

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 51018/2017
(22) Anmeldetag: 07.12.2017
(43) Veröffentlicht am: 15.06.2019

(51) Int. Cl.: **G01N 29/02** (2006.01)
G01N 29/024 (2006.01)
G01N 29/032 (2006.01)
G01N 29/07 (2006.01)
G01N 29/11 (2006.01)
G01N 29/34 (2006.01)
G01N 29/36 (2006.01)
G01N 29/40 (2006.01)
G01N 29/44 (2006.01)
G01N 29/48 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 2716833 A1
US 5951163 A
WO 03089214 A2

(71) Patentanmelder:
Johannes Kepler Universität Linz
4040 Linz (AT)

(72) Erfinder:
Praher Bernhard Dipl.Ing. Dr.
4020 Linz (AT)
Straka Klaus Dipl.Ing.
4614 Marchtrenk (AT)

(74) Vertreter:
Schneider Sebastian C. Dr.
4020 Linz (AT)

(54) **PROZESSÜBERWACHUNG BEI DER HERSTELLUNG VON SPRITZGUSSFORMTEILEN**

(57) Im Folgenden wird ein Messsystem zur Überwachung eines Gießprozesses beschrieben. Gemäß einem Ausführungsbeispiel weist das Messsystem einen Ultraschall-Transducer (8) auf, der dazu ausgebildet ist, Ultraschall-Pulse in ein Gusswerkzeug (7) einzukoppeln. Das Messsystem weist weiter eine mit dem Ultraschall-Transducer (8) gekoppelte Sensorschaltung (22) auf, die dazu ausgebildet ist, zur Erzeugung der Ultraschall-Pulse den Ultraschall-Transducer (8) mit einem Ansteuersignal, das eine Sequenz von Pulsen aufweist, anzusteuern und ein von dem Ultraschall-Transducer (8) (oder einem weiteren Ultraschall-Transducer) bereitgestelltes Empfangssignal ($u(t)$), das im Gusswerkzeug reflektierte Ultraschall-Pulse repräsentiert, zu verarbeiten. Das Empfangssignal ($u(t)$) weist eine mit dem Ansteuersignal korrespondierende Sequenz von Pulsen auf, die jeweils aus einem Hauptpuls und Nachschwingen umfassen. Die Verarbeitung des Empfangssignals ($u(t)$) beinhaltet unter anderem – für jeden Puls des Empfangssignals ($u(t)$) – das Erzeugen eines ersten Messwertes ($U_H(t)$), der die Amplitude des Hauptpulses repräsentiert, und eines zweiten Messwertes ($U_N(t)$), der die Amplitude des Nachschwingens repräsentiert.

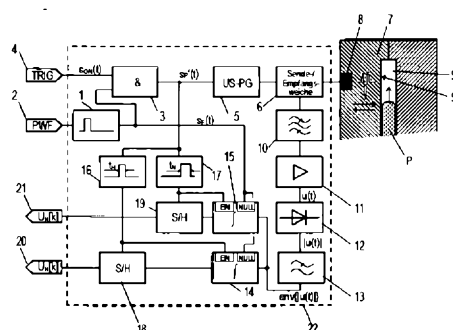


Fig. 3

ZUSAMMENFASSUNG / ABSTRACT

Im Folgenden wird ein Messsystem zur Überwachung eines Gießprozesses beschrieben. Gemäß einem Ausführungsbeispiel weist das Messsystem einen Ultraschall-Transducer auf, der dazu ausgebildet ist, Ultraschall-Pulse in ein Gusswerkzeug einzukoppeln. Das Messsystem weist weiter eine mit dem Ultraschall-Transducer gekoppelte Sensorschaltung auf, die dazu ausgebildet ist, zur Erzeugung der Ultraschall-Pulse den Ultraschall-Transducer mit einem Ansteuersignal, das eine Sequenz von Pulsen aufweist, anzusteuern und ein von dem Ultraschall-Transducer (oder einem weiteren Ultraschall-Transducer) bereitgestelltes Empfangssignal, das im Gusswerkzeug reflektierte Ultraschall-Pulse repräsentiert, zu verarbeiten. Das Empfangssignal weist eine mit dem Ansteuersignal korrespondierende Sequenz von Pulsen auf, die jeweils aus einem Hauptpuls und Nachschwingen umfassen. Die Verarbeitung des Empfangssignals beinhaltet unter anderem – für jeden Puls des Empfangssignals – das Erzeugen eines ersten Messwertes, der die Amplitude des Hauptpulses repräsentiert, und eines zweiten Messwertes, der die Amplitude des Nachschwingens repräsentiert.

PROZESSÜBERWACHUNG BEI DER HERSTELLUNG VON SPRITZGUSSFORMTEILEN

TECHNISCHES GEBIET

[0001] Die vorliegende Beschreibung betrifft die Überwachung eines Spritzgussprozesses mittels eines Ultraschallsensors.

HINTERGRUND

[0002] Spritzgießen ist einer der wichtigsten Herstellungsprozesse in der Kunststoffverarbeitung. Immer höher werdende Qualitätsanforderungen an die gefertigten Bauteile bezüglich mechanischer und/oder optischer Eigenschaften, die Minimierung von Ausschuss (Stichwort „Nullfehlerproduktion“) sowie die selbstständige Optimierung (also die Verkürzung der Produktionszeiten bzw. der automatisierte Ausgleich sich veränderbarer äußerer Einflüsse) spielen in zunehmendem Maße eine Rolle, um geforderte Qualitätsanforderungen gerecht zu werden.

[0003] Eine sogenannte Formgebungseinheit besteht prinzipiell aus einer Spritzgießmaschine und dem Spritzgießwerkzeug. Während das Spritzgießwerkzeug mindestens eine Negativform – die sogenannte Kavität – des herzustellenden Formteils aufweist, verarbeitet die Spritzgießmaschine das meist granulatförmige Kunststoffgrundmaterial in eine fließfähige Schmelze und spritzt dieses Material unter hohen Drücken in das Werkzeug ein, wo es in der Kavität auskühlt (bzw. in Reaktion gebracht wird). In vielen Fällen kann aus dem Werkzeug das fertige Formteil herausgelöst (entformt) werden. Bei dem Spritzgießwerkzeug und der Spritzgießmaschine handelt es sich häufig um eine rein bauliche Einheit ohne jegliche Verbindung mittels Sensorik.

[0004] Falls auf eine Überwachung des Prozesses mittels Sensoren nicht verzichtet werden kann – sei es aus Gründen der nötigen/vorgeschriebenen Qualitätssicherung oder weil für die Steuerung des Spritzgießprozesses Sensordaten benötigt werden – haben sich am Markt sogenannte Forminnendrucksensoren und Formteilstempersensoren etabliert.

[0005] Für eine genaue Messung ist es jedoch in der Regel notwendig, dass der Sensorkopf das Kunststoffformteil berührt, wofür eine Bohrung in die Kavität hinein notwendig

ist. Um eine fehlerfreie Messung und Dichtheit der Kavität bei hohen Drücken zu garantieren, werden an die Bohrungen in das Werkzeug strenge Toleranzanforderungen gestellt, was entsprechende Kosten zur Folge hat. Der resultierende, am fertigen Formteil sichtbare Abdruck des Sensorkopfes ist für viele Anwendungen, bei denen eine Messung sinnvoll wäre – wie optischer Komponenten (z.B. Linsen, Autoscheinwerfergehäuse, etc.) – ein Ausschlussgrund.

[0006] Darüber hinaus dienen die Sensordaten von Forminnendrucksensoren üblicherweise der Prozessüberwachung, die im besten Fall mit den Produkteigenschaften des gefertigten Formteils korrelieren jedoch nicht müssen. Die standardmäßig eingesetzten Formteilmotorsensoren sind in der Regel nicht geeignet, die für die Produkteigenschaften wichtige Abkühlrate (Abkühlgeschwindigkeit) quantitativ zu bestimmen. Die hohen Drücke beim Spritzgießen erfordern eine massive Ummantelung des eigentlichen Sensorelementes (z.B. Thermoelemente), was große Ansprechzeiten im Sekundenbereich zur Folge hat. Der Sensorkopf steht auch in Berührung mit dem (temperierten) Werkzeug, was ebenfalls das Ergebnis der Temperaturmessung verfälschen kann.

[0007] Eine vielversprechende Möglichkeit zur gleichzeitigen Überwachung von Prozess- und Produkteigenschaften während des Spritzgießens besteht in der Verwendung von gepulsten Ultraschall-Sensorsystemen. In einer Vielzahl von Publikationen (z.B. DE 197 37 276 C2, DE 198 34 797 C2, EP 2 657 801 A2, DE 20 2012 008 359 U1) wird die Messung der Schallgeschwindigkeit- und der Schalldämpfung in einer Reflexionsanordnung (d.h. Ultraschallsender = Ultraschallempfänger) oder einer Transmissionsanordnung beschrieben. Die direkte Kopplung viskoelastischer bzw. thermodynamischer Eigenschaften mit der Schalldämpfung bzw. Schallgeschwindigkeit ermöglicht theoretisch eine Vielzahl von Rückschlüssen auf den Prozess- und Materialzustand während des Spritzgießens. Als problematisch kann die starke Dämpfung des Ultraschalls in Kunststoffschmelzen gesehen werden; die Dämpfung kann die Ermittlung akustischer Kenngrößen erschweren bzw. verunmöglichen, beispielsweise bei größeren Wandstärken sowie bei Vorhandensein von Füllstoffen (z.B. Glasfasern, Talk, etc.) in der Kunststoffschmelze. Daher hat diese Art der Ultraschallmessung beim Spritzgießen auch keine relevante Verbreitung in der industriellen Praxis gefunden.

[0008] In der Publikationen US 7,017,412 B2 wird beschrieben, die oben angeführten Probleme gepulster Ultraschallsysteme durch ein kontinuierlich arbeitendes Ultraschallsys-

tem zu umgehen. Die Ergebnisse sind hier jedoch immer stark abhängig von den örtlichen Gegebenheiten (z.B. Abstand zur Kavität, Kavitätendicke, Ankopplungseffizienz, individuelle Sensorcharakteristik, etc.), und für jede Einbausituation und Werkzeugtemperatur muss eine Resonanzfrequenz am System bestimmt werden, was ein derartiges System wenig effizient für die industrielle Praxis macht. In der Publikation US 5,951,163 wird erstmals qualitativ über die Möglichkeit der Verwendung einfacher Reflexionsmessungen zur Fließfrontdetektion berichtet, wobei eine quantitative Auswertemethodik sowie Vorschläge zu Kalibrierung des Systems, um Sensoralterungseffekte und Abnahme der Ankopplungseffizienz zu berücksichtigen fehlen, was allerdings für dauerhafte Messungen in der industriellen Praxis unabdingbar ist.

[0009] Die Erfinder haben sich die Aufgabe gestellt, die Signalverarbeitung/-auswertung bei gepulsten Ultraschall Reflexionsmessungen in Spritzgießwerkzeugen zu verbessern, sodass diese für eine größere Anzahl von Kunststoffen (mit oder ohne Füllstoffen) und Formteilwandstärken zur Prozessführung- und Produktüberwachung verwendet werden können und des weiteren Sensoralterungseffekte und Änderung der Ankopplungseffizienz des Sensors an das Werkzeug durch geeignete Signalnormierung kompensiert werden können.

ZUSAMMENFASSUNG

[0010] Die oben genannte Aufgabe wird durch das Messsystem gemäß Anspruch 1 oder das Verfahren gemäß Anspruch 6 gelöst. Verschiedene Ausführungsbeispiele und Weiterentwicklungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche

[0011] Im Folgenden wird ein Messsystem zur Überwachung eines Gießprozesses beschrieben. Gemäß einem Ausführungsbeispiel weist das Messsystem einen Ultraschall-Transducer auf, der dazu ausgebildet ist, Ultraschall-Pulse in ein Gusswerkzeug einzukoppeln. Das Messsystem weist weiter eine mit dem Ultraschall-Transducer gekoppelte Sensorschaltung auf, die dazu ausgebildet ist, zur Erzeugung der Ultraschall-Pulse den Ultraschall-Transducer mit einem Ansteuersignal, das eine Sequenz von Pulsen aufweist, anzusteuern und ein von dem Ultraschall-Transducer (oder einem weiteren Ultraschall-Transducer) bereitgestelltes Empfangssignal, das im Gusswerkzeug reflektierte Ultraschall-Pulse repräsentiert, zu verarbeiten. Das Empfangssignal weist eine mit dem Ansteuersignal korrespondierende Sequenz von Pulsen auf, die jeweils aus einen Hauptpuls und

Nachschwingen umfassen. Die Verarbeitung des Empfangssignals beinhaltet unter anderem – für jeden Puls des Empfangssignals – das Erzeugen eines ersten Messwertes, der die Amplitude des Hauptpulses repräsentiert, und eines zweiten Messwertes, der die Amplitude des Nachschwingens repräsentiert.

[0012] Ein weiteres Ausführungsbeispiel betrifft ein Verfahren, das folgendes aufweist: das Einkoppeln einer Sequenz von Ultraschall-Pulsen in ein Gusswerkzeug; das Empfangen einer korrespondierenden Sequenz von reflektierten Ultraschall-Pulsen und Erzeugen eines Empfangssignals, das eine korrespondierende Sequenz von Pulsen aufweist, die jeweils einen Hauptpuls und ein Nachschwingen aufweisen. Für jeden Puls des Empfangssignals wird ein erster Messwert und ein zweiter Messwert erzeugt, die jeweils die Amplitude der Hauptpulses bzw. die die Amplitude des Nachschwingens repräsentieren.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0013] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele anhand von Abbildungen näher erläutert. Die Darstellungen sind nicht zwangsläufig maßstabsgetreu und die Ausführungsbeispiele sind nicht nur auf die dargestellten Aspekte beschränkt. Vielmehr wird darauf Wert gelegt, die den Ausführungsbeispielen zugrundeliegenden Prinzipien darzustellen. In den Abbildungen zeigt:

[0014] Figur 1 enthält Zeitdiagramme zur Illustration von Ultraschallpulssignalen und deren Hüllkurve.

[0015] Figur 2A ist ein Zeitdiagramm zur Illustration eines von einem Ultraschallempfänger empfangenen Ultraschallpulses, der an der Wand einer Kavität eines Spritzgusswerkzeugs reflektiert wurde.

[0016] Figur 2B illustriert die Entstehung von Interferenzen durch Mehrfachreflexion in der Wandschicht des abkühlenden Kunststoffformteils.

[0017] Figur 3 ist ein Blockdiagramm zur Illustration eines Beispiels einer Schaltung zur Signalverarbeitung und Signalauswertung eines reflektierten Ultraschallpulses.

[0018] Figur 4 enthält Zeitdiagramme zur Illustration der resultierenden Messsignale im Verlauf eines Spritzgießvorganges.

[0019] Figur 5 illustriert den messbaren Einfluss der Temperatur des Spritzgießwerkzeugs auf das Wachstum der Randschicht des abkühlenden Kunststoffformteils.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

[0020] Bevor auf die Abbildungen näher eingegangen wird, werden zunächst einige allgemeine Aspekte der hier beschriebenen Ausführungsbeispiele erläutert. Gemäß den hier beschriebenen Ausführungsbeispielen werden mittels eines Ultraschall-Transducers wiederholt kurze Ultraschallpulse erzeugt und in Richtung der Kavität des Spritzgusswerkzeugs ausgesendet. Der Ultraschall-Transducer kann im Spritzgusswerkzeug oder an dessen Oberfläche angeordnet sein. Das Spritzgusswerkzeug besteht üblicherweise aus Metall, z.B. Stahl. Vor dem Einspritzen der Kunststoffschmelze befindet sich in der Kavität Luft. Aufgrund der sehr hohen Dichteunterschiede zwischen Metall und Luft wird an der Metall/Luft-Grenzschicht (d.h. an der Innenwand der luftgefüllten Kavität) die Schallenergie nahezu vollständig reflektiert. Das reflektierte Signal kann von demselben Ultraschall-Transducer empfangen und in elektrisches Signal umgewandelt werden. Dieses Signal kann nun von einer Signalverarbeitungseinheit weiterverarbeitet und ausgewertet werden. Gemäß den hier beschriebenen Beispielen wird z.B. ein Messwert ermittelt, der die Amplitude des reflektierten Signals (ein sogenannter Puls oder *Burst*) repräsentiert. Für eine luftgefüllte Kavität (vor dem Einspritzen der Kunststoffschmelze) kann dieser Messwert als Referenzwert herangezogen werden; weitere Messungen während eines Spritzgießvorgangs werden mit diesem Referenzwert normiert (skaliert). Dadurch können Alterungseffekte des Ultraschall-Transducers und der Ankopplungsmedien, Temperaturunterschiede im Werkzeugstahl und andere mögliche Effekte eliminiert werden, was einen Vergleich von Messwerten über lange Zeiträume ermöglicht.

[0021] Während des Spritzgießvorganges wird Kunststoffschmelze in die Kavität des Werkzeugs unter Druck eingespritzt, wodurch der Kunststoff sukzessive die Luft aus dem Werkzeug verdrängt und die Kavität ausfüllt. Sobald die Kunststoffschmelze während dieses Vorgangs jene Position erreicht, an welcher der Ultraschall-Puls reflektiert wird, kann eine Verringerung des erwähnten Messwertes, der die Amplitude des reflektierten Signals repräsentiert, beobachtet werden, da ein Teil der Schallenergie nun durch die Grenzschicht Metall/Kunststoff (d.h. durch die nun mit Kunststoff bedeckte Innenwand der Kavität) in die Kunststoffschmelze hinein transmittiert wird. In der Praxis können rund 1 - 5 % der eingekoppelten Schallenergie in die Kunststoffschmelze hinein transmittiert werden.

[0022] Die oben erwähnte Normierung auf die gemessene Amplitude des reflektierten Signals bei luftgefüllter Kavität entspricht im Wesentlichen der Berechnung des Reflexionskoeffizienten R an der Innenwand der Kavität, der angibt, wieviel Prozent der eingekoppelten akustischen Energie an einer Grenzfläche reflektiert wird. Da dieser Reflexionskoeffizient R bei einer Metall/Luft-Grenzschicht praktisch 1 (100%) ist, kann er sehr einfach ermittelt werden, indem die Messwerte für die Amplituden des reflektierten Signals ausgedrückt werden als Vielfaches des erwähnten Referenzwertes, der die Amplitude des reflektierten Signals bei luftgefüllter Kavität repräsentiert. Ein normierter Messwert von 1 entspricht also einem Reflexionsfaktor von 100% und weist auf eine Luftgefüllte Kavität hin. Ein normierter Messwert kleiner 1 (z.B. zwischen 0,95 und 1) weist auf eine kunststoffgefüllte Kavität hin. Mithilfe des Reflexionskoeffizienten R und dessen Veränderung können Rückschlüsse auf die Dichte des Kunststoffes während des Spritzgießprozesses gemacht werden. Ultraschall-Transducer können an mehreren Stellen eines Spritzgusswerkzeugs angeordnet sein, was Messungen an unterschiedlichen Positionen der Kavität ermöglicht. In derartigen Anwendungen können die Ultraschall-Messungen z.B. zur Detektion der Fließfront der Kunststoffschmelze verwendet werden.

[0023] Neben der Detektion der Fließfront der Kunststoffschmelze in der Kavität kann durch eine geeignete Signalverarbeitung auch der Zeitpunkt der vollständigen Füllung der Kavität mit Kunststoffschmelze bestimmt werden. Ist die Kavität vollständig mit Kunststoffschmelze gefüllt führt ein Druckanstieg in der Kunststoffschmelze zu einem Dichteanstieg und somit zur weiteren Verringerung des Reflexionskoeffizienten. Der Zeitpunkt der vollständigen Füllung der Kavität ist beim Spritzgießen ein wichtiger Prozessparameter. Zu diesem Zeitpunkt wird üblicherweise von geschwindigkeitsgeregeltem Einspritzen der Kunststoffschmelze auf den sogenannten „Nachdruck“ umgeschaltet. Dabei wird üblicherweise ein (z.B. konstanter) Druck auf die Kunststoffschmelze in der Kavität ausgeübt, um eine Volumenkontraktion aufgrund der Abkühlung des Kunststoffes zu reduzieren. Die Ultraschall-Messungen können verwendet werden, um den Umschaltzeitpunkt zu steuern. Zu frühes Umschalten kann zu unvollständig gefüllten Kavitäten führen und zu spätes Umschalten zur Überfüllung und damit zur Gratbildung am fertigen Formteil an der Werkzeugtrennebene oder im ungünstigsten Fall zur Überspritzung des Werkzeuges, wodurch sich die Werkzeughälften an der Trennebenen während des Prozesses öffnen; dies kann zu schweren Beschädigungen am Werkzeug führen.

[0024] Mit Hilfe des hier beschriebenen Konzepts kann der optimale Umschaltzeitpunkt mit Hilfe des Ultraschall-Messsystem detektiert werden, und z.B. durch Aussenden eines Trigger-Signals an die Spritzgießmaschine signalisiert werden. Gemäß einem Ausführungsbeispiel kann der erwähnte Umschaltzeitpunkt detektiert werden, indem detektiert wird, dass der normierte Messwert für die Signalamplitude des reflektierten Signals einen Schwellenwert unterschreitet.

[0025] Die durch das Messsystem ermittelten Messwerte für die Amplitude der reflektierten Signale (Ultraschall-Pulse) können auch dazu verwendet werden, um die Homogenität der Kunststoffschmelze hinsichtlich unerwünschter Gaseinschlüsse oder unaufgeschmolzenem Kunststoffgranulat zu beurteilen. Diese beiden Fehler werden vor allem durch feuchtes Kunststoff-Grundmaterial (Granulat) oder durch Fehler bei der Plastifizierung des Grundmaterials verursacht und führen zu gravierenden optischen und/oder mechanischen Fehler im produzierten Kunststoffformteil. Gaseinschlüsse haben eine Erhöhung des Reflexionskoeffizienten (wegen Dichteabnahme im Vergleich zur Kunststoffschmelze) zur Folge und führen im reflektierten Signal zur Zunahme der Amplitude. Umgekehrt führt unaufgeschmolzenes Granulat zur Verringerung des Reflexionskoeffizienten (wegen Dichtezunahme im Vergleich zur Kunststoffschmelze).

[0026] Eine weitere detektierbare Größe ist der Zeitpunkt des Abschwindens des Formteils von der Kavitätenwand. Die zunehmende Abkühlung des Formteils erlaubt ab einen gewissen Zeitpunkt keinen weiteren Transport von Kunststoffschmelze in das auskühlende Formteil durch den angelegten Nachdruck. Dadurch kann die Volumenkontraktion durch die Abkühlung nicht mehr ausgeglichen werden und das Formteil schrumpft und löst sich von der Innenwand der Kavität ab. Dieser Zeitpunkt ist deshalb von Bedeutung, da sich durch die bildende Luftschicht zwischen Kavitätenwand und Formteil die Kühlwirkung auf das Formteil drastisch verschlechtert und ein weiteres Verweilen in der Kavität gegebenenfalls die Zykluszeit unnötig verlängert. Der Zeitpunkt des Abschwindens ist durch eine sprunghafte Zunahme des die Amplitude des reflektierten Signals repräsentierenden Messwerts detektierbar.

[0027] Eine zusätzliche Information, die mit Hilfe des hier beschriebenen Konzepts bestimmt werden kann, sind die Dicke und die Wachstumsgeschwindigkeit der abkühlenden Randschicht des Formteils in der Kavität. Im Inneren des Kunststoffs kommt es in der Nähe der Kavitätenwand zu einer weiteren Reflexion des Ultraschallsignals an der Grenz-

schicht zwischen erstarrtem Kunststoff und Kunststoffschmelze. Diese weitere Reflexion kann sich einem Teil der Hauptreflexion (die an der Kavitätenwand stattfindet) konstruktiv oder dekonstruktiv überlagern, wodurch bei Auswertung der Messwerte für die Signalamplituden Interferenzen beobachtet werden können. Diese Interferenzen geben Auskunft über die Wachstumsgeschwindigkeit der bereits erstarrten Randschicht des Formteils in der Kavität. Eine Änderung der Wachstumsgeschwindigkeit im Formteil kann Hinweise auf eine Störung der Werkzeugkühlung geben (siehe auch Fig. 5). Durch das hier beschriebene Konzept der Überwachung eines Gießprozesses können Abweichungen von einem Sollverlauf beim Randschichtwachstum der erstarrenden Schmelze detektiert werden. Derartige Abweichungen können wie beschrieben auf Inhomogenitäten (z.B. Blasen, unvollständig geschmolzenes Kunststoffgranulat, etc.) in der Schmelze oder auf eine fehlerhafte Kühlung des Gusswerkzeugs hindeuten.

[0028] Die Zeitdiagramme in Fig. 1 dienen zur Illustration eines Ultraschallpulses und eines Beispiels der Messung der Signalamplitude. Das Diagramm (a) in Fig. 1 zeigt einen Ultraschallpuls, genau genommen den Signalverlauf (d.h. den Momentanwert des Signals abhängig von der Zeit) eines elektrischen Signals $A(t)$, das von einem Ultraschall-Transducer in ein akustisches Signal umgewandelt und abgestrahlt wird oder das von dem Ultraschall-Transducer empfangen und durch Umwandlung des empfangenen (reflektierten) akustischen Signals erzeugt wird. Ein gepulstes Ultraschallsignalsignal besteht in der Regel aus einer Sequenz von Pulsen. Aufgrund der begrenzten Bandbreite realer Ultraschall-Transducer hat ein Puls in der Regel den Signalverlauf eines Burst-Signals (kurz: *Burst*), d.h. ein Puls umfasst einige wenige Schwingungen mit einer rasch ansteigenden und dann wieder abfallenden Amplitude, wobei die Frequenz der Schwingung z.B. der Resonanzfrequenz des Transducers entspricht. In Fig. 1 ist die maximale Amplitude (ca. in der Mitte eines Pulses) mit A_P bezeichnet.

[0029] Der erwähnte Reflexionskoeffizient R kann (bei Vernachlässigung der Dämpfung der Schallwelle) als Quotient A_R/A_T der Amplitude A_T eines emittierten Ultraschall-Pulses und der Amplitude A_R des korrespondierenden reflektierten Ultraschallpulses definiert werden. Berücksichtigt man die Dämpfung, ist R gleich $(A_R/A_T) \cdot e^{-2L \cdot \alpha}$ ($\alpha > 0$), wobei L der Abstand zwischen Ultraschall-Transducer 8 und der reflektierenden Kavitätenwand ist und α einen Dämpfungskoeffizienten repräsentiert (siehe auch Fig. 2B). Da wie in Fig. 1 dargestellt die Amplitude eines Ultraschall-Pulses $A(t)$ nicht konstant ist kann statt der Amplitude auch die maximale Amplitude A_P für die Bestimmung des Reflexionskoeffizienten ver-

wendet werden. Eine Möglichkeit der messtechnischen Bestimmung der maximalen Amplitude A_P eines Burstsignals besteht darin, das Signal zuerst gleichzurichten und dann einer Tiefpassfilterung zu unterziehen. Das gleichgerichtete Signal $|A(t)|$ ist in Diagramm (b) der Fig. 1 dargestellt und das gefilterte gleichgerichtete Signal in Diagramm (c) der Fig. 1. Dieses gefilterte gleichgerichtete Signal repräsentiert auch die Hüllkurve (*envelope*) des Ultraschall-Pulses und wird hier mit $\text{env}\{|A(t)|\}$ bezeichnet. Die Amplitude der Hüllkurve entspricht der maximalen Amplitude A_P des Ultraschall-Pulses $A(t)$, d.h.

$A_P = \max\{\text{env}\{|A(t)|\}\}$. Die Amplitude der Hüllkurve kann also als Messwert für die Amplitude des Ultraschall-Pulses $A(t)$ verwendet werden (und folglich auch für die Bestimmung des Reflexionskoeffizienten).

[0030] Alternativ kann auch die schraffierte Fläche unter der Hüllkurve $\text{env}\{|A(t)|\}$ als Messwert für die Amplitude verwendet werden. Da die Pulsdauer t_P im Wesentlichen konstant und durch die Eigenschaften (u.a. die Bandbreite) des Transducers gegeben ist, ist die Fläche näherungsweise proportional zur maximalen Amplitude A_P . Diese Fläche kann auch als Messwert für die Signalenergie (genau genommen für die Quadratwurzel der Signalenergie) des Ultraschall-Pulses $A(t)$ interpretiert werden. Ein Messwert für die Amplitude des Ultraschall-Pulses $A(t)$ kann demnach ermittelt werden, indem das Hüllkurvensignal $\text{env}\{|A(t)|\}$ über die Pulsdauer t_P integriert wird. Statt der Gleichrichtung (Diagramm (b) aus Fig. 1) könnte alternative das Signal $A(t)$ auch quadriert werden. In diesem Fall würde der erhaltene Messwert proportional zum Amplitudenquadrat A_P^2 der Hüllkurve (d.h. der Signalenergie) sein, was nichtsdestotrotz ein geeigneter Messwert für die Amplitude des Ultraschall-Pulses $A(t)$ ist.

[0031] Fig. 2A zeigt einen realistischeren Signalverlauf eines von einem Ultraschall-Transducer erzeugten elektrischen Signals $u(t)$ (z.B. eine elektrische Spannung), das den Signalverlauf eines empfangenen Ultraschall-Pulses repräsentiert, der zuvor an der Kavitätswand eines Spritzgusswerkzeugs reflektiert wurde. Wie man in Fig. 2A sehen kann weist das Signal $u(t)$ (reflektierter Ultraschall-Puls) zwei voneinander unterscheidbare Abschnitte auf, einen ersten Abschnitt, der als „Hauptpuls“ (*main pulse*) bezeichnet wird und einen zweiten Abschnitt, der als „Nachschwingen“ (*ringing*) bezeichnet wird. Der Hauptpuls hat eine Pulslänge t_H , z.B. kann die Zeitdauer t_H einige wenige (z.B. die ersten drei) Halbwellen des Signals $u(t)$ umfassen. Das Nachschwingen hat seine Ursache in der endlichen Bandbreite des Ultraschall-Transducers und die Dauer des Nachschwingens ist mit t_N bezeichnet. Im Bereich dieser Nachschwingphase kommt es bei Mehrfachreflexionen in

der erstarrenden Randschicht des Formteils zu Interferenzen (siehe auch Fig. 2B). Das Ende des zweiten Abschnittes ist am Signalverlauf nicht klar zu erkennen, da das Nachschwingen langsam abklingt. Jedoch kann man beispielsweise das Ende des zweiten Abschnittes als jenen Zeitpunkt definieren, zu dem die Amplitude der Schwingung unter einen gewissen Schwellenwert gefallen ist (z.B. 10% der Maximalamplitude). Beispielsweise kann die Zeitdauer t_N eine bestimmte Anzahl z.B. zehn) von Halbwellen nach dem Hauptpuls umfassen. Die Zeiten t_H und t_N sind für einen bestimmten Messaufbau (Puls-generator, Ultraschall-Transducer, Geometrie des Werkzeugs und der Kavität, etc.) annähernd konstante Größen und sind daher bekannte Systemparameter.

[0032] Während des Spitzgießprozesses werden fortlaufend Ultraschall-Pulse erzeugt, an der Kavitätenwand reflektiert (Hauptpuls) und zum Transducer zurück reflektiert. Manche Prozessparameter beim Spritzgießen lassen sich an der Veränderung der Amplitude des Hauptpulses erkennen. Andere interessante Parameter können aus der Veränderung der Amplitude des Nachschwingens abgeleitet werden. Beispielsweise können durch die Auswertung des Hauptpulses folgende Prozessparameter detektiert werden: Zeitpunkt der Fließfrondetektion, Zeitpunkt der vollständigen Füllung der Kavität mit Kunststoffschmelze, Überprüfung/Detektion des Zeitpunkts des Beginns der Nachdruckphase, Dauer und Ende der Nachdruckphase, Zeitpunkt des Abschwindens des Formteils von der Kavitätenwand, Beurteilung der Homogenität und Dichte der Schmelze. Die Auswertung des Nachschwingens erlaubt die Überwachung der Randschicht der abkühlenden Kunststoffschmelze (Randschichtwachstumsgeschwindigkeit bzw. Randschichtstärke).

[0033] Fig. 2B illustriert die Entstehung der erwähnten Interferenzen in der Nachschwingphase eines Ultraschall-Pulses. Fig. 2B zeigt in einer Skizze den Ultraschall-Transducer 8, ein Werkzeug 7 mit einer Kavität 9, die mit Kunststoffschmelze P gefüllt ist. Beim Abkühlen/Erstarren des Kunststoffes bildet sich im Formteil eine von der Wand 9' der Kavität 9 ausgehende wachsende Randschicht P' aus. Das heißt, die Dicke d der Randschicht wächst während der Abkühlzeit. Wie in Fig. 2B skizziert wird ein Teil der Ultraschallleistung an der Wand 9' reflektiert. Der nicht reflektierte Teil dringt in die Randschicht R' ein und wird am anderen Ende der Randschicht (am Übergang fest/flüssig) zurückreflektiert. Der in der Randschicht reflektierte Teil des Schalls hat einen (um zwei Mal die Dicke d) längeren Weg als der Schall, der an der Kavitätenwand 9' reflektiert wird, was einem Laufzeitunterschied von Δt von $2d/c_p$ entspricht (c_p bezeichnet die Schallgeschwindigkeit in der Randschicht R'). Der Laufzeitunterschied Δt ist damit proportional

zur Dicke d der Randschicht R' und wird während des Abkühlens größer (da die Randschicht R' dicker wird). Im Gegensatz dazu bleibt die Laufzeit $2L/c_s$ in der Stahlwand 71 des Werkzeugs 7 konstant (c_s bezeichnet die Schallgeschwindigkeit in der Wand des Werkzeugs, L die Wandstärke). In der Praxis ist der Laufzeitunterschied Δt kürzer als die Dauer eines Ultraschall-Pulses, sodass der vom Transducer 8 empfangene Puls eine Überlagerung der beiden Reflexionen (an der Kavitätenwand 9' und in der Randschicht R') ist, wobei diese Überlagerung im Wesentlichen in der Nachschwingphase auftritt, die in Fig. 2B als Interferenzbereich I bezeichnet ist. Die Veränderung der Interferenzen und deren Bedeutung wird später unter Bezugnahme auf Fig. 4 und 5 besprochen.

[0034] Fig. 3 ist ein Blockdiagramm und zeigt exemplarisch eine mögliche Implementierung einer Sensorschaltung für die oben beschriebenen Ultraschallmessungen in einem Spritzgießwerkzeug. Es versteht sich, dass es viele andere Möglichkeiten gibt, die gleiche oder eine gleichwertige Funktion schaltungstechnisch zu implementieren. Im Hinblick auf die obigen und die folgenden Erläuterungen wird ein Fachmann problemlos in der Lage sein, die dargestellte oder andere geeignete Implementierungen zu realisieren.

[0035] Gemäß dem in Fig. 3 dargestellten Beispiel ist ein Ultraschall-Transducer 8 in einem Spritzgießwerkzeug 7 oder außen an dessen Oberfläche angeordnet. In Fig. 3 auch dargestellt ist ein Ultraschallpuls, der vom Transducer 8 durch das Spritzgießwerkzeug 7 hin zu einer im Werkzeug 7 angeordneten Kavität 9 läuft, (zumindest) an der Wand 9' der Kavität 9 reflektiert wird, zurück zum Transducer 8 läuft und von diesem wieder empfangen wird. Während des Spritzgießprozesses wird Kunststoffschmelze P in das Werkzeug eingepresst. Fig. 3 zeigt die Fließfront der Kunststoffschmelze P in der Kavität 9 und die Fließrichtung.

[0036] Der Ultraschall-Transducer 8 dient sowohl als Sender als auch als Empfänger. Die mit dem Transducer 8 gekoppelte Sensorschaltung 22 kann folglich als Ultraschall-Transceiver (Sende-Empfänger) angesehen werden. Die Sensorschaltung 22 weist also einen Sendepfad und einen Empfangspfad auf. Der Sendepfad umfasst einen Oszillator 1, der ein Signal $s_p(t)$ mit Pulsen definierter Pulsdauer und einstellbarer Pulswiederholfrequenz PWF erzeugt. Beispielsweise kann der Oszillator 1 ein astabiler Multivibrator (Relaxationsoszillator) sein. Andere Möglichkeiten der Signalerzeugung sind ebenfalls einsetzbar. Die Pulswiederholfrequenz PWF ist über ein am Eingang 2 empfangenes Signal einstellbar. Der Oszillator 1 kann über ein Triggersignal $son(t)$, welches von der Steuerung

der Spritzgießmaschine kommen kann aktiviert oder deaktiviert. Es existieren viele Möglichkeiten, diese Aktivierung bzw. Deaktivierung zu implementieren. Im dargestellten Beispiel zeigt das von der Spritzgießmaschine Am Eingang 4 empfangene Triggersignal $s_{ON}(t)$ über einen bestimmten Logikpegel (z.B. High-Pegel) an, dass der Oszillator aktiv sein soll. Dazu werden das Oszillatorsignal $s_P(t)$ und das Triggersignal $s_{ON}(t)$ einem UND-Gatter 3 zugeführt, welches für das Oszillatorsignal $s_P(t)$ transparent ist, solange das Triggersignal $s_{ON}(t)$ einen High-Pegel aufweist. Wechselt der Pegel des Triggersignals $s_{ON}(t)$ auf einen Low-Pegel, wird das Oszillatorsignal $s_P(t)$ durch das UND-Gatter 3 ausgetastet und der Signalpegel am Ausgang des UND-Gatters 3 ist annähernd null (Low-Pegel). Als Triggersignal $s_{ON}(t)$ kann z.B. ein Signal verwendet werden, das anzeigt, ob das Werkzeug 7 der Spritzgussvorrichtung geschlossen ist.

[0037] Der Ausgangssignal $s_P'(t)$ des UND-Gatters 3 (entspricht dem Oszillatorsignal $s_P(t)$ falls der Oszillator aktiv ist) ist einem Trigger-Eingang eines Hochspannungspulsgenerator 5 zugeführt. Der Hochspannungspulsgenerator 5 ist dazu ausgebildet, als Reaktion auf einen am Trigger-Eingang empfangenen Puls einen Hochspannungspuls (d.h. ein *Burst-Signal*) definierter Pulsdauer (z.B. einige wenige Mikrosekunden) zu erzeugen. Solange der Oszillator 1 aktiv ist (d.h. das UND-Gatter 3 das Oszillatorsignal $s_P(t)$ nicht ausgetastet), erzeugt der Hochspannungspulsgenerator 5 also Hochspannungspulse mit der Pulswiederholfrequenz PWF.

[0038] Die vom Hochspannungspulsgenerator 5 erzeugte Sequenz von Hochspannungspulsen ist über eine Sende-Empfangsweiche 6 dem Ultraschall-Transducer 8 zugeführt, der dazu ausgebildet ist, korrespondierende akustische Ultraschall-Pulse auszusenden, d.h. in das Werkzeug 7 hinein zu emittieren. Der Ultraschall-Transducer 8 konvertiert das elektrische (Burst-) Signal in ein akustisches Signal. Die Sende-Empfangsweiche 6 ist dazu ausgebildet, ein Einkoppeln von Hochspannungssignalanteilen in den Empfangspfad zu verhindern. Derartige Sende-Empfangsweichen sind an sich bekannt und werden daher hier nicht näher erläutert. Der vom Transducer 8 abgestrahlte akustische Ultraschall-Puls läuft durch das Material (z.B. Stahl) des Werkzeugs 7 hin zur Kavität 9, wird dort an der Kavitätswand 9 reflektiert und läuft zurück zum Ultraschall-Transducer 8, der den reflektierten akustischen Ultraschall-Puls wieder in ein elektrisches Signal konvertiert. Das empfangene elektrische Signal wird über die Sende-Empfangsweiche 6 einem analogen Filter zugeführt, beispielsweise einem Bandpass 10, um unerwünschte Frequenzanteile zu unterdrücken, und verstärkt (siehe Verstärker 11). Im dargestellten Beispiel ist das bandpassgefil-

terte und verstärkte Signal mit $u(t)$ bezeichnet; ein exemplarischer Signalverlauf des Signals $u(t)$ wurde z.B. in Fig. 2A bereits dargestellt. Diesbezüglich wird auch auf die obigen Erläuterungen verwiesen. Auch das empfangene (gefilterte und verstärkte) Signal $u(t)$ beinhaltet eine Sequenz von Pulsen mit der Pulswiderholfrequenz PWF, wobei in den Fig. 2A und 2B nur ein Puls dargestellt wurde.

[0039] Wie weiter oben erläutert, gibt es verschiedene Möglichkeiten, einen Messwert zu ermitteln, der die Amplitude eines Pulses im empfangenen Signal $u(t)$ repräsentiert. Im vorliegenden Beispiel wird die Fläche unter der Hüllkurve des Pulses mittels Integration ermittelt, wobei der Hauptpuls und das Nachschwingen (vgl. Fig. 2A) separat ausgewertet werden. Wie erwähnt ist der Hauptpuls das erste empfangene Echo des ausgesendeten Ultraschall-Pulses der aufgrund seiner relativ hohen Amplitude keine messbaren Interferenzerscheinungen mit dem (sehr schwachen) Signal der Grenzschicht erstarrter Kunststoff/Schmelze aus dem Inneren des Formteils besitzt.

[0040] Für die Ermittlung der Hüllkurve wird das empfangene Signal $u(t)$ zunächst gleichgerichtet (siehe Fig. 3, Gleichrichter 12) und anschließend tiefpassgefiltert (siehe Fig. 3, Tiefpass 13). Die Wirkung der Gleichrichtung und Tiefpassfilterung wurde weiter oben unter Bezugnahme auf Fig. 1 erläutert und wird hier deshalb nicht wiederholt. Das resultierende Hüllkurvensignal $\text{env}\{|u(t)|\}$ wird einem ersten Integrator 14 und einem zweiten Integrator 15 zugeführt, die regelmäßig am Beginn eines Pulses zurückgesetzt werden. Beispielsweise kann das Oszillatorsignal $s_P(t)$ (alternativ auch $s_P'(t)$) einem Reset-Eingang der Integratoren 14, 15 zugeführt sein. Die Zeitfenster der Integration werden durch die Pulsgeneratoren 16 und 17 vorgegeben, die beispielsweise jeweils eine monostabile Kippstufe und ein Verzögerungselement beinhalten können. Die Pulsgeneratoren 16 und 17 sind dazu ausgebildet, als Reaktion auf den Empfang eines Pulses des Oszillatorsignals $s_P'(z)$ einen Puls mit definierter Länge und definierter Verzögerung (relativ zum Oszillatorsignal) zu erzeugen. Diese Pulse zeigen die Integrationszeitfenster an und können z.B. *Enable*-Eingängen der Integratoren 14, 15 zugeführt sein.

[0041] Die Länge und die zeitliche Lage (relativ zum Oszillatorsignal) der von den Pulsgeneratoren 16 und 17 erzeugten Pulse definieren die Integrationszeitfenster für die Integratoren 14 und 15. Für den ersten Integrator 14 ist die Länge des Zeitfensters t_H und für den zweiten Integrator 15 ist die Länge des Zeitfensters t_N . Diese Zeitfenster sind auch in Fig. 2A dargestellt und entsprechen der Länge des Hauptpulses und des Nachschwingens. Die

Länge und die zeitliche Lage der Zeitfensters t_H und t_N hängen von der Laufzeit des akustischen Signals sowie von der Frequenz und der Bandbreite des Ultraschall-Transducers 8 ab und sind damit bekannte Systemparameter. Am Ende der Integrationszeitfenster t_H und t_N wird das Ausgangssignal des zugehörigen Integrators 14 bzw. 15 mittels den Sample & Hold-Schaltungen 18 bzw. 19 abgetastet. Die resultierenden zeitdiskreten Ausgangssignale der Sample & Hold-Schaltungen 18 bzw. 19 werden mit $u_H[k]$ bzw. $u_N[k]$ bezeichnet, wobei k ein Zeitindex ist. Die Abtastrate entspricht der Pulswiederholfrequenz PWF. Die Zeitdiskreten Ausgangssignale $u_H[k]$ bzw. $u_N[k]$ können an den Ausgängen 20 bzw. 21 ausgegeben und z.B. digitalisiert und mittels eines Prozessors (nicht dargestellt) weiterverarbeitet werden. Alternativ ist auch eine analoge (quasikontinuierliche) Signalverarbeitung möglich.

[0042] Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Sensorschaltung 22 als eine Baugruppe ausgeführt, mit einem Anschluss für den Ultraschall-Transducer 8, einem Eingang 4 für das Triggersignal $s_{ON}(t)$ von der Spritzgussmaschine, einem Eingang 2 für die Wahl der Pulswiederholfrequenz und zwei Ausgängen 20 und 21 für die Ausgangssignale $u_H[k]$ bzw. $u_N[k]$, welche jeweils die Fläche unter der Hüllkurve des Hauptpulses bzw. des Nachschwingens repräsentieren. Diese Flächen können – wie eingangs unter Bezugnahme auf Fig. 1 erläutert – als Messwert für die (maximale) Amplitude des Hauptpulses bzw. des Nachschwingens herangezogen werden.

[0043] Die Zeitdiagramme aus Fig. 4 zeigen exemplarisch einen typischen Signalverlauf der (zeitdiskreten, bei hoher Pulswiederholfrequenz quasikontinuierlichen) Ausgangssignale $u_H[k]$ und $u_N[k]$, die den Verlauf der (maximalen) Amplitude der Hauptpulse und der zugehörigen Nachschwingphasen repräsentieren. Wie eingangs erwähnt wird durch die Normierung auf 100% erreicht, dass Alterungseffekte und eine variierende Ankopplungseffizienz des Ultraschall-Transducers keine nennenswerte Rolle spielen. Die in Fig. 4 dargestellten Signale $U_H[k]$ und $U_N[k]$ sind demnach bezogen auf die Messwerte für eine leere (luftgefüllte) Kavität (z.B. $U_H(t_k) = u_H[k]/u_H[0]$ und $U_N(t_k) = u_N[k]/u_N[0]$). Der Zeitpunkt $k=0$ (entspricht $t_0=0s$) repräsentiert den Start einer Messung bei geschlossener, noch mit Luft gefüllter Kavität vor dem Einspritzen von Kunststoffschmelze und der Zeitpunkt t_k entspricht dem Vielfachen des Kehrwertes des Pulswiederholfrequenz ($t_k=k \cdot PWF^{-1}$).

[0044] Da sich zum Zeitpunkt t_0 Luft in der Kavität befindet, wird praktisch 100% der Schallenergie an der Kavitätenwand 9' (vgl. Fig. 3) reflektiert. Das normierte Signal $U_H(t)$

kann daher auch als Reflexionskoeffizient R interpretiert werden. Erreicht während des Spritzgießprozesses die Fließfront der Kunststoffschmelze das „Sichtfeld“ des Ultraschall-Transducers 8, nehmen der Reflexionskoeffizient R und damit auch die (maximalen) Amplituden der reflektierten Hauptpulse (sowie die Amplituden des zugehörigen Nachschwingens) signifikant ab. Die Fließfront der Kunststoffschmelze P . (vgl. Fig. 3) kann z.B. dadurch detektiert werden, dass das Signal $U_H(t)$ während des Spritzgießprozesses überwacht und jener Zeitpunkt t_{FF} detektiert wird, an dem das normierte Signal $U_H(t)$ einen vorgebbaren Schwellenwert S_{FF} unterschreitet. Der Schwellenwert S_{FF} kann z.B. im Bereich von 98-99% liegen. Auf diese Weise ist eine schnelle und genaue Detektion der Fließfront möglich. Zusätzlich oder alternativ kann das Signal $U_N(t)$ für die Fließfrontdetektion herangezogen werden. Veränderungen des Messwertes $U_H(t)$ deuten auf Veränderungen des Reflexionskoeffizienten R hin und damit indirekt auch auf Dichteschwankungen in der Schmelze, die z.B. durch die erwähnten Inhomogenitäten verursacht werden können. Für die Prozessüberwachung könnte z.B. ein Ultraschall-Transducer so am Gusswerkzeugs platziert werden (z.B. kurz hinter dem Einspritzpunkt), dass die gesamte eingespritzte Schmelze das Messfeld („Sichtfeld“) des Sensors passieren muss. Kurze, sprunghafte Änderungen des Messwertes $U_H(t)$ (d.h. des Reflexionskoeffizienten) können auf Inhomogenitäten hinweisen.

[0045] Sobald die Kavität 9 vollständig mit Kunststoffschmelze P (vgl. Fig. 3) gefüllt ist, kommt es zu einer deutlichen Verdichtung des Kunststoffmaterials in der Kavität, und folglich nehmen der Reflexionskoeffizient R und damit auch die (maximalen) Amplituden der reflektierten Hauptpulse (sowie die Amplituden des zugehörigen Nachschwingens) weiter signifikant ab. Der zugehörige Zeitpunkt t_U der vollständigen Füllung der Kavität 9 kann ebenfalls mittels eines Schwellenwertes S_U detektiert werden, der kleiner ist als der Schwellenwert S_{FF} (z.B. liegt S_{FF} im Bereich von 95-97%). Der Zeitpunkt t_U wird demnach dadurch detektiert, dass das normierte Signal $U_H(t)$ unter den Schwellenwert S_U fällt. Dieser Zeitpunkt t_U kann dazu verwendet werden, die Nachdruckphase einzuleiten, in der von einer konstanten Einpressgeschwindigkeit der Kunststoffschmelze auf einen z.B. konstanten Druck umgeschaltet wird. In dieser Nachdruckphase beginnt der Formteil auszukühlen, und es bildet sich eine dicker werdende Randschicht aus, in der die Kunststoffschmelze erstarrt ist. Zusätzlich oder alternative kann das Signal $U_N(t)$ für die Detektion des Umschaltzeitpunktes t_U herangezogen werden.

[0046] Mit Anlegen des Nachdrucks beginnt im Formteil das Wachstum der Randschicht von der Oberfläche des Formteils ausgehend hinein ins Innere. Aufgrund dieser (wachsenden) Randschicht R' , kommt es zu einer Reflexion, die sich mit der Reflexion an der Kavitätenwand $9'$ überlagert (siehe Fig. 2B); diese Überlagerung (Interferenz) macht sich vor allem in der (maximalen) Amplitude des Nachschwingens – also im Signal $U_N(t)$ – bemerkbar. Diese Überlagerung (Interferenz) hat eine Art Schwebungssignal zur Folge, welches man nach dem Zeitpunkt t_U im Signal $U_N(t)$ erkennen kann.

[0047] Die Wirkung des Nachdrucks auf das Formteil lässt sich am Signal $U_H(t)$, welches die Amplituden der Hauptpulse repräsentiert, erkennen. Kurze Zeit nach dem Umschaltzeitpunkt t_U regelt die Spritzgießmaschine den Druck auf den (meist konstanten) eingestellten Nachdruck. Das der Zeitpunkt des Erreichens dieses Druckniveaus ist in dem Signal $U_H(t)$ erkennbar; die Amplitude steigt wieder geringfügig an. Der zugehörige Zeitpunkt ist in Fig. 4 mit $t_{N,start}$ bezeichnet. Die Dauer der Nachdruckphase wird üblicherweise vom Benutzer an der Spritzgießmaschine eingestellt. Tatsächlich kann sie nur solange wirken wie Kunststoffschmelze durch den flüssigen Kern des Formteils in das Formteil hinein nachgefördert werden kann. Der tatsächliche Zeitpunkt $t_{N,ende}$ an dem der Nachdruck nicht mehr wirkt kann aus dem Verlauf des Signals $U_H(t)$ abgelesen werden, da der Druckabfall zu einer Änderung der Dichte und somit sprunghaften Änderung der maximalen Amplituden der Hauptpulse führt. Die tatsächliche, auf das Formteil wirkende Nachdruckdauer ergibt sich aus der Differenz $t_N = t_{N,ende} - t_{N,start}$.

[0048] Beim Signal $U_N(t)$, das die maximalen Amplituden der Nachschwingphasen repräsentiert, ist die oben erwähnte Interferenz zu erkennen, die sich im Signal $U_N(t)$ als Oszillation manifestiert, welche mit dem Beginn der Nachdruckphase (ca. zum Zeitpunkt $t_{N,start}$) beginnt. Diese Oszillation ist wie erwähnt ein Resultat der sich überlagernden Reflexion an der Kavitätenwand $9'$ mit der Reflexion an der wachsenden Randschicht R' des Formteils (siehe Fig. 2B). In dieser Phase können im Signal $U_N(t)$ (z.B. mittels digitaler Signalverarbeitung) die Zeitpunkte $t_{MAX,1}$, $t_{MAX,2}$ der Maxima (zusätzlich oder alternativ auch der Minima) der Oszillation detektiert werden.

[0049] Die Zeitpunkte $t_{MAX,1}$, $t_{MAX,2}$ oder die Periodendauer der Oszillation Δt_{MAX} können während des Spritzgießprozesses überwacht (und ggf. gespeichert und dokumentiert) werden, um die Konstanz des Wachstums der Randschicht über mehrere Produktionszyklen zu überwachen. Die Periodendauer der Oszillation Δt_{MAX} kann als Messwert für die Wachs-

tumsgeschwindigkeit der Randschicht dienen. Aus diesem Messwert kann bei unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit im Kunststoff und der Frequenz der Ultraschalls die tatsächliche Wachstumsgeschwindigkeit näherungsweise berechnet werden.

[0050] Das Abkühlen des Formteils hat eine Volumenkontraktion zur Folge, die wiederum dazu führt, dass der Formteil schrumpft und sich von der Innenwand der Kavität ablöst („Abschwinden“). Der Zeitpunkt t_{AB} , zu dem sich das Formteil von der Werkzeuginnenwand ablöst, ist in beiden Signalen $U_H(t)$ und $U_N(t)$ deutlich erkennbar. Aufgrund des entstehenden Spalts zwischen Kavitätenwand ϑ' (siehe Fig. 3) und Formteil steigt der Reflexionsfaktor wieder auf annähernd 100% und die Signale steigen wieder auf ihre anfänglichen Werte.

[0051] Die exemplarischen Signalverläufe der normierten Ausgangssignale $U_H(t)$ und $U_N(t)$ machen deutlich, dass die hier beschriebenen Konzepte sowohl für die Überwachung als auch für die Steuerung eines Spritzgießprozesses verwendet werden können. In den hier beschriebenen Beispielen wird ein Ultraschall-Transducer verwendet, der sowohl als Sender als auch als Empfänger arbeitet. Stattdessen können als Sender und Empfänger auch zwei separate Transducer verwendet werden. In diesem Fall wird die Sende-/Empfangsweiche nicht benötigt. Schließlich sei noch angemerkt, dass die hier beschriebenen Konzepte nicht nur für die Überwachung und Steuerung eines (Kunststoff-) Spritzgießprozesses (*injection moulding*), sondern analog auch für die Überwachung und Steuerung eines (Metall-) Druckgießprozesses (*die casting*) oder anderer Gießprozesse verwendet werden kann.

PATENTANSPRÜCHE

1. Ein Messsystem zur Überwachung eines Gießprozesses, das folgendes aufweist:

einen Ultraschall-Transducer (8), der dazu ausgebildet ist, Ultraschall-Pulse in ein Gusswerkzeug (7) einzukoppeln;

eine mit dem Ultraschall-Transducer (8) gekoppelte Sensorschaltung (22), die dazu ausgebildet ist, zur Erzeugung der Ultraschall-Pulse den Ultraschall-Transducer (8) mit einem Ansteuersignal, das eine Sequenz von Pulsen aufweist, anzusteuern und ein von dem Ultraschall-Transducer (8) oder einem weiteren Ultraschall-Transducer bereitgestelltes Empfangssignal ($u(t)$), das im Gusswerkzeug (7) reflektierte Ultraschall-Pulse repräsentiert, zu verarbeiten,

wobei das Empfangssignal ($u(t)$) eine mit dem Ansteuersignal korrespondierende Sequenz von Pulsen aufweist, die jeweils einen Hauptpuls und ein Nachschwingen aufweisen, und

wobei die Verarbeitung des Empfangssignals ($u(t)$) folgendes umfasst:

Erzeugen – für jeden Puls des Empfangssignals ($u(t)$) – eines ersten Messwertes ($U_H(t)$), der die Amplitude der Hauptpulses repräsentiert, und eines zweiten Messwertes ($U_N(t)$), der die Amplitude des Nachschwingens repräsentiert.

2. Das Messsystem gemäß Anspruch 1,

wobei der erste Messwert ($U_H(t)$) jeweils auf der maximalen Amplitude des Hauptpulses und der zweiten Messwert ($U_N(t)$) jeweils auf der maximalen Amplitude des Nachschwingens basiert.

3. Das Messsystem gemäß Anspruch 1 oder 2,

wobei der erste Messwert ($U_H(t)$) jeweils auf der Fläche unter der Hüllkurve des Hauptpulses und der zweiten Messwert ($U_N(t)$) jeweils auf der Fläche unter der Hüllkurve des Nachschwingens basiert.

4. Das Messsystem gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3,

wobei das Erzeugen des ersten Messwerts ($U_H(t)$) die Integration der Hüllkurve des jeweiligen Pulses des Empfangssignals ($u(t)$) in einem ersten Zeitfenster (t_H) umfasst und

wobei das Erzeugen des zweiten Messwerts ($U_N(t)$) die Integration der Hüllkurve des jeweiligen Pulses des Empfangssignals ($u(t)$) in einem zweiten Zeitfenster (t_N) umfasst.

5. Das Messsystem gemäß Anspruch 4,

wobei das erste Zeitfenster (t_H) eine definierte erste Verzögerungszeit nach dem korrespondierenden Puls im Ansteuersignal beginnt, und

wobei das zweite Zeitfenster (t_N) eine definierte zweite Verzögerungszeit nach dem korrespondierenden Puls im Ansteuersignal beginnt.

6. Ein Verfahren, das folgendes aufweist:

Einkoppeln einer Sequenz von Ultraschall-Pulsen in ein Gusswerkzeug (7);

Empfangen einer Sequenz von reflektierten Ultraschall-Pulsen und Erzeugen eines Empfangssignals ($u(t)$) mit, das eine korrespondierende Sequenz von Pulsen aufweist, die jeweils einen Hauptpuls und ein Nachschwingen aufweisen;

Erzeugen – für jeden Puls des Empfangssignals ($u(t)$) – eines ersten Messwertes ($U_H(t)$), der die Amplitude der Hauptpulses repräsentiert; und

Erzeugen – für jeden Puls des Empfangssignals ($u(t)$) – eines zweiten Messwertes ($U_N(t)$), der die Amplitude des Nachschwingens repräsentiert.

7. Das Verfahren gemäß Anspruch 6,

wobei die ersten Messwerte ($U_H(t)$) und die zweiten Messwerte ($U_N(t)$) derart normiert, dass sie bei einem leeren Gusswerkzeug (7) einen vordefinierten Wert annehmen.

8. Das Verfahren gemäß Anspruch 6 oder 7,

wobei basierend auf der Veränderung der ersten und/oder zweiten Messwerte ($U_H(t)$, $U_N(t)$) während eines Gießprozesses ein oder mehrere Prozessparameter ermittelt werden, die mindestens eines der folgenden beinhaltet: der Zeitpunkt (t_{FF}) der Detektion der Fließfront der ins Gusswerkzeug (7) eingespritzten Schmelze, der Zeitpunkt (t_U) der vollständigen Füllung einer Kavität des Gusswerkzeug (7) mit Schmelze, Zeitpunkt und Dauer einer Nachdruckphase, Wachstumsgeschwindigkeit der Randschicht der Schmelze im Gusswerkzeug, Zeitpunkt des Abschwindens des Formteils von der Wand der Kavität.

9. Das Verfahren gemäß Anspruch 6 oder 7,

wobei basierend auf der Veränderung der zweiten Messwerte während eines Gießprozesses, bei dem Schmelze in eine Kavität des Werkzeugs (7) eingebracht wird, unerwünschte Abweichungen beim Randschichtwachstum in der Schmelze von einem Sollverlauf detektiert werden, während die Schmelze auskühlt und erstarrt.

10. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 6 bis 9,

wobei, basierend auf dem ersten Messwert ($U_H(t)$) und dessen Veränderung, Dichteschwankungen der ins Gusswerkzeug (7) eingespritzten Schmelze detektiert werden, insbesondere um Inhomogenitäten in der Schmelze zu detektieren. .

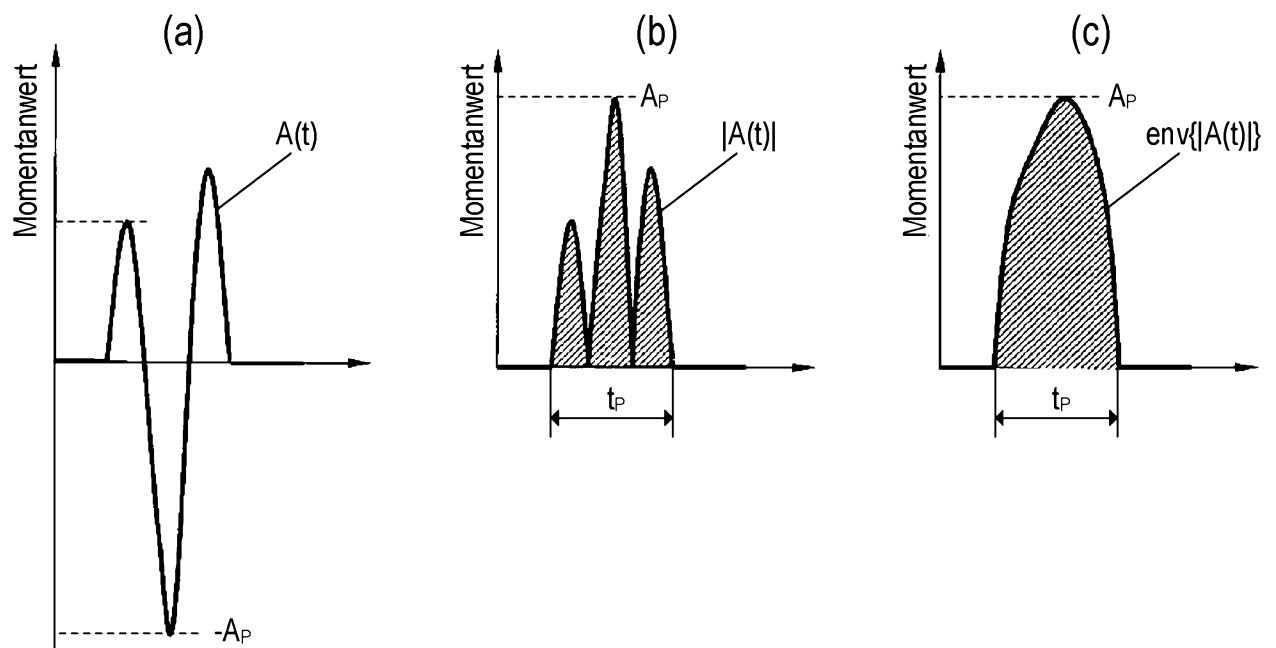


Fig. 1

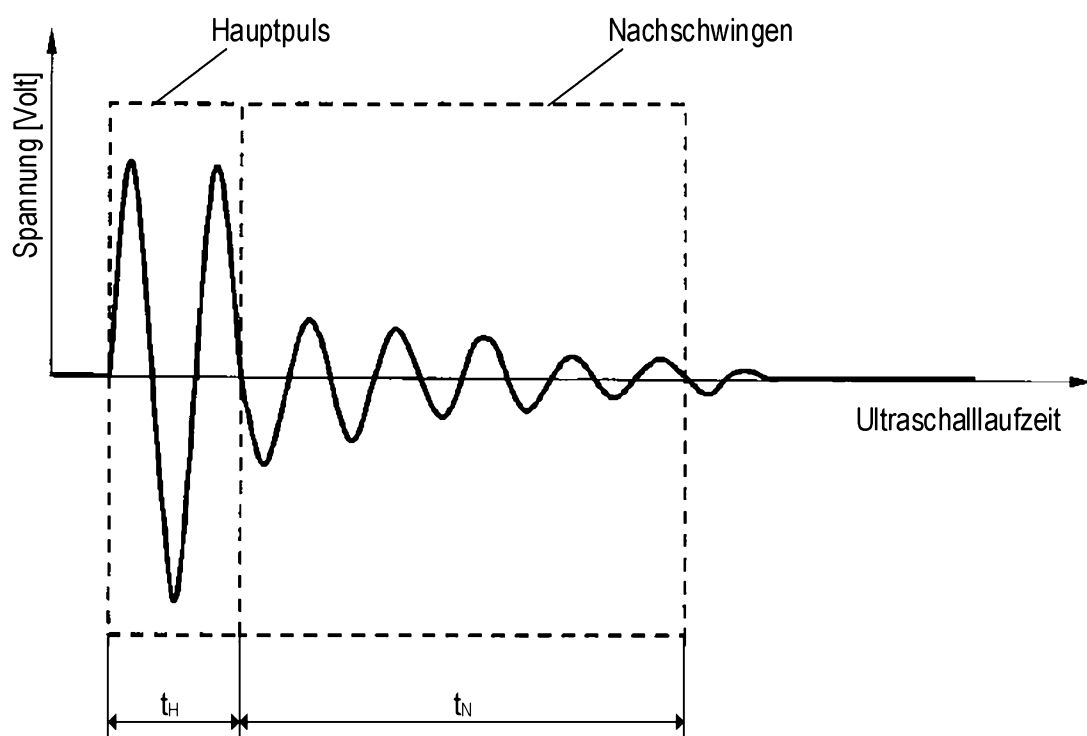


Fig. 2A

2/3

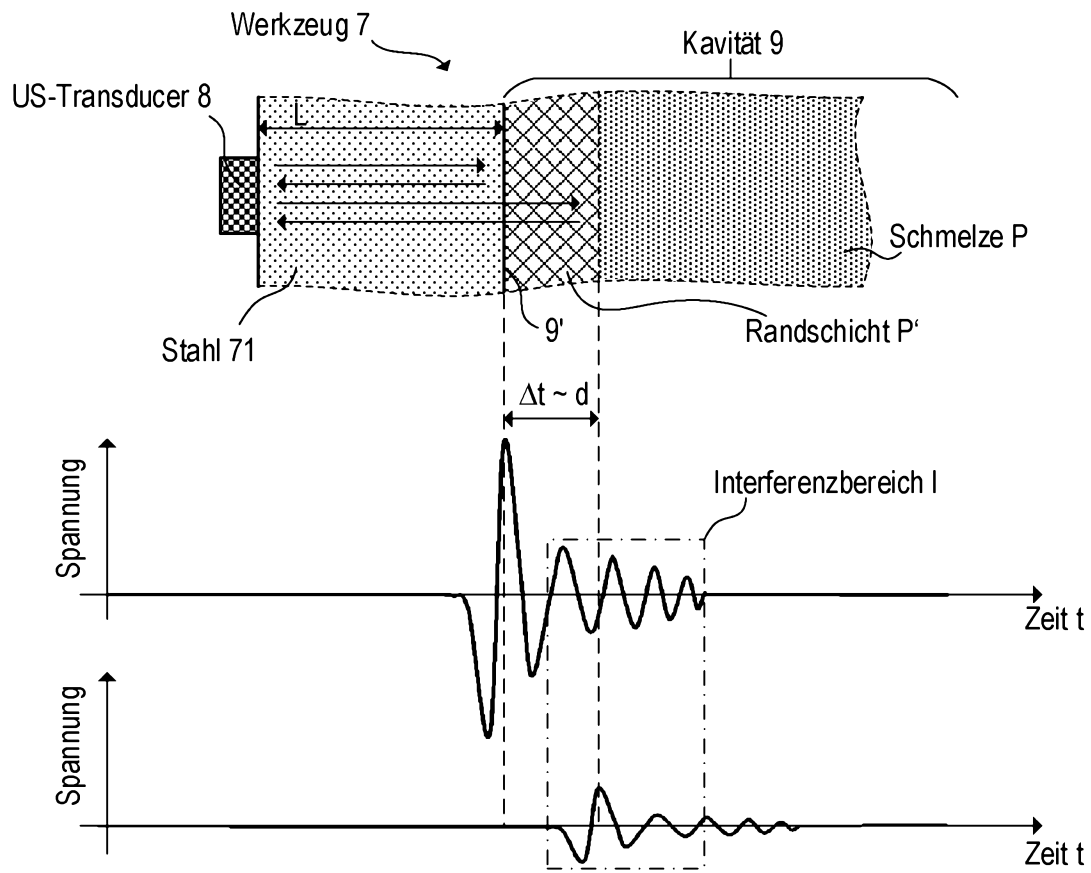


Fig. 2B

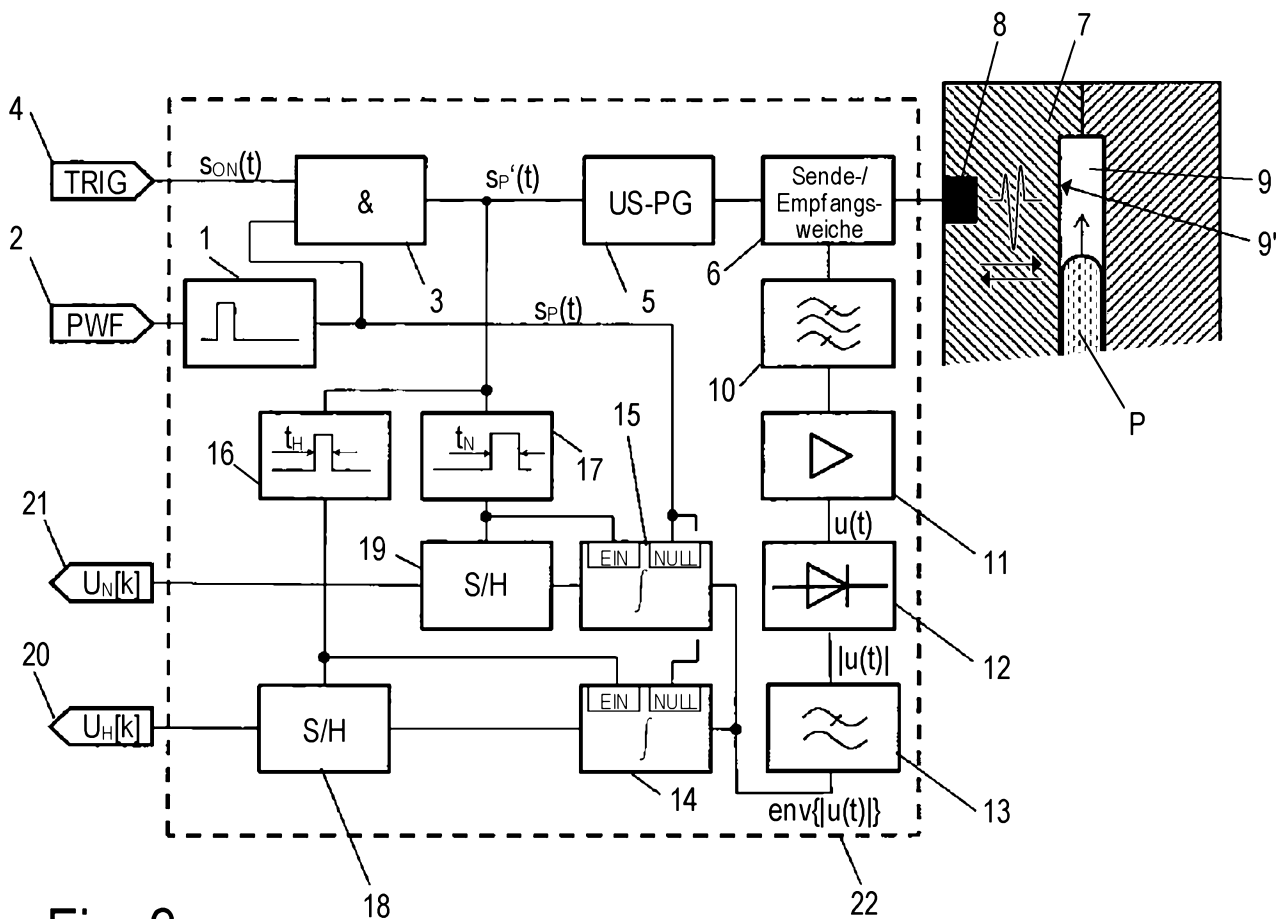


Fig. 3

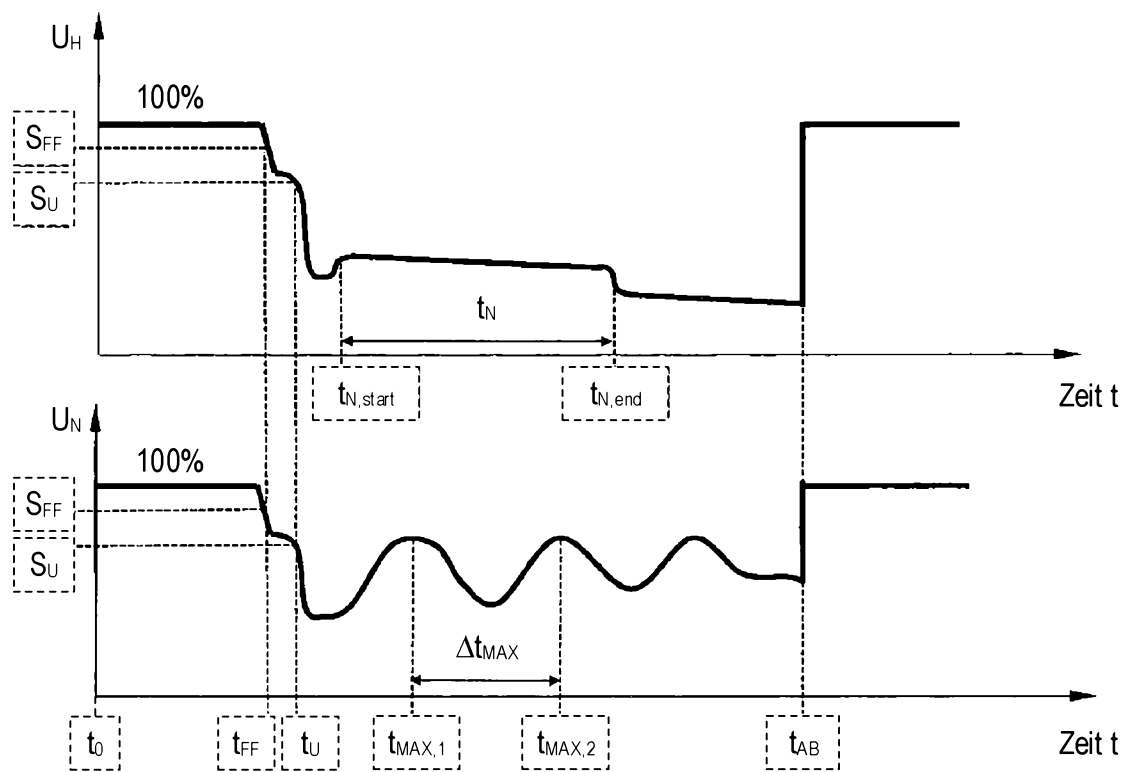


Fig. 4

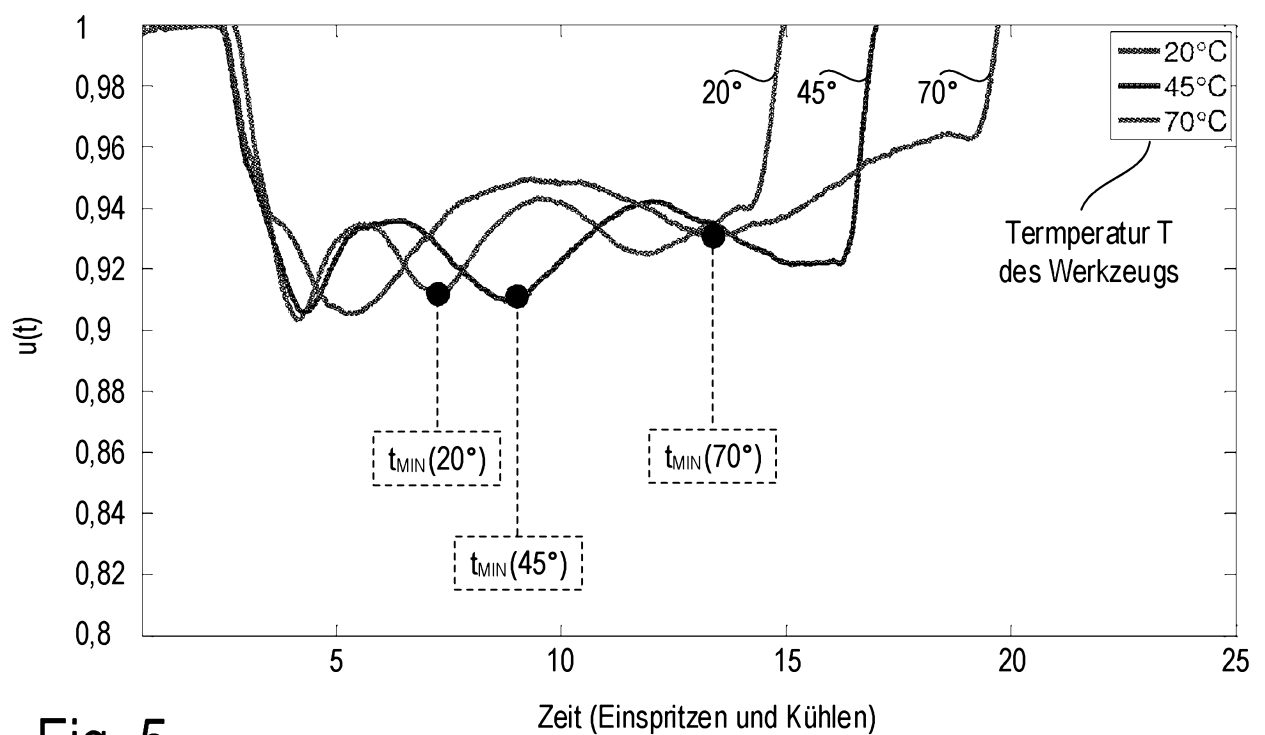


Fig. 5

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß IPC:

G01N 29/02 (2006.01); G01N 29/024 (2006.01); G01N 29/032 (2006.01); G01N 29/07 (2006.01); G01N 29/11 (2006.01); G01N 29/34 (2006.01); G01N 29/36 (2006.01); G01N 29/40 (2006.01); G01N 29/44 (2006.01); G01N 29/48 (2006.01)

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß CPC:

G01N 29/02 (2017.08); G01N 29/024 (2013.01); G01N 29/032 (2013.01); G01N 29/07 (2013.01); G01N 29/11 (2013.01); G01N 29/34 (2017.08); G01N 29/343 (2013.01); G01N 29/36 (2017.08); G01N 29/40 (2013.01); G01N 29/44 (2017.08); G01N 29/4409 (2013.01); G01N 29/4454 (2013.01); G01N

Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation):

G01N, B29C

Konsultierte Online-Datenbank:

EPODOC; WPIAP; TXTnn

Dieser Recherchenbericht wurde zu den am 07.12.2017 eingereichten Ansprüchen 1-10 erstellt.

Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
X	DE 2716833 A1 (VNII K TSVETMETAVTOMATIKA) 27. Oktober 1977 (27.10.1977) Gesamtes Dokument. Insbesondere Seite 20, Absatz 3 - Seite 22 Abs. 2; Seite 24, Abs. 4 - Seite 26, Abs. 1 ; Seite 38, Abs. 2 - Seite 45, Abs. 1 und Figuren 2a - 2e	1-10
A	US 5951163 A (JEN CHENG-KUEI) 14. September 1999 (14.09.1999) Gesamtes Dokument.	1-10
A	WO 03089214 A2 (UNIV UTAH RES FOUND) 30. Oktober 2003 (30.10.2003) Gesamtes Dokument.	1-10
Datum der Beendigung der Recherche: 24.08.2018 Seite 1 von 1 Prüfer(in): AKBARZADEH Johanna		
^{*)} Kategorien der angeführten Dokumente: X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung: der Anmeldungs- gegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden. Y Veröffentlichung von Bedeutung: der Anmeldungsgegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist. A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert. P Dokument, das von Bedeutung ist (Kategorien X oder Y), jedoch nach dem Prioritätstag der Anmeldung veröffentlicht wurde. E Dokument, das von besonderer Bedeutung ist (Kategorie X), aus dem ein „älteres Recht“ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen). & Veröffentlichung, die Mitglied der selben Patentfamilie ist.		

PATENTANSPRÜCHE

1. Ein Verfahren zur Überwachung eines Gießprozesses, gekennzeichnet durch die folgenden Schritte:

- Einkoppeln einer Sequenz von Ultraschall-Pulsen in ein Gusswerkzeug (7);
- Empfangen einer Sequenz von reflektierten Ultraschall-Pulsen und erzeugen eines Empfangssignals ($u(t)$) mit, das eine korrespondierende Sequenz von Pulsen aufweist, die jeweils einen Hauptpuls und ein Nachschwingen aufweisen;
- Erzeugen – für jeden Puls des Empfangssignals ($u(t)$) – eines ersten Messwertes ($U_H(t)$), der die Amplitude der Hauptpulses repräsentiert; und
- Erzeugen – für jeden Puls des Empfangssignals ($u(t)$) – eines zweiten Messwertes ($U_N(t)$), der die Amplitude des Nachschwingens repräsentiert.

2. Das Verfahren gemäß Anspruch 1,

- wobei die ersten Messwerte ($U_H(t)$) und die zweiten Messwerte ($U_N(t)$) derart normiert, dass sie bei einem leeren Gusswerkzeug (7) einen vordefinierten Wert annehmen.

3. Das Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2,

- wobei basierend auf der Veränderung der ersten und/oder zweiten Messwerte ($U_H(t)$, $U_N(t)$) während eines Gießprozesses ein oder mehrere Prozessparameter ermittelt werden, die mindestens eines der folgenden beinhaltet: der Zeitpunkt (t_{FF}) der Detektion der Fließfront der ins Gusswerkzeug (7) eingespritzten Schmelze, der Zeitpunkt (t_U) der vollständigen Füllung einer Kavität des Gusswerkzeug (7) mit Schmelze, Zeitpunkt und Dauer einer Nachdruckphase, Wachstumsgeschwindigkeit der Randschicht der Schmelze im Gusswerkzeug, Zeitpunkt des Abschwindens des Formteils von der Wand der Kavität.

4. Das Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2,

- wobei basierend auf der Veränderung der zweiten Messwerte während eines Gießprozesses, bei dem Schmelze in eine Kavität des Werkzeugs (7) eingebracht wird, unerwünschte Abweichungen beim Randschichtwachstum in der Schmelze von einem Sollverlauf detektiert werden, während die Schmelze auskühlt und erstarrt.

5. Das Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4,

wobei, basierend auf dem ersten Messwert ($U_H(t)$) und dessen Veränderung, Dichteschwankungen der ins Gusswerkzeug (7) eingespritzten Schmelze detektiert werden, insbesondere um Inhomogenitäten in der Schmelze zu detektieren.

6. Ein Messsystem zur Überwachung eines Gießprozesses, das folgendes aufweist:

einen Ultraschall-Transducer (8), der dazu ausgebildet ist, Ultraschall-Pulse in ein Gusswerkzeug (7) einzukoppeln;

eine mit dem Ultraschall-Transducer (8) gekoppelte Sensorschaltung (22), die dazu ausgebildet ist, zur Erzeugung der Ultraschall-Pulse den Ultraschall-Transducer (8) mit einem Ansteuersignal, das eine Sequenz von Pulsen aufweist, anzusteuern und ein von dem Ultraschall-Transducer (8) oder einem weiteren Ultraschall-Transducer bereitgestelltes Empfangssignal ($u(t)$), das im Gusswerkzeug (7) reflektierte Ultraschall-Pulse repräsentiert, zu verarbeiten,

wobei das Empfangssignal ($u(t)$) eine mit dem Ansteuersignal korrespondierende Sequenz von Pulsen aufweist, die jeweils einen Hauptpuls und ein Nachschwingen aufweisen,

dadurch gekennzeichnet, dass die Sensorschaltung (22) für die Verarbeitung des Empfangssignals ($u(t)$) dazu ausgebildet ist – für jeden Puls des Empfangssignals ($u(t)$) – einen ersten Messwert ($U_H(t)$), der die Amplitude der Hauptpulses repräsentiert, und einen zweiten Messwert ($U_N(t)$), der die Amplitude des Nachschwingsens repräsentiert, zu erzeugen.

7. Das Messsystem gemäß Anspruch 6,

wobei der erste Messwert ($U_H(t)$) jeweils auf der maximalen Amplitude des Hauptpulses und der zweiten Messwert ($U_N(t)$) jeweils auf der maximalen Amplitude des Nachschwingsens basiert.

8. Das Messsystem gemäß Anspruch 6,

wobei der erste Messwert ($U_H(t)$) jeweils auf der Fläche unter der Hüllkurve des Hauptpulses und der zweiten Messwert ($U_N(t)$) jeweils auf der Fläche unter der Hüllkurve des Nachschwingsens basiert.

9. Das Messsystem gemäß einem der Ansprüche 8,

wobei für das Erzeugen des ersten Messwerts ($U_H(t)$) die Sensorschaltung (22) dazu ausgebildet ist, die Hüllkurve des jeweiligen Pulses des Empfangssignals ($u(t)$) in einem ersten Zeitfenster (t_H) zu integrieren und

wobei für das Erzeugen des zweiten Messwerts ($U_N(t)$) die Sensorschaltung (22) dazu ausgebildet ist, die Hüllkurve des jeweiligen Pulses des Empfangssignals ($u(t)$) in einem zweiten Zeitfenster (t_N) zu integrieren.

10. Das Messsystem gemäß Anspruch 9,

wobei das erste Zeitfenster (t_H) einen definierte erste Verzögerungszeit nach dem korrespondierenden Puls im Ansteuersignal beginnt, und

wobei das zweite Zeitfenster (t_N) einen definierte zweite Verzögerungszeit nach dem korrespondierenden Puls im Ansteuersignal beginnt.