



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 11 2007 002 725 T5** 2009.09.24

(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2008/063870**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2007 002 725.8**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2007/083753**
(86) PCT-Anmeldetag: **06.11.2007**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **29.05.2008**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **24.09.2009**

(51) Int Cl.⁸: **B03C 3/155** (2006.01)

(30) Unionspriorität:
11/559,282 **13.11.2006** **US**

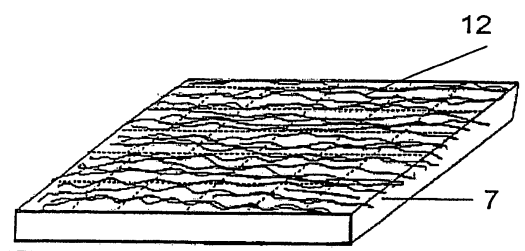
(71) Anmelder:
Research Triangle Institute, Triangle, N.C., US

(74) Vertreter:
HOFFMANN & EITLE, 81925 München

(72) Erfinder:
**Ensor, David S., Chapel Hill, N.C., US; Walls,
Howard J., Apex, N.C., US; Andrady, Anthony L.,
Apex, N.C., US; Walker, Teri A., Durham, N.C., US**

(54) Bezeichnung: **Partikelfiltersystem, das Nanofasern enthält**

(57) Hauptanspruch: Filtrationseinrichtung, die umfasst:
ein Filtrationsmittel, das eine Mehrzahl von Nanofasern
enthält, die Durchmesser aufweisen, die kleiner als 1
Mikron sind, die in Anwesenheit eines sich abrupt ändern-
den elektrischen Felds in eine Fasermatte ausgebildet
sind; und
eine Unterstüzung, die an dem Filtrationsmittel ange-
bracht ist und Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch auf-
weist.



Beschreibung

QUERREFERENZ AUF VERWANDTE ANMELDUNGEN

[0001] Diese Anmeldung bezieht sich auf die US-Anmeldung Seriennummer 10/819,916, eingereicht am 8. April 2004, mit dem Titel „Electrospinning of Polymer Nanofibers Using a Rotating Spray Head“, Attorney Docket No. 241015US-2025-2025-20, wobei die gesamten Inhalte davon hierin durch Bezugnahme einbezogen sind. Diese Anmeldung bezieht sich auch auf die US-Anmeldung Seriennummer 10/819,942, eingereicht am 8. April 2004, mit dem Titel „Electrospray/electrospinning Apparatus and Method“, Attorney Docket No. 241013US-2025-2025-20, wobei die gesamten Inhalte davon hierin durch Bezugnahme einbezogen sind. Diese Anmeldung bezieht sich auf die US-Anmeldung Seriennummer 10/819,945, eingereicht am 8. April 2004, mit dem Titel „Electrospinning in a Controlled Gaseous Environment“, Attorney Docket No. 245016US-2025-2025-20, wobei die gesamten Inhalte davon hierin durch Bezugnahme einbezogen sind. Diese Anmeldung bezieht sich auf die US-Seriennummer 11/130,269, eingereicht am 17. Mai 2005, mit dem Titel „Nanofiber Mats and Production Methods Thereof“, Attorney Docket No. 256964US-2025-2025-20, wobei die gesamten Inhalte davon hierin durch Bezugnahme einbezogen sind.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Gebiet der Erfindung

[0002] Die vorliegende Erfindung betrifft Nanofasern, Verfahren und Einrichtungen zum Elektrospinnen, Verfahren und Einrichtungen zum Ablagern von Nanofasern und Filter und andere Artikel, die aus abgelagerten Nanofasern ausgebildet sind.

Beschreibung des Standes der Technik

[0003] In der Filtrationsindustrie wurden herkömmlich Partikelluftfilter unter Verwendung eines herkömmlichen Mittels, wie beispielsweise Glas, Baumwolle oder Polymerfasern, das als gerollter Artikel vorgesehen ist, hergestellt. Die faserigen Mittel können durch nichtgewebte Verfahren, wie beispielsweise feucht eingelegtes Papier, Schmelzblaspinnen oder gewebtes Garn gefertigt werden. Das Material wird anschließend zu Einrichtungen transportiert, in der das Mittel geschnitten, plissiert, verstärkt, in Filterrahmen geklebt und bezüglich Undichtigkeit getestet wird. Verschiedene Maßnahmen der Eigenschaften der gerollten Artikel enthalten ein geeignetes Gewicht pro Flächeneinheit, Porosität, usw.

[0004] Das poröse Filtermittel kann in Beuteln plissiert oder gebunden werden, um den Flächenbereich

des Mittels in einzelnen Filtereinheiten zu vergrößern, um den Druckabfall zu verringern. Oft werden Abschirmungen und andere Verstärkungen hinzugefügt, um einen Kollaps des Mittels durch die Kraft der Luft, die durch die Filtereinheit strömt, wenn Staub angesammelt wird, zu vermeiden. In Abhängigkeit der angestrebten Verwendung des Filters kann der Filter mit einem geeigneten Belastungs-aerosol mit einer Nenn- oder Standardluftstromrate hinsichtlich eines Druckabfalls und einer Partikelansammlungseffizienz getestet werden (beispielsweise können ASHRAE 52.2, MIL-STD-282, ISST RP-CC 007.1, NIOSH APRS-STP-0051-00 und NIOSH APRS-0057-00 verwendet werden, um Filter zu testen).

[0005] Theoretisch hat die Verringerung des Durchmessers der Fasern in einem Filter das Potenzial, eine Verbesserung der Filtersystemleistungsfähigkeit zu bewirken. Für eine Hocheffizienzfiltration werden feucht eingelegte Glasfaserpiere weithin verwendet, die Faserdurchmesser im Größenbereich von 200 nm bis 5.000 nm aufweisen, wobei die Fasergrößen bezüglich der Haltbarkeit und Filtrationsleistungsfähigkeit bewusst vermengt sind.

[0006] Eine Technik zum Herstellen eines kleinen Faserdurchmessers, und folglich ein Potenzial zum Erzeugen eines verbesserten Filtrationsmittels, betrifft das Elektrospinnen von Polymeren, um Sub-Mikron- und Nanofasern zu fertigen. Elektrospinnen, wie es gegenwärtig praktiziert wird, verwendet eine konstante Spannung, um das Spinnverfahren anzutreiben, das hierin als Elektrospinnen des statischen Felds definiert ist.

[0007] Allerdings sind elektrogesponnene Nanofasern, die kleiner als 500 nm sind, typischerweise brüchig, schwer herzustellen und schwierig zu handhaben. Ein herkömmlicher Ansatz bestand darin, Nanofasern auf einem herkömmlichen porösen Filter abzulagern, um ein geschichtetes Nanofaserfiltermittel zu fertigen. Die folgenden Patente beschreiben herkömmliche Wege, um Filter, die Nanofasern enthalten, für verschiedene Anwendungen herzustellen: US-Patent-Nummern 7,008,465; 6,994,742; 6,974,490; 6,955,775; 6,924,028; 6,875,256; 6,875,249; 6,800,117; 6,746,517; 6,743,273; 6,740,142; 6,716,274; und 6,673,136, und US-Patentanmeldung Nummern 10/757,924 und 10/676,185; wobei die gesamten Inhalte von jedem dieser Patente in deren Gesamtheit hierin durch Bezugnahme einbezogen sind.

[0008] Herkömmlich geschichtete Nanofaserfilter, die aus Nanofasern gefertigt sind, die auf herkömmlichen porösen Filtermitteln abgelagert sind, weisen inhärente Beschränkungen auf. Das Verstärkungsmittel dieser Filter ist gewöhnlich ausreichend nachgiebig, um ein Plissieren oder eine Manipulation während des Montageschritts zu ermöglichen. Ein sol-

ches nachgiebiges Substratmittel kann knicken oder sich dehnen von der Kraft des Luftdruckabfalls und kann die Nanofasern brechen oder lösen. Die Unterstützungsschicht herkömmlicher Mittel kann wesentlich zum Druckabfall der gesamten Struktur beitragen.

[0009] Ein idealer Partikelfilter ist ein solcher, der die höchste Partikelansammlungseffizienz (geringste Partikeleindringung) mit dem geringsten Druckabfall vereinen würde. Ein Kriterium zum Vergleichen von Filter verschiedener Dicken betrifft den Filterqualitätsfaktor oder Gütefaktor (FoM). Je größer der Wert des FoM ist, desto besser funktioniert der Filter (Hinds, 1982). Ein Ausdruck für diesen Parameter ist gegeben durch:

$$\text{FoM} = -\text{Log}(\text{Pt})/\Delta\text{P} \quad (1)$$

wobei: Pt die Teileindringung eines spezifischen Aerosolpartikeldurchmessers ist (Effizienz = $(1 - \text{Pt})$) und ΔP der Druckabfall ist, der einer spezifischen Flächengeschwindigkeit des Filters (volumetrischer Luftdurchfluss geteilt durch Filterquerschnittsflächenbereich) entspricht. Wie es hierin verwendet wird, ist der Gütefaktor gegeben durch $\text{Log}(\text{Pt})/\Delta\text{P}$, wobei Pt die Teileindringung des spezifischen Aerosolpartikeldurchmessers ist und ΔP ein Druckabfall über das Filtermittel entsprechend einer Flächengeschwindigkeit von 5,3 cm/s und einer Partikelgröße von 0,3 Mikron ist.

[0010] Typischerweise beträgt der FoM eines hoch-effizienten Partikelluft-(HEPA)-Glasfasermittels 12 kPa^{-1} , gemessen mit der Flächengeschwindigkeit von 5,33 cm/s und 0,3 μm Partikeldurchmesser. Das sind Standardbedingungen für HEPA-Mitteltests (z. B. IEST-RP-CC021.1).

[0011] Der FoM des herkömmlichen geschichteten porösen Nanofaserfiltermittels, der oben beschrieben ist, ist durch die verhältnismäßig großen Faserdurchmesser des grobkörnigen Substrats beschränkt, die einen vergleichsweise geringen FoM erzeugen. Der FoM der herkömmlichen geschichteten porösen Nanofaserfiltermittelzusammensetzung hängt von den relativen Quantitäten der Nanofaserschichten und herkömmlichen Mitteln und deren entsprechendem FoM ab. Mit anderen Worten, während die einzelnen Nanofaserschichten einen höheren FoM als das herkömmliche poröse Filtermittelsubstrat aufweisen kann, ist der Verbund-FoM naher am Wert des herkömmlichen porösen Filtermittelsubstrats, aufgrund der relativen Quantitäten von Materialien, die in dem herkömmlichen Ansatz verwendet werden. Folglich stellen im gegenwärtigen Stand der Technik herkömmlich geschichtete Nanofaserfiltermittel keine Filter mit deutlich größerem FoM als herkömmliche Glasfasermittel bereit.

[0012] Referenzen, die verschiedene Hintergrundmaterialien und Filtertestprozeduren beschreiben, enthalten:

1. ASHRAE (1999) Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size, Standard 52.2-1999. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1791 Tullie Circle, N. E. Atlanta, USA.
2. Ahn, Y. C., S. K. Park, et al. (2005). "Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers." Current Applied Physics: In press (accessed online).
3. Dhaniyala, S. and B. Y. H. Liu (1999a). "Investigations of Particle Penetration in fibrous filters part I. Experimental." Journal of the ISST 42(1): 32-40.
4. Dhaniyala, S. and B. Y. H. Liu (1999b). "Investigations of Particle Penetration in fibrous filters Part II. Theoretical." Journal of the ISST 42(2): 40-46.
5. Rinds, W. C. (1982). Aerosol Technology. New York, John Wiley & Sons, Inc.
6. ISST (1992) Institute of Environmental Sciences, Testing ULPA Filters. ISST RP-CC 007.1 Institute of Environmental Science and Technology, Rolling Meadows, USA.
7. ISST (1995) Institute of Environmental Sciences and Technology (1995) Testing HEPA and ULPA Filter Media, IEST-RP-CC021.1, Rolling Meadows, IL.
8. MIL-STD-282, Filter units, Protective Clothing, Gasmask Components and Related Products: Performance Test Methods, US Government Printing Office, May 28, 1956.
9. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Particulate Filter Penetration Procedure to Test Negative Pressure Respirators against Liquid Particulates (Procedure APRS-STP-0051-00) Morgantown, WV: NIOSH Division of Safety Research, 1955.
10. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Particulate Filter Penetration Procedure to Test Negative Pressure Respirators against Solid Particulates (Procedure APRS-STP-0057-00) Morgantown, WV: NIOSH Division of Safety Research, 1955.
11. Park, H. S. and Y. O. Park (2005). "Filtration properties of electrospun ultrafine fiber webs." Korean Journal of Chemical Engineering 22(1): 165-172.
12. Schreuder-Gibson, H. L., P. Gibson, et al. (2004). "Cooperative charging effects of fibers from electrospinning of electrically dissimilar polymers." International Nonwovens Journal 13(4): 39-45.
13. Thomas, D., P. Contal, V. Renaudin, P. Penicot, D. Leclerc and J. Vendel (1999) Modelling Pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration. J. Aerosol Science, 30(2) 235-246.
14. S. Payet, D. Boulaud, G. Madelaine and A. Renoux (1992) Penetration and Pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles. J. Aerosol Science 23(7). 723-735.
15. Bhattarai, S. R., N. Bhattarai, et al. (2004). "Novel biodegradable electrospun membrane: scaffold for tissue engineering." Biomaterials 25(13): 2595-2602.

16. Boudriot, U., B. Goetz, et al. (2005). "Role of electrospun nanofibers in stem cell technologies and tissue engineering." *Macromolecular Symposia* 225: 9–16.
17. Choi, S. S., Y. S. Lee, et al. (2004). "Electrospun PVDF nanofiber web as polymer electrolyte or separator." *Electrochimica Acta* 50(2–3): 339–343.
18. Choi, S. W., S. M. Jo, et al. (2003). "An electrospun poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membrane and its battery applications." *Advanced Materials* 15(23): 2027–2032.
19. Jia, H. F., G. Y. Zhu, et al. (2002). "Enzymecarrying polymeric nanofibers prepared via electrospinning for use as unique biocatalysts." *Biotechnology Progress* 18(5): 1027–1032.
20. Liu, H. Q., J. B. Edel, et al. (2006). "Electrospun polymer nanofibers as subwavelength optical waveguides incorporating quantum dots." *Small* 2(4): 495–499.
21. Zhang, Y. Z., C. T. Lim, et al. (2005). "Recent development of polymer nanofibers for biomedical and biotechnological applications." *Journal of Materials Science-Materials in Medicine* 16(10): 933–946.
22. Aussawasathien, D., J. H. Dong, et al. (2005). "Electrospun polymer nanofiber sensors." *Synthetic Metals* 154(1–3): 37–40.
23. Chronakis, I. S. (2005). "Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process – A review." *Journal of Materials Processing Technology* 167(2–3): 283–293.
24. Demir, M. M., M. A. Gulgun, et al. (2004). "Palladium nanoparticles by electrospinning from poly(acrylonitrile-co-acrylic acid)-PdCl₂ solutions. Relations between preparation conditions, particle size, and catalytic activity." *Macromolecules* 37(5): 1787–1792.
25. Ding, B., M. Yamazaki, et al. (2005). "Electrospun fibrous polyacrylic acid membrane-based gas sensors." *Sensors and Actuators B-Chemical* 106(1): 477–483.
26. Huang, Z. M., Y. Z. Zhang, et al. (2003). "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites." *Composites Science and Technology* 63(15): 2223–2253.
27. Jia, H. F., G. Y. Zhu, et al. (2002). "Enzymecarrying polymeric nanofibers prepared via electrospinning for use as unique biocatalysts." *Biotechnology Progress* 18(5): 1027–1032.
28. Katti, D. S., K. W. Robinson, et al. (2004). "Bioresorbable nanofiber-based systems for wound healing and drug delivery: Optimization of fabrication parameters." *Journal of Biomedical Materials Research Part B-Applied Biomaterials* 70B(2): 286–296.
29. Kenawy, E. R. and Y. R. Abdel-Fattah (2002). "Antimicrobial properties of modified and electrospun poly(vinyl phenol)." *Macromolecular Bioscience* 2(6): 261–266.
30. Khil, M. S., D. I. Cha, et al. (2003). "Electrospun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing." *Journal of Biomedical Materials Research Part B-Applied Biomaterials* 67B(2): 675–679.
31. Liu, H. Q., J. Kameoka, et al. (2004). "Polymeric nanowire chemical sensor." *Nano Letters* 4(4): 671–675.
32. Luong-Van, E., L. Grondahl, et al. (2006). "Controlled release of heparin from poly(epsilon-caprolactone) electrospun fibers." *Biomaterials* 27(9): 2042–2050.
33. Ma, Z. W., M. Kotaki, et al. (2005). "Potential of nanofiber matrix as tissue-engineering scaffolds." *Tissue Engineering* 11(1–2): 101–109.
34. Murugan, R. and S. Ramakrishna (2006). "Nanofeatured scaffolds for tissue engineering: A review of spinning methodologies." *Tissue Engineering* 12(3): 435–447.
35. Spasova, M., N. Manolova, et al. (2004). "Preparation of chitosan-containing nanofibres by electrospinning of chitosan/poly(ethylene oxide) blend solutions." *E-Polymers*.
36. Zeng, J., X. Y. Xu, et al. (2003). "Biodegradable electrospun fibers for drug delivery." *Journal of Controlled Release* 92(3): 227–231.

[0013] Die gesamten Inhalte dieser Referenzen sind hierin durch Bezugnahme einbezogen.

ZUSAMMENPASSUNG DER ERFINDUNG

[0014] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine Filtrationseinrichtung bereitgestellt, welche ein Filtrationsmittel enthält, das eine Mehrzahl von Nanofasern eines Durchmessers von weniger als 1 Mikron aufweist, die in Anwesenheit eines abrupt schwankenden elektrischen Felds in eine Fasermatte ausgebildet werden. Die Filtrationseinrichtung enthält eine Unterstüzung, die an dem Filtrationsmittel angebracht ist und Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist.

[0015] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine Filtrationseinrichtung bereitgestellt, welche eine Unterstüzung aufweist, die Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist. Die Filtrationseinrichtung enthält ein Filtrationsmittel, das eine Mehrzahl von Fasern aufweist, die an der Unterstüzung angebracht sind. Das Filtrationsmittel weist einen Gütefaktor auf, der größer als 20 kPa^{-1} ist, wobei der Gütefaktor durch $-\text{Log}(Pt)/\Delta P$ gegeben ist, wobei Pt die Teileindringung eines spezifischen Aerosolpartikeldurchmessers ist und ΔP ein Druckabfall über das Filtrationsmittel ist, entsprechend einer Flächengeschwindigkeit von 5,3 cm/s und Partikelgröße von 0,3 Mikron.

[0016] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine Einrichtung zum Fertigen eines Filtermaterials bereitgestellt. Die Einrichtung enthält ein Elektrospinnenelement, das aufgebaut ist, um eine Mehrzahl von Fasern von einem vorderen Bereich des Elektrospinnenelements elektrozuspinnen, einen

Kollektor gegenüber dem Elektrospinnelement, der aufgebaut ist, um elektrogenesponnene Fasern auf einer Oberfläche des Kollektors zu sammeln, und eine Modulationseinrichtung für das elektrische Feld, die aufgebaut ist, um ein elektrisches Feld an dem Kollektor wenigstens einmal während des Elektrospinnens der Fasern abrupt zu variieren.

[0017] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren zum Ausbilden eines Filtermaterials bereitgestellt.

[0018] Das Verfahren enthält ein Bereitstellen einer Unterstützung, welche Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist, ein Elektrospinnen von Nanofasern über eine Gesamtheit der Öffnungen, und ein abruptes Ändern eines elektrischen Felds an dem Kollektor, wenigstens einmal während des Elektrospinnens der Fasern.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0019] Eine vollständigere Würdigung der Erfindung und viele der begleitenden Vorteile davon werden einfach erhalten, indem selbige durch Referenz auf die folgende detaillierte Beschreibung besser verstanden wird, wenn diese in Verbindung mit den begleitenden Zeichnungen berücksichtigt wird, wobei:

[0020] **Fig. 1A** ein Ablaufdiagramm ist, das ein Verfahren gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zur Herstellung eines auf Nanofaser basierenden Filters zeigt;

[0021] **Fig. 1B** ein Schema gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung für einen auf Nanofaser basierenden Filter ist;

[0022] **Fig. 2A** eine Prinzipdarstellung ist, welche gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung eine Vorrichtung zum Elektrospinnen in einer gesteuerten Umgebung zeigt;

[0023] **Fig. 2B** eine Prinzipdarstellung ist, welche gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung Details einer Einrichtung zeigt, die Elektrospinnen des dynamischen Felds zum Steuern der Ablagerung der Nanofasern genannt wird;

[0024] **Fig. 3** ein elektrisches Schema der Elektrospinneinrichtung des dynamischen Felds ist;

[0025] **Fig. 4** ein Mikrograph ist, der die Art der Nanofasermorphologie zeigt, die unter Verwendung von Techniken, die in der Erfindung beschrieben sind, erhalten wird;

[0026] **Fig. 5** Daten sind, für eine Partikelteileindringung als eine Funktion des Druckabfalls bei herkömmlichen Filtermitteln verglichen mit Filtermitteln

die unter Ausnutzung von Ausführungsformen dieser vorliegenden Erfindung verwendet werden;

[0027] **Fig. 6** Daten des mit der Zeit variierenden Potentials des Unterstützungsnetzes (sekundäre Elektrode) und der entsprechende Strom sind, der durch eine Spannungsbegrenzungseinrichtung (VLD) fließt, die mit dem Unterstützungsnetz zusammenhängt, das ein Element des Elektrospinnens des dynamischen Felds darstellt;

[0028] **Fig. 7** Daten für eine Partikeleindringung als eine Funktion der Partikelgröße für herkömmliche Filtermittel verglichen mit Filtermitteln sind, die Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung nutzen, um eine Verbesserung hinsichtlich der am meisten eindringende Partikelgröße darzustellen;

[0029] **Fig. 8** ein Schema ist, das eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung darstellt, in der mehrere Nanofaser-/Netzstapel verwendet werden;

[0030] **Fig. 9** ein Schema einer gestalteten Filtereinheit und einer Einrichtung zum Fertigen der gestalteten Filtereinheit ist, gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0031] **Fig. 10A** und **Fig. 10B** Schemata sind, welche eine Draufsicht und eine Seitenansicht eines Filterrahmens und eines Netzes gemäß einer Ausführungsform gemäß der vorliegenden Erfindung darstellen;

[0032] **Fig. 11** ein Schema einer Filterfertigungseinrichtung ist, gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, die einen Drehkopf aufweist;

[0033] **Fig. 12** ein Schema einer Zelle eines Filters ist, der mit der Einrichtung von **Fig. 10** gefertigt ist; und

[0034] **Fig. 13** ein Schema einer Nanofasereleinrichtung ist, gemäß einer Ausführungsform der Erfindung, mit einem grobkörnigen Vorfilter, der aus herkömmlichen Filtermitteln aufgebaut ist.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0035] Die vorliegende Erfindung befasst sich mit der Herstellung von Nanofasermatten, die beispielsweise für Filtrationsanwendungen verwendet werden können, darauf aber nicht beschränkt sind. Die vorliegende Erfindung kann auf einem weiten Bereich anderer Gebiete, wie beispielsweise Einzelfilamente, Garne, nichtgewebte Materialien und Membrane angewendet werden. Kennzeichnende Verbesserungen hinsichtlich der Filterperformance, beispielsweise angegeben durch FoM, werden für verschiedene Aus-

führungsformen der vorliegenden Erfindung bereitgestellt.

[0036] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine Elektrospinntechnik des dynamischen Felds verwendet, um verschiedene Artikel herzustellen, die hierin definiert sind, und/oder in Anwendungen verwendet werden, die Fasern, Garne, nicht Gewebtes bzw. Vliese und Membrane enthalten. Die vorliegende Erfindung, die das Elektrospinnen des dynamischen Felds nutzt, ist im Besonderen auf das Gebiet der Filtration anwendbar, das auf Nanofasern basierende Materialien nutzt, im Besonderen auf Nanofasern basierende Filter. Die Morphologie der resultierenden Nanofasermatte, die mit dem Fehlen der Verwendung von nichtgewebten Filtermitteln gekoppelt ist, um die Nanofasern zu unterstützen, hat auf den resultierenden Filter-FoM einen Einfluss. Andere Aspekte, die mit der vorliegenden Erfindung bereitgestellt werden, enthalten: (1) Filter, Filtereinrichtungen oder Filtermaterialien mit einem niedrigen Druckabfall und/oder einer besserer Filtrationseffizienz, die sich in einem verbesserten Filter-FoM niederschlägt, (2) Verringerung der am meisten eindringenden Partikelgröße, (3) Verfahren zur Herstellung von Filter, Filtereinrichtungen oder Filtermaterialien und (4) Verfahren für eine verbesserte Prozessüberwachung und -steuerung während der Herstellung von Nanofasermatten.

[0037] Bezugnehmend auf die Zeichnungen, worin gleiche Referenzzeichen identische oder entsprechende Teile durchgehend durch die entsprechenden Ansichten bezeichnen, ist [Fig. 1A](#) ein Ablaufdiagramm, das ein Verfahren gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zur Herstellung eines auf Nanofaser basierenden Filtermaterials zeigt. Ferner ist [Fig. 1B](#) ein Schema gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung für einen auf Nanofaser basierenden Filter, in dem ein Unterstützungsnetz **7** zu einer gleichmäßigen Tiefe eine Mehrzahl von Nanofasern **12** unterstützt. Zum Zweck der Klarheit sind lediglich wenige Schichten von Fasern gezeigt, und, wie es gezeigt ist, sind die Fasern ziemlich ausgerichtet. Die vorliegende Erfindung kann dickere Fasermatten nutzen (d. h. mehr Schichten), und obwohl Techniken existieren, um die Fasern auszurichten, ist die Ausrichtung der Fasern nicht notwendig, wie es in [Fig. 4](#) gezeigt ist. Wie es in [Fig. 1A](#) gezeigt ist, wird bei **100** ein Unterstützungsnetz zur physikalischen Unterstützung vorgesehen. Bei **102** werden Nanofasern, die einen mittleren Faserdurchmesser (AFD) von 200 nm oder weniger aufweisen, auf das Unterstützungsnetz elektrogenesponnen. Bei **103** wird die Filtermattenperformance durch eine Reihe von Verfahren gemessen, darunter sind enthalten, Druckabfall, Aerosoleindringung und Laserlichtstreuung, um ein Überwachen und Steuern des Prozesses zu ermöglichen.

[0038] Bei **102** sind in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung die Nanofasern unter den Bedingungen elektrogenesponnen, in denen ein Gehäuse die Steuerung der Elektrospinnumgebung hinsichtlich Aspekten, wie beispielsweise Spülen der Elektrospinnumgebung mit CO₂, Steuerung der relativen Feuchte und Steuerung des Lösungsmitteldampfdrucks, erlaubt.

[0039] Weitere Details der Abläufe bzw. Prozesse, die in der vorliegenden Erfindung bei **100**, **102** und **103** verwendet werden, sind unten in den verschiedenen offenbarten Ausführungsformen beschrieben.

[0040] Ein Beispiel der Ausbildung eines elektrogenesponnenen Nanofaserfilters, der verschiedene Aspekte der Erfindung verwendet, ist in [Fig. 2A](#) und [Fig. 2B](#) gezeigt. Die Herstellung des Nanofaserfilters wird in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung in einer eingeschlossenen und hinsichtlich der Umgebung gesteuerten Kammer **1** ausgeführt. Ein elektrisch isolierender Filterrahmen **6** mit einem groben Unterstützungsnetz **7** (sekundäre Elektrode) wird auf einen Filtermontagehalter **41-43** platziert. Die Vervollständigung des Schaltkreises ist eine Masseelektrode **43**, die mit der Masse durch eine Verbindungsröhre verbunden ist. Das Netz **7**, das als Unterstützung für die elektrogenesponnenen Materialien fungiert, weist makroskopische Öffnungen auf, die in einem nicht einschränkenden Beispiel ungefähr 1,4 mm mal 1,4 mm sind, und das minimal zum Druckabfall über den Filter beitragen, jedoch eine strukturelle Unterstützung für die Nanofasern bereitstellt. Das Netz ist in diesem Beispiel aus Drähten gefertigt, die einen Durchmesser von 0,1 mm aufweisen. Kohlendioxid CO₂-Bearbeitungsgas **26** wird in die Kammer **1** mit einer Feuchte der Kammer eingebracht, die zwischen 20% und 40% RH gesteuert wird, unter Verwendung einer Mischung aus getrocknetem CO₂ und befeuchtetem CO₂. Eine Polymerlösung (beispielsweise 21 Gew.-% Polysulfon im Lösungsmittel Dimethylacetamid) aus dem Reservoir **3** fließt zum Elektrospinnemitter/Düse **2**, die mit einer Hochspannungsleistungszufuhr **5** verbunden ist. Ein elektrisches Feld, das an dem Ende der Düse **2** anliegt, extrahiert die Polymerlösung von der Düse, wodurch Fasern der Polymerlösung ausgebildet werden.

[0041] Die Struktur der elektrischen Felder zwischen dem Emitter **2** (mit Leistung versorgt durch die Zufuhr **5**) und Masse, wodurch die Faserablagerung angetrieben wird, werden teilweise durch das Design des Filterrahmenhalters **41 bis 43** gesteuert. Ferner wird das Potential des Unterstützungsnetzes **7** durch eine Impulseinrichtung des elektrischen Felds **9** gesteuert (d. h. ein Spannungsbegrenzer oder Entladungseinrichtung oder eine Anlegeeinrichtung des elektrischen Felds). Die Impulseinrichtung des elektrischen Felds **9** ist aufgebaut, um ein elektrisches

Feld an dem Kollektor wenigstens einmal (oder häufig) während des Elektrosinnens der Fasern zu pulsieren, um Ladungen, die sich auf den elektrogenen Fasern angesammelt haben, zu entladen.

[0042] Ein elektrisches Schema des Elektrosinnenschaltkreises ist in [Fig. 3](#) gezeigt. Die elektrogenen Fasern **8** tragen Ladungen zum Netz (d. h. zur sekundären Elektrode **7**), die häufig zur geerdeten primären Elektrode **43** entladen wird, durch die Spannungsbegrenzungseinrichtung **9**, welche in diesem Beispiel als eine Impulseinrichtung des elektrischen Felds fungiert. Der Schaltkreis der [Fig. 3](#) nutzt das Elektrosinnen des dynamischen Felds, wo die sich mit der Zeit ändernde Spannung, die in [Fig. 6](#) gezeigt ist, auf der sekundären Elektrode oder dem Kollektor **7** vorliegt. Das resultierende elektrische Feld ist in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung in der Richtung der spinnenden Fasern ausgerichtet und modifiziert die Struktur des elektrischen Felds dynamisch, wodurch gemäß der vorliegenden Erfindung verbesserte Faser- und Matteneigenschaften vermittelt werden (beispielsweise gemessen mit dem FoM der Matte), verglichen mit dem Elektrosinnen des statischen Felds, das herkömmlich angewendet wird, bei dem beispielsweise der Kollektor **7** geerdet sein würde (wie es unten diskutiert wird).

[0043] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung strömt ein Mantel von CO₂-Gas **26A** über den Emitter **2**. Ein Strahl von Polymerfasern **8** wird ausgebildet, der sich zum Filteraufbau und Halter bewegt. Die Polysulfon PSu-Fasern, die auf das grobe Netz **7** elektrogenen werden, weisen typischerweise einen mittleren Faserdurchmesser von 200 nm auf. Die Filtermatte **12**, die durch die Nanofasern ausgebildet wird, kann ungefähr 3 µm dick sein, folglich enthält diese in der Größenordnung von 5 bis 20 Nanofaserschichten. Wenigstens ein Teil des Prozessgases strömt durch die Filtermatte während des Ablagerungsprozesses.

[0044] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann der Druckabfall über den sich ausbildenden Nanofaserfilter in Echtzeit während der Herstellung unter Verwendung eines Differenzialdrucknanometers **32** überwacht werden. Viele Faktoren haben einen Einfluss auf die resultierende Filterperformance. Einige dieser Faktoren sind: Erhalten einer geeigneten kleinen Nanofasergröße, einer geeigneten Nanofasermattenmorphologie und eines Filterrahmens + Nanofasermattenkonstrukts, der eine Festigkeit bezüglich der resultierenden Zusammensetzung bereitstellt, sodass die Unterstützungsstruktur den Druckabfall nicht begrenzt.

Spinnen geeigneter Nanofasern

[0045] Das Elektrosinnen des statischen Felds als

eine Technik zur Herstellung von feinen Polymerfasern ist bekannt. In der einfachsten Form ist eine hohle Düse mit einer fließenden Polymerlösung mit einer Hochspannungsleistungszufuhr (AC oder DC) verbunden, die typischerweise mit einer konstanten Spannung gesteuert wird. Der Spannungsgradient zieht das Fluid von der Düse (oder Spinndüse) in eine Fluidfaser. Wenn die Polymerlösung trocknet, stoßen sich Ladungen auf der Oberfläche des Polymers gegenseitig ab, strecken die Faser und verursachen eine peitschende Bewegung, was eine deutliche Verengung des Faserdurchmessers zur Folge hat. Die Fasern werden als eine Matte auf einer geerdeten Elektrodenoberfläche gesammelt. Der Prozess ist komplex, mit konkurrierenden Kräften zwischen dem Selbstabstoßen der gleich geladenen Fasern und der angelegten äußeren elektrischen Felder.

[0046] Es wurde ein großer Bereich von Polymeren elektrogenen, darunter sind enthalten Polycarbonat, Polyamid, Polystyren und Polysulfon, als einige wenige Beispiele. Beispielsweise kann Polysulfon (PSu), M_w ~ 35.000 g/mol aus einer 21 Gew.-% Lösung in N,N-Dimethylacetamid (DMAc) gesponnen werden, und Polycarbonat M_w ~ 60.000 g/mol kann aus einer 15 Gew.-% Lösung aus Polymer in einer 50/50-Lösung von Tetrahydrofuran (THF) und N,N-Dimethyl-Formamid (DMF) gesponnen werden.

[0047] Die US-Patentanmeldung Veröffentlichungsnummer (2005/0224999), wobei die gesamten Inhalte davon hierin durch Bezugnahme einbezogen sind, beschreibt die Verwendung eines elektronegativen Gases, um den Prozess des Elektrosinnens durch Einbringen, beispielsweise von Kohlendioxid (CO₂), um die Spinndüse oder den Emitter herum zu vereinfachen. Gase, wie beispielsweise CO, CF₄, N₂O, CCl₄, CCl₃F, CCl₂F₂ und andere halogenhaltige Gase können in die Elektrosinnenumgebung bei **26A** und/oder **26B** eingebracht werden. Das elektronegative Prozessgas stabilisiert den Taylorkegel, der von dem Polymerstrahl ausgebildet wird, wenn dieser sich von der Nadel ablöst, verringert Corona-Entladung an der Nadel und verringert den Faserdurchmesser. Ferner gewährleistet das Spinnen in einer gesteuerten Umgebung eine geringere Verunreinigung der Fasern, verbessert die Sicherheit und fügt eine weitere Dimension der Steuerparameter hinzu, die verwendet werden können, um die Faserausbildung fein einzustellen.

[0048] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung strömt ein elektronegatives Gas **26A** koaxial mit der Spinnnadel zusammen unter Ausnutzung einer gesteuerten Gasumgebung. Typischerweise wird eine Gasumkleidung verwendet, um den koaxialen Gasstrom zu erzeugen. Eine typische Umkleidung, die in der vorliegenden Erfindung verwendet wird, kann in der Gestalt eines Kranzes vorliegen, der einen Außenradius von ungefähr 0,48 cm und einen

Innenradius von ungefähr 0,40 cm aufweist. Eine Vielzahl von Geometrien und Größen sind möglich; beispielsweise eine kreisförmige Außenseite mit einer hexagonalen Innenseite, was eine zusätzliche Geometrie ist. In der kreisförmigen Geometrie kann ein Abstand von einem Ausgangsende des Kranzes, wo Gas bezüglich des Elektrospinnelements nach vorn abgegeben wird, von bündig (0 cm) bis 8 cm variieren; wobei ein typischer Abstand um die 4 bis 5 cm beträgt, und wobei ein Abstand von 4,7 cm für die späteren detaillierten Beispiele vorliegt.

[0049] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung hat die Steuerung der Elektrospinnbedingungen Polymernanofasern mit einem mittleren Faserdurchmesser AFD von 100 nm und weniger hergestellt. Es hat sich herausgestellt, dass Nanofasern von weniger als 200 nm die Filtrationseigenschaften der resultierenden Faser verbessert, wenn diese mit anderen Elementen der vorliegenden Erfindung kombiniert werden.

[0050] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung können Additive in der Polymerlösung einen wesentlichen Unterschied bezüglich der Fasergröße und Qualität ausmachen. Der Zusatz von Spurenbetrag von Salz oder einem Tensid erhöht die Leitfähigkeit der Lösung und folglich die Ladungsansammlung an der Vorderseite bzw. Spitze des Elektrospinnelements, was größere Dehnungskräfte, die zum Ausbilden der Faser aufgebracht werden, folglich geringere Faserdurchmesser zur Folge hat. Das Tensid verringert ferner die Oberflächenspannung des Polymers, was das Spinnen noch kleinerer Fasern ermöglicht. Lithiumsalze, (beispielsweise Lithiumchlorid und Lithiumtriflat) oder Tenside, wie beispielsweise Tetrabutylammoniumchlorid (TBAC), sind für die vorliegende Erfindung geeignet. Lithiumsalzkonzentrationen von 0,01 bis 3 Gew.-% sind für die vorliegende Erfindung geeignet. Konzentrationen von TBAC von zwischen 0,06 und 0,4 Gew.-% waren beispielhaft, wobei andere Konzentrationen geeignet sind.

[0051] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung hat die Polymerkonzentration in der Elektrospinnlösung einen Einfluss auf die Qualität der elektrosponnenen Fasern. Konzentrationen von 17 Gew.-% bis 30 Gew.-% für das molekulare Gewicht von PSu sind für die vorliegende Erfindung geeignet, wobei ungefähr 21 Gew.-% typischerweise ideal sind.

[0052] In einer Demonstration der vorliegenden Erfindung wurde Udel P3500 LCD PSu, hergestellt von Solvay Advanced Polymers, verwendet. Das molekulare Gewicht befindet sich im Bereich von 22.000 bis 36.000 g/mol. Das molekulare Gewicht wird als eine wichtige Komponente bezüglich der Formulierung der Polymerlösung verstanden. Das P3500 LCD ent-

hält wenige zyklische Dimere und ist für viele der hierin beschriebenen Anwendungen geeignet. Allerdings ist in der vorliegenden Erfindung das Polymer und dessen Charakteristika lediglich ein Beispiel und ist nicht auf dieses bestimmte Polymer beschränkt.

[0053] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sind Edlestahlextrudierspitzen von 0,15 mm bis 0,59 mm interner Durchmesser (ID) für die vorliegende Erfindung geeignet. Es können auch größere und kleinere Durchmesser verwendet werden. In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sind TeflonTM-Kapillarröhren mit ID von 0,076 mm bis 0,31 mm für die vorliegende Erfindung geeignet. Größere und kleinere Durchmesser können auch verwendet werden. Beide Arten von Düsen können kleine Fasern herstellen. Für beide Düsen hatten niedrige Durchflussraten der Polymerlösungen (beispielsweise 0,05 ml/Std.) gekoppelt mit hohen Spannungsabfällen typischerweise die kleinsten Faserdurchmesser (beispielsweise AFD weniger als 100 nm) zur Folge. In beiden Fällen wurde die Spannung auf 22 kV bis 30 kV für eine 17,8 cm bis 25,4 cm Lücke (d. h. Abstand zwischen Emitter 2 und Netz 7) festgelegt. Es sei bemerkt, dass die Spannung pro Elektrospinnlücke ein Parameter ist, der die Zugfestigkeit bestimmt; diese Lücke bestimmt ferner die Bewegungszeit, bestimmt folglich die Faserdehnungszeit.

[0054] Neben Edelstahl- und TeflonTM-Extrudierspitzen können in der vorliegenden Erfindung andere Materialien verwendet werden (vorausgesetzt, dass die Materialien mit der Substanz, die elektrosponnen wird, enthaltend irgendein Lösungsmittel, das in dem Elektrospinnprozess verwendet wird, nicht reaktiv sind), wie beispielsweise Polymere, Glas, Keramik oder Metallextrudierspitzen.

[0055] Ferner existiert ein Effekt der CO₂-Durchflussrate (**26A**, Gasmantel strömt um und über die Spindüse in der Faserrichtung) für die verschiedenen Spindüsen. Wenn Edlestahlnadeln verwendet wurden, hatten höhere Gasdurchflussraten (beispielsweise eine Erhöhung von 8 lpm auf 13 lpm) typischerweise verbesserte Fasern mit kleineren Durchmessern zur Folge. Demgegenüber, wenn Polytetrafluoroethylen (d. h. TeflonTM) Kapillarröhren verwendet wurden, war die Faserqualität mit Erhöhung der CO₂-Durchflussrate von 8 lpm auf 13 lpm typischerweise herabgesetzt. Es ist wahrscheinlich, dass eine optimale CO₂-Durchflussrate existiert, bei der das Optimum für die TeflonTM-Kapillare geringer ist als für die Edlestahlnadel. Das Optimum bei Verwendung mit einer TeflonTM-Kapillare beträgt ungefähr 8 lpm, wobei eine höhere Durchflussrate für die Edlestahlkapillare optimal ist.

[0056] Obwohl eine kleinere Faser bei 13 lpm vs. 8 lpm für Edlestahldüsen erhalten wird, hatte die höhe-

re CO₂-Durchflussrate einen negativen Einfluss auf die Nanofasermattenmorphologie für PSu-Fasern. D. h., eine PSu-Nanofasermatte, die bei 13 lpm ausgebildet wird, funktionierte nicht so gut, wie diejenigen, die bei 8 lpm hergestellt wurden. Die Werte für Durchflussraten des elektronegativen Gases (in diesem Fall CO₂), die hier gegeben werden, sind lediglich Beispiele, wobei andere Gasdurchflussraten verwendet werden können, wobei die Kombination der Faktoren gegeben sind, die hierin offenbart sind, welche die resultierende Nanofasermatte beeinflussen (beispielsweise Elektrospinnndüse, Polymerrezeptur, Unterstützungsnetz und Elektrospinnbedingungen). Andere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verwenden Durchflussraten des Mantelgases **26A** von ungefähr 0 bis 30 lpm. Ferner kann der Gesamtdurchfluss der Bearbeitungsgase **26** von 0 bis 300 lpm oder darüber hinaus sein.

[0057] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung hat die relative Feuchte RH der Elektrospinnkammer einen Einfluss auf die Fasermorphologie. Beispielsweise, wenn 21 Gew.-% PSu ($M_w \sim 35.000$ g/mol) in DMAc verwendet wird, hatte eine hohe RH (beispielsweise > 65%) Fasern zur Folge, welche sehr wenige Defekte und glatte Oberflächen aber große Durchmesser aufweisen. Ein Defekt in einer Faser wird im Allgemeinen als eine Abweichung von einer glatten runden Faser einer langen Länge angesehen. Defekte sind folglich Wülste auf der Faser, Schwankungen des Faserdurchmessers in der axialen Richtung usw. Jemandem, der auf dem Gebiet des Faserspinnens tätig ist, wird das bekannt sein. Eine niedrige RH (beispielsweise < 13%) hatte kleinere Fasern aber mehr Defekte zur Folge. Moderat niedrige RH (beispielsweise 40% bis 20%) stellten typischerweise eine kleine Fasergröße mit weniger Defekten her.

[0058] Eine Reihe von Mechanismen sind in der vorliegenden Erfindung geeignet, um die RH der Kammer zu steuern, wie beispielsweise Platzieren von Materialien, welche absorbieren (beispielsweise Kalziumsulfat) oder Wasserfeuchte emittieren (beispielsweise Hydrogele), die als kleine Befeuchter in der Kammer fungieren, und Feuchte in die Prozessgasströme **26** hinzufügen, vor dem Einbringen in die Elektrospinnkammer. Beispielsweise wurden positive Resultate mittels Blasenbildung von CO₂ durch entionisiertes (DI) Wasser und anschließendes Eindringen des befeuchteten CO₂-Gas in die Kammer erhalten. In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden zwei Gasströme (beispielsweise ein befeuchteter und ein trockener) verwendet, um eine gewünschte RH für die Kammer und/oder für den Gasmantel, der über die Elektrospinnndüse strömt, zu erhalten.

[0059] In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden RH und Elektrospinnbe-

dingungen verwendet, um den Faserdurchmesser als eine Funktion der Zeit zu variieren, was die Erzeugung einer Nanofasermatte bewirkt, deren Faserdurchmesser in der Dickenrichtung der Matte variiert.

[0060] Verschiedene Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verwenden, um Nanofasern herzustellen, 21 Gew.-% PSu ($M_w \sim 35.000$ g/mol) in N,N-Dimethylacetamid (DMAc) Lösung, wobei die Lösung 0,2 Gew.-% des Tensids TBAC enthält, das die Oberflächenspannung verringert und die ionische Leitfähigkeit und die dielektrische Konstante der Lösung vergrößert. Die oben genannte Polymerlösung wurde von 30G (ID $\approx 0,1524$ mm) Edelstahlnadeln mit einer Durchflussrate von 0,05 ml/Std. der Polymerlösung zur Edelstahlnadel gesponnen, eine Lücke von 25,4 cm zwischen der Nadel und dem Kollektor wurde festgelegt, ein angelegtes Potenzial von 29,5 kV DC wurde verwendet, eine Durchflussrate des CO₂-Gasmantels von 6,5 l/min wurde verwendet, und die RH wurde gesteuert, um sich im Bereich von 22 bis 38% zu befinden. Eine Prüfung durch SEM kennzeichnete einen mittleren Faserdurchmesser (AFD) von 82 ± 35 nm, wobei die kleinsten Fasern sich im Bereich von 30 bis 40 nm befinden. [Fig. 4](#) ist ein Rasterelektronenbild (SEM) dieser PSu-Fasern.

[0061] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wurde eine PSu-Lösung, die aus 21 Gew.-% Polymer und 0,2 Gew.-% TBAC zusammengesetzt war, von einer 0,1524 mm ID Teflonkapillarrohre mit einer Durchflussrate von 0,05 ml/Std., einer CO₂-Durchflussrate von 8 lpm, einer Lücke von 25,4 cm und einem Potenzial von 121 kV/m gesponnen. Aus dieser Bedingung wurde ein AFD von 81 ± 49 nm erhalten. Die große Varianz des AFD kennzeichnet die Diversität der Fasergrößen, wobei einige sehr kleine Fasern mit weniger als 50 nm enthalten sind.

[0062] In noch einem weiteren Beispiel der vorliegenden Erfindung wurde Polycarbonat PC aus einer 15 Gew.-% Lösung aus Polymer in einer 50/50-Lösung aus Tetrahydrofuran (THF) und N,N-Dimethylformamid (DMF) mit 0,06 Gew.-% TBAC gesponnen. Eine 30G Edelstahlnadel, eine Polymerdurchflussrate von 0,5 ml/Std. und eine CO₂-Durchflussrate von 8 lpm wurden mit einer Lücke von 25,4 cm und einem angelegten Potenzial von 25 kV verwendet, um Sub-200 nm Fasern zu erhalten. Die Prüfung durch SEM deutete auf einen AFD von 150 ± 31 nm hin, wobei die kleinsten Fasern ungefähr 100 nm betragen.

[0063] Der Faserdurchmesser, der in der vorliegenden Erfindung erhalten wird, ist eine Funktion des molekularen Polymergewichts, der Polymerarchitektur, des Lösungsmittels oder der Lösungsmittel, der Konzentration des Polymers in dem Lösungsmittelsystem, den Additiven und deren Konzentration, dem angelegten Elektrospinnpotenzial, der Lücke zwischen der Spinnndüse und der Masse, der Größe und

Gestalt der Spinndüse, der Polymerlösungsdurchflussrate, der Durchflussrate und Rezeptur des Prozessgases, das über die Nadel strömt, der RH des Prozessgases und des Partialdrucks des Lösungsmittels bzw. der Lösungsmittel. Die oben angegebenen Beispiele wurden als vorteilhaft zum Erhalten von Fasern gefunden, die für eine Nanofaserfilterkonstruktion geeignet sind, sie sind aber nicht restriktiv.

[0064] Andere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung könnten verschiedene Polymerlösungsmittelsysteme und folglich verschiedene Elektrospinnbedingungen verwenden, um geeignete Nanofasern zu erhalten. Ferner könnten dieselben Polymerlösungsmittelsysteme mit verschiedenen Elektrospinnbedingungen kombiniert werden, um verbesserte Fasern oder maßgeschneiderte Fasern für alternative Anwendungen zu erzeugen. Beispielsweise könnte der Mantel aus CO₂-Gas, der über die Nadel strömt, Lösungsmitteldampf enthalten, um die Verdampfungsrates des Lösungsmittels bzw. der Lösungsmittel in dem Polymerstrahl zu verringern, der an der Nadelspitze ausgebildet wird, wodurch die Dehnzeit der Polymerfaser vergrößert wird. Der Partialdruck des Lösungsmittels kann auch über die Steuerung der Temperatur, des Drucks und der Mischung der Lösungsmittel modifiziert werden. In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird die Lösungsmittelkonzentration, bestimmt durch eine relative Konzentration in der Atmosphäre, gesteuert, um sich zwischen 0 und 100% zu befinden.

[0065] Noch eine weitere Ausführungsform der vorliegenden Erfindung betrifft die Steuerung der Elektrospinnumgebung, und die Auswahl der Polymerlösungsmittelsysteme veranlasst die elektrogenesponnenen Fasern auf dem Netz oder auf sich selbst in einem Zustand abgelagert zu werden, in dem die Nanofasern bezüglich des Lösungsmittels nicht vollständig getrocknet sind. Folglich können die Fasern dann am Netz und/oder aneinander gebunden werden, wodurch die integrale Netz-/Faserstruktur ausgebildet wird.

[0066] Die Nanofasern, die durch die vorliegende Erfindung hergestellt werden, enthalten, sind darauf aber nicht beschränkt, Akrylonitril/Butadien-Copolymer, Zellulose, Zelluloseazetat, Chitosan, Collagen, DNA, Fibrinogen, Fibronectin, Nylon, Poly(Acrylsäure), Poly(Chlorostyren), Poly(Dimethylsiloxan), Poly(Etherimid), Poly(Ethersulfon), Poly(Ethylacrylat), Poly(Ethylvinylacetat), Poly(Ethyl-co-vinylacetat), Poly(Ethylenoxid), Poly(Ethylenterephthalat), Poly(Milchsäure-co-Vinylacetat), Poly(Methacrylatsäure)salz, Poly(Methylmethacrylat), Poly(Methylstyren), Poly(Styrensulfonsäure)salz, Poly(Styren-sulfonylfluorid), Poly(Styren-co-acrylonitril), Poly(Styren-co-butadien), Poly(Styren-co-divinylbenzene), Poly(Vinylacetat), Poly(Vinylalkohol), Poly(Vinylchlorid),

Poly(Vinylidenfluorid), Polyacrylamid, Polyacrylonitril, Polyamid, Polyanilin, Polybenzimidazol, Polycaprolacton, Polycarbonat, Poly(Dimethylsiloxan-co-polyethylenoxid), Poly(Etheretherketon), Polyethylen, Polyethylenimin, Polyimid, Polyisopren, Polylactid, Polypropylen, Polystyren, Polysulfon, Polyurethan, Poly(Vinylpyrrolidon), Poly(2-Hydroxyethylmethacrylat) (PHEMA), Gelatine, Proteine, SEES Copolymer, Seide (natürlich oder synthetisch abgeleitet) und Styren/Isopren-Copolymer.

[0067] Ferner können Polymermischungen auch hergestellt werden, solange die zwei oder mehr Polymere in einem gemeinsamen Lösungsmittel oder einem gemischten Lösungsmittelsystem löslich sind. Ein paar Beispiele seien genannt:

Poly(Vinylidenfluorid)-Mischung-Poly(Methylmethacrylat), Polystyren-Mischung-Poly(Vinylmethylether), Poly(Methylmethacrylat)-Mischung-Poly(Ethylenoxid), Poly(Hydroxypropylmethacrylat)-Mischung-Poly(Vinylpyrrolidon), Poly(Hydroxybutyrat)-Mischung-Poly(Ethylenoxid), Protein Mischung-Polyethylenoxid, Polylactid-Mischung-Polyvinylpyrrolidon, Polystyren-Mischung-Polyester, Polyester-Mischung-Poly(Hydroxyethylmethacrylat), Poly(Ethylenoxid)-Mischung-Poly(Methylmethacrylat), Poly(Hydroxystyren)-Mischung-Poly(Ethylenoxid)).

[0068] Andere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung enthalten die Verwendung von Polymeren, die pH sind und/oder ein thermisches Antwortverhalten aufweisen, sodass die Nanofasermatte später modifiziert werden kann, auf eine Änderung der Umgebung reagieren kann oder einfach aufgelöst werden kann. Beispielpolymere enthalten sowohl die kommerziellen pH-sensitiven Polymere, die als Eudragit-Polymere bekannt sind, als auch als Copolymere von N-Isopropylacrylamid (NIPAM) und N-Methylacryloyl-L-Leucine (MALEU) oder (N,N-Dimethylamino)ethylmethacrylat (DMAEMA). Ein ähnlicher Ansatz würde darin bestehen, Polymere zu verwenden, die einfach mit Enzymen, wie beispielsweise Chitosan abgebaut werden, das durch Chitosanase und Zellulose abgebaut wird, das durch α -Zellulase abgebaut wird. Kombinationen von Polymersystemen könnten verwendet werden, um die Eigenschaften der Nanofaserfiltermatten für die bestimmte Anwendung einzustellen.

[0069] Obwohl ein Verfahren der vorliegenden Erfindung die Verwendung eines Gehäuses **1** und eines Prozessgases **26** enthält, enthält eine alternative Ausführungsform ein offenes belüftetes System (beispielsweise einen Abzug), anstatt des Gehäuses **1**. In noch einer weiteren Ausführungsform kann das Bearbeitungsgas **26** weggelassen werden.

Filterunterstützungsnetz

[0070] Zusätzlich zum Erhalten von Nanofasern,

welche wenige Defekte und eine engere Verteilung bezüglich der Faserdurchmessergrößen aufweisen, haben die Konstruktion der Unterstüzung 7 und die Vorbereitung der Oberfläche der Unterstüzung einen Einfluss auf die resultierende Fasermatte und die resultierenden Filtereigenschaften. In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung stellt ein makroskopisches Netz eine adäquate Unterstüzung für Nanofasern bereit, um den Kräften zu widerstehen, die auf die Filtermatte während der Filtration ausgeübt werden. Das Unterstüzungnetz trägt minimal zum Druckabfall des resultierenden Filters bei. Der Aspekt des groben Netzes der vorliegenden Erfindung ist ein alternativer Ansatz, um die herkömmlichen Filtermittel als die Nanofaserunterstüzung zu verwenden.

[0071] Filter, die mit Netzen ausgebildet sind, die 1,27 cm, 0,635 cm oder 0,159 cm (d. h. American Engineering Standardgrößen: entsprechend 1/2", 1/4" und 1/16") Öffnungen unter Verwendung von Kupfer, Messing, Nickel, Edelstahl und Aluminiummetall aufweisen, sind für die vorliegende Erfindung geeignet. Eine Aluminiumfensterabschirmung mit Öffnungen von ungefähr 1,2 mm × 1,6 mm ist auch eine akzeptable Unterstüzung. Die Oberfläche des Metallnetzes, im Besonderen für Aluminiumnetze, wurde einer Reinigung unterzogen, um Schmutz und Öle zu entfernen, gefolgt von einem Waschen des Netzes in verdünnter Schwefelsäure (10 bis 20% H₂SO₄ in DI-Wasser pro Volumen), um resistive Oxide und Verunreinigungen zu entfernen. Diese Reinigung verbessert die Nanofaserdispersion und Adhäsion. Irgendeine Anzahl von Metallen oder Metalllegierungen, mit Öffnungen verschiedener Gestalten (quadratisch, rechteckig, kreisförmig, rautenförmig, länglich und nicht reguläre Formen), mit Öffnungen, die sich bezüglich der Größe von ungefähr 12,7 mm bis runter zu 1000fachen des AFD variieren, können in der vorliegenden Erfindung verwendet werden.

[0072] Die Adhäsion der Nanofasern an das Unterstüzungnetz wird in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung über die Anwendung eines Haftvermittlers direkt auf das Netz vor dem Elektrospinnen verbessert. Der Haftvermittler ist typischerweise ein langsam trocknender Haftvermittler, wodurch dem Haftvermittler ermöglicht wird, klebrig zu sein (d. h. haftend), wenn elektrogenesponnene Fasern abgelagert werden. Alternativ können in einer weiteren Ausführungsform die Drähte (oder Komponenten) des Netzes mit einer sehr dünnen Schicht aus Polymer überzogen sein, das Oberflächengruppen aufweist, die mit den Polymerfasern, die auf dem Netz abgelagert werden, interagieren (van der Waals-, Wasserstoffbindung, Dipol, elektrostatische Anziehung, usw.). Ein Beispielsystem ist eine dünne Beschichtung aus Poly(Glycidylmethacrylat) (PGMA) auf einem Nickelnetz mit Nanofasern aus Poly(Methylmethacrylat) (PMMA), die auf dem beschichteten Netz

abgelagert sind. Eine alternative Ausführungsform der vorliegenden Erfindung verwendet querverbindbare Systeme, die polymerisiert werden, nachdem die Fasern abgelagert sind. Beispiele enthalten Chitosannanofasern, die mit Glutaraldehyd und Polyvinylacetat querverbunden sind, das mit Borax querverlinkt ist; auch Ablagerungen von Nanofasern auf Haftvermittlern, wie beispielsweise Norland's Artikel aus aushärtbaren Haftvermittlern basierend auf Mercaptoesterkomponenten. Diese Oberflächenbeschichtungen vergrößern die Haftung und Adhäsion der Nanofasern auf der Unterstüzung.

[0073] In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird das Metallnetz mit Metallschäumen, wie beispielsweise ERG's Duocel™ Metallschäumen ersetzen; beispielsweise Aluminium Durocel mit 20 Poren pro Inch (PPI; alternativ eine mittlere Porengröße von 1,27 mm). Schäume können auch sowohl mit Kupfer, Nickel und verschiedenen anderen Metallen als auch aus Polymermaterialien gefertigt werden. Porositäten, die im Bereich von 10 PPI (2,5 mm Poren) bis 40 PPI (0,064 mm Poren) liegen, sind für die Erfindung akzeptabel.

[0074] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden Aluminiumteile (oder andere Metalle, die oxidieren) behandelt, um die Ausbildung von Aluminiumoxiden (Metalloxiden) zu vermeiden, beispielsweise unter Verwendung des Prozesses, der als "Electroless Nickel" bekannt ist oder Elektroplattieren mit Gold.

[0075] In noch einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist das Unterstüzungnetz aus leitfähigem Kunststoff aufgebaut. Beispielsweise wird Polyester oder eine Nylonabschirmung (oder grobes nichtgewebtes Polymernetz) mit einem leitfähigen Finish, wie beispielsweise Gold, Palladium oder verschiedenen Metalllegierungen, beschichtet. Der Beschichtungsprozess kann mit irgendeiner Anzahl von etablierten Verfahren aus dem Stand der Technik erzielt werden, darunter sind enthalten Vakuumablagerung (beispielsweise Sputterbeschichtung, Verdampfungsablagerung und chemische Dampfbeschichtung) und Chromplattierung von Kunststoffen. Alternativ kann das Netz aus leitfähigem Kunststoff aufgebaut sein, der seine Leitfähigkeit über eingebettete leitfähige Partikel erhält (Carbon nanotubes, Metalle usw.); oder irgendein Verfahren, um ein Kunststoffnetz leitfähig, semi-leitfähig oder elektrostatisch ableitend zu machen.

[0076] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine nichtgewebte Unterstüzung verwendet, die leitfähig ist oder leitfähig gemacht ist (beispielsweise durch Sputterbeschichten usw., wie es oben erwähnt ist). Die nichtgewebte Unterstüzung trägt stark zum Druckabfall bei, aber kann in bestimmten Anwendungen akzeptabel sein. Diese Aus-

führungsform ist ähnlich wie der existierende Stand der Technik, unterscheidet sich aber darin, dass zunächst ein leitfähiges Faservlies verwendet wird und zweitens – und am wichtigsten – die Struktur des elektrischen Felds und des elektrischen Potentials der Unterstüztung anders als im existierenden Stand der Technik gesteuert wird, wie es später in diesem Dokument detaillierter ausgeführt wird.

[0077] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, welche die vorteilhaften Eigenschaften der Nanofasermatten mit hohem FoM (später beschrieben) nutzt, werden Nanofasern der vorliegenden Erfindung auf einem Substrat eines herkömmlichen Filtermittels abgelagert, das von dem Metallnetz während des Spinnens unterstüzt wird. Das geschichtete herkömmliche Nanofasermittel, das somit erzeugt ist, kann später von dem Netz entfernt und plissiert, in Beuteln gebunden und in herkömmlichen Herstellungstechniken zum Fertigen verschiedener Filterprodukte verwendet werden. Diese Ausführungsform ist ähnlich wie beim Stand der Technik, ermöglicht aber die Steuerung der Struktur der elektrischen Felder, und das elektrische Potenzial des Unterstüztungsnetzes wird im Vergleich zum existierenden Stand der Technik anders gesteuert, um Mittel mit einem FoM zu erzeugen, der größer als 20 kPa^{-1} ist, wie es in diesem Dokument später ausführlich beschrieben ist. Ferner können aufgrund der Natur des Elektrosplinnens Fasern direkt auf einen plissierten Filter oder ein anderes Filterprodukt (beispielsweise Beutelfilter) gesponnen werden, was eine Verbesserung eines Niedrigeffizienzfilters bereitstellt. Ein solches Beispiel würde eine Schicht von Nanofasern auf einen plissierten allgemeinen Lüftungsfiter aufbringen, der die Entfernung von Allergenen (Pollen, Endotoxine usw.) oder Biotoxine (Endotoxine, Spuren, Infektionsmittel usw.) verbessern würde.

[0078] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung können Polymere ausgewählt werden, um sich in Wasser aufzulösen, pH und/oder regulierte Pufferlösungen, die durch Erhitzen über die Raumtemperatur abgereichert werden oder durch Enzyme abgereichert werden, um die Rückgewinnung von Partikeln oder Bioaerosolen für eine nachfolgende Analyse zu vereinfachen, in dem Fall, in dem die Nanofasermatte für eine Probenentnahme verwendet wird.

Filterherstellung und Nanofasermattenmorphologie

[0079] Wie es oben erwähnt ist besteht ein Weg zur Festlegung der Filterperformance und zum Vergleichen verschiedener Filter darin, Vergleiche des Gütefaktors (FoM) zu verwenden. Der FoM ist eine fundamentale Größe eines Filters, der einen Vergleich der Filter verschiedener Dicken, die zu vergleichen sind, ermöglicht; je größer der FoM, desto besser der Fil-

ter.

[0080] Im Grunde ist der FoM ein Verhältnis der Einzelfaseransammlungseffizienz normalisiert mit dem aerodynamischen Einzelfaserwiderstand. Ein einfacher Weg (aber nicht notwendigerweise der einzige Weg), um den FoM zu verstehen, ist wie folgt: Wenn zwei identische Filter genommen werden und diese in Reihe angeordnet werden, vergrößert sich die Effizienz des Systems, aber auch der Druckabfall vergrößert sich, da die Dicke verdoppelt wurde. Folglich bleibt der FoM konstant. Ein besonders interessanter Aspekt von faserhaltigen Filtern und FoM besteht darin, dass die Mehrzahl von kommerziellen faserhaltigen Filtermitteln alle ähnliche FoMs aufweisen. **Fig. 5** demonstriert dieses Phänomen teilweise, wobei gezeigt wird, dass Daten des teilweisen Eindringens bzw. Durchdringens versus Druckabfall von verschiedenen herkömmlichen Glasfaserfiltern (offene Rauten) alle entlang einer diagonalen Linie liegen; diese Linie ist FoM. Ein FoM von ungefähr $12 \pm 2 \text{ kPa}^{-1}$ für $0,3 \mu\text{m}$ Partikel bei einer Flächengeschwindigkeit von $5,33 \text{ cm/s}$ beschreibt die Performance von ungefähr allen faserhaltigen Glasfasermitteln über einen großen Bereich von Wirkungsgraden.

[0081] Theoretisch hängt der FoM vom Faserdurchmesser und einer Packungsdichte des Filters ab. Für eine Packungsdichte von 0,09 und einem Faserdurchmesser von 10 nm (potentiell eine untere Schranke für das praktische Spinnen von Fasern), wird der FoM auf 720 kPa^{-1} für $0,3 \mu\text{m}$ Partikel bei $5,3 \text{ cm/s}$ berechnet. Diese Berechnungen basieren auf Gleichungen zum Druckabfall und der Partikelansammlung, dargelegt von Payet et al (1992) und Thomas et al (1992), die durch Bezugnahme einbezogen sind.

[0082] Obwohl das Modellieren eines Filter FoM als eine Funktion des Faserdurchmessers eine deutliche Verbesserung der Filterperformance mit kleiner werdendem Faserdurchmesser voraussagt, wurde diese Verbesserung nicht realisiert. In früheren Arbeiten wurden Filter durch Elektrosplinnen von Nanofasern auf geerdeten Unterstüztungen oder Substraten (beispielsweise Niedrigeffizienzcellulosefiltermittel) ausgebildet, die auf einer geerdeten Oberfläche sitzen. Allerdings wurden keine große Verbesserungen bezüglich des FoM beobachtet, d. h. der erhaltene FoM war kleiner als 12 kPa^{-1} für $0,3 \mu\text{m}$ Partikel bei $5,3 \text{ cm/s}$. Folglich ist die Verwendung von elektrosponnenen Nanofasern, um Hocheffizienzfilter zu erhalten, mit Verbesserungen zu den existierenden Technologien, nicht geradlinig und wurde folglich vorher noch nicht realisiert.

[0083] Filter, die durch Elektrosplinnen von Nanofasern auf geerdeten Unterstüztungen gefertigt wurden, sind in **Fig. 5** als halbgefüllte Hexagone gezeigt. Diese Resultate, die während der Entwicklung der

vorliegenden Erfindung erhalten wurden, zeigen, was mit dem Stand der Technik möglich ist. Literaturwerte für Hocheffizienznanofasernfilter, die durch ASTM Standard F1215-89 (oder verwandte Filterteststandards) getestet wurden, wobei diese noch nicht vollständig in der Literatur gegeben sind, sind vergleichbar oder sehr viel schlechter als die Werte, die in [Fig. 5](#) dargestellt sind (d. h. typische Werte des FoM $\ll 12 \text{ kPa}^{-1}$ für $0,3 \mu\text{m}$ Partikel bei $5,3 \text{ cm/s}$).

[0084] Das Herstellen eines Nanofasernfilters mit einer verbesserten Performance bezüglich der existierenden Technologie beinhaltet typischerweise sowohl Sub-200 nm Fasern als auch eine geeignete Filtermattenmorphologie (beispielsweise eine Gleichförmigkeit über einen weiten Flächenbereich und Fasern, welche eine Streuung bezüglich des mittleren Faserdurchmessers aufweisen, der mit dem mittleren Faserdurchmesser vergleichbar ist). Das Erhalten einer Filtermattenmorphologie, die für einen Hoch-FoM-Filter geeignet ist, umfasst Faktoren, wie beispielsweise die Dicke der Nanofasernfiltrationsschichten, die Packungsdichte der Fasern, den mittleren Faserdurchmesser und den Bereich und die Population der Faserdurchmesser. Die Elektrospinntechniken, die oben beschrieben sind, zum Erhalten von Sub-200 nm Fasern in Kombination mit der Auswahl eines Unterstützungsnetzes, das minimal zum Druckabfall beiträgt (verglichen mit dem Beitrag aufgrund der Nanofasermatte), sind ein Teil der verbesserten Nanofasernfilter der vorliegenden Erfindung.

[0085] Der Filter FoM kann teilweise auch beeinflusst werden durch Undichtigkeiten bei Komponentenschnittstellen, einer Mattenungleichförmigkeit über das gesamte Unterstützungsnetz und die Mattenmorphologie (Faserpackungsdichte, Faserdurchmesser usw.). In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann die Herstellung eines Filters (oder eines Filtermittels) das Anbringen des groben Netzes **7** an einen Unterstützungsrahmen **6** beinhalten. Ein Aspekt betrifft die Auswahl eines Anbringungsschemas, das die Ausbildung von Undichtigkeiten an der Netz-/Rahmenschnittstelle vermeidet, aufgrund einer nicht angemessenen Ablagerung der Nanofasern. In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird ein Haftvermittler verwendet. In dieser Ausführungsform werden Fasern unter ähnlichen Bedingungen wie bei der Verwendung bei einer Nanofasernablagerung auf einem ebenen Unterstützungsnetz abgelagert, aber die Anwesenheit eines Haftvermittlers verbessert die Dichtung der Nanofasermatte an dem Rahmen. In einer weiteren Ausführungsform wird die Schnittstelle mit einem Haftvermittler abgedichtet oder weiter abgedichtet, der mit den Polymernanofasern kompatibel ist (an den Polymernanofasern, dem Netz und dem Rahmen ohne Auflösen der Nanofasern anhaftet), sodass keine geschwächte Nanofasern-/Haftvermittlerschnittstelle ausgebildet wird.

[0086] Verschiedene Haftvermittler, wie beispielsweise Silikongummi, Epoxide und elektrisches Hochspannungstape als Dichtungsmittel wurden in der vorliegenden Erfindung verwendet. Eine Kombination der dielektrischen Haftfestigkeit und der Oberflächeneigenschaften des Haftvermittlers (chemische Oberflächengruppen und Ladung) bestimmen, wie die elektrogenesponnenen Nanofasern mit den Haftvermittlern interagieren. Es wurde herausgefunden, dass Polystyren und PSu-Fasern auf herkömmlichen Epoxidhaftvermittlern einfach ablagern, wohingegen es weniger wahrscheinlich war, dass diese auf herkömmlichen Silikonhaftvermittlern ablagern, wie beispielsweise Electric Products, Inc.'s Plumber's Goop™ und Dow Corning's RTV™. Der kleinste Betrag der Faserablagerung wurde für Plumber's Goop und 3M elektrisches Hochspannungstape gefunden.

[0087] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird Epoxid (beispielsweise Loctite™ Epoxy gel) angewendet, um eine gute Abdeckung der PSu-Nanofasern an der Schnittstelle des Unterstützungsnetzes und des Rahmens zu gewährleisten. In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wurde dasselbe Epoxid nach dem Elektrospinnen von PSu verwendet, um Undichtigkeiten und dünne Flecken abzudichten. Andere Ausführungsformen, die Polymer(e) verwenden, die sich von PSu unterscheiden, würden die Auswahl eines Haftvermittlers erfordern, sodass die Haftvermittler-/Polymernanofasern-Kompatibilität beibehalten wird.

[0088] In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden Haftvermittler ausgewählt, um die Faserablagerung in bestimmten Bereichen einer Filtergeometrie zu minimieren. Beispielsweise könnte eine Kombination einer Netzgestalt und Spannungspotenzialen zusammen mit Haftvermittlern, welche niedrige oder hohe Faserablagerungseigenschaften aufweisen, verwendet werden, um komplexe zwei- oder dreidimensionale Muster von Nanofasern zu erzeugen.

[0089] Obwohl verschiedene Ausführungsformen erfordern, dass das Unterstützungsnetz in einem Rahmen angebracht wird, benötigen andere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung keinen Rahmen, der das Netz unterstützt.

[0090] Sowohl erdfreie als auch geerdete Unterstützungsnetze (beispielsweise Element **7** in [Fig. 2B](#) und [Fig. 3](#)) wurden bei der Entwicklung der vorliegenden Erfindung verwendet. Mit einem elektrisch erdfreien Netz wiesen die Fasern, die anfangs abgelagert wurden, eine größere gleichförmige Dispersion auf als diejenigen, die auf direkt geerdeten Netzen abgelagert wurden. Allerdings, indem Fasern auf das Netz abgelagert werden, steigt das Netzpotenzial mit der Zeit rasch an, wodurch die elektrische Potenzialdifferenz zwischen der Elektrospinnnadel (Düse **2**) und

dem Ziel (das Unterstützungsnetz 7) verringert wird, die den Prozess antreibt. Tatsächlich kann das Spannungspotenzial auf dem Netz bis zu dem Punkt ansteigen, bei dem der Elektrospinprozess stoppt.

[0091] Folglich wird in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung eine Spannungsentladungseinrichtung oder eine Spannungsbeschränkungseinrichtung (VLD) bereitgestellt, die das Netzpotenzial als eine Funktion der Zeit reguliert. Diese Einrichtungen sind Beispiele der oben genannten Impulseinrichtung des elektrischen Felds. Verfahren zum Steuern der Spannung des Netzes/der sich ausbildenden Nanofasermatte enthalten beispielsweise eine Elektrodenabstandseinrichtung oder eine Spannungsentladungsröhre. Sobald das Netz/die Matte einen Grenzwert erreicht, wird die Ladung entfernt. Die VLD vermeidet folglich das Stoppen des Elektrospinprozesses.

[0092] Eine Ausführungsform der VLD der vorliegenden Erfindung ist eine Elektrodenabstandseinrichtung, d. h. Element 9 in [Fig. 2B](#) und [Fig. 3](#), die durch Falten eines überschüssigen Unterstützungsnetzes unter die Ebene des Unterstützungsnetzes, wo die Fasern abgelagert werden, ausgebildet wurde. Der Abstand zwischen den Spitzen bzw. Vorderseiten der Drähte und der Masseplatte 41 darunter betrug ungefähr 3,5 mm. Die Spannung, bei der die Entladung auftritt, ist die dielektrische Durchschlagsspannung, die durch den Lückenabstand (beispielsweise 3,5 mm) und der dielektrischen Durchschlagsspannung des Gases in der Elektrospinkammer gesteuert wird. Die dielektrische Durchschlagsspannung des Gases wird von der Gaszusammensetzung und den Umgebungsbedingungen (d. h. RH und Temperatur) bestimmt.

[0093] Das Unterstützungsnetzpotenzial ändert sich mit der Zeit, indem es von der VLD 9 und den Elektrospinbedingungen bestimmt wird. Dieses sich mit der Zeit ändernde Potenzial ist bezüglich der Herstellung hoher FoM-Filter vorteilhaft. [Fig. 6](#) stellt ein Beispiel des Unterstützungsnetzpotenzials und des Entladungsstroms/VLD-Stroms als eine Funktion der Zeit bereit. Das Netzpotenzial wurde unter Verwendung einer Hochimpedanzsonde gemessen; der Entladungsstrom wurde über einen Widerstand gemessen, der in Reihe zwischen dem Masseplattensystem und dem Erdboden angeordnet ist. Für ein angelegtes Spinnpotenzial von 29,5 kV betrug das arithmetische Mittel des Potenzials des Netzes 7 ungefähr 5,7 kV und die Frequenz der Entladung betrug $5,3 \pm 1,0$ Hz, die Peakspannung betrug ungefähr 10 kV. Das zeitabhängige Netzpotenzial und dessen Mittelwert sind beispielhaft in [Fig. 6](#) gezeigt, sind aber nicht auf diese Werte beschränkt. Andere Frequenzen und Potenziale sind für die vorliegende Erfindung geeignet. Tatsächlich werden in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung Schichten von Nanofasern in

Anwesenheit einer periodischen Entladung abgelagert. In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden Schichten von Nanofasern in Anwesenheit einer angelegten Pulsierung eines elektrischen Felds abgelagert.

[0094] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung produziert die sich abrupt ändernde Wellenform Fasermatten mit verbesserten Filtrationseigenschaften, gemessen durch die erhaltenen resultierenden FoM-Werte. Der (Die) exakte(n) Mechanismus oder Mechanismen für die verbesserte Performance ist (sind) zur jetzigen Zeit nicht sicher. Mögliche Quellen der Verbesserung könnten Änderungen der Faserdichte, Änderungen der dreidimensionalen Struktur der Filtermatte, verbesserte Fasermorphologie und verbesserte Verteilung der Fasern auf der Unterstützungsstruktur (beispielsweise Netz) enthalten.

[0095] Dieser Weg der Faserherstellung, welcher eine abrupte elektrische Feldmodulation verwendet, könnte in anderen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung zur Herstellung von Nanofasern, Nanofasergarnen, Nanofaservliesen und anderen Nanofaserstrukturen für eine Vielzahl von Anwendungen über die Ausbildung von Filtrationsmitteln und Einrichtungen hinaus angewendet werden.

[0096] Die vorliegende Erfindung ist nicht auf die exakten abrupten Übergänge, die in [Fig. 6](#) gezeigt sind, beschränkt. Nichtsdestotrotz stellen die Übergänge in [Fig. 6](#) ein illustratives Beispiel dar. Die abrupten Entladungsereignisse schienen typischerweise 16 ms anzunehmen, um 10 kV zu entladen. Allerdings sind diese Zahlen nicht fest, selbst für die Übergänge, die in [Fig. 6](#) gezeigt sind. Gleichermaßen betrug die Ladungszeit zurück zu 10 kV ungefähr 200 ms, schwankte aber auch von Zyklus zu Zyklus.

[0097] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung können die angelegten Wellenformen oder Ladungsereignisse (beispielsweise bis zu 15.000 V oder 50% der angelegten Spannung) von 100 ms bis 1 s annehmen, wobei 200 ms typisch sind. Entladungsereignisse oder abrupte Übergänge zu einem Potenzial des elektrischen Felds nahe Null können schnell auftreten, beispielsweise 2 ms bis 80 ms annehmen, wobei 16 ms typisch sind. Die Werte und Wellenformen, die in [Fig. 6](#) gezeigt sind, werden genommen, um repräsentative abrupte Übergänge zu sein, die gemäß verschiedener Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung verwendet werden können, um Fasermatten für verschiedene Nanofaseranwendungen herzustellen.

[0098] Eine Reihe von Verfahren zum Steuern des Netzpotenzials mit einer VLD sind in der vorliegenden Erfindung möglich. Es kann eine Elektrodenabstandseinrichtung verwendet werden, die kein inte-

graler Teil der Unterstüztung ist, wie es in [Fig. 2B](#) zeigt ist, sondern einfach das Bildernetz verbindet. Dieser Abstand kann unter Verwendung einer Mikrometereinrichtung vorsichtig gesteuert werden. Der Abstand kann auch dynamisch gesteuert werden, d. h. dass zeitveränderliche Potenzial des Netzes wird überwacht und die Abstandsgröße wird eingestellt, um das Netzpotenzialverhalten aktiv auf einen gewünschten Wert zu steuern. Die VLD kann irgendeine Anzahl von Einrichtungen sein, die eine definierte Spannung oder eine in der Zeit veränderliche Wellenform einstellt, wie etwa eine Gasentladungsröhre (beispielsweise SRCs Spannungsbegrenzungsgasentladungsröhren), Miniaturneonleuchten, Schalter oder andere elektronische Komponenten oder Systeme, die entweder aktiv oder passiv die Spannung des Netzes als eine Funktion der Zeit regulieren.

[0099] Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung enthalten VLD und Elektrospleinbedingungen, sodass Frequenz mit bis zu 1000 Hz erreichen kann und das durchschnittliche Netz-/Mattenpotenzial im Bereich von 0 V bis 15.000 V oder 0 bis 50% der Spannung, welche an die Elektrospleindüse angelegt wird, liegen kann. Eine andere Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann vergleichbare Spannungswellenformen mit diesen Amplituden und Frequenzen anlegen.

[0100] Zusätzlich zum elektrischen Potenzial des Unterstüztungsnetzes **7** waren die Gestalt (oder Struktur) der elektrischen Felder für den Faserausbildungsprozess wichtig. Während das Netz **7** auf einem regulierten Spannungspotenzial gehalten wird, waren die Anwesenheit, der Ort und Gestalt der geerdeten Metallelektroden wichtig. Obwohl kreisförmige oder zylindrische Komponenten verwendet wurden, sind andere Geometrien möglich.

[0101] In einer Ausführungsform wurde eine Masseplatte **41** an einem festgelegten Abstand unterhalb des Netzes **7** positioniert, um eine ausreichende Potenzialdifferenz bereitzustellen, und die Gestalt der elektrischen Felder musste ein adäquates Elektrosplein und Ablagern der Fasern auf dem Netz erzielen. In einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wurde eine zweite Masseplatte **43** unterhalb des Unterstüztungsrahmens **6** positioniert, wobei ein gewisser Betrag der Metallmasseplatte sich über die Seite des Rahmens **6** erstreckt. Das verhilft weiter, dass das angemessene Elektrospleinpotenzial und die Gestalt des elektrischen Feldes die Ablagerung von Fasern auf dem Netz unterstützen, enthaltend die vordere Kante des Filterrahmens **6**.

[0102] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sorgen ein Abstand eines Netzes **7** zur internen Masseplatte **41** von 5 mm mit einem Abstand des Elektrodenabstands **9** von 3,5 mm, ein Abstand zwischen einer Außenkante der unteren Bodenplatte

43 zur Seite des Filterrahmens **6** von 7 mm und ein Abstand von **43** zu **41** von 69 mm für eine gute Nanofaser- und Mattenmorphologie. Andere Ausführungsformen enthalten eine Verringerung des Abstands zwischen **43** und **41** oder selbst eine Eliminierung von **43**. In einer verwandten Ausführungsform ist der Abstand beibehalten, aber ein entfernbarer Abstandshalter kann so verwendet werden, dass eine sehr dünne Filterstruktur erzeugt wird (Rahmen + Netz + Nanofasermatte ≤ 1 cm; und Rahmen + Netz + Nanofasermatte $\leq 0,5$ cm). Die Höhe des Elements **43** würde typischerweise konstant sein und ein Abstandshalter würde den Rahmen **6** ersetzen. Dieser Rahmen **6** würde in zwei Teilen vorliegen, wobei ein Abstandshalter, der während des Elektrospleinens verwendet wird, und der eigentliche Rahmen, der das Netz **7** unterstützt, dünn sein würden. Alternativ könnten der Rahmen **6** und das Element **42** kürzer gefertigt sein. Der Abstand zwischen dem Netz **7** und der Bodenplatte **41** kann im Bereich von 0,5 mm bis 10 mm liegen, der Elektrodenabstand kann im Bereich in der Nähe von 0 mm bis 10 mm liegen, und der Abstand von der Seite von **6** zur Außenkante von **43** kann von 0 bis 10 cm variieren.

[0103] In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird eine Gasentladungsröhre oder andere VLD verwendet, sodass kein Abstandsentfernung spezifiziert/verwendet wird; allerdings ist der Filteraufbau und das Masseplattensystem so, wie es gerade beschrieben wurde.

[0104] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird keine Spannungsbegrenzungseinrichtung verwendet – das Netz **7** ist mit der Masse verbunden, aber das Masseplattensystem **41–43** ist gleich. Dieser Aufbau ermöglicht einen Filter mit sehr hoher Effizienz (d. h. eine Partikeleindringung $P_t < 10^{-6}$) aber mit einem verringerten FoM.

[0105] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist eine leitfähige, semi-leitfähige oder isolierende nichtgewebte Unterstüztung oben auf einem System mit einer Spannungsbeschränkungseinrichtung und einem Masseplattensystem platziert, sodass das Potenzial des Vlieses moduliert wird und die elektrischen Felder gestaltet/beibehalten werden, hauptsächlich auf dieselbe Weise wie in der Ausführungsform oben mit dem Netz. In einer Variation wird ein nichtgewebtes Mittel auf einem leitfähigen Metallnetz unterstützt. Das resultierende geschichtete Mittel könnte von dem Metallnetz entfernt werden und in herkömmlichen Filterherstellungsprozessen verwendet werden, die einen Verbundfilter bereitstellen, in dem die Nanofaserschichten eine hocheffiziente Partikelfalle bereitstellen und das herkömmliche Filtermittel ein zusätzliches Filtrationsmittel für Partikel, die größer als ein Mikron sind, bereitstellt. HEPA-Filter können auch als das zusätzliche Filtermittel verwendet werden.

[0106] Ein alternativer Ansatz für die Nanofasern besteht darin, sich auf der Stromaufwärtsseite des Vlieses zu befinden, wobei das Vlies einfach eine Strukturunterstützung bereitstellt. Optional könnten doppelseitige Mittel vorgesehen sein, d. h. Nanofasern/Vlies/Nanofasern.

[0107] Es wurde herausgefunden, dass auch RH die abgelagerte Nanofasermattenmorphologie beeinflusst (bereits oben wurde der Effekt bezüglich der Fasermorphologie genannt). Eine höherer RH hatte Fasern zur Folge, die in stärkerer Eintragung mit den Drähten des Netzes abgelagert sind, wohingegen eine geringer Feuchte eine gleichförmigere Dispersion von Fasern über die Netzöffnungen zur Folge hatte. Für das PSu-Beispiel, das bereit genannt ist, neigte eine RH im Bereich von 38% bis 22% dazu, eine bessere Fasermorphologie zu ergeben. Die RH-Steuertechnologie ist gleich wie in der obigen Diskussion zum Ausbilden von Nanofasern.

[0108] Weitere Verbesserungen hinsichtlich der Gleichförmigkeit der Nanofasermatte wurden durch Bewegungen der Elektrospinnndüse **2** und/oder des Filterrahmenaufbaus **6** während der Faserablagerung erhalten. In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wurde der Filterrahmen **6** außerhalb des Zentrums des Spinnstrahls platziert, und der Rahmen drehte sich während der Faserablagerung. Beispielsweise wurde der 8,89 cm OD-Filterrahmen und die Spinnndüse axial positioniert, wobei aber die Spinnndüse vom Zentrum um 2,22 cm verschoben war. Der Filterrahmen wurde anschließend um 90° im Uhrzeigersinn alle 7 Minuten gedreht, wobei andere Zeitintervalle von alle 30 Sekunden bis alle 10 Minuten in anderen Ausführungsformen der Erfindung verwendet wurden. Alternativ könnte ein automatisiertes System kontinuierlich oder periodisch den Filterrahmen drehen. Für die Ausführungsformen wurde eine Gestalt verwendet, die sich von der Kreisförmigen unterscheidet, wobei der Rahmen und/oder der Spinnstrahl auf eine X-Y-Weise rasternd über das Filternetz wiederholend bis zum Schluss verschoben wird. Andere Ausführungsformen, unabhängig von der Filtergeometrie, enthalten die Bewegungen des Emitters und Netzes relativ zueinander unter Verwendung der Bewegung in der X-Y- und Z-Richtung, zusammen mit einer Drehung und einem Kippen, um eine gewünschte Abdeckung des Netzes zu erhalten.

[0109] Die Dicke der Nanofasermatte kann von ungefähr 0,25 µm (250 nm) bis 100 µm oder, sofern benötigt, darüber hinaus variieren, wobei die meisten Filter eine durchschnittliche Mattendicke im Bereich von 2 bis 5 Mikron aufwiesen. Die durchschnittlichen Mattendicken-Nummern repräsentieren die durchschnittliche Dicke der Gesamtnanofasermatte in einem Filter. Alternativ kann die Mattendicke als Schichten von Nanofasern definiert werden, wobei eine Dicke von 4 bis 4.000 Schichten enthalten ist,

wobei 4 bis 400 oder 5 bis 100 oder 5 bis 15 Schichten in verschiedenen Ausführungsformen typisch waren.

[0110] Die Bestimmung, wie lange elektrozuspinnen ist, um eine gewünschte Fasermattendicke, Druckabfall und/oder Filtereffizienz zu erzielen, wurde in erster Linie über eine Echtzeitbeobachtung des Druckabfalls des sich ausbildenden Filters durchgeführt. Ein Bearbeitungsgas **26** strömt durch die sich ausbildende Filtermatte und aus dem einzigen aktiven Auslass **28** während des Elektrospinnens. Ein Differenzialdruckmanometer **32** maß den Gesamtdruckabfall über den Filter bei einer Flächengeschwindigkeit des Bearbeitungsgases, das durch den sich ausbildenden Filter strömt. Es gibt eine direkte Beziehung zwischen dem gemessenen Druckabfall und dem, der beobachtet wird, wenn der fertige Filter getestet/verwendet wird, bei einer bestimmten Flächengeschwindigkeit (beispielsweise 5,3 cm/s). Es gibt auch eine Beziehung zwischen dem Druck, der von dem Differenzialdruckmanometer **32** gemessen wird, und der Mattendicke und -dicke. In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wurde der Druckabfall verwendet, um zu bestimmen, wie lange elektrozuspinnen ist, um einen Filter mit einem FoM oberhalb von 20 kPa⁻¹ zu erhalten.

[0111] In einer weiteren Ausführungsform wurde allein die Zeit verwendet, um zu bestimmen, wann das Elektrospinnen anzuhalten ist, wobei die direkte Beziehung zwischen der Elektrospinnndauer (Zeit) und der Fasermattendichte und -dicke gegeben ist.

Beispiel 1:

[0112] Es wurde eine Standardaluminiumfensterabschirmung mit Alkohol gereinigt, mit DI-Wasser gespült, mit Aceton gereinigt, mit DI-Wasser gespült, getrocknet und anschließend mit verdünntem (14 Vol%) Schwefelsäure gereinigt, sorgfältig mit DI-Wasser gespült und anschließend mit sauberem, trockenem Stickstoffgas getrocknet. Ein Kreis des gereinigten Netzes mit einem Durchmesser von 8,89 cm wurde an ein 7,7 cm langes Stück 7,62 ID PVC Rohr angebracht, wobei einige der Kanten des Netzes heruntergefaltet wurden (9). Das Netz wurde an den PVC-Rahmen mit Loctite™ Epoxy gel angebracht. Der Aufbau aus Netz **7**, Rahmen **6** wurde auf das Masseplattensystem **28**, **41-43** in dem Elektrospinngehäuse **1** platziert. Der Abstand zwischen **7** und **41** betrug 8 mm, die Elektrodenabstandseinrichtung **9** wies einen Abstand von ungefähr 5 mm auf. Die Seite von **6** zur Außenkante von **43** betrug 7 mm (Bestimmungsflächenbereich der unteren Masseplatte **43**, das dazu beiträgt, das elektrische Feld zwischen dem Emitter **2** und dem Filteraufbau zu formen und beizubehalten). Eine Mischung aus trockenem und feuchten (über Blasenbildung durch DI-Wasser) CO₂ **26** wurde verwendet, um eine RH im Bereich von

26 bis 38% zu erhalten.

[0113] 21 Gew.-% PSu (Udel P3500 LCD durch Solvay Advanced Polymers) in DMAC mit den 0,2 Gew.-% TBAC wurde als die Polymerlösung verwendet. Diese Polymerlösung wurde von einer 30G (ID 0,152 mm) Edelstahlnadel mit einer Durchflussrate von 0,05 ml/h, einer Lücke bzw. einem Abstand von 25,4 mm, einem angelegten Potenzial von 20,5 kV DC und einer CO₂-Gasmanteldurchflussrate von 8 L/min gesponnen.

[0114] Der Filterrahmenaufbau wurde um 90° im Uhrzeigersinn alle 10 Minuten für insgesamt 50 Minuten gedreht. Der resultierende Druckabfall des fertigen Filters betrug 53,9 Pa bei einer Flächengeschwindigkeit von 5,3 cm/s. Der Filter wies einen FoM von ungefähr 85 kPa⁻¹ für 0,3 µm Partikel bei 5,3 cm/s nach zwei Wochen Alterung in einem sauberen, trockenen Lagerbereich auf.

Beispiel 2:

[0115] Derselbe Aluminiumnetz- und Filterrahmenaufbau aus dem Beispiel 1 wurde verwendet, aber ein Elektrodenabstand **9** von 3,5 mm wurde mit einem Abstand des Netzes **7** bis **41** von 5 mm verwendet. Die RH wurde reguliert, um sich im Bereich von 33 bis 26% zu befinden. Der Rest der Bedingungen und Konfigurationen war mit dem Beispiel 1 identisch. Der Filter wurde alle fünf Minuten um 45° für insgesamt 45 Minuten gedreht, um einen Filter mit einem Druckabfall von 48,8 Pa und einer Eindringung Pt von $1,7 \times 10^{-5}$, das ist ein FoM von ungefähr 98 kPa⁻¹, herzustellen.

Vergleichendes Beispiel:

[0116] Das Beispiel drei gleicht dem ersten Beispiel mit Ausnahme darin, dass das Unterstützungsnetz in einen engen Kontakt mit **41** platziert ist, wodurch dieses als Massennetz fungiert, anstelle des Verwendens einer Spannungsbegrenzungseinrichtung. Ein Abstand der Düse zum Netz von 16,83 cm wurde verwendet, wobei die anderen Dimensionen für das Bodenplattensystem gleich waren. Dieselbe Polymerlösung wurde mit der Edelstahlnadel derselben Größe und angelegten Spinnspannung verwendet. Das Elektrosponnen des Filters wurde für ungefähr 35 Minuten durchgeführt. Der resultierende Filter wies einen Druckabfall von 448 Pa auf. Die Partikeleindringung Pt war schwierig zu messen, aber es wurde geschätzt, dass diese kleiner als 5×10^{-7} war, was einen Schätzwert für den FoM von ungefähr 14 kPa⁻¹ ergibt. Obwohl die Filterstruktur, die durch Erden des Netzes ausgebildet wird, nicht für einen hohen FoM-Filter sorgt, stellt diese einen Filter sehr hoher Effizienz (besser als HEPA) für einen Druckabfall bereit, der mit HEPA-Filtern vergleichbar ist.

Filter mit verbesserter Performance

[0117] Die vorliegende Erfindung ermöglicht in einer Ausführungsform Filter, die eine Mehrzahl von Nanofasern angeordnet auf einem Unterstützungsnetz aufweisen, um ein Filtrationsmittel auszubilden, das Gütefaktoren von mehr als 20 kPa⁻¹ für mittlere Faserdurchmesser von Nanofasern kleiner als 200 nm aufweist. Die vorliegende Erfindung ermöglicht in einer Ausführungsform die Realisierung von Filtern, die einen FoM größer als 40 Pa⁻¹ für mittlere Faserdurchmesser von Nanofasern kleiner als 100 nm aufweisen.

[0118] Eine weitere Verbesserung, die hinsichtlich gegenwärtiger Glasfaser-HEPA-Filtermittel erhalten wird, betrifft eine Verringerung des Durchmessers der am meisten eindringenden Partikelgröße. Der tiefste Eindringungspunkt ist der Größenbereich, bei dem der Filter am wenigsten effizient ist (die meisten Partikel gehen hindurch). Für herkömmliche Glasfaser-HEPA-Mittel befindet sich die Größe in dem Bereich von 0,1 bis 0,3 µm, wohingegen für unsere Nanofaserfilter mit einem AFD um 82 nm die Größe der stärksten Eindringung um 0,7 µm beträgt, wie es in [Fig. 7](#) gezeigt ist.

[0119] Die vorliegende Erfindung ist nicht auf eine Größe der stärksten Eindringung von 0,07 µm beschränkt; die Daten zeigen lediglich, dass eine Verbesserung bezüglich des Standes der Technik durch die Lehre dieser Erfindung erhalten wird. Es ist wichtig zu bemerken, dass der gezeigte HEPA-Filter einen Druckabfall von ungefähr 330 Pa (bei 5,3 cm/s Flächengeschwindigkeit) aufweist, wohingegen die Nanofaserfilter einen Druckabfall von ungefähr 48 Pa aufweisen. Ein Nanofaserfilter mit derselben maximalen Partikeleindringung wie der HEPA-Filter würde einen Druckabfall von 86 Pa ohne Änderung hinsichtlich der Partikelgröße der stärksten Eindringung aufweisen.

Überwachen und Rückkopplungssteuerung der Nanofasermatte

[0120] Wie es oben erwähnt ist, haben die Filtermattendicke und die Gleichförmigkeit einen Einfluss auf die Eigenschaften des resultierenden Filters. In [Fig. 1](#) enthält der Schritt **103** eine Steuerung des Elektrosponnprozesses. Eine ungleichmäßige Filtermattendichte erzeugt Flächenbereiche, die mehr als deren Beitrag zum Gasdurchfluss tragen und weniger als die durchschnittliche Filtrationseffizienz aufweisen. Das Überwachen der Nanofasermattendichte, Dicke und Gleichförmigkeit zusammen mit der Filtereffizienz ist unter Verwendung einiger zusätzlicher Innovationen möglich.

[0121] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden Lichtstreutechniken verwendet,

um die Mattendichte und Gleichförmigkeit zu messen. Obwohl der mittlere Faserdurchmesser (AFD) in einigen Ausführungsformen der Erfindung 100 nm oder weniger beträgt, befinden sich einige Fasern im Größenbereich von 200 bis 250 nm. Es wurde nachgewiesen, dass ein roter Laser mit einer Wellenlänge um 650 nm ausreichend Licht von der Matte streut, um Unterschiede in der Mattendicke zu detektieren. Das Streuen einer repräsentativen Population von Fasern ist gegenüber dem Streuen der Gesamtpopulation der Fasern in einigen Ausführungsformen der Erfindung vorteilhaft.

[0122] Allerdings, in dem Fall, in dem Faserdurchmesser und -anzahlen zu klein für einen roten Laser sind, oder mehr Streuinformationen benötigt werden, sind inzwischen Laser mit kürzeren Wellenlängen einfacher erhältlich, wie beispielsweise ein blauer Laser mit 405 nm. Dieser blaue Laser würde eine Beugungsgrenze von ungefähr 101 nm aufweisen, was innerhalb von Ein-Sigma der AFD selbst für die kleinsten Nanofasern ist, die verwendet werden, um Filtermatten zu fertigen. In einer Ausführungsform der Erfindung wird Licht, das von der Fasermatte streut, verwendet, um den Punkt zum Anhalten des Elektrosplinnens zu bestimmen. Andere Ausführungsformen ermöglichen eine „In-Place“ Qualitätssicherheit“ (QA) des Filters und ein Überwachen der Mattengleichförmigkeit.

[0123] In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sind die Laserlichtstreuer und ein automatisiertes System, das die Spinnöse und den Filterrahmen relativ zueinander bewegt, in einem Mikroprozessorsteuersystem verbunden. Die Ablagerung der Fasern wird überwacht und in Echtzeit gesteuert, um eine verbesserte Nanofasermattengleichförmigkeit zu erzielen und die korrekte Mattendicke und -dichte zu erhalten. Andere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung enthalten das Einbeziehen dieses Steuersystems mit einem Echtzeitdruckabfalltest und Aerosoltest (weiter unten diskutiert).

[0124] Eine weitere Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, die sich mit dem Überwachen der Filtereffizienz und dem Bestimmen des Anhaltepunkts oder Durchführens einer „In-Place“ QA befasst, betrifft das Verwenden eines Testaerosols, um die Filterperformance zu messen. Der Auslass **28** in [Fig. 2B](#) kann mit einem Aerosolinstrument **30** verbunden werden, das imstande ist, die Zusammensetzung des Ausgabegases zu analysieren. Das Gas, das in den Einlass **26B** eingebracht wird, kann Testaerosolpartikel enthalten, um die Effizienz des ausgebildeten Filters zu testen. Mit der Anordnung, die in

[0125] [Fig. 2B](#) gezeigt ist, wird die Produktion des Filters, der elektrogesponnene Fasern enthält, hinsichtlich dessen Performance online überwacht, d. h.

durch Analysieren des Betrags der Aerosolpartikel, die durch den Filter entfernt werden, in Echtzeit mit dem Aerosolinstrument **30** während dieser hergestellt wird. Folglich kann in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ein Hersteller einen Schwellwert für den Betrag der Partikel (d. h. als ein Prozentsatz der Partikel), die von dem Filter von der Umgebung entfernt werden sollten, festlegen, und das Elektrosplinnen des Filters wird gestoppt, wenn dieser Schwellwert erzielt wird. Auf diese Weise ist die Herstellung des Filters effizient, in dem Sinne, dass kein Material oder keine Zeit verschwendet wird, um den Filter auszubilden. Diese Echtzeitüberwachung des Herstellungsprozesses des Filters wird den Filter mit den Testpartikeln lediglich minimal verunreinigen.

[0126] In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, betreffend das Testen des sich ausbildenden Filters mit Aerosol, wird eine isokinetische Sonde, die mit dem Aerosolinstrument **30** verbunden ist, über den unteren Flächenbereich des Filters gescannt, folglich wird somit ein lokales Testen des Filters ermöglicht, um Undichtigkeiten oder dünne Flecken zu finden. Eine isokinetische Sonde, wie es im Stand der Technik bekannt ist, umfasst ein Abgleichen der Luftgeschwindigkeit in der Sonde mit der Umgebungsluftgeschwindigkeit, wodurch Abtastfehler, die von der Partikelgröße aus der Partikelträgeit abhängen, minimiert werden. In Situationen, in denen kleine Partikel (beispielsweise kleiner als 200 nm) gemessen werden, sind die Abtastfehler aufgrund der Partikelträgeit gewöhnlich klein und ein anisokinetisches Abtasten (die Durchflussgeschwindigkeiten sind nicht identisch) kann verwendet werden. In einigen Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung könnten anisokinetische Sonden verwendet werden. Ähnlich wie bei der Lichtstreuerausführungsform würde ein Steuersystem die Position der Elektrosplinnöse relativ zur sich ausbildenden Filtermatte basierend auf Testresultaten der Scannsonde/des Aerosolinstruments führen.

Alternative Filtergestalten und Konfigurationen

[0127] Obwohl ursprünglich flache, kreisförmige Filter mit 7,62 cm dargestellt wurden, enthalten andere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung quadratische, rechteckförmige, röhrenförmige und unregelmäßig oder neu gestaltete Filterrahmen verschiedener Größen für einen weiten Bereich von Nanofasermattenanwendungen. Es gibt wenige Beschränkungen hinsichtlich der Größe (Querschnittsflächenbereich) der Filtereinrichtungen, die sich von sehr klein (Nasenlochgröße im Bereich von 1 cm im Durchmesser) bis sehr groß (Bauwerk und Raumreinigungsfiler im Bereich von 2 ft mal 2 ft und größer) erstrecken.

[0128] [Fig. 8](#) zeigt ein weiteres Beispiel der vorlie-

genden Erfindung, in der ein Filter, der eine erweiterte Tiefe aufweist, aus mehreren Nanofaser-/Mattenstapeln ausgebildet ist. Wie es in [Fig. 8](#) gezeigt ist, können mehrere Schichten oder Stufen von elektrogenesponnenen Nanofasermatten **12** auf Mattenunterstützungen **7** (individuell ausgebildet) aufeinander gestapelt sein, um mehrere Stufen der Filtration oder redundante Filtration bereitzustellen. In verwandten Ausführungsformen wird die Polymerzusammensetzung und/oder AFD, die verwendet werden, um jede Stufe des gestapelten Filters zu fertigen, variiert. Eine Beispielverwendung davon enthält eine Variation bezüglich der Filtereffizienz, wobei jede Stufe so ist, dass die erste Stufe ein grober Filter ist und die letzte Stufe hoch effizient ist. In einem weiteren Beispiel dieser Ausführungsformen weisen die Stufen verschiedene Funktionen auf, beispielsweise entfernt die erste Stufe Partikel, während nachfolgende Stufen Fasern mit reaktiven, absorptiven und/oder katalytischen Eigenschaften zum Entfernen oder Neutralisieren toxischer oder gefährlicher Chemikalien (beispielsweise Saringas) enthalten.

[0129] [Fig. 9](#) zeigt eine ähnliche Anordnung wie [Fig. 2A](#), aber die Netzunterstützung **20** weist in dieser Ausführungsform der vorliegenden Erfindung die Gestalt einer Produkteinrichtung auf; wie beispielsweise ein Atemgerät für das Filtrieren inhalierter Luft. Beispielsweise könnte die Netzunterstützung **20** die Gestalt eines Atmungskartuschenfilters (beispielsweise eine „top hat“-Gestalt) gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung aufweisen. Eine Mehrzahl von Formen bzw. Gestalten kann vorgesehen sein, die aufgrund der Fähigkeit der elektrogenesponnenen Nanofasermatte, mit dem verwendeten Unterstützungsnetz überein zu stimmen, hergestellt werden können. Für die Ausführungsform zum Herstellen gestalteter Filtermatten werden das Netz und der Emitter relativ zueinander in der X-, Y- und Z-Richtung zusätzlich zur Drehung und zum Kippen bewegt (beispielsweise Platzen des Netzes und Filterhaltersystems auf einer kardanischen Aufhängung).

[0130] Der Hochdruckabfall des herkömmlichen Mittels wird typischerweise durch Vergrößern des Oberflächenbereichs des Filtermittels abgeschwächt, der in einem bestimmten Querschnittsbereich einer Filtereinrichtung vorliegt. Das Mittel wird plissiert, um einen Filter mit erweitertem Flächenbereich zu erhalten. Mit der vorliegenden Erfindung ist eine Anzahl von Ansätzen zum Herstellen von Filtern mit erweiterten Flächenbereichen möglich. In einer Ausführungsform der Erfindung zum Herstellen von Filtern mit erweitertem Flächenbereich wird ein Nanofaserfiltermittel auf einem Unterstützungsnetz hergestellt, und anschließend werden die Nanofasermatten/-netze in „V“-Strukturen zusammengefügt. In noch einer weiteren Ausführungsform wird eine Struktur eines erweiterten Flächenbereichs durch das Unterstützungs-

netz ausgebildet, und die Nanofasern werden anschließend direkt auf die Struktur des erweiterten Flächenbereichs gesponnen.

[0131] Ein Filter, der aus mehreren Zellen aufgebaut ist, wobei die Fasern in jede Zelle elektrogenesponnen werden, wie es in den [Fig. 10](#), [Fig. 11](#) und [Fig. 12](#) gezeigt ist, ist noch eine weitere Ausführungsform, die zur Herstellung von Filtern mit erweitertem Flächenbereich gehört. Wie es in [Fig. 10B](#) in einer Seitenansicht gezeigt ist, definiert das Netz **307** Zellen **322**, in denen Nanofasern einfach elektrogenesponnen werden können.

[0132] [Fig. 11](#) zeigt den Rahmen **6** der [Fig. 10A](#) bis [Fig. 10B](#), platziert in dem Gehäuse **1**. [Fig. 11](#) zeigt ferner schematisch ein Steuersystem zum Betreiben eines Elektrospinnsystems der vorliegenden Erfindung. Genauer gesagt empfängt eine Steuereinheit (nicht gezeigt) eine Eingabe von verschiedenen Testeinrichtungen, wie beispielsweise einem Partikeldetektor **30** und einem Differentialdruckmanometer **32**, um die Verschiebung des Emitters **302** in der seitlichen Richtung oberhalb eines Kollektors der elektrogenesponnenen Fasern zu steuern und/oder den Zeitbeitrag zu steuern, den der Emitter **302** in jeder Zelle **307** verbleibt. Das Gehäuse **1** nimmt ferner den Emitter **302** auf, der eine ähnliche Funktion aber eine andere Gestalt als der Emitter **2** von [Fig. 2A](#) aufweist. Obwohl es in [Fig. 10](#) zum Zweck einer vollständigeren Erläuterung dargestellt ist, kann die Steuereinheit **10** verwendet werden, um beispielsweise die laterale und/oder vertikale Position des Emitters **2** in [Fig. 2A](#) zu steuern.

[0133] Der Emitter **302** kann beispielsweise der Drehkopf sein, der in der US-Anmeldung Seriennummer 10/819,916 offenbart ist, wobei die gesamten Inhalte davon hierin durch Bezugnahme einbezogen sind. Alternativ könnte der Emitter mehrere Düsen aufweisen, die Fasern in allen Richtungen bereitstellen; oder eine Kombination von Dreh- und mehreren Düsen wird verwendet. Der Emitter **302** kann im Stande sein (i) sich zu drehen, wie es mit einem Pfeil A gezeigt ist und (ii) sich entlang der Richtung B zu bewegen. Ferner ist der Emitter **302** im Stande, sich entlang einer vertikalen Richtung in dem Gehäuse **1** zu bewegen. Der Emitter **302** ist mit der Spannungszufuhr **5** verbunden, und der Rahmen **6** ist optional mit der Masse verbunden.

[0134] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist der Drehemitter **302** in jeder Zelle **322** eingebracht, um die Fasern **312** auf das Netz **307** elektrozuspinnen. Nachdem die Fasern **312** auf einer Zelle ausgebildet sind, bewegt sich der Emitter **302** zur nächsten Zelle mit Hilfe eines Bewegungsmechanismus (nicht gezeigt). Diese Bewegung kann automatisch von einem Mikroprozessor gesteuert werden. Das Netz **307** kann elektrisch leitfähig sein. Die

Zellen können einen Boden aufweisen, der aus einer Lage eines Drahtnetzes ausgebildet ist. Der Rahmen **6** kann bezüglich Luft undurchlässig sein und kann beispielsweise aus Holz, Metall oder Kunststoff beispielsweise sein. Bereiche des Rahmens und Netzes können mit einem Haftvermittler beschichtet sein, wie es von dem Fachmann verstanden wird, um die Bindung der elektrogenen Fasern hinzuzufügen. Eine Mehrzahl von Emitter **302** kann verwendet werden, um den Durchsatz zu verbessern. Eine Fläche des Filters kann ein Gitter von kreisförmigen, röhrenförmigen Aussparungen enthalten, die mit Fasern oder Nanofasern gesponnen sind.

[0135] [Fig. 12](#) zeigt eine einzelne Zelle **322**, in der ein Elektrospinnelement **302** eingebracht ist. Einige der Fasern **312** werden die Seitenwand des Netzes **7** nicht erreichen, aber werden eine Schicht von Fasern ausbilden, die den Boden der Zelle **322** ausbilden wird. Derselbe Prozess kann im oberen Bereich der Zelle **322** stattfinden, wodurch eine geschlossene Aussparung von Fasern **312** ausgebildet wird. In einigen Fällen kann ein sich nicht drehender Emitter für den Boden der Zellen benötigt werden.

Zusetzen des Filters

[0136] Auf dem Gebiet der Filtration besteht ein allgemeines Problem darin, dass sich Filter mit Staub zusetzen oder verschmutzt werden, was einen zu groß werdenden Druckabfall über den Filter zur Folge hat. Der Filter muss dann ersetzt oder gereinigt werden. Einige Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung berücksichtigen dieses Problem durch Bereitstellen eines Vorfilters für Staub.

[0137] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung (vergleiche [Fig. 13](#)) kann ein Vorfilter, der aus einem herkömmlichen Mittel **210** aufgebaut ist, vor den elektrogenen Fasern **12** in einer Richtung des Luftstroms angeordnet sein. Das herkömmliche Mittel stellt eine erste Schicht des groben Filters bereit, zum Entfernen von Staub und großen Partikeln oder potenziellen Verschmutzungen, während das auf Nanofaser basierende Mittel eine Hocheffizienzfiltration bereitstellt (sorgfältiges Entfernen von Partikeln kleinerer Größe). Beispielsweise ist ein grober Staubfilter mit Schnappverschluss vor dem Nanofaserfilter angeordnet; wenn der grobe Filter mit großen Partikeln zugesetzt ist, ist es einfacher, diesen zu ersetzen, während der Nanofaserfilter kontinuierlich eine Hocheffizienzfiltration von kleinen Partikeln bereitstellt. Dieser Anordnung würde die Lebensdauer des Nanofaserfilters vergrößern und ein Filtrationssystem mit hohem FoM bereitstellen.

Verschieden Verfahren der vorliegenden Erfindung

[0138] Zurückkommend auf eine allgemeine Diskussion der Prozesse in [Fig. 1A](#), stellt [Fig. 1A](#) ein

Verfahren gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zum Ausbilden einer Fasermatte dar. Bei **100** ist eine Unterstützung, welche Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist, vorgesehen. Bei **102** sind Fasern über eine Gesamtheit der makroskopischen Öffnungen elektrogenen, um eine Mehrzahl von Schichten auszubilden, die ein Filtrationsmittel bereitstellen, in dem Partikel, welche in die Schichten eindringen, von dem Fluidfluss gefiltert werden. Nanofasern, welche einen mittleren Faserdurchmesser von weniger als 200 nm aufweisen, wie es in [Fig. 1A](#) und [Fig. 4](#) gezeigt ist, sind besonders für eine Filtration mit hohem FoM geeignet. In einer besonderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird bei **102** ein elektrisches Feld an dem Kollektor wenigstens einmal während des Elektrosinnens der Fasern gepulst, um Ladungen, die sich an den elektrogenen Fasern angesammelt haben, zu entladen. Die Pulsierung kann von einer der oben beschriebenen Spannungsentladungseinrichtungen kommen oder kann extern angelegt werden. Beispielsweise kann in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung eine sich zeitlich ändernde Wellenform (ähnlich der, die in [Fig. 6](#) gezeigt ist) an die Unterstüttung angelegt werden. Wellenformen, wie beispielsweise Rechteckwellen und Sägezahnwellen sind für die vorliegende Erfindung auch geeignet.

[0139] Bei **100** kann die Unterstüttung ein leitfähiges Netz sein. Ein Haftvermittler kann an einem Umfang der Unterstüttung aufgebracht sein, um den Umfang von einem Umgehen des Filters durch Partikel abzudichten. Das leitfähige Netz kann behandelt werden und beschichtete werden, um eine Haftung von Nanofasern an dem Netz zu unterstützen. Die Unterstüttung ist in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung in den Filter eingebaut.

[0140] Beispielsweise kann ein Filtrationsmittel der vorliegenden Erfindung eine Anzahl von Unterstüttungsmitteln enthalten, die von festen Strukturen mit makroskopischen Öffnungen bis zu einem Hocheffizienzpartikelluftfiltermittel (HEPA) reichen. Beispielsweise erlaubt die vorliegende Erfindung in einer Ausführungsform die Ausbildung eines Hochperformanzfilters durch Elektrosinnen von Nanofasern direkt auf ein vorhandenes Niedrigeffizienzmittel, wie beispielsweise bei einem herkömmlichen Wohn- und Geschäftsgebäudefilter, das einen minimalen Effizienzberichtswert (MERV) im Bereich von 3–12 aufweist.

[0141] MERV-Beurteilungen werden für allgemeinen Ventilationsfilter bestimmt, wie sie in ASHRAE Standard 52.2 (1999) beschrieben sind. Ein Kaliumchloridaerosol-(KCL)-Test wird verwendet, um eine von der Partikelgröße abhängige Effizienz über einen weiten Bereich von Partikeldurchmessern zu erhalten. Druckabfall und Filtereffizienz sind zwei Haupt-

kriterien beim Testen eines Filters. Die Bestimmung eines Druckabfalls ist eine Funktion der Gasdurchflussrate, während die Messung der Filtereffizienz bei der beurteilten Durchflussrate eine Funktion des Partikeldurchmessers von 0,3 bis 10 µm ist. Die anfängliche Effizienz wird als eine Funktion des Partikeldurchmessers mit dem KCL-Aerosol und einem optischen Partikelzähler bestimmt. Die Effizienz mit den folgenden Schritten bestimmt. Die Effizienz des sauberen Filters wird gemessen. Anschließend wird ein Aufbereitungsschritt mit ASHRAE-Staub ausgeführt, um bei permanent geladenen Filtern eine atmosphärische Partikelbelastung und die resultierende Verringerung der Effizienz zu simulieren. Die Messungen der Effizienz als eine Funktion des Partikeldurchmessers mit KCL-Aerosol und OPC(s) wird wiederholt. Der Filter wird anschließend mit ASHRAE-Staub in vier verschiedenen Schrittweiten zugesetzt, gefolgt von Messungen einer Effizienz als eine Funktion des Partikeldurchmessers unter Verwendung des KCL-Aerosols. Die Endzusatzung mit Staub wird den Druckabfall in dem Filter veranlassen, mit dem vom Hersteller genannten Druckabfallgrenzwert überein zu stimmen. Der minimale Effizienzberichtswert (MERV) wird durch zunächst Berechnen des Durchschnitts der minimalen Effizienz, die in den drei Partikelgrößenbereichen 0,3 bis 1, 1,0 bis 3,0 und 3,0 bis 10,0 µm beobachtet werden, bestimmt. Eine Standardtabelle in ASHRAE (1999) wird verwendet, um den MERV nachzuschlagen, der den minimalen Effizienzen bzw. Nutzgraden entspricht.

[0142] In anderen Anwendungen der vorliegenden Erfindung würden die Nanofasern auf die Filtermittel elektrogesponnen werden, die bei der Herstellung von plissierten Filtern und anderen technischen Filtereinheiten verwendet werden. Ein solcher Ansatz würde beispielsweise ein praktischer Weg sein, um einen verbesserten Filter auszubilden, in dem die Nanofaser beschichteten Filtermittel anschließend plissiert und in einer herkömmlich gestaltete HEPA-Filtereinheit für eine Installation in Standardluftanwendungen ausgebildet werden. In einem weiteren Beispiel könnten die HEPA-Mittel mit Nanofasern beschichtet werden, um Filter mit vorher nicht erreichbaren Wirkungsgraden bzw. Effizienzen (> 99,9999%) mit lenkbaren Druckabfällen herzustellen.

[0143] In einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung kann die Unterstützung zum Ablagern der Fasermatten der vorliegenden Erfindung von der abgelagerten Fasermatte entfernt oder aufgelöst werden, wodurch ermöglicht wird, dass die Fasermatte zu einem weiteren Filtrationsmittel, wie beispielsweise einem herkömmlichen Filtermittel, einem Plastikschaum, einem Metallschaum, einem Halbleiterschäum, einem gewebten Material, einem nichtgewebten Material, einer Kunststoffabschirmung und einem Hocheffizienzpartikelluft(HEPA)-Filter übertragen werden kann.

[0144] Das Netz ist typischerweise leitfähig, könnte aber isolierend sein, wenn dieses in Verbindung mit einem leitfähigen Rahmen während des Elektrospinnens verwendet wird. Die Unterstützung kann eine konisch gestaltete Unterstützung, eine kreisförmig gestaltete Unterstützung, eine ebenförmige Unterstützung, eine kugelförmige Unterstützung oder eine zylindrisch gestaltete Unterstützung aufweisen. Die Unterstützung kann als eine Form so gestaltet sein, um beispielsweise mit einer Atemgerätkartusche zusammenzupassen. Die Unterstützung kann mehrere zellförmige Rahmen enthalten, die benachbart zueinander angeordnet sind. Beispielsweise stellt das Elektrospinnen in jedem Rahmen einen Mechanismus des Erhaltens eines größeren Flächenbereichs-filters mit geeignetem Partikeleinschluss und Filtration in jedem Rahmen bereit.

[0145] Bei **102** kann das Elektrospinnen Nanofaserschichten mit entsprechenden Nanofasern in einer Schicht ausbilden, die integral an anderen Nanofasern in einer benachbarten Schicht angebracht sind. Das Elektrospinnen kann eine Lösung elektrospinnen, welche ein Polymer enthält, das in der Lösung aufgelöst ist, beispielsweise mit einer Konzentration von 1 bis 50 Gew.-% in der Lösung in einigen Ausführungsformen und 17 bis 30 Gew.-% in der Lösung in anderen Ausführungsformen. Das Elektrospinnen kann ferner mit geschmolzenen Polymeren durchgeführt werden. Das Polymer kann ein molekulares Gewicht von 20.000 bis 2.000.000 g/mol aufweisen. Alternative Polymerkonzentrationen und Polymergewichte können mit geeigneten Lösungsmitteln gemischt werden und für den Elektrospinnprozess verwendet werden.

[0146] Die elektrogesponnenen Nanofasern können einen mittleren Faserndurchmesser von weniger als 500 nm oder weniger als 200 nm oder weniger als 100 nm in Abhängigkeit der angewendeten spezifischen Elektrospinnbedingungen, wie es oben gezeigt ist, aufweisen. Das Elektrospinnen kann zunächst Nanofasern elektrospinnen, welche einen ersten mittleren Faserndurchmesser aufweisen; und danach auf die ersten Nanofasern zweite Nanofasern elektrospinnen, welche einen zweiten mittleren Faserndurchmesser aufweisen, der kleiner als der erste mittlere Durchmesser ist. Auf diese Weise wird ein stufenweise feineres Netz der Nanofaserfiltermatte erhalten. Das Elektrospinnen kann erste Nanofasern elektrospinnen, welche einen ersten mittleren Faserndurchmesser aufweisen; und danach auf die ersten Nanofasern zweite Nanofasern elektrospinnen, welche einen zweiten mittleren Faserndurchmesser aufweisen, der größer als der erste mittlere Durchmesser ist. Auf diese Weise kann ein stufenweise größeres Netz der Nanofaserfiltermatte erhalten werden. Bei **102** kann das Elektrospinnen zwischen 4 bis 4000 (oder 10 bis 100) Schichten von Nanofasern ausbilden.

[0147] Ferner kann die resultierende Fasermatte (mit oder ohne die Unterstützung) mit einem Filtrationsmittel bereitgestellt werden, das benachbart zur Fasermatte oder der Unterstützung angeordnet ist. Die Basisfiltration stellt eine grobe Filtration von Partikeln bereit (beispielsweise Filtration von Partikeln größer als 1 Mikron). Alternativ kann das Verfahren mehrere der Unterstützungen zusammenfügen, wobei entsprechende der Unterstützungen die Nanofaserschichten enthalten, wodurch eine mehrstufige Filtration bereitgestellt wird.

[0148] Bei **102** kann eine gesteuerte Atmosphäre für das Elektrospinnen durch Steuern einer Feuchte oder einer Lösungsmittelkonzentration in der Atmosphäre bereitgestellt werden. Die Feuchte kann auf eine relative Feuchte kleiner als 100% oder in einigen Ausführungsformen zwischen 5% und 65% oder in anderen Ausführungsformen zwischen 15 und 40% gesteuert werden. Die Lösungsmittelkonzentration kann kleiner als ein Sättigungsbetrag bezüglich einer relativen Konzentration (beispielsweise Partialdruck) zwischen 10 und 80% der Atmosphäre in dem Gehäuse und spezieller zwischen 20 und 45% gesteuert werden. Bei **102** kann das Elektrospinnen eine pH sensitive Polymersubstanz elektrospinnen, wodurch in einigen Fällen die Auflösung der elektrogesponnenen Fasern nach dem Partikeleinschluss ermöglicht wird. Bei **102** kann das Elektrospinnen eine thermisch sensitive Polymersubstanz oder eine Enzym-sensitive-Polymersubstanz elektrospinnen, wodurch in einigen Fällen auch die Auflösung der elektrogesponnenen Fasern nach dem Partikeleinschluss ermöglicht wird.

[0149] Bei **102** kann das Elektrospinnen ein Additiv, das wenigstens entweder ein Salz oder ein Tensid enthält, zu einer Substanz bereitstellen, die elektrospinnen ist. Das Additiv kann mit einer Konzentration von 0,01 bis 10% oder mehr und in verschiedenen Ausführungsformen mit einer Konzentration von 0,06 bis 0,2 Gew.-% zugeführt werden. Bei **102** wird die Gleichförmigkeit der Faserablagerung durch allgemeines Bewegen des Elektrospinnenelements (d. h. Spindüse) und der Unterstützung relativ zueinander verbessert.

[0150] Bei **103** kann das Elektrospinnen einen Betrag von Gas oder Aerosol detektieren, das durch einen Abschnitt des zu testenden Filters tritt, und das Elektrospinnenelement versetzen oder eine relative Bewegung zwischen dem Elektrospinnenelement und dem Kollektor bereitstellen, als Antwort auf ein Resultat der Detektion. Die oben erwähnten Lichtstreuungstechniken können auch für die Detektion der Mattengleichförmigkeit verwendet werden.

[0151] Ferner kann die dynamische Elektrospinnentechnik, die hierin für das Elektrospinnen von Nanofasern dargestellt ist, für das Elektrospinnen von Fa-

sern und für Elektrosprays von Flüssigkeiten (d. h. Herausgezogen durch ein elektrisches Feld) verwendet werden, um Tröpfchen, Feststoffe aus festen Partikeln und/oder ionisierte Komponenten aus der von dem elektrischen Feld extrahierten Substanz verwendet werden.

Andere Anwendungsbereiche

[0152] Die resultierende Nanofasermatte, die von einem oder allen oben beschriebenen Verfahren hergestellt wird, kann von der Unterstützung für andere Filter und nicht Filteranwendungen entfernt werden. Beispielsweise kann die Mehrzahl von Nanofaserschichten von der Unterstützung entfernt werden; und danach an ein herkömmliches Filtermittel, einen Kunststoffschaum, einen Metallschaum, einen Halbleiterschäum, ein gewobenes Material, ein nichtgewobenes Material, eine Kunststoffabschirmung und einen Hocheffizienzpartikelluft (HEPA)-Filter angebracht werden. Alternativ kann die entfernte Nanofasermatte in Bereichen verwendet werden, wo Nanofasermaterialien vorher angewendet wurden, wie beispielsweise Katalyse, Batterietrenner und Wundverbände, Unterstützungen für das Zellwachstum und Gassensoren, um einige zu nennen.

[0153] Die Anwendungen der Nanofasermattenmaterialien der vorliegenden Erfindung würde Techniken gleich denen, wie es in den Referenzen unten beschrieben ist, folgen, aber würde die Elektrospinnentechniken verwenden, die hierin offenbart sind, um die Fasermatten der vorliegenden Erfindung herzustellen.

[0154] Verschieden Beispiele dieser Nicht-Filteranwendungen sind unten gegeben.

[0155] In katalytischen Anwendungen würden die Nanofasermattenmaterialien der vorliegenden Erfindung unter Verwendung von Polymeren elektrospinnen, die katalytische Metallpartikel (beispielsweise Nanopartikelmetall und Metalloxidnanopartikel) enthalten, welche die Mechanismen für die Katalyse bereitstellen würden, vergleichbar damit, wie es beispielsweise von Demir, M. M., M. A. Gulgun, et al., „Palladium nanoparticles by electrospinning from poly(acrylonitrile-co-acrylic acid)-PdCl₂ solutions. Relations between preparation conditions, particle size, and catalytic activity“ beschrieben ist, was bereits hierin durch Bezugnahme einbezogen ist. Ferner, wie es in der US-Seriennummer 11/130,269 beschrieben ist, können diese Nanopartikel in die Fasern der Fasermatte während des Elektrospinnens eingebaut werden. Alternativ könnten diese Partikel zu Fasern (die beim Elektrospinnen keine Partikel enthalten) während der Ausbildung der Fasermatte hinzugefügt werden oder nach der Ausbildung der Fasermatte hinzugefügt werden.

[0156] In einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung können Partikel zu den Fasermatten nach dem Elektrospinnen hinzugefügt werden. In dieser Ausführungsform wird eine Lösung, welche die Partikel enthält, bereitgestellt und die Nanofasermatte wird in die Lösung eingetaucht. Die Lösung wird so ausgewählt, dass die Nanofasermatte sich nicht auflöst, aber die Polymere, welche in der Nanofasermatte vorhanden sind, etwas aufquillt. Diese Erweiterung der Fasern in dem Netzwerk erweitert die Räume zwischen den Fasern, wodurch die Netzwerkräume geöffnet werden, um den Partikeln zu ermöglichen, sich dazwischen zu bewegen. Folglich bewegen sich die Partikel zur Faseroberfläche aufgrund der Brownschen Bewegung. Die Fasermatte kann in die Lösung für einen Zeitraum von 10 Minuten bis 72 Stunden eingetaucht werden und kann mit einem konstanten Lösungsmitteldurchfluss für 20 bis 30 Sekunden gespült werden, um die Entfernung von irgendwelchen lose angebrachten Oberflächenpartikeln zu gewährleisten. Die Fasermatte kann anschließend auf einer Unterstützung platziert werden und dieser kann ermöglicht werden, vollständig vor der Verwendung zu trocknen.

[0157] Infolge des kleinen Durchmessers der Nanofasern und des niedrigen Widerstands hinsichtlich des Fluidflusses stellen die Nanofasermatten der vorliegenden Erfindung Vorteile bezüglich traditioneller Katalysatormittel und auf Nanofaser basierenden Katalysatormaterialien, die oben beschrieben sind, darin bereit, dass der verfügbare Oberflächenbereich der katalytischen Reaktionen gegenüber dem Stand der Technik vergrößert werden kann. Die Einlagerung von Nanopartikelmetall und Metalloxidnanopartikeln in die Nanofaser kann ein wertvolles katalytisches Material für industrielle und biologische Prozesse ergeben.

[0158] Gleichermaßen würden in Batterietrenneranwendungen Nanofasermaterialien der vorliegenden Erfindung unter Verwendung von Polymeren elektrogesponnen werden, die mit den Batterielösungen nicht reaktiv sein würden. Aufgrund des kleinen Durchmessers der Nanofasern und des niedrigen Widerstands bezüglich des Fluidflusses stellen die Nanofasermatten Vorteile relativ zu herkömmlichen Batterietrennermaterialien und auf Nanofaser basierenden Batterietrennermaterialien des Stands der Technik, vergleichbar damit, wie es beispielsweise von Choi, S. W., S. M. Jo, et al., „An electrospun poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membrane and its battery applications“ beschrieben ist, was bereits hierin durch Bezugnahme einbezogen ist, darin bereit, dass Lösungen für elektrolytische Reaktionen einfacher von der Anode zur Kathode über die Fasermatten der vorliegenden Erfindung übertragen werden können.

[0159] Gleichermaßen würden in Wundverbänden die Nanofasermattenmaterialien der vorliegenden Er-

findung unter Verwendung von biokompatiblen oder biologisch abbaubaren Polymeren elektrogesponnen werden, um Nanofasermatten bereitzustellen, welche einen freien Austausch von Gasen ermöglichen. Ferner können, vergleichbar damit, wie es beispielsweise von Katti, D. S., K. W. Robinson, et al. „Bioresorbable nanofiber-based systems for wound healing and drug delivery: Optimization of fabrication parameters“ beschrieben ist, was bereits hierin durch Bezugnahme einbezogen ist, Nanofasermatten den Zugang von Mikroben in die Wundoberfläche hemmen. Die Fasermatten der vorliegenden Erfindung können folglich als effektive Wundverbände verwendet werden, im Besonderen wenn eine Funktionalität, wie beispielsweise Hämostase und kontrollierte Arzneimittelzufuhr in die Struktur eingebaut ist. Ferner, wie es in der US-Seriennummer 11/130,269 beschrieben ist, können Nanopartikel in die Fasern der Fasermatte während der Fasermattenausbildung oder nach der Fasermattenausbildung, wie es oben beschrieben ist, eingebracht werden. Solche Nanopartikel können Arzneipartikel sein, die ausgestaltet sind, um ein Arzneimittel frei zu setzen, wenn die Fasermatte sich mit die Zeit auflöst.

[0160] Gleichermaßen würden bei der Grundlage der Gewebezüchtung die Nanofasermattenmaterialien der vorliegenden Erfindung elektrogesponnen werden, unter Verwendung von biologisch abbaubaren Polymeren, um Nanofasermatten bereitzustellen, die verwendet werden würden, um Zellen in der Struktur zu kultivieren, vergleichbar damit, wie es beispielsweise von Murugan, R. and S. Ramakrishna, „Nano-featured scaffolds for tissue engineering: A review of spinning methodologies“ beschrieben ist, was bereits hierin durch Bezugnahme einbezogen ist. Sobald sich die Zellen vermehrt haben, würde die Fasermattengrundlage chirurgisch in den Körper implantiert werden. Der große Oberflächenbereich der Nanofasern unterstützt die Zellanbringung und die hohe Porosität der Konstruktion ermöglicht den Austausch von Gasen und Nährstoffen.

[0161] Gleichermaßen würden in Anwendungen zur Zufuhr von Arzneimitteln oder bioaktiven Materialien die Nanofasermattenmaterialien der vorliegenden Erfindung unter Verwendung von wasserlöslichen Polymeren elektrogesponnen, um Nanofasermatten bereitzustellen, welche die oben erwähnten Partikel enthalten (jetzt enthalten diese mehr im Allgemeinen bioaktive Substanzen), würden verwendet werden, um eine kontrollierte Zufuhr von bioaktiven Substanzen zu unterstützen, vergleichbar damit, wie es beispielsweise von Jia, H. F., G. Y. Zhu, et al., „Enzyme-carrying polymeric nanofibers prepared via electrospinning for use as unique biocatalysts“ beschrieben ist, was hierin bereits durch Bezugnahme einbezogen ist. Medikamente, im Besonderen solche, die in Wasser schwerlöslich sind, können unter Verwendung von Nanofasereinrichtungen zugeführt werden.

Die Arzneimittelkomponente löst sich entweder auf oder ist als feine Teilchen bzw. Partikel in der Polymernanofasermatrix verteilt. Unter physiologischen Bedingungen wird das bioaktive Mittel entweder diffusiv oder über biologisches Abbauen der Nanofasermatrix, wie es in mehreren Referenzen aus dem Stand der Technik beschrieben ist, freigesetzt.

[0162] Ferner, wie es in der US-Seriennummer 11/130,269 beschrieben ist, können bioaktive Nanopartikelmaterialien in die Fasern der Fasermatte während der Fasermattenausbildung eingebaut werden, oder nach der Fasermattenausbildung, wie es oben beschrieben ist. Solche Nanopartikel können Arzneipartikel sein, die designed sind, ein Arzneimittel freizusetzen, wenn sich die Fasermatte im Verlauf der Zeit auflöst.

[0163] Gleichermaßen würden in auf Nanofaser basierenden Verbundanwendungen die Nanofasermattenmaterialien der vorliegenden Erfindung unter Verwendung von Polymeren elektrogenesponnen, wie beispielsweise solche, die oben beschrieben wurden, die Kohlenstoff enthalten würden, und anorganische Nanofasern können als Verstärkungseinlagen in Kunststoffrezepturen verwendet werden, um die Festigkeit und Haltbarkeit zu verbessern, vergleichbar damit, wie es beispielsweise von Chronakis, I. S. (2005), „Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process – A review.“ beschrieben ist, was bereits hierin durch Bezugnahme einbezogen ist.

[0164] Gleichermaßen würden in anti-bakteriellen Nanofasermattenanwendungen die Nanofasermattenmaterialien der vorliegenden Erfindung unter Verwendung von Polymeren elektrogenesponnen, wie beispielsweise solche, die oben beschrieben sind, die zusätzlich photokatalytische Komponenten, wie beispielsweise Titan, enthalten würden, vergleichbar damit, wie es beispielsweise von Kenawy, E. R. and Y. R. Abdel-Fattah, „Antimicrobial properties of modified and electrospun poly(vinyl Phenol)“ beschrieben wurde, was hierin bereits durch Bezugnahme einbezogen ist. Partikel der photokatalytischen Komponenten könnten, wie es oben diskutiert ist, durch Hinzufügen von Partikeln dieser photokatalytischen Komponenten während der Ausbildung der Fasermatte oder nach der Ausbildung der Fasermatte eingefügt werden. Das Aussetzen der Fasermatte dem Licht in dieser Anwendung erzeugt Arten freier Radikale, die biozid sind.

[0165] Dasselbe kann durch Dispersion von Nanopartikeln erzielt werden, wie beispielsweise solche aus Silber in den Nanofasern. In dieser Anwendung würden die elektrogenesponnen Fasern im Wesentlichen lichttransparent sein, wodurch die Produktion von freien Radikalen selbst im Innenbereich der Fasermatte ermöglicht wird.

[0166] Gleichermaßen würden in Textilanwendungen elektrogenesponnene Nanofasern, die durch diese Technik gefertigt sind, auf herkömmlichen Textilstoffen abgelagert werden oder als eine Komponente in einem mehrschichtigen Stoffaufbau eingebaut werden. Das Einlegen einer Nanofasermatte in ein Textil als ein Element wird die Partikelfiltrationseffizienz des Textilmaterials verbessern. Die Nanofaserschicht würde nicht nur als die effektivste Filterschicht in einem solchen Aufbau dienen, sondern würde auch die Belüftungsfähigkeit des Materials nicht beeinflussen, da Nanofasermatten den Transport von Luft und Feuchte durch das Textil erlauben. Dieser Anwendungsbereich ist nicht nur von einem Umweltstandpunkt des Schützens von Individuen vor dem Aussetzen von Haut bezüglich Partikeln, enthaltend Nanopartikel, interessant, sondern auch in militärischen Anwendungen, wo das Aussetzen der Haut bezüglich Partikeln, welche biologisch aktive Materialien oder chemische Mittel tragen, gesteuert werden muss.

[0167] Gleichermaßen würden in Sensoranwendungen die Nanofasermattenmaterialien der vorliegenden Erfindung unter Verwendung von Polymeren elektrogenesponnen, wie beispielsweise diese, die oben beschrieben wurden, die Nanofasern eines großen Oberflächenbereichs bereitstellen, die in Gas-sensoranwendungen zu verwenden sind, vergleichbar damit, wie es von Aussawasathien, D. J. H. Dong, et al. (2005). „Electrospun polymer nanofiber sensors“ beschrieben ist, was bereits hierin durch Bezugnahme einbezogen ist.

[0168] In diesen Nicht-Filteranwendungen werden die Filtermatten an einer Unterstützung angebracht oder sind davon lösbar. Wie bei den Filteranwendungen kann die Unterstützung die Unterstützung sein, die für die Herstellung der Fasermatte verwendet wird, oder kann eine lösbare Unterstützung sein, die beispielsweise in den Wundverbandanwendungen die Entfernung der Unterstützung von den verletzten Stellen ermöglicht.

[0169] Verschiedene Modifikationen und Variationen der vorliegenden Erfindung sind im Licht der obigen Lehren möglich. Es versteht sich folglich, dass im Gegenstand der beigefügten Ansprüche, die Erfindung anders ausgeführt werden kann, als es speziell hierin beschrieben ist.

Zusammenfassung

[0170] Eine Filtrationseinrichtung, die ein Filtrationsmittel enthält, das eine Mehrzahl von Nanofasern von Durchmessern kleiner als ein 1 Mikron aufweist, die in Anwesenheit eines sich abrupt ändernden elektrischen Felds in eine Fasermatte ausgebildet werden. Die Filtrationseinrichtung enthält eine Unterstützung, die an dem Filtrationsmittel angebracht ist und Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist.

Eine Einrichtung zum Herstellen eines Filtermaterials. Die Einrichtung enthält ein Elektrospinnenelement, das aufgebaut ist, um eine Mehrzahl von Fasern von einer Spitze des Elektrospinnenelements elektrozuspinnen, einen Kollektor, der dem Elektrospinnenelement gegenüberliegt, der aufgebaut ist, um elektrogenesponnene Fasern auf einer Oberfläche des Kollektors anzusammeln, und eine Modulationseinrichtung des elektrischen Felds, die aufgebaut ist, um ein elektrisches Feld an dem Kollektor wenigstens einmal während des Elektrospinnens der Fasern abrupt zu ändern. Ein Verfahren zum Herstellen eines Filtermaterials. Das Verfahren stellt eine Unterstützung bereit, die Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist, wobei Nanofasern über eine Gesamtheit der Öffnungen elektrogenesponnen werden und ein elektrisches Feld an dem Kollektor wenigstens einmal während des Elektrospinnens der Fasern abrupt geändert wird.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 7008465 [0007]
- US 6994742 [0007]
- US 6974490 [0007]
- US 6955775 [0007]
- US 6924028 [0007]
- US 6875256 [0007]
- US 6875249 [0007]
- US 6800117 [0007]
- US 6746517 [0007]
- US 6743273 [0007]
- US 6740142 [0007]
- US 6716274 [0007]
- US 6673136 [0007]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- ASHRAE (1999) Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size, Standard 52.2-1999. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 1791 Tullie Circle, N. E. Atlanta, USA [0012]
- Ahn, Y. C., S. K. Park, et al. (2005). "Development of high efficiency nanofilters made of nanofibers." Current Applied Physics: In press (accessed online) [0012]
- Dhaniyala, S. and B. Y. H. Liu (1999a). "Investigations of Particle Penetration in fibrous filters part I. Experimental." Journal of the ISST 42(1): 32-40 [0012]
- Dhaniyala, S. and B. Y. H. Liu (1999b). "Investigations of Particle Penetration in fibrous filters Part II. Theoretical." Journal of the ISST 42(2): 40-46 [0012]
- Rinds, W. C. (1982). Aerosol Technology. New York, John Wiley & Sons, Inc [0012]
- ISST (1992) Institute of Environmental Sciences, Testing ULPA Filters. ISST RP-CC 007.1 Institute of Environmental Science and Technology, Rolling Meadows, USA [0012]
- ISST (1995) Institute of Environmental Sciences and Technology (1995) Testing HEPA and ULPA Filter Media, IEST-RP-CC021.1, Rolling Meadows, IL [0012]
- MIL-STD-282, Filter units, Protective Clothing, Gasmask Components and Related Products: Performance Test Methods, US Government Printing Office, May 28, 1956 [0012]

- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Particulate Filter Penetration Procedure to Test Negative Pressure Respirators against Liquid Particulates (Procedure APRS-STP-0051-00) Morgantown, WV: NIOSH Division of Safety Research, 1955 [0012]
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Particulate Filter Penetration Procedure to Test Negative Pressure Respirators against Solid Particulates (Procedure APRS-STP-0057-00) Morgantown, WV: NIOSH Division of Safety Research, 1955 [0012]
- Park, H. S. and Y. O. Park (2005). "Filtration properties of electrospun ultrafine fiber webs." Korean Journal of Chemical Engineering 22(1): 165-172 [0012]
- Schreuder-Gibson, H. L., P. Gibson, et al. (2004). "Cooperative charging effects of fibers from electrospinning of electrically dissimilar polymers." International Nonwovens Journal 13(4): 39-45 [0012]
- Thomas, D., P. Contal, V. Renaudin, P. Penicot, D. Leclerc and J. Vendel (1999) Modelling Pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration. J. Aerosol Science, 30(2) 235-246 [0012]
- S. Payet, D. Boulaud, G. Madelaine and A. Renoux (1992) Penetration and Pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles. J. Aerosol Science 23(7). 723-735 [0012]
- Bhattarai, S. R., N. Bhattarai, et al. (2004). "Novel biodegradable electrospun membrane: scaffold for tissue engineering." Biomaterials 25(13): 2595-2602 [0012]
- Boudriot, U., B. Goetz, et al. (2005). "Role of electrospun nanofibers in stem cell technologies and tissue engineering." Macromolecular Symposia 225: 9-16 [0012]
- Choi, S. S., Y. S. Lee, et al. (2004). "Electrospun PVDF nanofiber web as polymer electrolyte or separator." Electrochimica Acta 50(2-3): 339-343 [0012]
- Choi, S. W., S. M. Jo, et al. (2003). "An electrospun poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membrane and its battery applications." Advanced Materials 15(23): 2027-2032 [0012]
- Jia, H. F., G. Y. Zhu, et al. (2002). "Enzymecarrying polymeric nanofibers prepared via electrospinning for use as unique biocatalysts." Biotechnology Progress 18(5): 1027-1032 [0012]
- Liu, H. Q., J. B. Edel, et al. (2006). "Electrospun polymer nanofibers as subwavelength optical waveguides incorporating quantum dots." Small 2(4): 495-499 [0012]
- Zhang, Y. Z., C. T. Lim, et al. (2005). "Recent development of polymer nanofibers for biomedical and biotechnological applications." Journal of Materials Science-Materials in Medicine 16(10): 933-946 [0012]
- Aussawasathien, D., J. H. Dong, et al. (2005).

- "Electrospun polymer nanofiber sensors." *Synthetic Metals* 154(1–3): 37–40 [0012]
- Chronakis, I. S. (2005). "Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process – A review." *Journal of Materials Processing Technology* 167(2–3): 283–293 [0012]
- Demir, M. M., M. A. Gulgun, et al. (2004). "Palladium nanoparticles by electrospinning from poly(acrylonitrile-co-acrylic acid)-PdCl₂ solutions. Relations between preparation conditions, particle size, and catalytic activity." *Macromolecules* 37(5): 1787–1792 [0012]
- Ding, B., M. Yamazaki, et al. (2005). "Electrospun fibrous polyacrylic acid membrane-based gas sensors." *Sensors and Actuators B-Chemical* 106(1): 477–483 [0012]
- Huang, Z. M., Y. Z. Zhang, et al. (2003). "A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites." *Composites Science and Technology* 63(15): 2223–2253 [0012]
- Jia, H. F., G. Y. Zhu, et al. (2002). "Enzyme-carrying polymeric nanofibers prepared via electrospinning for use as unique biocatalysts." *Biotechnology Progress* 18(5): 1027–1032 [0012]
- Katti, D. S., K. W. Robinson, et al. (2004). "Bioresorbable nanofiber-based systems for wound healing and drug delivery: Optimization of fabrication parameters." *Journal of Biomedical Materials Research Part B-Applied Biomaterials* 70B(2): 286–296 [0012]
- Kenawy, E. R. and Y. R. Abdel-Fattah (2002). "Antimicrobial properties of modified and electrospun poly(vinyl phenol)." *Macromolecular Bioscience* 2(6): 261–266 [0012]
- Khil, M. S., D. I. Cha, et al. (2003). "Electrospun nanofibrous polyurethane membrane as wound dressing." *Journal of Biomedical Materials Research Part B-Applied Biomaterials* 67B(2): 675–679 [0012]
- Liu, H. Q., J. Kameoka, et al. (2004). "Polymeric nanowire chemical sensor." *Nano Letters* 4(4): 671–675 [0012]
- Luong-Van, E., L. Grondahl, et al. (2006). "Controlled release of heparin from poly(epsilon-caprolactone) electrospun fibers." *Biomaterials* 27(9): 2042–2050 [0012]
- Ma, Z. W., M. Kotaki, et al. (2005). "Potential of nanofiber matrix as tissue-engineering scaffolds." *Tissue Engineering* 11(1–2): 101–109 [0012]
- Murugan, R. and S. Ramakrishna (2006). "Nanostructured scaffolds for tissue engineering: A review of spinning methodologies." *Tissue Engineering* 12(3): 435–447 [0012]
- Spasova, M., N. Manolova, et al. (2004). "Preparation of chitosan-containing nanofibres by electrospinning of chitosan/poly(ethylene oxide) blend solutions." *E-Polymers* [0012]
- Zeng, J., X. Y. Xu, et al. (2003). "Biodegradable electrospun fibers for drug delivery." *Journal of Controlled Release* 92(3): 227–231 [0012]
- ASHRAE Standard 52.2 (1999) [0141]
- ASHRAE (1999) [0141]
- Demir, M. M., M. A. Gulgun, et al., "Palladium nanoparticles by electrospinning from poly(acrylonitrile-co-acrylic acid)-PdCl₂ solutions. Relations between preparation conditions, particle size, and catalytic activity" [0155]
- Choi, S. W., S. M. Jo, et al., "An electrospun poly(vinylidene fluoride) nanofibrous membrane and its battery applications" [0158]
- Katti, D. S., K. W. Robinson, et al., "Bioresorbable nanofiber-based systems for wound healing and drug delivery: Optimization of fabrication parameters" [0159]
- Murugan, R. and S. Ramakrishna, "Nano-featured scaffolds for tissue engineering: A review of spinning methodologies" [0160]
- Jia, H. F., G. Y. Zhu, et al., "Enzyme-carrying polymeric nanofibers prepared via electrospinning for use as unique biocatalysts" [0161]
- Chronakis, I. S. (2005), "Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process – A review." [0163]
- Kenawy, E. R. and Y. R. Abdel-Fattah, "Antimicrobial properties of modified and electrospun poly(vinyl Phenol)" [0164]
- Aussawasathien, D. J. H. Dong, et al. (2005). "Electrospun polymer nanofiber sensors" [0167]

Patentansprüche

1. Filtrationseinrichtung, die umfasst:
ein Filtrationsmittel, das eine Mehrzahl von Nanofasern enthält, die Durchmesser aufweisen, die kleiner als 1 Mikron sind, die in Anwesenheit eines sich abrupt ändernden elektrischen Felds in eine Fasermatte ausgebildet sind; und
eine Unterstüztung, die an dem Filtrationsmittel angebracht ist und Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist.
2. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Nanofasern in Anwesenheit einer periodischen Entladung zur Masse, wodurch das sich abrupt ändernde elektrische Feld erzeugt wird, ausgebildet sind.
3. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Nanofasern in Anwesenheit einer angelegten Wellenform des elektrischen Felds, wodurch das sich abrupt ändernde elektrische Feld erzeugt wird, ausgebildet sind.
4. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Unterstüztung umfasst:
eine leitfähige Unterstüztung, welche die Öffnungen ausbildet.
5. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Unterstüztung umfasst:
wenigstens eines aus: einem Filter, einem Kunststoffschaum, einem Metallschaum, einem Halbleiterschäum, einem gewebten Material, einem nichtgewebten Material, einer Kunststoffabschirmung, einem Textil und einem Hocheffizienzpartikelluft-(HEPA)-Filtermittel.
6. Einrichtung nach Anspruch 1, bei welcher der Filter einen minimalen Effizienzberichtswert (MERV) zwischen 3 und 12 aufweist.
7. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Unterstüztung wenigstens eines aufweist, aus: einer konischen Gestalt, einer gekrümmten Gestalt, einer kreisförmigen Gestalt, einer ebenen Gestalt, einer kugelförmigen Gestalt und einer zylindrischen Gestalt und Kombinationen davon.
8. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Unterstüztung mehrere zellförmige Rahmen umfasst, die benachbart zueinander angeordnet sind.
9. Einrichtung nach Anspruch 8, bei der die mehreren zellförmigen Rahmen zylindrische Zellen enthalten.
10. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Nanofasern integral aneinander an Punkten entlang entsprechender Nanofasern angebracht sind.
11. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Nanofasern einen mittleren Faserdurchmesser von weniger als 500 nm aufweisen.
12. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Nanofasern einen mittleren Faserdurchmesser von weniger als 200 nm aufweisen.
13. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Nanofasern einen mittleren Faserdurchmesser von weniger als 100 nm aufweisen.
14. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der das Filtrationsmittel eine Mehrzahl von Schichten von Nanofasern umfasst, die in der Anwesenheit des sich abrupt ändernden elektrischen Felds ausgebildet sind.
15. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Mehrzahl von Schichten zwischen 4 bis 4000 Schichten von Nanofasern enthält.
16. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Mehrzahl von Schichten zwischen 10 bis 100 Schichten von Nanofasern enthält.
17. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Mehrzahl von Schichten eine Dicke zwischen 0,25 und 500 μm umfasst.
18. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der das Filtrationsmittel einen Gütefaktor $\text{FoM} = -\text{Log}(\text{Pt})/\Delta\text{P}$ aufweist,
wobei Pt die Teileindringung eines Aerosolpartikeldurchmessers von 0,3 Mikron und ΔP ein Druckabfall des Filtrationsmittels über das Filtrationsmittel ist, der einer Flächengeschwindigkeit von 5,3 cm/s entspricht, und
wobei der Gütefaktor größer als 20 kPa^{-1} ist.
19. Einrichtung nach Anspruch 18, bei der die Unterstüztung einen Unterstüztungsdruckabfall aufweist, der nicht größer als 10 bis 50% des Druckabfalls des Filtrationsmittels ist.
20. Einrichtung nach Anspruch 18, bei welcher der Gütefaktor größer als 50 kPa^{-1} ist.
21. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Nanofasern wenigstens eines umfasst, aus: einem pH-abbaubaren Material, einem Enzym-abbaubaren Material und einem Wärme-abbaubaren Material.
22. Einrichtung nach Anspruch 1, ferner umfassend:
ein Dichtungsmittel, das auf einem Umfang der Unterstüztung angeordnet ist, um die Fasern zur Unterstüztung abzudichten.
23. Einrichtung nach Anspruch 1, bei der die Un-

terstützung ein zusätzliches Filtrationsmittel umfasst.

24. Einrichtung nach Anspruch 23, bei der das zusätzliche Filtrationsmittel einen Filter umfasst, auf den die Mehrzahl von Nanofasern in Anwesenheit des sich abrupt ändernden elektrischen Felds abgelagert wurde.

25. Einrichtung nach Anspruch 23, bei der die zusätzliche Filtrationsschicht eine Filtration von Partikeln gewährleistet, die größer als 1 Mikron im Durchmesser sind.

26. Einrichtung nach Anspruch 1, ferner umfassend:
eine Mehrzahl von Unterstützungen, wobei entsprechende der Unterstützungen entsprechende Nanofaserschichten enthalten, um eine mehrstufige Filtration bereitzustellen.

27. Filtrationseinrichtung, die umfasst:
eine Unterstützung, welche Öffnung für einen Fluidfluss dadurch aufweist;
ein Filtrationsmittel, das eine Mehrzahl von Fasern enthält, die an der Unterstützung angebracht sind; und
wobei das Filtrationsmittel einen Gütefaktor $FoM = -\text{Log}(Pt)/\Delta P$ aufweist,
wobei Pt die Teileindringung von einem Aerosolpartikeldurchmesser von 0,3 Mikron ist und ΔP ein Druckabfall des Filtrationsmittels über das Filtrationsmittel ist, der einer Flächengeschwindigkeit von 5,3 cm/s entspricht, und
der Gütefaktor größer als 20 kPa^{-1} ist.

28. Einrichtung nach Anspruch 27, bei der die Unterstützung einen Druckabfall der Unterstützung aufweist, der nicht größer als 10 bis 50% des Druckabfalls des Filtrationsmittels ist.

29. Einrichtung nach Anspruch 27, bei welcher der Gütefaktor größer als 50 kPa^{-1} ist.

30. Filtrationseinrichtung, die umfasst:
eine Unterstützung, welche makroskopische Dimensionen und Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist;
ein Filtrationsmittel, das eine Mehrzahl von Nanofasern enthält, die auf der Unterstützung abgelagert sind; und
wobei ein Teil der Mehrzahl von Nanofasern an der Unterstützung anhaftet, um das Filtrationsmittel an der Unterstützung zu sichern.

31. Einrichtung nach Anspruch 30, ferner umfassend:
eine Haftverbindung des Filtrationsmittels mit der Unterstützung.

32. Einrichtung nach Anspruch 30, bei welcher

der Teil der Mehrzahl von Nanofasern integral an der Unterstützung angebracht ist.

33. Einrichtung nach Anspruch 30, ferner umfassend:
ein Dichtungsmittel, das auf einem Umfang der Unterstützung angeordnet ist, um die Fasern an der Unterstützung abzudichten.

34. Einrichtung nach Anspruch 30, bei der die Mehrzahl von Nanofasern eine Dicke zwischen 0,25 und $500 \mu\text{m}$ umfasst.

35. Fasermittel, das umfasst:
eine Mehrzahl von Nanofasern, die Durchmesser aufweisen, die kleiner als 1 Mikron sind, die in einer Faserplatte in der Anwesenheit eines sich abrupt ändernden elektrischen Felds ausgebildet sind; und
wobei die Faserplatte wenigstens eines umfasst, aus:
einem Filter, einer katalytischen Materialquelle, einem Batterietrenner, einem Wundverband, einer Gewebegrundlage, einer bioaktiven Materialquelle, einer anti-bakteriellen Materialquelle, eines Textilstücks und eines Sensors.

36. Mittel nach Anspruch 35, ferner umfassend:
eine Unterstützung, die an der Faserplatte angebracht ist.

37. Das Mittel nach Anspruch 36, bei dem die Unterstützung von der Faserplatte lösbar ist.

38. Einrichtung zum Herstellen eines Filtermaterials, umfassend:
ein Elektrospinnelement, das aufgebaut ist, um eine Mehrzahl von Fasern von einer Forderseite des Elektrospinnelements elektrozuspinnen;
einen Kollektor, der dem Elektrospinnelement gegenüberliegt und aufgebaut ist, elektrogespinnene Fasern auf einer Oberfläche des Kollektors anzusammeln; und
eine Modulationseinrichtung des elektrischen Felds, die aufgebaut ist, ein elektrisches Feld an dem Kollektor wenigstens einmal während des Elektrospinnens der Fasern abrupt in der Zeit zu ändern.

39. Einrichtung nach Anspruch 38, ferner umfassend:
ein Gehäuse, das aufgebaut ist, um das Elektrospinnelement in einer gesteuerten Atmosphäre einzuschließen.

40. Einrichtung nach Anspruch 38, ferner umfassend:
eine Steuereinrichtung, die aufgebaut ist, um wenigstens entweder eine Feuchte oder eine Lösungsmittelkonzentration in dem Gehäuse zu steuern.

41. Einrichtung nach Anspruch 40, bei der die

Steuereinrichtung aufgebaut ist, um die Feuchte auf eine relative Feuchte zwischen 5 und 65% zu steuern.

42. Einrichtung nach Anspruch 40, bei der die Steuereinrichtung aufgebaut ist, um die Feuchte auf eine relative Feuchte zwischen 15 und 40% zu steuern.

43. Einrichtung nach Anspruch 40, bei der die Steuereinrichtung aufgebaut ist, um die Lösungsmittelkonzentration auf eine relative Konzentration zwischen 10 und 80% einer Atmosphäre in dem Gehäuse zu steuern.

44. Einrichtung nach Anspruch 40, bei der die Steuereinrichtung aufgebaut ist, um die Lösungsmittelkonzentration auf eine relative Konzentration zwischen 20 und 45% einer Atmosphäre in dem Gehäuse zu steuern.

45. Einrichtung nach Anspruch 38, ferner umfassend:
eine Aerosoltesteinrichtung, die aufgebaut ist, um einen Betrag von Gas oder Aerosol, das durch einen Abschnitt des zu testenden Filters tritt, zu detektieren.

46. Einrichtung nach Anspruch 45, ferner umfassend:
eine Verschiebungseinrichtung, die aufgebaut ist, um eine relative Bewegung zwischen dem Elektrospinnelement und dem Kollektor als Antwort auf ein Resultat der Aerosoltesteinrichtung bereitzustellen.

47. Einrichtung nach Anspruch 46, bei welcher die Verschiebungseinrichtung aufgebaut ist, um eine Position der Spitze des Elektrospinnelements relativ zur Oberfläche des Kollektors zu steuern.

48. Einrichtung nach Anspruch 38, ferner umfassend:
eine Lichtstreueinrichtung, die aufgebaut ist, um Schwankungen bezüglich der Dicke der elektrogenen Fasern über die Oberfläche des Kollektors zu detektieren.

49. Einrichtung nach Anspruch 48, ferner umfassend:
eine Verschiebungseinrichtung, die aufgebaut ist, um eine relative Bewegung zwischen dem Elektrospinnelement und dem Kollektor als Antwort auf ein Resultat der Lichtstreueinrichtung bereitzustellen.

50. Einrichtung nach Anspruch 49, bei der die Verschiebungseinrichtung aufgebaut ist, um eine Position der Spitze des Elektrospinnelements relativ zur Oberfläche des Kollektors zu steuern.

51. Einrichtung nach Anspruch 38, ferner umfassend:

send:

eine erste Masseplatte, die unter dem Kollektor angeordnet ist und eine Massereferenz für die Impulseinrichtung des elektrischen Felds bereitstellt.

52. Einrichtung nach Anspruch 51, ferner umfassend:
eine zweite Masseplatte, die unter der ersten Masseplatte angeordnet ist und sich über eine Grenze der ersten Masseplatte hinaus erstreckt.

53. Einrichtung nach Anspruch 38, bei der die Spitze des Elektrospinnelements wenigstens eines umfasst, aus: einem Polymer, Keramik, Glas oder Metall.

54. Einrichtung nach Anspruch 38, bei der die Spitze des Elektrospinnelements wenigstens entweder Polytetrafluoroethylen oder Edelstahl umfasst.

55. Einrichtung nach Anspruch 38, bei der die Spitze des Elektrospinnelements eine sich drehende Spitze umfasst.

56. Einrichtung nach Anspruch 38, bei der die Modulationseinrichtung des elektrischen Felds eine Spannungsbegrenzungseinrichtung umfasst, die wenigstens einmal Ladungen auf den elektrogenen Fasern über eine Elektrodenlücke zur Masse entlädt.

57. Einrichtung nach Anspruch 38, bei der die Modulationseinrichtung des elektrischen Felds eine Anlegeeinrichtung des elektrischen Felds umfasst, die aufgebaut ist, um ein elektrisches Feld an den Kollektor anzulegen und danach wenigstens einmal das elektrische Feld, das an den Kollektor angelegt ist, auf ein Massepotenzial zu verringern.

58. Verfahren zum Ausbilden eines Filtermaterials, umfassend:
Bereitstellen einer Unterstüzung, die Öffnungen für einen Fluidfluss dadurch aufweist;
Elektrosponnen von Nanofasern über eine Gesamtheit der Öffnungen, um eine Mehrzahl von Nanofaserschichten als ein Filtrationsmittel auf der Unterstüzung auszubilden; und
abruptes Variieren eines elektrischen Felds an der Unterstüzung, wenigstens einmal während des Elektrosponnens der Nanofasern.

59. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Variieren umfasst:
periodisches Entladen der Unterstüzung zur Masse während des Elektrosponnens.

60. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Variieren umfasst:
Anlegen eines elektrischen Felds an die Unterstüzung und danach Verringern wenigstens einmal des angelegten elektrischen Felds aus ein Massepotenzi-

al.

61. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Bereitstellen einer Unterstützung umfasst: Bereitstellen einer leitfähigen Unterstützung.

62. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Aufbringen eines Dichtungsmittels auf einen Umfang der Unterstützung, um den Umfang vor einer Umgehung des Filters durch die Partikel abzudichten.

63. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Bereitstellen einer Unterstützung umfasst: wenigstens entweder Behandeln oder Beschichten einer Oberfläche der Unterstützung, um die Anhaftung der Nanofasern an die Unterstützung zu unterstützen.

64. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Bereitstellen einer Unterstützung umfasst: Bereitstellen für die Unterstützung wenigstens eines aus: einer konisch gestalteten Unterstützung, einer gekrümmt gestalteten Unterstützung, einer kreisförmig gestalteten Unterstützung, einer ebenf rmigen Unterstützung, einer kugelförmigen Unterstützung und einer zylindrisch gestalteten Unterstützung und Kombinationen davon.

65. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Bereitstellen einer Unterstützung umfasst: Bereitstellen mehreren zellf rmiger Rahmen für die Unterstützung, die benachbart zueinander angeordnet sind.

66. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Ausbilden der Nanofaserschichten mit entsprechenden der Nanofasern in einer Schicht, die integral an anderen Nanofasern in einer benachbarten Schicht angebracht ist.

67. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Elektrosponnen einer Lösung, die ein Polymer enthält, das in der Lösung aufgelöst ist.

68. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Elektrosponnen eines geschmolzenen Polymers.

69. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Elektrosponnen von Nanofasern, die einen mittleren Faserdurchmesser von weniger als 500 nm aufweisen.

70. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Elektrosponnen von Nanofasern, die einen mittleren

Faserdurchmesser von weniger als 200 nm aufweisen.

71. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Elektrosponnen von Nanofasern, die einen mittleren Faserdurchmesser von weniger als 100 nm aufweisen.

72. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Elektrosponnen erster Nanofasern, die einen ersten mittleren Faserdurchmesser aufweisen; und Elektrosponnen auf den ersten Nanofasern von zweiten Nanofasern, die einen zweiten mittleren Faserdurchmesser aufweisen, der kleiner als der erste mittlere Durchmesser ist.

73. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Elektrosponnen von ersten Nanofasern, die einen ersten mittleren Faserdurchmesser aufweisen; und Elektrosponnen auf den ersten Nanofasern von zweiten Nanofasern, die einen zweiten mittleren Faserdurchmesser aufweisen, der gr o er als der erste mittlere Durchmesser ist.

74. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Ausbilden zwischen 4 bis 4000 Schichten von Nanofasern auf der Unterstützung.

75. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Ausbilden zwischen 10 bis 100 Schichten der Nanofasern auf der Unterstützung.

76. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosponnen umfasst:
Ausbilden der Nanofasern auf der Unterstützung auf eine Dicke zwischen 0,25 bis 500 μm .

77. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Entfernen der Mehrzahl von Nanofaserschichten von der Unterstützung; und Anbringen der entfernten Schichten an wenigstens einen, aus: einem Filter, einem Kunststoffschaum, einem Metallschaum, einem Halbleiterschium, einem gewebten Material, einem nichtgewebten Material, einer Kunststoffabschirmung, einem Textil und einem Hocheffizienzpartikelluft-(HEPA)-Filtermittel.

78. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Anbringen der Mehrzahl von Nanofaserschichten an ein zusätzliches Filtrationsmittel.

79. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:

Zusammenfügen einer Mehrzahl von Unterstützungen mit entsprechenden der Unterstützungen, die entsprechende Nanofaserschichten enthalten, um dadurch eine mehrstufige Filtration bereitzustellen.

80. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosplennen umfasst:
Bereitstellen einer gesteuerten Atmosphäre für das Elektrosplennen.

81. Verfahren nach Anspruch 80, ferner umfassend:
Steuern wenigstens entweder einer Feuchte oder einer Lösungsmittelkonzentration in der Atmosphäre.

82. Verfahren nach Anspruch 81, bei dem das Steuern umfasst:
Steuern der Feuchte auf eine relative Feuchte zwischen 5 und 65%.

83. Verfahren nach Anspruch 81, bei dem das Steuern umfasst:
Steuern der Feuchte auf eine relative Feuchte zwischen 15 und 40%.

84. Verfahren nach Anspruch 81, bei dem das Steuern umfasst:
Steuern der Lösungsmittelkonzentration auf eine relative Konzentration in der Atmosphäre zwischen 10 und 80%.

85. Verfahren nach Anspruch 81, bei dem das Steuern umfasst:
Steuern der Lösungsmittelkonzentration auf eine relative Konzentration in der Atmosphäre zwischen 20 und 45%.

86. Verfahren nach Anspruch 58, bei dem das Elektrosplennen umfasst:
Elektrosplennen wenigstens eines, aus: einem pH-abbaubaren Material, eine Enzym-abbaubaren Material und einem thermisch-abbaubaren Materials.

87. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Detektieren eines Betrags von Gas oder Aerosol, das durch einen Abschnitt des zu testenden Filters tritt.

88. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Verwenden von Lichtstreuung, um Schwankungen der Dicke der elektrogesponnen Fasern über die Oberfläche des Kollektors zu detektieren.

89. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Bereitstellen einer relativen Bewegung zwischen dem Elektrosplennenelement und der Unterstützung als Antwort auf das Detektieren lokaler Ungleichförmigkeiten in dem Filtrationsmittel, um die Gleichförmig-

keit des ausgebildeten Filtrationsmittels zu verbessern.

90. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Bereitstellen eines Additivs, das wenigstens entweder ein Salz oder ein Tensid enthält, zu einer Substanz, die elektrosplennen ist.

91. Verfahren nach Anspruch 90, bei dem das Bereitstellen eines Additivs umfasst:
Zuführen des Additivs mit einer Konzentration zwischen 0,06 bis 0,2 Gew.-%.

92. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Drehen wenigstens entweder des Elektrosplennenelements oder der Unterstützung während des Elektrosplennens.

93. Verfahren nach Anspruch 58, ferner umfassend:
Bereitstellen eines Bearbeitungsgasflusses durch das Nanofaserfiltermittel auf der Unterstützung während des Elektrosplennens.

94. Verfahren nach Anspruch 93, ferner umfassend:
Überwachen eines Druckabfalls über dem Filtrationsmittel während des Elektrosplennens.

95. Verfahren zum Ablagern eines Materials auf einem Kollektor, umfassend:
Extrahieren einer Substanz mittels eines elektrischen Felds aus einem Emitter;
Ansammeln der Substanz auf dem Kollektor nach der Extraktion der Substanz aus dem Emitter; und
abruptes Ändern eines elektrischen Felds an dem Kollektor, wenigstens einmal während des Extrahierens der Substanz mittels eines elektrischen Felds.

96. Verfahren nach Anspruch 95, bei dem das Extrahieren des elektrischen Felds wenigstens entweder das Elektrosplennen von Fasern oder das Elektrosplennen von Partikeln umfasst.

97. Verfahren nach Anspruch 95, bei dem das Elektrosplennen von Partikeln umfasst:
Ausbilden wenigstens eines, aus einem Tröpfchen, einem Rests von Feststoffpartikeln und ionisierten Komponenten, aus der mittels des elektrischen Felds extrahierten Substanz.

98. Verfahren nach Anspruch 95, bei dem das abrupte Ändern umfasst:
Anwenden einer Spannungsentladungseinrichtung, um Ladungen von dem Kollektor zur Masse abzuleiten.

Es folgen 13 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

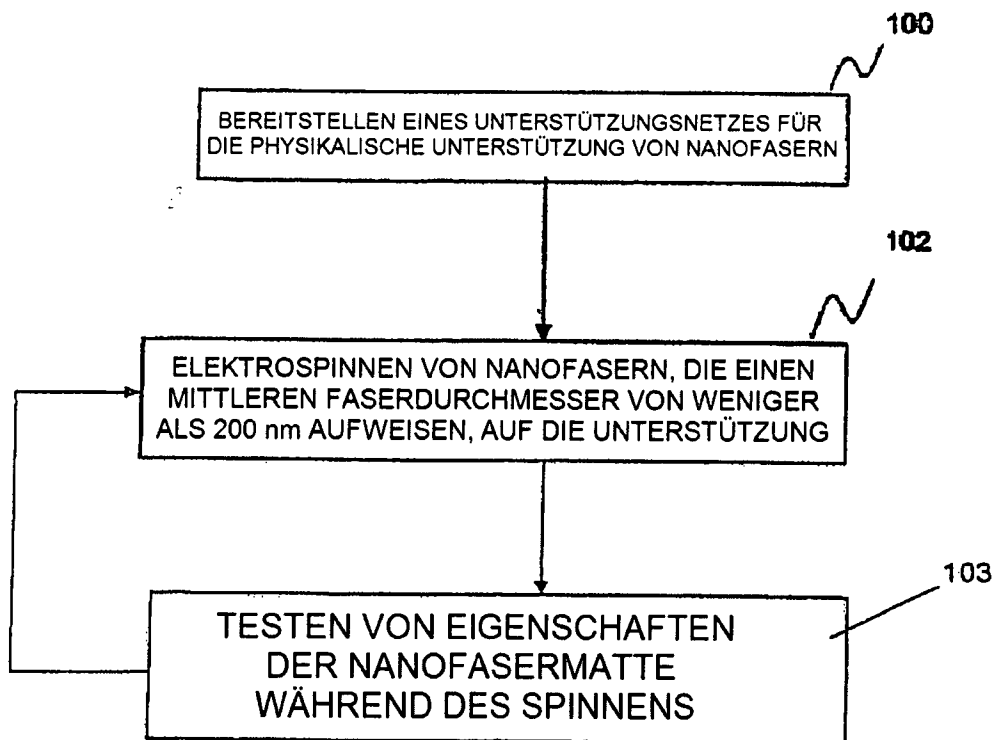


FIG. 1A

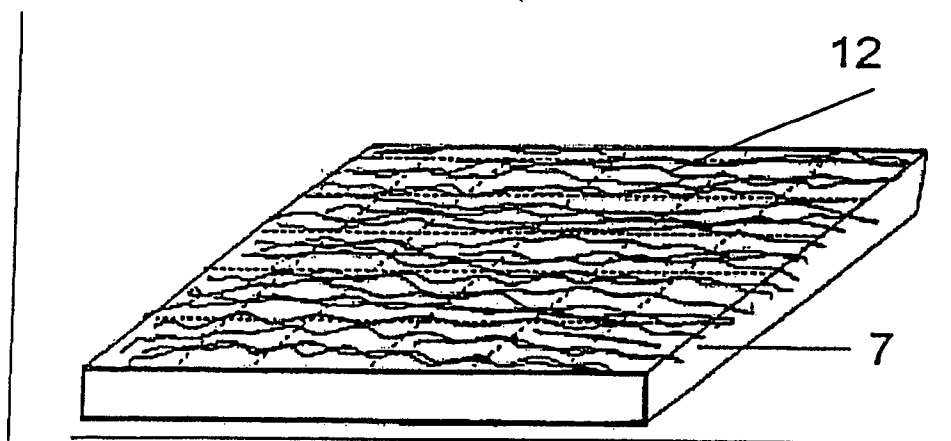


FIG. 1B



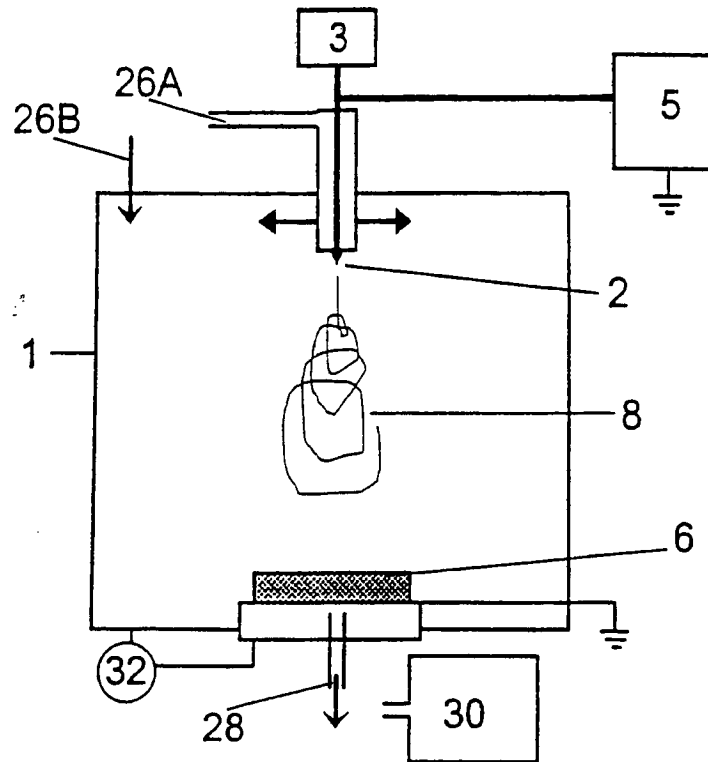


FIG. 2A

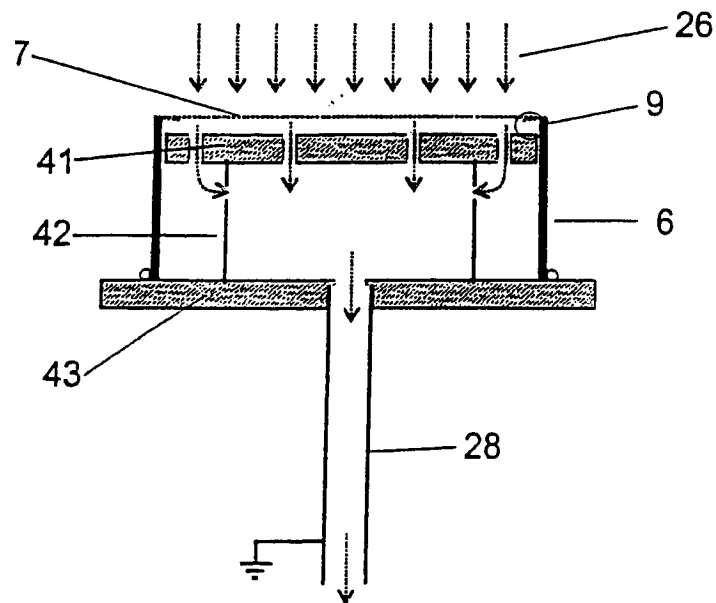


FIG. 2B

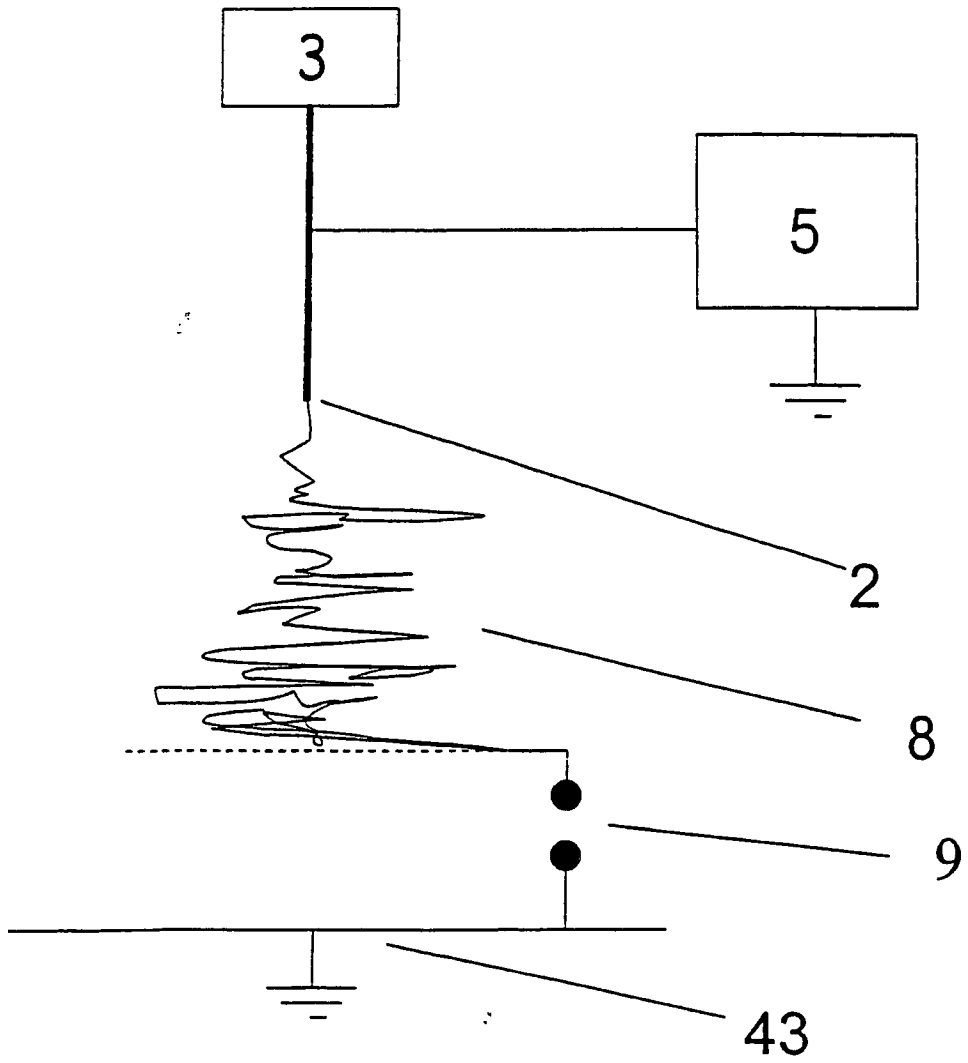


FIG. 3

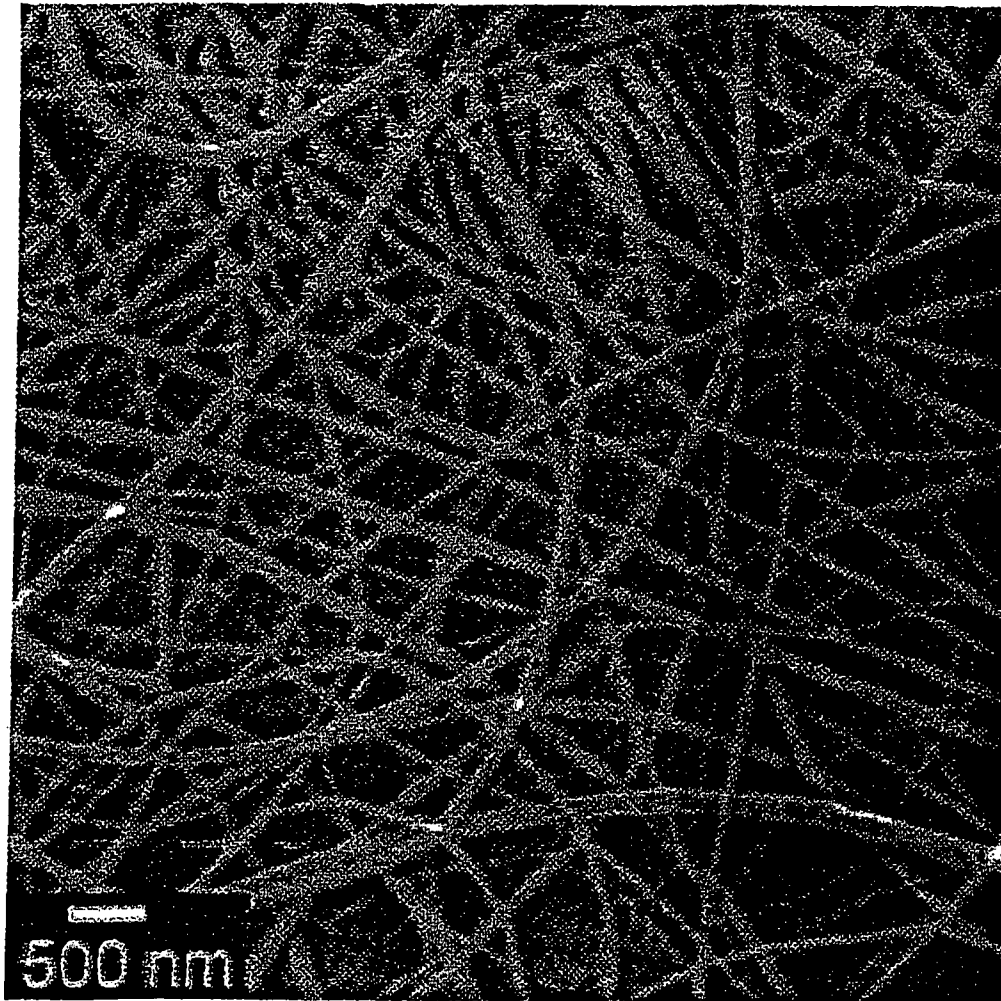


FIG. 4

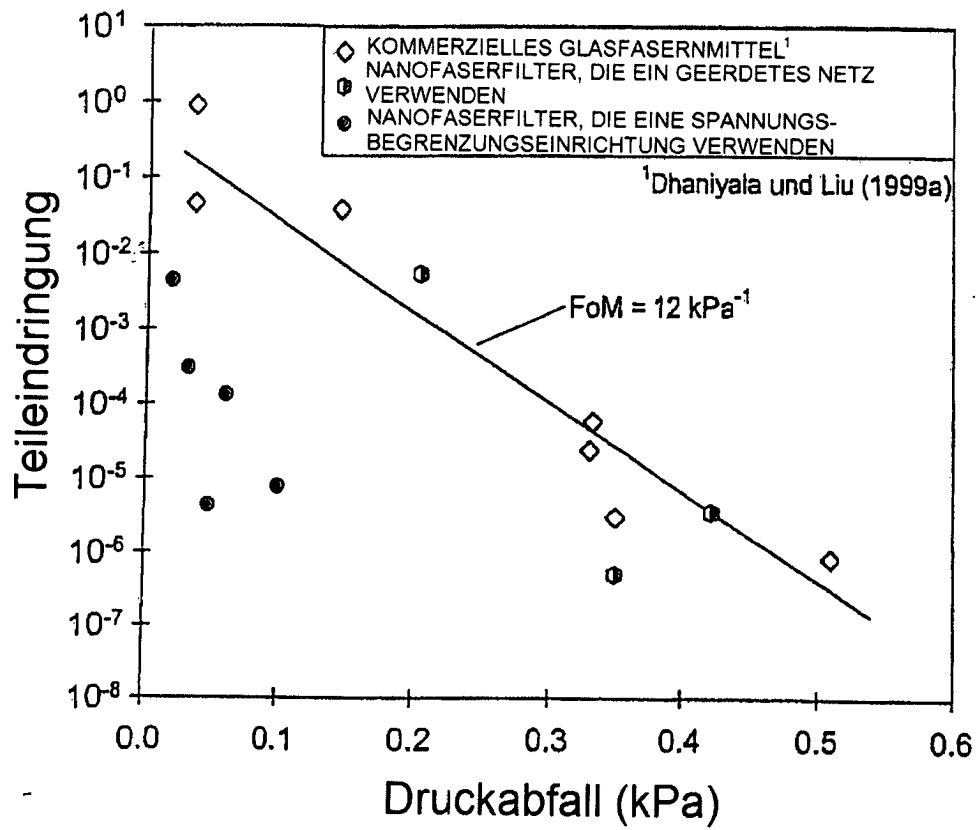


FIG. 5

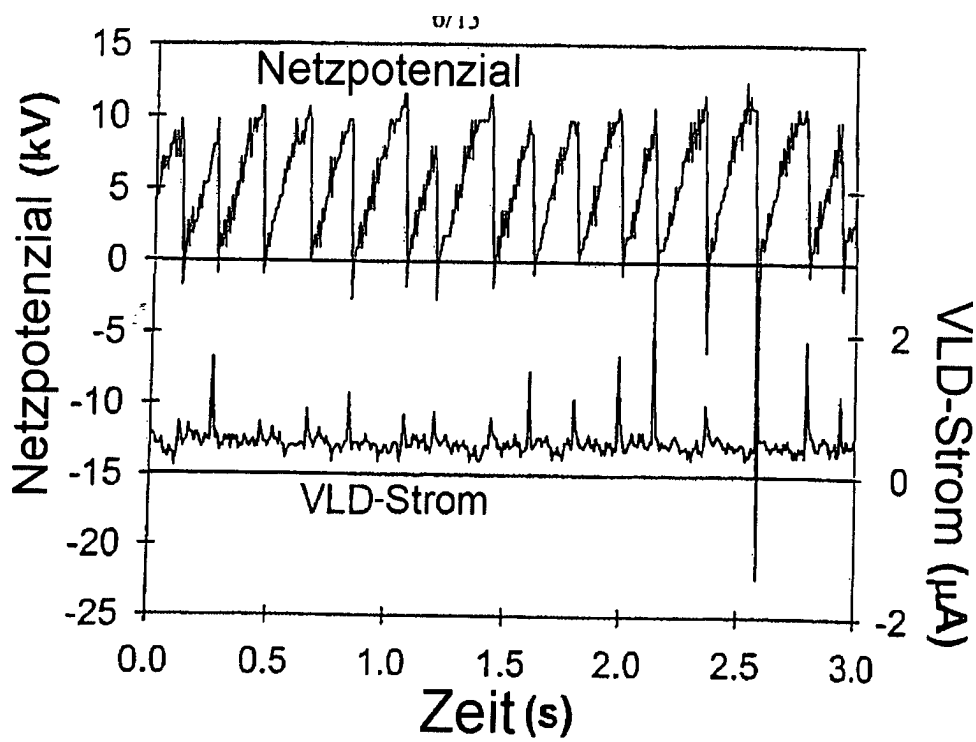


FIG. 6

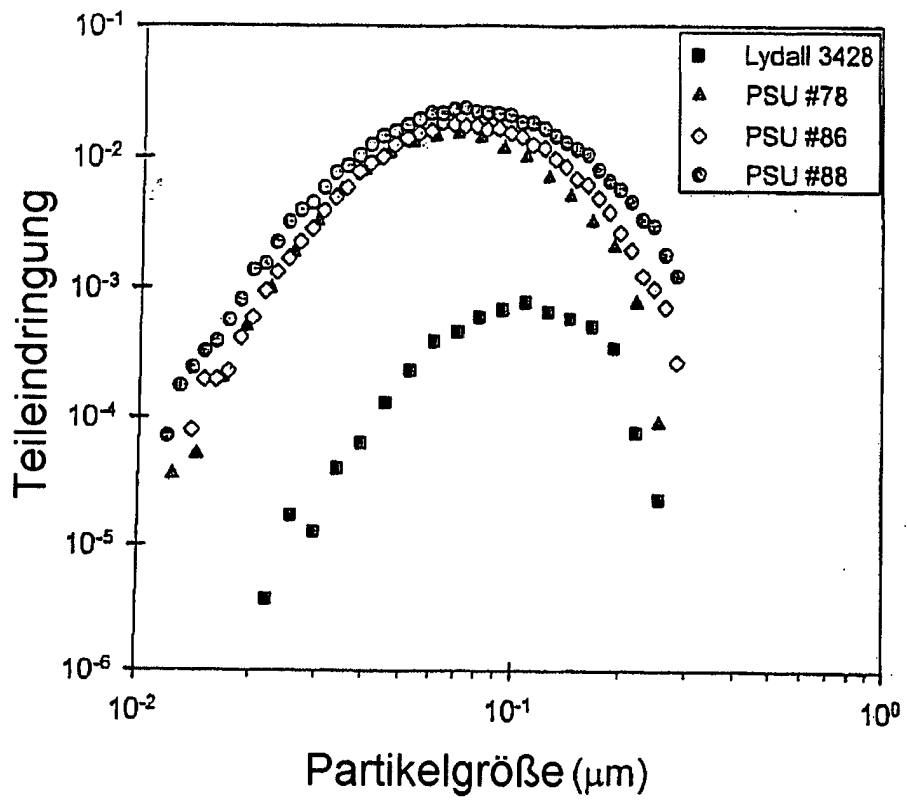


FIG. 7.

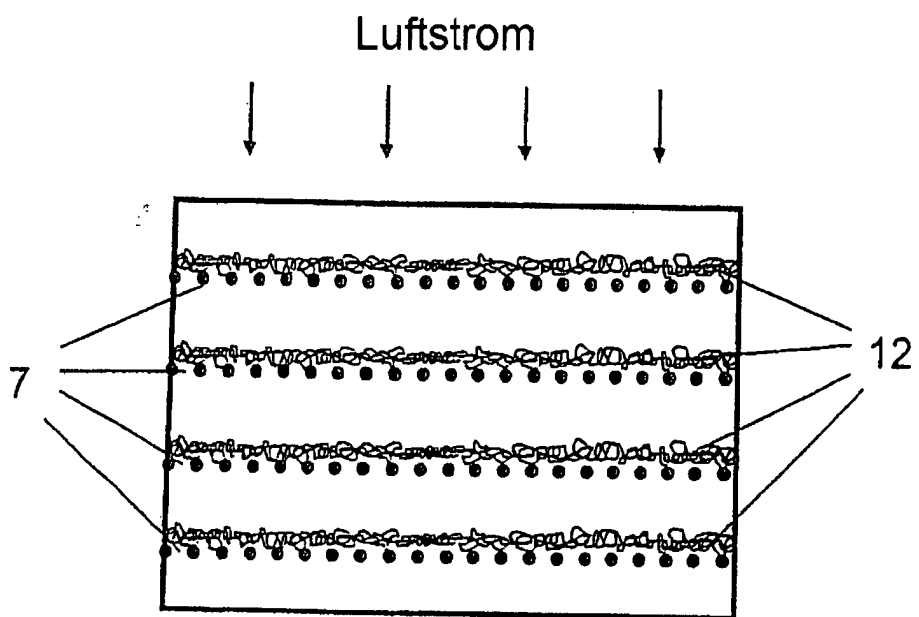


FIG. 8.

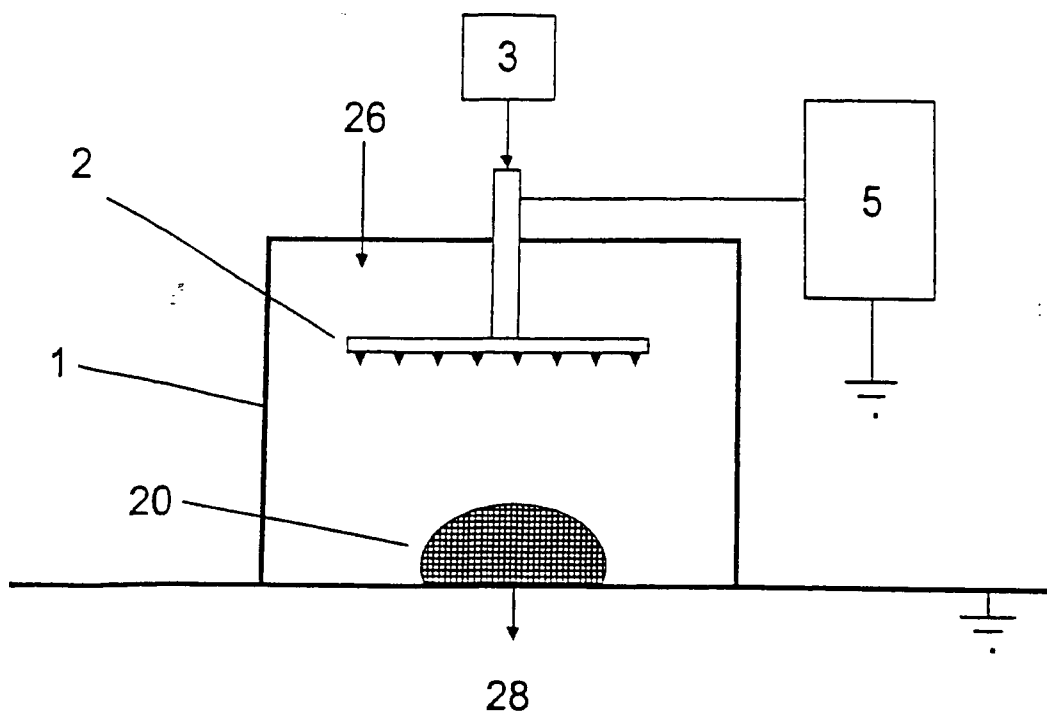


FIG. 9.

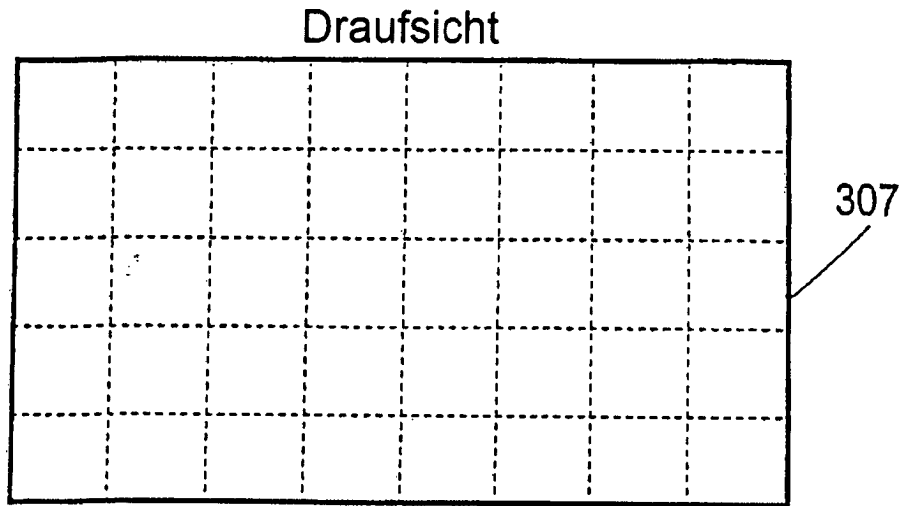


FIG. 10A.

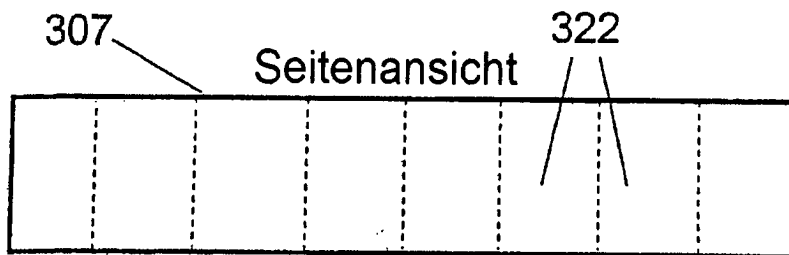


FIG. 10B.

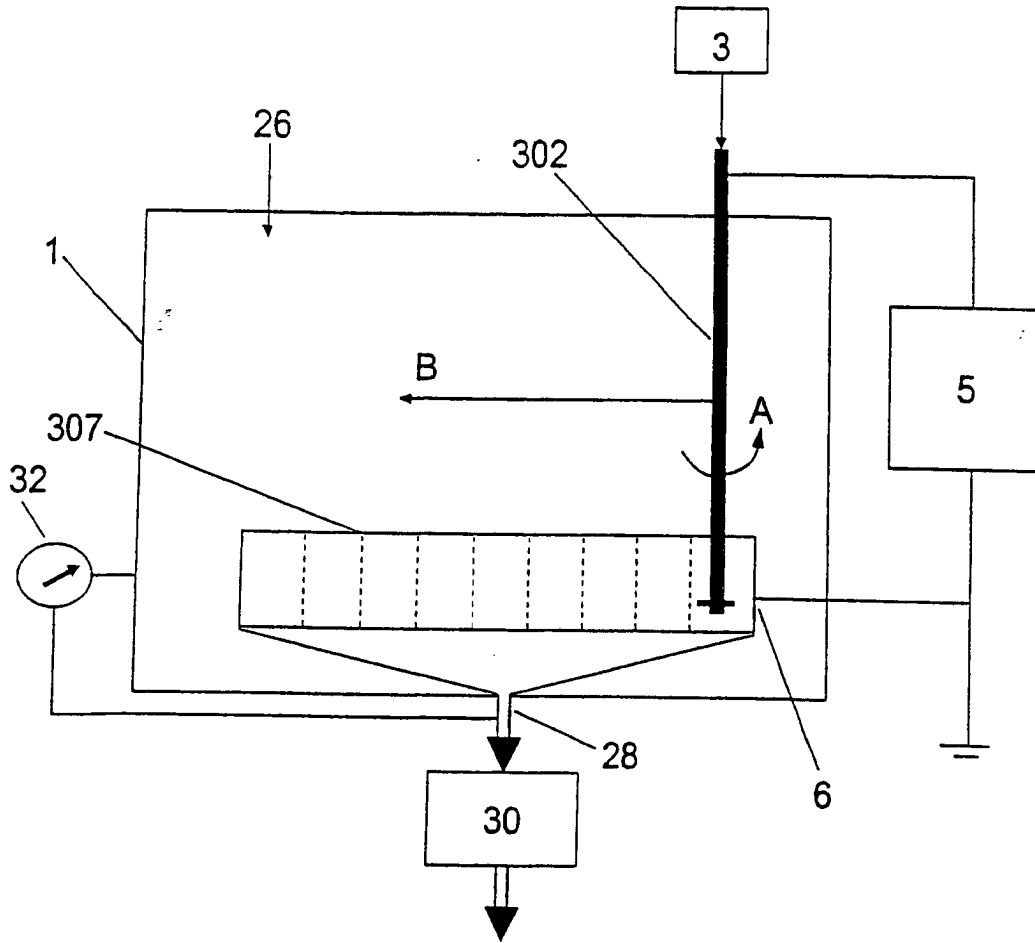


FIG. 11.

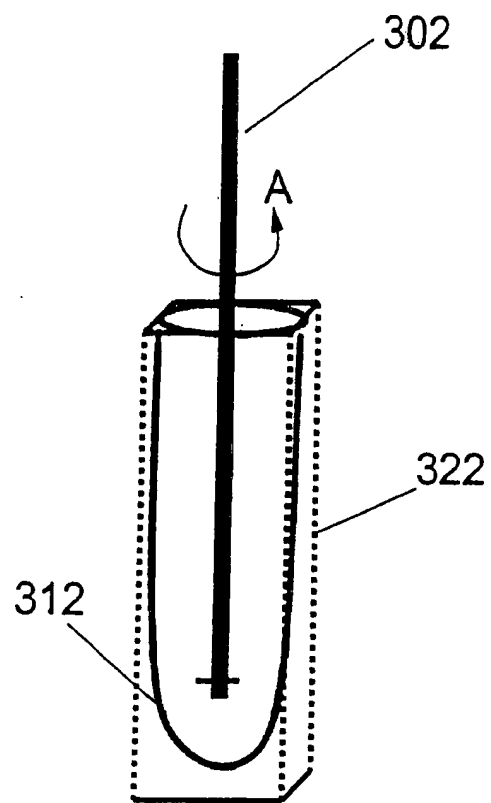


FIG. 12.

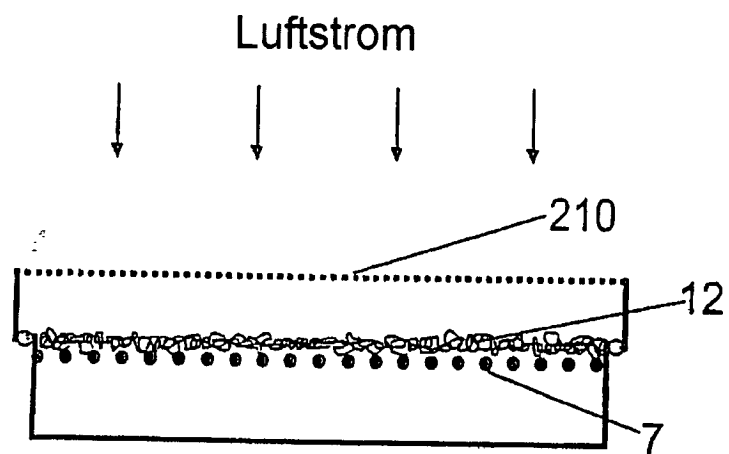


FIG. 13.