



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2023 111 254.6**

(22) Anmeldetag: **02.05.2023**

(43) Offenlegungstag: **28.03.2024**

(51) Int Cl.: **H01M 4/13** (2010.01)

H01M 4/134 (2010.01)

H01M 4/36 (2006.01)

H01M 4/38 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
17/954,896 **28.09.2022** **US**

(72) Erfinder:
**Yoon, Insun, Warren, MI, US; Wang, Meixian,
Warren, MI, US; Halalay, Ion C., Warren, MI, US**

(71) Anmelder:
**GM Global Technology Operations LLC, Detroit,
MI, US**

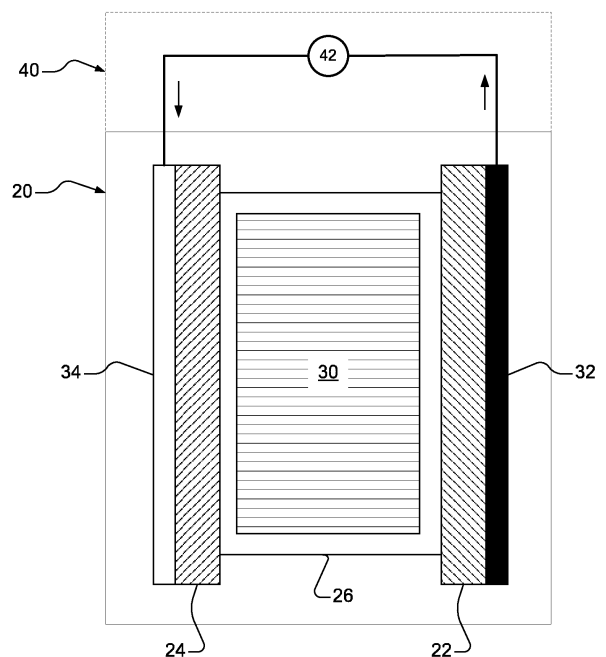
(74) Vertreter:
**Manitz Finsterwald Patent- und
Rechtsanwaltspartnerschaft mbB, 80336
München, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Siliciumhaltige Elektroden und Verfahren zu deren Herstellung**

(57) Zusammenfassung: Eine elektrochemische Zelle kann eine erste Elektrode umfassen, die ein positives elektroaktives Material umfasst, eine zweite Elektrode, die ein negatives elektroaktives Material und ein Polyacrylatbindemittel umfasst, und eine Trennschicht, die zwischen der ersten und der zweiten Elektrode angeordnet ist. Das Polyacrylatbindemittel hat ein Molekulargewicht von größer/gleich etwa 250.000 mol/g bis kleiner/gleich etwa 500.000 mol/g. Die zweite Elektrode wird hergestellt, indem eine elektrodenbildende Aufschlämmung mit einer Temperatur von größer/gleich etwa 4 °C bis kleiner/gleich etwa 15 °C auf oder nahe einer Oberfläche eines Stromkollektors aufgebracht wird. Die elektrodenbildende Aufschlämmung umfasst das negative elektroaktive Material und das Polyacrylatbindemittel. Das negative elektroaktive Material kann ein siliciumhaltiges Material sein.



Beschreibung

EINLEITUNG

[0001] Dieser Abschnitt enthält Hintergrundinformationen zur vorliegenden Offenbarung, die nicht unbedingt zum Stand der Technik gehören.

[0002] Es besteht ein Bedarf an fortschrittlichen Energiespeichervorrichtungen und -systemen, um den Energie- und/oder Leistungsbedarf für eine Vielzahl von Produkten zu decken, einschließlich Automobilprodukten wie Start-Stopp-Systemen (z. B. 12-V-Start-Stopp-Systemen), batteriegestützten Systemen, Hybridelektrofahrzeugen („HEVs“) und Elektrofahrzeugen („EVs“). Typische Lithium-Ionen-Akkumulatoren umfassen mindestens zwei Elektroden und einen Elektrolyten und/oder Separator. Eine der beiden Elektroden kann als positive Elektrode oder Kathode und die andere als negative Elektrode oder Anode dienen. Zwischen der negativen und der positiven Elektrode kann ein mit einem flüssigen oder festen Elektrolyten gefüllter Separator angeordnet sein. Der Elektrolyt ist geeignet, Lithiumionen zwischen den Elektroden zu leiten, und kann, wie die beiden Elektroden, in fester und/oder flüssiger Form und/oder als Hybrid davon vorliegen. Bei Festkörperrakkumulatoren, die Festkörperelektroden und einen Festkörperelektrolyten (oder einen Festkörperseparator) umfassen, kann der Festkörperelektrolyt (oder der Festkörperseparator) die Elektroden physisch trennen, sodass kein eigener Separator erforderlich ist.

[0003] Zur Herstellung von Komponenten für einen Lithium-Ionen-Akkumulator können viele verschiedene Materialien verwendet werden. Die negative Elektrode umfasst in der Regel ein Material zur Einlagerung von Lithium oder ein Legierungswirtsmaterial. Zu den typischen elektroaktiven Materialien für die Bildung einer Anode gehören beispielsweise Graphit und andere Formen von Kohlenstoff, Silicium und Siliciumoxid, Zinn und Zinnlegierungen. Bestimmte Anodenmaterialien weisen besondere Vorteile auf. Während Graphit mit seiner theoretischen spezifischen Kapazität von $372 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ am häufigsten in Lithium-Ionen-Akkumulatoren verwendet wird, sind Anodenmaterialien mit hoher spezifischer Kapazität, z. B. mit einer hohen spezifischen Kapazität von etwa $900 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ bis etwa $4.200 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, von immer größerem Interesse. Silicium hat zum Beispiel die höchste bekannte theoretische Kapazität bezüglich Lithium (z. B. etwa $4.200 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$), was es zu einem interessanten Material für Lithium-Ionen-Akkumulatoren macht. Bei solchen Materialien kommt es jedoch während der Lithiierung und Delithiierung häufig zu einer enormen Volumenvergrößerung, was zu Teilchenpulverisierung, Verlust des elektrischen Kontakts und Bildung einer instabilen Solid Electrolyte Interface (SEI) führen

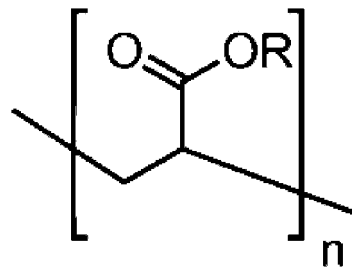
kann, wodurch die Elektrode kollabiert und die Kapazität nachlässt. Entsprechend wäre es wünschenswert, verbesserte Materialien sowie Verfahren zu deren Herstellung und Verwendung zu entwickeln, die diese Probleme lösen können.

KURZDARSTELLUNG

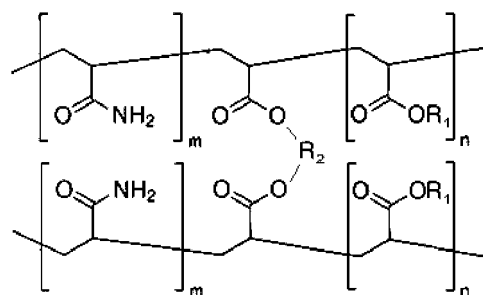
[0004] Dieser Abschnitt enthält eine allgemeine Zusammenfassung der Offenbarung und ist keine umfassende Offenbarung ihres vollen Umfangs oder all ihrer Merkmale.

[0005] Die vorliegende Offenbarung betrifft siliciumhaltige Elektroden, elektrochemische Zellen, die diese umfassen, und Verfahren zu deren Herstellung und Verwendung.

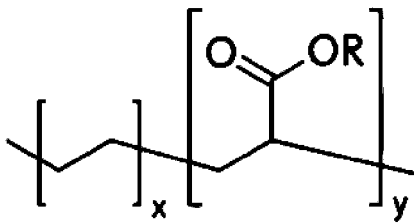
[0006] In verschiedenen Aspekten sieht die vorliegende Offenbarung eine Elektrode für eine elektrochemische Zelle vor, die Lithiumionen zyklisiert. Die Elektrode kann ein siliciumhaltiges elektroaktives Material und ein Polyacrylatbindemittel umfassen, das aus einem Monomer gebildet wird aus der Gruppe bestehend aus:



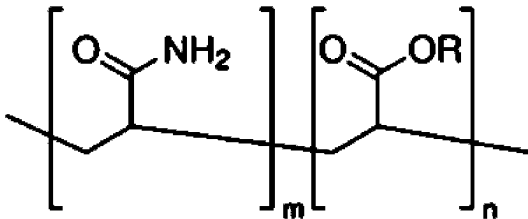
$R = \text{H, Li, Na, K, Mg, or Ca}$



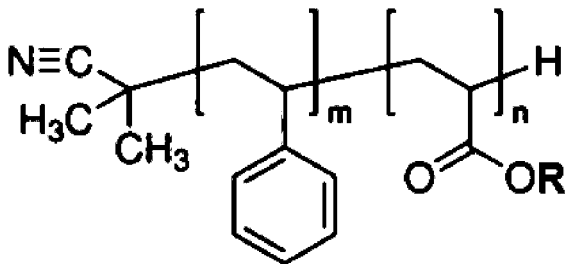
$R_1 = \text{H, Li, Na, or K}; R_2 = \text{Mg or Ca}$



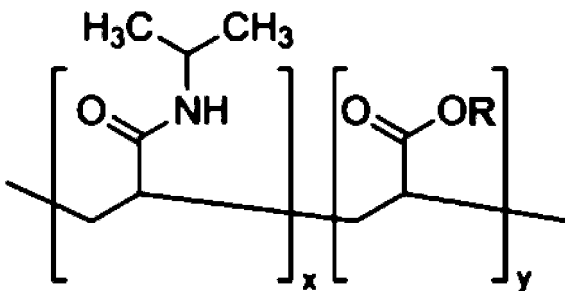
R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca



R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca



R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca



R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca

und Kombinationen davon.

[0007] In einem Aspekt kann das Polyacrylatbindemittel ein Molekulargewicht von größer/gleich etwa 250.000 mol/g bis kleiner/gleich etwa 500.000 mol/g haben.

[0008] In einem Aspekt kann die Elektrode größer/gleich etwa 0,5 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 5 Gew.-% des Polyacrylatbindemittels umfassen.

[0009] In einem Aspekt kann die Elektrode ferner größer/gleich etwa 0,1 Gew.-% bis kleiner/gleich

etwa 5 Gew.-% eines leitfähigen Zusatzstoffs umfassen.

[0010] In einem Aspekt kann die Elektrode ferner größer/gleich etwa 10 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 50 Gew.-% des siliciumhaltigen elektroaktiven Materials umfassen.

[0011] In einem Aspekt kann die Elektrode ferner ein kohlenstoffhaltiges elektroaktives Material umfassen.

[0012] In einem Aspekt kann die Elektrode größer/gleich etwa 10 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 50 Gew.-% des siliciumhaltigen elektroaktiven Materials und größer/gleich etwa 40 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 80 Gew.-% des kohlenstoffhaltigen elektroaktiven Materials umfassen.

[0013] In verschiedenen Aspekten stellt die vorliegende Offenbarung eine elektrochemische Zelle bereit, die Lithiumionen zyklisiert. Die elektrochemische Zelle kann eine erste Elektrode umfassen, die ein positives elektroaktives Material umfasst, eine zweite Elektrode, die ein negatives elektroaktives Material und ein Polyacrylatbindemittel umfasst, und eine Trennschicht, die zwischen der ersten und der zweiten Elektrode angeordnet ist. Das Polyacrylatbindemittel kann ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus: Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) sowie Kombinationen davon.

[0014] In einem Aspekt kann das Polyacrylatbindemittel ein erstes Polyacrylatbindemittel sein und die erste Elektrode kann außerdem ein zweites Polyacrylatbindemittel enthalten. Das zweite Polyacrylatbindemittel kann ebenfalls ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus: Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-

Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) sowie Kombinationen davon.

[0015] In einem Aspekt kann das Polyacrylatbindemittel ein Molekulargewicht von größer/gleich etwa 200.000 mol/g bis kleiner/gleich etwa 500.000 mol/g haben.

[0016] In einem Aspekt kann die zweite Elektrode größer/gleich etwa 0,5 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 5 Gew.-% des Polyacrylatbindemittels umfassen.

[0017] In einem Aspekt kann die zweite Elektrode ferner größer/gleich etwa 0,1 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 5 Gew.-% eines leitfähigen Zusatzstoffs umfassen.

[0018] In einem Aspekt kann die zweite Elektrode größer/gleich etwa 10 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 50 Gew.-% des siliciumhaltigen elektroaktiven Materials umfassen.

[0019] In einem Aspekt kann die zweite Elektrode ferner ein kohlenstoffhaltiges elektroaktives Material umfassen.

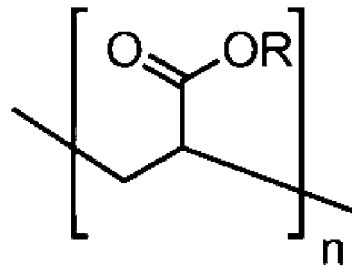
[0020] In einem Aspekt kann die zweite Elektrode größer/gleich etwa 10 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 50 Gew.-% des siliciumhaltigen elektroaktiven Materials und größer/gleich etwa 40 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 80 Gew.-% des kohlenstoffhaltigen elektroaktiven Materials umfassen.

[0021] In verschiedenen Aspekten stellt die vorliegende Offenbarung ein Verfahren zur Herstellung einer siliciumhaltigen Elektrode bereit. Das Verfahren kann beinhalten, eine elektrodenbildende Aufschlämmung mit einer Temperatur von größer/gleich etwa 4 °C bis kleiner/gleich etwa 15 °C auf oder nahe einer Oberfläche eines Stromkollektors aufzubringen, um die Elektrode zu bilden. Die elektrodenbildende Aufschlämmung kann ein siliciumhaltiges elektroaktives Material und ein Polyacrylatbindemittel umfassen.

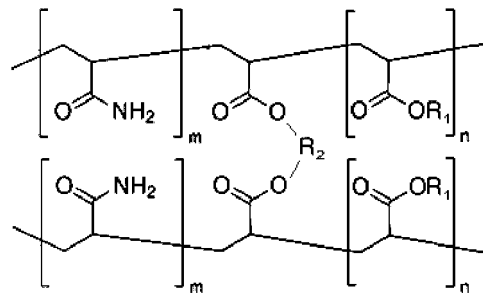
[0022] In einem Aspekt kann das Verfahren ferner beinhalten, die elektrodenbildende Aufschlämmung vor ihrer Entsorgung für eine Haltedauer auf Temperatur zu halten.

[0023] In einem Aspekt kann das Polyacrylatbindemittel ein Molekulargewicht von größer/gleich etwa 250.000 mol/g bis kleiner/gleich etwa 500.000 mol/g

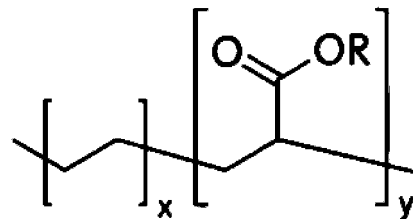
haben und aus Monomeren gebildet werden, die ausgewählt sind aus der Gruppe bestehend aus:



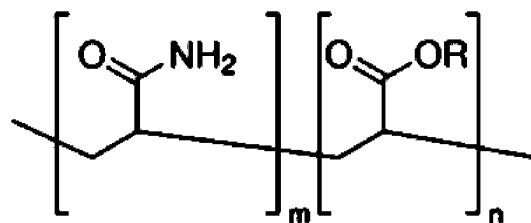
$R = \text{H, Li, Na, K, Mg, or Ca}$



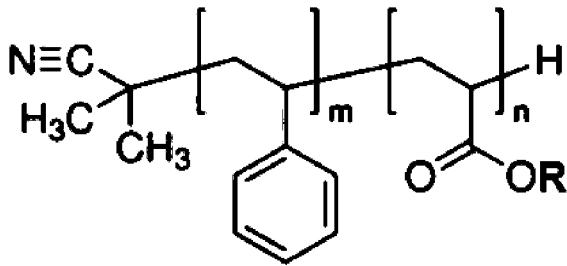
$R_1 = \text{H, Li, Na, or K}; R_2 = \text{Mg or Ca}$



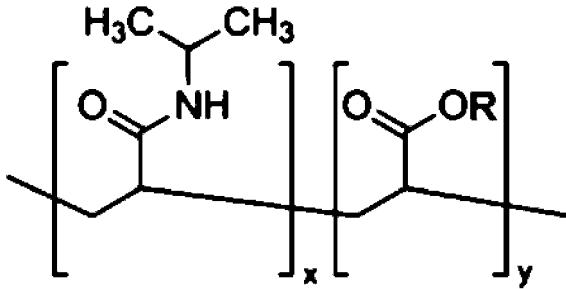
$R = \text{H, Li, Na, K, Mg, or Ca}$



$R = \text{H, Li, Na, K, Mg, or Ca}$



$R = \text{H, Li, Na, K, Mg, or Ca}$



$R = \text{H, Li, Na, K, Mg, or Ca}$

und Kombinationen davon.

[0024] In einem Aspekt kann die elektrodenbildende Aufschlämmung außerdem einen leitfähigen Zusatzstoff enthalten.

[0025] In einem Aspekt kann die elektrodenbildende Aufschlämmung außerdem ein kohlenstoffhaltiges elektroaktives Material umfassen.

[0026] Entsprechende Bezugszeichen kennzeichnen entsprechende Teile in den verschiedenen Ansichten der Zeichnungen.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0027] Die hier beschriebenen Zeichnungen dienen nur zur Veranschaulichung ausgewählter Ausführungsformen und nicht aller möglichen Ausführungen und sollen den Umfang der vorliegenden Offenbarung nicht einschränken.

Fig. 1 zeigt eine beispielhafte elektrochemische Zelle mit einer siliciumhaltigen Elektrode gemäß verschiedenen Aspekten der vorliegenden Offenbarung;

Fig. 2A zeigt eine Top-Down-Ansicht einer siliciumhaltigen Elektrode, die mit Hilfe eines Aufschlämmungsverfahrens bei Raumtemperatur hergestellt wurde;

Fig. 2B zeigt eine Top-Down-Ansicht einer siliciumhaltigen Elektrode, die im Niedrigtemperaturverfahren gemäß verschiedenen Aspekten

der vorliegenden Offenbarung hergestellt wurde;

Fig. 3A zeigt eine grafische Darstellung, die die Viskositätsänderungen im Zeitablauf für eine beispielhafte elektrodenbildende Aufschlämmung zeigt, die gemäß verschiedenen Aspekten der vorliegenden Offenbarung hergestellt wurde;

Fig. 3B zeigt eine grafische Darstellung, die die Viskositätsänderungen einer vergleichbaren elektrodenbildenden Aufschlämmung im Zeitablauf zeigt; und

Fig. 4 zeigt eine grafische Darstellung, die die Ladungserhaltung einer beispielhaften Zelle mit einer siliciumhaltigen Elektrode zeigt, die gemäß verschiedenen Aspekten der vorliegenden Offenbarung hergestellt wurde.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG

[0028] Es werden beispielhafte Ausführungsformen angegeben, um diese Offenbarung umfassend darzustellen und dem Fachmann ihren vollen Umfang zu vermitteln. Es werden zahlreiche konkrete Details aufgeführt, wie Beispiele konkreter Zusammensetzungen, Komponenten, Vorrichtungen und Verfahren, um ein umfassendes Verständnis der Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung zu bieten. Für den Fachmann ist es offensichtlich, dass konkrete Details nicht verwendet werden müssen, dass beispielhafte Ausführungsformen in vielen unterschiedlichen Formen ausgeführt sein können und dass keine der Ausführungsformen so ausgelegt werden sollte, dass sie den Umfang der Offenbarung einschränkt. Bei einigen beispielhaften Ausführungsformen sind bekannte Prozesse, bekannte Gerüststrukturen und bekannte Technologien nicht im Detail beschrieben.

[0029] Die hier verwendete Terminologie dient nur der Beschreibung bestimmter beispielhafter Ausführungsformen und ist nicht als einschränkend zu verstehen. Sofern aus dem Kontext nicht eindeutig etwas anderes hervorgeht, sollen die hier verwendeten Singularformen „ein“, „eine“ und „der“, „die“, „das“ ggf. auch die Pluralformen umfassen. Die Begriffe „umfassen“, „umfassend“, „enthalten“ und „aufweisen“ sind inklusiv und geben somit das Vorhandensein von genannten Merkmalen, Elementen, Zusammensetzungen, Schritten, ganzen Zahlen, Vorgängen und/oder Komponenten an, schließen aber das Vorhandensein oder Hinzufügen von einem oder mehreren anderen Merkmalen, ganzen Zahlen, Schritten, Vorgängen, Elementen, Komponenten und/oder Gruppen davon nicht aus. Obwohl der offene Begriff „umfassend“ als nicht einschränkend zu verstehen ist und verschiedene hier dargelegte Ausführungsformen beschreiben und beanspruchen soll, kann er in bestimmten Aspekten

alternativ auch als ein stärker einschränkender und restriktiverer Begriff verstanden werden, wie z. B. „bestehend aus“ oder „im Wesentlichen bestehend aus“. Daher umfasst die vorliegende Offenbarung bei jeder beliebigen Ausführungsform, die Zusammensetzungen, Materialien, Komponenten, Elemente, Merkmale, ganze Zahlen, Vorgänge und/oder Verfahrensschritte angibt, ausdrücklich auch Ausführungsformen, die aus solchen angegebenen Zusammensetzungen, Materialien, Komponenten, Elementen, Merkmalen, ganzen Zahlen, Vorgängen und/oder Verfahrensschritten bestehen oder im Wesentlichen daraus bestehen. Im Falle von „bestehend aus“ schließt die alternative Ausführungsform alle zusätzlichen Zusammensetzungen, Materialien, Komponenten, Elemente, Merkmale, ganzen Zahlen, Vorgänge und/oder Verfahrensschritte aus, während im Falle von „im Wesentlichen bestehend aus“ alle zusätzlichen Zusammensetzungen, Materialien, Komponenten, Elemente, Merkmale, ganzen Zahlen, Vorgänge und/oder Verfahrensschritte, die sich erheblich auf die grundlegenden und neuartigen Eigenschaften auswirken, von einer solchen Ausführungsform ausgeschlossen sind, aber alle Zusammensetzungen, Materialien, Komponenten, Elemente, Merkmale, ganzen Zahlen, Vorgänge und/oder Verfahrensschritte, die sich nicht erheblich auf die grundlegenden und neuartigen Eigenschaften auswirken, in der Ausführungsform eingeschlossen sein können.

[0030] Die hier beschriebenen Verfahrensschritte, Prozesse und Vorgänge sind nicht so auszulegen, dass sie zwangsläufig in der bestimmten erläuterten oder veranschaulichten Reihenfolge durchgeführt werden müssen, es sei denn, sie sind ausdrücklich als Durchführungsreihenfolge gekennzeichnet. Sofern nicht anders angegeben, können natürlich auch zusätzliche oder alternative Schritte durchgeführt werden.

[0031] Wird eine Komponente, ein Element oder eine Schicht als „auf“ einem anderen Element oder einer anderen Schicht befindlich oder als damit „in Eingriff“ oder „verbunden“ oder als daran „gekoppelt“ bezeichnet, kann sie sich direkt auf oder in Eingriff mit der anderen Komponente, dem anderen Element oder der anderen Schicht befinden oder direkt damit verbunden oder daran gekoppelt sein, oder es können dazwischenliegende Elemente oder Schichten vorhanden sein. Wird dagegen ein Element als „direkt auf“ einem anderen Element oder einer anderen Schicht befindlich oder als damit „direkt in Eingriff“ oder „direkt verbunden“ oder als daran „direkt gekoppelt“ bezeichnet, dürfen keine dazwischenliegenden Elemente oder Schichten vorhanden sein. Andere Wörter, die zur Beschreibung der Beziehung zwischen Elementen verwendet werden, sollten ähnlich ausgelegt werden (z. B. „zwischen“ gegenüber „direkt zwischen“, „benachbart“ oder „angrenzend“

gegenüber „direkt benachbart“ oder „direkt angrenzend“ usw.). Der hier verwendete Begriff „und/oder“ umfasst sämtliche Kombinationen von einem oder mehreren der zugehörigen aufgelisteten Punkte.

[0032] Obwohl die Begriffe „erste“, „zweite“, „dritte“ usw. hier verwendet werden können, um verschiedene Schritte, Elemente, Komponenten, Bereiche, Schichten und/oder Abschnitte zu beschreiben, sollten diese Schritte, Elemente, Komponenten, Bereiche, Schichten und/oder Abschnitte nicht durch diese Begriffe eingeschränkt werden, sofern nicht anders angegeben. Diese Begriffe dürfen nur verwendet werden, um einen Schritt, ein Element, eine Komponente, einen Bereich, eine Schicht oder einen Abschnitt von einem anderen Schritt, einem anderen Element, einer anderen Komponente, einem anderen Bereich, einer anderen Schicht oder einem anderen Abschnitt zu unterscheiden. Sofern vom Kontext nicht eindeutig vorgegeben, implizieren Begriffe wie „erste“, „zweite“ und andere numerische Begriffe hier keine bestimmte Abfolge oder Reihenfolge. So könnte man einen ersten Schritt, ein erstes Element, eine erste Komponente, einen ersten Bereich, eine erste Schicht oder einen ersten Abschnitt, die im Folgenden besprochen werden, als zweiten Schritt, zweites Element, zweite Komponente, zweiten Bereich, zweite Schicht oder zweiten Abschnitt bezeichnen, ohne von den Lehren der Ausführungsbeispiele abzuweichen.

[0033] Räumlich oder zeitlich relative Begriffe wie „vor“, „nach“, „innere“, „äußere“, „unterhalb“, „unter“, „untere“, „über“, „obere“ und dergleichen können hier der Einfachheit halber verwendet werden, um die Beziehung eines Elements oder Merkmals zu einem oder mehreren anderen Elementen oder Merkmalen zu beschreiben, wie in den Figuren veranschaulicht. Räumlich oder zeitlich relative Begriffe können dazu bestimmt sein, neben der in den Figuren dargestellten Ausrichtung auch andere Ausrichtungen des in Gebrauch oder Betrieb befindlichen Geräts oder Systems zu umfassen.

[0034] In dieser gesamten Offenbarung stellen die Zahlenwerte ungefähre Maße oder Grenzen für Bereiche dar, um geringfügige Abweichungen von den angegebenen Werten und Ausführungsformen, die in etwa den genannten Wert aufweisen, sowie solche Werte, die genau den genannten Wert aufweisen, einzuschließen. Anders als in den Arbeitsbeispielen am Ende der detaillierten Beschreibung sind alle Zahlenwerte von Parametern (z. B. von Mengen oder Bedingungen) in dieser Patentschrift, einschließlich der im Anhang befindlichen Ansprüche, so zu verstehen, dass sie in allen Fällen durch den Begriff „etwa“ modifiziert sind, unabhängig davon, ob „etwa“ tatsächlich vor dem Zahlenwert erscheint oder nicht. „Etwa“ gibt den exakten oder genauen angegebenen Zahlenwert an und bedeutet auch, dass der

angegebene Zahlenwert eine leichte Ungenauigkeit zulässt (mit einer gewissen Annäherung an die Genauigkeit des Werts; ungefähr oder ziemlich nahe am Wert; fast). Wird die Ungenauigkeit, die durch „etwa“ gegeben ist, im Stand der Technik nicht anderweitig mit dieser gewöhnlichen Bedeutung verstanden, dann bezeichnet „etwa“ im hier verwendeten Sinne zumindest Abwandlungen, die sich aus gewöhnlichen Verfahren zur Messung und Verwendung solcher Parameter ergeben können. Zum Beispiel kann „etwa“ eine Abweichung von kleiner/gleich 5 %, optional kleiner/gleich 4 %, optional kleiner/gleich 3 %, optional kleiner/gleich 2 %, optional kleiner/gleich 1 %, optional kleiner/gleich 0,5 % und in bestimmten Fällen optional kleiner/gleich 0,1 % umfassen.

[0035] Darüber hinaus umfasst die Offenbarung von Bereichen die Offenbarung aller Werte und weiter unterteilter Bereiche innerhalb des Gesamtbereichs, einschließlich der Endpunkte und der für die Bereiche angegebenen Teilbereiche.

[0036] Anhand der beigefügten Zeichnungen werden nun beispielhafte Ausführungsformen ausführlicher beschrieben.

[0037] Die vorliegende Technologie betrifft elektrochemische Zellen mit siliciumhaltigen Elektroden sowie Verfahren zu deren Herstellung und Verwendung. Solche Zellen können in Fahrzeug- oder Kraftfahrzeugtransportanwendungen (z. B. Motorrädern, Booten, Traktoren, Bussen, Motorrädern, Wohnmobilen, Wohnwagen und Panzern) eingesetzt werden. Die vorliegende Technologie kann jedoch auch in einer Vielzahl anderer Branchen und Anwendungen eingesetzt werden, insbesondere in Komponenten für die Luft- und Raumfahrt, in Konsumgütern, Geräten, Gebäuden (z. B. Häusern, Büros, Schuppen und Lagerhallen), in der Büroausstattung und in Büromöbeln sowie in Maschinen für Industrieausrüstung, in landwirtschaftlichen Geräten, Landmaschinen oder Schwermaschinen. Obwohl die weiter unten veranschaulichten Beispiele eine einzelne positive Elektrode/Kathode und eine einzelne Anode umfassen, wird der Fachmann erkennen, dass sich die vorliegenden Lehren auch auf verschiedene andere Ausbildungen erstrecken, einschließlich solcher mit einer oder mehreren Kathoden und einer oder mehreren Anoden sowie verschiedenen Stromkollektoren mit elektroaktiven Schichten, die auf einer oder mehreren Oberflächen davon oder angrenzend an diese angeordnet sind.

[0038] Eine beispielhafte und schematische Darstellung einer elektrochemischen Zelle (auch bezeichnet als Akkumulator) 20 ist in **Fig. 1** dargestellt. Der Akkumulator 20 umfasst eine negative Elektrode 22 (z. B. Anode), eine positive Elektrode 24 (z. B. Kathode) und einen Separator 26, der zwischen

den beiden Elektroden 22, 24 angeordnet ist. Der Separator 26 sorgt für eine elektrische Trennung zwischen den Elektroden 22, 24, d. h. er verhindert den physischen Kontakt. Der Separator 26 stellt außerdem einen minimalen Widerstandspfad für den internen Durchgang von Lithiumionen und in bestimmten Fällen von zugehörigen Anionen während der Zyklisierung der Lithiumionen bereit. In verschiedenen Aspekten umfasst der Separator 26 einen Elektrolyten 30, der in bestimmten Aspekten auch in der negativen Elektrode 22 und/oder der positiven Elektrode 24 vorhanden sein kann, sodass ein durchgängiges Elektrolytnetz gebildet wird. Bei bestimmten Abwandlungen kann der Separator 26 aus einem Festkörperelektrolyten oder einem halbfesten Elektrolyten (z. B. einem Gelelektrolyten) bestehen. Zum Beispiel kann der Separator 26 aus einer Vielzahl von Festkörperelektrolytteilchen gebildet sein. Im Fall von Festkörperakkumulatoren und/oder halbfesten Akkumulatoren können die positive Elektrode 24 und/oder die negative Elektrode 22 (zusätzlich oder alternativ) eine Vielzahl von Festkörperelektrolytteilchen umfassen. Die Vielzahl von Festkörperelektrolytteilchen, die im Separator 26 enthalten sind oder diesen bilden, kann gleich oder verschieden von der Vielzahl von Festkörperelektrolytteilchen sein, die in der positiven Elektrode 24 und/oder der negativen Elektrode 22 enthalten sind.

[0039] Ein erster Stromkollektor 32 (z. B. ein negativer Stromkollektor) kann an oder in der Nähe der negativen Elektrode 22 angeordnet sein. Der erste Stromkollektor 32 kann zusammen mit der negativen Elektrode 22 als negative Elektrodenanordnung bezeichnet werden. Obwohl nicht dargestellt, weiß der Fachmann, dass bei bestimmten Abwandlungen negative Elektroden 22 (auch als negative elektroaktive Materialschichten bezeichnet) auf einer oder mehreren parallelen Seiten des ersten Stromkollektors 32 angeordnet sein können. Ebenso weiß der Fachmann, dass bei anderen Abwandlungen eine negative elektroaktive Materialschicht auf einer ersten Seite des ersten Stromkollektors 32 und eine positive elektroaktive Materialschicht auf einer zweiten Seite des ersten Stromkollektors 32 angeordnet sein kann. In jedem Fall kann der erste Stromkollektor 32 eine Metallfolie, ein Metallgitter oder -schirm oder ein Streckmetall sein, das Kupfer oder ein anderes geeignetes elektrisch leitfähiges, dem Fachmann bekanntes Material umfasst.

[0040] Ein zweiter Stromkollektor 34 (z. B. ein positiver Stromkollektor) kann an oder in der Nähe der positiven Elektrode 24 angeordnet sein. Der zweite Stromkollektor 34 kann zusammen mit der positiven Elektrode 24 als positive Elektrodenanordnung bezeichnet werden. Obwohl nicht dargestellt, weiß der Fachmann, dass bei bestimmten Abwandlungen positive Elektroden 24 (auch als positive elektroaktive Materialschichten bezeichnet) auf einer oder

mehreren parallelen Seiten des zweiten Stromkollektors 34 angeordnet sein können. Ebenso weiß der Fachmann, dass bei anderen Abwandlungen eine positive elektroaktive Materialschicht auf einer ersten Seite des zweiten Stromkollektors 34 und eine negative elektroaktive Materialschicht auf einer zweiten Seite des zweiten Stromkollektors 34 angeordnet sein kann. In jedem Fall kann der zweite Elektrodenstromkollektor 34 eine Metallfolie, ein Metallgitter oder -schirm oder ein Streckmetall sein, das Aluminium oder ein anderes geeignetes elektrisch leitfähiges, dem Fachmann bekanntes Material umfasst.

[0041] Der erste Stromkollektor 32 und der zweite Stromkollektor 34 können jeweils freie Elektronen sammeln und sie zu einem externen Stromkreis 40 und von diesem wegbewegen. Beispielsweise können ein unterbrechbarer externer Stromkreis 40 und eine Lastvorrichtung 42 die negative Elektrode 22 (über den ersten Stromkollektor 32) und die positive Elektrode 24 (über den zweiten Stromkollektor 34) verbinden. Der Akkumulator 20 kann während der Entladung durch reversierbare elektrochemische Reaktionen, die auftreten, wenn der externe Stromkreis 40 geschlossen ist (um die negative Elektrode 22 und die positive Elektrode 24 zu verbinden) und die negative Elektrode 22 ein geringeres Potenzial als die positive Elektrode aufweist, einen elektrischen Strom erzeugen. Die chemische Potenzialdifferenz zwischen der positiven Elektrode 24 und der negativen Elektrode 22 treibt die durch eine Reaktion, z. B. die Oxidation von interkaliertem Lithium, an der negativen Elektrode 22 erzeugten Elektronen durch den externen Stromkreis 40 in Richtung der positiven Elektrode 24. Lithiumionen, die ebenfalls an der negativen Elektrode 22 erzeugt werden, werden gleichzeitig durch den im Separator 26 enthaltenen Elektrolyten 30 zur positiven Elektrode 24 hin übertragen. Die Elektronen fließen durch den externen Stromkreis 40 und die Lithiumionen wandern durch den Separator 26, der den Elektrolyten 30 enthält, um an der positiven Elektrode 24 interkaliertes Lithium zu bilden. Wie oben erwähnt, befindet sich der Elektrolyt 30 in der Regel auch in der negativen Elektrode 22 und der positiven Elektrode 24. Der durch den externen Stromkreis 40 fließende elektrische Strom kann nutzbar gemacht und durch die Lastvorrichtung 42 geleitet werden, bis das Lithium in der negativen Elektrode 22 verbraucht ist und die Kapazität des Akkumulators 20 verringert ist.

[0042] Der Akkumulator 20 kann jederzeit aufgeladen oder wieder mit Strom versorgt werden, indem eine externe Stromquelle an den Lithium-Ionen-Akkumulator 20 angeschlossen wird, um die elektrochemischen Reaktionen umzukehren, die bei der Entladung des Akkumulators stattfinden. Der Anschluss einer externen elektrischen Stromquelle an den Akkumulator 20 fördert eine Reaktion, z. B. eine nichtspontane Oxidation von interkaliertem

Lithium, an der positiven Elektrode 24, sodass Elektronen und Lithiumionen erzeugt werden. Die Lithiumionen fließen durch den Elektrolyten 30 und durch den Separator 26 zur negativen Elektrode 22 zurück, um die negative Elektrode 22 mit Lithium (z. B. interkaliertem Lithium) zur Verwendung während des nächsten Akkumulatorentladevorgangs aufzufüllen. Ein vollständiger Entladevorgang, gefolgt von einem vollständigen Aufladevorgang, wird als ein Zyklus betrachtet, bei dem Lithiumionen zwischen der positiven Elektrode 24 und der negativen Elektrode 22 zyklisiert werden. Die externe Stromquelle, die zum Aufladen des Akkumulators 20 verwendet werden kann, kann je nach Größe, Auslegung und besonderer Endanwendung des Akkumulators 20 variieren. Einige besondere und beispielhafte externe Stromquellen sind insbesondere Wechselstrom-Gleichstrom-Wandler, die über eine Wandsteckdose an ein Wechselstromnetz angeschlossen sind, sowie Kfz-Wechselstromlichtmaschinen.

[0043] In vielen Lithium-Ionen-Akkumulator-Anordnungen werden jeweils der erste Stromkollektor 32, die negative Elektrode 22, der Separator 26, die positive Elektrode 24 und der zweite Stromkollektor 34 als relativ dünne Schichten (z. B. mit einer Dicke von einigen Mikrometern bis zu einem Bruchteil eines Millimeters oder weniger) hergestellt und in elektrisch parallel geschalteten Schichten zusammengebaut, um ein geeignetes Paket zu erhalten, das elektrische Energie und Leistung liefert. In verschiedenen Aspekten kann der Akkumulator 20 außerdem eine Vielzahl anderer Komponenten umfassen, die hier zwar nicht dargestellt, dem Fachmann aber dennoch bekannt sind. Zum Beispiel kann der Akkumulator 20 ein Gehäuse, Dichtungen, Polkappen, Laschen, Akkumulatorpole und andere herkömmliche Komponenten oder Materialien umfassen, die sich innerhalb des Akkumulators 20, einschließlich zwischen der negativen Elektrode 22, der positiven Elektrode 24 und/oder dem Separator 26 oder um diese herum, befinden. Der in **Fig. 1** gezeigte Akkumulator 20 umfasst einen Flüssigelektrolyten 30 und zeigt repräsentative Konzepte für den Akkumulatorbetrieb. Die vorliegende Technologie gilt jedoch auch für Festkörperakkumulatoren und/oder halbfeste Akkumulatoren, die Festkörperelektrolyten und/oder Festkörperelektrolytteilchen und/oder halbfeste Elektrolyten und/oder elektroaktive Festkörperteilchen umfassen, die, wie dem Fachmann bekannt ist, auch anders ausgeführt sein können.

[0044] Größe und Form des Akkumulators 20 können je nach spezieller Anwendung, für die er ausgelegt ist, variieren. Batteriebetriebene Fahrzeuge und tragbare Geräte der Unterhaltungselektronik sind zwei Beispiele, bei denen der Akkumulator 20 sehr wahrscheinlich nach unterschiedlichen Größen-, Kapazitäts- und Leistungsspezifikationen ausgelegt wäre. Der Akkumulator 20 kann auch mit anderen

ähnlichen Lithium-Ionen-Zellen oder -Akkumulatoren in Serie oder parallel geschaltet werden, um eine höhere Ausgangsspannung, Energie und Leistung zu erzeugen, wenn dies von der Lastvorrichtung 42 benötigt wird. Dementsprechend kann der Akkumulator 20 elektrischen Strom für eine Lastvorrichtung 42 erzeugen, die Teil des externen Stromkreises 40 ist. Die Lastvorrichtung 42 kann durch den elektrischen Strom gespeist werden, der durch den externen Stromkreis 40 fließt, wenn sich der Akkumulator 20 entlädt. Während es sich bei der elektrischen Lastvorrichtung 42 um eine beliebige Anzahl bekannter elektrisch betriebener Geräte handeln kann, umfassen einige besondere Beispiele einen Elektromotor für ein elektrifiziertes Fahrzeug, einen Laptop-Computer, einen Tablet-Computer, ein Mobiltelefon sowie schnurlose Elektrowerkzeuge oder -geräte. Die Lastvorrichtung 42 kann auch ein Stromerzeugungsgerät sein, das den Akkumulator 20 zum Zwecke der Speicherung elektrischer Energie auflädt.

[0045] Unter erneuter Bezugnahme auf **Fig. 1** können die positive Elektrode 24, die negative Elektrode 22 und der Separator 26 jeweils eine Elektrolytlösung oder das Elektrolytsystem 30 umfassen, z. B. in ihren Poren, die in der Lage sind, Lithiumionen zwischen der negativen Elektrode 22 und der positiven Elektrode 24 zu leiten. Jeder geeignete Elektrolyt 30, sei es in fester, flüssiger oder geliert Form, der in der Lage ist, Lithiumionen zwischen der negativen Elektrode 22 und der positiven Elektrode 24 zu leiten, kann in dem Lithium-Ionen-Akkumulator 20 verwendet werden. In bestimmten Aspekten kann der Elektrolyt 30 z. B. eine nichtwässrige flüssige Elektrolytlösung (z. B. $> 1 \text{ M}$) sein, die ein Lithiumsalz umfasst, das in einem organischen Lösungsmittel oder einem Gemisch organischer Lösungsmittel gelöst ist. In dem Akkumulator 20 können zahlreiche herkömmliche nichtwässrige flüssige Elektrolytlösungen 30 verwendet werden.

[0046] Eine nicht einschränkende Liste von Lithiumsalzen, die in einem organischen Lösungsmittel gelöst sein können, um die nichtwässrige flüssige Elektrolytlösung zu bilden, umfasst beispielsweise Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6), Lithiumperchlorat (LiClO_4), Lithiumtetrachloraluminat (LiAlCl_4), Lithiumiodid (LiI), Lithiumbromid (LiBr), Lithiumthiocyanat (LiSCN), Lithiumtetrafluorborat (LiBF_4), Lithiumtetraphenylborat ($\text{LiB}(\text{C}_6\text{H}_5)_4$), Lithium-bis(oxalato)borat ($\text{LiB}(\text{C}_2\text{O}_4)_2$) (LiBOB), Lithiumdifluoroxalatoborat ($\text{LiBF}_2(\text{C}_2\text{O}_4)$), Lithiumhexafluoroarsenat (LiAsF_6), Lithiumtrifluormethansulfonat (LiCF_3SO_3), Lithium-bis(trifluormethan)sulfonylimid ($\text{LiN}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2$), Lithium-bis(fluorosulfonyl)imid ($\text{LiN}(\text{FSO}_2)_2$) (LiSFI) und Kombinationen davon. Diese und andere ähnliche Lithiumsalze können in einer Vielzahl von nichtwässrigen aprotischen organischen Lösungsmitteln gelöst sein, insbesondere in

verschiedenen Alkylcarbonaten, wie z. B. zyklischen Carbonaten (z. B. Ethylencarbonat (EC), Propylencarbonat (PC), Butylencarbonat (BC), Fluorethylencarbonat (FEC), Vinylencarbonat (VC) und dergleichen), linearen Carbonaten (z. B. Dimethylcarbonat (DMC), Diethylcarbonat (DEC), Ethylmethylcarbonat (EMC) und dergleichen), aliphatischen Carbonsäureestern (z. B. Methylformiat, Methylacetat, Methylpropionat und dergleichen), γ -Lactonen (z. B. γ -Butyrolacton, γ -Valerolacton und dergleichen), Kettenstruktur-Ethern (z. B. 1,2-Dimethoxyethan, 1-2-Diethoxyethan, Ethoxymethoxyethan und dergleichen), cyclischen Ethern (z. B. Tetrahydrofuran, 2-Methyltetrahydrofuran, 1,3-Dioxolan und dergleichen), Schwefelverbindungen (z. B. Sulfolan) und Kombinationen davon.

[0047] Der Separator 26 kann ein poröser Separator sein. In bestimmten Fällen kann der Separator 26 beispielsweise ein mikroporöser polymerer Separator sein, der z. B. ein Polyolefin umfasst. Das Polyolefin kann ein Homopolymer (von einem einzigen Monomerbestandteil abgeleitet) oder ein Heteropolymer (von mehr als einem Monomerbestandteil abgeleitet) sein, das entweder linear oder verzweigt sein kann. Ist ein Heteropolymer von zwei Monomerbestandteilen abgeleitet, kann das Polyolefin jede beliebige Copolymer-Kettenanordnung annehmen, einschließlich derjenigen eines Blockcopolymers oder eines statistischen Copolymers. Ist das Polyolefin ein Heteropolymer, das von mehr als zwei Monomerbestandteilen abgeleitet ist, kann es sich ebenfalls um ein Blockcopolymer oder ein statistisches Copolymer handeln. In bestimmten Aspekten kann es sich bei dem Polyolefin um Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) oder ein Gemisch aus Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) oder um mehrschichtige strukturierte poröse Filme aus PE und/- oder PP handeln. Im Handel erhältliche Membranen 26 für poröse Polyolefin-Separatoren umfassen CELGARD® 2500 (einschichtiger Polypropylen-Separator) und CELGARD® 2320 (dreischichtiger Polypropylen-/Polyethylen-/Polypropylen-Separator), die von Celgard LLC angeboten werden.

[0048] Ist der Separator 26 ein mikroporöser polymerer Separator, kann es sich um ein einschichtiges oder ein mehrschichtiges Laminat handeln, das entweder im Trocken- oder Nassverfahren hergestellt werden kann. Zum Beispiel kann in bestimmten Fällen eine einzelne Schicht des Polyolefins den gesamten Separator 26 bilden. Bei anderen Aspekten kann der Separator 26 eine faserige Membran mit einer Fülle von Poren sein, die sich zwischen den sich gegenüberliegenden Oberflächen erstrecken, und beispielsweise eine durchschnittliche Dicke von weniger als einem Millimeter aufweisen. Als weiteres Beispiel können jedoch mehrere diskrete Schichten aus gleichartigen oder verschiedenen Polyolefinen zusammengesetzt sein, um den mikroporösen poly-

meren Separator 26 zu bilden. Der Separator 26 kann neben dem Polyolefin auch andere Polymere umfassen, wie z. B. Polyethylenterephthalat (PET), Polyvinylidenfluorid (PVdF), Polyamid, Polyimid, Polyamid-Polyimid-Copolymer, Polyetherimid und/oder Zellulose oder jedes andere Material, das geeignet ist, die erforderliche poröse Struktur zu erzeugen. Die Polyolefinschicht und alle anderen optionalen Polymerschichten können ferner als Faserschicht in den Separator 26 aufgenommen sein, um dazu beizutragen, dem Separator 26 geeignete Struktur- und Porositätseigenschaften zu verleihen.

[0049] In bestimmten Aspekten kann der Separator 26 ferner ein keramisches Material und/oder ein hitzebeständiges Material umfassen. Beispielsweise kann der Separator 26 auch mit dem keramischen Material und/oder dem hitzebeständigen Material gemischt werden, oder eine oder mehrere Oberflächen des Separators 26 können mit dem keramischen Material und/oder dem hitzebeständigen Material beschichtet werden. Bei bestimmten Abwandlungen kann das keramische Material und/oder das hitzebeständige Material auf einer oder mehreren Seiten des Separators 26 angeordnet sein. Das keramische Material kann ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliciumdioxid (SiO_2) und Kombinationen davon. Das hitzebeständige Material kann ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus: Nomex, Aramid und Kombinationen davon.

[0050] Es sind verschiedene herkömmliche Polymere und handelsübliche Produkte zur Bildung des Separators 26 sowie die vielen Herstellungsverfahren, die zur Herstellung eines solchen mikroporösen Polymereseparators 26 eingesetzt werden können, denkbar. In jedem Fall kann der Separator 26 eine durchschnittliche Dicke von größer/gleich etwa 1 Mikrometer (μm) bis kleiner/gleich etwa 50 μm und in bestimmten Fällen optional größer/gleich etwa 1 μm bis kleiner/gleich etwa 20 μm aufweisen.

[0051] In verschiedenen Aspekten können der poröse Separator 26 und/oder der Elektrolyt 30, der in dem porösen Separator 26 gemäß **Fig. 1** angeordnet ist, durch einen Festkörperelektrolyten („SSE“) und/oder einen halbfesten Elektrolyten (z. B. Gel) ersetzt werden, der sowohl als Elektrolyt als auch als Separator fungiert. Beispielsweise kann der Festkörperelektrolyt und/oder der halb feste Elektrolyt zwischen der positiven Elektrode 24 und der negativen Elektrode 22 angeordnet sein. Der Festkörperelektrolyt und/oder der halb feste Elektrolyt ermöglicht den Transfer von Lithiumionen und sorgt gleichzeitig für eine mechanische Trennung und elektrische Isolierung zwischen der negativen und der positiven Elektrode 22, 24. Als nicht einschränkendes Beispiel kann der Festkörperelektrolyt und/oder halb feste Elektrolyt eine Vielzahl von Füllstoffen umfassen,

wie etwa $\text{LiTi}_2(\text{PO}_4)_3$, $\text{Li-Ge}_2(\text{PO}_4)_3$, $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$, $\text{Li}_3\text{xLa}_{2/3-\text{x}}\text{TiO}_3$, Li_3PO_4 , Li_3N , Li_4GeS_4 , $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$, $\text{Li}_2\text{S-P}_2\text{S}_5$, $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Cl}$, $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{Br}$, $\text{Li}_6\text{PS}_5\text{I}$, Li_3OCl , $\text{Li}_{2,99}\text{Ba}_{0,005}\text{ClO}$ oder Kombinationen davon. Der halb feste Elektrolyt kann einen Polymerwirt und einen Flüssigelektrolyten umfassen. Der Polymerwirt kann ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus Polyvinylidenfluorid (PVDF), Polyvinylidenfluorid-Hexafluorpropylen (PVDF-HFP), Polyethylenoxid (PEO), Polypropylenoxid (PPO), Polyacrylnitril (PAN), Polymethacrylnitril (PMAN), Polymethylmethacrylat (PMMA), Carboxymethylcellulose (CMC), Polyvinylalkohol (PVA), Polyvinylpyrrolidon (PVP) und Kombinationen davon. Bei bestimmten Abwandlungen kann sich der halb feste oder Gelelektrolyt auch in der positiven Elektrode 24 und/oder den negativen Elektroden 22 befinden.

[0052] Die negative Elektrode 22 wird aus einem Lithiumwirts material gebildet, das in der Lage ist, als Minuspol eines Lithium-Ionen-Akkumulators zu fungieren. In verschiedenen Aspekten kann die negative Elektrode 22 durch eine Vielzahl von negativen elektroaktiven Materialteilchen festgelegt sein. Die negativen elektroaktiven Materialteilchen können in einer oder mehreren Schichten angeordnet sein, um die dreidimensionale Struktur der positiven Elektrode 22 festzulegen. Der Elektrolyt 30 kann z. B. nach dem Zusammenbau der Zelle eingebracht werden und in Poren der negativen Elektrode 22 enthalten sein (d. h. in den Zwischenräumen zwischen den negativen elektroaktiven Materialteilchen). Beispielsweise kann die negative Elektrode 22 bei bestimmten Abwandlungen eine Vielzahl von Festkörperelektrolytteilchen umfassen, die mit den negativen elektroaktiven Materialteilchen dispergiert sind. In jedem Fall kann die negative Elektrode 22 (einschließlich der einen oder der mehreren Schichten) eine Dicke von größer/gleich etwa 30 μm bis kleiner/gleich etwa 500 μm und in bestimmten Aspekten optional größer/gleich etwa 50 μm bis kleiner/gleich etwa 100 μm aufweisen.

[0053] Bei bestimmten Abwandlungen können die negativen elektroaktiven Materialteilchen siliciumhaltige (oder siliciumbasierte) elektroaktive Materialien umfassen. Die siliciumhaltigen elektroaktiven Materialien können Silicium, Lithium-Silicium-Legierungen und andere siliciumhaltige binäre und/oder ternäre Legierungen umfassen. Bei bestimmten Abwandlungen kann das siliciumhaltige elektroaktive Material zum Beispiel elementares Silicium (Si), verschiedene Lithiumsilicid-Phasen (Li_xSi_y , wobei $0 < x < 17$ und $1 < y < 4$), in eine Siliciumoxid-Matrix (SiO_x , wobei $0 < x < 2$) eingebettete Silicium-Nanokörner, lithiumdotiertes Siliciumoxid (Li_ySiO_x , wobei $0 < x < 2$ und $1 < y < 3$) und Kombinationen davon umfassen.

[0054] Bei bestimmten Abwandlungen kann die negative Elektrode 22 eine Verbundelektrode mit

einer Kombination aus negativen elektroaktiven Materialien sein. Die negative Elektrode 22 kann zum Beispiel ein erstes negatives elektroaktives Material und ein zweites negatives elektroaktives Material umfassen. Ein Verhältnis zwischen dem ersten negativen elektroaktiven Material und dem zweiten negativen elektroaktiven Material kann größer/gleich etwa 5:95 bis kleiner/gleich etwa 95:5 sein. Bei bestimmten Abwandlungen kann das erste negative elektroaktive Material ein volumenvergrößerndes Material sein, das beispielsweise Silicium enthält, und das zweite negative elektroaktive Material kann ein kohlenstoffhaltiges Material (z. B. Graphit, Hartkohle und/oder Weichkohle) umfassen. Bei bestimmten Abwandlungen kann die negative Elektrode 22 größer/gleich etwa 10 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 50 Gew.-% des siliciumhaltigen elektroaktiven Materials und größer/gleich etwa 40 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 90 Gew.-% und in bestimmten Aspekten optional größer/gleich etwa 40 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 80 Gew.-% des kohlenstoffhaltigen elektroaktiven Materials umfassen. Das negative elektroaktive Material kann beispielsweise einen auf kohlenstoffhaltigem Silicium basierenden Verbundwerkstoff mit z. B. etwa 10 Gew.-% eines gebundenen Nano-Silizium-Materials (z. B. SiO_x , wobei $0 \leq x \leq 2$) und etwa 90 Gew.-% des kohlenstoffhaltigen Materials (z. B. Graphit) umfassen.

[0055] In verschiedenen Aspekten kann das negative elektroaktive Material mit einem elektronisch leitfähigen Material (d. h. einem leitfähigen Zusatzstoff) vermischt sein, das einen elektronenleitenden Pfad bereitstellt. Zum Beispiel kann die negative Elektrode 22 größer/gleich etwa 80 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 97 Gew.-% des negativen elektroaktiven Materials und größer/gleich etwa 0,1 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 5 Gew.-% und in bestimmten Aspekten optional größer/gleich etwa 1 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 5 Gew.-% des elektronisch leitfähigen Materials umfassen. Beispiele für leitfähige Zusatzstoffe sind Materialien auf Kohlenstoffbasis, pulverförmiges Nickel oder andere Metallteilchen oder leitfähige Polymere. Materialien auf Kohlenstoffbasis sind beispielsweise Graphitpartikel, Acetylen-schwarz (wie etwa KETCHEN™-Schwarz oder DENKA™-Schwarz), Kohlenstoff-Nanofasern und -Nanoröhren (z. B. einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren (SWCNT), mehrwandige Kohlenstoff-Nanoröhren (MWCNT)), Graphen (z. B. Graphenplättchen (GNP), oxidierte Graphenplättchen), leitfähige Industrieruße (wie SuperP (SP)) und dergleichen. Beispiele für leitfähige Polymere sind Polyanilin (PANi), Polythiophen, Polyacetylen, Polypyrrol (PPy) und dergleichen.

[0056] In verschiedenen Aspekten kann das negative elektroaktive Material (und auch das elektronisch leitfähige Material) mit einem Polyacrylatbindemittel vermischt sein. Zum Beispiel kann die negative

Elektrode 22 größer/gleich etwa 0,5 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 5 Gew.-%, optional größer/gleich etwa 1 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 4 Gew.-% und in bestimmten Aspekten optional größer/gleich etwa 2 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 4 Gew.-% des Polyacrylatbindemittels umfassen. Das Polyacrylatbindemittel kann eine begrenzte Quellung aufweisen (zum Beispiel kann lithiiertes Polyacrylatbindemittel mit einem Acrylamid-Copolymer (LiPAA-1 genannt) eine Quellung von etwa 5,0 % erfahren, Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR) kann eine Quellung von etwa 10,0 % erfahren und lithiiertes Polyacrylatbindemittel (LiPAA-2 genannt) kann eine Quellung von etwa 29,2 % erfahren), wenn es mit einer nichtwässrigen flüssigen Elektrolytlösung (z. B. Elektrolyt 30) in Kontakt gebracht wird, sodass mehr Volumen der Elektrolytlösung für den Transport zur Verfügung steht und sich die mechanischen Eigenschaften der negativen Elektrode 22 nur begrenzt verschlechtern. Das Polyacrylatbindemittel kann auch eine bessere Haftung mit den negativen elektroaktiven Materialien und auch mit dem elektronisch leitfähigen Material aufweisen.

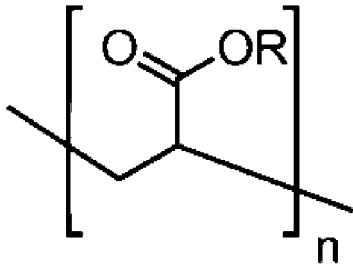
[0057] Das Polyacrylatbindemittel kann beispielsweise Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) und Kombinationen davon umfassen.

[0058] Bei bestimmten Abwandlungen kann die Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure) und/oder Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) mit Magnesium und/oder Calcium fraktioniert neutralisiert sein. Bei bestimmten Abwandlungen kann die Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure) und/oder Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) mit Magnesium oder Calcium fraktioniert neutralisiert sein. Bei bestimmten Abwandlungen kann die Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure) und/oder Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) mit Magnesium oder Calcium fraktioniert neutralisiert sein.

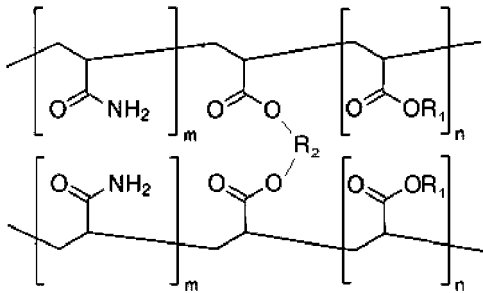
[0059] Bei bestimmten Abwandlungen kann die Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure) und/oder Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) geringfügig mit Lithium, Natrium und/oder Kalium neutralisiert sein. Bei bestimmten Abwandlungen kann die Polyacrylsäure, Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure) und/oder Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) geringfügig mit Lithium, Natrium oder Kalium neutralisiert sein. Bei bestimmten Abwandlungen kann die Poly(acryl-

säure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-coacrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure) und/oder Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) geringfügig mit Lithium, Natrium und Kalium neutralisiert sein.

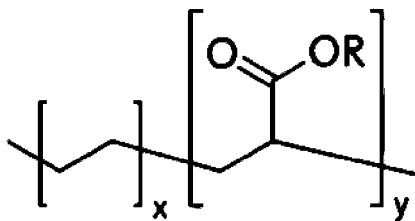
[0060] Das Polyacrylatbindemittel kann zum Beispiel



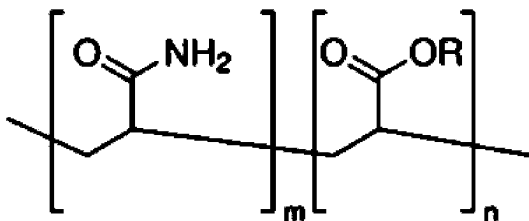
R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca



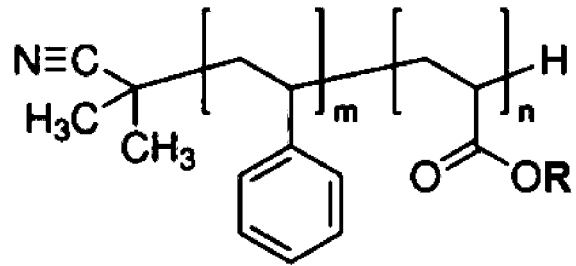
R₁ = H, Li, Na, or K; R₂ = Mg or Ca



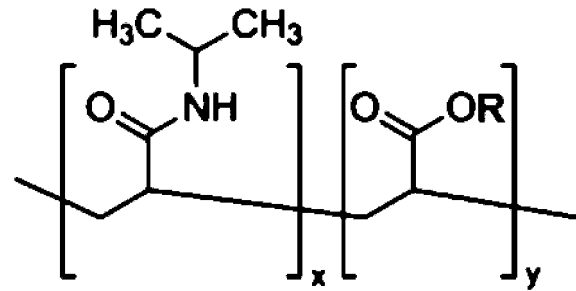
R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca



R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca



R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca



R = H, Li, Na, K, Mg, or Ca

und Kombinationen davon umfassen.

[0061] In verschiedenen Aspekten kann das Polyacrylatbindemittel ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus: Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) sowie Kombinationen davon.

[0062] In verschiedenen Aspekten kann das Polyacrylatbindemittel ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus: Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-coacrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium oder Kalium fraktioniert neutralisierte Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), Poly(N-isopropylacrylamid-co-acryl-

säure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) sowie Kombinationen davon.

[0063] In verschiedenen Aspekten kann das Polyacrylatbindemittel ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus: Poly(acrylsäure), mit Magnesium und/oder Calcium und/oder Lithium und/oder Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), mit Magnesium und/oder Calcium und/oder Lithium und/oder Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium und/oder Calcium und/oder Lithium und/oder Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), mit Magnesium und/oder Calcium und/oder Lithium und/oder Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium und/oder Calcium und/oder Lithium und/oder Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(N-isopropylacrylamid-co-acrylsäure) sowie Kombinationen davon.

[0064] Bei jeder Abwandlung kann das Polyacrylatbindemittel ein Molekulargewicht (z. B. einen gewichteten Mittelwert) von größer/gleich etwa 100.000 mol/g bis kleiner/gleich etwa 5.000.000 mol/g, optional größer/gleich etwa 200.000 mol/g bis kleiner/gleich etwa 500.000 mol/g und in bestimmten Aspekten optional größer/gleich etwa 250.000 mol/g bis kleiner/gleich etwa 500.000 mol/g aufweisen. Das Polyacrylatbindemittel kann eine begrenzte Quellung aufweisen, wenn es mit dem Elektrolyten 30 in Kontakt kommt.

[0065] Die positive Elektrode 24 ist aus einem aktiven Material auf Lithiumbasis gebildet, das in der Lage ist, einer Lithium-Interkalation und -Deinterkalation, einem Legier- und Entlegiervorgang oder einem Beschichtungs- und Ablösevorgang unterzogen zu werden, während es als Pluspol eines Lithium-Ionen-Akkumulators fungiert. Die positive Elektrode 24 kann durch eine Vielzahl von elektroaktiven Materialteilchen festgelegt sein. Solche positiven elektroaktiven Materialteilchen können in einer oder mehreren Schichten angeordnet sein, um die dreidimensionale Struktur der positiven Elektrode 24 festzulegen. Der Elektrolyt 30 kann z. B. nach dem Zusammenbau der Zelle eingebracht werden und in Poren der positiven Elektrode 24 enthalten sein. Bei bestimmten Abwandlungen kann die positive Elektrode 24 eine Vielzahl von Festkörperelektrolytteilchen umfassen. In jedem Fall kann die positive Elektrode 24 eine durchschnittliche Dicke von größer/gleich etwa 1 µm bis kleiner/gleich etwa 500 µm und bei bestimmten Aspekten optional größer/

gleich etwa 10 µm bis kleiner/gleich etwa 200 µm aufweisen.

[0066] In verschiedenen Aspekten umfasst das positive elektroaktive Material ein Schichtoxid, dargestellt durch LiMeO_2 , wobei Me ein Übergangsmetall wie Kobalt (Co), Nickel (Ni), Mangan (Mn), Eisen (Fe), Aluminium (Al), Vanadium (V) oder Kombinationen davon ist. Bei anderen Abwandlungen umfasst das positive elektroaktive Material ein Oxid vom Olivin-Typ, dargestellt durch LiMePO_4 , wobei Me ein Übergangsmetall wie Kobalt (Co), Nickel (Ni), Mangan (Mn), Eisen (Fe), Aluminium (Al), Vanadium (V) oder Kombinationen davon ist. Bei weiteren Abwandlungen umfasst das positive elektroaktive Material ein Oxid vom monoklinen Typ, dargestellt durch $\text{Li}_3\text{Me}_2(\text{PO}_4)_3$, wobei Me ein Übergangsmetall wie Kobalt (Co), Nickel (Ni), Mangan (Mn), Eisen (Fe), Aluminium (Al), Vanadium (V) oder Kombinationen davon ist. Bei weiteren Abwandlungen umfasst das positive elektroaktive Material ein Oxid vom Spinell-Typ, dargestellt durch LiMe_2O_4 , wobei Me ein Übergangsmetall wie Kobalt (Co), Nickel (Ni), Mangan (Mn), Eisen (Fe), Aluminium (Al), Vanadium (V) oder Kombinationen davon ist. Bei weiteren Abwandlungen umfasst das positive elektroaktive Material einen Tavorit, dargestellt durch $\text{LiMe-SO}_4\text{F}$ und/oder LiMePO_4F , wobei Me ein Übergangsmetall wie Kobalt (Co), Nickel (Ni), Mangan (Mn), Eisen (Fe), Aluminium (Al), Vanadium (V) oder Kombinationen davon ist. Bei weiteren Abwandlungen kann die positive Elektrode 24 eine Verbundelektrode mit einer Kombination aus positiven elektroaktiven Materialien sein. Die positive Elektrode 24 kann zum Beispiel ein erstes positives elektroaktives Material und ein zweites elektroaktives Material umfassen. Ein Verhältnis zwischen dem ersten positiven elektroaktiven Material und dem zweiten positiven elektroaktiven Material kann größer/gleich etwa 5:95 bis kleiner/gleich etwa 95:5 sein. Bei bestimmten Abwandlungen können das erste und das zweite elektroaktive Material unabhängig voneinander aus einem oder mehreren Schichtoxiden, einem oder mehreren Oxiden vom Olivin-Typ, einem oder mehreren Oxiden vom monoklinen Typ, einem oder mehreren Oxiden vom Spinell-Typ, einem oder mehreren Tavoriten oder Kombinationen davon ausgewählt sein.

[0067] Bei jeder Abwandlung kann das positive elektroaktive Material optional mit einem elektronisch leitfähigen Material (d. h. einem leitfähigen Zusatzstoff), das einen elektronenleitenden Pfad bereitstellt, und/oder einem polymeren Bindemittel, das die strukturelle Integrität der positiven Elektrode 24 verbessert, vermischt (z. B. aufgeschlämmt) sein. Beispielsweise kann die positive Elektrode 24 größer/gleich etwa 70 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 98 Gew.-% und in bestimmten Aspekten optional größer/gleich etwa 80 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 97 Gew.-% des positiven elektroaktiven Materials, grö-

ßer/gleich 0 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 30 Gew.-% und in bestimmten Aspekten optional größer/gleich etwa 0,5 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 10 Gew.-% des elektronisch leitenden Materials und größer/gleich 0 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 20 Gew.-% und in bestimmten Aspekten optional größer/gleich etwa 0,5 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 10 Gew.-% des polymeren Bindemittels umfassen. Der in der positiven Elektrode 24 enthaltene leitfähige Zusatzstoff kann mit dem in der negativen Elektrode 22 enthaltenen leitfähigen Zusatzstoff identisch sein oder sich davon unterscheiden. Wie bei der negativen Elektrode 22 kann das in der positiven Elektrode 24 enthaltene Bindemittel ein Polyacrylatbindemittel sein. Das in der positiven Elektrode 24 enthaltene Polyacrylatbindemittel kann mit dem in der negativen Elektrode 22 enthaltenen Polyacrylatbindemittel identisch sein oder sich davon unterscheiden.

[0068] In verschiedenen Aspekten sieht die vorliegende Offenbarung Verfahren zur Herstellung von siliciumhaltigen Elektroden wie der in **Fig. 1** dargestellten negativen Elektrode 22 vor. Siliciumhaltige Elektroden sind oft schwierig herzustellen, weil elementares Silicium bei der Aufschlammung leicht mit Wasser reagiert und dabei Wasserstoffgas bildet, was zur Bildung von entsprechenden Elektroden führt, die eine ungleichmäßige Topografie (z. B. Streifen- oder Kordmuster) mit Nadellöchern aufweisen, und auch zu ungleichmäßigen Stromdichten in Zellen, die die gebildeten Elektroden umfassen. Darüber hinaus weisen Aufschlammungen für die Herstellung siliciumhaltiger Elektroden häufig eine schlechte Lagerstabilität auf, da sich Viskosität und Elektrodenstruktur durch Sedimentation und Verdünnung verändern. Die vorliegende Offenbarung schlägt ein Niedrigtemperatur-Aufschlammungsverfahren vor, das die Bildung von Wasserstoffgas einschränkt, und es hat sich (wie weiter unten beschrieben) auch gezeigt, dass das Vorhandensein von Polyacrylatbindemitteln in der Elektrodenaufschlammung die Lagerstabilität der elektrodenbildenden Aufschlammung verbessert.

[0069] In verschiedenen Aspekten umfasst das Niedrigtemperatur-Aufschlammungsverfahren das Aufbringen einer elektrodenbildenden Aufschlammung mit einer Temperatur von größer/gleich etwa 4 °C bis kleiner/gleich etwa 15 °C auf oder in der Nähe einer oder mehrerer Oberflächen eines Stromkollektors (wie des in **Fig. 1** dargestellten Stromkollektors 32). Bei bestimmten Abwandlungen kann das Verfahren auch beinhalten, die elektrodenbildende Aufschlammung vor Aufbringen auf oder in der Nähe der einen oder mehreren Oberflächen des Stromkollektors für eine Haltedauer auf Temperatur zu halten. Bei bestimmten Abwandlungen kann die elektrodenbildende Aufschlammung beispielsweise ab dem ersten Kontakt der Aufschlammungskomponenten (z. B. des siliciumhaltigen elektroaktiven

Materials und/oder des leitfähigen Zusatzstoffs und/oder des Polyacrylatbindemittels und eines Lösungsmittels wie Wasser) bis zum und während des Aufbringens der elektrodenbildenden Aufschlammung auf den Stromkollektor zur Bildung der Elektrode bei niedriger Temperatur gehalten werden. Das Niedrigtemperaturverfahren kann die Blasenbildung unterdrücken, da die chemische Reaktionsgeschwindigkeit sinkt und die Gaslöslichkeit sowie die Oberflächenspannung des Wassers bei niedrigeren Temperaturen aufgrund von Viskositätsänderungen zunehmen. Bei bestimmten Abwandlungen kann sich die chemische Reaktionsgeschwindigkeit pro 10°C-Änderung um einen Faktor von etwa 2 verringern. Nur zum Vergleich zeigt **Fig. 2A** eine Top-Down-Ansicht einer siliciumhaltigen Elektrode 300, die mit Hilfe eines Aufschlammungsverfahrens bei Raumtemperatur (z. B. etwa 25 °C) hergestellt wurde, und **Fig. 2B** zeigt eine Top-Down-Ansicht einer siliciumhaltigen Elektrode 350, die mit Hilfe eines weiter oben beschriebenen Herstellungsverfahrens mit einer Niedrigtemperatur-Aufschlammung (z. B. größer/gleich etwa 4 °C bis kleiner/gleich etwa 15 °C) hergestellt wurde. Wie dargestellt, weist die siliciumhaltige Elektrode 300 ein Streifen- oder Kordmuster auf, während die siliciumhaltige Elektrode 350 eine glatte Oberfläche hat.

[0070] Bestimmte Merkmale der vorliegenden Technologie werden in den folgenden, nicht einschränkenden Beispielen näher erläutert.

Beispiel 1

[0071] Beispielhafte Akkumulatoren und Akkumulatorzellen können gemäß verschiedenen Aspekten der vorliegenden Offenbarung hergestellt werden. Bereitgestellt wird etwa eine beispielhafte Aufschlammung 410 mit einem Polyacrylatbindemittel. Zum Vergleich wird eine Vergleichsaufschlammung 450 mit einem Styrol-Butadienkautschuk (SBR) als Bindemittel bereitgestellt. Die beispielhafte Aufschlammung 410 und die Vergleichsaufschlammung 450 können jeweils etwa 3,9 Gew.-% des jeweiligen Bindemittels zusammen mit etwa 95 Gew.-% eines siliciumhaltigen elektroaktiven Materials und etwa 1,1 Gew.-% eines leitfähigen Zusatzstoffs (z. B. etwa 1 Gew.-% SuperP und etwa 0,1 % einwandige Kohlenstoff-Nanoröhren (SWCNT)) umfassen. Die beispielhafte Aufschlammung 410 und die Vergleichsaufschlammung 450 können jeweils einen Feststoffgehalt von etwa 45 % aufweisen.

[0072] **Fig. 3A** ist eine grafische Darstellung, die Viskositätsänderungen der beispielhaften Aufschlammung 410 zeigt, wobei die x-Achse 400 die Scherrate (s^{-1}) und die y-Achse 402 die Viskosität (Pa s) darstellt. Wie dargestellt, ändert sich die Viskosität während einer vierundzwanzigstündigen Mischzeit kaum. Die beispielhafte Aufschlammung

410 mit dem Polyacrylatbindemittel weist eine verbesserte Lagerstabilität auf.

[0073] Fig. 3B ist eine grafische Darstellung, die Viskositätsänderungen der Vergleichsaufschlämmung 450 zeigt, wobei die x-Achse 460 die Scherrate (s^{-1}) und die y-Achse 462 die Viskosität (Pa s) darstellt. Wie dargestellt (Linie 452 steht für null Stunden, Linie 454 für fünf Stunden und Linie 456 für vierundzwanzig Stunden), nimmt die Viskosität der Vergleichsaufschlämmung 450 während der vierundzwanzigstündigen Mischzeit allmählich ab.

Beispiel 2

[0074] Beispielhafte Akkumulatoren und Akkumulatorzellen können gemäß verschiedenen Aspekten der vorliegenden Offenbarung hergestellt werden. Eine beispielhafte Zelle 510 kann zum Beispiel eine siliciumhaltige negative Elektrode enthalten, die ein Polyacrylatbindemittel gemäß verschiedenen Aspekten der vorliegenden Offenbarung umfasst. Zum Vergleich: Eine beispielhafte Vergleichszelle 520 mit einer siliciumhaltigen negativen Elektrode, die einen Styrol-Butadienkautschuk (SBR) als Bindemittel enthält. Die negativen Elektroden der beispielhaften Zelle 510 und der Vergleichszelle 520 können gemischte Anoden sein, die beispielsweise etwa 20 Gew.-% Silicium und etwa 80 Gew.-% Graphit enthalten. Die negativen Elektroden der beispielhaften Zelle 510 und der Vergleichszelle 520 können jeweils eine Ladung von etwa $5,5 \text{ mAh/cm}^2$ aufweisen. Die beispielhafte Zelle 510 und die Vergleichszelle 520 können jeweils auch eine Kathode enthalten, die z. B. LiNiCoMnAlO_2 (NCMA) enthält und eine Ladung von etwa 5 mAh/cm^2 aufweist. Die beispielhafte Zelle 510 und die Vergleichszelle 520 können jeweils auch einen Elektrolyten enthalten, der z. B. 1 M Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) in einem Lösungsmittelgemisch enthält. Das Lösungsmittelgemisch kann Ethylencarbonat (EC) und Dimethylcarbonat (DMC) sowie etwa 1 Gew.-% Vinylencarbonat (VC) und etwa 2 Gew.-% Fluorethylencarbonat (FEC) enthalten,

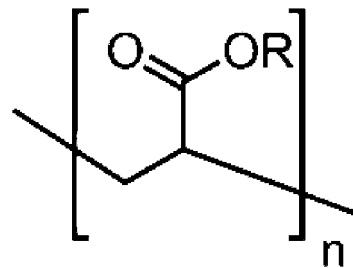
[0075] Fig. 4 ist eine grafische Darstellung, die die Ladungserhaltung der beispielhaften Zelle 510 im Vergleich zur Vergleichszelle 520 zeigt, wobei die x-Achse 500 die Anzahl der Zyklen und die y-Achse 502 die Ladungserhaltung (%) darstellt. Wie dargestellt, hat die beispielhafte Zelle 510 nach 500 Zyklen etwa 90 % der ursprünglichen Kapazität. Im Gegensatz dazu hat die Vergleichszelle 520 nach 500 Zyklen nur noch etwa 85 % der ursprünglichen Kapazität. Nach 500 Zyklen ist der Kapazitätsverlust der beispielhaften Zelle 510 geringer als der Kapazitätsverlust der Vergleichszelle.

[0076] Die vorstehende Beschreibung der Ausführungsformen dient der Veranschaulichung und

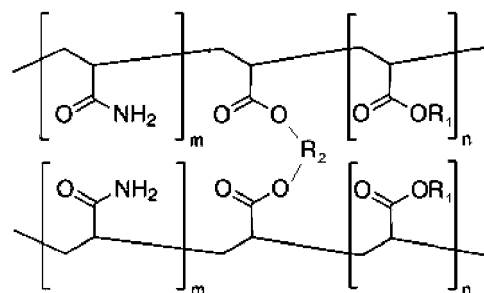
Beschreibung. Sie ist weder vollständig, noch soll sie die Offenbarung einschränken. Einzelne Elemente oder Merkmale einer bestimmten Ausführungsform sind im Allgemeinen nicht auf diese beschränkt, sondern sind gegebenenfalls austauschbar und können in einer ausgewählten Ausführungsform verwendet werden, auch wenn sie nicht konkret dargestellt oder beschrieben sind. Sie können auch auf vielerlei Art und Weise abgewandelt werden. Solche Abwandlungen sind nicht als Abweichung von der Offenbarung zu verstehen, sondern sind vielmehr in den Anwendungsbereich der Offenbarung einzubeziehen.

Patentansprüche

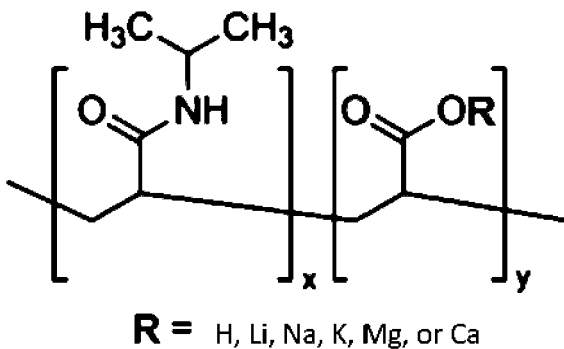
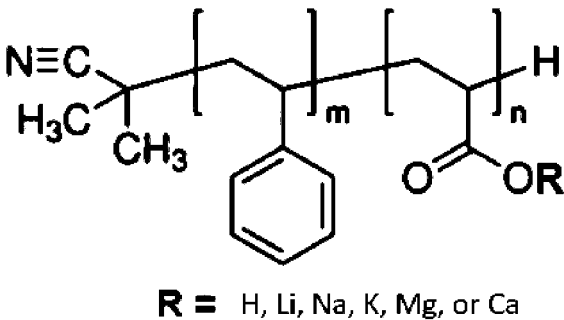
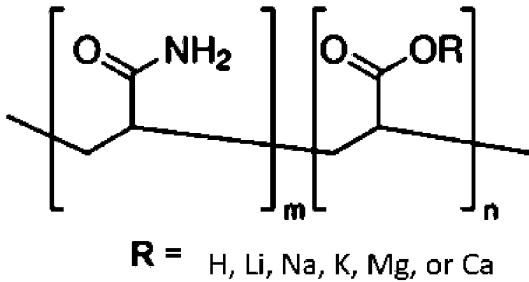
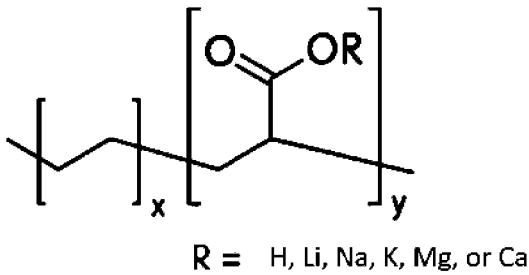
1. Elektrochemische Zelle, die Lithiumionen zyklisiert, wobei die elektrochemische Zelle umfasst: eine erste Elektrode, die ein positives elektroaktives Material umfasst; eine zweite Elektrode, die ein negatives elektroaktives Material und ein Polyacrylatbindemittel umfasst, das aus einem Monomer gebildet wird, das ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus:



$R = \text{H, Li, Na, K, Mg, or Ca}$



$R_1 = \text{H, Li, Na, or K}; R_2 = \text{Mg or Ca}$



und Kombinationen davon; und eine Trennschicht, die zwischen der ersten und der zweiten Elektrode angeordnet ist.

2. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 1, wobei das Polyacrylatbindemittel ein Molekulargewicht von größer/gleich etwa 250.000 mol/g bis kleiner/gleich etwa 500.000 mol/g aufweist.

3. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 1, wobei die zweite Elektrode größer/gleich etwa 0,5 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 5 Gew.-% des Polyacrylatbindemittels umfasst.

4. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 1, wobei die zweite Elektrode außerdem einen leitfähigen Zusatzstoff umfasst.

5. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 4, wobei die zweite Elektrode größer/gleich etwa 0,1 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 5 Gew.-% eines leitfähigen Zusatzstoffs umfasst.

6. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 1, wobei das negative elektroaktive Material ein siliciumhaltiges elektroaktives Material umfasst.

7. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 6, wobei die zweite Elektrode größer/gleich etwa 10 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 50 Gew.-% des siliciumhaltigen elektroaktiven Materials umfasst.

8. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 6, wobei das negative elektroaktive Material ferner ein kohlenstoffhaltiges elektroaktives Material umfasst.

9. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 8, wobei die zweite Elektrode größer/gleich etwa 40 Gew.-% bis kleiner/gleich etwa 80 Gew.-% des kohlenstoffhaltigen elektroaktiven Materials umfasst.

10. Elektrochemische Zelle nach Anspruch 1, wobei das Polyacrylatbindemittel ein erstes Polyacrylatbindemittel ist und die erste Elektrode ferner ein zweites Polyacrylatbindemittel umfasst, das ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus: Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylsäure), Poly(ethylen-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(ethylen-co-acrylsäure), Poly(acrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(acrylamid-co-acrylsäure), Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Polystyrol-Block-Poly(acrylsäure), Poly(N-iso-propylacrylamid-co-acrylsäure), mit Magnesium, Calcium, Lithium, Natrium und/oder Kalium fraktioniert neutralisierte Poly(N-iso-propylacrylamid-co-acrylsäure) sowie Kombinationen davon.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

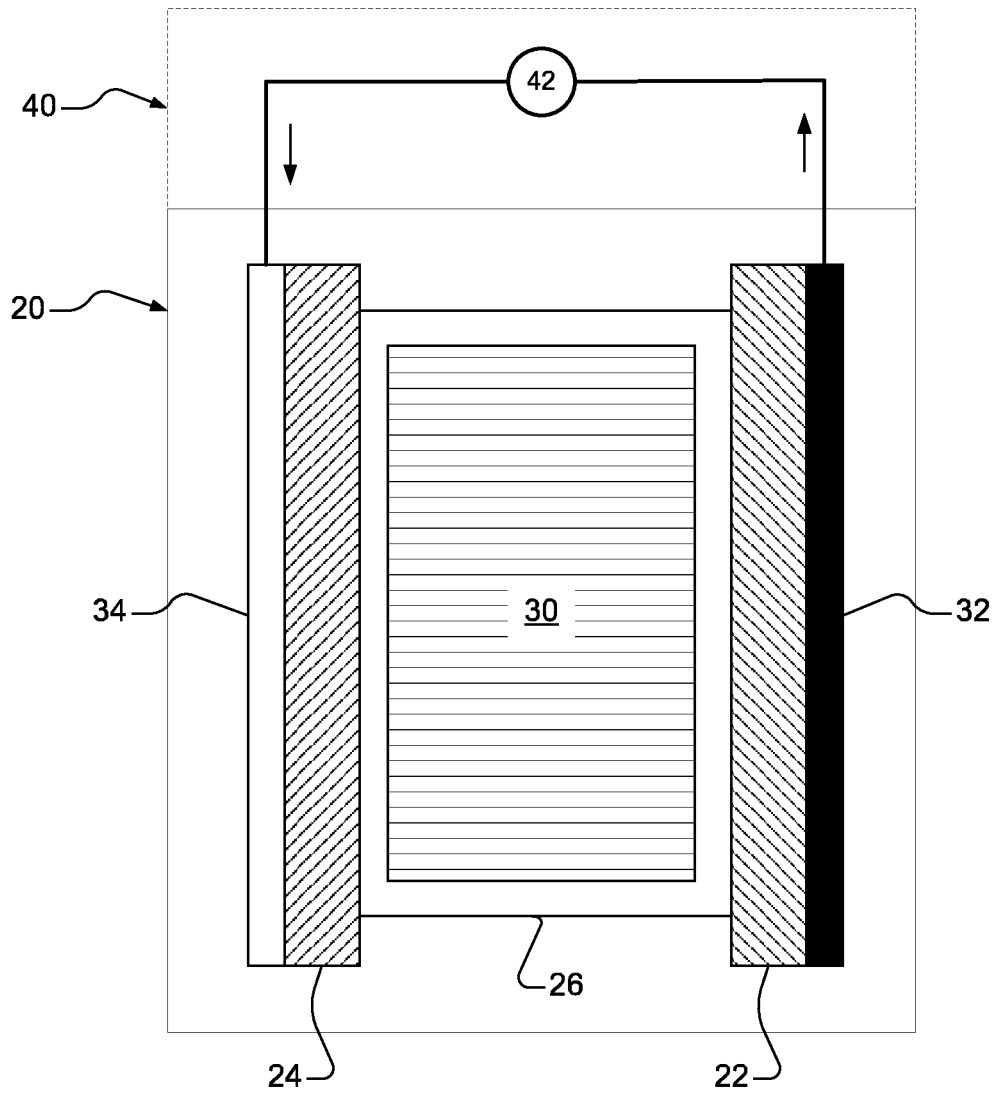


FIG. 1



FIG. 2A



FIG. 2B

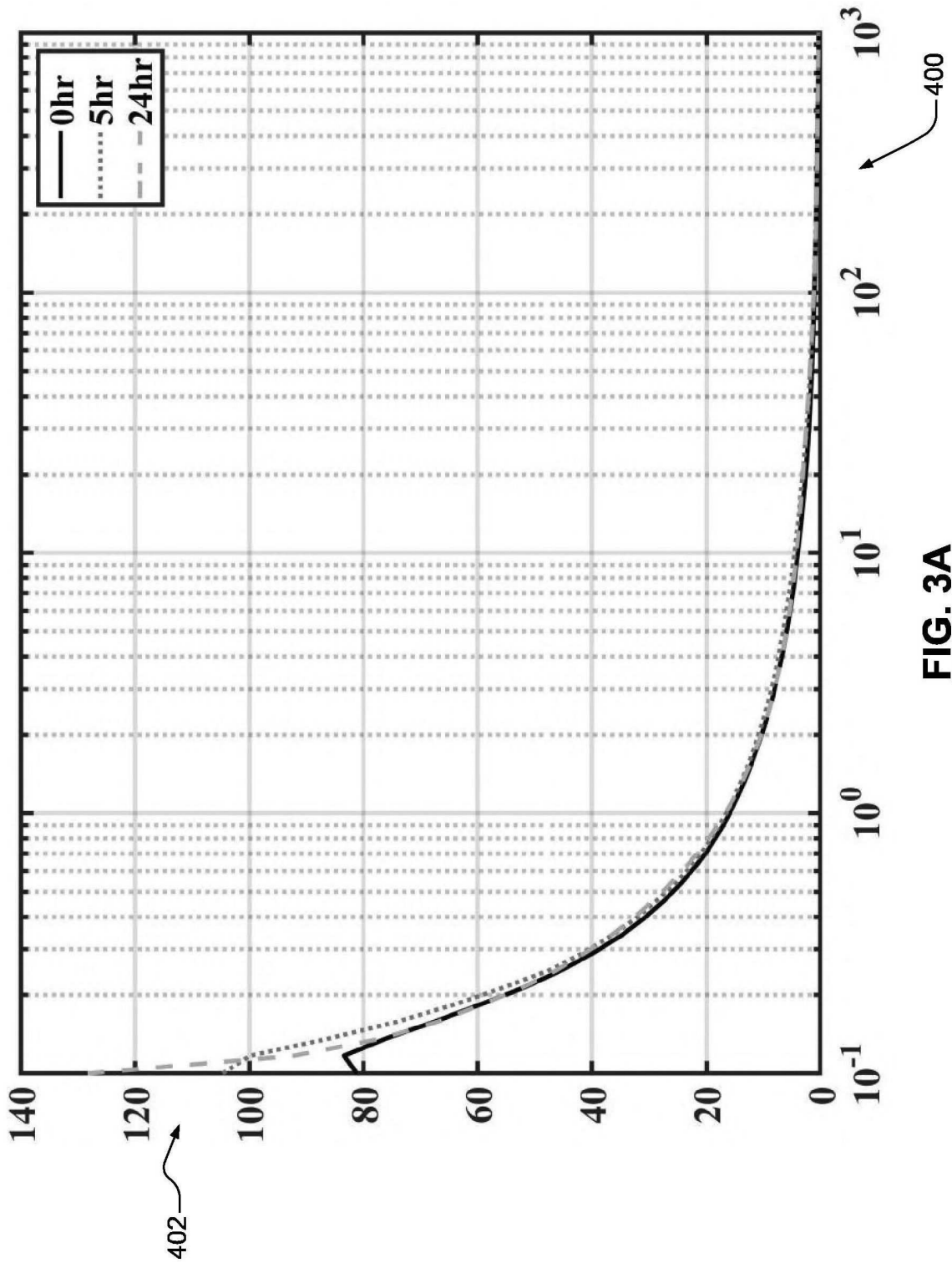


FIG. 3A

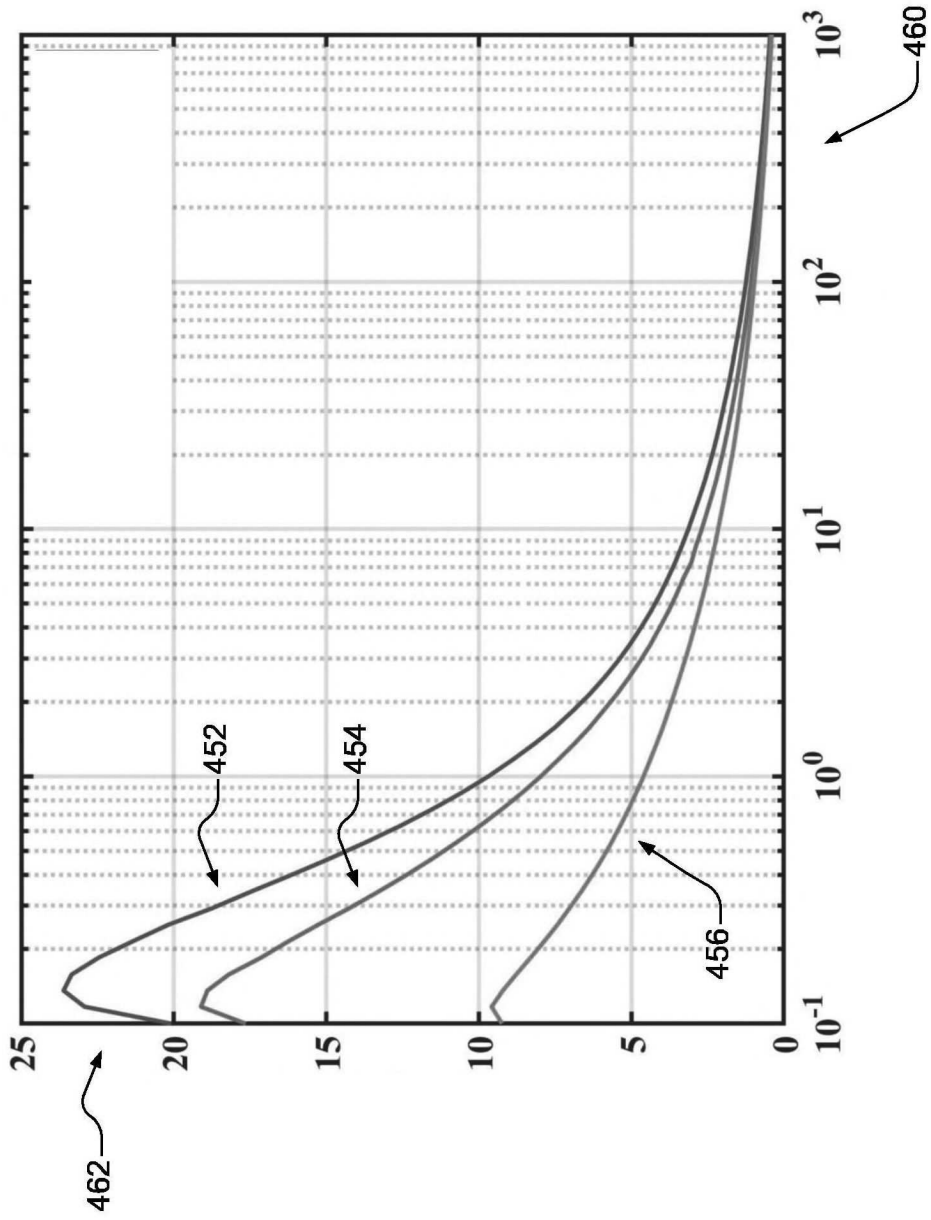


FIG. 3B

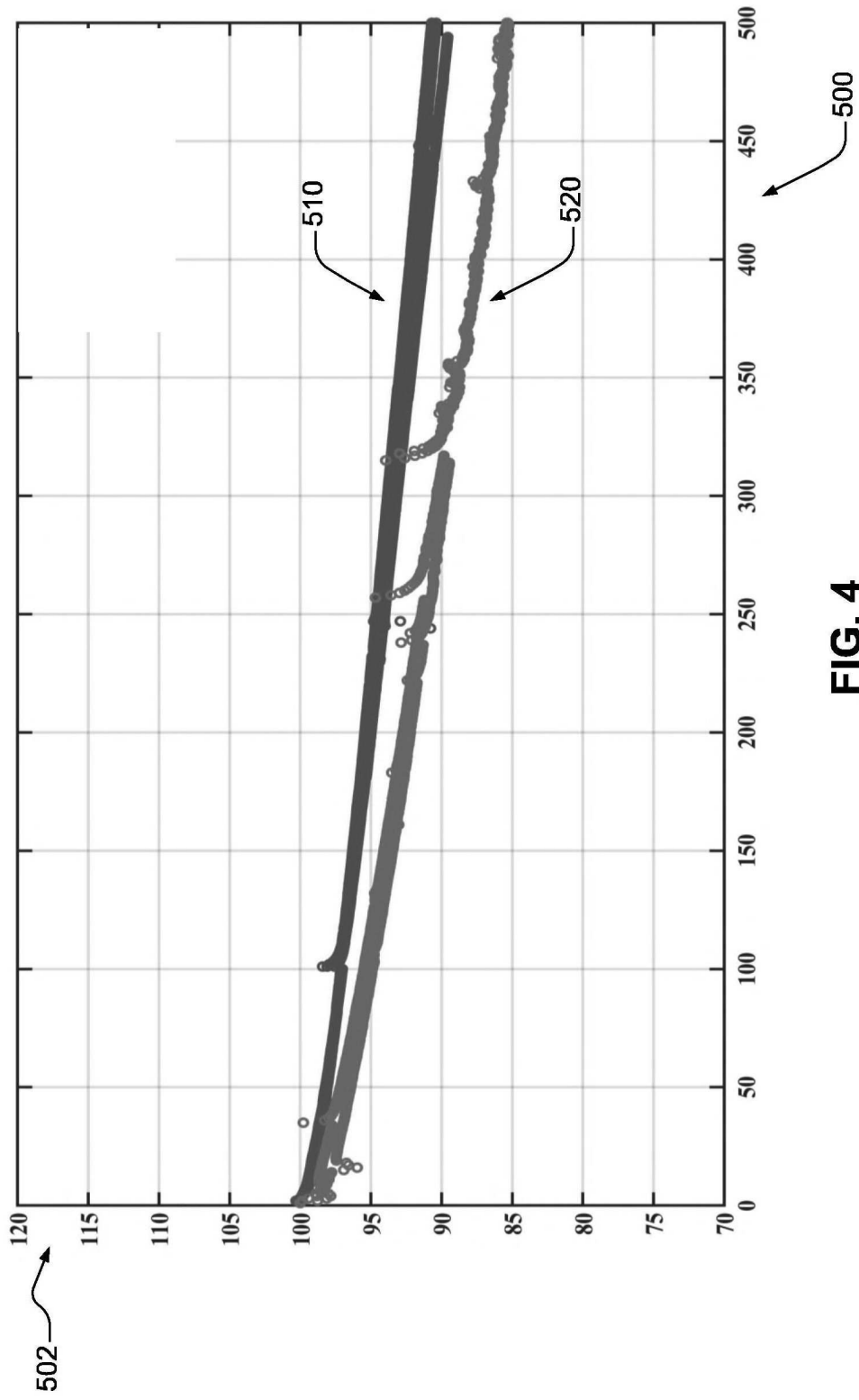


FIG. 4