



(19) Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 103 92 592 T5 2005.05.12



(12)

## Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der

(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 03/091708**

in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)

(21) Deutsches Aktenzeichen: 103 92 592-9

(86) PCT-Aktenzeichen: PCT/US03/09820

(86) BCT-Anmeldetag: 03.04.2003

(86) PCT-Anmeldetag: 02.04.2003

(13) Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung

(43) Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung  
in deutscher Übersetzung: **13.05.2005**

In deutscher Übersetzung: 12.05.2005

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **G01N 15/06**

### (30) Unionspriorität:

10/131,366 24.04.2002 US

(74) Vertreter:

**Vossius & Partner, 81675 München**

(71) Anmelder:

MSP Corp., Shoreview, Minn., US

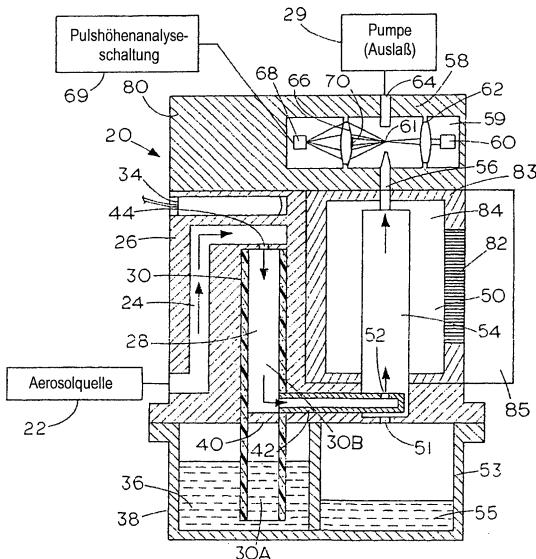
(72) Erfinder:

Liu, Benjamin Y. H., North Oaks, Minn., US

(54) Bezeichnung: **Kompakter hocheffizienter Kondensationskernzähler**

(57) Hauptanspruch: Durchflußmeßvorrichtung zum Erfassen von Partikeln, die in einem sich entlang eines Pfades bewegenden Gasstrom enthalten sind, mit:

- einer Quelle für ein flüssiges Arbeitsfluid;
- einer entlang des Pfades angeordneten Sättigungseinrichtung zum Zuführen einer Dampfform des Arbeitsfluids zum Gasstrom, wobei die Sättigungseinrichtung ein poröses Metall aufweist, das mit der Fluidquelle kommuniziert und über das der Gasstrom strömt;
- einer Heizquelle zum Erwärmen des porösen Metalls;
- einer entlang des Pfades des Gasstroms, strömungsabwärts von der Sättigungseinrichtung angeordneten Kühlseinrichtung zum Veranlassen einer Dampfkondensation auf den Partikeln, um Tröpfchen im Gasstrom zu erzeugen; und
- einem strömungsabwärts von der Küleinrichtung angeordneten Sensor zum Erfassen der Tröpfchen.



## Beschreibung

### Hintergrund der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft einen kompakten, hocheffizienten und zuverlässigen Kondensationskernzähler zum Zählen von Aerosolpartikeln und ein Verfahren zum Verwenden eines derartigen Zählers. Die Erfindung betrifft insbesondere die Messung von in einem als Aerosol bezeichneten Gas suspendierten Partikeln. Das Gas ist üblicherweise Luft, aber auch andere Gase können ein Medium für eine Partikelsuspension sein. Die Partikel können Feststoffe, Flüssigkeiten oder eine Kombination davon sein. In allen Fällen wird ein Gas mit darin suspendierten Partikeln als Aerosol bezeichnet, wobei keine Einschränkung hinsichtlich der chemischen Eigenschaften der Partikel und des Gases und hinsichtlich ihrer physikalischen Zustände gemacht wird.

**[0002]** Aerosole, die aus in Luft oder anderen Gasen suspendierten kleinen Partikeln bestehen, kommen in der Natur und in der Umgebung des Menschen weit verbreitet vor. In einem allgemein verwendeten Verfahren zum Zählen von Aerosolpartikeln wird ein Kondensationskernzähler (CNC) verwendet, der auch als Kondensationspartikelzähler bezeichnet wird. In einem typischen Kondensationskernzähler durchläuft das Aerosol zunächst einen Sättiger, um das Gas zu erwärmen und das Gas mit dem Dampf eines Arbeitsfluids zu sättigen. Das Gas wird dann in einem Kondensator abgekühlt, um einen Übersättigungszustand zu erzeugen. Der übersättigte Dampf kondensiert dann auf den Partikeln und bildet Tröpfchen, die durch einen Lichtstreuungs-Tröpfchenzähler gezählt werden.

**[0003]** Ein herkömmlicher Kondensationskernzähler ist schematisch in [Fig. 1](#) dargestellt. Der Sättiger weist einen porösen Kunststoffblock auf, der in einem erwärmten Flüssigkeitsbehälter angeordnet ist, der das Arbeitsfluid in flüssiger Form enthält. Durch einen Gasströmungskanal im porösen Kunststoff kann das Aerosol den Arbeitsfluiddampf durchströmen und durch den Arbeitsfluiddampf erwärmt und gesättigt werden. Der Kondensator weist einen rohrförmigen Kanal in einem Metallblock auf, der bei einer niedrigen Temperatur gehalten wird. Wenn das Gas durch den Kondensatorkanal strömt, kühlt es durch Übertragung von Wärme von dem Gasstrom zu den kalten Kanalwänden ab, wodurch die Gastemperatur abgesenkt und veranlaßt wird, daß das Gas übersättigt wird. Der übersättigte Dampf kondensiert dann auf den im Gas transportierten Partikeln, um Tröpfchen zu bilden. Das Aerosol strömt in einen herkömmlichen optischen Partikelzähler, durch den dann ein Tröpfchenzählwert und damit indirekt ein Partikelzählwert bereitgestellt wird.

**[0004]** Der Kondensatorblock wird durch eine thermoelektrische Kühlvorrichtung bei einer niedrigen Temperatur gehalten. Die durch die thermoelektrische Kühlvorrichtung abgegebene Wärme wird teilweise zum Erwärmen des Flüssigkeitsbehälters auf die gewünschte oder Soll-Temperatur und zum Erwärmen des Optikblocks des optischen Partikelzählers zum Verhindern einer Dampfkondensation darin genutzt, und die Restwärme wird über einen Kühlkörper an die Umgebungsluft abgegeben.

**[0005]** Das in einem Kondensationskernzähler am häufigsten verwendete Arbeitsfluid ist Butylalkohol. Der Sättiger wird normalerweise auf etwa 35°C erwärmt, und der Kondensator wird normalerweise auf etwa 5°C abgekühlt. Der in [Fig. 1](#) dargestellte herkömmliche Kondensationskernzähler ist in der Lage, Partikel mit einem Durchmesser von nur 8 Nanometern (nm) nachzuweisen. Mit speziellen Konstruktionen können durch den Kondensationskernzähler sogar Partikel mit einer Größe von nur 3 nm nachgewiesen werden.

**[0006]** Im in [Fig. 1](#) dargestellten herkömmlichen Kondensationskernzähler hat der erwärmte Aerosolströmungskanal im Sättigerblock einen großen rechteckigen Querschnitt, um die Gasströmungsgeschwindigkeit zu reduzieren und dadurch die Gasverweilzeit zum Erwärmen und Sättigen des Gases mit Dampf zu erhöhen. Aus dem gleichen Grunde sind im Kondensatorblock mehrere rohrförmige Kanäle ausgebildet, um die Gasströmungsgeschwindigkeit in jedem Kanal zu reduzieren und die zum Abkühlen und zur Dampfkondensation auf den Partikeln zum Bilden von Tröpfchen erforderliche Verweilzeit des Gases zu erhöhen. Ein Kondensationskernzähler mit diesen Konstruktionsmerkmalen ist im US-Patent Nr. 4,790,650 beschrieben.

**[0007]** Die im herkömmlichen Kondensationskernzähler verwendete Luftströmungsgeschwindigkeit beträgt wenige Zentimeter pro Sekunde. Die typische Verweilzeit beträgt etwa eine Sekunde. Durch die geringe Luftströmungsgeschwindigkeit wird veranlaßt, daß der Gasstrom in den Sättiger- und Kondensatorkanälen im wesentlichen laminar oder stromlinienförmig ist.

**[0008]** Bei einem laminaren oder stromlinienförmigen Gasstrom wird Gas, das den Kondensator an verschiedenen radialen Abständen von der Kanalmitte durchströmt, sich mit verschiedenen Gasgeschwindigkeiten be-

wegen. Gleichzeitig wird durch Wärme- und Massenübertragung durch molekulare Diffusion über den Gasstrom veranlaßt, daß sich ein Temperatur- und Dampfkonzentrationsgradient entwickelt, wobei die niedrigste Gastemperatur und die niedrigste Dampfkonzentration an den Rohrwänden und die höchsten an der Kanalmittellinie auftreten.

**[0009]** Weil Partikel mit verschiedenen radialen Abständen durch den Kondensator strömen, erfahren die Partikel in Abhängigkeit von der radialen Position der Partikel verschiedene Temperatur- und Dampfübersättigungsbedingungen. Im allgemeinen würden in der Nähe der Kanalmittellinie strömende Partikel die höchste Übersättigung erfahren, während in der Nähe der Kanalwände strömende Partikel aufgrund der geringeren Dampfkonzentration und der direkten Dampfkondensation an den kalten Kanalwänden eine geringere Übersättigung erfahren würden.

**[0010]** Aus diesem Grunde muß, um sehr kleine Partikel zu zählen, der Gasstrom, der die zu erfassenden Partikeln enthält, auf eine engen Bereich in der Nähe der Mitte des rohrförmigen Kanals begrenzt werden. Dies wird normalerweise realisiert, indem das Aerosol über eine kleine hypodermale Nadel entlang der Kanalachse in den Kondensatorkanal eingeleitet wird. Ein auf diesem Prinzip basierender, kommerziell erhältlicher ultrafeiner Kondensationskernzähler (CNC) zum Erfassen von Partikel bis herab zu einer Größe von nur 3 nm ist in "An Ultrafine Aerosol Condensation Nucleus Counter", M.B. Stolzenberg and P.H. McMurry, *Aerosol Science and Technology*, Bd. 14, Seiten 48-65, 1991 beschrieben.

**[0011]** Im ultrafeinen Kondensationskernzähler beträgt die Aerosoldurchflußrate durch die hypodermale Nadel typischerweise 10% der Gesamtgasdurchflußrate durch den Kondensator. Daher ist die effektive Aerosoldurchflußrate des ultrafeinen Kondensationskernzählers gegenüber derjenigen eines herkömmlichen Kondensationskernzählers, der dazu geeignet ist, größere Partikel zu erfassen, um einen Faktor 10 geringer.

**[0012]** In Verbindung mit der Funktionsweise eines herkömmlichen Kondensationskernzählers kann unter Bedingungen einer hohen Feuchtigkeit das durch den Kondensator strömende Gas unter den Gastaupunkt (engl. gas dew point) abkühlen und veranlaßt werden, daß Feuchtigkeit im Gas kondensiert. Das kondensierte Wasser fließt dann zusammen mit dem kondensierten Dampf des Arbeitsfluids die Kanalwände herab zum porösen Sättigerblock.

**[0013]** Wenn das kondensierte Wasser das poröse Kunststoffmaterial im Sättiger erreicht, sammelt es sich tendenziell in den Sättigerporen und verdrängt das organische Arbeitsfluid vom porösen Material. Mit der Zeit kann sich im porösen Material ausreichend Wasser ansammeln, wodurch die Funktionsfähigkeit des Kondensationskernzählers abnimmt, was zu einer fehlerhaften oder ungeeigneten Funktion der Vorrichtung führt, wodurch fehlerhafte und unzuverlässige Daten erhalten werden. Ein Verfahren zum Trennen des kondensierten Wassers vom Arbeitsfluid ist im US-Patent Nr. 5,118,959 beschrieben.

#### Kurze Beschreibung der Erfindung

**[0014]** Die vorliegende Erfindung betrifft Verbesserungen in der Handhabung eines Aerosols in einem Kondensationskernzähler, um dessen Leistungsfähigkeit zu verbessern. Der Sättiger weist einen den Gaskanal bildenden porösen Metalleinsatz mit einer kontrollierten Porengröße auf, so daß der Sättiger in einer beliebigen Orientierung angeordnet werden kann, die von der herkömmlichen horizontalen oder im wesentlichen horizontalen Orientierung verschieden sein kann.

**[0015]** Eine geeignete Porengröße wird so ausgewählt, daß über das poröse Material eine höhere Druckdifferenz erhalten werden kann, ohne daß die Flüssigkeit von den Poren herausgeblasen wird.

**[0016]** Die Strömungskanäle sind derart konstruiert, daß turbulente Wirbel verursacht werden, um die Wärme- und Dampfübertragungsrate im Sättiger und Kondensator zu erhöhen, so daß die Vorrichtung kleiner ausgebildet werden kann und eine verbesserte allgemeine Leistungsfähigkeit erhalten wird.

**[0017]** Das Arbeitsfluid wird in einem Behälter gehalten, während das Kondensat (Arbeitsfluid und Wasser) in einem separaten Behälter gesammelt wird, um Probleme zu vermeiden, die in Verbindung damit auftreten, daß kondensiertes Wasser das poröse Material des Sättigers durchdringt.

**[0018]** Die vorliegende Erfindung betrifft außerdem einen Mehrkanal-Kondensationskernzähler (CNC), der mehrere Probenströme gleichzeitig zählen kann.

[0019] Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0020] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Darstellung eines herkömmlichen Kondensationskernzählers;

[0021] [Fig. 2](#) zeigt eine Vorderansicht eines erfindungsgemäßen Mehrkanal-Kondensationskernzählers (CNC);

[0022] [Fig. 3](#) zeigt eine Draufsicht des Kondensationskernzählers von [Fig. 2](#);

[0023] [Fig. 4](#) zeigt ein schematisches Diagramm zum Darstellen der Beziehung zwischen einer Oberflächen- spannung und einem Flüssigkeitssäulenanstieg;

[0024] [Fig. 5](#) zeigt eine Querschnittsansicht entlang der Linie 5-5 in [Fig. 2](#);

[0025] [Fig. 6](#) zeigt eine Querschnittsansicht entlang der Linie 6-6 in [Fig. 3](#);

[0026] [Fig. 7](#) zeigt eine Querschnittsansicht entlang der Linie 7-7 in [Fig. 3](#);

[0027] [Fig. 8](#) zeigt eine vertikale Querschnittsansicht eines modifizierten erfindungsgemäßen Kondensations- kernzählers; und

[0028] [Fig. 9](#) zeigt eine Querschnittsansicht entlang der Linie 9-9 in [Fig. 8](#).

#### Ausführliche Beschreibung erläuternder Ausführungsformen

[0029] [Fig. 1](#) zeigt, wie vorstehend erwähnt, einen herkömmlichen Kondensationskernzähler (CNC) **10** mit einem Fluidbehälter **12**, der mit einem porösen Kunststoffmaterial **14** ausgekleidet ist. Ein Aerosol von einer Quelle **16** wird in einen Kanal **15** in der Mitte des porösen Kunststoffmaterials eingeleitet, und der Kanal beschreibt eine Biegung im rechten Winkel und erstreckt sich durch einen Kondensatorkanal **17A** in einem Kondensatorblock **17** nach oben. Das Aerosol von der Quelle enthält auch Wasserdampf. Der Block **17** wird durch ein zwischen dem Block **17** und einem Kühlkörper **18** angeordnetes thermoelektrisches Modul **19** gekühlt. Das thermoelektrische Modul **19** zieht Wärme vom Kondensatorblock **17** ab und stellt eine Temperaturabsenkung bereit, so daß das durch den Kanal **17A** strömende Aerosol mit Dampf vom Arbeitsfluid im Fluidbehälter gesättigt wird, und dann kondensiert der Arbeitsfluiddampf, wenn das Aerosol den Kanal **17A** durchläuft. Es wird ein optischer Partikelzähler **19** zum Zählen der Tröpfchen verwendet, die nach der Kondensation auf den Partikeln entstehen.

[0030] Die [Fig. 2](#) – [Fig. 7](#) zeigen einen erfindungsgemäßen Kondensationskernzähler (CNC) **20**. Der Zähler ist ein Mehrkanal-Kondensationskernzähler, wobei jeder Kanal dem in [Fig. 5](#) dargestellten Kanal gleicht. Luft oder ein anderes Gas, das zu erfassende Partikel und etwas Wasserdampf enthält, strömt von einer Aerosolquelle **22** zunächst in einen erwärmten Kanal **24** in einem Metallblock **26**, der mit der Sättigerkammer **28** in engem thermischen Kontakt steht. Der Aerosolstrom wird durch eine Pumpe oder einen anderen Strömungs- generator **29** an einem Auslaß jedes Kondensationskernzählerabschnitts erzeugt. Die Sättigerkammer **28** weist einen Kanal in einem aus einem porösen Metall hergestellten Sättigerrohr **30** auf. Das durch den Kanal **24** strömende Aerosol wird dadurch etwa auf die Temperatur der Sättigerkammer **28** vorgewärmt, bevor sie in die Kammer im Sättigerrohr **30** eintritt. Durch Vorwärmung der Gasprobe, bevor sie durch die Kammer **28** strömt, muß das Gas nicht im Sättiger erwärmt werden, was bei einem in [Fig. 1](#) dargestellten und mit dem herkömmlichen Kondensationskernzähler verwendeten herkömmlichen Sättiger erforderlich ist. Durch Vorwärmung des Aerosols wird die Größe des Sättigerabschnitts reduziert und die gesamte Leistungsfähigkeit des Sättigers verbessert.

[0031] Außerdem wird, wenn die Gasprobe durch den erwärmten Kanal **24** strömt, in dem Wärme von den den Kanal bildenden Wänden zum Gas übertragen wird, durch die auf die Partikel wirkende thermophoretische Kraft ein durch Diffusion zu den Wänden des Kanals **24** verursachter Partikelverlust wesentlich reduziert oder eliminiert. Auch bei sehr kleinen Partikeln mit einem hohen Diffusionskoeffizienten, z.B. Partikeln mit einer Größe im Bereich von Nanometern, würde, während sie den Vorerwärmungskanal **24** durchlaufen, nur ein geringer oder kein Partikelverlust auftreten.

[0032] Das Sättigerrohr **30** weist ein poröses Metallrohr, vorzugsweise aus einem porösen rostfreien Stahl, auf, das in einer Wärmeübertragungsbeziehung mit dem Block in den Metallblock **26** eingesetzt ist. Der Me-

tallblock **26** wird durch eine kleine elektrische Heizvorrichtung **34** oder eine thermoelektrische Heizvorrichtung elektrisch erwärmt und bei einer erhöhten Temperatur gehalten. Die Temperatur des porösen Metallrohrs des Sättigers beträgt typischerweise zwischen 25 und 40°C, wenn im Kondensationskernzähler Butylalkohol als Arbeitsfluid verwendet wird.

**[0033]** Das untere Ende des porösen Metallrohrs **30** des Sättigers steht mit einem flüssigen Arbeitsfluid **36** in einem Arbeitsfluidbehälter **38** in Kontakt. Ein massiver Verschluß **40** im Sättigerrohr **30** trennt den unteren Teil **30A** des porösen Metallrohrs vom oberen Teil **30B**. Die Porengröße des porösen Metallrohrs des Sättigers wird so gewählt, daß die Flüssigkeit durch die kapillare Oberflächenspannungskraft gezogen wird und die Porenzwischenräume füllt und das poröse Metallrohr **30** des Sättigers über seine gesamte Länge vollständig sättigt.

**[0034]** Der Raum oberhalb des massiven Verschlusses **40** ist vom porösen Metallrohr umschlossen und bildet eine Sättigerkammer **28**. Wenn das Gas in die Kammer **28** strömt, trifft es auf den von den nassen Wänden des porösen Sättigerrohrs verdampften Arbeitsfluiddampf.

**[0035]** Am Eingang oder Einlaß zum Sättigerrohr **30** ist eine kleine Öffnung **44** oder sind mehrere Öffnungen ausgebildet, wie dargestellt, durch die das Aerosol strömt. Durch die kleine Fläche der Öffnung **44** wird veranlaßt, daß das Aerosol einen Hochgeschwindigkeitsgasstrahl bildet, wenn es die Öffnung durchströmt. Die Öffnungsgröße wird so gewählt, daß die mittlere Strahlgeschwindigkeit typischerweise 10 m/s (Meter pro Sekunde) beträgt. Dieser Hochgeschwindigkeitsgasstrahl trifft dann auf das relativ stillstehende oder träge Gas in der erwärmten Sättigerkammer **28**. Wenn der Gasstrahl in die Kammer **28** eintritt, vermischt er sich durch turbulentes Mischen mit dem erwärmten und dampfbeladenen Gas in der Kammer. Dadurch wird das Gas selbst schnell mit dem Arbeitfluiddampf gesättigt.

**[0036]** Das nun mit dem Arbeitsfluiddampf gesättigte Aerosol tritt dann über einen erwärmten Kanal im Rohr **42** aus dem Sättigerrohr zu einem Kondensator **50** aus. Das Aerosol strömt ebenfalls über eine kleine Öffnung **52** (die aus einer oder mehreren Öffnungen bestehen kann, wie dargestellt) in der Seitenwand des Rohrs **42** in den Kanal des Kondensators **50**. Das Ende des Rohrs **42** ist so verschlossen, daß das Gas über die Öffnung **52** austreten muß.

**[0037]** Das Gas tritt mit einer mittleren Gasgeschwindigkeit von typischerweise 10 m/s aus der Öffnung aus. Die kleine zylindrische Kammer **54** des Kondensators **50** oder eine Kammer mit einer anderen geometrischen Querschnittsform wird bei einer niedrigen Temperatur von typischerweise 5°C bis 15°C gehalten, wenn Butylalkohol als Arbeitsfluid **36** verwendet wird. Wenn das Aerosol sich in der Kondensatorkammer **54** durch die durch den Hochgeschwindigkeitsaerosolstrom erzeugte turbulente Mischwirkung mit kalter Luft mischt, kühlt sich das Aerosol schnell ab und kommt in ein thermisches Gleichgewicht mit dem kalten Kammergas, wodurch ein Übersättigungszustand für Dampfkondensation und Tröpfchenwachstum erzeugt wird. Wasserdampf und überschüssiger Arbeitsfluiddampf kondensieren aus dem Aerosol heraus und werden über eine Ableitöffnung **51** in einen Kondensatbehälter **53** abgeleitet. Das Kondensat **55** sammelt sich im Behälter **53**.

**[0038]** Die gewachsenen Tröpfchen im Aerosol werden dann durch die Luftströmung durch eine rohrförmige Düse **56** in einen Tröpfchenzählerabschnitt **58** transportiert, wo sie durch einen Lichtstreuungs-Tröpfchenzähler erfaßt werden. Die einzelnen Tröpfchen können durch eine geeignete elektronische Schaltung gezählt werden. Der Lichtstreuungs-Tröpfchenzähler weist eine Kammer **59** und eine Laserlichtquelle **60** auf, die einen Laserstrahl durch eine Kondensorlinse **62** projiziert, die den Lichtstrahl fokussiert. Das durch die Düse **56** strömende, die flüssigen Tröpfchen transportierende Aerosol kreuzt den Fokusbereich des Lichtstrahls und tritt über ein Auslaßrohr **64** aus der Kammer **59** aus. Durch die Tröpfchen gestreutes Licht wird durch eine Kollektormarke **66** gesammelt und zu einer lichtempfindlichen Fotodiode **68** projiziert, die einer Pulshöhenanalyse-Schaltung **69** Lichtsignale für einen Zählvorgang zuführt. Die Linse **66** weist eine Mittelstrahlblockiereinrichtung **70** auf, so daß durch die Fotodiode **68** und die Schaltung **69** nur gestreutes Licht gesammelt und erfaßt wird.

**[0039]** Im herkömmlichen Kondensationskernzähler weist das für den Sättigerblock im Behälter für das flüssige Arbeitsfluid verwendete poröse Material keine spezifischen physikalischen Eigenschaften auf, die von der Eigenschaft, daß das Material porös sein muß, verschieden sind. Damit der Sättiger geeignet funktioniert, muß der Porenzwischenraum mit der das Arbeitsfluid enthaltenden Flüssigkeit vollständig gesättigt sein, so daß die Flüssigkeit das gesamte poröse Material und insbesondere zur Oberfläche des Aerosolkanals durchdringen kann, wo die Verdampfung stattfindet. Trotz des wesentlichen Merkmals, daß ein vollständig gesättigtes poröses Material für das Arbeitsfluid bereitgestellt werden muß, ist der spezifischen Porengröße, die verwendet werden muß, um das poröse Material mit dem flüssigen Arbeitsfluid vollständig zu sättigen, bisher keine be-

sondere Beachtung geschenkt worden. Die physikalische Basis für die Auswahl der geeigneten Porengröße für die Sättigerkonstruktion wird nachstehend in Verbindung mit der vorliegenden Erfindung beschrieben.

**[0040]** Das das Rohr **30** der Sättigerkammer **28** bildende poröse Metall wird erfindungsgemäß derart ausgewählt, daß es eine bevorzugte Porengröße hat, so daß die die Poren füllende Flüssigkeit durch die kapillare Oberflächenspannungskraft auf eine gewünschte Höhe angehoben werden kann. Außerdem kann, wenn eine bestimmte minimale Gasdruckdifferenz über das flüssigkeitsgesättigte poröse Metallrohr **30** erhalten werden soll, die Porengröße durch das hierin beschriebene Verfahren so ausgewählt werden, daß die die Poren füllende Flüssigkeit dem Gasdruck widerstehen kann und nicht von den Poren herausgeblasen wird.

**[0041]** [Fig. 4](#) zeigt ein schematisches Diagramm eines kleinen Kapillarrohrs **72** mit einem Radius  $r$ , das mit einer Flüssigkeit gefüllt ist, die die Oberfläche der Wände des Sättigerrohrs **30** benetzt. Das Kapillarrohr **72** stellt eine äquivalente Pore in der Wand des Sättigerrohrs **30** dar. Metalle, z. B. rostfreier Stahl, sind durch Wasser benetzbar und werden als hydrophil bezeichnet. Auch viele organische Flüssigkeiten, wie beispielsweise Butylalkohol, das als Arbeitsfluid in einem Kondensationskernzähler verwendet wird, würden die Metalloberfläche benetzen. Für Flüssigkeiten, die die Oberfläche des Kapillarrohrs bzw. der Kapillare benetzen, würde die Oberflächenspannung der Flüssigkeit gemäß der nachstehenden Gleichung eine Hubkraft  $F_s$  auf die Flüssigkeitssäule **74** ausüben:

$$F_s = 2\pi r \sigma$$

wodurch die Flüssigkeitssäule auf eine in [Fig. 4](#) dargestellte Höhe  $h$  angehoben wird, wobei die Oberflächenspannung der Flüssigkeit bezeichnet. Die durch die Oberflächenspannung angehobene Flüssigkeitssäule hat das Gewicht

$$F_w = \pi r^2 \rho h$$

**[0042]** Im Gleichgewichtszustand würde die Oberflächenspannungskraft  $F_s$  mit dem Gewicht  $F_w$  der Flüssigkeitssäule im Gleichgewicht stehen, d.h.

$$F_s = F_w$$

**[0043]** Dadurch beträgt die Kapillarsäulenhöhe im Gleichgewichtszustand

$$h = \frac{2\sigma}{r \rho g}$$

wobei  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit (Arbeitsfluid) und  $g$  die Erdbeschleunigung bezeichnen. Die folgende Tabelle zeigt die Beziehung zwischen der Höhe  $h$ , auf die eine Flüssigkeit durch die Oberflächenspannung angehoben werden kann, für verschiedene Porengrößen. Es wird vorausgesetzt, daß die Flüssigkeitsoberflächenspannung  $30 \cdot 10^{-5}$  N/cm ( $30$  Dyn/cm) und die Flüssigkeitsdichte  $1 \text{ g/cm}^3$  ( $1 \text{ g/cc}$ ) betragen. Diese Werte liegen nahe bei den Werten für das in einem typischen Kondensationskernzähler verwendete Arbeitsfluid.

Tabelle 1

$\sigma$ [ $(\times 10^5 \text{ N/cm})$ ( $\text{Dyn/cm}$ )]	Poredurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	$h$ [ $\text{cm H}_2\text{O}$ ]
30	1,0	1223
30	2,0	612
30	5,0	245
30	10,0	122
30	20,0	61
30	50,0	24
30	100,0	12
30	200,0	6
30	500,0	2
30	1000,0	1

**[0044]** Die vorstehende Tabelle zeigt, daß die kapillare Oberflächenspannungskraft bei einem Poredurchmesser von beispielsweise  $10 \mu\text{m}$  in der Lage ist, eine Flüssigkeitssäule auf eine Höhe von  $122 \text{ cm}$  anzuheben.

Die Poren eines vertikalen porösen Metallrohrs, z.B. des Sättigerrohrs **30**, werden daher durch die Flüssigkeit bis zu dieser Maximalhöhe gefüllt. Diese erreichbare Höhe ist wesentlich größer als die für Sättigerrohre in einem Kondensationskernzähler erforderliche Höhe. Für einen typischen Kondensationskernzähler kann eine Gesamtlänge des Sättigers in der Größenordnung von einigen Zentimetern erforderlich sein. Eine Gesamtlänge des Sättigerrohrs von 15 cm ist für die meisten Anwendungen wahrscheinlich mehr als geeignet. Infolgedessen sind wesentlich größere Porendurchmesser verwendbar.

**[0045]** Wenn das Kapillarrohr oder die Kapillare an der Oberseite mit einer Gasquelle mit einem Druck  $\Delta p$  über dem Umgebungsdruck verbunden ist, würde dieser Gasdruck eine Kraft von weniger als

$$F_P = \pi r^2 \Delta p$$

auf die darunterliegende Kapillarsäule ausüben. Wenn diese Kraft größer oder gleich der Oberflächenspannungskraft

$$F_S = 2\pi r \sigma$$

ist, würde die Kapillarsäule vom Boden weggeblasen, von dem vorausgesetzt wird, daß er sich in einer Flüssigkeit **36** in einem Flüssigkeitsbehälter befindet. Der auf die Kapillarsäule ausübbare maximale Gasdruck ist daher gegeben durch

$$(\Delta p)_{\max} = \frac{2\sigma}{r} = \rho g h$$

Der in Tabelle 1 dargestellte Kapillarsäulenanstiegswert steht mit dem maximalen Gasdruck, der über die Wand des porösen Metallrohrs **30** ausgeübt werden kann, ohne daß die Flüssigkeit (Arbeitsfluid) aus den Poren herausgezwungen wird, direkt in Beziehung. Wie die Ergebnisse zeigen, würde ein poröses Metallrohr mit einem Porendurchmesser von 10 µm, das mit einer organischen Flüssigkeit gefüllt ist, wobei der Kapillarsäulenanstieg 122 cm beträgt, in der Lage sein, einer einer Wassersäule von 122 cm entsprechenden maximalen Gasdruckdifferenz über das poröse Metallrohr zu widerstehen.

**[0046]** Weil poröse Metalle im allgemeinen durch die meisten als Arbeitsfluid in einem Kondensationskernzähler geeigneten organischen Flüssigkeiten benetzbar sind, können sie einer wesentlichen Gasdruckdifferenz widerstehen, bevor die Flüssigkeit aus den Poren herausgeblasen wird. Außerdem können poröse Metalle mit wesentlich kleineren Porengrößen als diejenige von porösen Kunststoffen hergestellt werden, und ihre Qualität und ihre Porengröße ist gleichmäßiger als bei porösem Kunststoff. Unter Verwendung eines porösen Metalls, insbesondere von porösem rostfreiem Stahl, wäre es daher möglich, Sättiger von Kondensationskernzählern mit geeignet voraussagbaren Kapillarsäulenanstiegswerten herzustellen. Das Leistungsvermögen der aus porösen Metallen hergestellten Sättiger wäre daher gleichmäßiger und zuverlässiger und besser voraussagbar.

**[0047]** In der vorliegenden Erfindung tritt Gas, das zu erfassende Feinpartikel enthält (das Aerosol), mit einer sehr hohen Geschwindigkeit über eine kleine Öffnung oder einen Öffnungssatz **44** in die Sättigerkammer **28** ein. Wenn der Hochgeschwindigkeitsgasstrahl auf das gesättigte und erwärmte Gas in der Kammer **28** trifft, bricht es in kleine turbulente Wirbel auf, deren Größe etwa der Öffnungsgröße der Öffnung **44** entspricht. Die kleinen turbulenten Wirbel dispergieren rasch in das erwärmte und dampfgesättigte Gas in der Kammer **28**. Durch Wärme- und Dampfdiffusion über die Wirbelgrenzen werden die einzelnen Wirbel erwärmt und mit Dampf gesättigt. Der Zeitmaßstab, über den Wärme- und Dampfdiffusion stattfindet, kann anhand der Einstein-Gleichung für Wärme- und Dampftransport durch Molekulardiffusion abgeschätzt werden. Für thermische oder Wärmediffusion ist der Zeitmaßstab gegeben durch die Gleichung

$$X^2 = 2\alpha t$$

und für Dampfdiffusion gilt

$$X^2 = 2D t_v$$

wobei  $x$  den quadratischen Mittelwert oder Effektivwert des Diffusionsabstands,  $t$  und  $t_v$  die charakteristische Wärme- und Dampfdiffusionszeit,  $\alpha$  die Temperaturleitfähigkeit des Gases und  $D$  die Temperaturleitfähigkeit des Dampfes bezeichnen.

**[0048]** Die charakteristischen Wärme- und Dampfdiffusionszeiten über die Wirbelgrenzen ändern sich daher mit dem Quadrat des Radius der turbulenten Wirbel. Weil der Radius  $x$  der turbulenten Wirbel etwa die gleiche Größe hat wie der Radius  $r$  der Öffnung **44**, d.h.

$$x \approx r,$$

und weil die mittlere Gasgeschwindigkeit durch die Öffnung

$$V_g = \frac{Q}{\pi r^2}$$

beträgt, betragen die charakteristischen Wärme- und Dampfdiffusionszeiten

$$t_w = \frac{Q}{2\pi\alpha V_g}$$

bzw.

$$t_v = \frac{Q}{2\pi D V_g}$$

wobei  $Q$  die volumetrische Gasdurchflußrate durch die Öffnung bezeichnet.  $t_w$  und  $t_v$  sind daher zu der mittleren Gasgeschwindigkeit  $V_g$  durch die Öffnung umgekehrt proportional.

**[0049]** Beispielsweise beträgt die mittlere Gasgeschwindigkeit durch die Öffnung **44** für eine Gasdurchflußrate von  $300 \text{ cm}^3/\text{min}$  ( $\text{cc}/\text{min}$ ) bei einer Öffnung **44** mit einem Durchmesser von  $0,75 \text{ mm}$   $10 \text{ m/s}$  (Meter pro Sekunde). Die charakteristische Wirbelgröße beträgt  $0,75 \text{ mm}$ , und die charakteristischen Diffusionszeiten betragen etwa  $36 \text{ ms}$ . Zum Vergleich beträgt die Gasverweilzeit im Sättiger in einem für die Dampfsättigung verwendeten herkömmlichen Laminarströmungs-Sättiger für das durch den Dampf des Arbeitsfluids zu erwärmende und zu sättigende Gas etwa eine Sekunde. Unter Verwendung der hierin beschriebenen Turbulenzstrahltechnik werden die charakteristischen Wärme- und Dampfdiffusionszeiten um einen Faktor von ungefähr 30 und damit erheblich reduziert. Durch Erhöhen der Gasgeschwindigkeit auf beispielsweise  $20 \text{ m/s}$  können die Wärme- und Dampfdiffusionszeiten weiter um einen Faktor 2 auf etwa  $16 \text{ ms}$  reduziert werden, bzw. um einen Faktor, der 60-mal größer ist als bei dem in [Fig. 1](#) dargestellten herkömmlichen Kondensationskernzähler verwendeten Laminarströmungs-Sättiger.

**[0050]** Der im Turbulenzmischkondensator **50** auftretende Prozeß ist ähnlich. Wenn das Feinpartikel transportierende erwärmte und gesättigte Gas über eine kleine Öffnung oder einen Öffnungssatz **52** in den Kondensator eintritt, wird das Gas ebenfalls in kleine Wirbel aufgebrochen. Diese kleinen Wirbel, die jeweils erwärmten und gesättigten Dampf enthalten, werden in das kalte Gas im Kanal oder in der Kammer **54** dispergiert, das etwa die Kondensatortemperatur aufweist. Die einzelnen Wirbel werden durch thermische Diffusion über die Wirbelgrenzen abgekühlt, wodurch Übersättigungsbedingungen erzeugt werden, die zu einer Dampfkondensation und zu Tröpfchenwachstum auf den Partikeln führen.

**[0051]** Weil für den organischen Arbeitsfluiddampf Wärmediffusion schneller auftritt als Dampfdiffusion, würden die einzelnen Wirbel etwa auf eine gleichmäßige Temperatur abgekühlt, bevor durch Diffusion über die Wirbelgrenzen zum umgebenden kalten Gas viel Dampf verloren geht. Dadurch wird gewährleistet, daß die innerhalb jedes Wirbels erzeugten Übersättigungsbedingungen für die Dampfkondensation und das Tröpfchenwachstum im wesentlichen gleichmäßig sind, und daß alle Partikel mit der gleichen Größe aktiviert werden. Dies führt zu einem verbesserten Leistungsvermögen des Kondensationskernzählers. Außerdem wird der Arbeitsfluidverlust durch Dampfkondensation auf den die Kammer **54** bildenden kalten Kondensatorrohrwänden minimiert. Der sich daraus ergebende Arbeitsfluidverbrauch durch den Kondensationskernzähler ist ebenfalls geringer. Dadurch kann die Größe des Arbeitsfluidbehälters **38** reduziert werden, wodurch die Größe des Kondensationskernzählers insgesamt reduziert werden kann.

**[0052]** Die Gaseintrittsgeschwindigkeiten des in die Sättiger und in die Kondensatorkammer eintretenden Gasstroms, die erforderlich sind, um eine effiziente turbulente Mischung zu erzeugen, sind davon abhängig, wie schnell die Mischung stattfinden muß. Für Kondensationskernzähleranwendungen hat sich gezeigt, daß eine Gasstrahlgeschwindigkeit von  $10 \text{ m/s}$  und sogar Gasstrahlgeschwindigkeiten von nur  $50 \text{ cm/s}$  verwendbar sind, um das Leistungsvermögen des Kondensationskernzählers zu verbessern.

**[0053]** Obwohl lediglich eine Öffnung **44** oder **52** für die turbulente Gasmischung im Sättiger oder im Kondensator verwendet werden kann, können auch mehr als eine Öffnung verwendet werden. Beispielsweise muß, wenn an Stelle einer einzigen Öffnung vier Öffnungen mit dem gleichen Durchmesser verwendet werden, während die volumetrische Gasdurchflußrate in den Kondensator oder in den Sättiger und die mittlere Gasgeschwindigkeit durch jede Öffnung unverändert bleiben, die Fläche jeder Öffnung um den Faktor 4 und der Öffnungsduurchmesser um den Faktor 2 reduziert werden. Der Öffnungsduurchmesser kann daher von 0,75 mm auf 0,375 mm reduziert werden, wodurch die charakteristische Wärmediffusionszeit von 36 ms auf 18 ms abnimmt. Durch Erhöhen der Anzahl von Öffnungen von beispielsweise 1 auf 16 würde die Öffnungsgröße von 0,75 auf 0,19 mm und die charakteristische Wärmediffusionszeit von 36 ms auf 9 ms reduziert. Durch Erhöhen der Anzahl von am Sättiger- und am Kondensatoreinlaß verwendeten Öffnungen wird die Anzahl turbulenter Wirbel erheblich erhöht. Gleichzeitig wird die Wirbelgröße kleiner, wodurch die zum Erreichen des thermischen und Dampfgleichgewichts erforderliche Zeit reduziert wird.

**[0054]** Zum Zählen der durch Kondensation gebildeten Tröpfchen kann ein optischer Partikelzähler verwendet werden. In der in [Fig. 6](#) dargestellten bevorzugten Ausführungsform wird ein Lichtstreuungs-Tröpfchenzähler **58** (LDC) verwendet. Im LDC-Zähler ist die Kondensorlinse **62** eine zylindrische Linse, die veranlaßt, daß der Laserstrahl in einem Bereich **61** an der Achse der Einlaßdüse **56** und des Auslaßrohrs **64** fokussiert wird. Wenn der Strahl die Kollektorlinse **66** erreicht, wird das Laserlicht durch die Strahlblockiereinrichtung **70**, die eine opake, lichtabsorbierende Fläche bildet, absorbiert.

**[0055]** Die Aerosoltröpfchen gelangen über die Einlaßdüse **56** in den LDC-Zähler. Wenn die Tröpfchen die Düsen spitze erreichen, nimmt die Strömungsquerschnittsfläche wesentlich ab, so daß das Aerosol auf eine hohe Geschwindigkeit beschleunigt wird. Dieses Hochgeschwindigkeitsgas, das die zu erfassenden Tröpfchen enthält, durchläuft dann den fokussierten Laserstrahl und strömt über das Auslaßrohr **64** aus dem Lichtstreuungs-Partikelzähler heraus. Wenn jedes Tröpfchen den Fokusbereich **61** des Laserstrahls durchläuft, streut es Licht in alle Richtungen. Die Kollektorlinse **66** sammelt das gestreute Licht in der Vorwärtsrichtung des Laserstrahls und projiziert es auf einen der Linse **66** gegenüberliegenden ringförmigen Bereich auf dem Halbleiter-Fotodiodendetektor **68**. Das Signal von der Fotodiode **68** wird dann durch eine geeignete Pulshöhenanalyseschaltung **69** elektronisch verarbeitet. Obwohl als Kollektorlinse **66** für das gestreute Licht eine einzelne Linse dargestellt ist, können als Kollektorlinse auch mehr als eine Linse oder eine Mehrelementlinse verwendet werden, um das Leistungsvermögen zu verbessern.

**[0056]** In der Darstellung sind sowohl die Kondensor- als auch die Kollektorlinsen zur Vereinfachung als einzelne Linsen dargestellt, es können jedoch mehr als eine Linse verwendet werden, um das optische Leistungsvermögen des LDC-Zählers **58** zu verbessern. Solche Verbesserungen in der optischen Konstruktion von Lichtstreuungs-Partikelzählern sind für Fachleute leicht ersichtlich.

**[0057]** Um zu verhindern, daß der Arbeitsfluiddampf auf der LDC-Optik kondensiert, ist das LDC-Gehäuse **80** aus einem wärmeleitenden Material, z.B. Aluminium, hergestellt und in engem thermischem Kontakt mit dem Sättigerblock **26** angeordnet und wird im wesentlichen auf die gleiche Temperatur wie diejenige des Sättigerblocks **26** erwärmt. Daß Dampfkondensation auf der Optik des Tröpfchendetektors verhindert werden muß, ist für Fachleute auf dem Gebiet der Konstruktion von Kondensationskernzählern ersichtlich, wie beispielsweise gemäß der Zeichnung der im US-Patent Nr. 4,790,650 (Keady) dargestellten Vorrichtung ersichtlich ist.

**[0058]** In der in [Fig. 5](#) dargestellten bevorzugten Ausführungsform des Kondensationskernzählers wird eine elektrische Heizvorrichtung **34** verwendet, um den Sättigerblock auf eine gewünschte oder Soll-Temperatur von typischerweise 35°C zu erwärmen, und eine thermoelektrische Kühlvorrichtung **82** wird verwendet, um den einen Teil eines Kondensators **50** bildenden Kondensatorblock **84** auf eine gewünschte oder Soll-Temperatur von typischerweise 5°C abzukühlen.

**[0059]** [Fig. 5](#) zeigt einen einzelnen Kanal eines in den [Fig. 2](#), [Fig. 3](#), [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) dargestellten Mehrkanal-Kondensationskernzählers, der für derartige Zwecke geeignet wäre.

**[0060]** In den [Fig. 2](#), [Fig. 3](#), [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) sind vier Meßkanäle dargestellt, die jeweils identisch wie in [Fig. 6](#) bezeichnet sind, außer daß die Strömungskanäle durch die Bezugszeichen **106**, **106A**, **106B** und **106C** bezeichnet sind. Im allgemeinen kann ein Mehrkanal-Kondensationskernzähler auch lediglich zwei Meßkanäle aufweisen. Es besteht kein besonderer oberer Grenzwert hinsichtlich der maximalen Anzahl von Kanälen eines Mehrkanal-Kondensationskernzählers. Der obere Grenzwert wird im allgemeinen durch Raum- und Kostenbetrachtungen festgelegt.

[0061] [Fig. 6](#) zeigt einen Querschnitt durch den Sättigermetallblock **26**, der die Sättigerrohre **30** aus porösem Metall aufweist. Die Sättigerrohre **30** aus porösem Metall stehen alle mit dem Sättigerblock **26** in engem thermischen Kontakt, der aus einem Metall mit hoher Wärmeleitfähigkeit, typischerweise aus Aluminium, hergestellt ist. Der Block **26** wird durch elektrische Heizvorrichtungen **34** auf eine geeignete hohe Temperatur, typischerweise auf 25°C bis 40°C, erwärmt. Weil der Sättigermetallblock **26** eine im wesentlichen gleichmäßige Temperatur aufweist, weisen alle Sättigerrohre **30** ebenfalls eine im wesentlichen gleiche Temperatur auf.

[0062] Die unteren Enden der Sättigerrohre **30** stehen mit dem Arbeitsfluid **36** im Arbeitsfluidbehälter **38** in Fluidkommunikation. Der Behälter **38** wird auch zum Zuführen des Arbeitsfluids zu allen Sättigerrohren verwendet. Durch kapillare Oberflächenspannung werden die Sättigerrohre **30** aus porösem Metall daher in ihren Porenzwischenräumen mit dem Arbeitsfluid gesättigt, so daß das Arbeitsfluid von den porösen Metallwänden in die Sättigerkammern **28** verdampfen kann. Jedes Sättigerrohr **30** aus porösem Metall weist eine feste Verschluß-/Trennvorrichtung auf, die die Basis der Sättigerkammer **28** bildet, wobei das untere Ende des Sättigerrohrs **30** in das Arbeitsfluid **36** im Behälter **38** eintaucht. Auch hier wird eine kleine Öffnung **44** am Gaseinlaß zu den Sättigerkammern **28** verwendet, um zu ermöglichen, daß das zu erfassende Partikel enthaltende Gas einen Hochgeschwindigkeitsgasstrahl bildet, um in der Sättigerkammer **28** eine turbulente Gasmischung und Dampfsättigung zu erhalten.

[0063] [Fig. 7](#) zeigt einen Querschnitt durch den Kondensatorblock **84**, der ebenfalls aus einem Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit, typischerweise aus Aluminium, hergestellt ist. Der Block **84** wird durch eine in [Fig. 5](#) dargestellte thermoelektrische Kühlvorrichtung **82** auf eine Temperatur von typischerweise 5°C abgekühlt. Der Kondensatorblock **84** ist von einer Wärmeisolierung **83** umgeben, um die Wärmebelastung der thermoelektrischen Kühlvorrichtung **82** zu minimieren und dadurch die zum Betreiben der thermoelektrischen Kühlvorrichtung **82** erforderlichen elektrische Leistung zu minimieren. Außerdem wird ein Kühlkörper **85** bereitgestellt.

[0064] Es sind zahlreiche Kondensatorhohlräume oder -kammern **54** im Kondensatorblock vorhanden. Jede Kammer **54** hat typischerweise eine im allgemeinen zylindrische Form. An der Basis jeder Kammer befindet sich ein erwärmer Gaskanal in den Rohren **42**, denen das zu erfassende Partikel enthaltende, erwärmte und dampfbeladene Gas vom Sättiger **28** zugeführt wird. Dieses Gas strömt durch die kleine Einlaßöffnung **52**, um einen Hochgeschwindigkeitsgasstrahl zu erzeugen, der in die Kondensatorkammern **54** eintritt, um eine turbulente Mischung und Dampfkondensation auf den Partikeln zu veranlassen, um Tröpfchen zu bilden. Außerdem kondensieren auch etwas Wasser und Arbeitsfluid, das durch Öffnungen **51** in die Ableitkammer **53** abgeleitet wird. Die Tröpfchen werden dann durch das Gas durch den Kammerauslaß und in die Einlaßdüse **56** der Tröpfchenzähler **58** auf der Oberseite des Kondensationskernzählers transportiert. Für jeden Kondensationskernzählerkanal ist ein Tröpfchenzähler vorgesehen. Für den dargestellten Vierkanal-Kondensationskernzähler sind daher vier separate Tröpfchenzähler **58** vorgesehen.

[0065] Die [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) zeigen unter Bezugszeichen **90** eine andere Ausführungsform des erfindungsgemäßen Kondensationskernzählers. Die Arbeitsweise und Konstruktion sind im wesentlichen die gleichen wie bei der Ausführungsform von [Fig. 5](#), außer daß die elektrische Heizvorrichtung eliminiert und durch eine thermoelektrische Heizvorrichtung ersetzt worden ist und die thermoelektrische Kühlvorrichtung und der Kühlkörper zu einer anderen Position versetzt worden sind.

[0066] In den [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) weist der Kondensationskernzähler **90** einen Sättigerblock **92** auf, der durch eine thermoelektrische Heizvorrichtung **94** erwärmt wird und Wärme von der Umgebungsluft über einen Kühlkörper **96** abzieht und an den Sättigerblock **92** Wärme abführt (zuführt). Es wird eine thermoelektrische Kühlvorrichtung **98** verwendet, um Wärme vom Kondensatorblock **100** abzuziehen, während Wärme über einen Kühlkörper **102** an die Umgebungsluft abgegeben wird. Der Kondensatorblock **100** weist Isolierlagen an den Seiten auf, die von der mit der thermoelektrischen Kühlvorrichtung **98** in Kontakt stehenden Fläche verschieden sind. Die beiden Kühlkörper **96** und **102**, d.h. ein Kühlkörper für die thermoelektrische Heizvorrichtung **94** und ein anderer Kühlkörper für die thermoelektrische Kühlvorrichtung **98**, sind thermisch gekoppelt und bilden eine einzelne Einheit, so daß die durch einen Kühlkörper abgegebene Wärme zum Zuführen von durch den anderen Kühlkörper abgezogener Wärme verwendet wird. Auf diese Weise wird die zum Erwärmen des Sättigerblocks **92** erforderliche elektrische Energie reduziert, weil der zum Erwärmen des Sättigers erforderliche Wärmeanteil von der durch die thermoelektrische Kühlvorrichtung für den Kondensator abgegebenen Wärme bereitgestellt wird, und die Restenergie wird durch die der thermoelektrischen Heizvorrichtung zugeführte elektrische Leistung bereitgestellt.

[0067] In der in den [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) dargestellten Ausführungsform wird das Aeorosol durch die Aerosolquelle **104** einem Kondensatorkanal **106** im Kondensatorblock **92** zugeführt, und dann strömt das Aerosol

durch eine Öffnung **108** in eine Sättigerkammer **110**, die in einem Sättigerrohr **112** ausgebildet ist, das wie vorstehend erwähnt aus einem porösen Metall hergestellt ist. Der Aerosolstrom wird durch eine Pumpe oder durch einen anderen eine Druckdifferenz erzeugenden Strömungsgenerator **113** an einem Auslaß des Kondensationskernzählers **90** erzeugt. Das Sättigerrohr aus porösem Metall weist ein Ende auf, das sich in einem flüssigen Arbeitsfluid **114** befindet, das in einem Behälter **116** gehalten wird und durch eine Wand **117** begrenzt ist. Das Aerosol strömt, nachdem es durch den Dampf des Arbeitsfluids gesättigt ist, über einen Pfad in einem Rohr **118** und durch eine Öffnung oder einen Öffnungssatz **120** in eine Kondensatorkammer **122** des Kondensatorblocks **100**.

**[0068]** Außerdem wird eine zu einer Kondensatkammer **124** zum Sammeln von Kondensat **126** führende Auslaßöffnung **123** bereitgestellt.

**[0069]** Das die Tröpfchen mit dem um die Partikel herum ausgebildeten Kondensat transportierende Aerosol durchläuft ein Auslaßdüsenrohr **128** und strömt in eine Lichtstreuungs-Tröpfchenzählkammer **130** eines Lichtstreuungs-Tröpfchenzählers **132**. Über ein mit der Pumpe **113** verbundenes Auslaßrohr **134** kann das Aerosol die Kammer **130** verlassen, nachdem es einen Laserstrahl **136** passiert hat. Durch die Tröpfchen gestreutes Licht wird durch eine Linse **138** gesammelt, die einer Fotodiode **140** Lichtsignale zuführt, wie vorstehend erläutert wurde. Die Fotodiode **140** ist außerdem mit einer geeigneten Schaltung **142** verbunden, wie ebenfalls vorstehend erläutert wurde, um einen Tröpfchen (Partikel) -zählwert bereitzustellen. Der Laserlichtstrahl **136** wird durch eine Laserquelle **144** erzeugt.

**[0070]** Ein Vorteil der Verwendung einer thermoelektrischen Heizvorrichtung **94** zum Erwärmen des Sättigerblocks **92** an Stelle einer einfachen elektrischen Heizvorrichtung besteht darin, daß, wenn ein Kondensationskernzähler in einer problematischen oder schwierigen Temperaturumgebung verwendet wird, bei der die Umgebungstemperatur höher ist als die gewünschte Betriebstemperatur des Sättigers, die thermoelektrische Heizvorrichtung als Kühlvorrichtung verwendbar ist, indem einfach die Richtung des Gleichstromflusses zur Heizvorrichtung umgekehrt wird. Wenn beispielsweise die Umgebungstemperatur  $35^{\circ}\text{C}$  beträgt, während die gewünschte Betriebstemperatur des Sättigers  $30^{\circ}\text{C}$  beträgt, wäre eine einfache elektrische Heizvorrichtung nicht in der Lage, den Sättiger bei der gewünschten Temperatur von  $30^{\circ}\text{C}$  zu halten, während eine thermoelektrische Heizvorrichtung im Kühlmodus betreibbar ist, indem die Richtung des Gleichstromflusses einfach umgekehrt wird. Dadurch kann der Betriebstemperaturbereich des Kondensationskernzählers so erweitert werden, daß er auch für gelegentlich auftretende problematische oder schwierige Temperaturumgebungen geeignet ist.

**[0071]** Ein anderer Vorteil der Verwendung zweier thermoelektrischer Module, wobei eines primär als Heizvorrichtung und das andere als Kühlvorrichtung verwendet wird, in einem "Gegentakt"modus (engl. „push – pull“ mode) besteht darin, daß die beiden separaten thermoelektrischen Module unabhängig voneinander steuerbar sind, um die Temperatur des Sättigers und des Kondensators bei ihren jeweiligen Sollwerten von beispielsweise  $35^{\circ}\text{C}$  bzw.  $5^{\circ}\text{C}$  zu steuern. In der herkömmlichen Technik, gemäß der ein einzelnes thermoelektrisches Modul zwischen dem Kondensator und dem Sättiger verwendet wird, kann lediglich die Temperaturdifferenz zwischen dem Sättiger und dem Kondensator gesteuert werden. Wenn die Umgebungstemperatur sich ändert, würden sich auch die Ist-Temperatur des Kondensatorblocks **100** und diejenige des Sättigerblocks **92** ändern, was zu einer Änderung des Leistungsverhaltens des Kondensationskernzählers führt. Diese Änderung kann durch Verwendung von zwei separaten unabhängigen Steuerungen **94A** und **98A** für die beiden separaten thermoelektrischen Module **94** und **98** eliminiert werden. Die Steuerung **94A** wird zum Steuern des Moduls **94** und die Steuerung **98A** zum Steuern des Moduls **98** verwendet.

**[0072]** Hinsichtlich der spezifischen Technik zum Steuern der Temperatur des Sättigerblocks **92** oder des Kondensatorblocks **100** durch ein thermoelektrisches Modul ist es üblich, die Differenz zwischen der Ist-Temperatur und der Soll-Temperatur zu messen, und durch einen PID- (Proportional-Integral-Differential) Controller wird die zugeführte Spannung geändert, um den Stromfluß durch das thermoelektrische Modul zu ändern, bis die Temperaturdifferenz auf ein Minimum reduziert ist. Für die Sättiger- oder Kondensatortemperatursteuerung ist es, weil die Temperatur sich nur langsam ändert, im allgemeinen nicht nötig, die volle PID-Steuerungsfunktionsfähigkeit zu nutzen. Ein Proportional-Integral-Controller wäre in den meisten Fällen völlig ausreichend, und in einigen Fällen wäre eine einfache Proportionalsteuerung geeignet. Die Temperatursteuerungstechnik ist Fachleuten auf dem Gebiet des elektronischen Schaltungsdesigns bekannt, und in der Praxis kann eine beliebige Steuerschaltung verwendet werden, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen, gemäß dem der Sättigerblock **92** und der Kondensatorblock **100** bei ihren jeweiligen Temperatur-Sollwerten gehalten werden, ohne daß von den vorstehend beschriebenen erfindungsgemäßigen Zielen zum Erreichen eines gleichmäßigen und reproduzierbaren Leistungsverhaltens des Kondensationskernzählers durch eine verbesserte

Konstruktion und eine präzisere Temperatursteuerung des Sättigerblocks und des Kondensatorblocks abgewichen wird.

**[0073]** Wenn ein Kondensationskernzähler zum Zählen von Partikeln in einem Aerosol verwendet wird, müssen manchmal mehrere Aerosole gleichzeitig gezählt werden. In einigen Fällen wäre es vorteilhaft, hierfür an Stelle mehrerer einzelner Kondensationskernzähler einen einzelnen Mehrkanal-Kondensationskernzähler zu verwenden.

**[0074]** Der in den [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) dargestellte Zähler ist auch als Mehrkanalzähler implementierbar. Ein Vorteil eines Mehrkanal-Kondensationskernzählers ist, daß eine einzelne Mehrkanalvorrichtung im allgemeinen wesentlich kleiner ist als mehrere separate, selbständige Kondensationskernzähler, die erforderlich sind, um die gleiche Messung auszuführen. Die Kosten der Mehrkanalvorrichtung sind ebenfalls niedriger, weil an Stelle separater Heizvorrichtungen und Steuerungen, jeweils eine für jeden selbständigen Kondensationskernzähler, zum Steuern aller Sättiger eine einzelne elektrische Heizvorrichtung und Steuerschaltung verwendet werden kann. Aus dem gleichen Grunde kann zum Steuern aller Kondensatorblöcke an Stelle separater Kühl- und Steuervorrichtungen, eine für jeden der Kondensatorblöcke separater Kondensationskernzähler, eine einzelne thermoelektrische Kühlvorrichtung und Steuerschaltung verwendet werden.

**[0075]** Technisch kann ein Mehrkanal-Kondensationskernzähler ebenfalls ein besseres Leistungsvermögen haben, weil alle Sättigerkammern im gleichen Sättigerblock ausgebildet sind, wodurch erreicht wird, daß die Temperatur und der Dampfsättigungsgrad in den Probengasströmen sich in höherem Maße im wesentlichen gleichen. Ähnlicherweise wären die Bedingungen für Dampfkondensation und Tröpfchenwachstum für alle Probenströme im wesentlichen gleich, weil die Kondensatorkammern im gleichen Kondensatorblock ausgebildet sind. Die durch eine einzelne Mehrkanalvorrichtung ausgeführte Messung wäre daher konsistenter als unter Verwendung separater selbständiger Kondensationskernzähler ausgeführte Messungen.

**[0076]** Obwohl die vorliegende Erfindung unter Bezug auf bevorzugte Ausführungsformen beschrieben worden ist, ist für Fachleute ersichtlich, daß innerhalb des Schutzmfangs der Erfindung Änderungen in den Ausführungsformen und Details vorgenommen werden können.

#### Zusammenfassung Kompakter hocheffizienter Kondensationskernzähler

**[0077]** Durch die vorliegende Erfindung wird ein Kondensationskernzähler (**20, 90**) mit einer Folge von einen Strömungsweg bildenden Strömungskanälen bereitgestellt, die einen ersten Kanal (**24, 30, 42, 54, 56, 106, 110, 118, 122**) zum Transportieren eines zu erfassende Partikel enthaltenden Gasstroms aufweisen, wobei der erste Kanal geheizt ist, so daß der Gasstrom erwärmt wird, bevor er in einen Sättiger (**30, 110**) eintritt. Der Sättiger (**30, 110**) ist als Teil des Strömungsweges (**24, 30, 42, 54, 56, 106, 110, 118**) für den Gasstrom angeordnet und besteht aus einem porösen Material und weist einen in ein flüssiges Arbeitsfluid (**36**) eingetauchten Abschnitt auf. Das poröse Material wird so ausgewählt, daß sich das flüssige Arbeitsfluid (**36, 114**) durch eine Kapillarwirkung entlang der Länge des Sättigers (**30, 110**) bewegt. Dampf vom flüssigen Arbeitsfluid wird zum Gasstrom übertragen, während er sich durch den Sättiger (**30**) bewegt. Der Gasstrom wird dann einem Kondensator oder einer Kühlvorrichtung (**54, 122**) zugeführt, der/die die Temperatur des Gasstroms absenkt und veranlaßt, daß der Arbeitsfluiddampf auf den Partikeln im Gasstrom kondensiert, um Tröpfchen zu bilden. Ein Partikeldetektor (**58, 132**), z.B. ein Lichtstreuungs-Partikeldetektor (**58, 132**), empfängt dann den Gasstrom und erfaßt die erzeugten Tröpfchen. ([Fig. 5](#))

#### Patentansprüche

1. Durchflußmeßvorrichtung zum Erfassen von Partikeln, die in einem sich entlang eines Pfades bewegenden Gasstrom enthalten sind, mit:  
einer Quelle für ein flüssiges Arbeitsfluid;  
einer entlang des Pfades angeordneten Sättigungseinrichtung zum Zuführen einer Dampfform des Arbeitsfluids zum Gasstrom, wobei die Sättigungseinrichtung ein poröses Metall aufweist, das mit der Fluidquelle kommuniziert und über das der Gasstrom strömt;  
einer Heizquelle zum Erwärmen des porösen Metalls;  
einer entlang des Pfades des Gasstroms, strömungsabwärts von der Sättigungseinrichtung angeordneten Kühleinrichtung zum Veranlassen einer Dampfkondensation auf den Partikeln, um Tröpfchen im Gasstrom zu erzeugen; und  
einem strömungsabwärts von der Kühleinrichtung angeordneten Sensor zum Erfassen der Tröpfchen.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei der Porendurchmesser des porösen Metalls kleiner ist als 500 µm.

3. Durchflußmeßvorrichtung zum Erfassen von Partikeln in einem Gasstrom, mit:  
einer Quelle für eine Gasprobe, die sich in einem Strom entlang eines Pfades bewegt, wobei die Gasprobe Feinpartikel und Wasserdampf enthält;  
einer Fluidquelle für ein flüssiges Arbeitsfluid;  
einer Sättigungseinrichtung mit einem entlang des Pfades ausgebildeten und mit der Fluidquelle kommunizierenden Kanal, wobei die Sättigungseinrichtung dazu geeignet ist, dem Gas Arbeitsfluiddampf zuzuführen;  
einer entlang des Pfades und strömungsabwärts von der Sättigungseinrichtung angeordneten Kühlvorrichtung zum Veranlassen, daß Dampf auf den Partikeln im Gasstrom kondensiert, um Tröpfchen zu erzeugen; einer in der Nähe der Kühlvorrichtung angeordneten Sammelvorrichtung zum Sammeln von kondensiertem Arbeitsfluid und Wasserdampf; und  
einem strömungsabwärts von der Kühlvorrichtung angeordneten Sensor zum Erfassen der Tröpfchen.

4. Durchflußmeßvorrichtung nach Anspruch 3, wobei die Sättigungseinrichtung ein poröses Material mit einen Innenraum definierenden Wänden und eine Öffnung aufweist, durch die der Gasstrom sich bewegt, um einen in den Innenraum eintretenden Gasstrahl zu erzeugen.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, wobei die mittlere Gasgeschwindigkeit des durch die Öffnung strömenden Gases mindestens 50 cm/s beträgt.

6. Durchflußmeßvorrichtung nach Anspruch 4, wobei die Kühlvorrichtung eine Kammer mit kalten Wänden und einer Einlaßöffnung zum Zuführen des Gasstroms in die Kammer aufweist, wobei durch die Einlaßöffnung ein in den Innenraum der Kammer eintretender Gasstrahl bereitgestellt wird.

7. Durchflußmeßvorrichtung zum Erfassen von Partikeln in einem Gasstrom, mit:  
einer Strömungserzeugungsvorrichtung zum Saugen einer Gasprobe in einem Strom entlang eines ersten, eines zweiten und eines dritten Kanals, die in Folge miteinander verbunden sind, wobei die Gasprobe Feinpartikel enthält;  
einer Fluidquelle für ein flüssiges Arbeitsfluid;  
einer Heizvorrichtung zum Erwärmen der Gasprobe auf eine ausgewählte Temperatur, während der Gasstrom sich entlang des ersten Kanals bewegt;  
einer Sättigungseinrichtung mit dem zweiten Kanal, der derart verbunden ist, daß er den Gasstrom vom ersten Kanal empfängt, um dem Gasstrom Arbeitsfluiddampf zuzuführen, wenn der Gasstrom sich durch den zweiten Kanal bewegt; und  
einer Kühlvorrichtung mit dem dritten Kanal zum Empfangen des Gasstroms vom zweiten Kanal, um eine Dampfkondensation auf den Partikeln im Gasstrom zu veranlassen, um Tröpfchen zu bilden.

8. Durchflußmeßvorrichtung nach Anspruch 7, wobei zwischen dem ersten und dem zweiten Kanal eine Öffnung zum Erzeugen eines Gasstrahls im zweiten Kanal angeordnet ist.

9. Durchflußmeßvorrichtung nach Anspruch 8, wobei die Sättigungseinrichtung ein den zweiten Kanal bildendes Rohr aufweist, wobei das Rohr porös ist und einen in der Arbeitsfluidquelle angeordneten Abschnitt aufweist, wobei durch die Poren der Sättigungseinrichtung eine kapillare Bewegung des flüssigen Arbeitsfluids zur Oberfläche des zweiten Kanals veranlaßt wird.

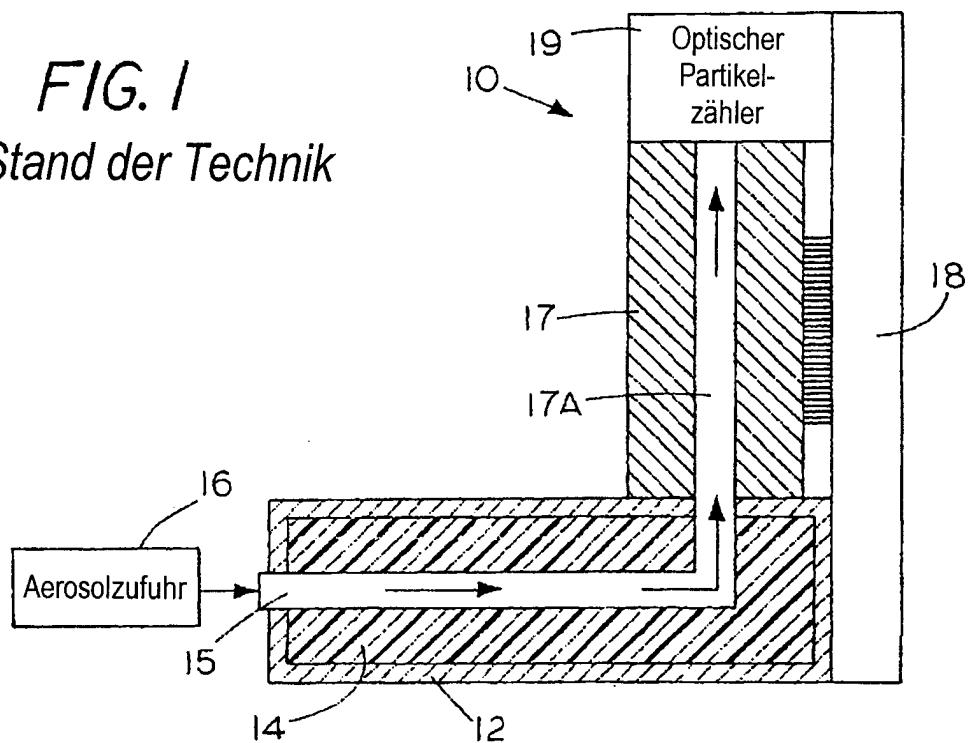
10. Durchflußmeßvorrichtung nach Anspruch 7, wobei zwischen dem zweiten Kanal und dem dritten Kanal eine zweite Öffnung angeordnet ist, wobei ein durch die zweite Öffnung erzeugter Gasstrahl den dritten Kanal durchläuft.

11. Durchflußmeßvorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 10, wobei die Kühlvorrichtung einen Block mit dem darin ausgebildeten dritten Kanal und eine bezüglich des Blocks in einer Wärmeübertragungsbeziehung angeordnete thermoelektrische Kühlvorrichtung aufweist.

12. Durchflußmeßvorrichtung nach Anspruch 10, wobei das Rohr ein poröses Metallrohr mit einer im allgemeinen aufrechten Achse ist, wobei die Öffnung zwischen dem ersten und dem zweiten Kanal an einem oberen Ende des Rohrs angeordnet ist, und wobei der zweite Kanal durch einen rohrförmigen Verbinder an einem unteren Ende des dritten Kanals mit dem dritten Kanal verbunden ist.

Es folgen 5 Blatt Zeichnungen

*FIG. 1*  
Stand der Technik



*FIG. 2*

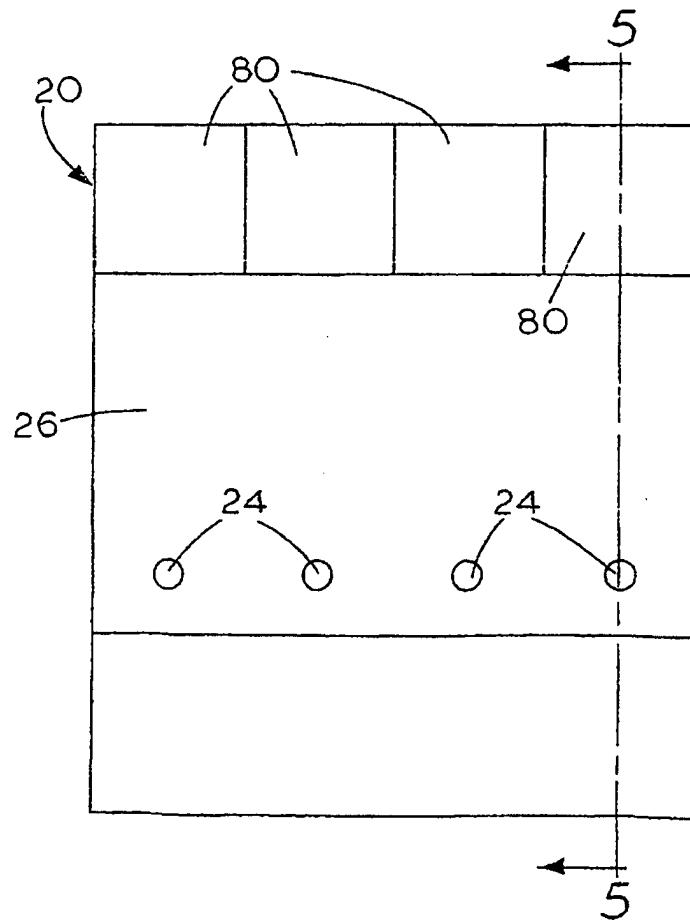


FIG. 3

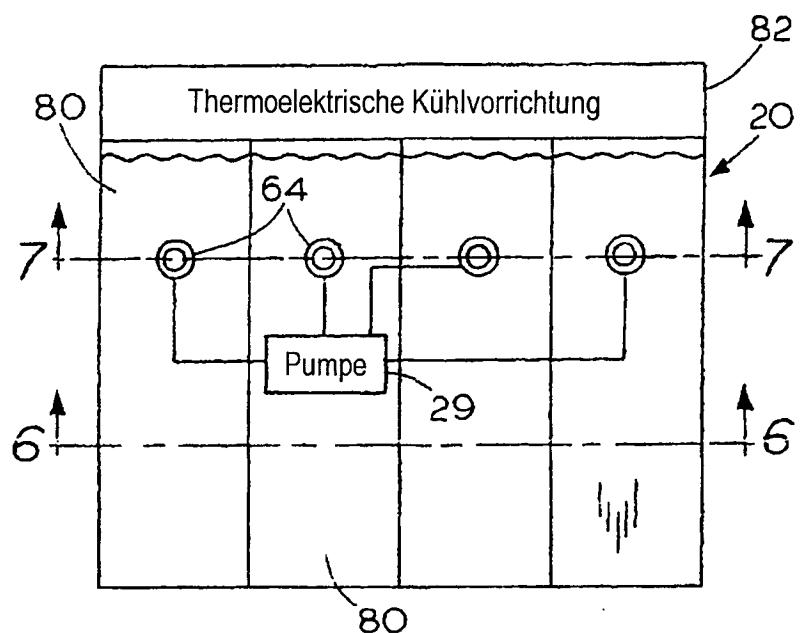


FIG. 4

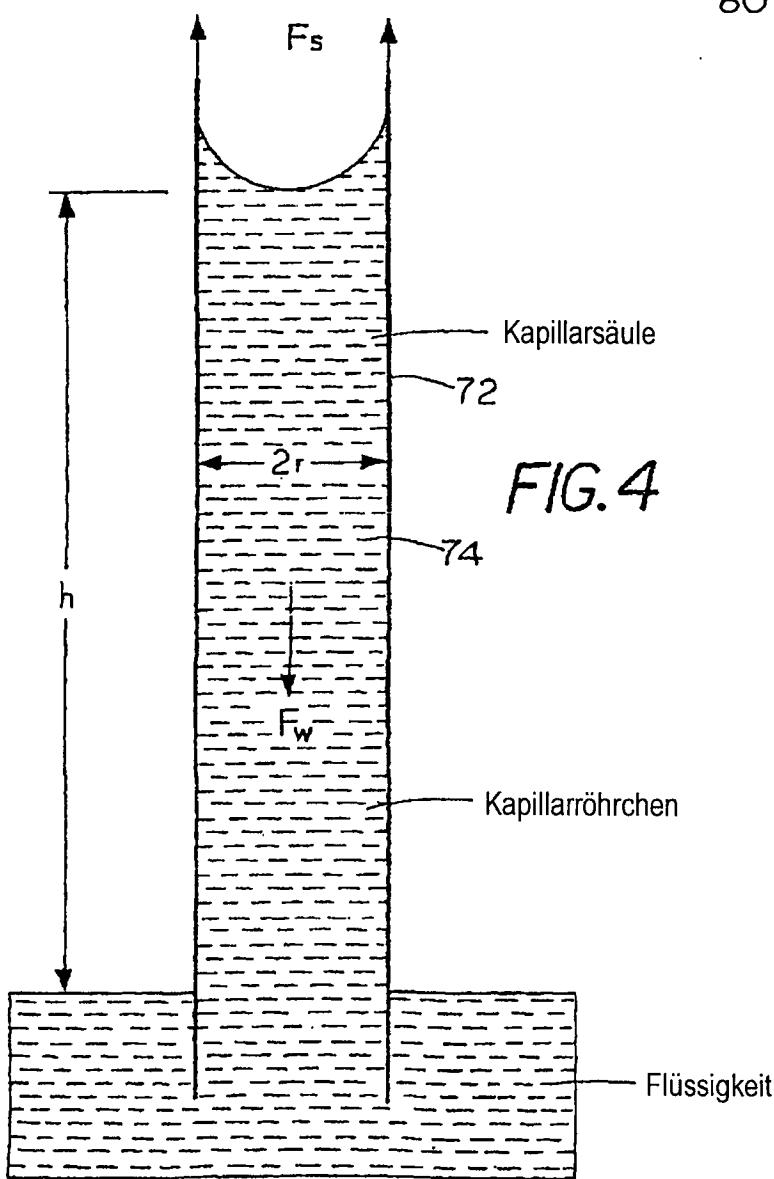


FIG. 5

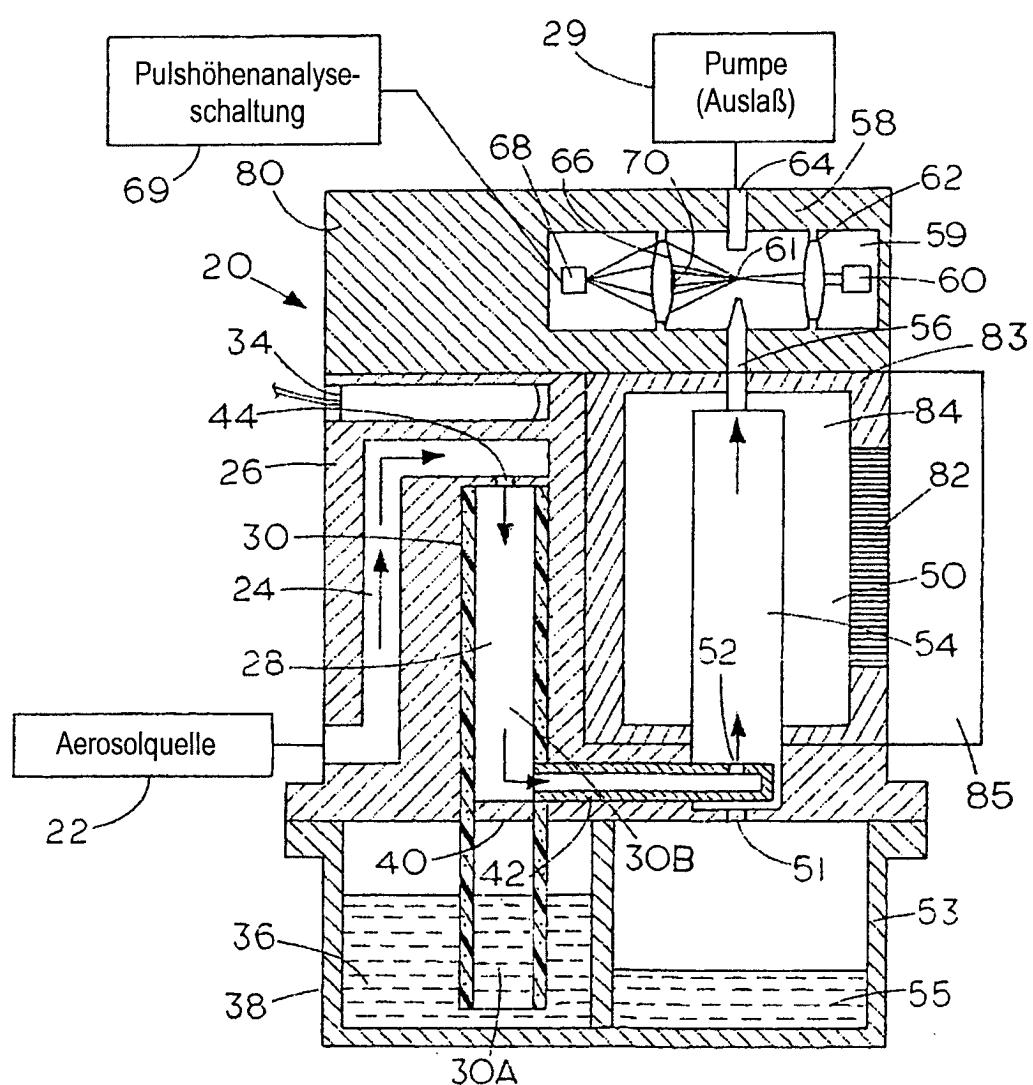


FIG.6

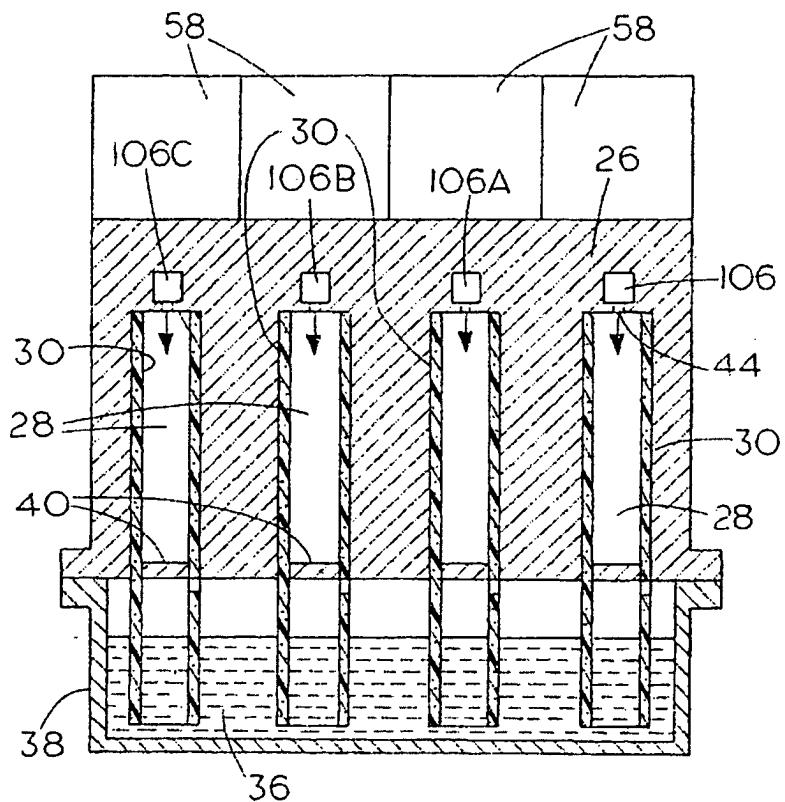


FIG.7

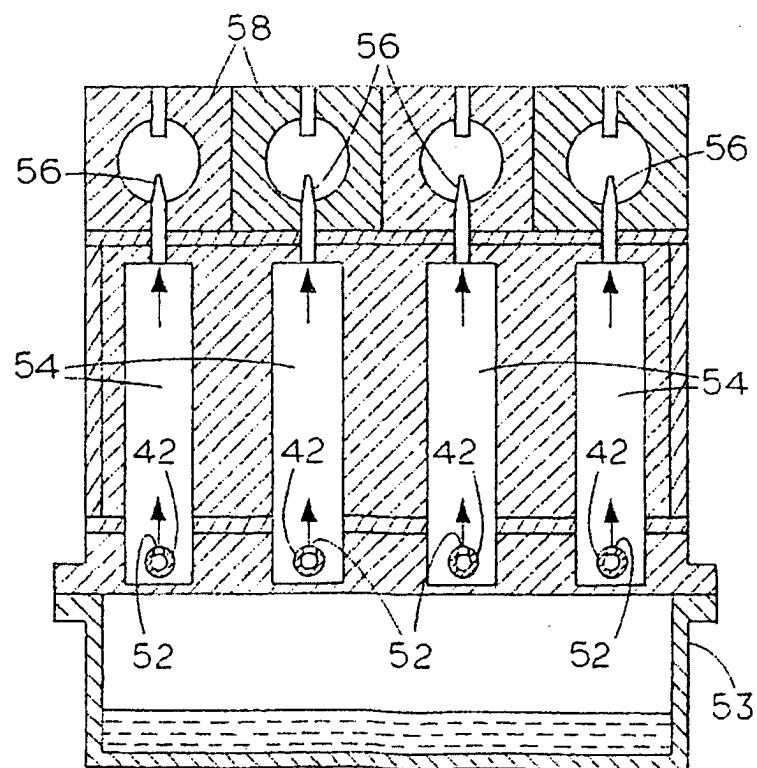


FIG. 8

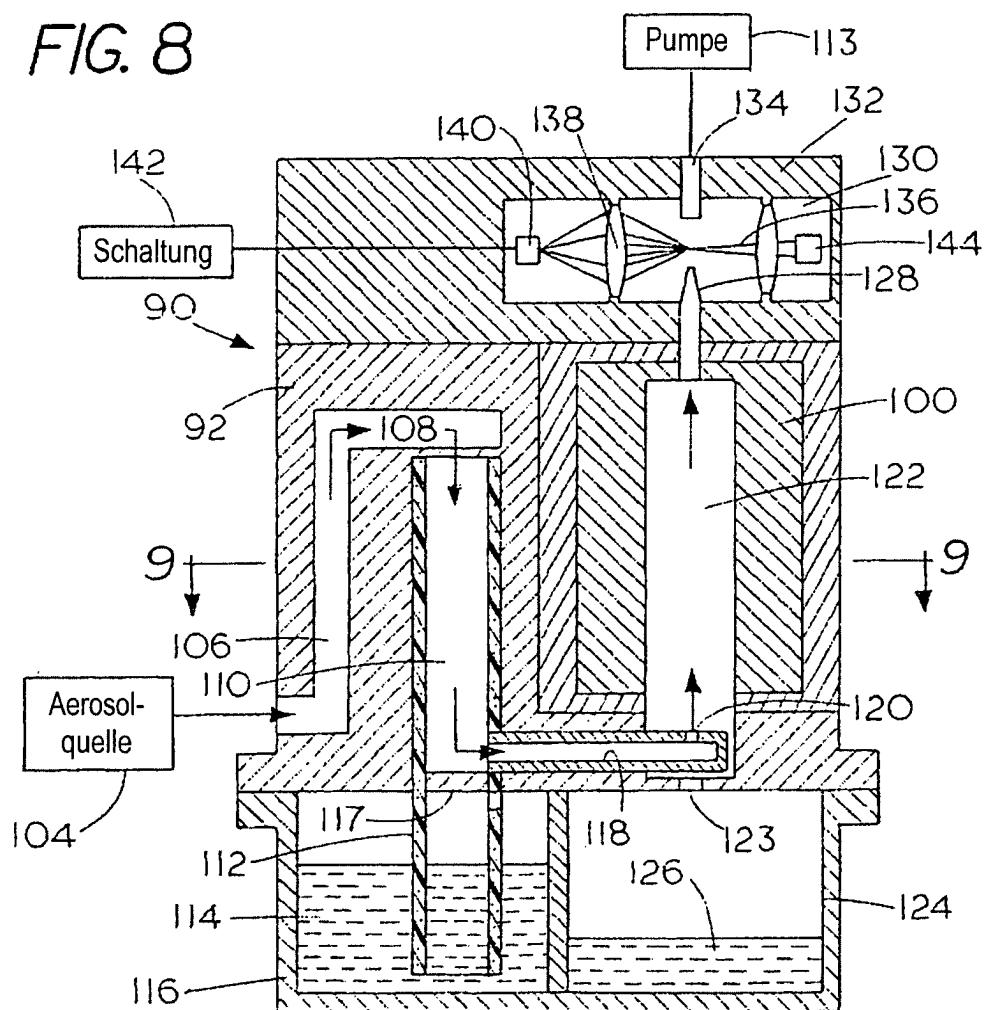


FIG. 9

