



(11)

EP 3 437 759 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
12.10.2022 Patentblatt 2022/41

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
B22D 11/16^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **17184936.7**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
B22D 11/161

(22) Anmeldetag: **04.08.2017**

(54) **STRANGGIESSEN EINES METALLISCHEN STRANGS**

CONTINUOUS CASTING OF A METALLIC STRAND

COULÉE CONTINUE D'UNE BARRE MÉTALLIQUE

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
06.02.2019 Patentblatt 2019/06

(73) Patentinhaber: **Primetals Technologies Austria GmbH**
4031 Linz (AT)

(72) Erfinder:
• **Wimmer, Franz**
4752 Riedau (AT)
• **Hahn, Susanne**
4040 Linz (AT)
• **Thoene, Heinrich**
4020 Linz (AT)

(74) Vertreter: **Metals@Linz**
Primetals Technologies Austria GmbH
Intellectual Property Upstream IP UP
Turmstraße 44
4031 Linz (AT)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A1- 3 184 202 EP-A2- 3 122 492
EP-B1- 2 788 133 AT-B- 303 987
AT-B- 341 127 DE-A1- 3 937 752
JP-A- 2013 022 609 US-A1- 2004 172 153

- **ZHANG Y ET AL: "Industrial application of multivariate SPC to continuous caster start-up operations for breakout prevention", CONTROL ENGINEERING PRACTICE, PERGAMON PRESS, OXFORD, GB, Bd. 14, Nr. 11, 1. November 2006 (2006-11-01), Seiten 1357-1375, XP027906106, ISSN: 0967-0661 [gefunden am 2006-11-01]**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 3 437 759 B1

Beschreibung

Gebiet der Technik

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft das Stranggießen, vorzugsweise das semi-kontinuierliche Stranggießen, eines metallischen Strangs in einer Stranggießmaschine.

[0002] Konkret betrifft die Erfindung ein Verfahren zum semi-kontinuierlichen Stranggießen eines Strangs in einer Stranggießmaschine, wobei die Stranggießmaschine eine Kokille mit einer Primärkühlung, in Gießrichtung nachfolgend eine Strangführung mit mehreren, vorzugsweise an den Strang anstellbaren, Strangführungsrollen zum Führen und einer Sekundärkühlung zum Abkühlen des Strangs, und wiederum nachfolgend eine Tertiärkühlzone zum gesteuerten oder geregelten Abkühlen des Strangs aufweist, umfassend die Verfahrensschritte:

- Einführen eines Kaltstrangs in die Kokille;
- Halten des Kaltstrangs in der Kokille, sodass ein Kopf des Kaltstrangs die Kokille fluiddicht verschließt;
- Angießen der Stranggießmaschine, wobei Metallschmelze in die Kokille gegossen wird und sich in der Kokille ein Gießspiegel und ein teilerstarrender Strang ausbildet;
- Beginnen des Ausziehens des Kaltstrangs aus der Kokille, wobei der Kaltstrang mit einer ersten Ausziehgeschwindigkeit v_1 aus der Kokille ausgezogen wird;
- Stützen und Führen des teilerstarrenden Strangs in der Strangführung, wobei der teilerstarrende Strang durch die Strangführungsrollen gestützt, geführt und durch Kühldüsen der Sekundärkühlung abgekühlt wird; und
- gesteuertes oder geregeltes Abkühlen des teilerstarrenden Strangs bis zur Durcherstarrung des Strangs in der Tertiärkühlzone.

Stand der Technik

[0003] Das gattungsgemäße Verfahren sowie eine geeignete Anlage sind aus der WO 2015/079071 bekannt. Durch die Tertiärkühlzone mit einstellbaren Isolationspanelen kann die Abkühlgeschwindigkeit des Strangs von unten nach oben fein eingestellt werden. Dadurch wird die Ausbildung von Hohlräumen im Strang unterbunden, sodass flüssige Stahlschmelze durch die Erstarrung bedingte Volumensprünge zwischen der festen und flüssigen Phase ausgleichen kann. Die Innenqualität des Strangs wird dadurch wesentlich verbessert. Nachteilig daran ist, dass das Stranggießen bis zur vollständigen Durcherstarrung sehr lange dauert. Wie das Stranggießen beschleunigt werden kann, ohne die Innenqualität des Strangs negativ zu beeinflussen, geht aus der Schrift nicht hervor.

[0004] Aus der DE 3937752 A1 und der US

2004/172153 A1 ist es bekannt, beim Start des kontinuierlichen Stranggießens mit einer relativ geringen Ausziehgeschwindigkeit zu beginnen und anschließend die Geschwindigkeit kontinuierlich zu steigern.

[0005] Aus der Veröffentlichung Y. Zhang et al. / Control Engineering Practice 14 (2006) 1357-1375 ist auch eine stufenförmige Erhöhung der Ausziehgeschwindigkeit bekannt.

10 Zusammenfassung der Erfindung

[0006] Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, bekannte Stranggießverfahren so zu verändern, dass ein Strang rasch vergossen und dennoch die Ausbildung von Hohlräumen bzw. Rissen im Strang verhindert wird. Dadurch soll die Wirtschaftlichkeit erhöht und die Innenqualität des vergossenen Strangs gesteigert werden.

[0007] Die erfindungsgemäße Ausgabe wird durch den Gegenstand von Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0008] Konkret erfolgt die Lösung durch ein gattungsgemäßes Verfahren, wobei nach dem Beginnen des Ausziehens die Ausziehgeschwindigkeit v des Kaltstrangs aus der Kokille auf eine zweite Ausziehgeschwindigkeit v_2 erhöht wird, wobei gilt $v_2 > v_1$, und ein thermisches Rechenmodell während des Stranggießens in Abhängigkeit

- einer chemischen Zusammensetzung der Metallschmelze,
- der Primärkühlung in der Kokille,
- der Sekundärkühlung des Strangs in der Strangführung, ständig das Ist-Temperaturfeld des Strangs einschließlich der Ist-Phasengrenzen zwischen den festen, teigigen und flüssigen Phasen im Strang berechnet, wobei die Ausziehgeschwindigkeit v des Kaltstrangs aus der Kokille in Abhängigkeit des Ist-Temperaturfelds und/oder der Ist-Phasengrenzen, insbesondere der Ist-Position der Sumpfspitze, eingestellt wird.

[0009] Durch diese Maßnahme wird ein Strang, typischerweise ein Stahlstrang oder ein Strang aus einer sog. Superlegierung (siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Superlegierung>, z.B. einer Nickelbasislegierung), mit einer ausgeprägten V-förmigen Ausbildung der Strangschalen erzeugt. Mit anderen Worten nimmt das Dickenwachstum der Strangschalen in Gießrichtung rasch zu, sodass die Strangschale am unteren Ende des Strangs wesentlich dicker ist als am oberen Ende. Dadurch kann flüssige Metallschmelze etwaige durch die Erstarrung bedingte Hohlräume unmittelbar auffüllen, wodurch die Innenqualität des Strangs verbessert wird. Die Erhöhung der Gießgeschwindigkeit wirkt sich außerdem vorteilhaft auf die Wirtschaftlichkeit des Stranggießverfahrens aus.

[0010] Um eine ausgeprägte V-Form der Strangschalen zu erreichen, ist es vorteilhaft, wenn das Erhöhen der

Ausziehgeschwindigkeit v in Abhängigkeit der Zeit oder der Stranglänge erfolgt. Durch eine Beschränkung der Ausziehgeschwindigkeit v nach oben mit $v_{\max}$ ist sichergestellt, dass die Strangschale am oberen Ende des Strangs eine Mindestdicke aufweist. Dadurch können Ausbrüche verhindert werden.

[0011] Um Stöße in der Anlage zu verhindern, ist es günstig, wenn die Ausziehgeschwindigkeit v stückweise stetig, bevorzugt zumindest einmal stetig differenzierbar, erhöht wird.

[0012] Alternativ dazu kann das Erhöhen der Ausziehgeschwindigkeit v auch unstetig, z.B. in diskreten Stufen, erfolgen.

[0013] Erfindungsgemäß berechnet ein thermisches Rechenmodell während des Stranggießens in Abhängigkeit

- einer chemischen Zusammensetzung der Metallschmelze,
- der Primärkühlung in der Kokille,
- der Sekundärkühlung des Strangs in der Strangführung, ständig das Ist-Temperaturfeld des Strangs einschließlich der Ist-Phasengrenzen zwischen den festen, teigigen und flüssigen Phasen im Strang, wobei die Ausziehgeschwindigkeit des Kaltstrangs aus der Kokille in Abhängigkeit des Ist-Temperaturfelds und/oder der Ist-Phasengrenzen, insbesondere der Ist-Position der Sumpfspitze, eingestellt wird.

[0014] Die Berechnung des Ist-Temperaturfelds ist z.B. aus der WO 2009/141205 A1 bekannt. Details dazu werden in diese Anmeldung per Referenz mitaufgenommen. Durch die erfindungsgemäße Ausführungsform kann die Ausziehgeschwindigkeit des Kaltstrangs aus der Kokille z.B. so eingestellt werden, dass die Ist-Position einer zeitlich abhängigen Soll-Position der Sumpfspitze möglichst entspricht.

[0015] Zusätzlich zur Veränderung der Auszieh- bzw. der Gießgeschwindigkeit während des Gießprozesses ist es vorteilhaft, die Intensität der Kühlleistung der Kühldüsen in der Sekundärkühlung in Abhängigkeit des Ist-Temperaturfelds und/oder der Ist-Phasengrenzen, insbesondere der Ist-Position der Sumpfspitze, einzustellen.

[0016] Außerdem ist es äußerst günstig, einen Wärmedurchgangskoeffizient U der Isolierung in der Tertiärkühlzone in Abhängigkeit des Ist-Temperaturfelds und/oder der Ist-Phasengrenzen, insbesondere der Ist-Position der Sumpfspitze, einzustellen.

[0017] Die beiden letztgenannten Maßnahmen wirken sich ebenfalls sehr positiv auf die V-förmige Ausbildung der Strangschale aus.

[0018] Im Allgemeinen ist es vorteilhaft, wenn die Intensität der Kühlleistung der Kühldüsen in der Sekundärkühlung über der Zeit bzw. über der Stranglänge s abnimmt und/oder der Strang in der Tertiärkühlzone durch eine Isolierung thermisch isoliert wird, wobei ein Wärmedurchgangskoeffizient U der Isolierung in Gießrichtung

zunimmt. Dadurch wird das untere Ende des Strangs, d.h. der Strangkopf, stärker abgekühlt als das obere Ende des Strangs, d.h. der Strangfußes.

[0019] Eine weitere Verbesserung der Innenqualität des Strangs kann erreicht werden, wenn die Stranggießmaschine einen in Gießrichtung verfahrbaren Strangrührer umfasst, wobei der Strangrührer während des Ausziehens und nach dem Beenden des Ausziehens des Kaltstrangs aus der Kokille den Bereich der Sumpfspitze des Strangs elektromagnetisch rührt.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0020] Weitere Vorteile und Merkmale der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung nicht einschränkender Ausführungsbeispiele. Die nachfolgenden schematisch dargestellten Figuren zeigen:

Fig 1a bis 1h die Verfahrensschritte bei der Durchführung des Verfahrens,

Fig 2a ein stranggegossener Strang nach dem Stand der Technik,

Fig 2b ein stranggegossener Strang, der gemäß der Erfindung hergestellt wurde,

Fig 3a ein Verlauf einer Ausziehgeschwindigkeit eines Strangs aus einer Kokille über der Zeit t ,

Fig 3b ein Verlauf einer Ausziehgeschwindigkeit eines Strangs aus einer Kokille über der Stranglänge s ,

Fig 4a ein Verlauf einer Durchflussrate Q eines Kühlmittels durch eine Kühldüse über der Zeit t ,

Fig 4b ein Verlauf einer Durchflussrate Q eines Kühlmittels durch eine Kühldüse über der Stranglänge s ,

Fig 5 eine Darstellung einer auf einen Strang akkumulierten Kühlmittelmenge,

Fig 6 eine Darstellung einer variablen Isolierung in der Tertiärkühlzone,

Fig 7a eine Darstellung einer variablen Wärmeisolation in der Tertiärkühlzone durch verschwenkbare Isolierklappen,

Fig 7b eine Darstellung einer variablen Wärmeisolation in der Tertiärkühlzone durch verschiebbare Isolierklappen,

Fig 8a eine Darstellung einer nicht erfindungsgemäßen Stranggießmaschine mit einer Steuer- und Regeleinrichtung zur Einstellung der Auszugs- geschwindigkeit v ,

Fig 8b eine Darstellung einer nicht erfindungsgemäßen Stranggießmaschine mit einer Steuer- und Regeleinrichtung zur Einstellung der Intensität der Sekundärkühlung,

Fig 8c eine Darstellung einer nicht erfindungsgemäßen Stranggießmaschine mit einer Steuer- und Regeleinrichtung zur Einstellung der Wärmeisolierung in der Tertiärkühlzone,

Fig 9a bis 9e eine Darstellung von Verfahrensschritten auf einer alternativen Stranggießmaschine zu den Fig 1a...1h,

Fig 10 eine Darstellung einer Kopfisolierung, und

Fig 11 eine Darstellung der Position der Sumpfspitze im Strang über der Zeit gemäß dem Stand der Technik und der Erfindung.

Beschreibung der Ausführungsformen

[0021] In den Figuren 1a...1h ist das Stranggießen, konkret das sogenannte semi-kontinuierliche Stranggießen, eines Strangs 1 aus Stahl dargestellt. Die Stranggießmaschine ist als eine Vertikalanlage ausgebildet und weist als Hauptkomponenten eine wassergekühlte Kokille 2, eine Strangführung 3 umfassend mehrere, an den Strang 1 anstellbare, Strangführungsrollen 3a und eine Sekundärkühlung 4 mit mehreren Kühldüsen 4a, sowie eine Tertiärkühlzone 5 mit einer Wärmeisolierung 9 und mehreren Isolationspanelen 9a auf. Der Maschinenkopf der Stranggießmaschine, umfassend die Kokille 2 und die Strangführung 3, sind gegenüber der Tertiärkühlzone 5 verfahrbar, sodass ein einziger Maschinenkopf mehrere Tertiärkühlzonen mit Strängen versorgen kann. Die Strangführungsrollen 3a müssen nicht notwendigerweise über einen Aktuator an den Strang 1 anstellbar sein. Es genügt, wenn diese mechanisch, z.B. über Beilagscheiben oder sog. shims, anstellbar sind.

[0022] In Fig 1a ist die Situation vor dem Angießen der Stranggießmaschine dargestellt. Ein Kaltstrang 6 wurde in die Kokille 2 eingeführt, sodass der stationäre Kaltstrang 6 die Kokille in Gießrichtung G fluiddicht abdichtet.

[0023] In Fig 1b ist das Angießen der Stranggießmaschine dargestellt. Eine Stahlschmelze oder eine Schmelze einer sog. Superlegierung wird in die Kokille 2 entweder direkt oder über ein Verteilergefäß zugeführt, sodass sich in der Kokille 2 ein Gießspiegel M und aufgrund der Primärkühlung der Kokille 2 ein Strang 1 ausbildet. Nachdem sich ein etwas konstanter Gießspiegel M eingestellt hat, wird mit dem Ausziehen des Kaltstrangs 6 aus der Kokille 2 begonnen. Anfangs erfolgt das Ausziehen relativ langsam mit einer ersten Ausziehgeschwindigkeit v_1 von 0,12 m/min (siehe Fig 3a). Die Ausziehgeschwindigkeit v wird gemäß der Erfindung gesteigert (siehe Fig 3a), sodass sich ein Strang 1 mit einer

ausgeprägten V-Form der Strangschalen ausbildet (siehe Fig 2b). Im Gegensatz dazu weist der Strang 1 bei Stranggießverfahren nach dem Stand der Technik (siehe Fig 2a) keine ausgeprägte V-Form auf, was zu einer schlechten Innenqualität (wie Risse, Hohlräume etc.) führt. Durch die ausgeprägte V-Form der Strangschalen 11 des Strangs 1 (siehe Fig 2b) kann der Strang 1 während der Abkühlung in der Tertiärkühlzone 5 flüssig Schmelze aus dem oberen Bereich des teilerstarrten Strangs 1b nachsaugen, sodass etwaige durch die Erstarrung bedingte Hohlräume oder Risse durch Schmelze wiederaufgefüllt werden. Eine dünne Strangschale 11 am oberen Strangende 1c erleichtert dies entscheidend. Die Kokille 2 wird durch einen nicht dargestellten Oszillierer in vertikaler Richtung oszilliert. Eine ebenfalls nicht dargestellte Rührspule unterhalb der Kokille 2 rührt den teilerstarrten Strang. Beide Details sind fachlich und z.B. aus der WO 2015/079071 bekannt.

[0024] In Fig 1c ist das Stranggießen weiter fortgeschritten, wobei der Strang 1 in der Strangführung 3 durch die Strangführungsrollen 3a gestützt und geführt sowie durch die Kühldüsen 4a der Sekundärkühlung 4 weiter abgekühlt wird. Gemäß der durchgezogenen Linie von Fig 3a beträgt die Ausziehgeschwindigkeit zum Zeitpunkt von Fig 1c in etwa 0,2 m/min.

[0025] In Fig 1d ist der Zeitpunkt beim Stranggießen dargestellt, bei dem die Zufuhr von Stahlschmelze in die Kokille gerade gestoppt wurde. Die Ausziehgeschwindigkeit v entspricht der zweiten Ausziehgeschwindigkeit v_2 von 0,36 m/min. Diese Ausziehgeschwindigkeit des Strangs 1 wird bis zum Ende des Ausziehvorgangs beibehalten (siehe Fig 3a).

[0026] Nachdem die Zufuhr von Stahlschmelze gestoppt wurde, sinkt der Gießspiegel G in der Kokille 2 ab (siehe Fig 1e). Zu diesem Zeitpunkt weist der Strang 1 eine Stranglänge L von typischerweise 6 bis 12m auf. Der Durchmesser des Strangs 1 beträgt 600 mm.

[0027] Die Fig 1f zeigt die Situation nachdem das Strangende 1c die Strangführung 3 passiert hat und die Sekundärkühlung 4 abgeschaltet wurde. Der teilerstarrte Strang 1b befindet sich sodann in der Tertiärkühlzone 5 und wird dort langsam gesteuert oder geregelt abgekühlt.

[0028] In den Fig 1g und 1h ist das Abkühlen des teilerstarrten Strangs 1b in der Tertiärkühlzone 5 dargestellt, wobei der Zeitpunkt der Fig 1g vor dem Zeitpunkt der Fig 1h ist. Wie oben bereits angedeutet, kann der Maschinenkopf mehrere Tertiärkühlzonen 5 bedienen und z.B. in horizontaler Richtung zu einer weiteren Tertiärkühlzone 5 verfahren werden. Um die Erstarrung des Strangendes 1c weiter zu verzögern, kann anstelle der Sekundärkühlung 4 das Strangende 1c durch eine Kopfheizung 13 aufgeheizt werden. Die Kopfheizung 13 kann z.B. induktiv oder auch durch ein exothermes Pulver (das Verfahren wird als engl. "hot topping" bezeichnet) erfolgen, wobei das Pulver mit der flüssigen Stahlschmelze Wärmeenergie erzeugt. Da der teilerstarrte Strang 1b im Bereich der Sumpfspitze besonders anfällig dafür ist, Risse bzw. Hohlräume zu bilden, ist es vorteilhaft, wenn

ein Strangrührer 14 insbesondere diesen Bereich elektromagnetisch rührt.

[0029] Die Fig 2a zeigt einen stranggegossenen teilerstarrten Strang 1b nach dem Stand der Technik. Das Strangende ist beinahe vollständig durcherstarrt, sodass etwaige Hohlräume oder Risse im Strang nicht mehr durch flüssige Schmelze 12 aufgefüllt werden können.

[0030] Im Gegensatz dazu zeigt Fig 2b einen erfindungsgemäßen Strang. Das Strangende 1c ist noch weitgehend flüssig, sodass etwaige Hohlräume oder Risse im Strang durch flüssige Schmelze 12 aufgefüllt werden können. Dadurch weist der Strang eine bessere Innenqualität auf.

[0031] Wie oben angeführt, zeigt die Fig 3a die

[0032] Ausziehgeschwindigkeit v über der Zeit t . Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Ausziehgeschwindigkeit v nicht notwendigerweise linear gesteigert werden muss, sondern bspw. auch unter- oder überlinear (siehe strichlierte Linien). Auch eine nicht dargestellte Steigerung in diskreten Stufen wäre denkbar und könnte sinnvoll sein.

[0033] Die Fig 3b zeigt ein weiteres Diagramm für die Ausziehgeschwindigkeit v , wobei v nicht von der Zeit t sondern von der Stranglänge s abhängt. Dadurch wird sichergestellt, dass der Stranganfang 1a stärker gekühlt wird als das Strangende 1c, und zwar unabhängig von etwaigen Unterbrechungen im Gießprozess.

[0034] In beiden Fällen wird durch die Erhöhung der Ausziehgeschwindigkeit v nicht nur die Innenqualität des Strangs 1 erhöht, sondern auch die Wirtschaftlichkeit des Stranggießverfahrens verbessert, da mehr Stränge innerhalb derselben Zeit vergossen werden können.

[0035] Die Innenqualität des Strangs kann auch durch eine Einstellung der Intensität der Sekundärkühlung 4 in Abhängigkeit der Zeit oder der Stranglänge s (siehe Fig 1c) erfolgen. In beiden Fällen bedeutet dies, dass der Stranganfang 1a stärker in der Sekundärkühlung 4 abgekühlt wird als das Strangende 1c. Diese Maßnahme kann zusätzlich zur Steigerung der Ausziehgeschwindigkeit v des Kaltstrangs 6 aus der Kokille 2 oder auch anstelle davon erfolgen.

[0036] Für den Fall, dass die Einstellung der Intensität der Sekundärkühlung 4 zusätzlich zur Änderung der Ausziehgeschwindigkeit v erfolgt, ist die Beschreibung der Figuren 1a-1h weiterhin voll gültig. Zusätzlich dazu wird die Intensität der Sekundärkühlung in Abhängigkeit der Zeit t oder der Stranglänge s variiert. Die zeitabhängige Änderung der Intensität der Sekundärkühlung durch eine Änderung der Durchflussrate Q durch die Kühldüsen 4a der Sekundärkühlung 4 ist in Fig 4a dargestellt. Die Abnahme der Durchflussrate Q bzw. der Intensität der Sekundärkühlung 4 kann linear (durchgezogene Linie) aber auch unter- oder überlinear (siehe strichlierte Linien) erfolgen. Alternativ dazu kann die Intensität der Sekundärkühlung auch in Abhängigkeit der Stranglänge s variiert werden (siehe Fig 4b). In diesem Fall wird die Stranglänge s während des Gießens erfasst bzw. berechnet und die Intensität der Sekundärkühlung 4 gemäß der Kenn-

linie von Fig 4b eingestellt.

[0037] Für den Fall, dass die Einstellung der Intensität der Sekundärkühlung 4 anstelle der Änderung der Ausziehgeschwindigkeit v erfolgt, ist die Beschreibung der Figuren 1a-1h so abzuändern, dass die Ausziehgeschwindigkeit v konstant bleibt. Der aus der Kokille 2 ausgezogene Strang 1 wird in der Sekundärkühlzone 4 entweder zeit- oder stranglängenabhängig mit variabler Intensität abgekühlt, sodass der Stranganfang 1a stärker abgekühlt wird als das Strangende 1c.

[0038] In Fig 5 ist schematisch die auf die unterschiedlichen Bereiche eines teilerstarrten Strangs 1b akkumulierten Kühlmittelmengen bei der zeit- oder stranglängenabhängigen Einstellung der Intensität der Sekundärkühlung (siehe Fig 4a oder 4b) dargestellt. Eine hohe akkumulierte Kühlmittelmenge, wie am unteren Stranganfang 1a, wurde fein gerastert und eine niedrige akkumulierte Kühlmittelmenge, wie am oberen Strangende 1c, wurde grob gerastert dargestellt. Durch die zeit- oder stranglängenabhängige Änderung der Durchflussrate Q oder eine zeit- oder stranglängenabhängige Änderung des Drucks p des Kühlmittels wird die Intensität der Sekundärkühlung verändert, sodass der Stranganfang stärker als das Strangende abgekühlt wird.

[0039] In Fig 6 ist eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Innenqualität des Strangs gezeigt. In diesem Fall wird die Wärmeisolation 9 in der Tertiärkühlzone 5 in Abhängigkeit der Stranglänge L eingestellt, wobei ein Wärmedurchgangskoeffizient U der Wärmeisolation 9 in Gießrichtung G zunimmt. Mit anderen Worten, wird der Stranganfang 1a stärker in der Tertiärkühlung 5 abgekühlt als das Strangende 1c. Diese Maßnahme kann entweder zusätzlich oder anstelle zur Steigerung der Ausziehgeschwindigkeit v des Kaltstrangs 6 aus der Kokille 2 erfolgen. Es wäre auch möglich, dass die Änderung der Wärmeisolation 9 in der Tertiärkühlzone 5 zusätzlich oder anstelle zur Einstellung der Intensität der Sekundärkühlung 4 erfolgt. Die Änderung des Wärmedurchgangskoeffizientens U der Wärmeisolation 9 ist in Fig 6 durch eine variable Dicke der Isolation dargestellt.

[0040] In Fig 7a ist die stranglängenabhängige Änderung der Wärmeisolation 9 in der Tertiärkühlzone 5 durch Isolationspaneele 9a dargestellt. Um den Stranganfang 1a stärker als das Strangende 1c abzukühlen, sind die schwenkbaren Klappen der Isolationspaneele unterschiedlich eingestellt, wobei die oberen Klappen weitgehend geschlossen und die unteren Klappen weitgehend offen sind. Dadurch nimmt ein Wärmedurchgangskoeffizient U der Wärmeisolation 9 in Gießrichtung G zu. Die Änderung des Öffnungswinkels der Klappen kann entweder statisch voreingestellt oder auch dynamisch, z.B. über Schwenkantriebe zum Schwenken der Klappen, während der Abkühlung in der Tertiärkühlzone 5 erfolgen.

[0041] Die Fig 7b zeigt eine Alternativ zu Fig 7a, wobei der Abdeckungsgrad der Isolierklappen 9a des Strangs beim Strangende 1c höher ist als beim Stranganfang. Auch dadurch nimmt der Wärmedurchgangskoeffizient

U der Wärmeisolation 9 in Gießrichtung G zu.

[0042] In Fig 8a ist eine nicht erfindungsgemäße Stranggießmaschine mit einer Steuer- oder Regeleinrichtung 10 zur Steuerung bzw. Regelung der Auszugsgeschwindigkeit v gezeigt. Die Steuer- oder Regeleinrichtung 10 berechnet unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung 15 der Metallschmelze, der Primärkühlung 2a in der Kokille 2, der Sekundärkühlung 4 und der Stranglänge s das Temperaturfeld und die Sumpfspitze im gegossenen Strang 1 und stellt die Auszugsgeschwindigkeit des Motors 16 in Abhängigkeit der Sumpfspitze ein. Optional wäre es ebenfalls möglich, weitere Parameter wie die Stellung der Isolierpaneele 9a in der Tertiärkühlzone zu berücksichtigen.

[0043] Die Fig 8b zeigt eine nicht erfindungsgemäße Stranggießmaschine mit einer Steuer- oder Regeleinrichtung 10 zur Steuerung bzw. Regelung der Intensität der Sekundärkühlung 4 in Abhängigkeit der Stranglänge s. Die Steuer- oder Regeleinrichtung 10 berechnet unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung 15 der Metallschmelze und der Primärkühlung 2a in der Kokille und der Stranglänge s das Temperaturfeld und die Sumpfspitze im gegossenen Strang 1 und stellt die Intensität der Sekundärkühlung 4 in Abhängigkeit der Sumpfspitze ein. Die Sumpfspitze wird in einem thermischen Rechenmodell in Echtzeit berechnet.

[0044] Die Fig 8c zeigt ebenfalls eine nicht erfindungsgemäße Stranggießmaschine mit einer Steuer- oder Regeleinrichtung 10 zur Steuerung bzw. Regelung eines Wärmedurchgangskoeffizientens U der Wärmeisolation 9 in der Tertiärkühlzone 5. Die Steuer- oder Regeleinrichtung 10 berechnet unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung 15 der Metallschmelze und der Primärkühlung 2a in der Kokille das Temperaturfeld und die Sumpfspitze im gegossenen Strang 1 und stellt die Öffnungswinkel der Isolierpaneele 9a in Abhängigkeit der Sumpfspitze ein. Die Sumpfspitze wird in einem thermischen Rechenmodell in Echtzeit berechnet.

[0045] In den Fig 9a bis 9e ist eine alternative Stranggießmaschine zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt. In Fig 9a wird ein Strang 1 in der Kokille 2 abgegossen und mit variabler Ausziehgeschwindigkeit v aus der Kokille ausgezogen. Der Strang 1 wird in der Strangführung 3 gestützt und geführt und durch die Sekundärkühlung abgekühlt. In Fig 9b wurde das Gießen in der Kokille beendet und der Strang 1 befindet sich in einem Strahlungsbereich 17, wo er über eine gewisse Zeit Wärme an die Umgebung abstrahlen kann. Auf dem Weg in die Tertiärkühlzone 5 passiert der Strang eine Rührspule 14 und wird durch diese elektromagnetisch gerührt, siehe Fig 9c. Sodann wird der Strang in die Tertiärkühlzone 5 eingebracht, wo er gesteuert oder geregelt durch die Wärmeisolation 9 abgekühlt wird. Da insbesondere das Strangende 1c besonders empfindlich ist, wird dieses nochmals durch einen Deckel besonders thermisch isoliert, siehe Fig 9d und 9e.

[0046] In Fig 10 ist schematisch eine Kopfisolierung

18 eines Strangs 1 gezeigt. Die Kopfisolierung weist eine Wärmeisolation 9 für das Strangende 1c des Strangs 1 auf, sodass das Strangende 1c länger flüssig bleibt. Zusätzlich zur Wärmeisolation 9 kann ein exothermes Pulver 19 auf das flüssige Strangende 1c aufgegeben werden, was den Strang 1 zusätzlich erwärmt.

[0047] In Fig 11 ist schematisch das Ergebnis der zeit- bzw. wegababhängigen Einstellung der Ausziehgeschwindigkeit v und/oder der zeit- bzw. wegababhängigen Einstellung der Intensität der Sekundärkühlung und/oder der Einstellung eines Wärmedurchgangskoeffizientens U der Wärmeisolation 9 dargestellt. Alle diese Maßnahmen haben den Effekt, dass die Erstarrung des teilerstarrten Strangs verlangsamt wird (siehe die strichlierte Linie die die Position der Sumpfspitze im Strang über der Zeit angibt). Im Gegensatz dazu gibt die durchgezogene Linie den Vergleich mit dem Stand der Technik an. Wie oben angeführt, führen diese Maßnahmen dazu, dass der erfindungsgemäße Strang eine ausgeprägte V-Form der Strangschale aufweist (siehe Fig 11 rechts) im Gegensatz zu Strängen nach dem Stand der Technik ohne ausgeprägter V-Form der Strangschale (siehe Fig 11 links).

[0048] Obwohl die Erfindung im Detail durch die bevorzugten Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzbereich der Erfindung wie in den anhängenden Ansprüchen definiert zu verlassen.

Bezugszeichenliste

[0049]

1	Strang
1a	Stranganfang
1b	teilerstarrter Strang
1c	Strangende
2	Kokille
2a	Primärkühlung
3	Strangführung
3a	Strangführungsrollen
4	Sekundärkühlung, Sekundärkühlzone
4a	Kühldüse
5	Tertiärkühlung, Tertiärkühlzone
6	Kaltstrang
7	Rechenmodell
8	Sumpfspitze
9	Wärmeisolation
9a	Isolationspanel
10	Steuer- oder Regeleinrichtung
11	Strangschale
12	flüssiger Bereich des Strangs
13	Kopfheizung
14	Strangrührer
15	chemische Zusammensetzung
16	Motor
17	Strahlungsbereich

- 18 Kopfisolierung
19 exothermes Pulver

- G Gießrichtung
L Stranglänge
M Gießspiegel
Q Durchflussrate
S Stranglänge
t Zeit
U Wärmedurchgangskoeffizient
v Ausziehgeschwindigkeit, Gießgeschwindigkeit

Patentansprüche

1. Verfahren zum semi-kontinuierlichen Stranggießen eines Strangs (1) in einer Stranggießmaschine, wobei die Stranggießmaschine eine Kokille (2) mit einer Primärkühlung (2a), in Gießrichtung (G) nachfolgend eine Strangführung (3) mit mehreren Strangführungsrollen (3a) zum Führen und einer Sekundärkühlung (4) zum Abkühlen des Strangs (1), und wiederum nachfolgend eine Tertiärkühlzone (5) zum gesteuerten oder geregelten Abkühlen des Strangs (1) aufweist, umfassend die Verfahrensschritte:

- Einführen eines Kaltstrangs (6) in die Kokille (2);
- Halten des Kaltstrangs (6) in der Kokille (2), sodass ein Kopf des Kaltstrangs (6) die Kokille (2) fluiddicht verschließt;
- Angießen der Stranggießmaschine, wobei Metallschmelze in die Kokille (2) gegossen wird und sich in der Kokille (2) ein Gießspiegel (M) und ein teilerstarter Strang (1b) ausbildet;
- Beginnen des Ausziehens des Kaltstrangs (6) aus der Kokille (2), wobei der Kaltstrang (6) mit einer ersten Ausziehgeschwindigkeit v_1 aus der Kokille (2) ausgezogen wird;
- Stützen und Führen des teilerstarten Strangs (1b) in der Strangführung (3), wobei der teilerstartete Strang (1b) durch die Strangführungsrollen (3a) gestützt, geführt und durch Kühldüsen (4a) der Sekundärkühlung (4) abgekühlt wird;
- gesteuertes oder geregeltes Abkühlen des teilerstarten Strangs (1b) bis zur Durcherstarrung des Strangs (1) in der Tertiärkühlzone (5);

dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Beginnen des Ausziehens die Ausziehgeschwindigkeit v des Kaltstrangs (6) aus der Kokille (2) auf eine zweite Ausziehgeschwindigkeit v_2 erhöht wird, wobei gilt $v_2 > v_1$, und
dass ein thermisches Rechenmodell (7) während des Stranggießens in Abhängigkeit

- einer chemischen Zusammensetzung (15) der Metallschmelze,
- der Primärkühlung (2a) in der Kokille (2),
- der Sekundärkühlung (4) des Strangs (1) in der Strangführung (3),

ständig das Ist-Temperaturfeld des Strangs (1) einschließlich der Ist-Phasengrenzen zwischen den festen, teigigen und flüssigen Phasen im Strang (1) berechnet, wobei die Ausziehgeschwindigkeit v des Kaltstrangs (6) aus der Kokille (2) in Abhängigkeit des Ist-Temperaturfelds und/oder der Ist-Phasengrenzen, insbesondere der Ist-Position der Sumpfspitze (8), eingestellt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Erhöhen der Ausziehgeschwindigkeit v in Abhängigkeit der Zeit t oder der Stranglänge s erfolgt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Erhöhen der Ausziehgeschwindigkeit v stückweise stetig, bevorzugt zumindest einmal stetig differenzierbar, erfolgt.

4. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Erhöhen der Ausziehgeschwindigkeit v unstetig, z.B. in diskreten Stufen, erfolgt.

5. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ausziehgeschwindigkeit v des Kaltstrangs (6) derart eingestellt wird, dass die Ist-Position einer zeitlich abhängigen Soll-Position der Sumpfspitze (8) möglichst entspricht.

6. Verfahren nach Anspruch 1 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Intensität der Sekundärkühlung (4) in Abhängigkeit des Ist-Temperaturfelds und/oder der Ist-Phasengrenzen, insbesondere der Ist-Position der Sumpfspitze (8), eingestellt wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1, 5 oder 6, wobei der Strang (1) in der Tertiärkühlzone (5) durch eine Wärmeisolation (9) thermisch isoliert wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein Wärmedurchgangskoeffizient U der Wärmeisolation (9) in Abhängigkeit des Ist-Temperaturfelds und/oder der Ist-Phasengrenzen, insbesondere der Ist-Position der Sumpfspitze (8), eingestellt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Intensität der Sekundärkühlung (4) über der Zeit t oder der Stranglänge s abnimmt.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Strang (1) in der Tertiärkühlzone (5) durch eine Wärmeisolation

(9) thermisch isoliert wird, wobei ein Wärmedurchgangskoeffizient U der Wärmeisolation (9) in Gießrichtung (G) zunimmt.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Stranggießmaschine einen in Gießrichtung (G) verfahrbaren Strangrührer (14) umfasst, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Strangrührer (14) während des Ausziehens und nach dem Beenden des Ausziehens des Kaltstrangs (6) aus der Kokille (2) den Bereich der Sumpfspitze (8) des Strangs (1) elektromagnetisch rührt.

Claims

1. Method for the semi-continuous casting of a strand (1) in a continuous casting machine, wherein the continuous casting machine has a mould (2) with primary cooling (2a), followed in the casting direction (G) by a strand guide (3) with multiple strand guiding rollers (3a) for guiding purposes and secondary cooling (4) for cooling the strand (1), followed in turn by a tertiary cooling zone (5) for the controlled or regulated cooling of the strand (1), said method comprising the following method steps:

- introducing a dummy bar (6) into the mould (2);
- holding the dummy bar (6) in the mould (2), with the result that a head of the dummy bar (6) closes the mould (2) in a fluid-tight manner;
- beginning casting in the continuous casting machine, wherein molten metal is cast into the mould (2) and a casting level (M) and a partially solidified strand (1b) are formed in the mould (2);
- starting the extraction of the dummy bar (6) from the mould (2), wherein the dummy bar (6) is extracted from the mould (2) at a first extraction velocity v_1 ;
- supporting and guiding the partially solidified strand (1b) in the strand guide (3), wherein the partially solidified strand (1b) is supported and guided by the strand guiding rollers (3a) and cooled by cooling nozzles (4a) of the secondary cooling (4);
- performing controlled or regulated cooling of the partially solidified strand (1b) until the strand (1) has solidified right through in the tertiary cooling zone (5);

characterized in that, after the extraction starts, the extraction velocity v at which the dummy bar (6) is extracted from the mould (2) is increased to a second extraction velocity v_2 , wherein $v_2 > v_1$, and **in that**, during the continuous casting, a thermal calculation model (7) continuously calculates the actual temperature distribu-

tion of the strand (1), including the actual phase boundaries between the solid, pasty and liquid phases in the strand (1), depending on

- a chemical composition (15) of the molten metal,
- the primary cooling (2a) in the mould (2),
- the secondary cooling (4) of the strand (1) in the strand guide (3),

wherein the extraction velocity v at which the dummy bar (6) is extracted from the mould (2) is set depending on the actual temperature distribution and/or the actual phase boundaries, in particular the actual position of the liquidus tip (8).

2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the extraction velocity v is increased depending on the time t or the strand length s .
3. Method according to Claim 2, **characterized in that** the extraction velocity v is increased continuously in some parts, preferably at least once in a continuously differentiable manner.
4. Method according to Claim 2, **characterized in that** the extraction velocity v is increased discontinuously, e.g. in discrete stages.
5. Method according to Claim 1, **characterized in that** the extraction velocity v of the dummy bar (6) is set in such a way that the actual position corresponds as far as possible to a temporally dependent setpoint position of the liquidus tip (8).
6. Method according to Claim 1 or 5, **characterized in that** the intensity of the secondary cooling (4) is set depending on the actual temperature distribution and/or the actual phase boundaries, in particular the actual position of the liquidus tip (8).
7. Method according to one of Claims 1, 5 and 6, wherein the strand (1) is thermally insulated in the tertiary cooling zone (5) by heat insulation (9), **characterized in that** a heat transfer coefficient U of the heat insulation (9) is set depending on the actual temperature distribution and/or the actual phase boundaries, in particular the actual position of the liquidus tip (8).
8. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the intensity of the secondary cooling (4) decreases over the time t or the strand length s .
9. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the strand (1) is thermally in-

sulated in the tertiary cooling zone (5) by heat insulation (9), wherein a heat transfer coefficient U of the heat insulation (9) increases in the casting direction (G).

10. Method according to one of the preceding claims, wherein the continuous casting machine comprises a strand stirrer (14) that is displaceable in the casting direction (G), **characterized in that** the strand stirrer (14) electromagnetically stirs the region of the liquidus tip (8) of the strand (1) while the dummy bar (6) is being extracted from the mould (2) and after said extraction has ended.

Revendications

1. Procédé destiné à la coulée semi-continue d'une barre (1) dans une machine de coulée continue, dans lequel la machine de coulée continue présente une lingotière (2) avec un refroidissement primaire (2a), dans une direction de coulée (G) suivant un guidage de barre (3) avec plusieurs rouleaux de guidage de barre (3a) destinés au guidage et un refroidissement secondaire (4) destiné au refroidissement de la barre (1), et encore suivant une zone de refroidissement tertiaire (5) destinée au refroidissement commandé ou régulé de la barre (1), comprenant les étapes de procédé :

- introduction d'un mannequin (6) dans la lingotière (2) ;
- maintien du mannequin (6) dans la lingotière (2) de sorte qu'une tête du mannequin (6) ferme la lingotière (2) de manière étanche aux fluides ;
- démarrage d'une coulée de la machine de coulée continue, dans lequel du métal en fusion est versé dans la lingotière (2) et une surface de bain (M) et une barre en partie solidifiée (1b) se forment dans la lingotière (2) ;
- début de l'extraction du mannequin (6) à partir de la lingotière (2), dans lequel le mannequin (6) est extrait avec une première vitesse d'extraction v_1 à partir de la lingotière (2) ;
- soutien et guidage de la barre en partie solidifiée (1b) dans le guidage de barre de coulée (3), dans lequel la barre en partie solidifiée (1b) est soutenue, guidée par le biais des rouleaux de guidage de barre (3a) et refroidie par le biais de buses de refroidissement (4a) du refroidissement secondaire (4) ;
- refroidissement commandé ou régulé de la barre en partie solidifiée (1b) jusqu'à la solidification complète de la barre (1) dans la zone de refroidissement tertiaire (5) ;

caractérisé en ce que, après le début de l'extraction la vitesse d'extraction v du man-

nequin (6) à partir de la lingotière (2) est augmentée à une deuxième vitesse d'extraction v_2 , dans lequel $v_2 > v_1$, et **en ce qu'un** modèle de calcul thermique (7) calcule en permanence pendant la coulée continue en fonction

- d'une composition chimique (15) du métal en fusion,
 - du refroidissement primaire (2a) dans la lingotière (2),
 - du refroidissement secondaire (4) de la barre (1) dans le guidage de barre (3),
- le champ de températures réelles de la barre (1) comprenant les limites de phases réelles entre les phases solide, pâteuse et liquide dans la barre (1), dans lequel la vitesse d'extraction v du mannequin (6) à partir de la lingotière (2) est ajustée en fonction du champ de températures réelles et/ou des limites de phases réelles, en particulier de la position réelle de la pointe de cône liquide (8).

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'augmentation de la vitesse d'extraction v se fait en fonction du temps t ou de la longueur de barre s.

3. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** l'augmentation de la vitesse d'extraction v se fait petit à petit de manière continue, de préférence au moins une fois différenciable de manière continue.

4. Procédé selon la revendication 2, **caractérisé en ce que** l'augmentation de la vitesse d'extraction v se fait de manière non continue, par exemple par paliers discrets.

5. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la vitesse d'extraction v du mannequin (6) est ajustée de telle sorte que la position réelle correspond le plus possible à une position théorique de la pointe de cône liquide (8) dépendante du temps.

6. Procédé selon la revendication 1 ou 5, **caractérisé en ce que** l'intensité du refroidissement secondaire (4) est ajustée en fonction du champ de températures réelles et/ou des limites de phases réelles, en particulier de la position réelle de la pointe de cône liquide (8).

7. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1, 5 ou 6, dans lequel la barre (1) dans la zone de refroidissement tertiaire (5) est isolée thermiquement par le biais d'une isolation thermique (9), **caractérisé en ce qu'un** coefficient de transmission thermique U de l'isolation thermique (9) est ajusté

en fonction du champ de températures réelles et/ou des limites de phases réelles, en particulier de la position réelle de la pointe de cône liquide (8).

8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** l'intensité du refroidissement secondaire (4) diminue avec le temps 5
t ou la longueur de barre s.

9. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la barre (1) est isolée thermiquement dans la zone de refroidissement tertiaire (5) par le biais d'une isolation thermique (9), dans lequel un coefficient de transmission thermique U de l'isolation thermique (9) augmente 10
dans la direction de coulée (G). 15

10. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel la machine de coulée continue comprend un agitateur de barre (14) mobile 20
dans la direction de coulée (G), **caractérisé en ce que** l'agitateur de barre (14) agit de manière électromagnétique pendant l'extraction et après la fin de l'extraction du mannequin (6) à partir de la lingotière 25
(2) la zone de la pointe de cône liquide (8) de la barre (1). 25

30

35

40

45

50

55

Fig 1a

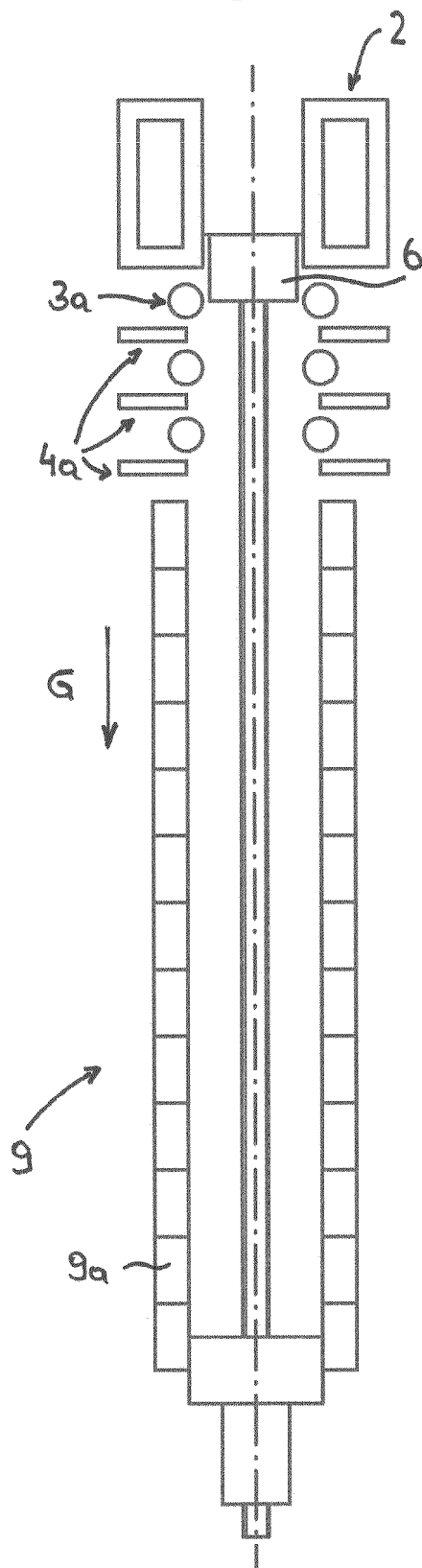


Fig 1b

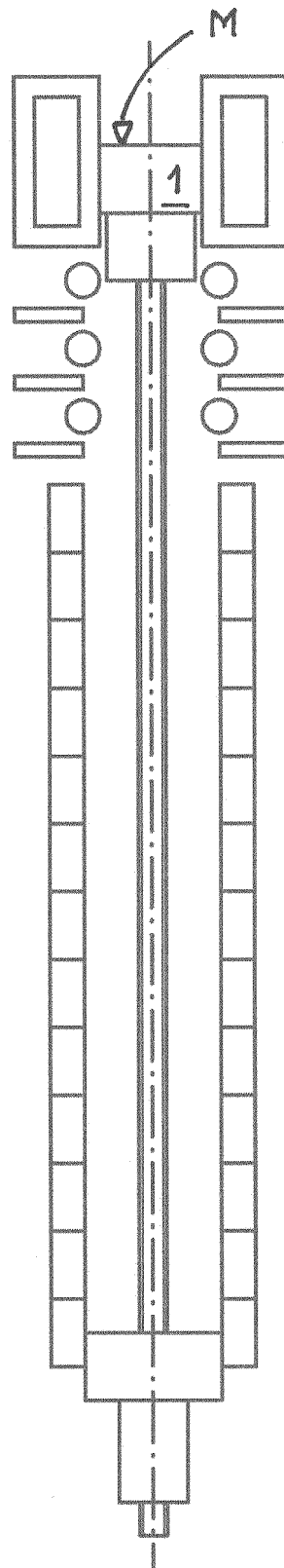


Fig 1c

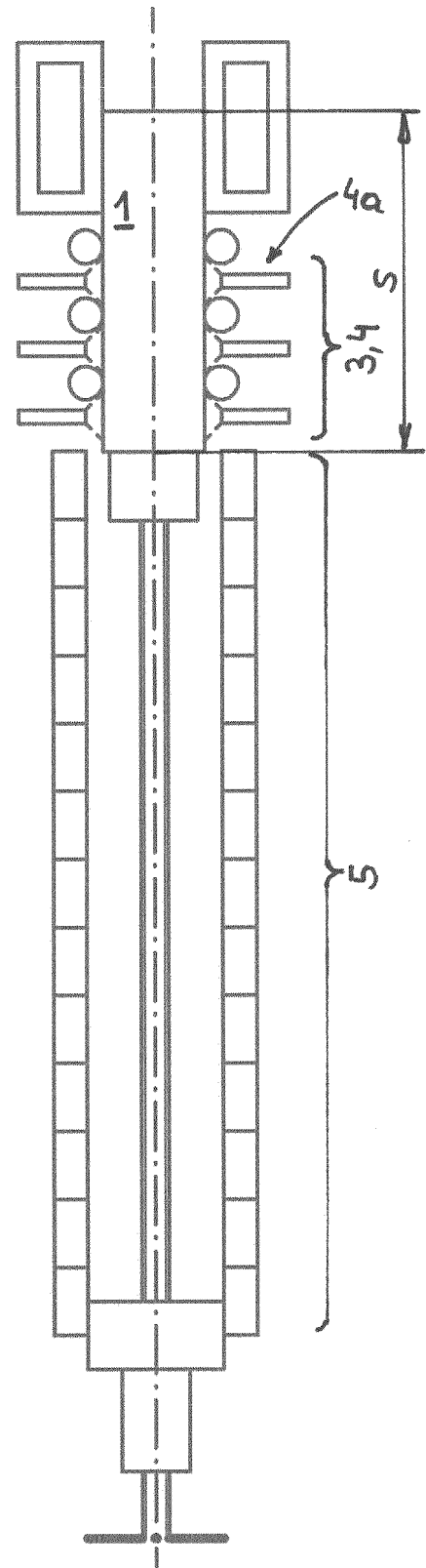


Fig 1d

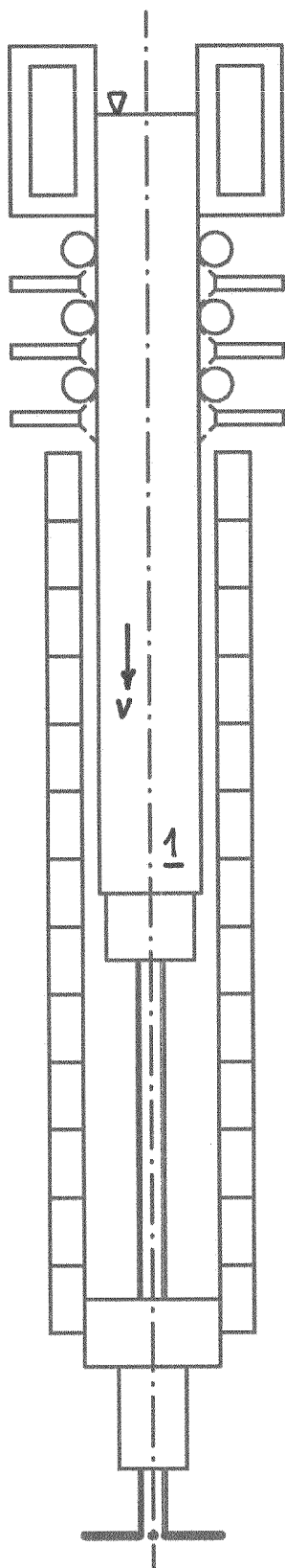


Fig 1e

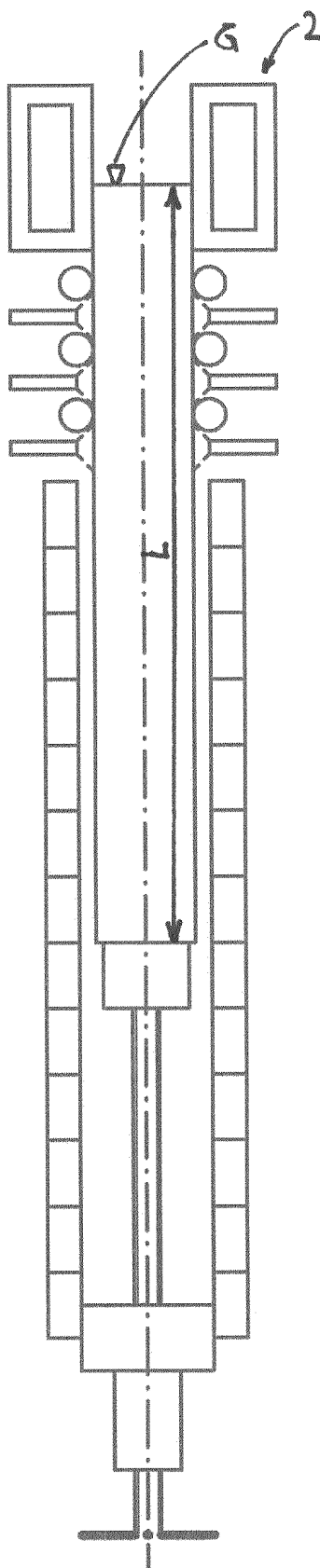
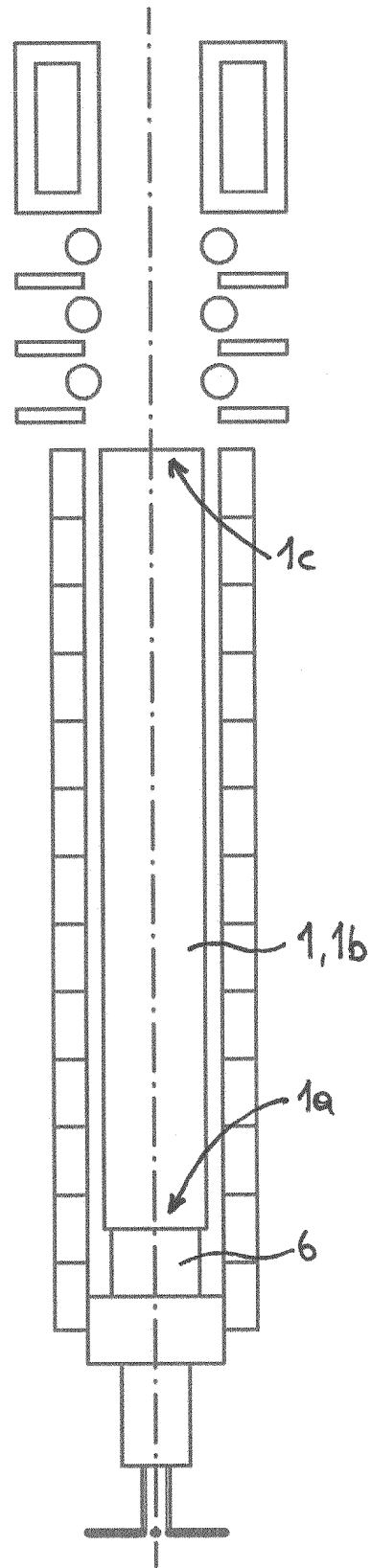


Fig 1f



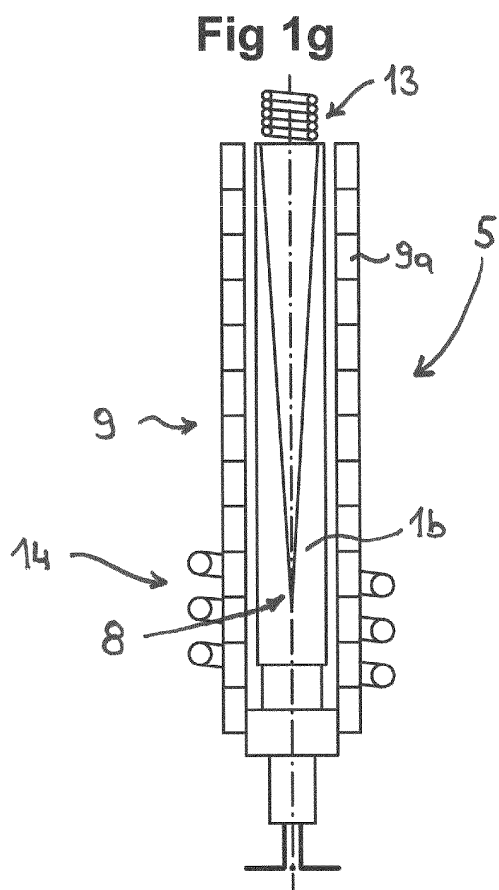


Fig 2a

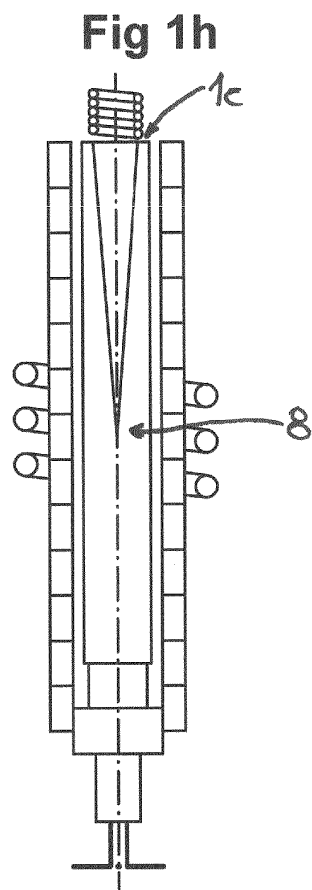
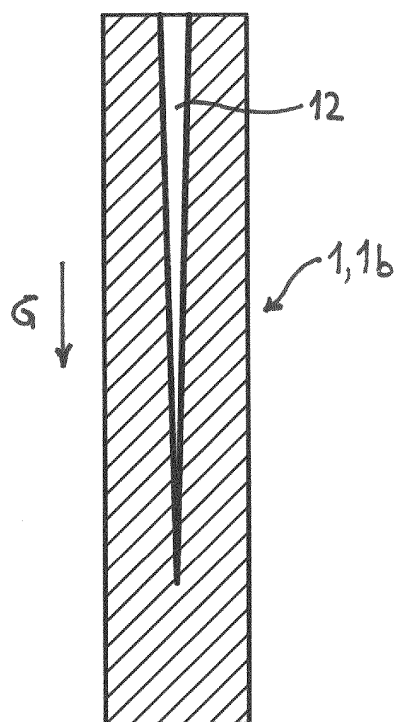


Fig 2b

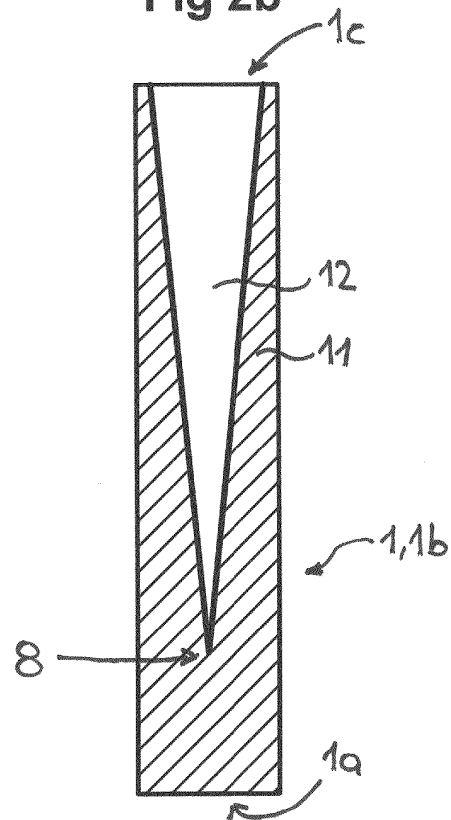


Fig 3a

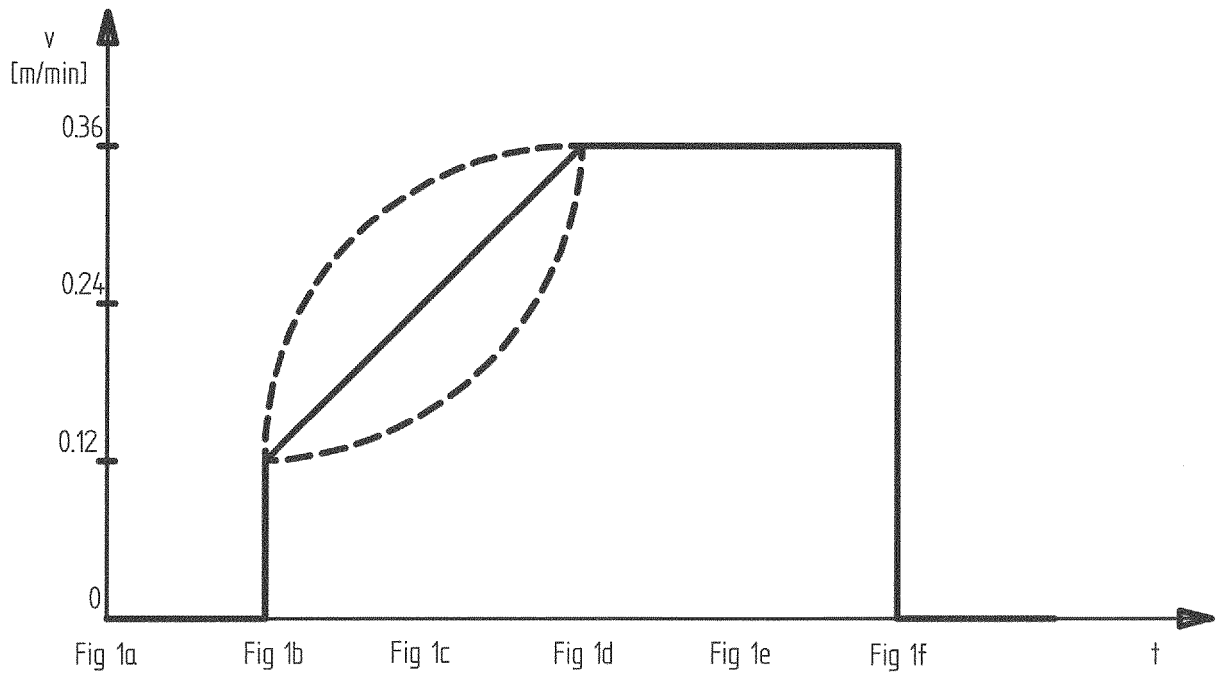


Fig 3b

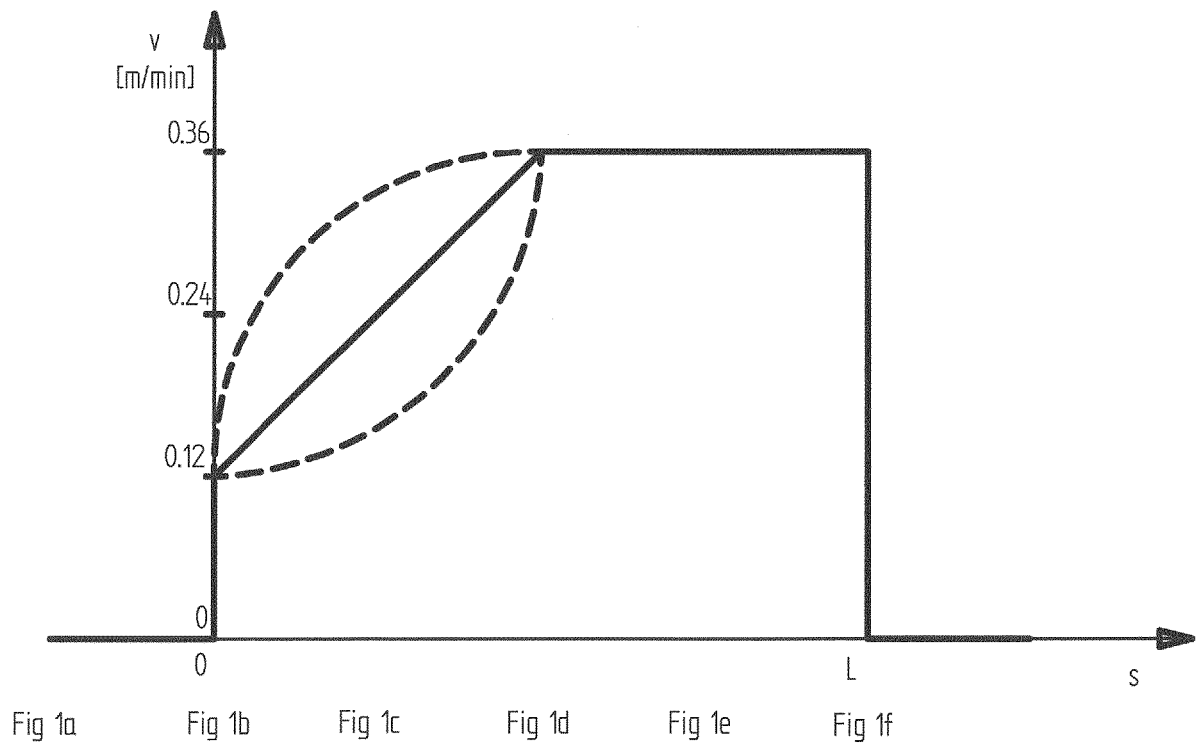


Fig 4a

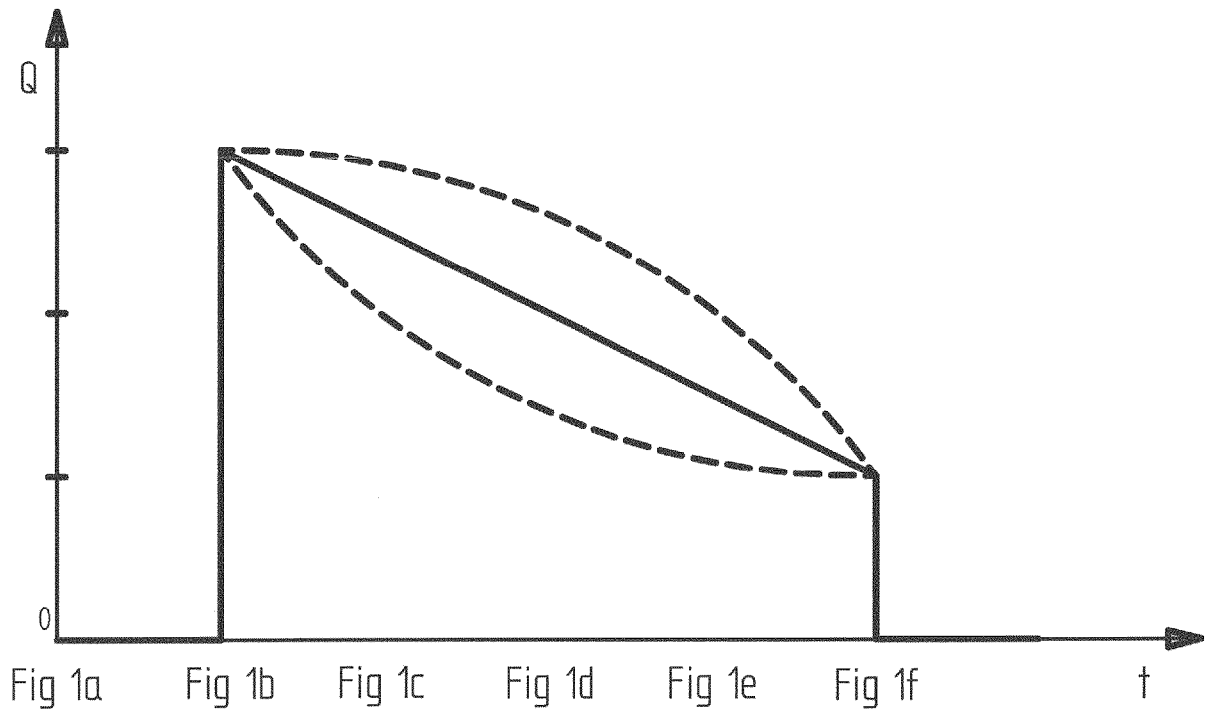


Fig 4b

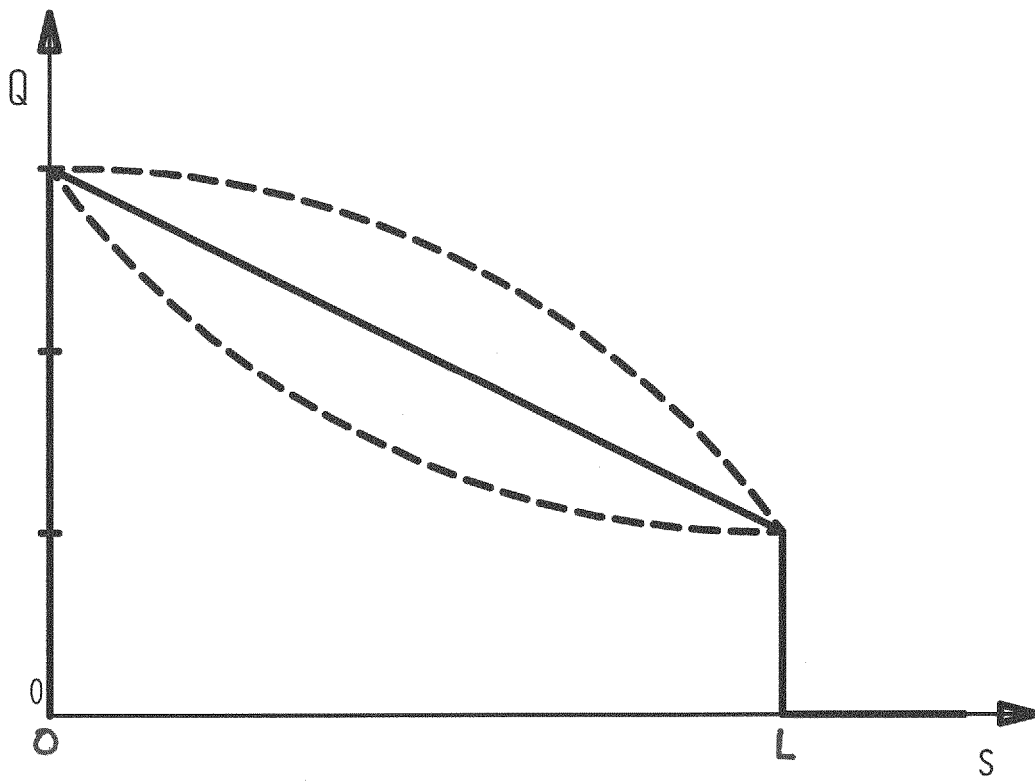


Fig 5

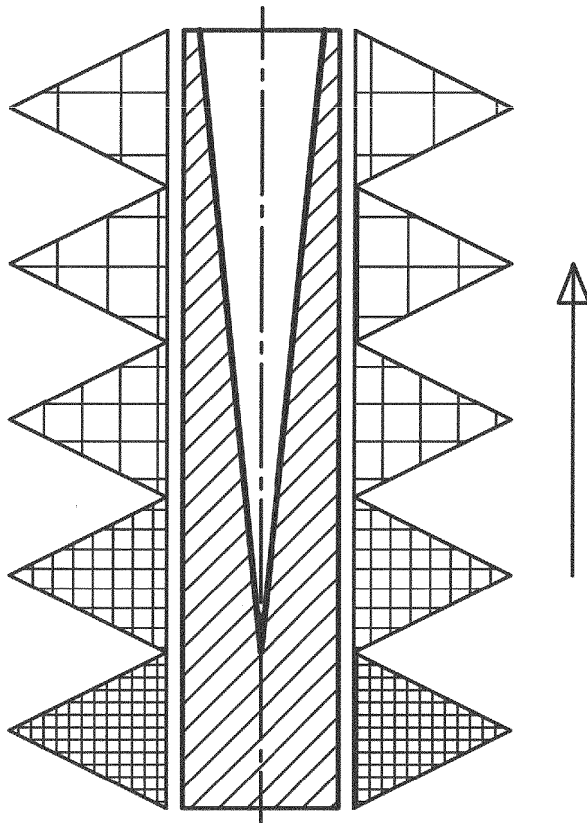
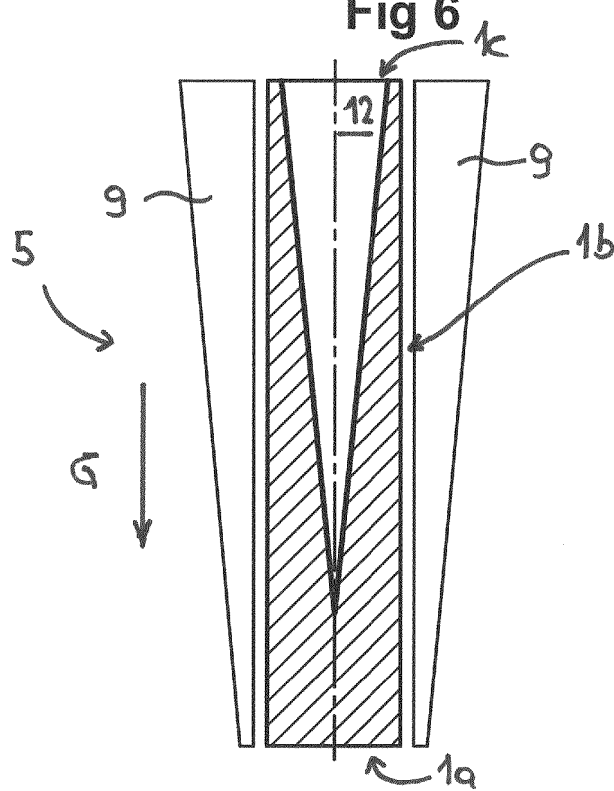


Fig 6



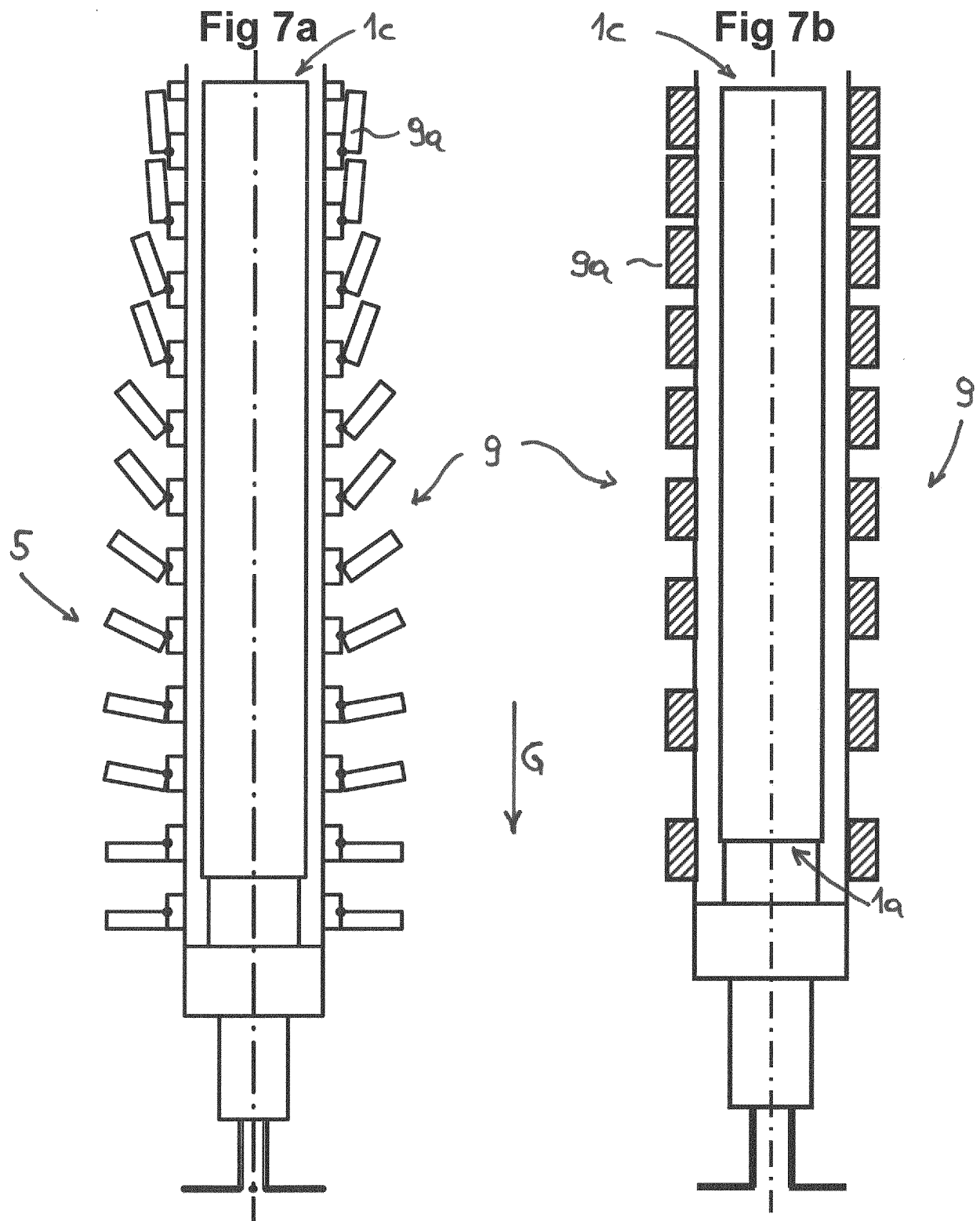


Fig 8a

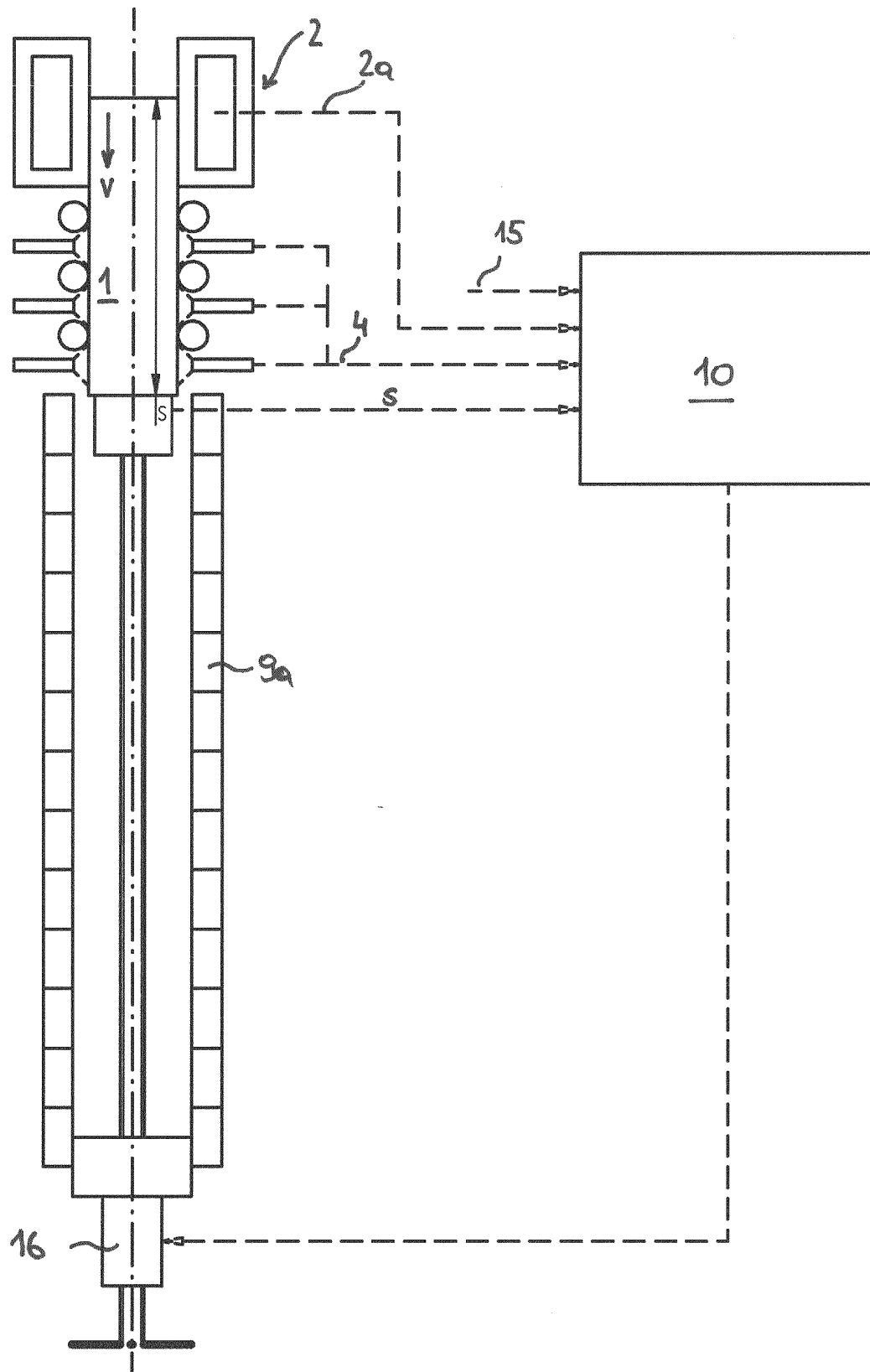


Fig 8b

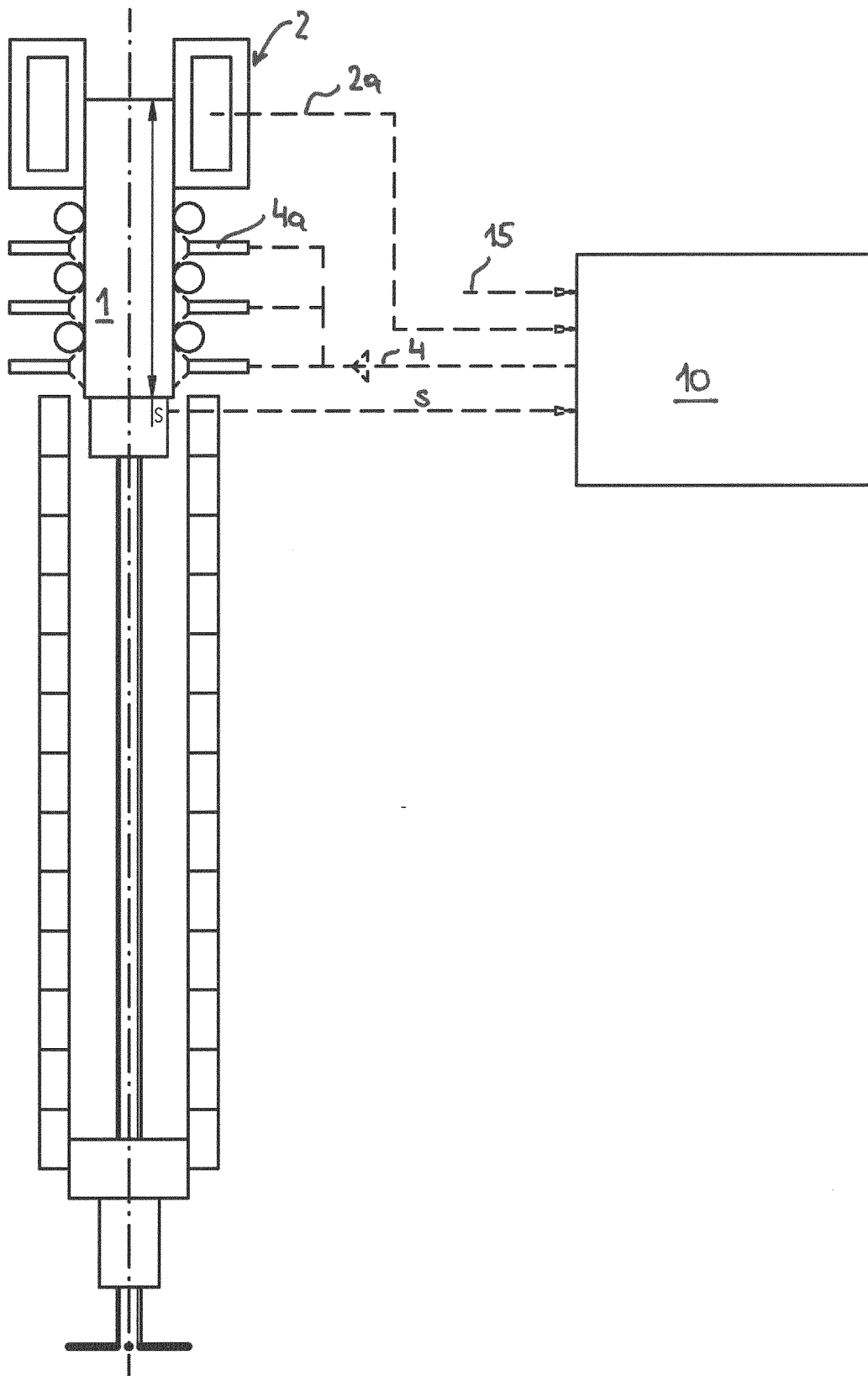


Fig 8c

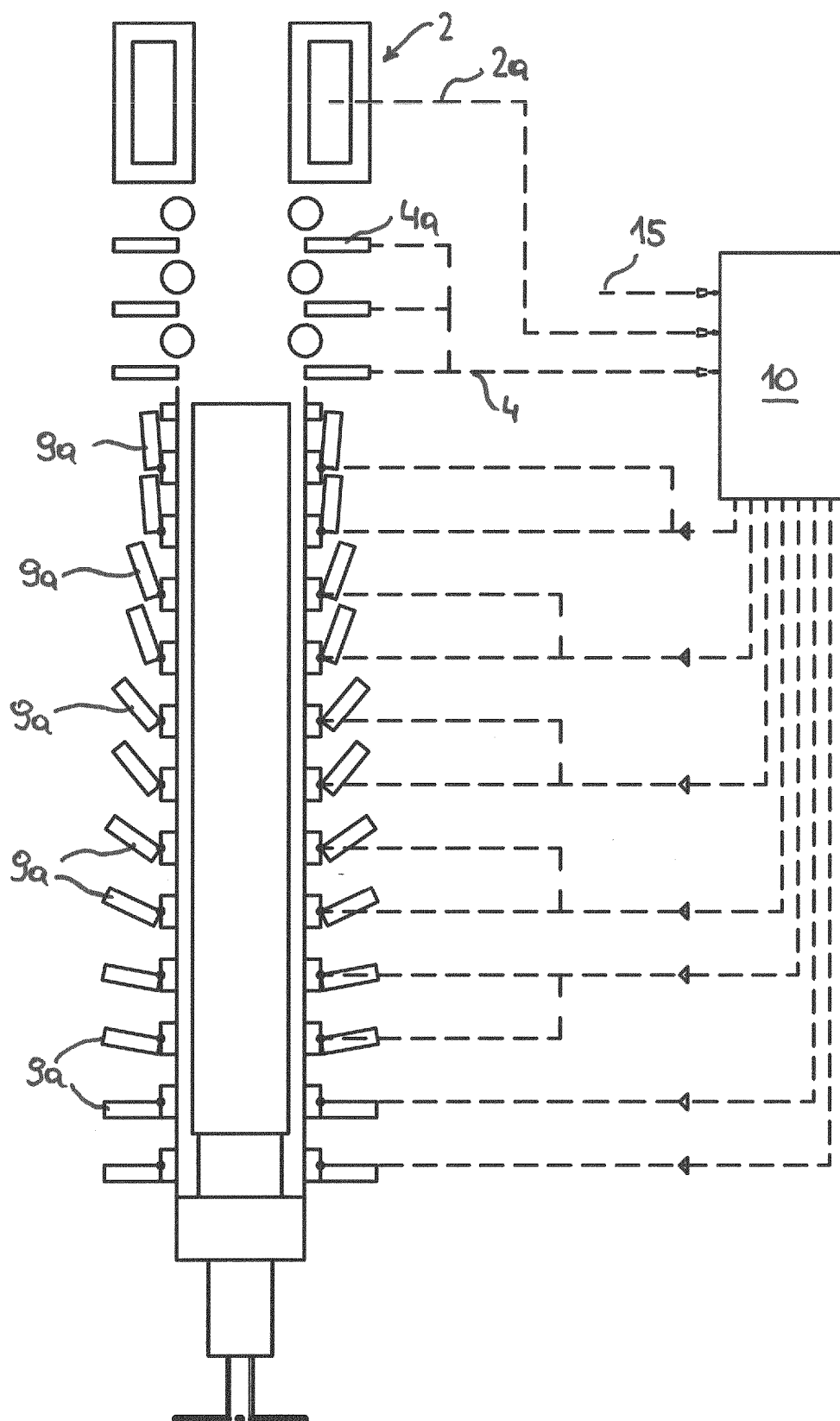


Fig 9e

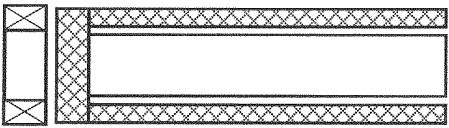


Fig 9d

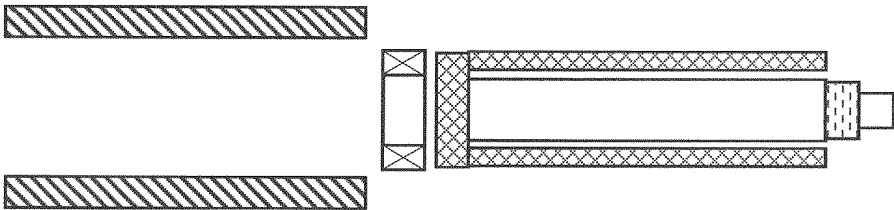


Fig 9c

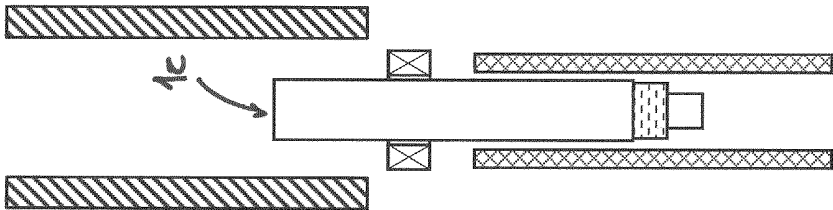


Fig 9b

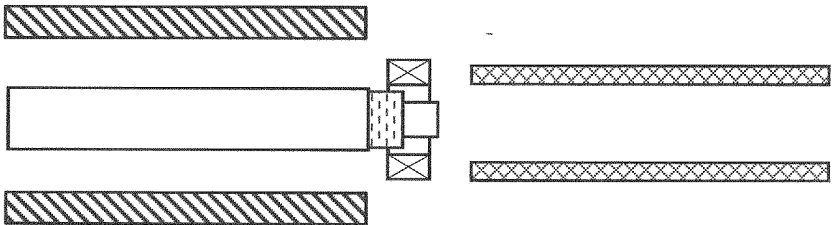


Fig 9a

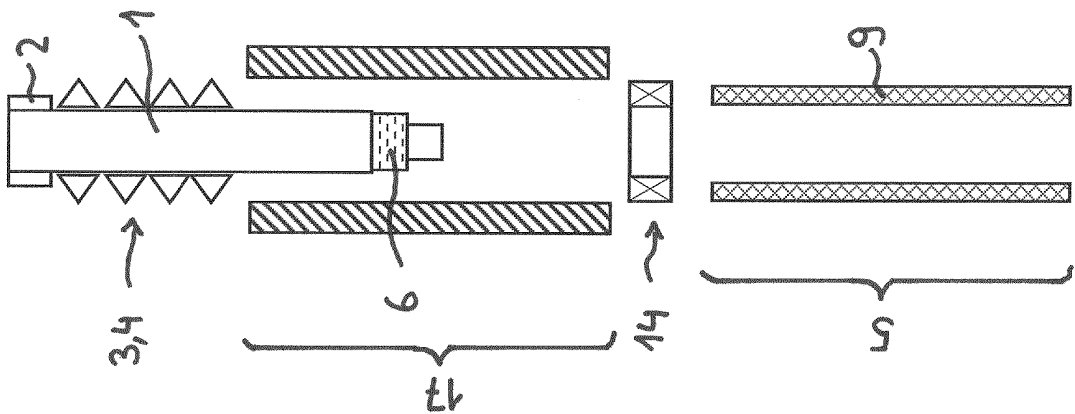


Fig 10

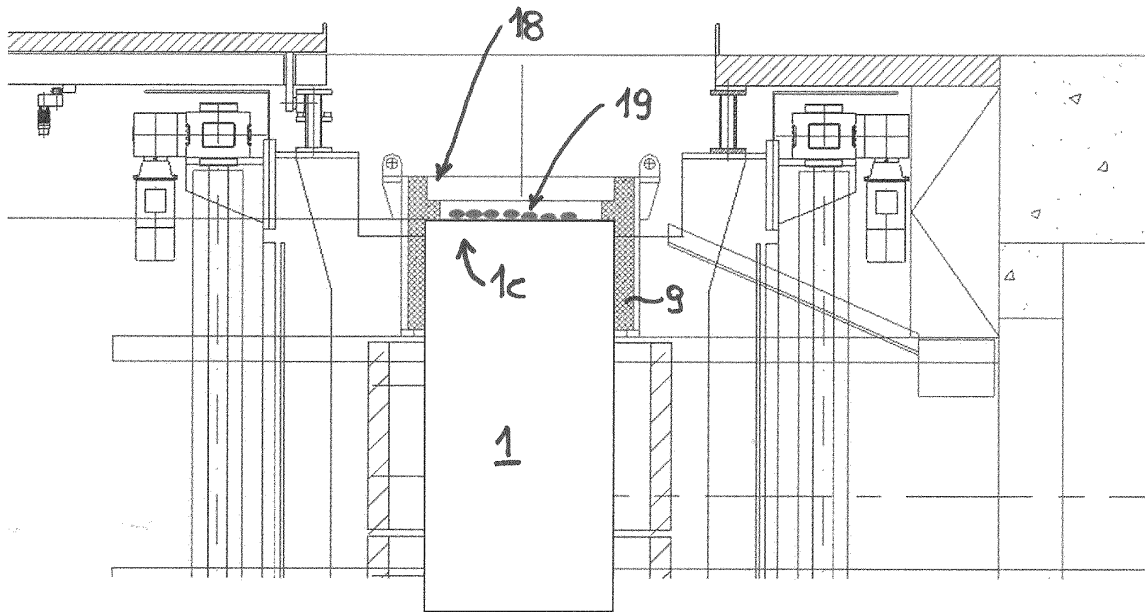
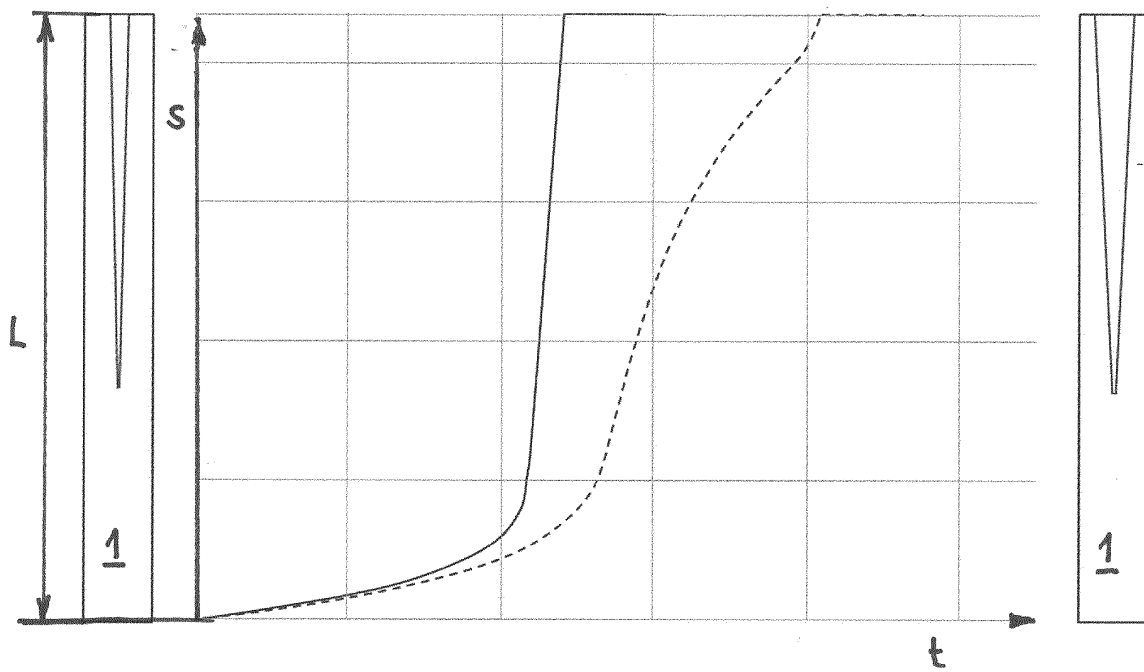


Fig 11



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- WO 2015079071 A [0003] [0023]
- DE 3937752 A1 [0004]
- US 2004172153 A1 [0004]
- WO 2009141205 A1 [0014]

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **Y. ZHANG et al.** *Control Engineering Practice*, 2006, vol. 14, 1357-1375 [0005]