

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
12. Dezember 2024 (12.12.2024)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/251511 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01N 15/02 (2024.01) G01N 29/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/063977

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. Mai 2024 (21.05.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2023 114 704.8
05. Juni 2023 (05.06.2023) DE

(71) Anmelder: **TIPCO TUDESHKI INDUSTRIAL PRO-
CESS CONTROL GMBH** [DE/DE]; Leonhardstr. 23- 27,
52064 Aachen (DE).

(72) Erfinder: **TUDESHKI, Kian**; Diepenbenden 29, 52076
Aachen (DE).

(74) Anwalt: **KOHLMANN, Kai**; Donatusstr. 1, 52078 Aachen
(DE).

(81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ,
DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH,
GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO,
JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR,
LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,
MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST,
SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(54) **Title:** METHOD FOR DETERMINING THE PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF GRANULAR MATERIAL IN A
DELIVERY FLOW, AND MEASURING DEVICE

(54) **Bezeichnung:** VERFAHREN ZUM BESTIMMEN DER KORNGRÖßENVERTEILUNG VON GRANULATEN IN EINEN
FÖRDERSTROM UND MESSEINRICHTUNG

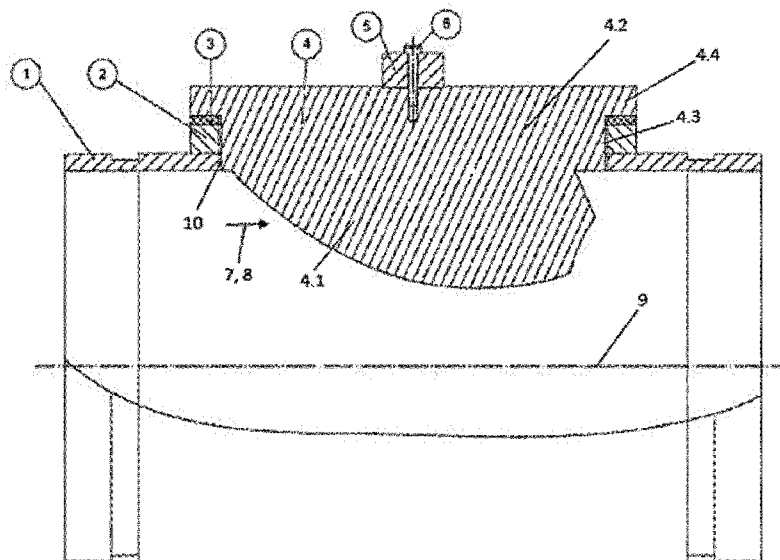


Abbildung 1

Abbildung = Figure

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for continuously determining the particle size distribution of solid particles of different particle sizes that are transported in a delivery direction into a delivery flow and in the process collide with an impact element in the form of a waveguide and produce acoustic signals that propagate as structure-borne sound waves in the impact element and are captured using a vibration sensor. The invention also relates to a measuring device for carrying out the method. In order to achieve more accurate results when determining the particle size distribution taking into account a variable flow energy of the delivery flow, it is proposed to reduce the pressure resistance component of the flow resistance of an impact part of the impact element in an inflow direction.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- hinsichtlich der Identität des Erfinders (Regel 4.17 Ziffer i)
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)
- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, die Priorität einer früheren Anmeldung zu beanspruchen (Regel 4.17 Ziffer iii)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- in Schwarz-Weiss; die internationale Anmeldung enthielt in ihrer eingereichten Fassung Farbe oder Graustufen und kann von PATENTSCOPE heruntergeladen werden.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum kontinuierlichen Bestimmen der Korngrößenverteilung von Feststoffpartikeln mit unterschiedlichen Korngrößen, die in einer Förderrichtung in einen Förderstrom transportiert werden und dabei mit einem als Wellenleiter eingerichteten Anprallkörper kollidieren und akustische Signale erzeugen, die sich in dem Anprallkörper als Körperschallwellen ausbreiten und mit einem Schwingungsaufnehmer erfasst werden. Außerdem betrifft die Erfindung eine Messeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Um genauere Ergebnisse bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung unter Berücksichtigung einer veränderlichen Strömungsenergie des Förderstroms zu erzielen wird vorgeschlagen, die Druckwiderstandskomponente des Strömungswiderstandes eines Anprallteils des Anprallkörpers in einer Anströmrichtung zu reduzieren.

Verfahren zum Bestimmen der Korngrößenverteilung von Granulaten in einen Förderstrom und Messeinrichtung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum kontinuierlichen
5 Bestimmen der Korngrößenverteilung von Granulaten bestehend
aus Feststoffpartikeln mit unterschiedlichen Korngrößen, die
in einer Förderrichtung in einen Förderstrom transportiert
werden und dabei mit mindestens einem als Wellenleiter
einggerichteten Anprallkörper kollidieren und akustische
10 Signale erzeugen, die sich in jedem Anprallkörper als
Körperschallwellen ausbreiten. Außerdem betrifft die
Erfindung eine Messeinrichtung zur Durchführung des
Verfahrens.

15 Ein wesentliches Merkmal von Granulaten ist deren
Korngrößenverteilung, die in allen Zweigen der Industrie als
ein messbarer Parameter zur Prozessüberwachung,
Qualitätskontrolle, Qualitätssteuerung, Maschinen- und
Anlagenüberwachung und Maschinen- und Anlagensteuerung
20 herangezogen wird.

Granulate werden bei der Umlagerung, Produktion oder
Verwendung mit unterschiedlichen Transportsystemen
transportiert, wobei der Transport in der Regel als
25 Förderstrom hydraulisch, z.B. als Feststoff-Wasser-Gemisch,
pneumatisch, z.B. als Feststoff-Luft-Gemisch, mittels
Bandanlagen oder teilweise im freien Fall erfolgt. Die
Entwicklung eines Verfahrens und einer Vorrichtung, die in
allen Förderströmen für ein breites Kornspektrum von einigen
30 Mikrometern bis zu einigen Dezimetern eine Korngrößenanalyse
in Echtzeit erlaubt, ist für eine Vielzahl von
Industriezweigen von besonderer Bedeutung.

Eine Vielzahl von Untersuchungen und Entwicklungsbestrebungen konzentrieren sich auf die Nutzung der Akustik zur Analyse von Granulaten, hauptsächlich in Suspensionsform während des hydraulischen Transports.

Die Erfindung betrifft ein passives akustisches Verfahren, wobei akustische Signale für die Signalverarbeitung genutzt werden, die während des Transports des Granulats durch eine Kollision von Feststoffpartikeln des Granulats mit einer Vorrichtung, wie einer Sonde, (Anprallkörper), oder einem Teil des Transportsystems, wie beispielsweise einer Rohrwandung, entstehen.

Passive akustische Verfahren sind beispielsweise aus der US 5,257,530 B, der WO 2014/11667 5 A1, der US 2008/282781 A1 US 10 309 887 B2 sowie US 11 260 399 B2 und der EP 3 356 813 B1 bekannt:

Die US 5,257,530 B offenbart eine metallische Sonde, die quer zur Förderrichtung einer Suspension in einer Leitung angeordnet ist, so dass die Feststoffpartikel mit der Sonde kollidieren. An der Sonde ist außerhalb der Leitung ein Beschleunigungsaufnehmer angebracht, der die akustischen Signale aufnimmt. Die verstärkten akustischen Signale werden zu einer Signalverarbeitungseinheit übertragen. Im Rahmen der Signalverarbeitung wird nach einer FFT-Analyse (Fast Fourier Transformation) aus der Signalenergie und Signalintensität auf die Konzentration der Feststoffpartikel in der Suspension geschlossen. In erster Linie dient das Verfahren zur Bestimmung der Konzentration und Masse von Sand in einem Öl- oder Gasstrom.

Die WO 2014/116675 A1 offenbart einen als Wellenleiter
eingerrichteten Anprallkörper, der quer zur Förderrichtung
einer Suspension in einer Leitung angeordnet ist, so dass die
5 Feststoffpartikel mit dem Anprallkörper kollidieren. An der
Sonde ist außerhalb der Leitung ein akustischer Wandler
angebracht, der die akustischen Signale aufnimmt. Die
akustischen Signale werden zu einer
Signalverarbeitungseinheit übertragen. Im Rahmen der
10 Signalverarbeitung soll auf die Korngrößenverteilung der
Feststoffpartikel in der Suspension geschlossen werden. Die
akustischen Signale werden mit einer Abtastfrequenz von
beispielsweise 250 Hz abgetastet. Für jedes abgetastete
Signal wird im Wege einer DFFT (Discrete Fast Fourier
15 Transformation) das Frequenzspektrum transformiert und daraus
die PDS (Power Density Spectrum) erzeugt, d.h. die
Schalleistungsdichte. Eine Änderung der Steigung der
Signalintensität im Frequenzbereich 100 kHz bis 1 MHz sowie
die Änderung der Signalintensität für eine bevorzugte
20 Frequenz im Frequenzbereich größer als 20 kHz dienen zur
Bestimmung der Korngröße der Feststoffpartikel in der
Suspension.

Die US 2008/282781 A1 offenbart eine Vorrichtung und ein
25 Verfahren zur Überwachung von Formationssand in
leitungsgebundenen Öl- und Gasförderströmen. Der Sand ruft in
den Leitungen, insbesondere deren Krümmungen
Erosionsverschleiß hervor. Der Erosionsverschleiß wird
üblicherweise mit einem elektrischen Widerstandssensor
30 erfasst. Um neben dem Erosionsverschleiß die Partikelmenge
und deren Einfluss auf den Erosionsverschleiß erfassen zu
können, wird eine Sonde vorgeschlagen, die ein von einem

Gehäuse entkoppeltes Detektorelement aufweist, das eine Anprallfläche, einen an die Anprallfläche gekoppelten akustischen Sensor und den elektrischen Widerstandssensor zur Erfassung des Erosionsverschleißes aufweist. Der

5 Akustiksensordient zur Erfassung der Partikelmenge, indem die Anzahl der Kollisionen der Partikel an der Anprallfläche gezählt wird. Die Sonde kann darüber hinaus Mittel zur Erfassung der Strömungsenergie aufweisen. Die Strömungsenergie des Förderstroms wird mittels eines

10 Differenzdruckwandlers erfasst. Um die Anzahl der Partikel in einem bestimmten Größenbereich zu ermitteln, die auf die Anprallfläche auftreffen, müssen die akustischen Energiesignale der Partikel mit der aus der Strömungsenergie abgeleiteten Fließgeschwindigkeit unter der Annahme

15 konstanter Dichte korreliert werden. Die Korrelation zwischen den akustischen Energiesignalen der auftreffenden Partikel sowie der qualitativen Änderungen der Fließgeschwindigkeit dient dem Zweck, die Anzahl der Partikel in dem bestimmten Größenbereich mit dem Erosionsverschleiß bei einem gegebenen

20 Geschwindigkeitsprofil des Förderstroms zu korrelieren.

Die US 10 309 887 B2 und die US 11 260 399 B2 offenbaren passive akustische Messverfahren zum kontinuierlichen Bestimmen der Korngrößenverteilung von Granulaten in einem

25 hydraulischen Förderstrom eines Zyklons. Die Vorrichtung umfasst ein festes Sensorelement, das in einem Prozessrohr angebracht ist, in den ein Prozessfluid fließt, wobei das feste Sensorelement einen Anprallkörper aufweist, der in die Strömung hineinragt. Eine doppelte Gewindehülse dient der

30 Befestigung des Anprallkörpers. Informationen über die Mahlgutgröße der Partikel werden zur Anlagensteuerung genutzt.

Die EP 3 356 813 B1 offenbart ein passives akustisches Verfahren zum kontinuierlichen Bestimmen der Korngrößenverteilung von Granulaten in einem Förderstrom, welches die weitere Erkenntnis nutzt, dass das akustische Signal hinsichtlich seiner Charakteristik von der Korngrößenverteilung und der Strömungsenergie des Förderstroms abhängt. Die Strömungsenergie wird durch die Geschwindigkeit und die Konzentration (Massekonzentration), bzw. die Schüttdichte der Feststoffpartikel des Granulats, bestimmt. Um in Echtzeit zuverlässige Messergebnisse zur Korngrößenverteilung zu erhalten, wird die Strömungsenergie des Förderstroms mit mindestens einem zusätzlich zu dem Schwingungsaufnehmer vorgesehenen Kraftaufnehmer erfasst. Die Signalverarbeitung der elektrischen Signale des Schwingungsaufnehmers zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wird unter Berücksichtigung der elektrischen Signale des Kraftaufnehmers durchgeführt.

Der Erfindung liegt ausgehend von der EP 3 356 813 B1 als nächstliegendem Stand der Technik die Aufgabe zugrunde, ein passives akustisches Verfahren vorzuschlagen, mit dem genauere Ergebnisse bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung von granularen Feststoffpartikeln in einem Förderstrom unter Berücksichtigung einer veränderlichen Strömungsenergie des Förderstroms in Echtzeit erzielt werden. In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung soll die Messung der Strömungsenergie des Förderstroms mithilfe mindestens eines Kraftaufnehmers zusätzlich zu dem Schwingungsaufnehmer entbehrlich sein. Außerdem soll eine Messeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens vorgeschlagen werden.

Die Lösung dieser Aufgabe basiert auf der Erkenntnis, dass der sich aus dem Druck- und Reibungswiderstand zusammensetzende Strömungswiderstand des Anprallkörpers in dem Förderstrom die Signalqualität nachteilig beeinflussen kann. Insbesondere ein hoher Druckwiderstand, auch als Formwiderstand bezeichnet, versetzt den umströmten Anprallkörper in Eigenschwingungen und beeinträchtigt dadurch die Abhängigkeit zwischen den Eigenschaften der elektrischen Signale und der Korngrößenverteilung.

Des Weiteren beruht die Erfindung in der Ausgestaltung des Anspruchs 2 auf der Erkenntnis, dass die Erfassung der räumlichen Ausbreitung der akustischen Signale in dem Anprallkörper und die Nutzung der entsprechenden elektrischen Signale mit Hilfe eines mehrachsigen Schwingungsaufnehmers mit mindestens drei Messachsen zu einer Erhöhung der verfügbaren elektrischen Signale führt, aus deren Charakteristik die Korngrößenverteilung in Echtzeit mit höherer Genauigkeit ermittelt werden kann. Neben der höheren Genauigkeit bietet der mehrachsige Schwingungssaufnehmer den weiteren Vorteil, dass für die Erfassung der Strömungsenergie des Förderstroms kein zusätzlicher Kraftaufnehmer mehr erforderlich ist. Zur Erfassung der Strömungsenergie kann auf die elektrischen Signale der mindestens drei Messachsen desselben Schwingungsaufnehmers zurückgegriffen werden, der die räumliche Ausbreitung der akustischen Signale in dem Anprallkörper erfasst.

Im Einzelnen wird die Aufgabe durch ein Verfahren zum kontinuierlichen Bestimmen der Korngrößenverteilung eines Granulats bestehend aus Feststoffpartikeln mit

unterschiedlichen Korngrößen mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Eine Messeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens ergibt sich aus den Merkmalen des Anspruchs 14.

- 5 Das Transportieren der Feststoffpartikel in einer festgelegten Förderrichtung in einem Förderstrom erfolgt vorzugsweise mit Hilfe eines Transportsystems. Bei dem Transportsystem handelt es sich insbesondere um einen Bandförderer oder einen Strömungsförderer, der die
- 10 Feststoffpartikel entweder pneumatisch, d.h. als Feststoffpartikel-Gas-Gemisch oder hydraulisch als Feststoffpartikel-Flüssigkeits-Gemisch rohrgebunden transportiert. Außerdem können die Feststoffpartikel in einer Förderrichtung in einem Förderstrom im freien Fall
- 15 transportiert werden.

- Die Feststoffpartikel kollidieren mit dem als Wellenleiter eingerichteten Anprallkörper und erzeugen akustische Signale, die sich in dem Anprallkörper räumlich als Körperschallwellen
- 20 ausbreiten. Der Anprallkörper umfasst ein Halteteil und ein Anprallteil. Das Anprallteil kann beispielsweise stromlinienförmig oder als längsangeströmte ebene Platte ausgestaltet sein. Das Anprallteil des Anprallkörpers ist dem Förderstrom mit Feststoffpartikeln ausgesetzt, während das
- 25 Halteteil zur Befestigung des Anprallkörpers an dem Transportsystem dient, beispielsweise zur Befestigung an einer Halterung eines Bandförderers oder der Rohrwandung eines Strömungsförderers. Außerdem wird an dem Halteteil der vorzugsweise mehrachsige Schwingungssaufnehmer akustisch
- 30 leitend angeordnet.

Im Interesse einer ungestörten Ausbreitung der Körperschallwellen sind das Anprallteil und das Halteteil einteilig aus einem metallischen Werkstoff ausgeführt. Um die Verschleißfestigkeit des Anprallkörpers in dem Förderstrom zu verbessern, besteht zumindest das Anprallteil aus gehärtetem Metall, insbesondere Hartmetall.

Die Form des umströmten Anprallteils und die Anströmrichtung bestimmen den Druckwiderstand und den Reibungswiderstand.

Der Druckwiderstand ist die Kraft auf das umströmte Anprallteil des Anprallkörpers, die aus der Druckdifferenz Δp zwischen seiner Vorder- und Rückseite resultiert. Die Druckdifferenz beruht auf dem Energieverlust der reibungsbehafteten Strömung des Förderstroms.

Der Reibungswiderstand wird von der Reibung der Strömung an der Oberfläche des Anprallteils verursacht. Die Größe dieser Kraft hängt ab von der Größe der betroffenen Oberfläche und den Strömungsverhältnissen, vor allem davon, ob die anliegende Strömung laminar oder turbulent ist, wobei turbulente Strömungen bei übereinstimmender Größe der Oberfläche den Reibungswiderstand erhöhen und laminare Strömungen den Reibungswiderstand verringern.

Bei kreiszylindrischen Anprallkörpern, wie sie bei den bekannten passiven akustischen Verfahren zum Einsatz gelangen, beträgt der Druckwiderstand etwa 90 % und der Reibungswiderstand an der Mantelfläche des Kreiszylinders etwa 10 % des Strömungswiderstandes bei Anströmung senkrecht zur Längsachse des Kreiszylinders. Die verhältnismäßig große Stirnfläche des Anprallkörpers, d. h. die in eine Ebene

senkrecht zur Anströmungsrichtung projizierte Fläche, hat zur Folge, dass der Anteil des Druckwiderstands um ein Vielfaches höher als der Reibungswiderstand ist und dadurch die Genauigkeit der Messung der Korngrößenverteilung, insbesondere im Bereich kleiner Korngrößenspektren beeinträchtigt wird.

Erfindungsgemäß wird indes die Form und Anströmungsrichtung des Anprallteils derart bestimmt, dass der Druckwiderstand kleiner als der Reibungswiderstand ist, d.h. der Anteil des Druckwiderstands beträgt weniger als 50 % des Strömungswiderstandes des Anprallteils, vorzugsweise jedoch weniger als 30%, besonders bevorzugt weniger als 10% des Strömungswiderstandes. Durch die Reduzierung des Druckwiderstandes kann die Genauigkeit der Bestimmung der Korngrößenverteilung und die Entkopplung von der Strömungsenergie des Förderstroms weiter verbessert werden.

Bei einem z.B. als Scheibe bzw. ebene Platte ausgebildeten Anprallteil mit einer Anströmungsrichtung parallel zu den Oberflächen der Scheibe bzw. Platte würde der Anteil des Druckwiderstandes nahezu gegen 0% gehen.

Eine Überprüfung des Strömungswiderstandes für ein bestimmtes Anprallteil kann mittels Vergleichsmessungen durch Dehnmessstreifen oder durch Experimente ermittelt werden.

Um den Reibungs- und Druckwiderstand an einem umströmten Körper zu ermitteln, kann beispielsweise das Anprallteil in einem Strömungskanal platziert und ein Strömungsmedium um das Anprallteil herum bewegt werden. Die Messung des Widerstands erfolgt mittels Kraftmessung der auf das Anprallteil wirkenden Kräfte.

Sowohl das Erfassen der Ausbreitung der akustischen Signale in dem Anprallkörper als auch das Erfassen der Strömungsenergie des Förderstroms sowie das Umformen in elektrische Signale erfolgt in vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung mit Hilfe eines mehrachsigen Schwingungsaufnehmers mit mindestens drei, vorzugsweise senkrecht zueinander angeordneten Messachsen.

- 10 Es werden ausschließlich die elektrischen Signale der mindestens drei Messachsen des Schwingungsaufnehmers verwendet, um sowohl die sich räumlich in dem Anprallkörper ausbreitenden akustischen Signale als auch die Strömungsenergie des Förderstroms zu erfassen, die zur
- 15 Bestimmung der Korngrößenverteilung unter Berücksichtigung der Strömungsenergie erforderlich sind. Zur Erfassung der Strömungsenergie wird das Verhältnis der elektrischen Signale von zwei Messachsen des Schwingungsaufnehmers verwendet. Zur Erfassung der Korngrößenverteilung unter Berücksichtigung der
- 20 Strömungsenergie werden die elektrischen Signale der mindestens drei Messachsen des einen Schwingungsaufnehmers verwendet.

- Da die akustischen Signale von dem Anprallkörper direkt auf den an dem Halteteil befestigten mehrachsigen Schwingungsaufnehmer übertragen werden, kommt als Schwingungsaufnehmer insbesondere ein mehrachsiger, insbesondere ein piezoelektrischer Beschleunigungssensor für das Erfassen der sich räumlich ausbreitenden akustischen
- 30 Signale in Betracht. Der Beschleunigungssensor wird an dem Halteteil außerhalb des Förderstroms befestigt, so dass keine

Feststoffpartikel aus dem Förderstrom unmittelbar mit dem mehrachsigen Beschleunigungssensor in Kontakt gelangen.

Das Erfassen der räumlichen Ausbreitung der akustischen
5 Signale und das Erfassen der Strömungsenergie des
Förderstroms mit Hilfe nur eines einzigen mehrachsigen
Schwingungsaufnehmers mit mindestens drei, vorzugsweise
senkrecht zueinander stehenden Messachsen bewirkt, dass das
Erfassen der akustischen Signale und der Strömungsenergie
10 zeitgleich und dadurch in Bezug auf ein übereinstimmendes
Kollektiv von Feststoffpartikeln erfolgt, sodass
Verfälschungen der Ergebnisse der Signalverarbeitung durch
einen zeitlichen Abstand der Erfassung der Strömungsenergie
von der Erfassung der akustischen Signale zur Bestimmung der
15 Korngrößenverteilung unter Berücksichtigung der
Strömungsenergie vermieden werden.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es möglich, eine
genauere Korngrößenanalyse in Echtzeit mit einem sehr breiten
20 Kornspektrum von einigen Mikrometern bis einigen Dezimetern
in jeglicher Art von granularen Förderströmen mit sich
ändernder Strömungsenergie basierend auf einem passiven
akustischen Verfahren durchzuführen, ohne dass die Messung
der Strömungsenergie des Förderstroms mithilfe eines
25 zusätzlichen Kraftaufnehmers erforderlich ist.

Der Druckwiderstand des Anprallteils kann dadurch wirksam
reduziert werden, dass die Stirnfläche des Anprallteils, das
heißt dessen in Anströmrichtung auf eine dazu senkrechte
30 Fläche projizierte Querschnittsfläche, maximal 10% der

gesamten von dem Förderstrom umströmten Oberfläche des Anprallteils beträgt.

Der Strömungswiderstand des umströmten Anprallteils des
5 Anprallkörpers kann jedoch nicht nur durch die Formgebung und Anströmungsrichtung, sondern auch durch eine Erhöhung der Oberflächengüte herabgesetzt werden, indem der Reibungswiderstand an der Oberfläche des Anprallteils reduziert wird. Vorzugsweise weist die Oberfläche eine
10 Rautiefe R_t von maximal 20 μm auf. Die Rautiefe R_t wird berührend nach der Tastschnittmethode (DIN EN ISO 25178-601) oder berührungslos mit der Konfokaltechnologie (DIN EN ISO 25178-602) gemessen.

Damit die Förderrichtung des Förderstroms und die
15 Anströmrichtung des Anprallteils parallel zu einer der Achsen des mehrachsigen Schwingungsaufnehmers verläuft, sind dessen Messachsen entsprechend der x-, y- und z- Achse eines orthogonalen Koordinatensystems zueinander angeordnet und der Schwingungsaufnehmer derart an dem Halteteil des
20 Anprallkörpers angeordnet, dass die x-Achse des Schwingungsaufnehmers parallel zur Anströmrichtung des Anprallteils verläuft. Zur Bestimmung der Strömungsenergie wird vorzugsweise das Verhältnis der elektrischen Signale der zwei Messachsen in x- und y-Richtung oder in x- und z-
25 Richtung des mehrachsigen Schwingungsaufnehmers verwendet.

In weiterer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Anprallkörper schwingungsisoliert in dem Förderstrom gehalten. Die Schwingungsisolation zwischen dem Halteteil des
30 Anprallkörpers und einer Halterung, z.B. an dem Gerüst des Förderbandes oder an dem Mantel einer Rohrleitung für den

hydraulischen Transport, reduziert den Einfluss von Fremdschwingungen auf den Anprallkörper und den daran befestigten Schwingungsaufnehmer, insbesondere werden Veränderungen der Signalintensität und Frequenzverschiebungen
5 weitgehend vermieden.

Zur weiteren Verbesserung der Signalqualität und Reproduzierbarkeit der Erfassung der akustischen Signale kann der mehrachsige Schwingungsaufnehmer mittels einer
10 Schraubverbindung lösbar mit dem Halteteil des Anprallkörpers verbunden sein. Hierdurch wird ein dauerhaft bestmöglicher Kontakt zu dem Halteteil gewährleistet.

Das Verfahren zum kontinuierlichen Bestimmen der
15 Korngrößenverteilung setzt vor Beginn der regulären Signalverarbeitung der elektrischen Signale eine vorherige Kalibrierung voraus, die nachfolgend für den bevorzugten Schwingungsaufnehmer mit drei Messachsen beschrieben wird:

20 In einem ersten Schritt wird eine Normierfunktion erstellt, indem ein funktionaler Zusammenhang (Korrelation) zwischen den kontinuierlich erfassten elektrischen Signalen von zwei Messachsen des Schwingungsaufnehmers zur Bestimmung der Strömungsenergie und der Konzentration bzw. Schüttdichte der
25 Feststoffpartikel des Granulats von während der kontinuierlichen Signalerfassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben ermittelt wird. Bei der Ermittlung des funktionalen Zusammenhanges wird vorzugsweise lediglich ein zuvor festgelegtes Frequenzspektrum der
30 kontinuierlich erfassten elektrischen Signale betrachtet.

Sofern die Strömungsenergie wie im Stand der Technik mittels eines unabhängig von dem Schwingungsaufnehmer vorgesehenen Kraftaufnehmers erfasst wird, wird der funktionale Zusammenhang zwischen den elektrischen Signalen des Kraftaufnehmers und der Konzentration bzw. Schüttdichte der Feststoffpartikel des Granulats von während der kontinuierlichen Signalerfassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben ermittelt.

- 10 Bei einem hydraulischen Förderstrom, z.B. als Feststoffpartikel-Wasser-Gemisch, wird eine Probe mit einem bekannten Gesamtvolumen entnommen und die Massenkonzentration der Probe ermittelt. Die Massenkonzentration β_i ist definiert als Quotient aus der Masse m_i einer betrachteten Mischungskomponente i , hier der Masse der Feststoffpartikel und dem Gesamtvolumen V der mit der Probe entnommenen Mischphase.

- Bei einem Transport der Feststoffpartikel auf einem Bandförderer wird indes die Schüttdichte ermittelt. Die Schüttdichte ρ_{sch} bezeichnet die Dichte, d. h. die Masse pro Volumen eines Gemenges aus einem körnigen Feststoff, hier die Feststoffpartikel, und einem kontinuierlichen Fluid, welches die Hohlräume zwischen den Feststoffpartikeln ausfüllt. Das Fluid ist beim Bandtransport die Luft.

- In einem zweiten Schritt wird unter Berücksichtigung der so erhaltenen Normierfunktion eine Kalibrierfunktion für die Energienormierung der Signalintensität der elektrischen Signale zum Bestimmen der Korngrößenverteilung erstellt, indem ein funktionaler Zusammenhang (Korrelation) zwischen

den mit der Normierfunktion verarbeiteten elektrischen Signalen sämtlicher Messachsen des Schwingungsaufnehmers und der Korngrößenverteilung von den während der Signalerfassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben ermittelt
5 wird.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung der zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben erfolgt mit einem bekannten Verfahren zur Bestimmung der
10 Korngrößenverteilung, beispielsweise im Wege einer Siebanalyse.

Die Erfassung der akustischen Signale sämtlicher Messachsen und die Ermittlung der Konzentration bzw. Schüttdichte sowie
15 der Korngrößenverteilung beziehen sich auf ein im wesentlichen übereinstimmendes Kollektiv von Feststoffpartikeln aus dem Förderstrom, d.h. die Probe wird während der Erfassung der akustischen Signale für die Kalibrierung in unmittelbarer Nähe zu dem mehrachsigen
20 Schwingungsaufnehmer gezogen.

Der sich an die Kalibrierung anschließende Regelbetrieb der Signalverarbeitung der elektrischen Signale der mindestens drei Messachsen des Schwingungsaufnehmers zum Bestimmen der
25 Korngrößenverteilung umfasst sodann die folgenden Schritte:

- Normieren der von den mindestens drei Messachsen des Schwingungsaufnehmers erfassten elektrischen Signale mit der Normierfunktion, um die Abhängigkeit der erfassten
30 elektrischen Signale sämtlicher Messachsen zur Bestimmung der Korngrößenverteilung von der Strömungsenergie zu eliminieren. Bei der Normierung wird vorzugsweise

lediglich das zuvor auch für die Erstellung der Kalibrierfunktion festgelegte Frequenzspektrum der kontinuierlich erfassten elektrischen Signale betrachtet.

- 5 - Ermitteln der Korngrößenverteilung in Echtzeit durch Anwenden der Kalibrierfunktion auf die normierten elektrischen Signale sämtlicher Messachsen.

Der sich an die Kalibrierung anschließende Regelbetrieb der
10 Signalverarbeitung der elektrischen Signale bei einem herkömmlichen Schwingungsaufnehmer erfolgt analog, wobei lediglich das eine von dem Schwingungsaufnehmer erfasste elektrische Signal mit der Normierfunktion normiert wird, um die Abhängigkeit des Signals zur Bestimmung der
15 Korngrößenverteilung von der Strömungsenergie zu eliminieren. Die Ermittlung der Korngrößenverteilung in Echtzeit erfolgt durch Anwenden der Kalibrierfunktion auf das normierte elektrischen Signale des Schwingungsaufnehmers.

- 20 Eine Messeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1-13 ergibt sich aus den Merkmalen des Anspruchs 14.

Der Schwingungsaufnehmer der Messeinrichtung umfasst
25 vorzugsweise mindestens drei Messachsen. Der mehrachsige Schwingungsaufnehmer entfaltet im Zusammenhang mit der erfindungsgemäßen Ausbildung des Anprallteils eine synergistische Wirkung in Bezug auf eine erhöhte Genauigkeit der Messergebnisse durch nahezu vollständige Entkopplung der
30 Messergebnisse von einer sich ändernden Strömungsenergie.

der Messeinrichtung nach Abbildung 1 sowie Schnitte entlang der Linien A-A, B-B, C-C und D-D in der Seitenansicht,

5 **Abbildung 3**

eine perspektivische Ansicht des Anprallkörpers nach Abbildung 1,

Abbildung 4

eine Darstellung einer Halterung für den Anprallkörper nach Abbildung 1,

10

Abbildung 5

unterschiedliche Korngrößenverteilungen eines Sand-Wasser-Gemisches mit vier verschiedenen Sanden für Testreihen 7-10,

15 **Abbildung 6**

Signalanalysen von Testreihen 1-6 mit einer Messeinrichtung nach dem Stand der Technik,

Abbildungen 7-9

20

Signalanalysen der Testreihen 1-6 mit einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung,

Abbildung 10

Signalanalysen von Testreihen 1-3 und 7-10 mit einer Messeinrichtung nach dem Stand der Technik,

25

Abbildungen 11-13 Signalanalysen von Testreihen 1-3 und 7-10 mit einer erfindungsgemäßen Messeinrichtung,

5 **Abbildung 14** eine Darstellung einer Normierfunktion, die den funktionalen Zusammenhang zwischen den elektrischen Signalen von zwei Messachsen des Schwingungsaufnehmers (berechnete Strömungsenergie) und der
10 Konzentration der Feststoffpartikel (Strömungsenergie) des Granulats von während der Signalerfassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben beschreibt,

15 **Abbildung 15** eine Darstellung einer Kalibrierfunktion die einen funktionalen Zusammenhang zwischen den mit der Normierfunktion verarbeiteten elektrischen Signalen
20 sämtlicher Achsen des Schwingungsaufnehmers und der Korngrößenverteilung von während der Signalerfassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben beschreibt.

25
Abbildung 1 zeigt eine Messeinrichtung zum Durchführen eines Verfahrens zum kontinuierlichen Bestimmen der Korngrößenverteilung eines Granulats in einem Strömungsförderer. Die Messeinrichtung besteht im
30 Wesentlichen aus einem Anprallkörper (4) aus einem metallischen, verschleißfesten Werkstoff, der zur Erzeugung akustischer Signale durch Anprall von Feststoffpartikeln

eines Granulats eingerichtet ist, die sich als Körperschallwellen in dem Anprallkörper (4) räumlich ausbreiten. Des Weiteren weist die Messeinrichtung eine Halterung (2) zum Halten des Anprallkörpers (4) in einem Förderstrom auf, in dem die Feststoffpartikel in einer Förderrichtung (7) hydraulisch durch eine Rohrleitung (1) transportiert werden.

Der Anprallkörper (4) weist ein Anprallteil (4.1) und ein Halteteil (4.2) auf. Das besser in Abbildung 3 erkennbare Halteteil (4.2) umfasst einen unteren Abschnitt (4.3), der sich senkrecht von einer Halteplatte (4.4) erstreckt. Der untere Abschnitt (4.3) greift in einen Schlitz (10) ein, der in den Mantel der Rohrleitung (1) parallel zu deren Längsachse (9) eingebracht ist (vgl. Abbildung 1). Der untere Abschnitt (4.3) schließt bündig mit der Innenwand der Rohrleitung (1) ab, so dass in das Innere der Rohrleitung (1) ausschließlich das Anprallteil (4.1) des Anprallkörpers (4) hineinragt.

Das Anprallteil (4.1), dessen Druckwiderstand in der Anströmrichtung (8) des Anprallteils (4.1) kleiner als der Reibungswiderstand ist, ist stromlinienförmig ausgebildet. In weiterführenden Versuchen hat sich herausgestellt, dass das Anprallteil (4.1) mit gleich guten Messergebnissen, jedoch geometrisch wesentlich einfacher, als längsangeströmte ebene Platte ausgeführt werden kann.

Wie insbesondere aus den Schnittdarstellungen in Abbildung 2 erkennbar, ist das Profil des Anprallteils (4.1) symmetrisch zu einer Symmetrieebene (11) ausgebildet. Der Richtungsvektor der Anströmrichtung (8) liegt in der Symmetrieebene (11). Die

größte Länge des Profils des Anprallteils (4.1) in dessen Anströmrichtung (8) befindet sich unmittelbar an dem Übergang zu dem Halteteil (4.2). Sie ist mindestens zehnmal so groß wie die größte Dicke des Profils senkrecht zu der

5 Symmetrieebene (11) (vgl. Schnitt A-A). Die größte Dicke des Profils befindet sich ausgehend von der Profilnase (12) etwa auf halber Länge der größten Längserstreckung des Profils des Anprallteils (4.1) und quer zur Anströmrichtung (8) befindet sich die größte Dicke des Profils bei 40-50 % der

10 größten Höhe des Profils in der Symmetrieebene (11).

Vorteilhaft für die Messgenauigkeit ist es, wenn die zu der Symmetrieebene (11) symmetrisch angeordneten Seitenflächen (13) des Anprallteils (4.1) an einer Unterseite (14) zu einer

15 in der Symmetrieebene (11) liegenden Kante (15) zusammenlaufen. Die Kante (15) verläuft parabelförmig ausgehend von der Profilnase (12), wie dies in der Seitenansicht in Abbildung 2 erkennbar ist. Die Profilnase (12) wird bei der dargestellten Geometrie des Anprallteils

20 (4.1) durch einen nahezu punktförmigen Bereich auf der Oberfläche des Anprallteils gebildet, der in Anströmrichtung (8) als erstes mit den Feststoffpartikeln in dem Förderstrom in Kontakt gelangt.

25 Der als Beschleunigungssensor ausgeführte mehrachsige Schwingungsaufnehmer (5) ist an der Stirnseite des Halteteils (4.2) außerhalb der Rohrleitung (1) mittels einer Schraube (6) verschraubt und dadurch gut wellenleitend mit dem Anprallkörper (4) verbunden. Die drei Messachsen des

30 mehrachsigen Schwingungsaufnehmers (5) sind entsprechend der x-, y- und z- Achse eines orthogonalen Koordinatensystems zueinander angeordnet und der Schwingungsaufnehmer (5) ist

derart an dem Halteteil (4.2) angeordnet und ausgerichtet, dass die x-Achse des Schwingungsaufnehmers parallel zur Anströmrichtung (8) des Anprallteils (4.1) verläuft.

5 Die Befestigung des Anprallkörpers (4) an der Rohrleitung (1) erfolgt mittels einer als Sockel ausgeführten Halterung (2), die detailliert in Abbildung 4 dargestellt ist. Aus den Schnitten A-A, B-B ist erkennbar, dass die Unterseite der Halterung (2) an die Kontur der des Mantels der Rohrleitung
10 (1) angepasst ist. Die Halterung (2) weist ebenfalls einen Schlitz (16) auf, der mit dem Schlitz (10) in dem Mantel der Rohrleitung (1) fluchtet. Die Befestigung der Halterung (2) an der Rohrleitung (1) erfolgt über Schraubverbindungen. Die Halteplatte (4.4) des Halteteils (4.2) wird auf die ebene
15 Oberfläche der Halterung (2) aufgelegt und mit dieser verschraubt. Zwischen der Halterung (2) und der Halteplatte (4.4) ist eine Schwingungsisolierung (3) angeordnet (vgl. Abbildung 1), die zugleich als Dichtung zwischen der Halteplatte (4.4) und der Halterung (2) dient.

20

Die von dem mehrachsigen Schwingungsaufnehmer (5) in elektrische Signale umgeformten akustischen Signale werden mittels einer Signalleitung zu einer in den Abbildungen nicht dargestellten Signalverarbeitungseinheit, beispielweise einem
25 Personal Computer, geführt. In der Signalverarbeitungseinheit werden die elektrischen Signale des Schwingungsaufnehmers (5) verarbeitet, um die Korngrößenverteilung aus den akustischen Signalen unter Berücksichtigung der Strömungsenergie zu ermitteln.

30

Versuche

- 5 Mit einer Messeinrichtung zur Durchführung des Verfahrens zum kontinuierlichen Bestimmen der Korngrößenverteilung wurden verschiedene Versuche durchgeführt:

Versuchsaufbau

10

In einem hydraulischen Kreislauf bestehend aus einer regelbaren Feststoffpumpe, einer Druckleitung, einer Saugleitung und einem Vorratsbehälter für das Granulat wurden in der Druckleitung ein stromlinienförmiger Anprallkörper (4) gemäß der Erfindung und in geringem Abstand dazu ein kreiszylindrischer Anprallkörper gemäß dem aktuellen Stand der Technik eingebaut. An dem stromlinienförmigen Anprallkörper (4) gemäß der Erfindung wurde ein mehrachsiger Schwingungsaufnehmer (5) und an dem zylindrischen Anprallkörper ein einachsiger Schwingungsaufnehmer befestigt.

15

20

Versuchsdurchführung

In einer ersten Testreihe wurde nur Wasser mit drei unterschiedlichen Leistungen der Feststoffpumpe gefördert. Die Tests dieser Testreihe sind mit Test 1 bis Test 3 gekennzeichnet.

25

In einer zweiten Testreihe wurde bei konstanter Leistung der Feststoffpumpe und Beibehaltung der Korngrößenverteilung (und zwar mit der Korngrößenverteilung von Test 7 in der Abbildung 5) drei verschiedene Tests mit unterschiedlichen

30

Feststoffkonzentrationen eines Sand-Wasser-Gemisches gefahren und die dazugehörigen Signale aufgezeichnet. Die Tests dieser Testreihe sind mit Test 4 bis Test 6 gekennzeichnet.

- 5 In einer dritten Testreihe wurden bei konstanter Leistung der Feststoffpumpe und Beibehaltung der Feststoffkonzentration eines Sand-Wasser-Gemisches vier verschiedene Sande mit unterschiedlichen Korngrößenverteilungen (siehe Abbildung 5) getestet und die Signale aufgezeichnet. Die Tests dieser
10 Testreihe sind mit Test 7 bis Test 10 gekennzeichnet.

Die aufgezeichneten elektrischen Signale der jeweiligen Test 1 bis Test 10 wurden einer Frequenzanalyse (Signalverarbeitung) unterzogen. Die Ergebnisse sind in den
15 Abbildungen 6 - 13 dargestellt, wobei in jedem Diagramm zum besseren Vergleich die Ergebnisse der Testreihen Test 1 bis Test 3 (Testserie mit reinem Wasser ohne Sand) ebenfalls dokumentiert sind.

- 20 In der Abbildung 6 sind die Frequenzanalysen der Testreihen Test 1 bis Test 6 für den konventionellen Anprallkörper (zylindrische Form) dokumentiert. Die Veränderung der Strömungsenergie, sei es in Form von Steigerung der Feststoffpumpenleistung in Test 1 bis Test 3 mit Wasser oder
25 durch Steigerung der Feststoffkonzentration in Test 4 bis Test 6 mit Sand-Wassergemisch, nimmt einen direkten Einfluss auf die Signalintensität. Ab einer Frequenz von 10 kHz steigt die Intensität proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und Feststoffkonzentration des Förderstroms. Die
30 Signaleigenschaften sind sehr stark abhängig von der Strömungsenergie (Erhöhung der Feststoffpumpenleistung bzw. Erhöhung der Feststoffkonzentration).

In den Abbildungen 7 bis 9 sind die Ergebnisse derselben Testreihe Test 1 bis Test 6 für die stromlinienförmige Ausführung des Anprallkörpers (4) und den Einsatz eines
5 mehrachsigen Schwingungsaufnehmers (5) gemäß der Erfindung dargestellt.

Die Testergebnisse zeigen, dass der Einsatz eines stromlinienförmigen Anprallkörpers in Kombination mit einem
10 mehrachsigen Schwingungsaufnehmer den Einfluss der Veränderung der Strömungsenergie, d.h. den Einfluss der Feststoffkonzentration und/oder Geschwindigkeit, auf die Signaleigenschaften herabsetzt.

15 In der Abbildung 10 sind die Frequenzanalysen der Testreihe Test 1 bis Test 3 und Test 7 bis Test 10 für den konventionellen Anprallkörper (zylindrische Form) dokumentiert.

20 Die Veränderung der Korngrößenverteilung in Test 7 bis Test 10 führt zu einem starken Anstieg der Signalintensitäten in dem gesamten Frequenzspektrum. Die Reihenfolge der Intensitäten zu den einzelnen Tests in Abbildung 10 entspricht jedoch nicht der Reihenfolge der

25 Korngrößenverteilung der Proben (Feinheit bzw. Grobheit). Bis zu einer Frequenz von 8 kHz sind die Signalintensitäten ungeordnet und schneiden sich. In einem Frequenzbereich zwischen 8 und 11 KHz sind die Signalintensitäten der Test 7 und Test 8 gleich, obwohl der Sand im Test 7 feiner ist als
30 der Sand im Test 8. Anschließend ist bis zur Frequenz 18 kHz die Signalintensität der feineren Mischung Test 7 sogar höher als die Signalintensität der gröberen Mischung von Test 8.

Anschließend bis zur Frequenz 25 kHz ist die Signalintensität der feineren Mischung Test 7 (mittlerer Korngröße 40 Mikrometer) sogar höher als die Signalintensität der sehr groben Mischung von Test 9 mit einer mittleren Korngröße von 100 Mikrometer.

Erfahrungsgemäß erlaubt eine solche Signaleigenschaft, die sehr stark von der Strömungsenergie (Feststoffkonzentration und Geschwindigkeit), jedoch sehr gering von der Korngrößenveränderung des Granulats im Förderstrom abhängig ist, kein zuverlässiges Bestimmen der Korngrößenverteilung des Granulats in einem Förderstrom in Echtzeit.

In den Abbildungen 11 bis 13 sind die Ergebnisse derselben Testreihen Test 1 bis Test 3 und Test 7 bis Test 10 für die stromlinienförmige Ausführung des Anprallkörpers in Kombination mit dem mehrachsigen Schwingungsaufnehmer gemäß der Erfindung dargestellt.

Der Einfluss der Korngrößenverteilung der Proben auf die Signalintensität der jeweiligen Wellenausbreitungsrichtungen sind unterschiedlich. Von wesentlicher Bedeutung ist der Umstand, dass in allen Wellenausbreitungsrichtungen die Signalintensität proportional zu Korngrößenverteilung der Proben ist. Die Signalintensität des Tests 7 (mittlerer Korngröße 40 Mikrometer) ist kleiner als die Signalintensität des Tests 8 (mittlere Korngröße 60 Mikrometer) und die Signalintensität des Tests 8 ist kleiner als die Signalintensität des Tests 9 (mittlere Korngröße 100 Mikrometer) und schließlich ist die Signalintensität des Tests 10 (mittlere Korngröße 180 Mikrometer) höher als die Signalintensität des Tests 9.

Die dargestellte strömungslinienförmige Ausführung des Anprallkörpers (4) gemäß der Erfindung reduziert den Einfluss der Druckwiderstandskomponente des Strömungswiderstands auf die Signalintensität (siehe zweite Testreihe) und erhöht die Abhängigkeit der Signaleigenschaften von der Korngrößenverteilung des Förderstroms. Hinzu kommt die Möglichkeit der Nutzung von unterschiedlichen Signaleigenschaften von drei Wellenausbreitungsrichtungen für das Bestimmen der Korngrößenverteilung des Massenstroms.

Weitere Analysen der Signaleigenschaften der elektrischen Signale, die beim Einsatz der Messvorrichtung gemäß der Erfindung aufgezeichnet wurden, zeigen, dass in einem bevorzugten Frequenzspektrum zwischen den für die Strömungsenergie maßgeblichen Feststoffkonzentrationen (Strömungsenergie) und den Signaleigenschaften in zwei Wellenausbreitungsrichtungen (berechnete Strömungsenergie) ein funktionaler Zusammenhang besteht, auf Basis dessen die Strömungsenergie in dem Förderstrom berechnet werden kann. In der Abbildung 14 ist der funktionale Zusammenhang (Normierfunktion) dargestellt. Dies erlaubt es, zur Bestimmung der Strömungsenergie das Verhältnis der elektrischen Signale von zwei Messachsen des mehrachsigen Schwingungsaufnehmers zu verwenden.

Die Signalanalyse und Auswertung der Ergebnisse zeigt weiterhin, dass zwischen den energienormierten Signalintensitäten in den jeweiligen Ausbreitungsrichtungen und der Korngrößenverteilung der Proben ein weiterer funktionaler Zusammenhang besteht. Dieser funktionale

Zusammenhang (Kalibrierfunktion) ist in der Abbildung 15 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mittels der Erfindung die
5 Korngrößenverteilung der Feststoffpartikel in einem
Massenstrom auch bei veränderlicher Strömungsenergie des
Förderstroms in Echtzeit zuverlässig ermittelt werden kann.

Nr.	Bezeichnung
1	Rohrleitung
2	Halterung
3	Schwingungsisolierung
4	Anprallkörper
4.1	Anprallteil
4.2	Halteteil
4.3	Unterer Abschnitt
4.4	Halteplatte
5	Mehrachsiger Schwingungsaufnehmer
6	Schraube
7	Förderrichtung
8	Anströmrichtung
9	Längsachse
10	Schlitz
11	Symmetrieebene
12	Profilnase
13	Seitenfläche
14	Unterseite
15	Kante
16	Schlitz

Patentansprüche

1. Verfahren zum kontinuierlichen Bestimmen der
Korngrößenverteilung von einem Granulat bestehend aus
5 Feststoffpartikeln mit unterschiedlichen Korngrößen
umfassend die Schritte

- Transportieren der Feststoffpartikel in einer
Förderrichtung (7) in einen Förderstrom, wobei die
10 Feststoffpartikel mit einem als Wellenleiter
einggerichteten Anprallkörper (4) kollidieren und
akustische Signale erzeugen, die sich in jedem
Anprallkörper (4) als Körperschallwellen ausbreiten,

15 - Erfassen der akustischen Signale und Umformen in
elektrische Signale,

- Erfassen der Strömungsenergie des Förderstroms, wobei
die Strömungsenergie durch die Geschwindigkeit und
20 Konzentration bzw. Schüttdichte der Feststoffpartikel
des Granulats bestimmt wird,

- Bestimmung der Korngrößenverteilung durch
Signalverarbeitung der elektrischen Signale unter
25 Berücksichtigung der erfassten Strömungsenergie,

dadurch gekennzeichnet, dass

- der Anprallkörper (4) ein Halteteil (4.2) und ein
30 Anprallteil (4.1) umfasst, wobei das Anprallteil
(4.1) in einer Anströmrichtung (8) von
Feststoffpartikeln des Granulats umströmt wird,

- der sich aus dem Druckwiderstand und dem Reibungswiderstand zusammensetzende Strömungswiderstand des umströmten Anprallteils (4.1) derart bestimmt wird, dass der Druckwiderstand kleiner als der Reibungswiderstand ist,
 - das Erfassen der Ausbreitung der akustischen Signale in dem Anprallkörper (4) und das Umformen in elektrische Signale mit Hilfe eines Schwingungsaufnehmers (5) erfolgt,
 - zur Bestimmung der Korngrößenverteilung unter Berücksichtigung der Strömungsenergie des Förderstroms die elektrischen Signale des Schwingungsaufnehmers (5) verwendet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, das das Erfassen der räumlichen Ausbreitung der akustischen Signale in dem Anprallkörper (4) und das Erfassen der Strömungsenergie des Förderstroms sowie das Umformen in elektrische Signale mit Hilfe eines mehrachsigen Schwingungsaufnehmers (5) mit mindestens drei Messachsen erfolgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Anteil des Druckwiderstandes maximal 30% des Strömungswiderstandes beträgt.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Anteil des Druckwiderstandes maximal 10% des Strömungswiderstandes beträgt.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Strömungswiderstand herabgesetzt wird, in dem Reibungswiderstand an der Oberfläche des Anprallteils reduziert wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Oberfläche eine Rautiefe von maximal 20 µm aufweist.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Strömungswiderstand herabgesetzt wird, in dem die Stirnfläche des Anprallteils (4.1), das heißt dessen in Anströmrichtung (8) auf eine dazu senkrechte Fläche projizierte Querschnittsfläche maximal 10% der gesamten von dem Förderstrom umströmten Oberfläche des Anprallteils (4.1) beträgt.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die drei Messachsen des mehrachsigen Schwingungsaufnehmers (5) entsprechend der x-, y- und z-Achse eines orthogonalen Koordinatensystems zueinander angeordnet sind und der Schwingungsaufnehmer (5) derart an dem Halteteil (4.2) angeordnet wird, dass die x-Achse des Schwingungsaufnehmers (5) parallel zur Anströmrichtung (8) des Anprallteils (4.1) verläuft.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 - 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Bestimmung der Strömungsenergie das Verhältnis der elektrischen Signale von zwei Messachsen des einen Schwingungsaufnehmers (5) verwendet wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 - 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Bestimmung der Korngrößenverteilung unter Berücksichtigung der Strömungsenergie des Förderstroms die elektrischen Signale der mindestens drei Messachsen des einen Schwingungsaufnehmers (5) verwendet werden.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Halteteil (4.2) des Anprallkörpers (4) schwingungsisoliert in dem Förderstrom gehalten wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass
- vor Beginn der Signalverarbeitung der elektrischen Signale zum Bestimmen der Korngrößenverteilung mindestens eine Normierfunktion erstellt wird, in dem ein Zusammenhang zwischen den elektrischen Signalen von zwei Messachsen des Schwingungsaufnehmers (5) zur Bestimmung der Strömungsenergie und der Konzentration bzw. Schüttdichte der Feststoffpartikel des Granulats von während der Signalerfassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben ermittelt wird,
 - vor Beginn der Signalverarbeitung der elektrischen Signale zum Bestimmen der Korngrößenverteilung mindestens eine Kalibrierfunktion erstellt wird, in dem ein Zusammenhang zwischen den mit der Normierfunktion verarbeiteten elektrischen Signalen sämtlicher Messachsen des Schwingungsaufnehmers (5) und der Korngrößenverteilung von den während der

Signalerfassung zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommenen Proben ermittelt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass

5

- die Signalverarbeitung der elektrischen Signale zum Bestimmen der Korngrößenverteilung folgende Schritte umfasst:

10

- Normieren der von den mindestens drei Messachsen des Schwingungsaufnehmers zur Bestimmung der Strömungsenergie erfassten elektrischen Signale mit der Normierfunktion, um die Abhängigkeit der erfassten elektrischen Signale sämtlicher Messachsen zur Bestimmung der Korngrößenverteilung von der Strömungsenergie zu eliminieren,

15

20

- Ermitteln der Korngrößenverteilung durch Anwenden der Kalibrierfunktion auf die normierten elektrischen Signale sämtlicher Messachsen.

14. Messeinrichtung zur Durchführung eines Verfahrens zum kontinuierlichen Bestimmen der Korngrößenverteilung eines Granulats bestehend aus Feststoffpartikeln mit unterschiedlichen Korngrößen, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 13, umfassend

25

30

- einen Anprallkörper (4) mit einem Halteteil (4.2) und einem von Feststoffpartikeln des Granulats umströmbaren Anprallteil (4.1) mit einer Anströmrichtung (8) für die Feststoffpartikel des

15. Messeinrichtung nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen der Halterung (2) und dem Halteteil (4.2) des Anprallkörpers (4) eine Schwingungsisolierung (3) angeordnet ist.

5

16. Messeinrichtung nach Anspruch 14 oder 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Anprallteil (4.1) stromlinienförmig ist.

10 17. Messeinrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass der sich aus dem Druckwiderstand und dem Reibungswiderstand zusammensetzende Strömungswiderstand des Anprallteils (4.1) derart bestimmt wird, dass der Druckwiderstand in
15 Anströmrichtung (8) maximal 10% des Strömungswiderstandes beträgt.

18. Messeinrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass der sich aus dem
20 Druckwiderstand und dem Reibungswiderstand zusammensetzende Strömungswiderstand des Anprallteils (4.1) derart bestimmt wird, dass der Druckwiderstand in Anströmrichtung (8) maximal 30% des Strömungswiderstandes beträgt.

25

19. Messeinrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Stirnfläche des Anprallteils (4.1), das heißt dessen in Anströmrichtung (8) auf eine dazu senkrechte Fläche projizierte
30 Querschnittsfläche maximal 10% der gesamten von dem Förderstrom umströmten Oberfläche des Anprallteils (4.1) beträgt.

20. Messeinrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 19,
dadurch gekennzeichnet, dass

- 5 - das Profil des Anprallteils (4.1) symmetrisch zu
 einer Symmetrieebene (11) ausgebildet ist,
- der Richtungsvektor der Anströmrichtung (8) des
 Anprallteils (4.1) in der Symmetrieebene (11) liegt,
- 10 - die größte Länge des Profils des Anprallteils (4.1)
 in Anströmrichtung (8) mindestens zehnmal so groß wie
 die größte Dicke des Profils des Anprallteils (4.1)
 senkrecht zu der Symmetrieebene ist.

15

21. Messeinrichtung nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**,
dass sich die größte Dicke des Profils ausgehend von
einer Profilnase bei 40 % - 50% der größten Länge des
Profils und bei 40 % -50 % der größten Höhe des Profils
20 des Anprallkörpers in der Symmetrieebene (11) und quer
zur Anströmrichtung (8) befindet.

22. Messeinrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 21,
dadurch gekennzeichnet, dass das Halteteil (4.2) und das
25 Anprallteil (4.1) des Anprallkörpers (4) einstückig
ausgebildet sind.

23. Messeinrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 22,
dadurch gekennzeichnet, dass der Schwingungsaufnehmer (5)
5 mindestens drei Messachsen aufweist und zum Erfassen der
räumlichen Ausbreitung der akustischen Signale und zum
Erfassen der Strömungsenergie des Förderstrom sowie zum
Umformen in elektrische Signale eingerichtet ist.

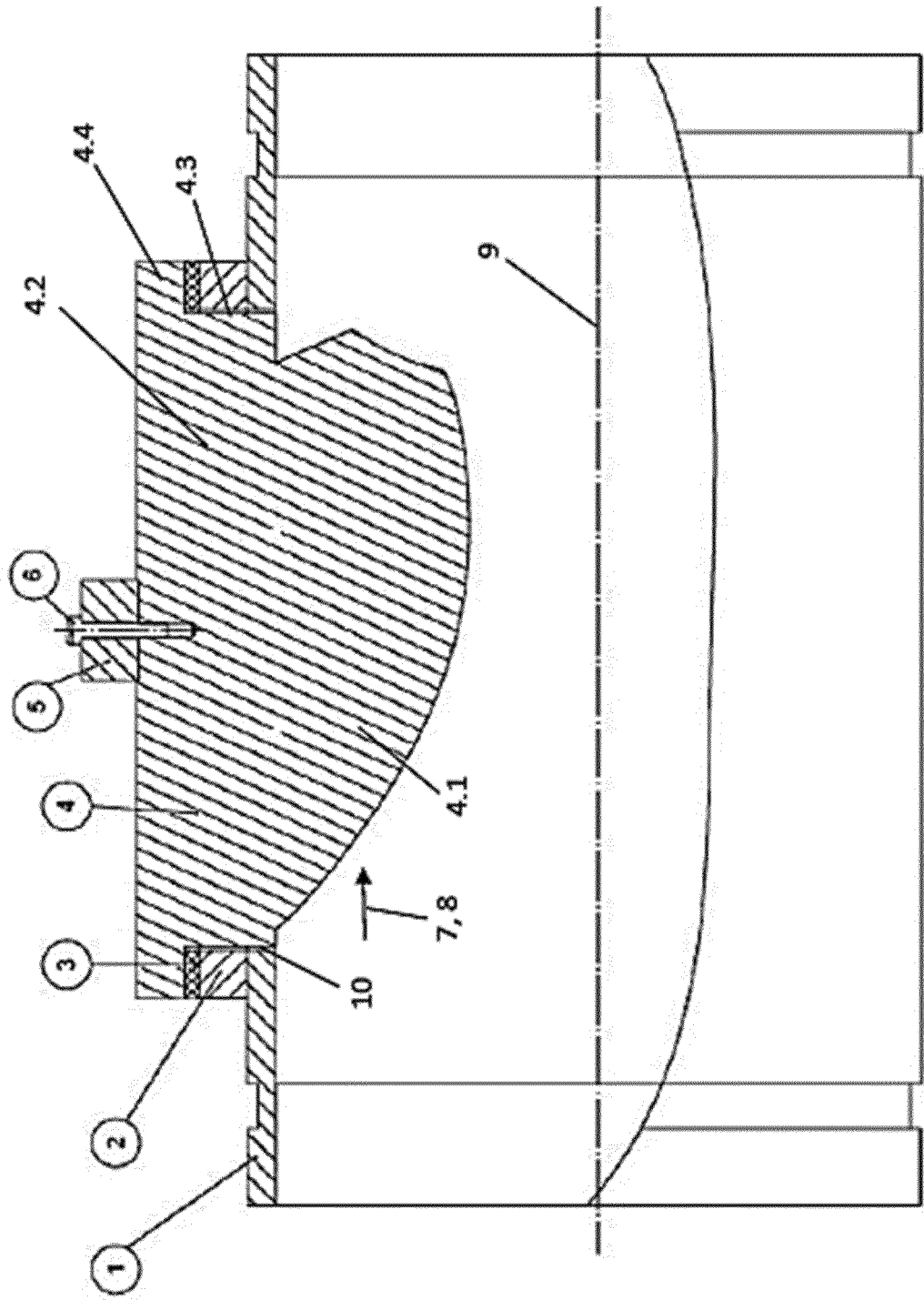


Abbildung 1

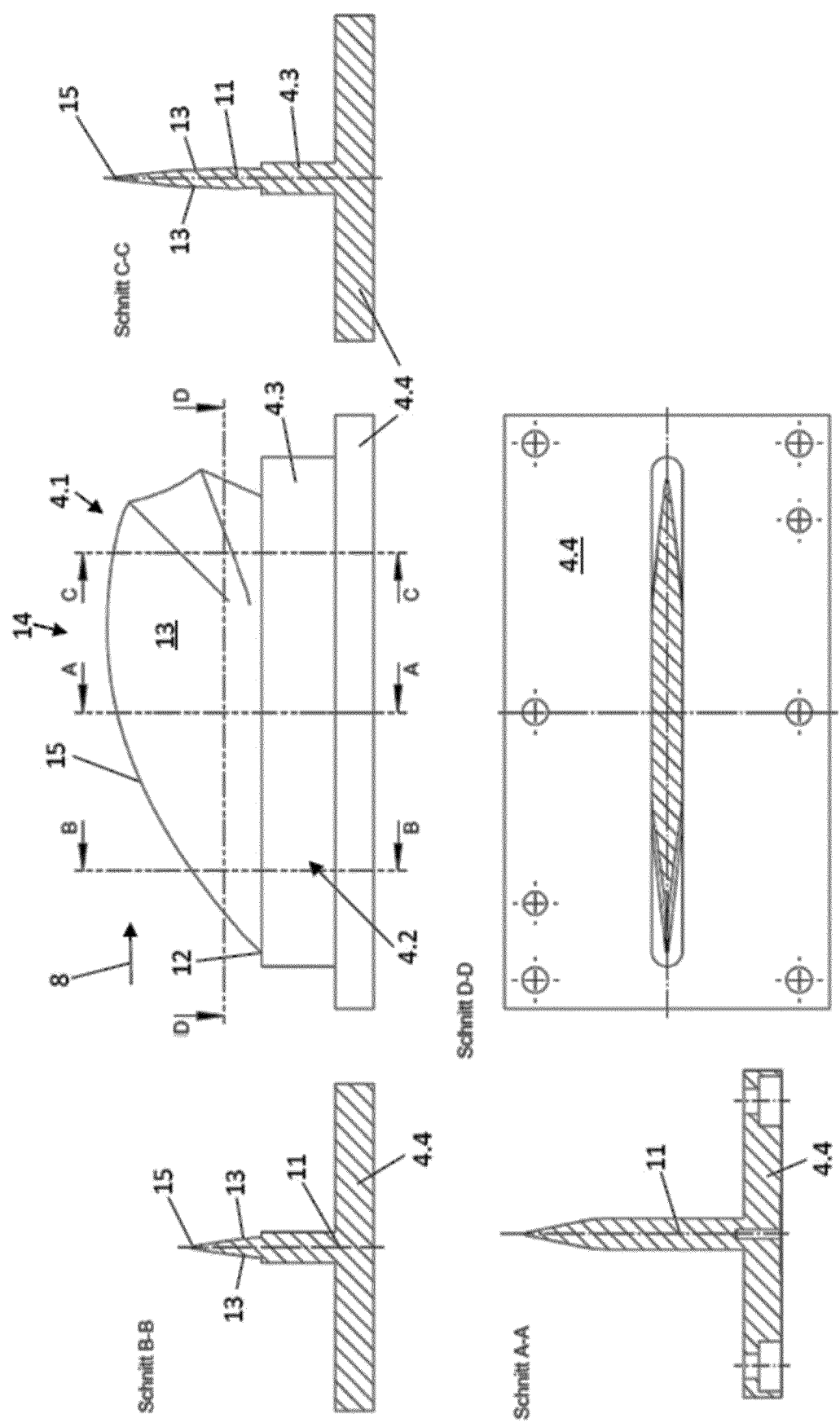


Abbildung 2

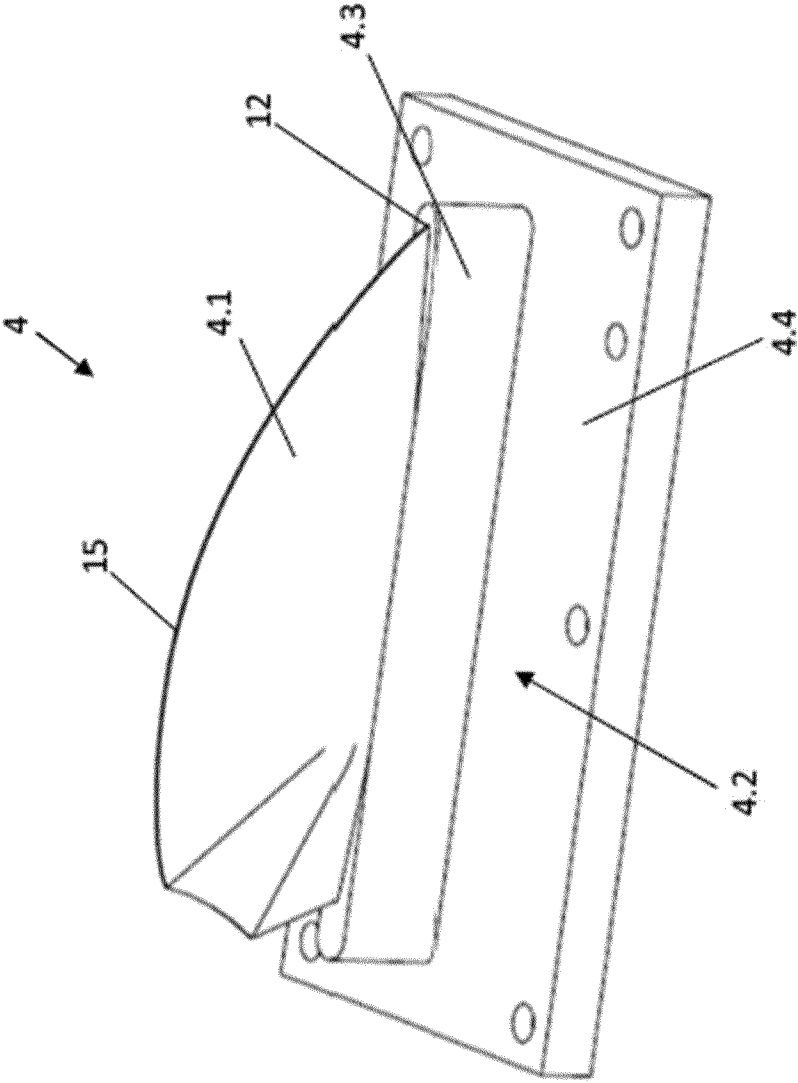


Abbildung 3

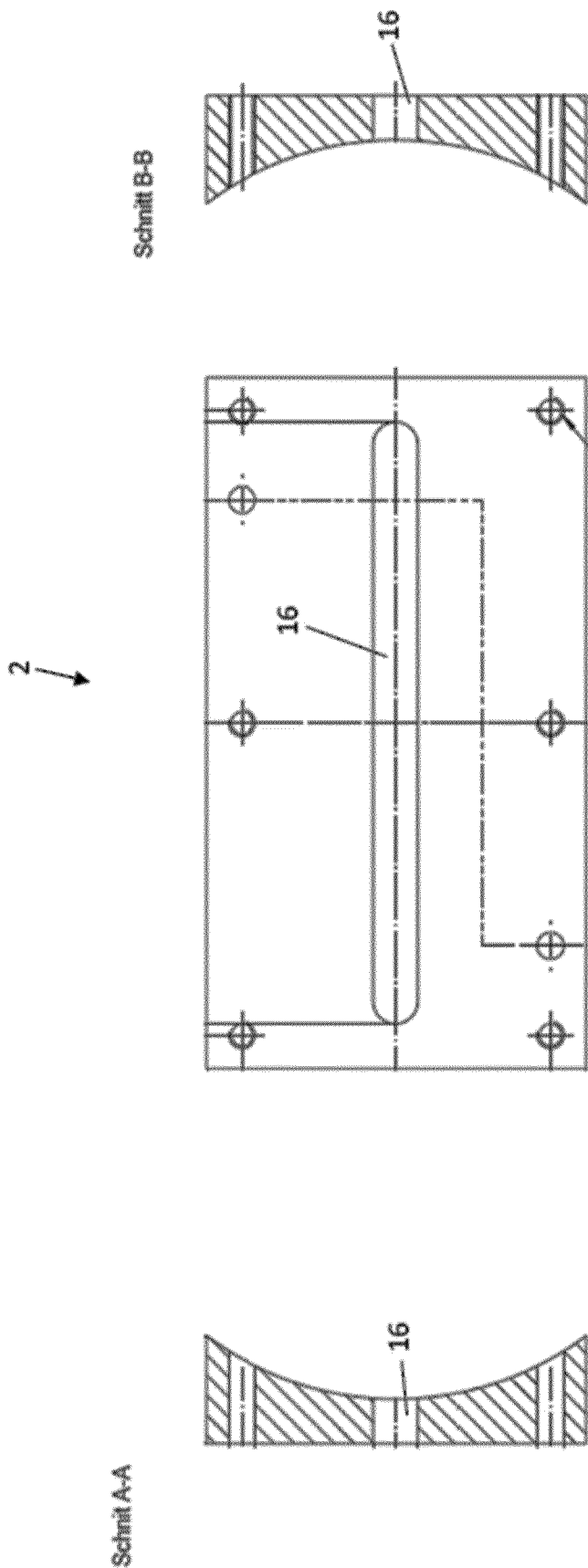


Abbildung 4

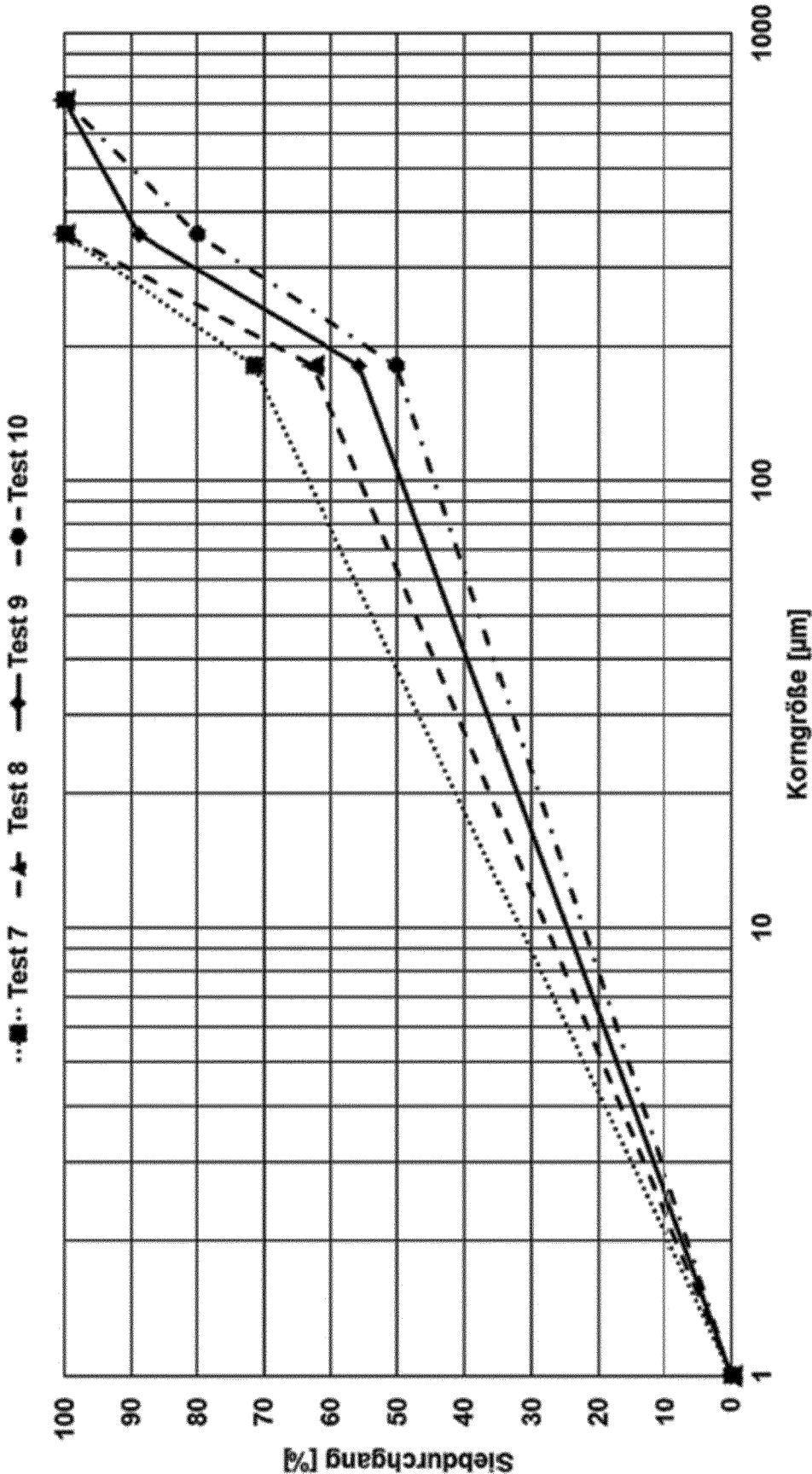


Abbildung 5

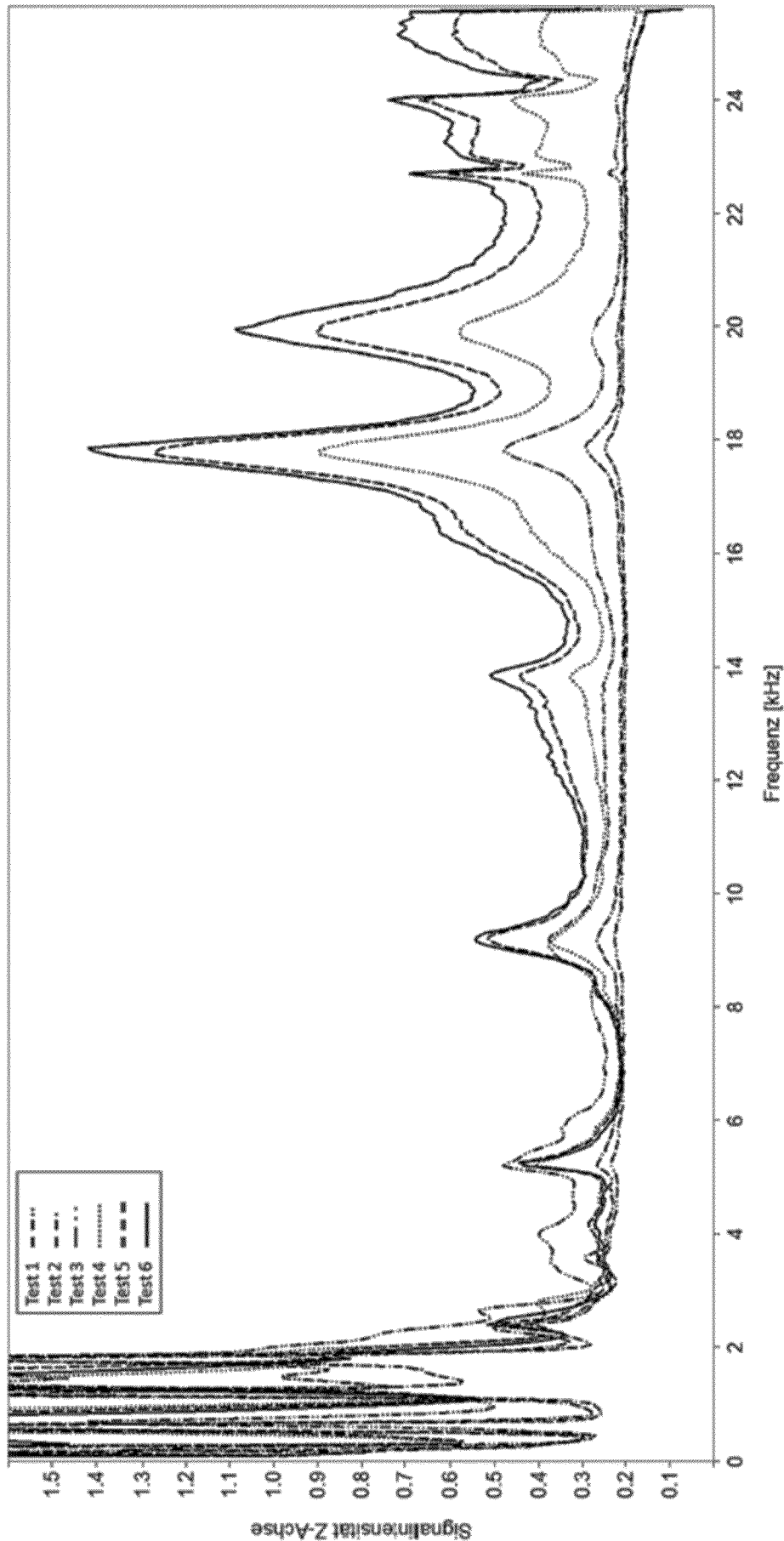


Abbildung 6

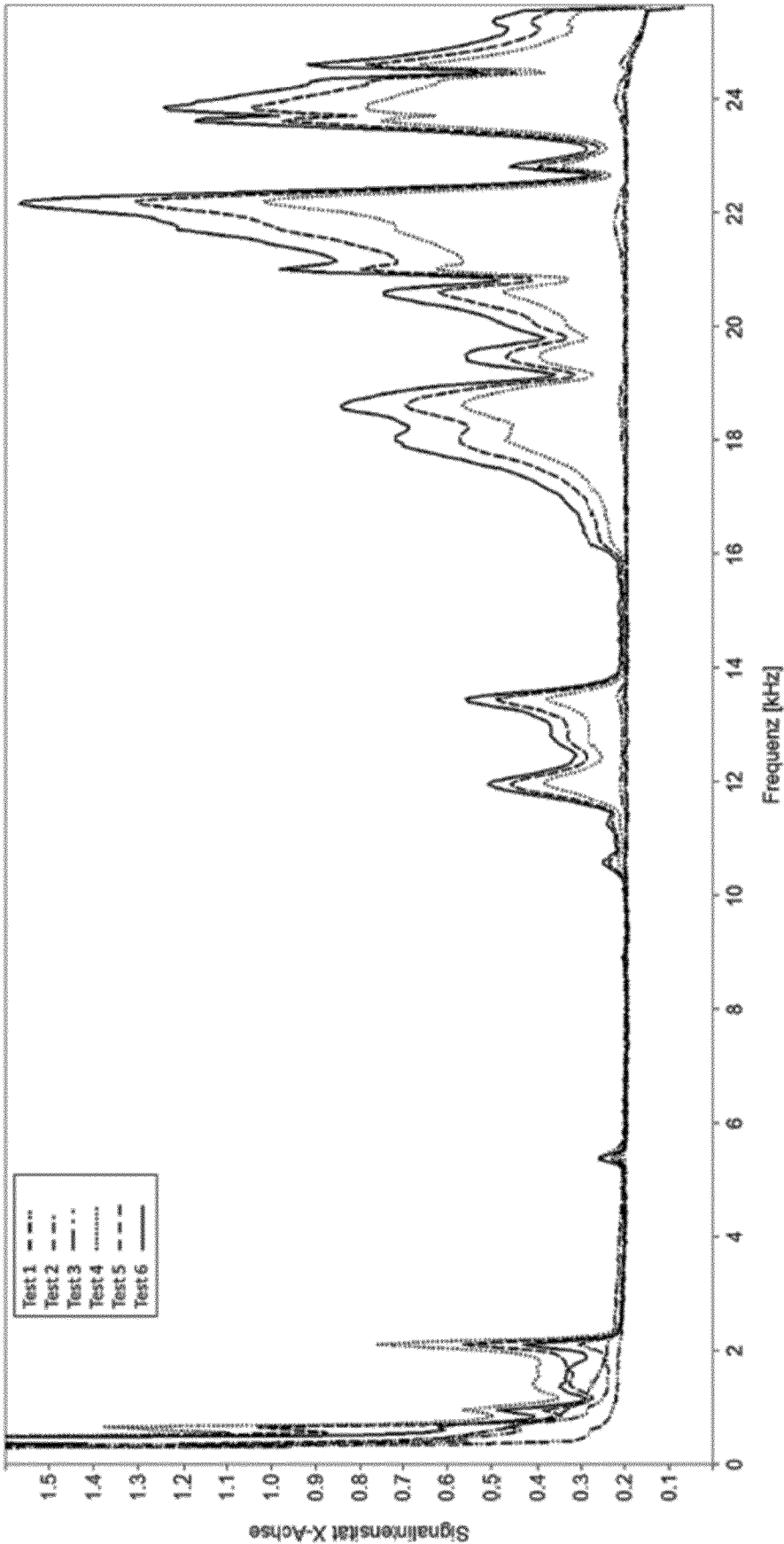


Abbildung 7

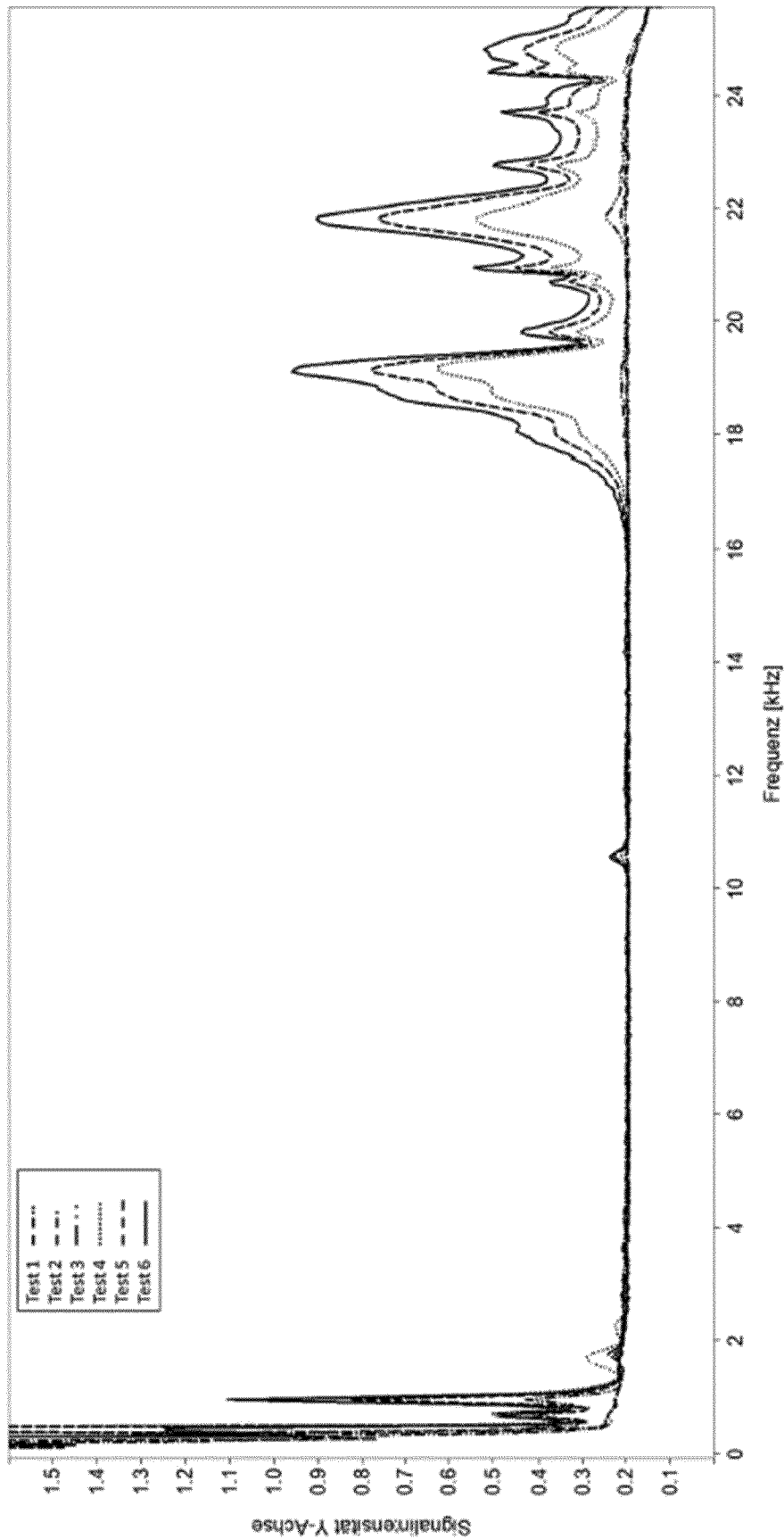


Abbildung 8

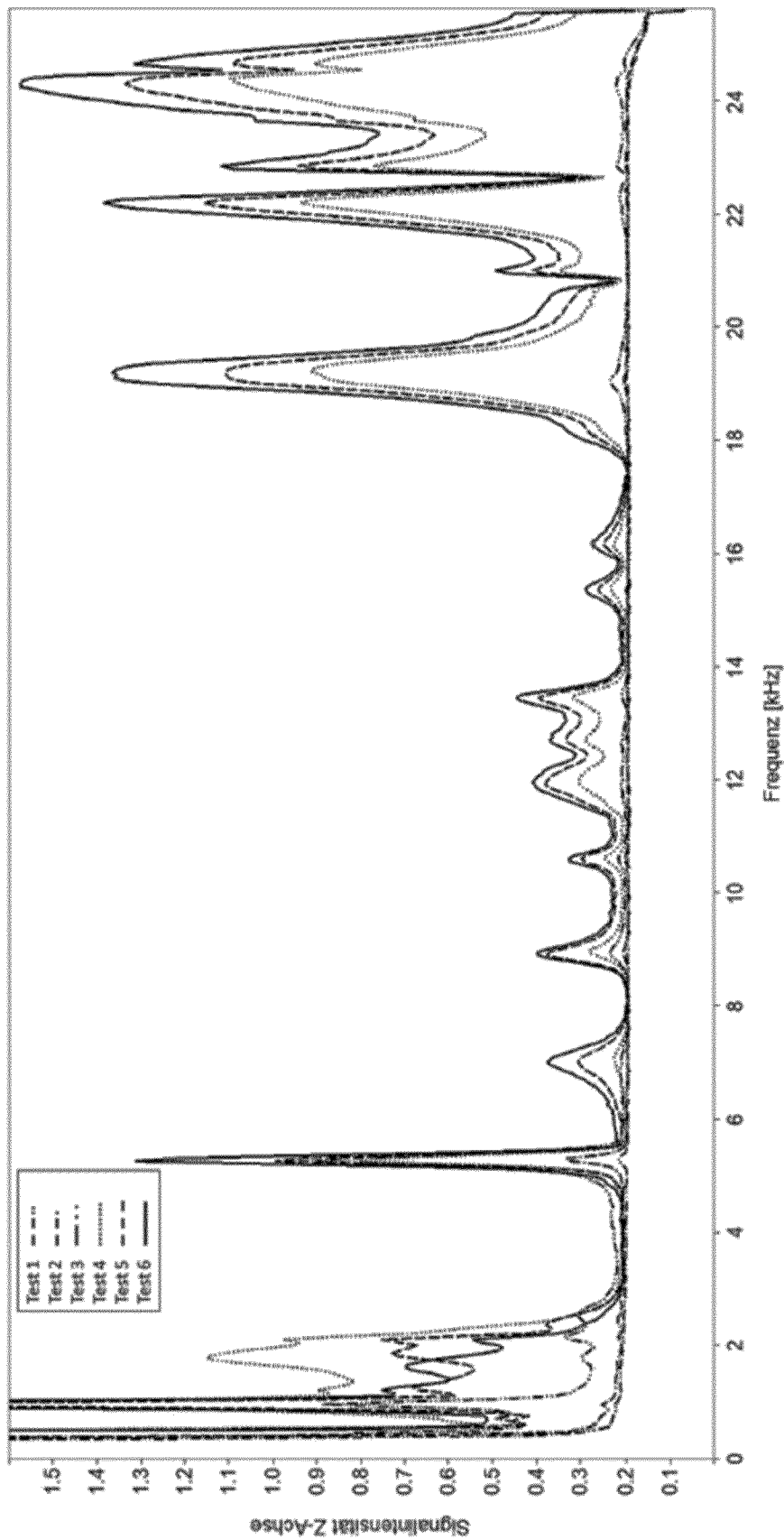


Abbildung 9

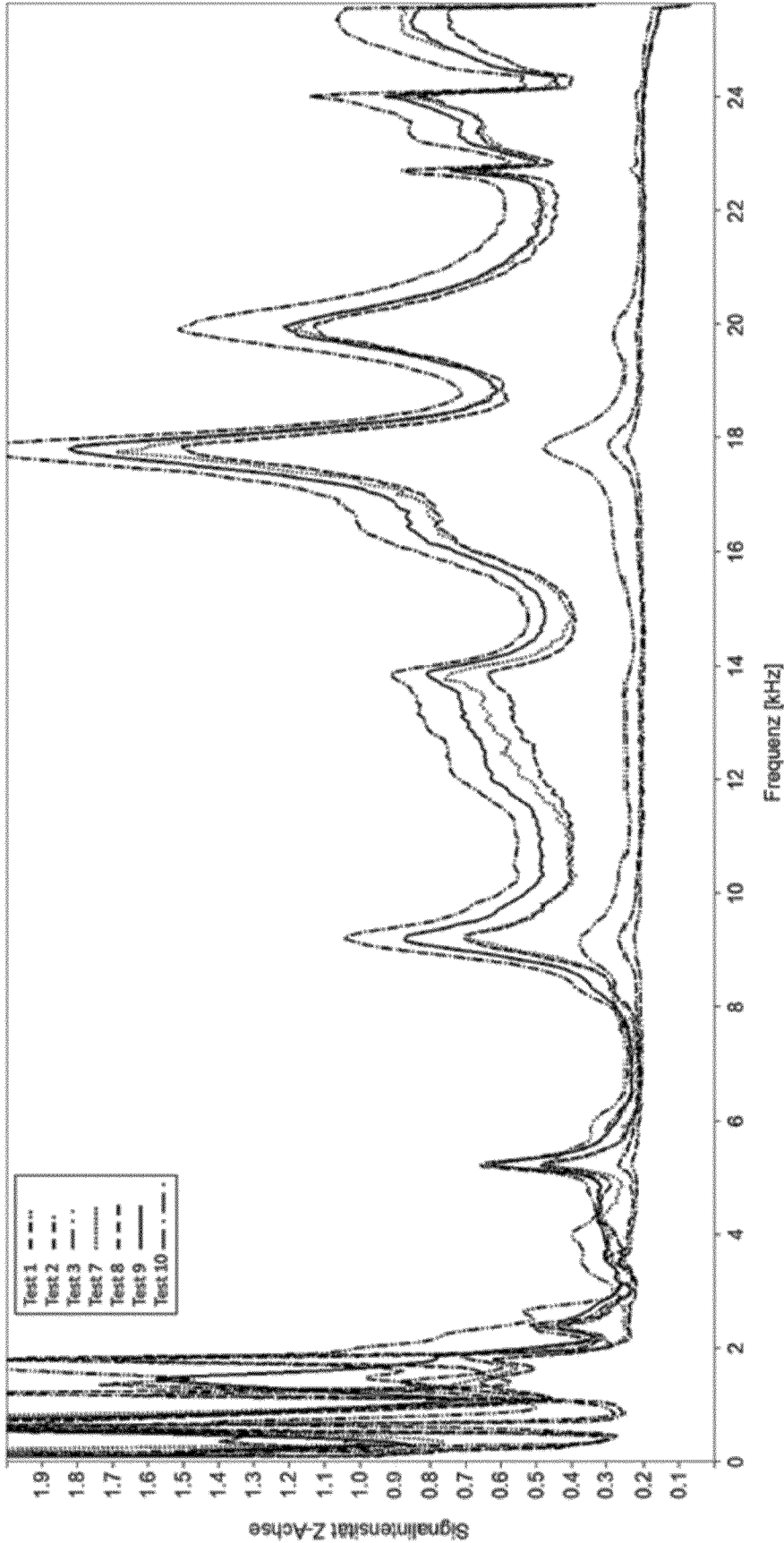


Abbildung 10

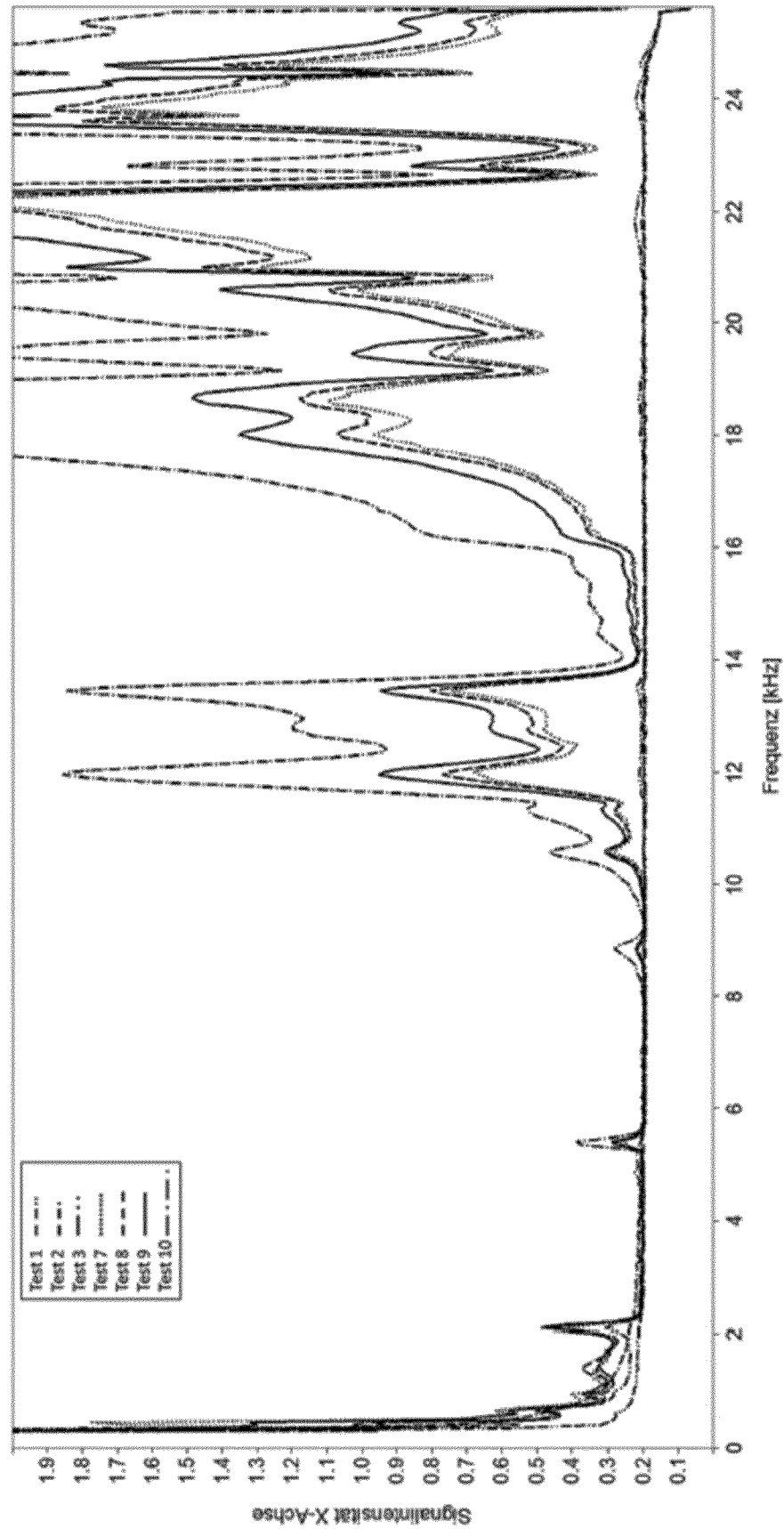


Abbildung 11

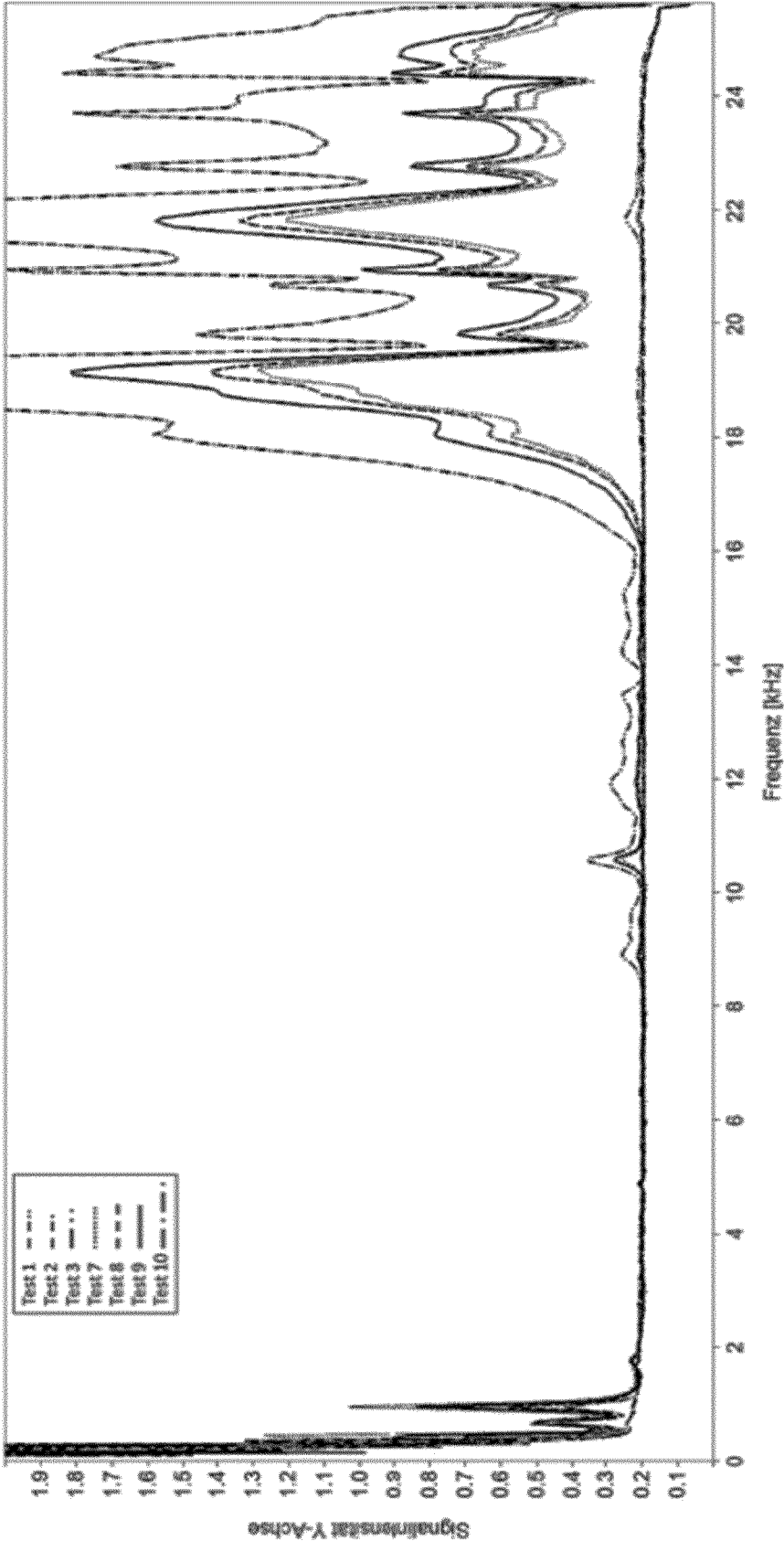


Abbildung 12

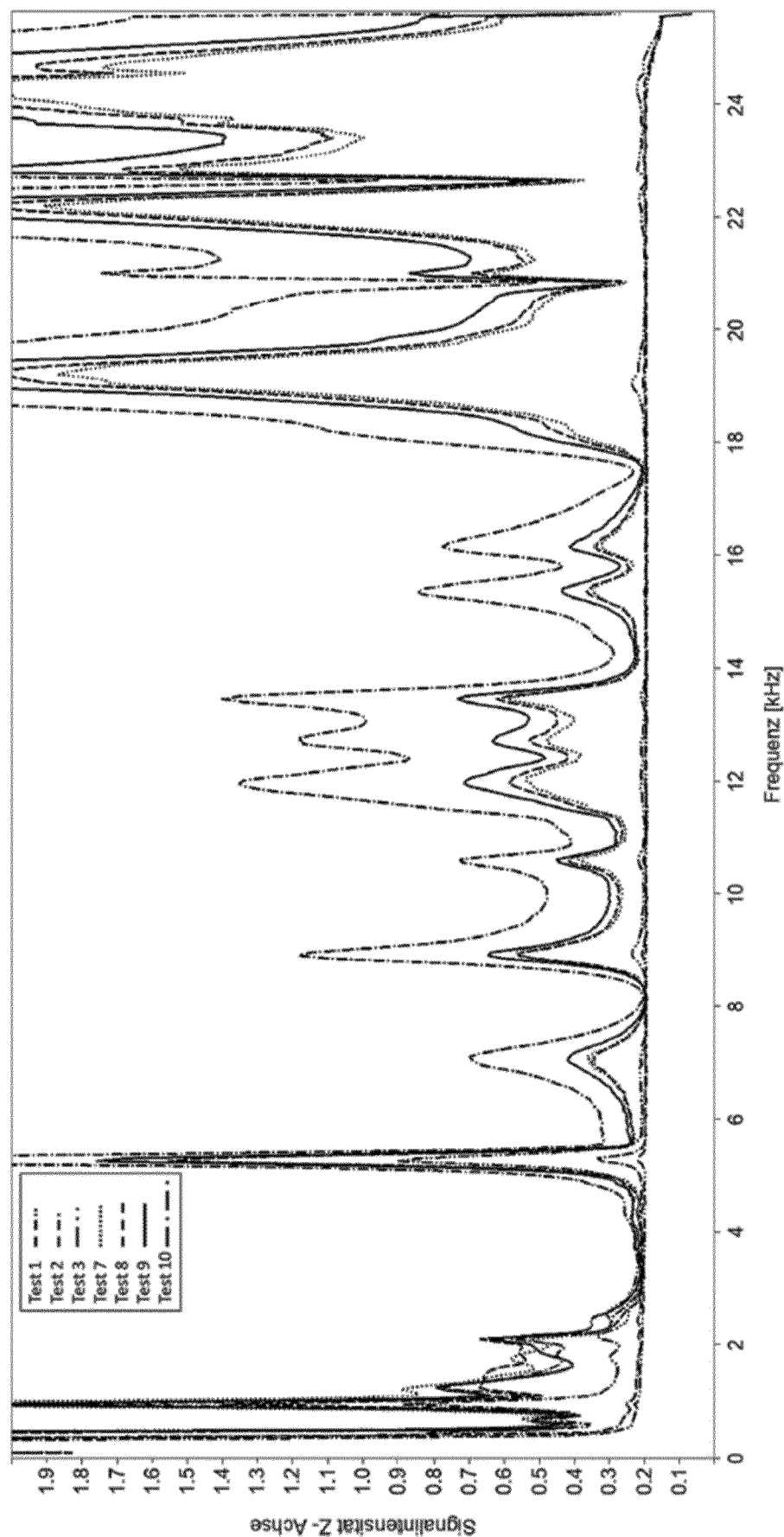


Abbildung 13

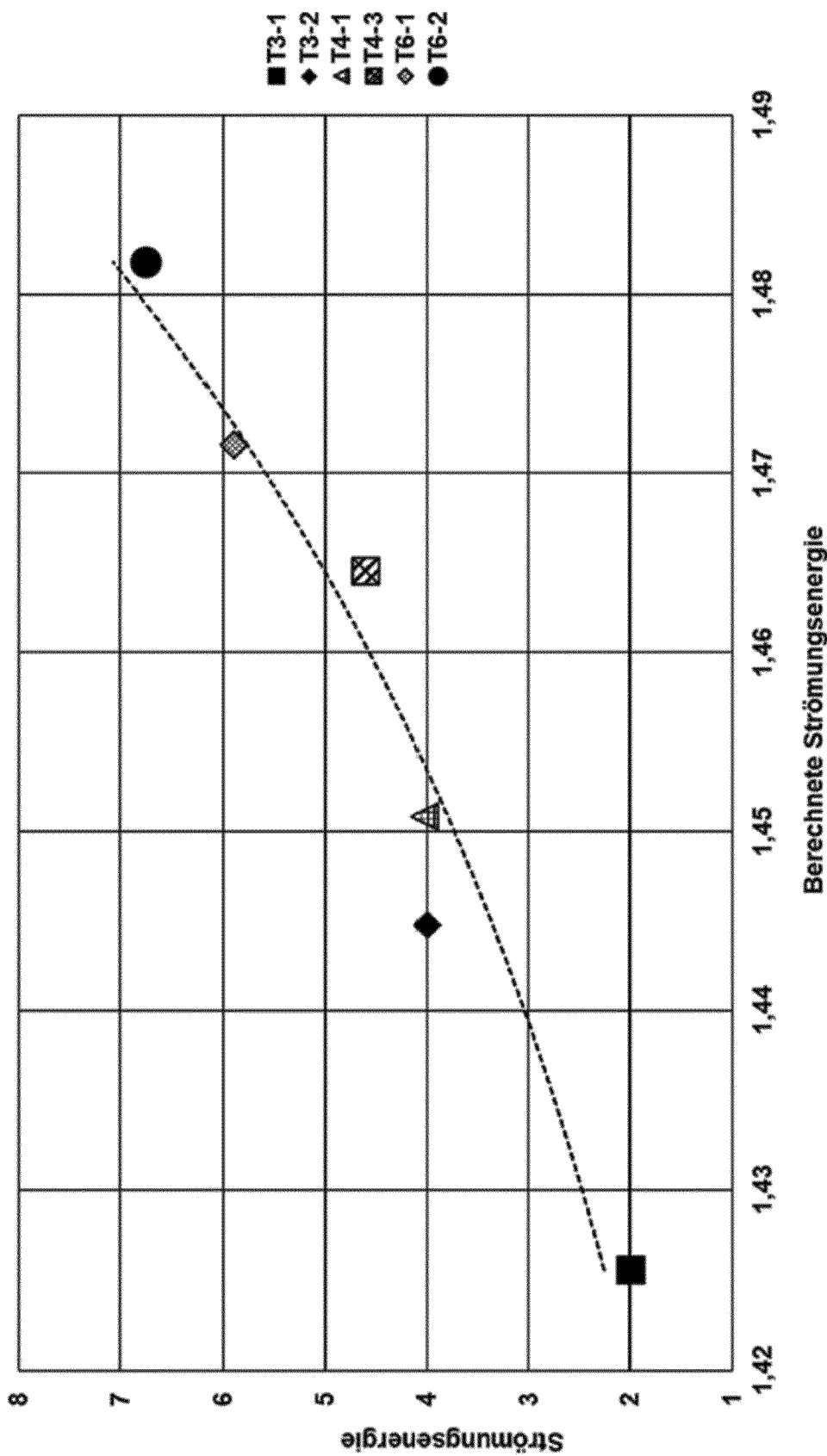


Abbildung 14

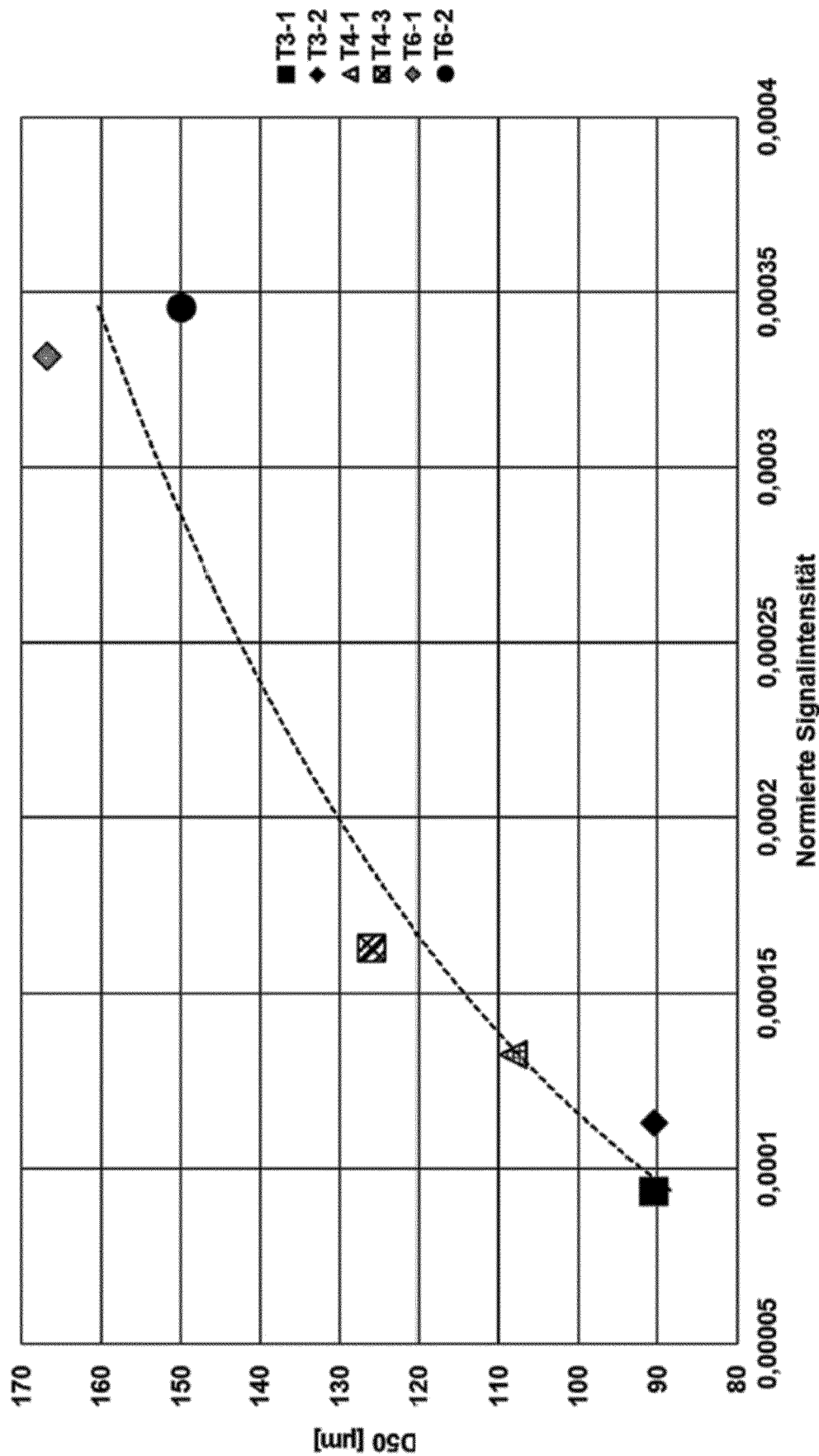


Abbildung 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/063977

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**G01N 15/02**(2024.01)i; **G01N 29/00**(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 3356813 B1 (TIPCO TUDESHKI IND PROCESS CONTROL GMBH [DE]) 17 July 2019 (2019-07-17)	1,3-6,11,14-18,22
A	cited in the application paragraphs [0026], [0036], [0042], [0044], [0045]; figure 1	2,7-10,12,13,19-21,23
A	SWANEPOEL F ET AL. "PARTICLE SIZE DISTRIBUTION DETERMINATION USING ACOUSTIC INFORMATION" 1999 IEEE AFRICON 5TH. AFRICON CONFERENCE IN AFRICA. CAPE TOWN, SOUTH AFRICA, SEPT. 28 - OCT. 1, 1999; [IEEE AFRICON CONFERENCE IN AFRICA], NEW YORK, NY : IEEE, US, 28 September 1999 (1999-09-28), pages 327-330 ISBN: 978-0-7803-5547-7. XP000895843 paragraph [04.1]	2,8-10,12,13,23



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

23 July 2024

Date of mailing of the international search report

01 August 2024

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands (Kingdom of the)

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

van Lith, Joris

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2024/063977

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
EP	3356813	B1	17 July 2019	DE	102015116376	A1	30 March 2017
				EP	3356813	A1	08 August 2018
				WO	2017055063	A1	06 April 2017

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G01N15/02 G01N29/00
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01N

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	EP 3 356 813 B1 (TIPCO TUDESHKI IND PROCESS CONTROL GMBH [DE]) 17. Juli 2019 (2019-07-17) in der Anmeldung erwähnt	1,3-6, 11, 14-18,22
A	Absätze [0026], [0036], [0042], [0044], [0045]; Abbildung 1 ----- -/-	2,7-10, 12,13, 19-21,23

☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

- * Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung:: die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 23. Juli 2024	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 01/08/2024
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter van Lith, Joris

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	SWANEPOEL F ET AL: "PARTICLE SIZE DISTRIBUTION DETERMINATION USING ACOUSTIC INFORMATION", 1999 IEEE AFRICON 5TH. AFRICON CONFERENCE IN AFRICA. CAPE TOWN, SOUTH AFRICA, SEPT. 28 - OCT. 1, 1999; [IEEE AFRICON CONFERENCE IN AFRICA], NEW YORK, NY : IEEE, US, 28. September 1999 (1999-09-28), Seiten 327-330, XP000895843, ISBN: 978-0-7803-5547-7 Absatz [04.1] -----	2,8-10, 12,13,23

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

PCT/EP2024/063977

Formblatt PCT/ISA/210 (Anhang Patentfamilie) (April 2005)