



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 698 28 169 T2** 2005.12.15

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 0 998 779 B1**

(51) Int Cl.7: **H02J 7/00**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **698 28 169.1**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US98/15298**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **98 937 043.2**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 99/005767**

(86) PCT-Anmeldetag: **23.07.1998**

(87) Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: **04.02.1999**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **10.05.2000**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **15.12.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **15.12.2005**

(30) Unionspriorität:  
**900607 25.07.1997 US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**DE, FR, GB, IT, SE**

(73) Patentinhaber:  
**3M Innovative Properties Co., St. Paul, Minn., US;  
Hydro-Quebec Corp., Montreal, Quebec, CA**

(72) Erfinder:  
**ROUILLARD, Jean, Saint-Luc, CA; COMTE,  
Christophe, Montreal, CA; HAGEN, A., Ronald,  
Stillwater, US; KNUDSON, B., Orlin, Vadnais  
Heights, US; MORIN, Andre, Longueuil, Quebec  
J4M 1X7, CA; ROSS, Guy, Beloeil, CA**

(74) Vertreter:  
**Vossius & Partner, 81675 München**

(54) Bezeichnung: **AUSGLEICHSSYSTEM UND VERFAHREN FÜR IN SERIE GESCHALTETE ENERGIESPEICHER-  
VORRICHTUNGEN**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

## Bereich der Erfindung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein wiederaufladbare Energiespeichervorrichtungen und insbesondere eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Regeln der Spannungen von in Serie geschalteten Energiespeicherzellen während eines Ladevorgangs.

## Hintergrund der Erfindung

**[0002]** In jüngster Zeit sind zahlreiche verbesserte Energiespeichervorrichtungstechniken entwickelt worden, beispielsweise Metallhydrid- (z. B. Ni-MH), Lithiumionen- und Lithium-Polymerzellentechniken, von denen erwartet wird, daß für einen weiten Bereich kommerzieller und kundenspezifischer Anwendungen eine Hochenergiequelle bereitgestellt werden kann. In Hochenergieanwendungen werden typischerweise eine wesentliche Anzahl einzelner Energiespeichervorrichtungen oder -zellen in Serie und parallel geschaltet, um höhere Spannungen bzw. Ströme zu erzeugen. Durch derartiges Kombinieren von Zellen wird die Energie- oder Leistungskapazität des Energiespeichersystems erhöht. Beispielsweise wird erwartet, daß ein zum Antreiben eines Elektrofahrzeugs geeignetes Batteriesystem eine Nennspannung in der Größenordnung von mehreren hundert Volt und einen Nennstrom in der Größenordnung von mehreren hundert Ampere haben wird.

**[0003]** In Anwendungen, in denen wiederaufladbare Energiespeicherzellen in Serie geschaltet sind, ist es wünschenswert, Zellen zu verwenden, die hinsichtlich ihrer elektrochemischen Eigenschaften und Spannungs-Strom-Charakteristiken gleich oder sehr ähnlich sind. Es ist bekannt, daß während des Lade- und Entladevorgangs häufig Probleme auftreten, wenn eine Speicherzelle in einer Serienschaltung von Zellen Eigenschaften oder Kenngrößen hat, die sich von denjenigen der anderen in Serie geschalteten Energiespeicherzellen wesentlich unterscheiden. Eine nachteilige Wirkung betrifft beispielsweise die Spannung einer anomalen Energiespeicherzelle in einer Serienschaltung, die während eines Ladevorgangs einen maximalen Nennspannungsgrenzwert rasch überschreitet. Ein solcher Überspannungs- oder Überladungszustand kann die Zelle beschädigen oder zerstören und die Lebensdauer der Zelle und anderer Zellen in der Serienschaltung wesentlich verkürzen.

**[0004]** Die Charakteristiken bzw. Kenngrößen von in Mengenfertigung hergestellten Energiespeicherzellen wird von einem vorgegebenen Satz von Soll-Charakteristiken in verschiedenen Graden abweichen. Außerdem werden Zellencharakteristiken, auch wenn sie zum Zeitpunkt der Herstellung als ge-

eignet betrachtet werden, mit der Zeit in verschiedenen Graden von Soll-Charakteristiken abweichen. Um sowohl feine als auch deutliche Unterschiede in den chemischen Zelleneigenschaften und in der Zellenleistung zwischen in Serie geschalteten Zellen geeignet zu kompensieren, sind mehrere Techniken entwickelt worden, die die nachteiligen Wirkungen der Ungleichheit der Zellen berücksichtigen, die typischerweise beim Aufladen einer Serienschaltung von Zellen auftreten.

**[0005]** Ein herkömmliches Verfahren zum Schützen einer wiederaufladbaren Energiespeichervorrichtung, z. B. einer Batterie, vor einem Überladungszustand während des Ladevorgangs beinhaltet das Steuern der Spannung über die Batterieanschlüsse. Obwohl dieses Verfahren geeignet sein kann, wenn es für eine einzelne Batterie oder mehrere parallelgeschaltete Batterien verwendet wird, würde sich ein solches Verfahren für einzelne in Serie geschaltete Batterien als unwirksam erweisen, weil die Spannung einer einzelnen in Serie geschalteten Batterie durch ein derartiges Verfahren nicht gesteuert werden kann. Bestimmte Verfahren, in denen ein Unterspannungsschalter und ein Überspannungsschalter in einer Laderegulierungsschaltung verwendet werden, sind zum Schützen einer einzelnen Batterie in einer Serienschaltung von Batterien ähnlicherweise unwirksam.

**[0006]** Andere herkömmliche Überladungsschutztechniken, die Überspannungs- und Unterspannungsschalter verwenden, haben andere wesentlichen Nachteile, insbesondere wenn hohe Nennströme und -spannungen vorliegen. Die Über- und Unterspannungsschalter müssen in diesen Techniken typischerweise den vollen Entlade- und Ladestrom des Batteriesystems aufnehmen. In Hochenergieanwendungen, in denen mehrere hundert Ampere Strom erzeugt und übertragen werden müssen, würden derartige Schalter wahrscheinlich sehr teuer und daher für ein kosteneffizientes Energie- oder Leistungsversorgungssystem kaum akzeptabel sein. Außerdem unterbricht, wenn eine der in Serie geschalteten Zellen oder Batterien einen vollständig geladenen Zustand erreicht, eine herkömmliche Überladungsschutzschaltung typischerweise den Ladestromfluß zu allen anderen Zellen oder Batterien in der Serienschaltung. Daher wird jede der in Serie geschalteten Zellen oder Batterien auf ein anderes Potential aufgeladen, wodurch ein unausgeglichenes oder unabgeglichenes Energiespeichersystem erhalten wird.

**[0007]** In der WO-A-98/11620, veröffentlicht am 19. März 1998, die Priorität vom 16. September 1996 beansprucht, ist ein System beschrieben, in dem verhindert wird, daß die einzelnen Batterien einer Serienschaltung von Batterien während eines Ladevorgangs der Serienschaltung überladen werden oder eine übermäßige Entladung während des Entlade-

vorgangs der Serienschaltung auftritt, indem das Ladepotential der Batterien überwacht wird. Wenn erfaßt wird, daß das Potential einen Ladegrenzwert erreicht hat, wird ein Nebenschlußstrom oder Nebenstrom für diese Batterie erzeugt, dessen Größe dem Strompegel in der Serienschaltung gleicht. Dadurch wird veranlaßt, daß der Pegel des durch diese Batterie fließenden Stroms im wesentlichen auf null abnimmt, so daß diese Batterie effektiv aus der Serienschaltung entfernt wird, ohne daß ihre Verbindung mit der Serienschaltung tatsächlich unterbrochen wird, wie dies bei Verwendung eines Schalters der Fall wäre. Dies wird durch zyklisches Auf- und Entladen von zu den Batterien parallelgeschalteten Spulen bzw. Induktoren ausgeführt, wenn erfaßt wird, daß ihre Ladung einen oberen oder einen unteren Grenzwert erreicht hat. Das dargestellte System unterbricht einfach den Ladestrom zu einer bestimmten Batterie einer Serienschaltung von Batterien, wenn sie ihren Ladungsgrenzwert erreicht hat, um eine Beschädigung der Batterie durch eine Überladung zu verhindern.

**[0008]** In der EP-A-0652620 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung beschrieben, die dazu geeignet sind, die Spannungen von in Serie geschalteten Batterien (1 bis n) während eines Ladevorgangs ab- oder auszugleichen. Die Spannung ( $V_1$  bis  $V_n$ ) und die Temperatur ( $T_1$  bis  $T_n$ ) jeder Batterie werden gemessen, und nur die Batterie mit der niedrigsten Spannung wird mit einem Strom höherer Intensität geladen, und für die anderen Batterien wird eine Stromumleitung eingerichtet. Die Schritte werden wiederholt, bis alle Batterien (1 bis n) die gleiche Spannung bezüglich der gemessenen Temperatur erreicht haben. Dadurch wird der Ladestrom zu allen Batterien außer zu der bestimmten Batterie mit der niedrigsten Spannung unterbrochen.

**[0009]** In der Batterieherstellungsindustrie besteht Bedarf für eine Vorrichtung und ein Verfahren zum effektiven und sicheren Laden mehrerer in Serie geschalteter Energiespeichervorrichtungen. Es besteht außerdem Bedarf für ein Verfahren zum Ab- oder Ausgleichen der Potentiale von in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtungen. Durch die vorliegende Erfindung wird dieser Bedarf gedeckt und werden andere Anforderungen erfüllt.

#### Kurze Beschreibung der Erfindung

**[0010]** Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren gemäß den Patentansprüchen 1 und 16. Es wird eine Abgleichschaltung zum Steuern einer Ladestrommenge bereitgestellt, die einzelnen elektrochemischen Zellen in einer Serienschaltung elektrochemischer Zellen zugeführt wird, ohne daß der Ladestromflusses durch die Serienschaltung unterbrochen wird. Die Abgleichschaltung gleicht das Potential jeder der elektrochemischen

Zellen während eines Ladevorgangs innerhalb eines zulässigen Spannungs-Sollwertbereichs und gegebenenfalls auch vor einem Anfangsladevorgang ab. Der Abgleich von Zellenpotentialen kann in der Endphase eines Ladezyklus oder während des gesamten Ladezyklus ausgeführt werden. Außerdem wird für jede der elektrochemischen Zellen der Serienschaltung ein Überladungsschutz bereitgestellt. Während eines Entladebetriebsmodus ist die Abgleichschaltung gemäß einer Ausführungsform bezüglich des Entladestromflusses von der Serienschaltung elektrochemischer Zellen im wesentlichen nicht leitend. Gemäß einer anderen Ausführungsform kann der Abgleich der Serienschaltung von Zellen während eines Bereitschaftsbetriebsmodus ausgeführt werden.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

**[0011]** [Fig. 1](#) zeigt ein Energiespeichersystem mit mehreren in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtungen und mit mit den Energiespeichervorrichtungen verbundenen Abgleichseinheiten zum Bereitstellen einer Spannungsregelung während eines Ladevorgangs;

**[0012]** [Fig. 2](#) zeigt mehrere elektrochemische Zellen, die eine Energiespeichervorrichtung bilden, die zu einer Abgleichseinheit parallelgeschaltet ist;

**[0013]** [Fig. 3](#) zeigt eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen elektrochemischen Dünnschicht-Halbleiterzelle mit einer prismenförmigen Konfiguration;

**[0014]** [Fig. 4](#) zeigt verschiedene Schichtlagen, aus denen die in [Fig. 3](#) dargestellte elektrochemische Zelle besteht;

**[0015]** [Fig. 5](#) zeigt einen Graphen zum Charakterisieren einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen elektrochemischen Zelle bezüglich einer Zellenspannung und einer Zellenkapazität;

**[0016]** [Fig. 6](#) zeigt verschiedene Konfigurationen einer Energiespeichervorrichtung, d. h. eine Zelleinheit-, eine Modul- und eine Batteriekonfiguration;

**[0017]** [Fig. 7](#) zeigt eine Explosionsansicht eines Energiespeichersmoduls, das mehrere miteinander verbundene elektrochemische Dünnschichtzellen aufweist.

**[0018]** [Fig. 8](#) zeigt eine grafische Darstellung einer Beziehung zwischen einer Zellenspannung und einem Zellenstrom während eines Ladevorgangs gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

**[0019]** [Fig. 9](#) zeigt verschiedene Verarbeitungsschritte eines Lade- und Abgleichprozesses gemäß

einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0020] [Fig. 10](#) zeigt eine grafische Darstellung einer Beziehung zwischen dem Strom und der Spannung einer Energiespeichervorrichtung, auf die gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung eine Lade- und Abgleichverarbeitung angewendet wird;

[0021] [Fig. 11–Fig. 12](#) zeigen ein Ablaufdiagramm verschiedener Schritte einer Ladeverarbeitung bzw. einer Abgleichverarbeitung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0022] [Fig. 13–Fig. 14](#) zeigen eine alternative Ausführungsform einer Abgleichschaltung;

[0023] [Fig. 15](#) zeigt eine weitere Ausführungsform einer Abgleichschaltung;

[0024] [Fig. 16](#) zeigt verschiedene Wellenformen, die die Funktionsweise verschiedener Komponenten der in [Fig. 15](#) dargestellten Abgleichschaltung charakterisieren;

[0025] [Fig. 17A–Fig. 17B](#) zeigen Darstellungen einer Schaltung, die der in [Fig. 15](#) dargestellten Schaltung äquivalent ist, in zwei verschiedenen Betriebszuständen;

[0026] [Fig. 18](#) zeigt verschiedene Wellenformen, die der in den [Fig. 17A–Fig. 17B](#) dargestellten Schaltung zugeordnet sind;

[0027] [Fig. 19–Fig. 20](#) zeigen eine andere Ausführungsform einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Abgleichschaltung;

[0028] [Fig. 21](#) zeigt eine grafische Darstellung von Unterschieden in der Ladespannung und im Ladestrom, wenn zwei verschiedene erfindungsgemäße Abgleichtechniken verwendet werden;

[0029] [Fig. 22](#) zeigt ein Ablaufdiagramm zum Beschreiben verschiedener Verarbeitungsschritte einer Abgleichschaltung, wenn ein kontinuierliches Abgleichverfahren verwendet wird;

[0030] [Fig. 23](#) zeigt eine Darstellung einer Präzisions-Spannungsmeßschaltung für in Serie geschaltete elektrochemische Zellen;

[0031] [Fig. 24–Fig. 27](#) zeigen eine Ausführungsform einer linearen Abgleichschaltung;

[0032] [Fig. 28](#) zeigt eine grafische Darstellung einer Beziehung zwischen dem Strom und der Spannung für die in den [Fig. 24–Fig. 27](#) dargestellte lineare Abgleichschaltung;

[0033] [Fig. 29](#) zeigt eine Ausführungsform einer Hochstrom-Abgleichschaltung mit einem Abgleichmodul und einem Mikrocontroller;

[0034] [Fig. 30–Fig. 31](#) zeigen eine Ausführungsform einer Hochstrom-Abgleichschaltung, die mit einem Mikrocontroller und mehreren in Serie geschalteten elektrochemischen Zellen verbunden ist;

[0035] [Fig. 32](#) zeigt eine schematische Darstellung einer Hochstrom-Abgleichschaltung;

[0036] [Fig. 33A–Fig. 33B](#) zeigen Darstellungen einer Schaltung, die der in [Fig. 32](#) dargestellten Schaltung äquivalent ist, in zwei verschiedenen Betriebszuständen;

[0037] [Fig. 34](#) zeigt verschiedene Spannungs- und Stromwellenformen einer Zelle, einer Abgleichschaltung bzw. eines Ladegeräts in der Endphase einer Abgleichverarbeitung;

[0038] [Fig. 35](#) zeigt eine grafische Darstellung einer Spannungswellenform für eine Zelle, auf die gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung eine Hochleistungs-Abgleichverarbeitung angewendet wird;

[0039] [Fig. 36](#) zeigt ein Diagramm eines digitalen Steuersignals, das durch eine Signaltreiberschaltung erzeugt wird, die einen Umleitungstransistor einer Hochstrom-Abgleichschaltung steuert;

[0040] [Fig. 37](#) zeigt Wellenformen, die der Gate-Source-Spannung eines Transistors, einem Umleitungsstrom einer Abgleichschaltung bzw. einem Zellenstrom zugeordnet sind, in Antwort auf Steuersignale, die durch einen Signaltreiber einer Hochstrom-Abgleichschaltung erzeugt werden;

[0041] [Fig. 38](#) zeigt eine Ausführungsform eines integrierten Abgleich- und Umleitungsmoduls, das eine Schaltung zum Ausführen von Zellenabgleich- und Zellenumleitungsfunktionen aufweist; und

[0042] [Fig. 39](#) zeigt eine Darstellung einer Verbindungsleiterplatte (Interconnect-Board), auf der das in [Fig. 38](#) dargestellte integrierte Abgleich- und Umleitungsmodul angeordnet ist.

Ausführliche Beschreibung der Ausführungsformen

[0043] Die Zeichnungen, und insbesondere [Fig. 1](#), zeigen eine Ausführungsform eines Energiespeichersystems, in dem eine Abgleichschaltung verwendet wird, die gemäß den erfindungsgemäßen Prinzipien arbeitet. Das in [Fig. 1](#) dargestellte Energiespeichersystem weist mehrere Energiespeichervorrichtungen **80** auf, die durch eine gemeinsame Verbindung oder einen Bus **85** zwischen einem positiven Anschluß **81**

und einem negativen Anschluß **83** in Serie geschaltet sind. Jeder Energiespeichervorrichtung **80** ist eine typischerweise dazu parallelgeschaltete Abgleichseinheit **82** zugeordnet.

**[0044]** Während eines Entladebetriebsmodus erzeugt die Energiespeichervorrichtung **80** einen Entladestrom  $I_D$ , der einer Last **84** oder einem anderen energieverbrauchenden Element zugeführt wird. Jede der Abgleichseinheiten **82** verbleibt in einem nichtleitenden Zustand, um den Fluß des Entladestroms  $I_D$  durch die in Serie geschalteten Vorrichtungen **80** nicht zu unterbrechen. Die Abgleichseinheiten **82** können daher während des Entladebetriebsmodus als bezüglich der Serienschaltung von Energiespeichervorrichtungen **80** elektrisch isoliert betrachtet werden.

**[0045]** Während eines Ladebetriebsmodus, der typischerweise eine Ladephase und eine Abgleichphase aufweist, führt die Ladeeinheit **84** einen Ladestrom  $I_C$  zu, der vom positiven Anschluß einer Ladeeinheit **84** über die Serienschaltung der Energiespeichervorrichtungen **80** fließt und zum negativen Anschluß der Ladeeinheit **84** zurückfließt. Anfangs wird der gesamte durch die Ladeeinheit **84** zugeführte Ladestrom den Energiespeichervorrichtungen **80** zugeführt, und die Abgleichseinheiten **82** befinden sich während der Ladephase eines typischen Ladeprozesses in einem nichtleitenden Zustand bezüglich den Vorrichtungen **80**. Der Ladestrom, der durch die Ladeeinheit **84** der Serienschaltung von Energiespeichervorrichtungen zugeführt wird, kann ziemlich hoch sein, er kann in einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung z. B. etwa 19 A betragen. Die Ladespannung über den positiven und den negativen Anschluß **81**, **83** ändert sich typischerweise in Abhängigkeit von der Anzahl der in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtungen. In der in [Fig. 6](#) dargestellten Ausführungsform eines Energiespeichermoduls liegt die Ladespannung über die Modulanschlüsse beispielsweise in der Größenordnung von insgesamt 360–400 Volt.

**[0046]** Wenn das Potential einer bestimmten Energiespeichervorrichtung **80** der Serienschaltung **85** während des Ladevorgangs einen vorgegebenen Spannungs-Sollwert erreicht, beginnt die zugeordnete Abgleichseinheit **82** damit, den der Energiespeichervorrichtung **80** zugeführten Ladestrom  $I_C$  zu steuern. Gemäß der in [Fig. 1](#) dargestellten Ausführungsform steuert die Abgleichseinheit #2 **82** den der Energiespeichervorrichtung #2 **80** zugeführten Ladestrom  $I_{C2}$  durch Bereitstellen eines steuerbaren Umleitungsstrompfades ( $I_{EQ2}$ ), über den der gesamte oder ein Teil des Ladestroms  $I_{C2}$  fließen kann. Wenn die Energiespeichervorrichtung #2 **80** einen vorgegebenen Spannungs-Sollwert erreicht, z. B. einen Sollwert, der die Spannung darstellt, bei der die Energiespeichervorrichtung als vollständig geladen betrachtet wird, leitet die Abgleichseinheit #2 **82** eine zunehmen-

de Ladestrommenge  $I_C$  über den Umleitungsstrompfad ( $I_{EQ2}$ ), wodurch die durch die Energiespeichervorrichtung #2 **80** empfangene Ladestrommenge  $I_C$  vermindert wird (d. h.  $I_{C2} = I_C - I_{EQ2}$ ).

**[0047]** Dieser durch Verwendung der Abgleichseinheit **82** ermöglichte Abgleich- oder Ausgleichvorgang wird fortgesetzt, bis die Spannung der Energiespeichervorrichtung **80** sich bei dem vorgegebenen Spannungs-Sollwert stabilisiert, wobei zu diesem Zeitpunkt der gesamte Ladestrom  $I_C$  (d. h. 100% des Ladestroms) umgeleitet oder verzweigt und die Energiespeichervorrichtung **80** durch keinen Ladestrom  $I_C$  (d. h. 0% des Ladestroms) geladen wird. Daher kann die Rate, mit der eine Energiespeichervorrichtung geladen wird, durch Steuern der Rate geändert werden, mit der der Ladestrom der Energiespeichervorrichtung zugeführt wird, wenn die Vorrichtung sich einem vollständig geladenen Zustand annähert und den vollständig geladenen Zustand erreicht.

**[0048]** Für Fachleute ist ersichtlich, daß durch Verwendung einer Abgleichtechnik gemäß den erfindungsgemäßen Prinzipien wesentliche Vorteile erzielbar sind. Ein solcher Vorteil betrifft, wie vorstehend beschrieben wurde, die Fähigkeit zum Steuern des einer bestimmten Energiespeichervorrichtung in einer Serienschaltung von Energiespeichervorrichtungen zugeführten Ladestroms ohne Unterbrechung des anderen Energiespeichervorrichtungen in der Serienschaltung zugeführten Ladestroms. Ein anderer wesentlicher Vorteil betrifft die Fähigkeit zum unabhängigen Abgleichen des Potentials jeder der in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtungen **80**, um die spezifischen elektrochemischen Eigenschaften der einzelnen Energiespeichervorrichtungen **80** zu kompensieren, obwohl diese Vorrichtungen **80** derart konstruiert sein können, daß sie gemäß einem entsprechenden Satz von Spezifikationen arbeiten.

**[0049]** In einer Ausführungsform, in der eine Abgleichseinheit **82** unabhängig von anderen Abgleichseinheiten **82** arbeitet, kann eine relativ einfache und kostengünstige Abgleichschaltungsimplementierung realisiert werden. Es kann eine analoge, eine digitale oder eine Hybridschaltungsimplementierung verwendet werden. Außerdem wird z. B. durch das in [Fig. 1](#) dargestellte Abgleichsystem ein effektiver Abgleich einer Serienschaltung von Hochleistungs-Energiespeichervorrichtungen bereitgestellt, die z. B. einen Spitzen-Betriebsstrom in der Größenordnung von 400 A und Spitzenspannungen in der Größenordnung von 400 V erzeugen.

**[0050]** Durch das in [Fig. 1](#) dargestellte Abgleichsystem wird außerdem ein effektiver Überladungsschutz für jede der in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtungen **80** bereitgestellt. Wie im Abschnitt "Hintergrund der Erfindung" dargestellt wurde, wird

die Spannung einer anomalen Energiespeichervorrichtung, die im Vergleich zu anderen Energiespeichervorrichtungen einer Serienschaltung eine ausreichend atypische, niedrigere Kapazität aufweist, während eines Ladevorgangs einen nominellen maximalen Spannungsgrenzwert schneller überschreiten. Durch eine erfindungsgemäße Abgleichtechnik wird verhindert, daß in der Serienschaltung der Energiespeichervorrichtungen ein Überladungszustand auftritt, indem der Ladestrom der einzelnen in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtungen gesteuert wird, wenn die Vorrichtungen sich einem vollständig geladenen Zustand annähern und den vollständig geladenen Zustand erreichen.

**[0051]** [Fig. 2](#) zeigt eine Ausführungsform einer Energiespeichervorrichtung **90**, die eine Reihe elektrochemischer Zellen **94** aufweist, die bezüglich einem positiven und einem negativen Anschluß **97**, **99** parallel angeordnet sind. Eine Abgleicheinheit **92** ist zur Reihe elektrochemischer Zellen **94** parallelgeschaltet. Außerdem kann eine Umleitungs Vorrichtung **96** zur Reihe elektrochemischer Zellen **94** parallelgeschaltet sein, um einen Kurzschlußpfad durch die Energiespeichervorrichtung **90** bereitzustellen, falls die Zellenreihe **94** defekt sein sollte. Der hierin verwendete Ausdruck "Zelle" kann eine einzelne elektrochemische Zelle oder eine Gruppe elektrochemischer Zellen darstellen, z. B. aus acht parallelgeschalteten Zellen, die eine Zelleinheit bilden.

**[0052]** Gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bilden die in [Fig. 2](#) dargestellten elektrochemischen Zellen Halbleiter-Dünnschichtzellen des in den [Fig. 3–Fig. 4](#) dargestellten Typs. Solche elektrochemischen Dünnschichtzellen sind insbesondere zum Konstruieren von Hochstrom-, Hochspannungs-Energiespeichermodule und Batterien geeignet, z. B. von Modulen bzw. Batterien, die zum Versorgen von Elektrofahrzeugen mit Leistung verwendet werden. [Fig. 3](#) zeigt eine Ausführungsform einer prismenförmigen elektrochemischen Zelle **100**, die einen Anodenkontakt **102** und einen Kathodenkontakt **104** aufweist, die entlang entgegengesetzten Rändern der elektrochemischen Zelle **100** ausgebildet sind.

**[0053]** In dieser Ausführungsform ist die elektrochemische Zelle **100** so konstruiert, daß ihre Länge  $L$  etwa 135 mm, ihre Höhe  $H$  etwa 149 mm und ihre Breite  $W_{ec}$  etwa 5,4 mm oder, wenn ein Schaumkernelement verwendet wird, etwa 5,86 mm betragen. Die Breite  $W_c$  des Kathodenkontakts **104** und des Anodenkontakts **102** beträgt jeweils etwa 3,9 mm. Eine derartige Zelle **100** weist typischerweise einen Energie-Nennwert von etwa 36,5 Wh, einen Spitzenleistungs-Nennwert von 87,0 W bei 80% Entladetiefe (DOD), eine Zellenkapazität von 14,4 Ah und einen Spannungs-Nennwert von 3,1 V bei voller Ladung auf.

**[0054]** Die in [Fig. 3](#) dargestellte elektrochemische Zelle kann eine ähnliche Konstruktion wie die in [Fig. 4](#) dargestellte Zelle haben. In dieser Ausführungsform weist die elektrochemische Zelle **120** gemäß der Darstellung eine flache gewickelte prismenförmige Konfiguration auf, die einen eine Ionentransportmembran bildenden Festpolymerelektrolyt **126**, eine Lithiummetallanode **124**, eine Vanadiumoxidkathode **128** und einen mittigen Stromkollektor **129** aufweist. Diese Schichtelemente werden als prismenförmige laminierte Dünnschichtstruktur ausgebildet, die auch eine Isolierschicht, z. B. eine Polypropylen-schicht, aufweisen kann.

**[0055]** Es wird ein bekannter Sputter-Metallisierungsprozeß verwendet, um die Stromabnahme- oder -sammelkontakte entlang den Rändern **125**, **123** der Anodenschicht **124** bzw. der Kathodenschicht **128** auszubilden. Durch die aufgespritzten Metallkontakte wird eine ausgezeichnete Stromabnahme entlang der Länge der Anoden- und Kathodenschichtträger **125**, **123** erhalten, und die Metallkontakte haben gute elektrische Kontakt- und Wärmeübertragungseigenschaften. Die in den [Fig. 3–Fig. 4](#) dargestellten elektrochemischen Zellen können gemäß den in den US-Patenten Nr. 5423110, 5415954 und 4897917 dargestellten Techniken hergestellt werden.

**[0056]** [Fig. 5](#) zeigt eine grafische Darstellung einer Beziehung zwischen einer Spannung und einer Kapazität für eine elektrochemische Zelle mit einer Konstruktion, die der in den [Fig. 3–Fig. 4](#) dargestellten Konstruktion im wesentlichen ähnlich ist. Wie in [Fig. 5](#) ersichtlich ist, weist eine einzelne elektrochemische Zelle eine nominelle Betriebsspannung im Bereich zwischen etwa 2,0 und 3,1 V auf. Es können ähnliche Spannungs-Kapazität-Kurven entwickelt werden, um Energiespeicherzellen zu charakterisieren, die unter Verwendung von Techniken hergestellt sind, die von den für die hierin beschriebenen Ausführungsformen verwendeten Techniken verschieden sind, wie beispielsweise Naß- und Trockenzellentechniken, und unter Verwendung solcher Kurven können geeignete Niedrig- und Hochspannungs-Sollwerte oder andere Grenzwerte erhalten werden, um eine effektive Abgleichtechnik gemäß den erfindungsgemäßen Prinzipien zu implementieren.

**[0057]** Es können mehrere elektrochemische Zellen selektiv parallel und/oder in Serie geschaltet werden, um eine gewünschte Nennspannung bzw. einen gewünschten Nennstrom zu erhalten. Beispielsweise können gemäß den [Fig. 6–Fig. 7](#) mehrere elektrochemische Zellen **130** zusammen gruppiert und zu gemeinsamen positiven und negativen Leistungsbussen oder -leitungen parallelgeschaltet werden, um eine Zelleinheit **132** zu bilden. Mehrere elektrochemische Zelleinheiten **132** können dann in Serie geschaltet werden, um ein Modul **134** zu bilden. Au-

ßerdem können mehrere einzelne Module **134** in Serie geschaltet werden, um eine Batterie **136** zu bilden.

**[0058]** Die in [Fig. 6](#) dargestellte Ausführungsform, die lediglich zur Erläuterung dient und die Erfindung nicht einschränken soll, zeigt eine Anordnung elektrochemischer Zellen in einer modularen Struktur, durch die ein effizientes Mittel zum Erreichen gewünschter Leistungsanforderungen für einen breiten Anwendungsbereich bereitgestellt wird. In dieser erläuternden Ausführungsform sind acht elektrochemische Zellen **130** zusammen gruppiert und parallelgeschaltet, um eine Zelleneinheit **132** zu bilden. Ein Modul **134** wird durch Gruppieren von sechs Zelleneinheiten **132** und Schalten der Einheiten **132** in Serie gebildet. Eine dargestellte Batterie **136** wird durch 24 in Serie geschaltete Module **134** gebildet.

**[0059]** Mit dieser Anordnung und unter der Voraussetzung, daß jede der elektrochemischen Zellen **139** Kenngrößen und Charakteristiken aufweist, die den in [Fig. 5](#) dargestellten Kenngrößen und Charakteristiken entsprechen, wird durch jede einzelne Zelle **130** eine Gesamt-Ausgangsenergie von etwa 36,5 Wh bereitgestellt. Durch jede Zelleneinheit **132** wird eine Gesamt-Ausgangsenergie von etwa 292 Wh bereitgestellt, während durch jedes Modul **134** eine Gesamt-Ausgangsenergie von 1,75 kWh bereitgestellt wird. Durch die Batterie **136**, die durch 24 in Serie geschaltete Module **134** gebildet wird, die in einer Anordnung von vier axial und sechs in Längsrichtung ausgerichteten Modulen angeordnet sind, wie in der in [Fig. 6](#) dargestellten Ausführungsform dargestellt ist, wird eine Gesamt-Ausgangsenergie von etwa 42 kWh bereitgestellt. Die Anordnung elektrochemischer Zellen **130** und die Verbindung der Zellen **130**, die eine Zelleneinheit **132**, ein Modul **134** und die Batterie **136** bilden, kann sich von der in [Fig. 6](#) dargestellten Anordnung unterscheiden.

**[0060]** [Fig. 7](#) zeigt eine Explosionsansicht einer Ausführungsform eines Energiespeichermoduls, das mehrere elektrochemische Zellen, Verbindungs-Hardware und Steuerungs-Hardware und Software aufnimmt. Gemäß einer Ausführungsform weist ein Modul **134** einen Stapel elektrochemischer Zellen **130** auf, die unter Verwendung einer Leistungsleiterplatte **135** verbunden sind. Der Stapel elektrochemischer Zellen **130** ist in sechs Zelleneinheiten **132** geteilt, die alle unter Verwendung von zwei Bändern **133** und zwei gegenüberliegenden Druckplatten **131** zusammengehalten werden. Auf die 48 elektrochemischen Zellen **130** wird eine kontinuierliche Druckkraft ausgeübt, die unter Verwendung der Bänder **133** und der Druckplatten **131** erzeugt wird, und ein optionales Schaumstoff- oder ein federähnliches Kernelement ist in jeder der Zellen **130** angeordnet. Das in der Mitte jeder der Zellen **130** angeordnete Schaumstoff- oder federähnliche Kern-

element dient dazu, den Druck zwischen den Zellen **130** gleichmäßig zu verteilen, was besonders wichtig ist, weil die Zellenvolumina sich während der Lade- und Entladezyklen ändern. Auf der Leistungsleiterplatte **135** ist typischerweise eine Abgleichschaltung angeordnet, die Abgleichschaltung kann jedoch auch Komponenten, z. B. einen Mikroprozessor, aufweisen, der auf einer Steuerungsleiterplatte **137** oder auf einer anderen externen Karte oder Leiterplatte angeordnet sind, die mit der Leistungsleiterplatte **135** elektrisch kommuniziert.

**[0061]** Der Graph von [Fig. 8](#) zeigt Strom- und Spannungskurven für eine wiederaufladbare Energiespeichervorrichtung, z. B. für eine elektrochemische Dünnschichtzelle, auf die ein Abgleichprozeß gemäß den erfindungsgemäßen Prinzipien angewendet wird. Während einer durch die Zeitdauer  $T_c$  dargestellten Ladeperiode wird der Energiespeichervorrichtung oder Zelle ein im wesentlichen konstanter Ladestrom **140** zugeführt. Die Zellenspannung **144** nimmt während der Ladeperiode  $T_c$  graduell zu, während der Zellenstrom **142** im wesentlichen konstant bleibt. Wenn die Zellenspannung **144** einen vorgegebenen Spannungs-Sollwert erreicht, wird ein Abgleichprozeß aktiviert, durch den die Zellenspannung auf eine nominelle Betriebsspannung abgeglichen wird. Wie in [Fig. 8](#) ersichtlich ist, wird der Zellenstrom **142** während der durch die Zeitdauer  $T_b$  dargestellten Zellenabgleichperiode gesteuert, um die Zellenspannung **144** bei der nominellen Betriebsspannung zu stabilisieren.

**[0062]** [Fig. 9](#) zeigt ein Ablaufdiagramm zum ausführlicheren Darstellen einer Verarbeitung zum Abgleichen einzelner Energiespeichervorrichtungen einer Serienschaltung von Energiespeichervorrichtungen gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Nachstehend wird auf [Fig. 10](#) Bezug genommen, die Strom- und Spannungskurven für eine der in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtungen darstellt, die einem Lade- und Abgleichprozeß gemäß der in [Fig. 9](#) dargestellten Verarbeitung unterzogen wird. Es wird vorausgesetzt, daß eine vollständig geladene Energiespeichervorrichtung oder Zelle durch Zuführen eines Zellenstroms zu einer Last oder einer anderen energieverbrauchenden Vorrichtung anfangs entladen wird (Schritt **160**). Wie vorstehend diskutiert wurde, hat die Abgleichschaltung während des Zellenentladevorgangs keine nennenswerte Wirkung auf den Stromfluß durch die Serienschaltung und befindet sich daher in einem nicht-interaktiven Zustand (Schritt **162**).

**[0063]** In diesem erläuternden Beispiel wird vorausgesetzt, daß der Ladevorgang **164** aktiviert wird, wenn die Spannung der Energiespeichervorrichtung den in [Fig. 10](#) als Niedrigspannungs-Sollwert dargestellten Pegel erreicht. In Abhängigkeit vom Spannungszustand der Energiespeichervorrichtungen in

der Serienschaltung kann ein Vorabgleichprozeß (Schritt **166**, **168**) aktiviert werden. Um zu bestimmen, ob der Vorabgleichvorgang erforderlich ist, wird die Spannung jeder Energiespeichervorrichtung in der Serienschaltung ermittelt und eine Spannungsdifferenz  $V_D$  zwischen dem höchsten und dem niedrigsten erfaßten Spannungswert bestimmt.

**[0064]** Wenn der Vorabgleichprozeß aktiviert wird, wird ein Spannungs-Sollwert gesetzt, der dem höchsten Spannungswert entspricht, der zuvor durch Abtasten des Potentials jeder Energiespeichervorrichtung bestimmt wurde. Der Vorabgleich der Serienschaltung von Energiespeichervorrichtungen oder Zellen wird unter Verwendung im wesentlichen der gleichen Technik ausgeführt, die die in der Endphase des Ladevorgangs zum Abgleichen von Zellenpotentialen verwendet wird. Die Dauer eines typischen Vorabgleichprozesses beträgt etwa 30 Minuten oder dauert an, bis der Zellenstrom einen Wert erreicht, der anzeigt, daß das Ende des Konstantspannungs-Vorladevorgangs erreicht worden ist, was in [Fig. 10](#) als Wartungsstrom-Sollwert dargestellt ist.

**[0065]** Beim Abschluß des Vorabgleichprozesses befinden sich alle Energiespeichervorrichtungen der Serienschaltung etwa auf dem gleichen Potential. Am Ende des Vorabgleichprozesses und vor dem Ladevorgang kann ein Entspannungsprozeß ausgeführt werden. Der Entspannungsprozeß beinhaltet die Unterbrechung der Zufuhr des Ladestroms zu den Energiespeichervorrichtungen während der Entspannungsperiode, die typischerweise eine oder mehrere Minuten dauert.

**[0066]** Ein typischer Ladevorgang beinhaltet das Zuführen eines im wesentlichen konstanten Ladestroms **150** zu den in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtungen (Schritt **170**). Im in [Fig. 10](#) dargestellten Beispiel hat die Konstantstrom-Ladephase eine Dauer von etwa 5 Stunden oder dauert an, bis ein Zellenabgleich-Sollwert erreicht ist (Schritt **172**). Die in [Fig. 10](#) dargestellte Spannung **152** der Energiespeichervorrichtung nimmt mit der Zeit zu, bis der Zellenabgleich-Sollwert erreicht ist, wobei zu diesem Zeitpunkt ein Zellenabgleichprozeß aktiviert wird (Schritt **175**). Im allgemeinen wird der Aus- oder Abgleichprozeß zu einem beliebigen Zeitpunkt ausgeführt, wenn die Spannung **152** der Energiespeichervorrichtung einen Hochspannungs-Sollwert überschreitet, was auftreten kann, wenn ein Ladevorgang versehentlich für vollständig aufgeladene Energiespeichervorrichtungen ausgeführt wird. Nach Abschluß des Zellenabgleichprozesses wird ein Entspannungsprozeß aktiviert, woraufhin der Ladevorgang abgeschlossen ist (Schritt **178**).

**[0067]** Die [Fig. 11](#) und [Fig. 12](#) zeigen verschiedene Verarbeitungsschritte für die Lade- und Abgleichphasen eines Ladevorgangs für ein Energiespeichermodul

des in den [Fig. 6–Fig. 7](#) dargestellten Typs. In dieser erläuternden Ausführungsform wird vorausgesetzt, daß das Modul sechs in Serie geschaltete Zelleneinheiten aufweist und jede Zelleneinheit acht parallelgeschaltete elektrochemische Zellen aufweist. Die Ladephase kann unabhängig vom Modulspannungszustand oder von der Entladetiefe (DOD) jederzeit aktiviert werden (Schritt **180**). Ein Zeitwert eines Ladeprozeßzeitgebers wird auf einen Wert gesetzt, der die Zeitdauer des Ladevorgangs definiert (d. h. der Ladephase und der Abgleichphase), z. B. auf acht Stunden. Eine Ladeeinheit wird anfangs auf einen vorgegebenen konstanten Stromwert gesetzt (Schritt **181**), woraufhin den in Serie geschalteten Zelleneinheiten ein konstanter Ladestrom zugeführt wird (Schritt **182**). Jede der sechs Zelleneinheiten wird überwacht (Schritt **183**), um zu bestimmen, ob irgendeine der Zelleneinheiten einen vorgegebenen Spannungs-Sollwert erreicht hat, z. B. einen Hochspannungs-Sollwert von 3,1 V.

**[0068]** Wenn keine der Zelleneinheiten den Spannungs-Sollwert erreicht hat, und wenn die Gesamtladezeit nicht abgelaufen ist (Schritt **184**), wird der Konstantstrom-Ladeprozeß für die Zelleneinheiten fortgesetzt. Wenn jedoch die Spannung irgendeiner der sechs Zelleneinheiten den Spannungs-Sollwert erreicht hat, wird der durch die Ladeeinheit zugeführte konstante Ladestrom nach einer kurzen Verzögerung (Schritt **188**) um einen vorgegebenen Wert, z. B. um 1 A, vermindert (Schritt **186**). Durch die kurze Verzögerung kann die Zellenspannung sich nach einer Stromänderung stabilisieren. Der Konstantstrom-Ladeprozeß wird nach der Verzögerung mit dem reduzierten Stromwert fortgesetzt, und die vorstehend beschriebenen Schritte **182–188** werden wiederholt, bis ein Strom-Sollwert, z. B. 5 A erreicht ist, wobei der Ladeprozeß zu diesem Zeitpunkt von der Ladephase in eine Abgleichphase übergeht (Schritt **189/190**).

**[0069]** Bei der Aktivierung des Abgleichvorgangs (Schritt **190**) wird ein Abgleichphasenzeitgeber auf einen Wert gesetzt, der die Zeitdauer, z. B. 1 Stunde, der Abgleichphase definiert. Die Abgleichphase beginnt typischerweise, wenn die Spannung aller sechs Zelleneinheiten den Spannungs-Sollwert erreicht hat. Eine Abgleichereinheit (jeder Zelleneinheit ist eine Abgleichereinheit zugeordnet) wird aktiviert (Schritt **191**), wenn die Zelleinheitspannung den Spannungs-Sollwert erreicht. Bis die Abgleichereinheiten aller sechs Zelleneinheiten aktiviert sind (Schritt **192**), wird der Konstantstrom-Ladevorgang bei dem niedrigen Strom-Sollwert (z. B. 5 A) fortgesetzt, bis der Zeitabgleichvorgang des Ladeprozeßzeitgebers und der Zeitabgleichvorgang des Abgleichphasenzeitgebers abgelaufen sind (Schritt **193**), wobei der Abgleichprozeß zu diesem Zeitpunkt beendet wird (Schritt **194**).

**[0070]** Nach der Aktivierung aller sechs Abgleichereinheiten schaltet die Ladeeinheit von einem Kon-

stantstrom-Lademodus auf einen Konstantspannungs-Lademodus um (Schritt **195**). Die Ladeeinheit wird auf eine konstante Spannung  $V_{\text{charger}}$  gesetzt, die der Summe der sechs Zelleneinheitenspannungen gleicht, die in diesem erläuternden Beispiel etwa 18,6 V beträgt (d. h. 6 Zelleneinheiten mit einer Spannung von jeweils 3,1 V). Der Konstantspannungs-Ladevorgang wird fortgesetzt, während der Ladestrom über einem minimalen Strom-Sollwert (z. B. einem Wartungsstrompegel) verbleibt (Schritt **196**), wenn die Zeitzählvorgänge des Ladeprozesszeitgebers und des Abgleichphasenzeitgebers noch nicht abgelaufen sind (Schritt **197**). Der Ladevorgang wird beendet (Schritt **198**), wenn der Ladestrom unter den minimalen Strom-Sollwert absinkt oder der Zeitzählvorgang des Ladeprozess- oder des Abgleichphasenzeitgebers abgelaufen ist (Schritt **197**).

**[0071]** Durch die vorstehend beschriebene Abgleichtechnik wird, außer daß eine Zellenabgleichfähigkeit bereitgestellt wird, auch ein Überspannungsschutz für jede der in Serie geschalteten Zelleneinheiten bereitgestellt. Insbesondere wird, wenn die Ladespannung einer bestimmten Zelleneinheit sich z. B. einem Zellenabgleich-Sollwert oder einem Hochspannungs-Sollwert annähert, die Abgleichfunktion für die Zelleneinheit aktiviert und steuert den der bestimmten Zelleneinheit zugeführten Ladestromfluß. Dadurch wird die einer Zelleneinheit zugeführte maximale Ladespannung auf eine dem Hochspannungs-Sollwert entsprechende Spannung begrenzt.

**[0072]** Die **Fig. 13–Fig. 14** zeigen eine Ausführungsform einer gemäß den Prinzipien der vorliegenden Erfindung arbeitenden Abgleichschaltung. In diesem erläuternden Beispiel sind drei Abgleichschaltungen **202**, **204**, **206** dargestellt, die jeweils mit einer entsprechenden in Serie geschalteten Energiespeichervorrichtung oder Zelle **223**, **225**, **227** verbunden sind. Es können auch mehr als drei Zellen in Serie geschaltet sein, wobei jeder Zelle eine entsprechende Abgleichschaltung zugeordnet ist. Die Abgleichschaltungen **202**, **204**, **206** arbeiten typischerweise unabhängig voneinander.

**[0073]** Alternativ können die Abgleichschaltungen **202**, **204**, **206** mit einem Controller **229**, z. B. mit einem Mikroprozessor, verbunden sein, der ihre Operation koordiniert und Sollwertparameter und andere Information zum Ausführen von Abgleichfunktionen bereitstellt. Durch eine Ausführungsform, die einen derartigen Controller **229** aufweist, kann vorteilhaft Betriebs- und Zustandinformation bezüglich den Abgleichschaltungen **202**, **204**, **206** und den Zellen **223**, **225**, **227** abgerufen werden. Durch eine derartige Ausführungsform kann ferner Information, z. B. Zustandinformation und Steuerparameter, zwischen dem Controller **229**, der in einem Energiespeichermodul angeordnet sein kann, und einem Systemcontroller oder einem Computer ausgetauscht werden,

der auf einer Batteriesystemplattform angeordnet sein kann.

**[0074]** Ein in **Fig. 13** dargestelltes Energiespeichersystem erzeugt einen Entladestrom  $I_D$ , der von einer Zelle-1 **223** zu einer Last **216** fließt und über eine Zelle-N **227** zurückfließt. **Fig. 14** zeigt den Fluß eines Ladestroms  $I_C$ , der durch eine Ladeeinheit **219** erzeugt und der Serienschaltung von Zellen über die Zelle-1 **223** zugeführt wird und über die Zelle-N **227** zur Ladeeinheit **219** zurückfließt. In einer Ausführungsform bildet das in den **Fig. 13–Fig. 14** dargestellte Energiespeichersystem eine Hochspannungsbatterie, die in der Lage ist, einen Entladestrom  $I_D$  in der Größenordnung von 400 A Peak- oder Spitzenstrom zu erzeugen, wobei die Batterie insbesondere für Systeme mit hohem Energiebedarf geeignet ist, z. B. für Elektrofahrzeuge.

**[0075]** Jede der Energiespeicherzellen, z. B. die Zelle-1 **223** weist eine Abgleichschaltung auf, z. B. die Schaltung **202**, die unabhängig von anderen Abgleichschaltungen arbeitet. Die Abgleichschaltungen **202**, **204**, **206** sind hinsichtlich ihrer Konfiguration und ihrer Funktion im wesentlichen gleich. Jede der Abgleichschaltungen weist einen spannungsgesteuerten Schalter **210**, eine Signaltreiberschaltung **212** und einen Umleitungsschalter **212** auf. Der spannungsgesteuerte Schalter **210**, der zu einer entsprechenden Zelle parallelgeschaltet ist, erfaßt eine Spannung über die Zelle und erzeugt ein Aktivierungssignal, wenn die Zellenspannung einen vorgegebenen Sollwert erreicht, z. B. den Zellenabgleich-Sollwert und/oder einen Überspannungs-Sollwert.

**[0076]** Das durch den spannungsgesteuerten Schalter **210** erzeugte Aktivierungssignal wird zu einer Signaltreiberschaltung **212** übertragen, die ein Steuersignal mit einer Frequenz erzeugt, die sich proportional zur Größe des Aktivierungssignals ändert. In Antwort auf das durch die Signaltreiberschaltung **212** erzeugte Steuersignal leitet der Umleitungsschalter **214** einen übermäßigen Ladestrom über den Umleitungsschalter **214**, um die der Zelle zugeführte Ladestrommenge zu steuern. Der Umleitungsschalter **214** wird durch das durch die Signaltreiberschaltung **212** erzeugte Steuersignal moduliert, um den Ladestromfluß zur Zelle zu steuern und die Zellenspannung bei einem im wesentlichen konstanten Pegel zu stabilisieren.

**[0077]** **Fig. 15** zeigt eine schematische Darstellung einer Ausführungsform einer Abgleichschaltung. Obwohl die in **Fig. 15** dargestellte Schaltung während aller Phasen des Zellenladevorgangs, z. B. während der Vorabgleichphase, effektiv arbeitet, konzentriert sich die folgende Beschreibung auf die Arbeitsweise der Schaltung in der Endphase eines typischen Ladevorgangs, die den Übergang von einer Standard-La-

dephase zu einer Zellenabgleichphase einschließt.

**[0078]** Die Abgleichschaltung **220** weist einen Differenzverstärker **222** zum Erfassen einer Spannungsdifferenz zwischen einer Spannung  $V_1$  über die Zelle **223** und einer Referenzspannung  $V_{ref}$ , die dem negativen bzw. dem positiven Eingang des Differenzverstärkers **222** zugeführt wird. Wenn die Spannung  $V_1$  über die Zelle **223** niedriger ist als die Referenzspannung  $V_{ref}$  hat das Ausgangssignal des Differenzverstärkers **222** einen niedrigen Pegel. Die Referenzspannung  $V_{ref}$  kann die Spannung darstellen, bei der die Zelle als vollständig geladen betrachtet wird (z. B. für einen Überspannungsschutz) oder den Spannungs-Sollwert, bei dem ein Abgleichprozeß aktiviert werden soll. Die Referenzspannung  $V_{ref}$  ist auf einen beliebigen von mehreren Referenzwerten einstellbar.

**[0079]** Wenn das Ausgangssignal des Differenzverstärkers **222** einen niedrigen Pegel hat, hat das Ausgangssignal des spannungsgesteuerten Oszillators (VCO) **224** einen niedrigen Pegel, so daß durch die monostabile Vorrichtung **226** keine Steuersignale erzeugt werden. Der Transistor **228** ist in Antwort auf ein niedriges Ausgangssignal von der monostabilen Vorrichtung **226** in einem nichtleitenden oder AUS-Zustand eingestellt. Während der Zeitdauer, in der der Transistor **228** auf einen nichtleitenden Zustand eingestellt ist, verbleibt die Abgleichschaltung **220** bezüglich eines Zellenladevorgangs im wesentlichen nichtleitend, so daß der Zelle **223** der gesamte durch die Ladeeinheit **234** erzeugte Ladestrom zugeführt wird.

**[0080]** Für die weitere Beschreibung der Arbeitsweise der in [Fig. 15](#) dargestellten Abgleichschaltung wird auf in [Fig. 16](#) dargestellte Wellenformen Bezug genommen. Wenn die Zellenspannung  $V_1$  **242** größer oder gleich der Referenzspannung  $V_{ref}$  ist, die z. B. der Abgleich-Sollwertspannung **240** entsprechen kann, geht das Ausgangssignal des Differenzverstärkers **222** auf einen hohen Zustand über. Die Größe des am Ausgang des Differenzverstärkers **222** erzeugten Signals ist der Spannungsdifferenz zwischen der Spannung  $V_1$  über die Zelle **222** und der Referenzspannung  $V_{ref}$  proportional.

**[0081]** Der VCO **224** erzeugt in Antwort auf den hohen Zustand am Differenzverstärkerausgang ein Signal **244** mit einer Frequenz, die der Größe des am Ausgang des Differenzverstärkers **222** erzeugten Differenzsignals proportional ist. In einer Ausführungsform erzeugt der VCO **224** in Abhängigkeit von der Größe des am Ausgang des Differenzverstärkers **222** bereitgestellten Differenzsignals eine Frequenz durch ein Modulations(FwM)signal mit einer zwischen 0 und 100 kHz variierenden Frequenz.

**[0082]** In Antwort auf das durch den VCO **224** erzeugte Signal **244** erzeugt die monostabile Vorrich-

tung **226** unabhängig vom Tastgrad des durch den VCO **224** erzeugten Signals **244** ein Signal **246** mit einer im wesentlichen konstanten Pulsbreite oder EIN-Zeit  $T_{on}$ . Der Transistor **228** schaltet in Antwort auf das durch die monostabile Vorrichtung **226** erzeugte Signal  $T_{on}$  von einem nichtleitenden Zustand auf einen leitenden Zustand, so daß ein Ladestrom mit einem von den Kenngrößen der Spule **230** und der Zenerdiode **232** abhängigen Größe durch den Umleitungsstrompfad **247** fließen kann. Die Pulsbreite  $T_{on}$  des durch die monostabile Vorrichtung **226** erzeugten Steuersignals **246** sollte so gewählt werden, daß eine Sättigung der Spule **230** während der Zeitdauer  $T_{on}$  vermieden wird.

**[0083]** Während der Zeitdauer, in der der Transistor **228** auf einen leitenden Zustand eingestellt ist, wird der Strom **248** in der Zelle **223** reduziert, wodurch die Zellenspannung **242** abnimmt. Wenn der Transistor **228** auf einen nichtleitenden Zustand schaltet, nimmt der Strom **248** in der Zelle zu, und die Zellenspannung **242** nimmt ebenfalls zu, bis die Zellenspannung **242** die Referenzspannung **240** (z. B. die Abgleich-Sollwertspannung) erreicht oder überschreitet. Wenn die Zellenspannung **242** erneut die Referenzspannung  $V_{ref}$  **240** erreicht oder überschreitet, erzeugt der Differenzverstärker **222** ein Differenz-Ausgangssignal mit einem hohen Pegel, wodurch veranlaßt wird, daß der VCO **224** ein Signal **244** mit einer Frequenz erzeugt, die typischerweise niedriger ist als die Frequenz des zuvor erzeugten Signals **244**. Dadurch ist die Periode  $T$  von durch den VCO **244** nachfolgend erzeugten Signalen **244** typischerweise kürzer als diejenige von zuvor erzeugten Signalen **244**.

**[0084]** Die monostabile Vorrichtung **246** erzeugt in Antwort auf weitere Signale **244** mit einer kürzeren Periode  $T$  häufiger Steuersignale **246** mit einer konstanten Zeitdauer  $T_{on}$ , wodurch veranlaßt wird, daß der Transistor **228** häufiger auf den leitenden oder EIN-Zustand schaltet. Der vorstehend beschriebene Hochfrequenzschaltvorgang wird fortgesetzt, bis die Zellenspannung **242** sich der Referenzspannung  $V_{ref}$  **240** annähert, die in diesem Beispiel eine Abgleich-Sollwertspannung darstellt.

**[0085]** Während eines unter Verwendung der in [Fig. 15](#) dargestellten Schaltung ausgeführten Abgleichprozesses sind zwei wesentliche Betriebsphasen beobachtbar. Die erste Phase betrifft die Zeitdauer, in der der Transistor **228** auf einen leitenden Zustand eingestellt ist, wobei [Fig. 17A](#) ein Äquivalenzschaltbild für diesen Zustand darstellt. Die zweite beobachtbare Phase von Interesse betrifft die Zeitdauer, in der der Transistor auf einen nicht leitenden Zustand eingestellt ist, wobei [Fig. 17B](#) ein Äquivalenzschaltbild für diesen Zustand zeigt. [Fig. 18](#) zeigt Stromwellenformen **262**, **264**, **266**, die der Spule **230**, dem Transistor **228** bzw. der Diode **232** zugeordnet sind, in Antwort auf das durch die monostabile Vor-

richtung **226** erzeugte Steuersignal **246**. Außerdem zeigt [Fig. 18](#) eine Spannungssignalwellenform **268** zum Darstellen relativer Werte der Spannung der Zelle **223** in Antwort auf das durch die monostabile Vorrichtung **226** erzeugte Steuersignal **246**.

**[0086]** Während der Zeitdauer  $T_{on}$ , in der der Transistor **228** auf den leitenden Zustand eingestellt ist, nimmt der Strom **262** in der Spule **230** auf einen Peak- oder Spitzenwert  $I_{pk}$  zu. Der Spitzenstromwert  $I_{pk}$  der Spule **230** ist von der Zeit  $T_{on}$  und der Zellen-Spannung abhängig, wie durch die nachstehende Gleichung [2] dargestellt ist. Es ist ersichtlich, daß der Strom im Umleitungsstrompfad, d. h. durch die Spule **230** und den Transistor **228**, während der Zeitdauer  $T_{on}$  zunimmt, während kein Strom **266** durch die Diode **232** fließt.

**[0087]** Die zweite Phase von Interesse betrifft die Zeitdauer, während der der Transistor **228** auf einen nichtleitenden Zustand eingestellt ist, wobei [Fig. 17B](#) das Äquivalenzschaltbild für diesen Zustand zeigt. Wenn der Transistor **228** während der Zeitdauer  $T_{off}$  auf einen nichtleitenden Zustand eingestellt ist, wird die Polarität der Spule **230** umgekehrt. Wenn die Spannung  $V_{ds}$  über den Transistor **228** den Spannungsschwellenwert der Zenerdiode **232** erreicht, beginnt die Diode **232** Strom zu leiten, so daß die Spule **230** aberregt werden kann. Wenn der Stromfluß durch die Zenerdiode aufhört, gleicht die Spannung  $V_{ds}$  über den Transistor **228** dem Spannungsabfall  $V_1$  über die Zelle **223**.

**[0088]** Der Ladevorgang der Zelle **223** wird fortgesetzt, bis in Antwort auf das durch die monostabile Vorrichtung **226** erzeugte Steuersignal der nächste Abgleichzyklus aktiviert wird. Weil die Pulsbreite  $T_{on}$  des durch die monostabile Vorrichtung **226** erzeugten Signals **246** fest ist, ist der durch die Abgleichschaltung **220** fließende mittlere Umleitungsstrom der Frequenz des durch den VCO **224** erzeugten Signals **244** proportional, die gegeben ist durch:

$$I_{L(average)} = K \cdot F \quad [1]$$

$$I_{pk} = (V_{cell} \cdot T_{on}) / L_i \quad [2]$$

$$\text{mit } K = I_{pk} / 2 \cdot (T_{on} + dt) \quad [3]$$

wobei  $I_{L(average)}$  den über die Spule **230** umgeleiteten mittleren Strom, der dem mittleren konstanten Strom der Ladeeinheit gleichen sollte,  $I_{pk}$  den Spitzenwert des Stroms in der Spule **230**,  $T_{on}$  die Zeitdauer, während der der Transistor **228** leitend ist und  $L_i$  die Induktivität der Spule **230** bezeichnen.

**[0089]** Die [Fig. 19A–Fig. 19B](#) zeigen eine andere Ausführungsform einer Abgleichschaltung, die gemäß den erfindungsgemäßen Prinzipien arbeitet. In diesem erläuternden Beispiel weist die Abgleich-

schaltung eine Steuerungsleiterplatte **270** auf, die mit einer Leistungsleiterplatte **280** verbunden ist. Die Steuerungs- und die Leistungsleiterplatte **270**, **280**, die in [Fig. 19A](#) und in einer in [Fig. 7](#) dargestellten Ausführungsform eines Energiespeichermoduls als zwei getrennte Leiterplatten dargestellt sind, können alternativ aus einer einzelnen Leiterplatte bestehen. Durch die in [Fig. 19A](#) dargestellte zweiteilige Ausführungsform wird vorteilhaft eine effektive Spannungsisolierung zwischen dem Controller **272** der Steuerungsleiterplatte **270** und der auf der Leistungsleiterplatte **280** angeordneten Abgleichschaltung bereitgestellt. [Fig. 20](#) zeigt eine detailliertere schematische Darstellung der Abgleichschaltung.

**[0090]** In den in den [Fig. 19–Fig. 20](#) dargestellten Ausführungsformen kommuniziert ein Controller **272**, z. B. ein Mikroprozessor, typischerweise mit einem (nicht dargestellten) Batterieplattformcontroller, von dem verschiedenartige Spannungs-Sollwerte und andere Parameter zum Ausführen eines Ladeprozesses empfangen werden. Solche Parameter weisen typischerweise Niedrig- und Hochspannungs-Sollwerte und einen Zellenabgleich-Sollwert auf, z. B. die in [Fig. 10](#) dargestellten Sollwerte. Die Steuerungsleiterplatte **270** kann die Operation einer einzelnen Abgleichschaltung oder einer beliebigen Anzahl von auf der Leistungsleiterplatte **280** angeordneten Abgleichschaltungen koordinieren.

**[0091]** Jeder Zelle **271** in der Serienschaltung von Zellen ist eine Abgleichseinheit zugeordnet, die einen A/D-Wandler **279** zum Umwandeln eines ein Zellenpotential anzeigenden Analogspannungssignals in ein entsprechendes Digitalspannungssignal **275** aufweist. In einer Ausführungsform ist der A/D-Wandler **279** auf  $\pm 1$  LSB (niedrigstwertiges Bit) von 12 Bits oder 0,027%, entsprechend  $\pm 1$  mV, genau. Das digitalisierte Zellenspannungssignal  $V_{cell}$  **275** für jede Zelle **271** wird dem Controller **272** zugeführt. Der Controller **272** vergleicht einen vorgegebenen Spannungsparameter mit dem Zellenspannungssignal **275** und berechnet einen die Spannungsdifferenz zwischen der Zellenspannung  $V_{cell}$  und dem vorgegebenen Spannungsparameter darstellenden Differenzwert. Der Differenzwert wird durch eine Pulsbreitenmodulations(PWM)Schaltung **274** verwendet, um ein Steuersignal **276** mit einer festen Periode und mit einer Pulsbreite (d. h.  $T_{on}$ ) zu erzeugen, die sich proportional zur Größe des durch den Controller **272** berechneten Differenzwertes ändert.

**[0092]** Eine Isolier- oder Trennschaltung **278** mit einer Opto-Isolationsvorrichtung ist auf der Leistungsleiterplatte **280** angeordnet und empfängt das Steuersignal **276** von der Steuerungsleiterplatte **270**. Das Steuersignal **276** wird dann der Abgleichschaltung **284** zugeführt. Die Abgleichschaltung **284** weist einen Leistungs-MOSFET-Transistor **277** auf, der in Antwort auf das Steuersignal **276** zwischen einem lei-

tenden und einem nichtleitenden Zustand moduliert wird. Ein Pufferverstärker **285** ist typischerweise zwischen der Isolationsvorrichtung **278** und dem Leistungstransistor **277** geschaltet. Während eines leitenden Zustands des Transistors **277** wird ein übermäßiger Ladestrom über einen Umleitungsstrompfad **286** abgeleitet, um die Spannung der Zelle **271** während des Ladeprozesses zu steuern. Während eines nichtleitenden Zustands des Transistors **277** bleibt die Abgleichschaltung **284** im wesentlichen nichtleitend und hat keine wesentliche Wirkung auf den Ladestromfluß durch die Zelle **271**.

**[0093]** Durch die in den **Fig. 19–Fig. 20** dargestellte PWM-Abgleichschaltung können an Stelle von analogen Komponenten digitale Komponenten verwendet werden, wodurch der Rauschsignalpegel in der Schaltung reduziert wird. Dadurch wird zwischen dem Controller **272** und der Abgleichschaltung **284** anstatt eines Analogsignals ein digitales Steuersignal übertragen, wodurch eine im wesentlichen rauschfreie Signalübertragung ermöglicht wird. Außerdem wird durch die PWM-Technik ermöglicht, daß die auf der Leistungsleiterplatte **280** angeordnete Abgleichschaltung durch ein Programm im Controller **272** effizient steuerbar ist.

**[0094]** Die in den **Fig. 19–Fig. 20** dargestellte Ausführungsform stellt daher eine Schaltmodusabgleichimplementierung dar, gemäß der der Umleitungsstrom zwischen null und einem Maximalstrom geschaltet wird. Der mittlere Strom ist durch den Tastgrad des Schaltvorgangs bestimmt. Der Tastgrad wird durch ein PWM-Signal festgelegt. Weil der Schaltvorgang durch einen Transistor ausgeführt wird, wird sehr wenig Leistung verbraucht und ist die Schaltung hochgradig zuverlässig. Der Schaltvorgang erzeugt jedoch Rauschen, so daß gegebenenfalls ein Filtervorgang erforderlich ist, um bestimmte Parameter präzise messen zu können. Wenn die Spannungen durch den Mikrocontroller bestimmt werden, kann eine sehr vielseitige Software verwendet werden, um die Proportional-Integral-Differential-(PID) Schleife zu steuern. Die Vorhersagbarkeit des durch die Schaltschaltung erzeugten Rauschens kann durch die softwaregesteuerte Schaltmodus-Abgleichschaltung auf einfache Weise gemanagt werden.

**[0095]** Die **Fig. 21–Fig. 22** zeigen eine Ausführungsform einer Abgleichtechnik, gemäß der ein Abgleichvorgang während des Ladezyklus ausgeführt wird. Im Gegensatz zu den vorangehend beschriebenen Techniken, in denen ein Abgleichvorgang in der Endphase des Ladezyklus ausgeführt wird, nutzt das in den **Fig. 21–Fig. 22** dargestellte kontinuierliche Abgleichverfahren die gesamte Zeitdauer des Ladezyklus aus und verteilt die mit dem Umleitungs- oder Nebenstrom in Beziehung stehende Gesamtenergie im Vergleich zu den vorstehend beschriebenen Ver-

fahren über eine wesentlich längere Zeitdauer. Dadurch ist während des Zellenabgleichprozesses die Nebenstrommenge pro Zeiteinheit wesentlich kleiner, und die pro Zeiteinheit verbrauchte Leistung ist ebenfalls wesentlich geringer. Der mit diesem Niedrigstromabgleichprozeß verbundene niedrigere Leistungsverbrauch führt zu einer geringeren Wärmezeugung und typischerweise zu einer Senkung der Kosten der elektronischen Bauteile.

**[0096]** Beispielsweise wird gemäß einem Prozeß, in dem ein Abgleich für ein vorgegebenes Energiespeichermodul in den letzten 15 Minuten eines 8-Stunden-Ladezyklus ausgeführt wird, ein großer Teil der durch das Ladegerät während des Abgleichprozesses zugeführten Leistung durch die Abgleichschaltung als Wärme abgegeben. Der maximale Leistungsverbrauch kann wesentlich sein, er kann z. B. für eine einzige Mehrzellen-Energiespeichervorrichtung in der Größenordnung von 120 W betragen. Durch den Niedrigstromabgleichprozeß wird ein wesentlich geringerer maximaler Leistungsverbrauch erhalten, der z. B. für eine einzelne Energiespeichervorrichtung in der Größenordnung von 12 W liegt. Außerdem kann, wenn die Zellen der Energiespeichervorrichtung geeignet abgeglichen sind, der Leistungsverbrauch weiter reduziert werden, z. B. auf etwa 1 W pro Modul.

**[0097]** **Fig. 21** zeigt Spannungs- und Stromkurven für zwei in Serie geschaltete Zellen, auf die der vorstehend beschriebene Abgleichprozeß und ein kontinuierlicher Abgleichprozeß angewendet werden. Wie anhand von **Fig. 21** ersichtlich ist, wird die in Serie geschaltete Zellen mit der niedrigeren Spannung  $V_{B1}$  unter Verwendung der beiden Prozesse mit der gleichen Rate geladen. Die Zelle mit der höheren Zellenspannung  $V_{B2}$  wird anfangs schneller und mit einem höheren Abgleichstrom  $I_{B2(\text{prev})}$  unter Verwendung des vorstehend beschriebenen Abgleichprozesses geladen. Wenn ein kontinuierlicher Abgleichprozeß verwendet wird, nimmt die Spannung  $V_{B2(\text{cont})}$  der Zelle mit der höheren Spannung gleichmäßiger und bei einem niedrigeren Abgleichstrom  $I_{B2(\text{cont})}$  zu. Die Fläche unter jeder Kurve ( $I_{B2(\text{cont})}$ ,  $I_{B2(\text{prev})}$ ) ist gleich, wodurch angezeigt wird, daß die durch beide Verfahren verbrauchte Gesamtenergie gleich ist. **Fig. 21** zeigt jedoch, daß die mit dem kontinuierlichen Abgleichprozeß in Beziehung stehende Gesamtenergie über eine größere Zeitdauer verteilt ist, wodurch der Leistungsbedarf der Abgleichschaltung vermindert wird.

**[0098]** **Fig. 22** zeigt ein Ablaufdiagramm einer Ausführungsform des in **Fig. 21** charakterisierten kontinuierlichen Abgleichprozesses. Zu Beginn werden die Spannungen an jedem Knoten der Serienschaltung von Zellen und der Anschlußknoten gemessen (Schritt **410**). Diese Information wird einem Mikrocontroller oder Mikroprozessor zugeführt, der typischerweise mit jedem von mehreren Energiespeichermo-

dulen über ein Intra-Batterienetz kommuniziert. In einer Konfiguration, in der alle Zellen in einem einzigen Gehäuse angeordnet sind, muß der Mikrocontroller keine Schaltung und keine Software aufweisen, die ansonsten für eine Kommunikation mit einem Batterieplattformcomputer über ein Netz erforderlich sind.

**[0099]** Der Mikrocontroller bestimmt die Zelle mit der niedrigsten Spannung  $V_{low}$  (Schritt **412**). Dann wird eine erste Zelle der Serienschaltung ausgewählt (Schritt **413**), und die Spannung  $V_{meas}$  der ausgewählten Zelle wird gemessen (Schritt **414**). Wenn die Zellenspannung  $V_{meas}$  größer ist als  $V_{low}$  plus einer Schwellenspannung  $V_{thresh}$  (Schritt **416**), überträgt der Mikrocontroller ein Steuersignal an die Abgleichschaltung der ersten Zelle, wodurch veranlaßt wird, daß die Schaltung einen Teil des Ladestroms um die erste Zelle herum über einen Nebenschluß leitet. Das Steuersignal kann beispielsweise ein PWM-Signal oder ein analog-digital-umgesetztes Signal sein.

**[0100]** Die durch die Abgleichschaltung der ersten Zelle umgeleitete Ladestrommenge  $I_{shunt}$  ist gegeben durch:  $I_{shunt} = k(V_{meas} - V_{low})$ , wobei  $k$  eine mit der voraussichtlichen umzuleitenden Energie und mit der Restladezeit in Beziehung stehende Konstante ist. Basierend auf der letzten Leistungsfähigkeit kann die Kapazität der Zelle berechnet und der Wert für  $I_{shunt}$  auf einen Wert im Bereich zwischen  $I_{shunt} = 0$  und  $I_{shunt} = I_{max}$  eingestellt werden. Für die Schwellenspannung  $V_{thresh}$  muß eine typischerweise zwischen den Zellen vorhandene kleine Spannungsungleichheit berücksichtigt werden. Geringfügige Differenzen der Zellenspannungen können verschiedene Ursachen haben, z. B. Rauschen und Schwankungen der zugeführten Leistung. Wenn diese kleinen Spannungsdifferenzen ignoriert werden, wird die Abgleichschaltung ungeeignet arbeiten, so daß die Zellen kontinuierlich entladen und geladen werden.

**[0101]** Wenn die Spannung  $V_{meas}$  der ersten Zelle nicht größer ist als  $V_{low} + V_{thresh}$ , wird kein Ladestrom umgeleitet bzw. über einen Nebenschluß geleitet (Schritt **418**). Die nächste Zelle der Serienschaltung wird ausgewählt (Schritt **422**), und die Vergleichs- und Nebenschlußsteuerungsschritte **414**, **416**, **418**, **420**, **422**, **424** werden wiederholt, bis alle Zellen innerhalb der Serienschaltung ausgewählt worden sind. Wenn alle Zellen vollständig geladen sind (Schritt **426**), werden die Lade- und Abgleichprozesse beendet (Schritt **428**). Wenn nicht alle Zellen geladen sind, werden die vorstehend beschriebenen Abgleichschritte für die Serienschaltung wiederholt, bis alle Zellen vollständig geladen sind.

**[0102]** Die in [Fig. 23](#) dargestellte Schaltung kann für einen vorstehend beschriebenen Abgleichprozeß verwendet werden, um hochgradig präzise Spannungsmeßwerte für jede Zelle der Serienschaltung von Zellen zu erhalten. Gemäß einer herkömmlichen

Meßtechnik wird typischerweise eine Differenzspannung unter Verwendung eines Differenz-Operationsverstärkers einer Meßgerätverstärkeranordnung mit einem mit einem A/D-Wandler verbundenen Einzelausgang gemessen.

**[0103]** Für Fachleute ist ersichtlich, daß in Präzisionsanwendungen, in denen ein sehr hohes Gleichtakt-Unterdrückungs-Verhältnis (CMRR) erforderlich ist, die Verwendung eines Differenz-Operationsverstärkers problematisch ist. Beispielsweise ist zum Messen einer Spannung mit einer Genauigkeit von 1 mV (0,001 V) über einen Dynamikbereich von 28 V ein Gleichtakt-Unterdrückungs-Verhältnis von 89 dB erforderlich. Dies ist mit einem Differenz-Operationsverstärker nur schwer erreichbar. Es kann die in [Fig. 23](#) dargestellte Implementierung mit optisch isoliertem A/D-Wandler verwendet werden, um dieses Gleichtakt-Unterdrückungs-Verhältnis zu erreichen.

**[0104]** Die Spannungsmeßschaltung **430** weist zwei Analogschalter **436** auf, die in einem differentiellen Multiplexmodus arbeiten. Die zwei X-auf-1-Analogschalter **436** sind gemäß Break-Before-Make-Charakteristiken gekoppelt, um während eines Umschaltvorgangs zwischen Zellen einen Hochstromkurzschluß zu verhindern. Der A/D-Wandler **434** weist einen effektiven Differenzeingang auf, wobei die Eingangssignale tiefpaßgefiltert und vor Hochspannungs-Schaltimpulsspitzen geschützt werden. Die Isolationsvorrichtung **432** führt Leistung für den A/D-Wandler **434** zu.

**[0105]** Der analoge Multiplexschalter **436** wird verwendet, um den positiven und den negativen Anschluß einer ausgewählten Zelle **438** in der Serienschaltung auf den positiven bzw. den negativen Eingang des A/D-Wandlers **434** zu schalten. Der Durchlaß- oder Ein-Widerstand der Analogschalter **436** ist wesentlich niedriger als der Verlustwiderstand der Isolationsvorrichtung **432**. Durch diese Anordnung wird ermöglicht, daß die Spannung einer ausgewählten Zelle **438** ohne Verlust über die Eingänge des A/D-Wandlers **434** bereitgestellt wird. Der analoge Multiplexschalter **436** kann modifiziert werden, um die Spannung über die gesamte Serienschaltung von Zellen zu messen, indem ein Spannungsteiler-Widerstandsnetz an den Endanschlüssen der Serienschaltung von Zellen bereitgestellt wird.

**[0106]** Die optische Isolationsvorrichtung **432** stellt ein praktisch unendliches Gleichtakt-Unterdrückungs-Verhältnis bereit. Der A/D-Wandler **434** kann in einer seriellen Kommunikationsanwendung verwendet werden, die die Isolationsanforderung minimiert. Eine Isolierung wird für Logiksignale bereitgestellt, wodurch jegliche durch das Kommunikationsschema verursachte Fehler eliminiert werden. Ein für diese Anwendung geeigneter serieller Kommunikationsstandard ist der in der Motorola-Betriebsanleitung

für den Mikrocontroller M68HC11 definierte Serial Peripheral Interface (SPI) Standard.

**[0107]** Die [Fig. 24–Fig. 27](#) zeigen eine Ausführungsform einer in einem linearen Modus betriebenen Abgleichschaltung. In einem linearen Abgleichbetriebsmodus ist die durch die Abgleichschaltung verbrauchte Leistung dem Ladestrom und der Spannung über eine Zelle direkt proportional. In einer Ausführungsform regelt die lineare Abgleichschaltung Zellenspannungen in der Größenordnung von 3 V mit einem auf etwa 5 A begrenzten Ladestrom. Daher wird durch diese Konfiguration eine Leistung von maximal etwa 15 W pro Zelle verbraucht.

**[0108]** In einer Ausführungsform arbeitet die Abgleichschaltung selbständig oder unabhängig und erfordert keine externen Steuersysteme. Insbesondere arbeitet jede lineare Abgleichvorrichtung **250** bezüglich anderen Abgleichvorrichtungen **250** und einem externen Controller oder Prozessor selbständig oder unabhängig. In einer anderen Ausführungsform kann ein externer Controller mit jeder der linearen Abgleichvorrichtungen **250** kommunizieren. Ein externer Mikrocontroller kann beispielsweise ein die Anweisung "Sollwert ersetzen" anzeigendes Steuersignal an alle Abgleichvorrichtungen **250** eines Moduls übertragen, wodurch der durch die Abgleichvorrichtungen **250** normalerweise verwendete Spannungssollwert ersetzt wird. Außerdem kann der Mikrocontroller Temperatur- und Spannungsmeßwerte über einen Datenkanal übertragen, der dazu geeignet ist, die Anforderungen einer bestimmten Anwendung zu erfüllen. Der Mikrocontroller kann außerdem verschiedenartige Verwendungen des Energiespeichermoduls überwachen und im Fall einer Störung Produktgarantie- und Validationsinformation übertragen.

**[0109]** Jede der linearen Abgleichvorrichtungen **250** arbeitet in einem linearen Modus und kann daher als "Nebenschlußspannungsregler" betrachtet werden. Die analoge Rückkopplungssteuerung **252** der Abgleichvorrichtung **250** überwacht kontinuierlich die Spannung über eine zugeordnete Zelle **256**. Die Weise, auf die die analoge Rückkopplungsschaltung **252** auf den Spannungszustand der Zelle reagiert, ist durch eine charakteristische Kurve vorgegeben, z. B. durch die in [Fig. 28](#) dargestellte Kurve, die derjenigen einer Super-Zenerdiode sehr ähnlich ist. Diese Kurve charakterisiert das Verhalten der analogen Rückkopplungssteuerung **252** in Antwort auf die Spannung über die Zelle **256**.

**[0110]** Die analoge Rückkopplungssteuerung **252** weist einen fernprogrammierbaren Spannungsverstärker und einen Stromverstärker auf. Die analoge Rückkopplungssteuerung **252** steuert in Antwort auf den Spannungszustand der Zelle **256** (d. h.  $V_{in}$ ) einen Leistungstransistor **258**, der den Ladestromfluß über

den Umleitungsstrompfad **260** steuert. In dieser Konfiguration ist der Leistungstransistor **258** die einzige Komponente, die Wärme abgibt.

**[0111]** Weil die Zellen **256** in Serie geschaltet sind, werden durch diese Anordnung Offset-Spannungen zwischen einzelnen Abgleichvorrichtungen **250** verursacht. Eine effektive Weise zum Berücksichtigen dieses Offset-Spannungsproblems besteht darin, eine Abgleichtechnik zu implementieren, gemäß der jede Abgleichvorrichtung **250** unabhängig von anderen Abgleichvorrichtungen **250** arbeitet, wobei die Abgleichvorrichtung **250** durch eine bestimmte Zelle **256** mit Leistung versorgt wird, mit der sie verbunden ist. Außerdem wird der Betriebsspannungs-Sollwert von einer gemeinsamen Referenzschaltung durch eine von der Offset-Spannung unabhängige Stromquelle übertragen. Auf ähnliche Weise wird die Zellenspannung unter Verwendung einer Stromquelle, die proportional zur Zellenspannung ist, an die gemeinsame Meßschaltung übertragen. Durch Empfangen von Sollwertinformation und Übertragen von Spannungsinformation unter Verwendung von Konstantstromquellen kann die zum vollständigen Berücksichtigen des Offset-Spannungsproblems erforderliche Schaltung wesentlich vereinfacht werden.

**[0112]** Es wird eine Präzisions-Referenzspannung verwendet, um den absoluten Spannungsarbeitspunkt zu setzen. Jeder Abgleichvorrichtung **250** ist eine Stromquelle zugeordnet. Jede Stromquelle erzeugt einen konstanten Strom, der von der Offset-Spannung unabhängig und zur Referenzspannung proportional ist. Die charakteristische Ladekurve einer Lithiumzelle, z. B. der in [Fig. 5](#) dargestellten Zelle, zeigt, daß die Spannung über die Zelle den Ladestrom der Zelle geeignet widerspiegelt.

**[0113]** Um Zellen mit einer Genauigkeit von etwa 1% gleichmäßig zu laden, muß die Spannung der einzelnen Zellen in der Größenordnung von 10 mV bei einer Gesamtaufladung von 3 V angepaßt oder abgeglichen werden. Daher muß die Genauigkeit der Regelschaltung in der Größenordnung von 0,3% liegen, um eine Reproduzierbarkeit bei der Herstellung zu gewährleisten, ohne daß Nachstell- oder Justierprozesse ausgeführt werden müssen. Jede der Abgleichvorrichtungen **250** ist statisch strombegrenzend, um eine schädigende Leistungsaufnahme zu vermeiden. Dies wird durch Begrenzen des Treiberstroms der Leistungsstufe unter Verwendung eines Widerstandes **251** erreicht.

**[0114]** Zum Zweck der Flexibilität kann der Betriebsspannungs-Sollwert verändert und auf einen beliebigen gewünschten Pegel gesetzt werden. Dieses Merkmal kann auch zum Entladen der Zellen auf einen niedrigeren Sollwert verwendet werden, um während eines Bereitschaftsbetriebsmodus einen Abgleich in den Zellen zu ermöglichen. Der Betriebs-

spannungs-Sollwert kann typischerweise über den nutzbaren Spannungsbereich der Zellen **256** geändert werden.

**[0115]** In einer Ausführungsform kann die hierin beschriebene Abgleichschaltung auf einer elektronischen Leiterplatte angeordnet sein, die außerhalb des Energiespeichermoduls angeordnet ist. Die elektronische Leiterplatte, und insbesondere die Leistungstransistoren und/oder Lasttransistoren, können am Temperaturmanagementsystem des Moduls befestigt sein, das während eines Ladezyklus durch das Modul erzeugte Wärme abgibt. Leistungs- und Erfassungssignale können über einen Glasdichtungsverbinder an die Komponenten der elektronischen Leiterplatte übertragen werden. In einer anderen Ausführungsform ist die elektronische Leiterplatte, auf der die Abgleichschaltung montiert ist, im Modulgehäuse integriert, wobei die Leistungstransistoren und/oder Lastwiderstände an den Kühlkörperelementen des Temperaturmanagementsystems des Moduls mechanisch befestigt sind.

**[0116]** Die [Fig. 29–Fig. 39](#) zeigen eine Ausführungsform einer Hochstrom-Abgleichschaltung, die insbesondere zur Verwendung mit in Serie geschalteten Hochenergie-Speicherzellen geeignet ist. In einer Anwendung, in der die zum Laden einer Serienschaltung von Zellen (z. B. eines Moduls oder einer Batterie) erforderliche Zeit besonders wichtig ist, ist es wünschenswert, die während des Abgleichprozesses durch eine Abgleichschaltung fließende Strommenge zu maximieren. Durch Erhöhen der Stromtransportfähigkeit einer Abgleichschaltung können während eines Abgleichprozesses höhere Strommengen durch die Serienschaltung von Zellen geleitet werden, wodurch die zum vollständigen Aufladen der Zellen erforderliche Zeitdauer abnimmt. Wenn eine größere Umleitungsstrommenge durch die Abgleichsschaltung geleitet wird, wird jedoch in der Abgleichschaltung eine größere Wärmemenge erzeugt.

**[0117]** In vielen Anwendungen ist die durch eine bestimmte Vorrichtung leitbare Strommenge häufig durch die Fähigkeit der Vorrichtung, durch die Vorrichtung erzeugte Wärme abzugeben, begrenzt. Bei dem z. B. in [Fig. 7](#) dargestellten Energiespeichermodul, das eine auf einer Verbindungsleiterplatte angeordnete Abgleichschaltung aufweist, wird durch die Abgleichschaltung erzeugte Wärme über das Temperaturmanagementsystem des Moduls abgegeben. In einer Ausführungsform eines Hochstrom-Abgleichschemas, z. B. bei dem in den [Fig. 29–Fig. 39](#) dargestellten Abgleichschema, ist die Abgleichschaltung dazu geeignet, einen Strom von mindestens 5 A durchzulassen, durch den etwa 15 W Verlustleistung entstehen.

**[0118]** In einer Modulkonfiguration, in der z. B. acht Abgleichschaltungen verwendet werden, muß das

Temperaturmanagementsystem des Moduls in der Lage sein, etwa 120 W (15 W × 8) der durch die Abgleichschaltungen insgesamt erzeugten überschüssigen Wärme zu managen. Daher ist die Adäquatheit des Temperaturmanagementsystems des Moduls besonders wichtig, wenn ein Abgleichschema verwendet wird, durch das ein relativ großer Strom umgeleitet wird.

**[0119]** [Fig. 29](#) zeigt eine Ausführungsform einer Hochstrom-Abgleichschaltung **300** mit einem Abgleichmodul **302** und einem Mikrocontroller, z. B. einem in [Fig. 20](#) dargestellten Mikrocontroller **214**. Das Abgleichmodul **302** weist einen Umleitungsschalter **306** auf, der zu einer Energiespeicherzelle **304** parallelgeschaltet ist. Ein Signaltreiber **310** steuert den Umleitungsschalter **306** durch Übertragen eines Signals **311** zum Umleitungsschalter **306**. Ein A/D-Wandler **308** mißt die Spannung über die Zelle **304** und wandelt das Analogspannungssignal in ein entsprechendes Digitalspannungssignal um. Durch die Konfiguration des parallel zur Zelle geschalteten Umleitungsschalters **306** wird ermöglicht, daß die Zelle innerhalb eines breiten Stromflußbereichs geladen oder entladen werden kann. Durch eine Opto-Isolationsvorrichtung **312** wird eine Spannungsisolierung zwischen dem Abgleichmodul **302** und dem Mikrocontroller **314** bereitgestellt. Dadurch wird das Abgleichmodul **302** vom Mikrocontroller **314** isoliert, wodurch der Mikrocontroller **314** vor in Verbindung mit der Hochspannungs-Serienschaltung auftretenden schädlichen Spannungspegeln geschützt wird.

**[0120]** Gemäß dieser Ausführungsform legt der Mikrocontroller **314** einen Spannungs-Sollwert oder -pegel fest, bei dem das Abgleichmodul **302** aktiviert wird. Im allgemeinen legt der Mikrocontroller **314** einen Spannungs-Sollwert fest, der über den nutzbaren Spannungsbereich der Zelle **304** verändert werden kann, und überträgt das der gemessenen Spannung und dem Spannungs-Sollwert entsprechende berechnete PWM-Signal **315** während des Lade- oder Entladezyklus zu einem beliebigen Zeitpunkt an das Abgleichmodul **302**.

**[0121]** Die in [Fig. 29](#) dargestellte Abgleichschaltung dient sowohl als Spannungsausgleichschaltung als auch als Überladungsschutzschaltung für die Zelle **304**. Während eines Lade- oder Entladezyklus ist der Umleitungsschalter **306** typischerweise auf einen nichtleitenden Zustand eingestellt, bis die durch den A/D-Wandler **308** gemessene Spannung über die Zelle **304** einen durch den Mikrocontroller **314** festgelegten vorgegebenen Spannungs-Sollwert überschreitet. Wenn beispielsweise vorausgesetzt wird, daß durch den Mikrocontroller **314** ein Niedrigspannungs-Sollwert festgelegt wurde, bleibt der Umleitungsschalter **306** auf einem nichtleitenden Zustand, bis der vorgegebene Niedrigspannungs-Sollwert erreicht ist.

**[0122]** Wenn beispielsweise die Spannung über die Zelle **304** einen Abgleichspannungs-Sollwert oder einen Überladungsspannungs-Sollwert erreicht, erzeugt der Controller **314** ein PWM-Steuersignal **315**, das über die Opto-Isolationsvorrichtung **312** übertragen und durch den Signaltreiber **310** empfangen wird. Der Signaltreiber **310** erzeugt in Antwort auf das PWM-Steuersignal **315** ein digitales Steuersignal **311**, das den Umleitungsschalter **306** steuert. Um die Spannung der Zelle **306** bei einem konstanten Pegel zu halten, überträgt der Controller **314** PWM-Steuersignale **315** an das Abgleichmodul **302**, um die zur Zelle **304** durchgelassene und die über den Umleitungsstrompfad **316** abgeleitete Strommenge zu steuern. Der Controller **314** kommuniziert typischerweise mit mehreren Energiespeichermodulen, die jeweils typischerweise mehrere Abgleichmodule **302** aufweisen.

**[0123]** Gemäß einer Ausführungsform eines Batteriesystems, das mehrere miteinander verbundene selbständige Energiespeichermodule aufweist, empfängt ein Batterieplattformcomputer Zellenspannungsinformation von einem in jedem Modul bereitgestellten Prozessor oder Controller **314**. In dieser Konfiguration wählt der Batterieplattformcomputer typischerweise jedes der Module aus und ruft mit dem Spannungszustand der Zellen oder von Zelleinheiten in Beziehung stehende Information ab. Unter Verwendung der abgerufenen Spannungsinformation bestimmt der Batterieplattformcomputer wann und bei welchem Spannungspegel der Zellenabgleichprozeß aktiviert werden sollte, z. B. am Ende eines Ladezyklus, vor einem Ladezyklus oder an Anfang oder Ende eines Entladezyklus.

**[0124]** [Fig. 30](#) zeigt mehrere einzelne Abgleichmodule **302**, die jeweils mit einer einzelnen Energiespeicherzelle **304** verbunden sind. Die Zellen **304** sind in Serie geschaltet, um ein Hochspannungsmodul oder eine Batterie zu bilden. [Fig. 30](#) zeigt den Entladestromfluß durch eine Last **320**, und [Fig. 31](#) zeigt den durch ein Ladegerät **322** erzeugten Ladestromfluß durch die Serienschaltung von Zellen. Während eines Entladezyklus fließt, wie in [Fig. 30](#) dargestellt ist, ein Entladestrom  $I_D$  durch die Serienschaltung der Zellen und die Last **320**. Weil die Anfangsspannung über jede der Zellen **304** typischerweise niedriger ist als ein vorgegebener Abgleich-Sollwert, befindet sich jeder der Umleitungsschalter **306** in einem nichtleitenden oder AUS-Zustand. Daher kann der Entladestrom  $I_D$  sehr hoch sein, z. B. 400 A Peak- bzw. Spitzenstrom betragen.

**[0125]** Während eines Ladezyklus fließt, wie in [Fig. 31](#) dargestellt ist, ein Ladestrom  $I_C$  vom positiven Anschluß des Ladegeräts **322** über die Serienschaltung der Zellen und fließt über den negativen Anschluß des Ladegeräts **322** zurück. Am Anfang des Ladezyklus wird den Zellen **304** der gesamte Lade-

strom zugeführt, und die Abgleichmodule **302** befinden sich in einem nicht-aktivierten Zustand. Daher kann der Ladestrom  $I_C$  sehr hoch sein, bis die Abgleichmodule aktiviert werden.

**[0126]** Die Spannung über jede Zelle **304** wird durch einen zugeordneten A/D-Wandler **308** überwacht, der z. B. ein serieller 12-Bit-A/D-Wandler sein kann. Der A/D-Wandler **308** überträgt die Spannungsinformation über eine durch die Opto-Isolationsvorrichtungen **132** bereitgestellte isolierte Verbindung zum Mikrocontroller **314**. Der Controller **314** erzeugt PWM-Steuersignale **315**, die jedem der Abgleichmodule **302** zugeführt werden. In Antwort auf die Steuersignale **315** steuern die einzelnen Abgleichmodule **302** den zu ihrer zugeordneten Zelle **304** oder ihrem zugeordneten Umleitungsstrompfad **316** fließenden Strom auf die vorstehend unter Bezug auf [Fig. 29](#) beschriebene Weise.

**[0127]** [Fig. 32](#) zeigt eine detaillierte Darstellung einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Abgleichmoduls. In dieser Ausführungsform managt ein (nicht dargestellter) Mikrocontroller die Operation des Abgleichmoduls **330** z. B. durch Definieren von Abgleichspannungs-Sollwerten, Erzeugen von PWM-Steuersignalen und Festlegen von Zellenspannungspegeln. Eine Spannungsisolierung zwischen dem Mikrocontroller und dem Abgleichmodul **330** wird durch Opto-Isolatoren OPTO 1–4 bereitgestellt.

**[0128]** Der Mikrocontroller steuert den A/D-Wandler, wenn das Potential über die Zelle **332** bestimmt wird, durch Zuführen geeigneter Signale zu Eingängen CLK/E und CONVERT **340**, **341** des Abgleichmoduls. Ein die gemessene Spannung der Zelle **332** darstellendes Signal wird am Ausgang  $D_{out}$  **338** bereitgestellt. Wenn der Mikrocontroller bestimmt, daß die durch den A/D-Wandler **334** gemessene Zellenspannung kleiner ist als der vorgegebene Abgleichspannungs-Sollwert oder der Überspannungs-Sollwert, hat das PWM-Ausgangssignal am Knoten **336** einen niedrigen Pegel, und der Leistungs-MOSFET-Transistor **342** ist aus- oder auf einen nichtleitenden Zustand geschaltet. Während dieser Zeitdauer wird der Zelle **332** der gesamte Ladestrom  $I_C$  zugeführt. [Fig. 33B](#) zeigt ein Äquivalenzschaltbild des Abgleichmoduls **330**, wenn der Transistor **342** auf einen nichtleitenden Zustand eingestellt ist.

**[0129]** Wenn die Spannung über die Zelle **332** einen Spannungs-Sollwert erreicht, erzeugt der Controller ein digitales PWM-Signal, das eine PID-Funktion der gemessenen Zellenspannung und verschiedener Ladeparameter ist, wie beispielsweise des Abgleichspannungs-Sollwertes, von Filterzeitkonstanten und der Abtastfrequenz. [Fig. 33A](#) zeigt ein Äquivalenzschaltbild der Abgleichschaltung **330**, wenn der Transistor **342** auf einen leitenden Zustand geschaltet ist.

[0130] [Fig. 33A](#) zeigt außerdem, daß, wenn der Transistor **342** auf einen leitenden Zustand geschaltet ist, ein Ladestrom über einen Widerstand **344** und den Transistor **342** abgeleitet wird, die einen Umleitungsstrompfad **346** definieren. Außerdem fließt Strom von der Zelle **332** in den Umleitungsstrompfad **346** und wird über den Widerstand **344** und den Transistor **342** geleitet. Während der Zeitdauer, in der der Transistor **342** leitend ist, ist die durch den Transistor **342** aufgenommene Leistung durch folgende Gleichung gegeben:

$$P_{T\text{-ave}} = R_{D\text{Son}} \cdot (I_{\text{equal-ave}})^2 \quad [4]$$

[0131] Der Widerstand **344** nimmt nahezu die gesamte Leistung auf, die durch die folgende Gleichung gegeben ist:

$$P_{R\text{-ave}} = R_1 \cdot (I_{\text{equal-ave}})^2 \quad [5]$$

wobei  $P_{T\text{-ave}}$  die durch den Transistor aufgenommene mittlere Leistung,  $R_{D\text{Son}}$  den Drain-Source-Widerstand des Transistors in einem leitenden Zustand,  $I_{\text{equal-ave}}$  den durch den Umleitungsstromweg der Abgleichschaltung fließenden mittleren Strom,  $P_{R\text{-ave}}$  die durch den Widerstand **344** aufgenommene mittlere Leistung und  $R_1$  den Widerstandswert des Widerstands **344** bezeichnen.

[0132] Die durch den Stromfluß durch die Abgleichschaltung **330** erzeugte Wärme wird typischerweise durch ein mit der Abgleichschaltung **330** verbundenes Temperaturmanagementsystem gemanagt. Typischerweise sind die Abgleichschaltung **330**, und insbesondere der Transistor **342** und der Widerstand **344**, an einem mit dem Temperaturmanagementsystem verbundenen Kühlkörper befestigt, z. B. mit einer Kupferbasisplatte oder einer metallischen Halterungsstruktur.

[0133] Wenn die Zelle **332** einen vollständig aufgeladenen Zustand erreicht, nimmt der Tastgrad des Transistors **342** im leitenden Zustand zu, um einen größeren Prozentanteil des Ladestroms über den Umleitungsstrompfad **346** umzuleiten. Der mittlere Strom  $I_{\text{equal-ave}}$  der Abgleichschaltung, nachdem die Zelle einen vollständig aufgeladenen Zustand erreicht hat, ist gegeben durch:

$$I_{\text{equal-ave}} = V_{\text{cell}}/R \cdot D \quad [6]$$

$$D = T_{\text{on}}/T \quad [7]$$

wobei  $D$  den Tastgrad bzw. Arbeitszyklus des durch den Mikrocontroller oder Signaltreiber erzeugten Steuersignals darstellt. Der über die Zelle geleitete mittlere Strom ist gegeben durch:

$$I_{\text{cell-ave}} = I_{\text{charger}} - I_{\text{equalizer}} \quad [8]$$

[0134] Der Graph von [Fig. 34](#) zeigt verschiedene mit einer Zelle, einer Abgleichschaltung und einem Ladegerät in Beziehung stehende Spannungs- und Stromwellenformen in der Endphase eines Abgleichprozesses. Im Bereich 1 des Graphen ist ersichtlich, daß die Zelle den gesamten Ladestrom empfängt und kein Ladestrom über die Abgleichschaltung umgeleitet wird. Im Bereich 2 des Graphen wird die Abgleichschaltung aktiv, wobei ein relativ kleiner Prozentanteil des Ladestroms für den Stromumleitungsstrompfad umgeleitet wird. Im dritten Bereich des Graphen wird der gesamte durch das Ladegerät zugeführte Strom über die Abgleichschaltung umgeleitet.

[0135] [Fig. 35](#) zeigt eine graphische Darstellung einer Spannungswellenform für eine Zelle, auf die eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Hochleistungs-Abgleichprozesses angewendet wird. Der Ladeparameter  $V_{\text{set}}$  stellt den Abgleichspannungs-Sollwert dar, bei dem ein Abgleichprozeß aktiviert wird. Der Ladeparameter  $\pm V_{H1}$  stellt einen Toleranzbereich oder eine Hysterese dar, die in Verbindung mit dem Abgleichspannungs-Sollwert  $V_{\text{set}}$  auftritt. Diese Parameter werden typischerweise durch den Controller festgelegt. [Fig. 36](#) zeigt ein Diagramm eines digitalen Steuersignals, das durch die dem Umleitungstransistor steuernde Signaltreiberschaltung erzeugt wird. In den [Fig. 35-Fig. 36](#) sind sechs spezifische Bereiche von Interesse dargestellt.

[0136] Im Bereich 1 ist die Zellenspannung niedriger als der Spannungs-Referenzwert  $V_{\text{set}}$ , wobei der untere Hystereseschwellenwert  $-V_{H1}$  berücksichtigt wurde. Bei diesem Zellenpotential wird durch den Controller oder Signaltreiber kein Steuersignal erzeugt, so daß der Transistor **342** ausgeschaltet bleibt. Dadurch wird der gesamte Ladestrom der Zelle **332** zugeführt. Im Bereich 2 liegt die Zellenspannung innerhalb des Hysteresebereichs  $V_{H1}$  (d. h. zwischen  $[V_{\text{set}} + V_{H1}]$  und  $[V_{\text{set}} - V_{H1}]$ ). Innerhalb dieses Hysteresebereichs wird durch den Controller kein Steuersignal erzeugt, und der Transistor verbleibt in einem nichtleitenden Zustand. Im Bereich 3 überschreitet die Zellenspannung den oberen Hystereseschwellenwert  $+V_{H1}$ . In Antwort darauf erzeugt der Controller PWM-Impulse, und der Signaltreiber erzeugt Steuersignale, die den Transistor veranlassen, zwischen einem nichtleitenden und einem leitenden Zustand umzuschalten. Dadurch wird der Ladestrom über den Stromumleitungsstrompfad **346** umgeleitet.

[0137] Wenn der Transistor **342** leitend ist, nimmt die Zellenspannung ab. Wenn die Zellenspannung innerhalb des Hysteresebereichs liegt, wie im Bereich 4 dargestellt ist, bleibt der Tastgrad des Steuersignals konstant. Wenn die Zellenspannung weiter abnimmt und den unteren Hystereseschwellenwert  $-V_{H1}$  unterschreitet, wie im Bereich 5 dargestellt ist, nimmt der Tastgrad ab, bis die Zellenspannung den Wert  $V_{\text{cell}} = V_{\text{set}} - V_{H1}$  erreicht. Zu diesem Zeitpunkt wird der Tast-

grad des Steuersignals erneut konstant. Wenn der gesamte Ladestrom über den Stromumleitungsweg **346** abgeleitet wird (d. h., wenn die Zelle vollständig aufgeladen ist), wie im Bereich 6 dargestellt ist, wird der Tastgrad des Steuersignals konstant und minimal.

[0138] **Fig. 37** zeigt mehrere den Bereichen 3 und 6 des in **Fig. 35** dargestellten Graphen entsprechende Stromwellenformen. **Fig. 37** zeigt der Gate-Source-Spannung ( $V_{GS}$ ) des Transistors, dem Umleitungsstrom der Abgleichschaltung und dem Zellenstrom entsprechende Stromwellenformen in Antwort auf durch den Signaltreiber erzeugte Steuersignale. Die in **Fig. 35** dargestellte Spannungswellenform zeigt eine sehr kleine Welligkeit, die aufgrund des Strompulsmodus der in **Fig. 37** dargestellten Abgleichoperation erhalten wird.

[0139] **Fig. 38** zeigt eine Ausführungsform eines Abgleich- und Umleitungsmoduls **350**, das eine Schaltung zum Ausführen von Zellenabgleich- und Zellenumleitungsfunktionen aufweist. Durch die Umleitungsrichtung wird, falls sie aktiviert ist, eine defekte Zelle oder Zelleneinheit von einer Serienschaltung von Zellen elektrisch isoliert. Die Umleitungsrichtung weist typischerweise eine elektrisch oder thermisch aktivierte Sicherung auf, die, falls sie ausgelöst wird, die defekte Zelle wirksam von der Serienschaltung trennt.

[0140] Das Abgleich- und Umleitungsmodul weist eine elektronische Steuerungsleiterplatte **354** auf, die in einem isolierten Bereich oder in einer Kammer des Modulgehäuses angeordnet ist, um die Wärmeableitung zu verbessern. Ein Leistungs-MOSFET-Transistor **356** und ein Lastwiderstand **358**, die auf einer Verbindungsleiterplatte angeordnet sind, stehen ebenfalls mit einem Kupfer-Wärmeleiter in thermischem Kontakt. Das Modul **350** weist einen positiven und einen negativen Kupfermetallanschluß **362**, **360** auf, die an der in **Fig. 39** dargestellten Verbindungsleiterplatte **370** montiert sind. Gemäß dieser Konfiguration ist das Abgleich- und Umleitungsmodul **350** in einem 0,625" hohen Gehäuse **352** hermetisch abgedichtet aufgenommen.

[0141] **Fig. 39** zeigt eine Darstellung einer Verbindungsleiterplatte **370**, auf der das in **Fig. 38** dargestellte Abgleich- und Umleitungsmodul **370** montiert ist. Die Verbindungsleiterplatte **370** wird typischerweise aus einer Kupfer-Basisplatte oder einer maschinengefrästen Kupferplatte mit einer Dicke von etwa 0,05" hergestellt. Die Verbindungsleiterplatte **370** weist einen positiven und einen negativen Anschluß **372**, **374** auf, die typischerweise mit anderen in Serie geschalteten Energiespeichermodulen verbunden sind. Außerdem ist eine an der Verbindungsleiterplatte **370** montierte integrierte Sicherungseinheit **376** dargestellt, die mehrere einzelne Sicherun-

gen aufweist, die jeweils mit einer zugeordneten Zelle **304** in Serie geschaltet sind.

[0142] Die durch das Abgleich- und Umleitungsmodul **350** erzeugte Wärme wird über den positiven und den negativen Anschluß **362**, **360** der Moduleinheit **350** entlang der wärmeleitenden Oberflächen der Verbindungsleiterplatte **370** und schließlich zum Temperaturmanagementsystem des Energiespeichermoduls geleitet. Gemäß dieser Konstruktion ist das Abgleich- und Umleitungsmodul **350** in der Lage, während eines Lade- oder Entladezyklus einen Strom von mindestens 5 A umzuleiten und etwa 15 W Leistung abzugeben.

[0143] Die verschiedenen vorstehend beschriebenen Ausführungsformen können natürlich auf verschiedene Weise modifiziert oder ergänzt werden. Beispielsweise können die erfindungsgemäßen Prinzipien in Verbindung mit Batterietechniken verwendet werden, die von Techniken verschieden sind, in denen Lithium-Polymer-Elektrolyte verwendet werden, z. B. mit Techniken, in denen Nickel-Metall-Hydrid-(Ni-MH), Lithiumionen- (Li-Ion) verwendet werden, und mit anderen Hochenergiebatterietechniken. Daher ist der Schutzzumfang der vorliegenden Erfindung nicht durch die vorstehend diskutierten besonderen Ausführungsformen, sondern ausschließlich durch die beigefügten Patentansprüche definiert.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Laden von in Serie geschalteten elektrochemischen Zellen mit den Schritten:  
Zuführen eines Ladestroms zu den elektrochemischen Zellen, um zu veranlassen, daß eine Spannung in jeder der in Serie geschalteten elektrochemischen Zellen ansteigt;  
Bereitstellen eines regelbaren Nebenstrompfades parallel zu jeder der in Serie geschalteten elektrochemischen Zellen, über den der gesamte Ladestrom oder ein Teil des Ladestroms fließen kann;  
Leiten einer zunehmenden Menge des Ladestroms in Antwort darauf, daß die Spannung einer bestimmten elektrochemischen Zelle einen vorgegebenen Spannungswert erreicht, über den Nebenstrompfad der bestimmten elektrochemischen Zelle, ohne daß der den anderen elektrochemischen Zellen zugeführte Ladestrom unterbrochen wird, bis die Spannung der bestimmten elektrochemischen Zelle sich bei einem zweiten Spannungswert stabilisiert, wobei zu dieser Zeit der gesamte Ladestrom über den Nebenstrompfad geleitet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, ferner mit dem Schritt: Verhindern eines Überladens der bestimmten elektrochemischen Zelle durch graduelles Erhöhen der über den Nebenstrompfad geleiteten Ladestrommenge, bis die Spannung der bestimmten elektrochemischen Zelle einen Spannungsgrenzwert er-

reicht, bei dem der gesamte Ladestrom über den Nebenstrompfad geleitet wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die über den Nebenstrompfad geleitete Ladestrommenge um die bestimmte elektrochemische Zelle herum zu den anderen elektrochemischen Zellen geleitet wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei der Ladestrom alternierend der bestimmten elektrochemischen Zelle und dem Nebenstrompfad zugeführt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, ferner mit dem Schritt zum Modulieren eines zur bestimmten elektrochemischen Zelle parallel geschalteten Schalters, um den Ladestrom der bestimmten elektrochemischen Zelle und dem zur bestimmten elektrochemischen Zelle parallel geschalteten Nebenstrompfad zuzuführen.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei der Schalter unter Verwendung einer Pulsbreitenmodulations- oder einer Frequenzmodulationstechnik moduliert wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei der Schritt des Zuführens des Ladestroms aufweist:

Zuführen des Ladestroms mit einem im wesentlichen konstanten Pegel zu den elektrochemischen Zellen, bis die bestimmte elektrochemische Zelle den Spannungs-Sollwert erreicht; und

Anlegen einer im wesentlichen konstanten Ladespannung mit einem ersten Spannungspegel über die elektrochemischen Zellen, wenn mindestens eine elektrochemische Zelle den Spannungs-Sollwert erreicht.

8. Verfahren nach Anspruch 7, ferner mit dem Schritt: Vermindern des den elektrochemischen Zellen zugeführten konstanten Ladestrompegels um einen vorgegebenen Wert, bis alle elektrochemischen Zellen den Spannungs-Sollwert erreichen.

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, wobei der Schritt des Anlegens der im wesentlichen konstanten Ladespannung aufweist: Bestimmen des ersten Spannungspegels durch Summieren der gemessenen Spannungen der elektrochemischen Zellen, nachdem alle elektrochemischen Zellen den Spannungs-Sollwert erreicht haben.

10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, ferner mit dem Schritt: Anlegen einer im wesentlichen konstanten Ladespannung mit einem bestimmten Spannungspegel über die elektrochemischen Zellen, bevor den elektrochemischen Zellen der Ladestrom mit einem im wesentlichen konstanten

Pegel zugeführt wird, um einen Vorabgleich der elektrochemischen Zellen zu erreichen.

11. Verfahren nach Anspruch 10, ferner mit den Schritten:

Bestimmen einer Spannung jeder der in Serie geschalteten elektrochemischen Zellen;

Berechnen einer Spannungsdifferenz zwischen einem Maximalwert und einem Minimalwert der Spannungen der elektrochemischen Zellen; und

Setzen des bestimmten Spannungspegels auf den Maximalwert, wenn die Spannungsdifferenz einen voreingestellten Grenzwert überschreitet, um den Vorabgleich der elektrochemischen Zellen zu aktivieren.

12. Verfahren nach Anspruch 10, ferner mit den Schritten:

Bestimmen einer Spannung jeder der in Serie geschalteten elektrochemischen Zellen;

Bestimmen eines Maximalwertes und eines Minimalwertes der Spannungen der elektrochemischen Zellen; und

Anlegen einer konstanten Ladespannung mit dem Maximalwert über die elektrochemischen Zellen, bevor den elektrochemischen Zellen der Ladestrom mit einem im wesentlichen konstanten Pegel zugeführt wird, um den Vorabgleich der elektrochemischen Zellen zu aktivieren.

13. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die elektrochemischen Zellen und der regelbare Nebenstrompfad in einem geschlossenen Gehäuse angeordnet sind, und wobei das Leiten einer zunehmenden Ladestrommenge der bestimmten elektrochemischen Zelle über den Nebenstrompfad innerhalb des geschlossenen Gehäuses ausgeführt wird.

14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei der durch die bestimmte elektrochemische Zelle fließende Ladestrom digital geregelt wird.

15. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei während der gesamten Zufuhr des Ladestroms die Spannung jeder elektrochemischen Zelle der in Serie geschalteten elektrochemischen Zellen gemessen und die Spannungsdifferenzen zwischen der elektrochemischen Zelle mit der niedrigsten Spannung und den anderen elektrochemischen Zellen unterhalb eines Schwellenwertes gehalten wird, indem ein Teil des Ladestroms um jede elektrochemische Zelle herum geleitet wird, deren gemessene Spannung die niedrigste Spannung um einen Wert überschreitet, der größer ist als der Schwellenwert, wodurch während des gesamten Ladezyklus ein kontinuierlicher Abgleich zwischen den in Serie geschalteten elektrochemischen Zellen erreicht wird.

16. Spannungsabgleichvorrichtung, die mit einer Ladeinheit verbunden ist, die einen Ladestrom bereitstellt, wobei die Spannungsabgleichschaltung aufweist:

mehrere in Serie geschaltete elektrochemische Zellen;

mehrere Abgleicheinrichtungen, wobei jede der Abgleicheinrichtungen mit einer der mehreren elektrochemischen Zellen verbunden ist und aufweist:

einen mit einer entsprechenden der elektrochemischen Zellen verbundenen Detektor zum Erfassen einer Spannung der entsprechenden elektrochemischen Zelle, wobei der Detektor einen Vergleich aufweist, der eine Spannungsdifferenz zwischen der Spannung der entsprechenden elektrochemischen Zelle und einer Referenzspannung bestimmt, wobei der Detektor ein mit der Spannungsdifferenz in Beziehung stehendes Ausgangssignal erzeugt;

einen mit dem Detektor verbundenen Signalgenerator zum Erzeugen eines Steuersignals in Antwort auf das Detektorausgangssignal; und

eine mit der entsprechenden elektrochemischen Zelle und dem Signalgenerator verbundene Nebenstromschaltung, wobei die Nebenstromschaltung in Antwort auf das Steuersignal einen Teil des Ladestroms leitet, so daß er um die entsprechende elektrochemische Zelle herum geleitet wird, ohne daß der den anderen der mehreren elektrochemischen Zellen zugeführte Ladestrom unterbrochen wird.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, wobei der Signalgenerator eine Frequenzmodulationsschaltung oder eine Pulsbreitenmodulationsschaltung aufweist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17, wobei der Signalgenerator ferner einen mit dem Detektor und einer monostabilen Vorrichtung verbundenen spannungsgesteuerten Oszillator aufweist, wobei die monostabile Vorrichtung mit der Nebenstromschaltung verbunden ist.

19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 18, wobei der Signalgenerator ferner aufweist:

einen mit dem Detektor verbundenen spannungsgesteuerten Oszillator zum Erzeugen eines Ausgangssignals mit einer Frequenz, die sich bezüglich einer Größe des Detektorausgangssignals ändert; und eine mit dem spannungsgesteuerten Oszillator und der Nebenstromschaltung verbundene monostabile Vorrichtung, die in Antwort auf das Ausgangssignal des spannungsgesteuerten Oszillators das Steuersignal mit einer festen Pulsbreite erzeugt.

20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 19, wobei die Nebenstromschaltung einen Umleitungsschalter aufweist, der in Antwort auf das Steuersignal zwischen einem leitenden Zustand und einem nicht-leitenden Zustand umschaltet, wobei der Umleitungsschalter im leitenden Zustand den Ladestromanteil um die entsprechende elektrochemische

Zelle herum zu anderen der mehreren elektrochemischen Zellen leitet.

21. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 20, wobei die Nebenstromschaltung parallel zur entsprechenden elektrochemischen Zelle geschaltet ist und eine mit einem Transistor verbundene Spule aufweist, wobei die Spule und der Transistor einen Nebenstrompfad definieren, über den der Ladestromanteil in Antwort auf das Steuersignal geleitet wird.

22. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 21, wobei die mehreren elektrochemischen Zellen Leistung für die Spannungsabgleichvorrichtung bereitstellen.

23. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 22, wobei jede der Abgleicheinrichtungen bezüglich anderen der mehreren Abgleicheinrichtungen unabhängig arbeitet.

24. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 23, wobei jede der Abgleicheinrichtungen einen Prozessor aufweist, der die Umleitung des Ladestromanteils um die entsprechende elektrochemische Zelle zu anderen der mehreren elektrochemischen Zellen steuert.

25. Vorrichtung nach Anspruch 24, ferner mit einem mit jedem der Abgleicheinrichtungsprozessoren verbundenen Systemprozessor.

26. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 25, wobei jede der Abgleicheinrichtungen aufweist: eine Analogüberwachungsschaltung mit einem ersten und einem zweiten Spannungseingang, die über eine entsprechende der elektrochemischen Zellen verbunden sind, wobei die Analogüberwachungsschaltung eine Spannung der entsprechenden elektrochemischen Zelle erfaßt; und

einen Leistungstransistor mit einer mit einem Ausgang der Analogüberwachungsschaltung verbundenen Gate-Elektrode und einem Kollektor und einem Emitter, die über die entsprechende elektrochemische Zelle so verbunden sind, daß ein Nebenstrompfad definiert wird, wobei die Analogüberwachungsschaltung in Antwort auf die erfaßte Spannung die Gate-Elektrode des Leistungstransistors steuert, um so einen Stromfluß über den Nebenstrompfad zu überwachen;

wobei die Verlustleistung des Leistungstransistors mit der erfaßten Spannung der entsprechenden elektrochemischen Zelle und dem Ladestrom linear in Beziehung steht.

27. Vorrichtung nach Anspruch 26, wobei die Verlustleistung des Leistungstransistors der erfaßten Spannung der entsprechenden elektrochemischen Zelle und dem Ladestrom jeder der Abgleicheinrichtungen direkt proportional ist.

28. Vorrichtung nach Anspruch 26 oder 27, wobei im wesentlichen die gesamte jeder der Abgleicheinrichtungen zugeordnete Wärme durch den Leistungstransistor erzeugt wird.

29. Vorrichtung nach Anspruch 26, 27 oder 28, wobei die Analogüberwachungsschaltung die Gate-Elektrode des Leistungstransistors in Antwort auf die erfaßte Spannung gemäß einer Super-Zenerdiodencharakteristik steuert.

30. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 29, wobei die Analogüberwachungsschaltung einen abgesetzten Sensorspannungsverstärker und einen Stromverstärker aufweist.

31. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 26 bis 30, wobei jede der Abgleicheinrichtungen eine einem Spannungs-Sollwert entsprechenden Sollwert-Steuerung von einem Controller empfängt.

32. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 31, wobei jede der Abgleicheinrichtungen durch ihre zugeordnete elektrochemische Zelle mit Leistung versorgt wird.

33. Vorrichtung nach Anspruch 32, wobei:  
zwischen den Abgleicheinrichtungen Offset-Spannungen induziert werden; und  
ein Spannungs-Sollwert jeder der Abgleicheinrichtungen von einer gemeinsamen Referenzschaltung durch eine Stromquelle übertragen wird, die von der Offset-Spannung unabhängig ist.

34. Vorrichtung nach Anspruch 33, wobei die erfaßte Spannung jeder der elektrochemischen Zellen einer gemeinsamen Meßschaltung unter Verwendung einer Stromquelle übertragen wird, die der Spannung der entsprechenden elektrochemischen Zelle proportional ist.

35. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 34, wobei die mehreren elektrochemischen Zellen prismenförmige elektrochemische Dünnschichtzellen aufweisen.

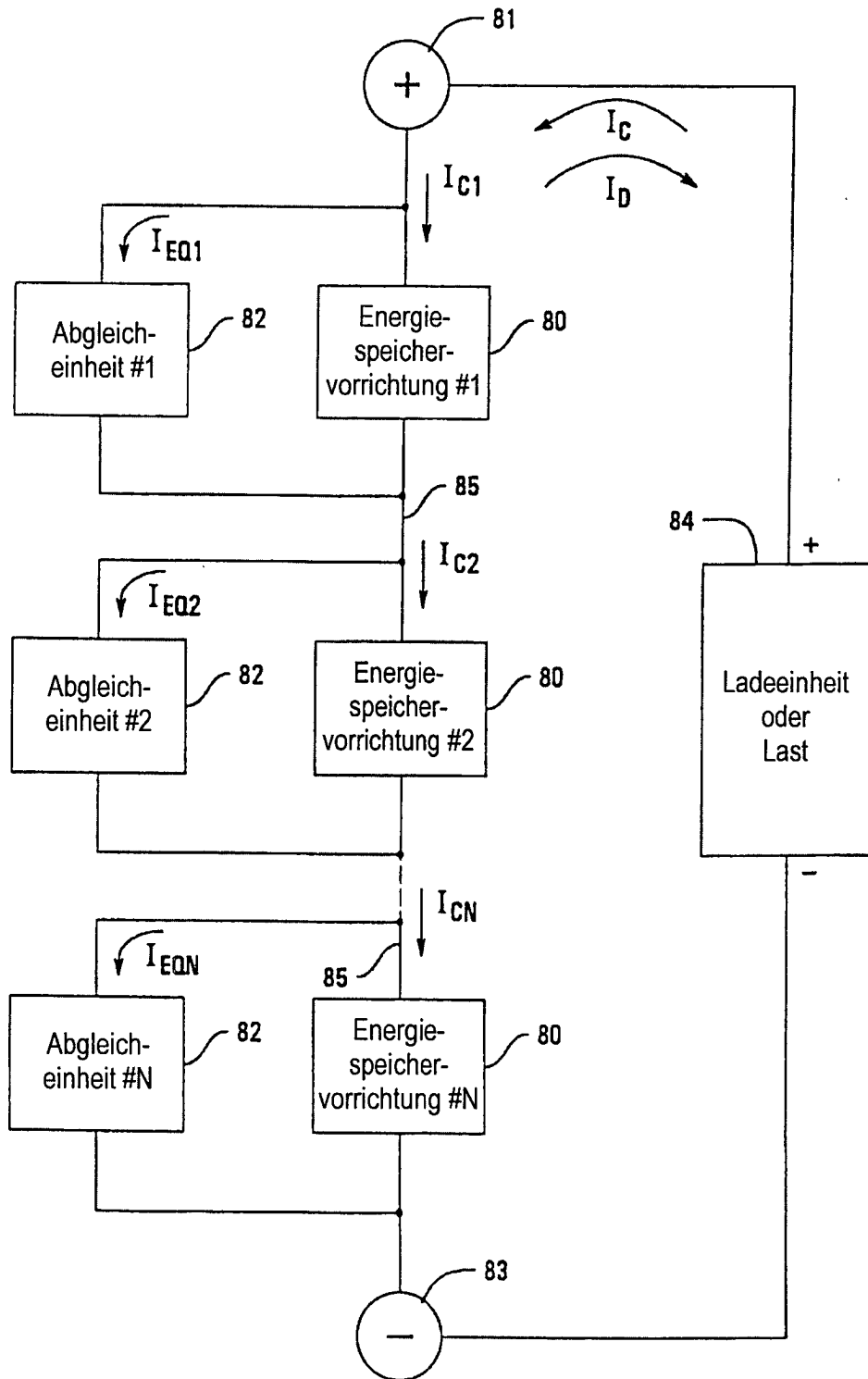
36. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 35, wobei die mehreren elektrochemischen Zellen Energiespeichermodule bilden, wobei jedes der Energiespeichermodule mehrere elektrochemische Dünnschichtzellen aufweist.

37. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 35, wobei die mehreren elektrochemischen Zellen mehrere elektrochemische Zellen aufweisen, die parallel zueinander angeordnet sind, um mehrere elektrisch unabhängige Zelleneinheiten zu bilden, wobei die mehreren elektrisch unabhängigen Zelleneinheiten in Serie angeordnet sind.

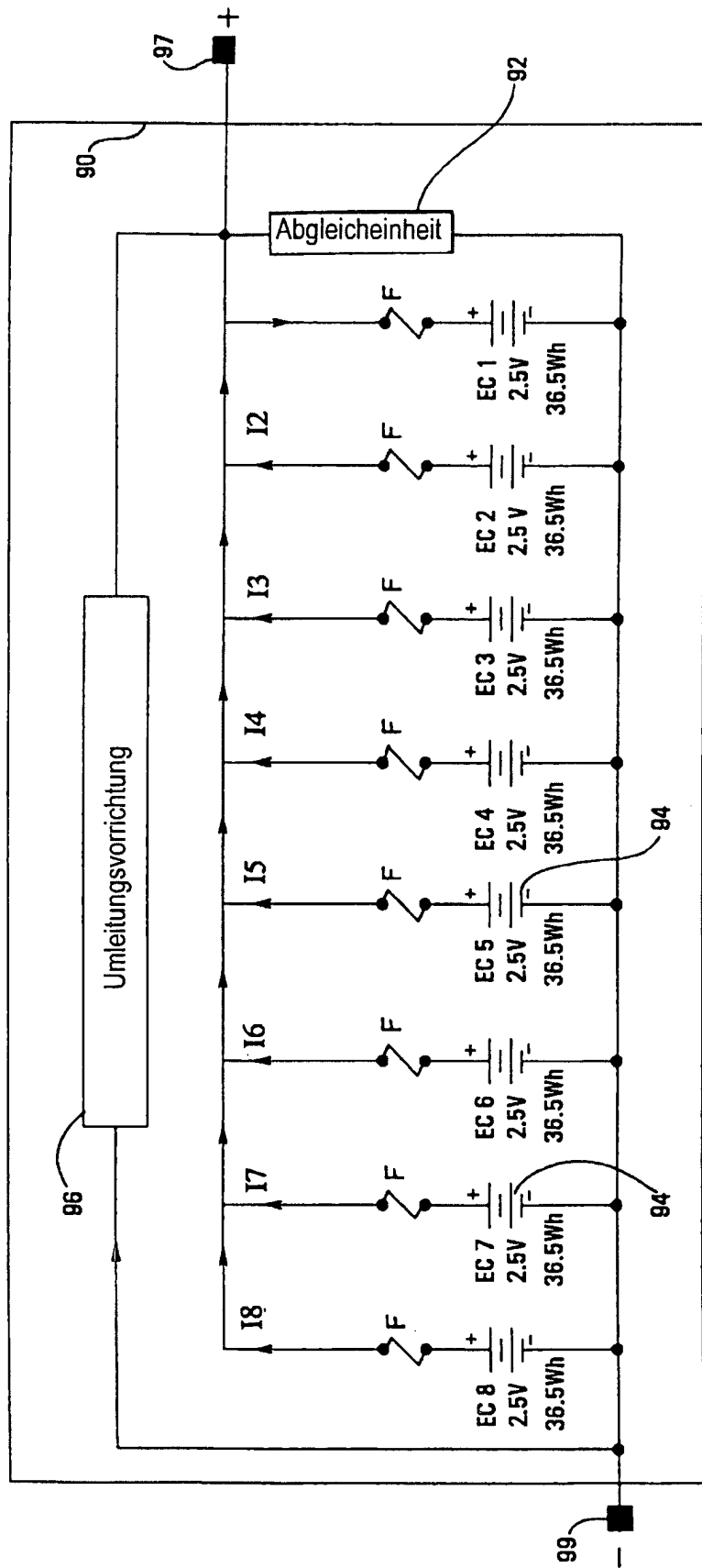
38. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 37, ferner mit einem von der Ladeinheit getrennten geschlossenen Gehäuse, wobei die elektrochemischen Zellen und die Abgleicheinrichtungen jeweils im geschlossenen Gehäuse angeordnet sind.

Es folgen 45 Blatt Zeichnungen

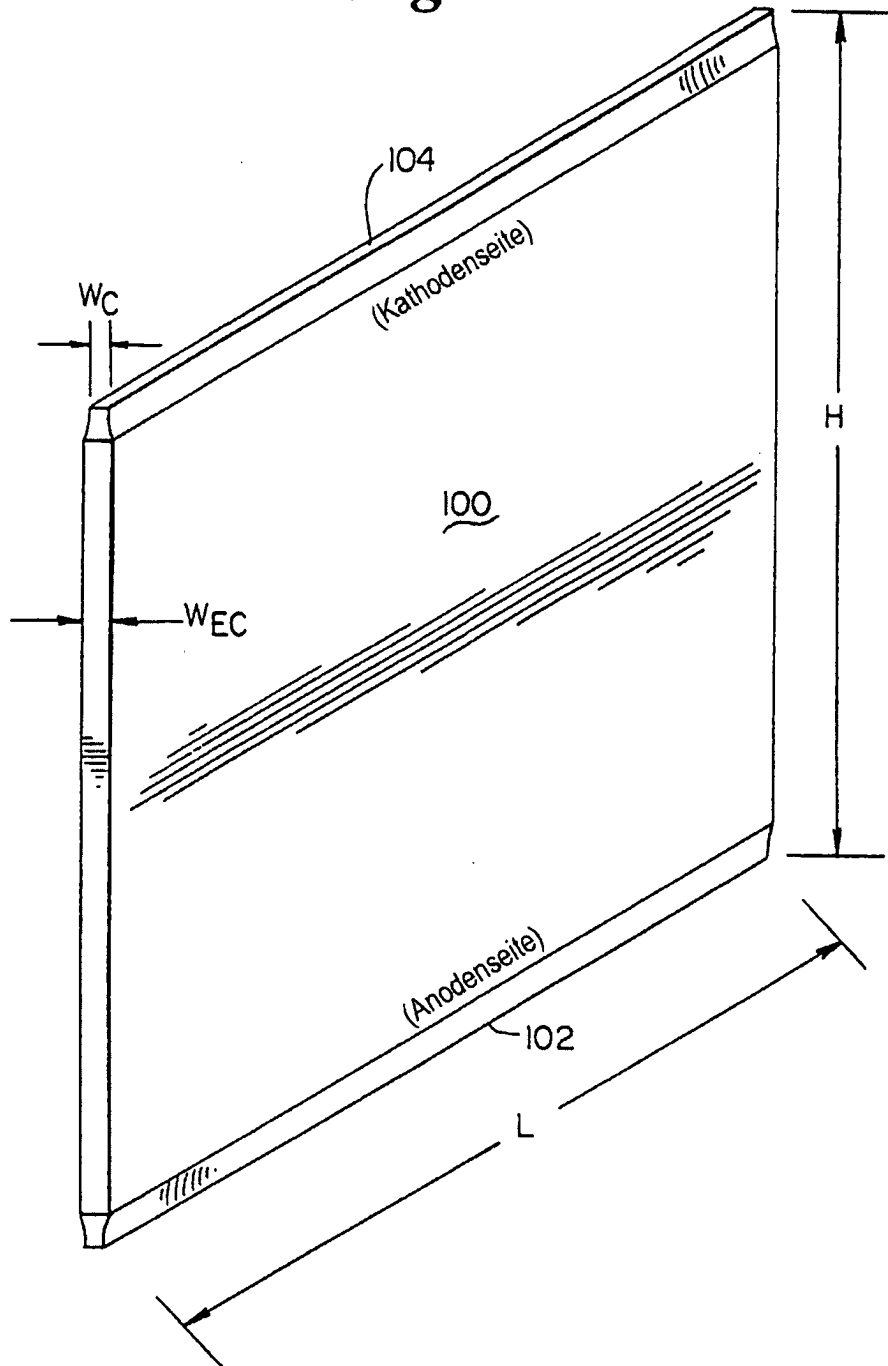
**Fig. 1**



**Fig.2**



*Fig. 3*



*Fig. 4*



Fig. 5

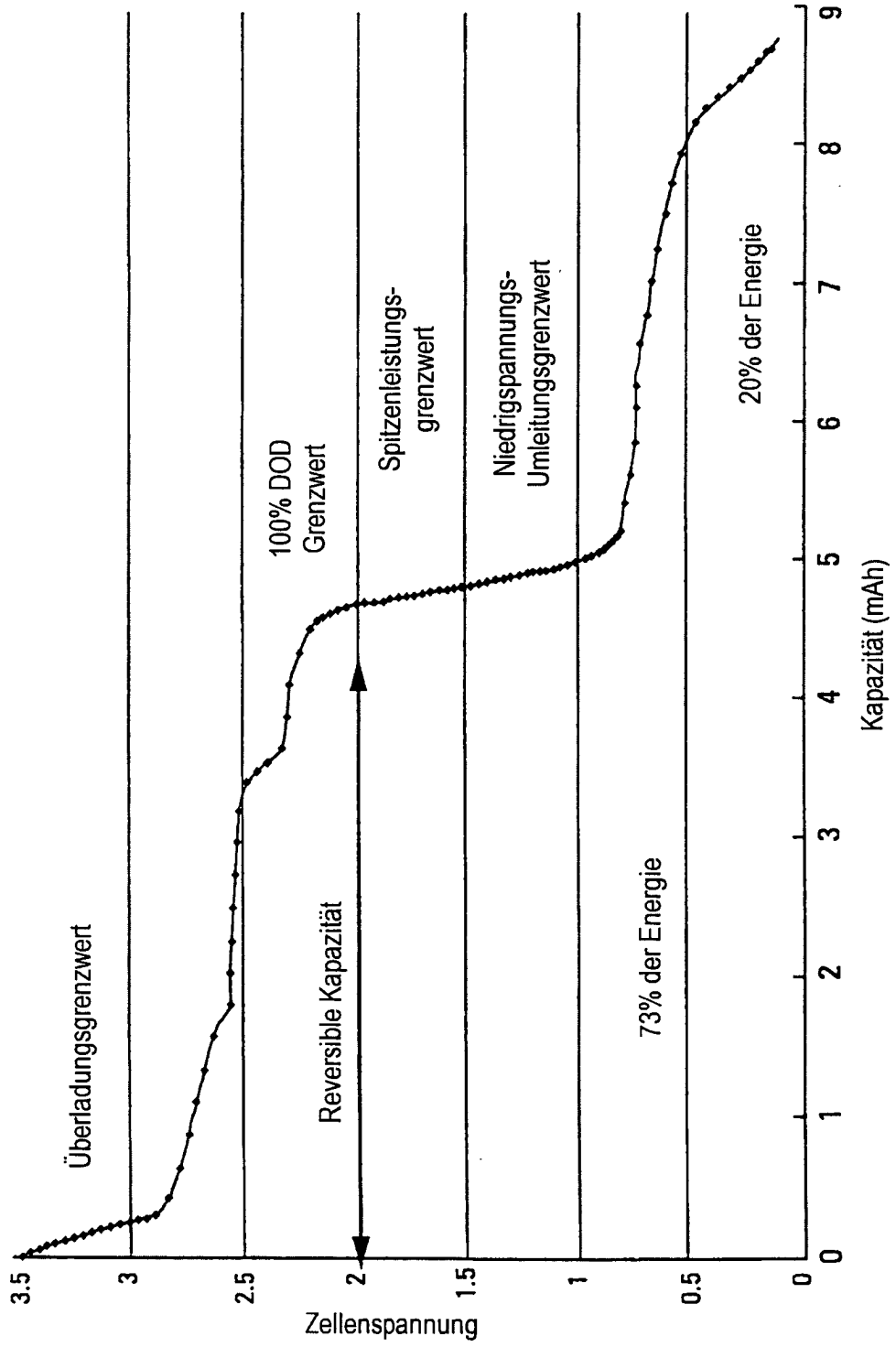
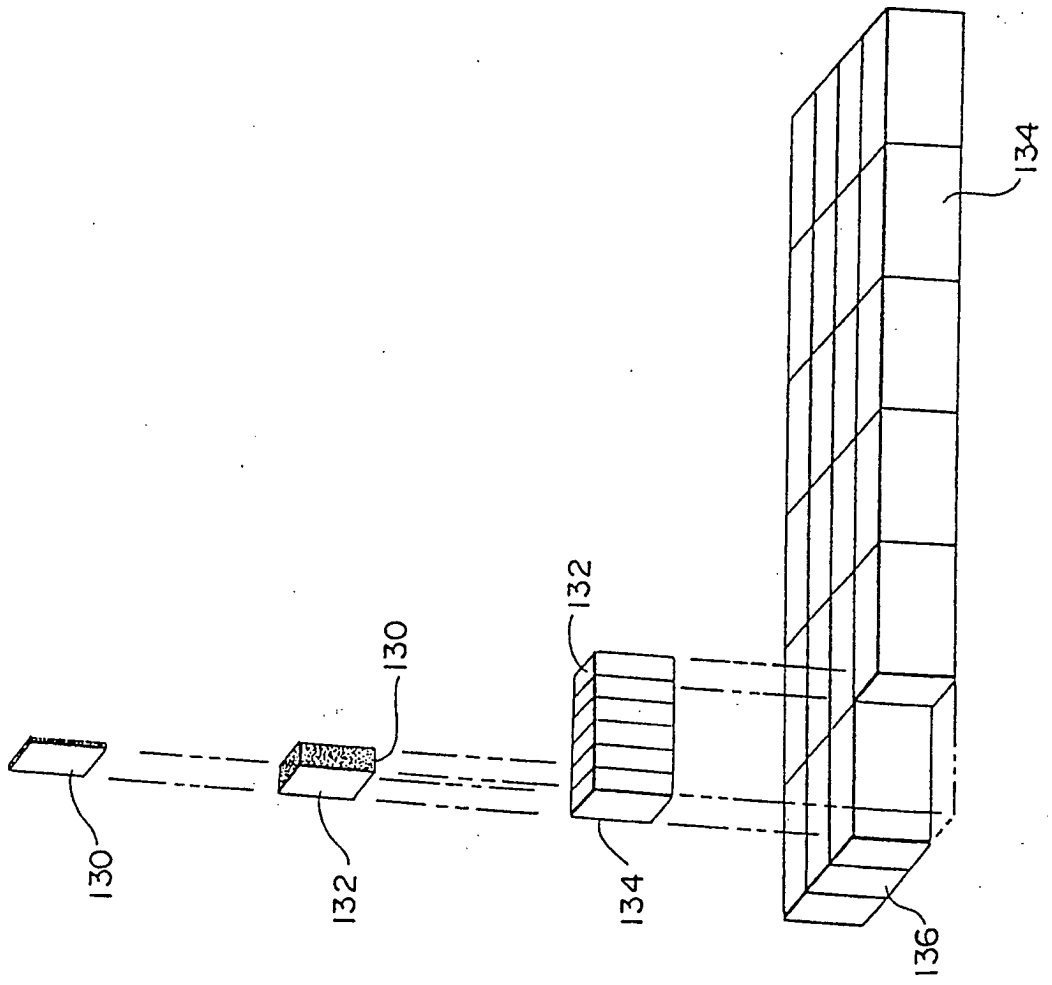


Fig. 6



*Fig. 7*

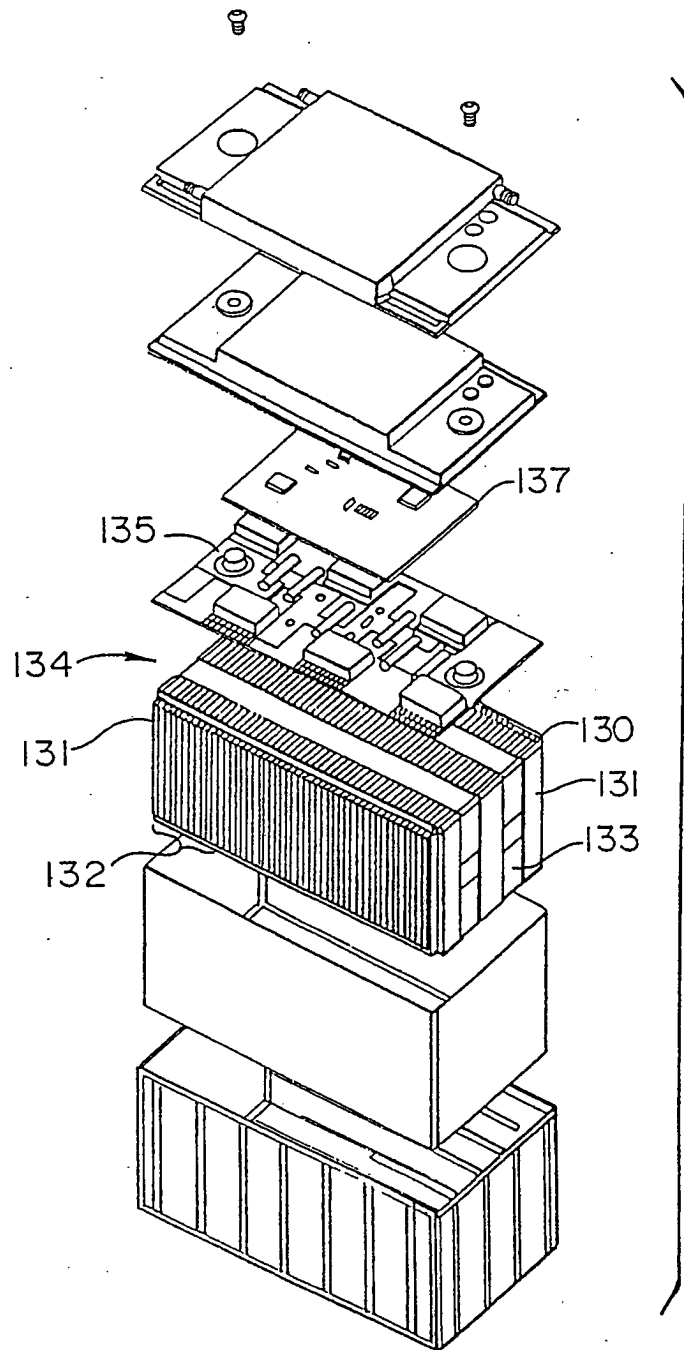
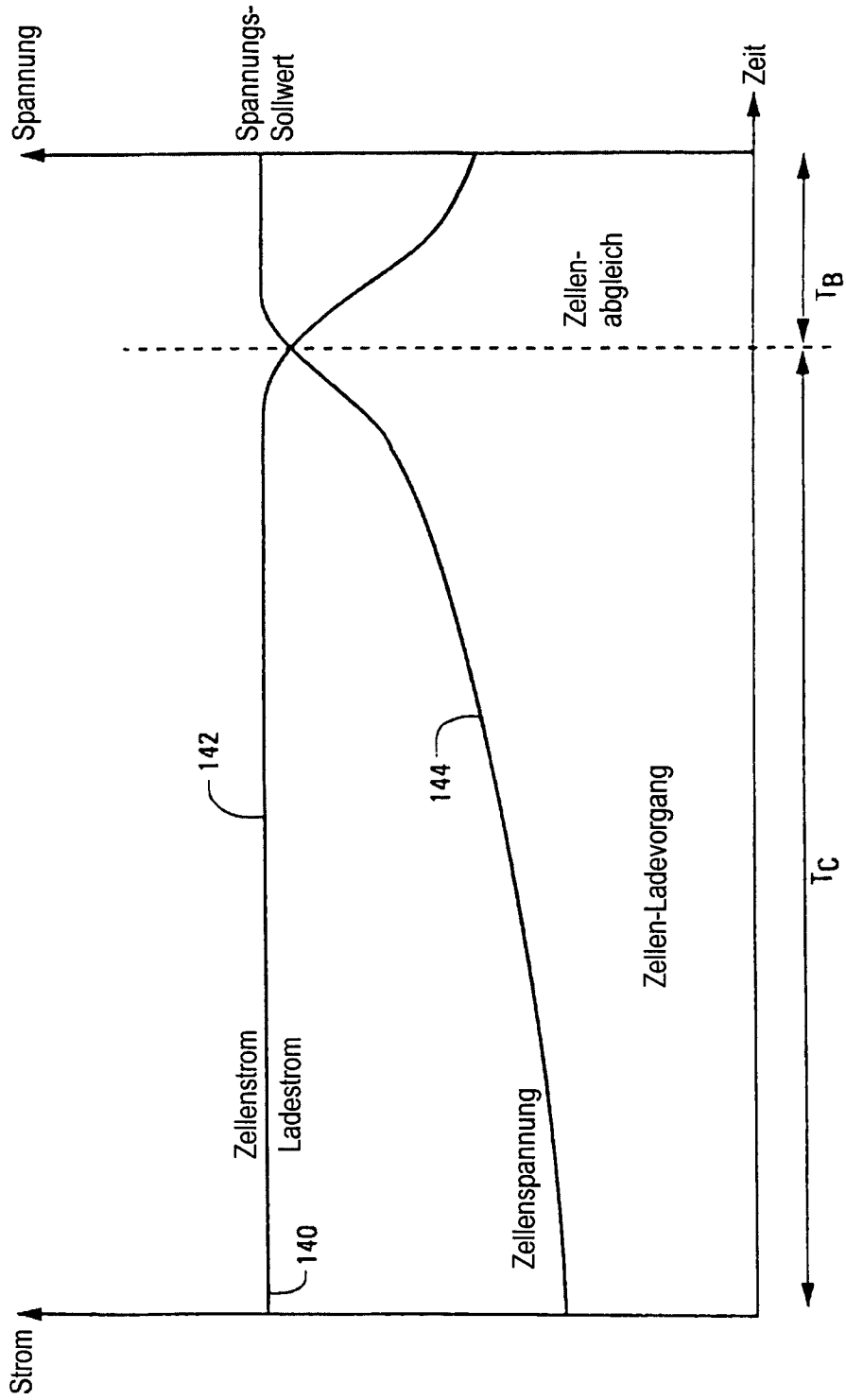
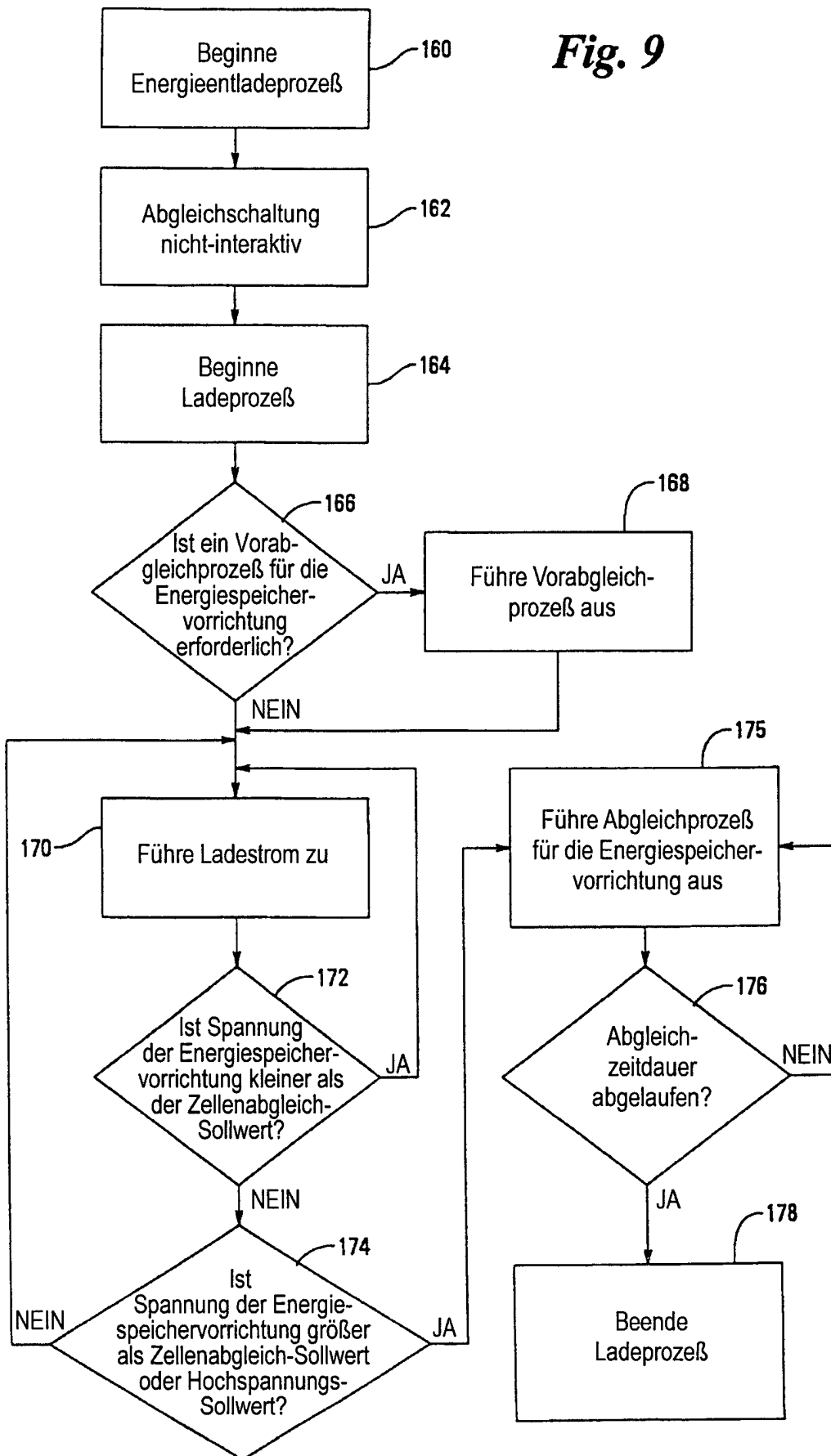


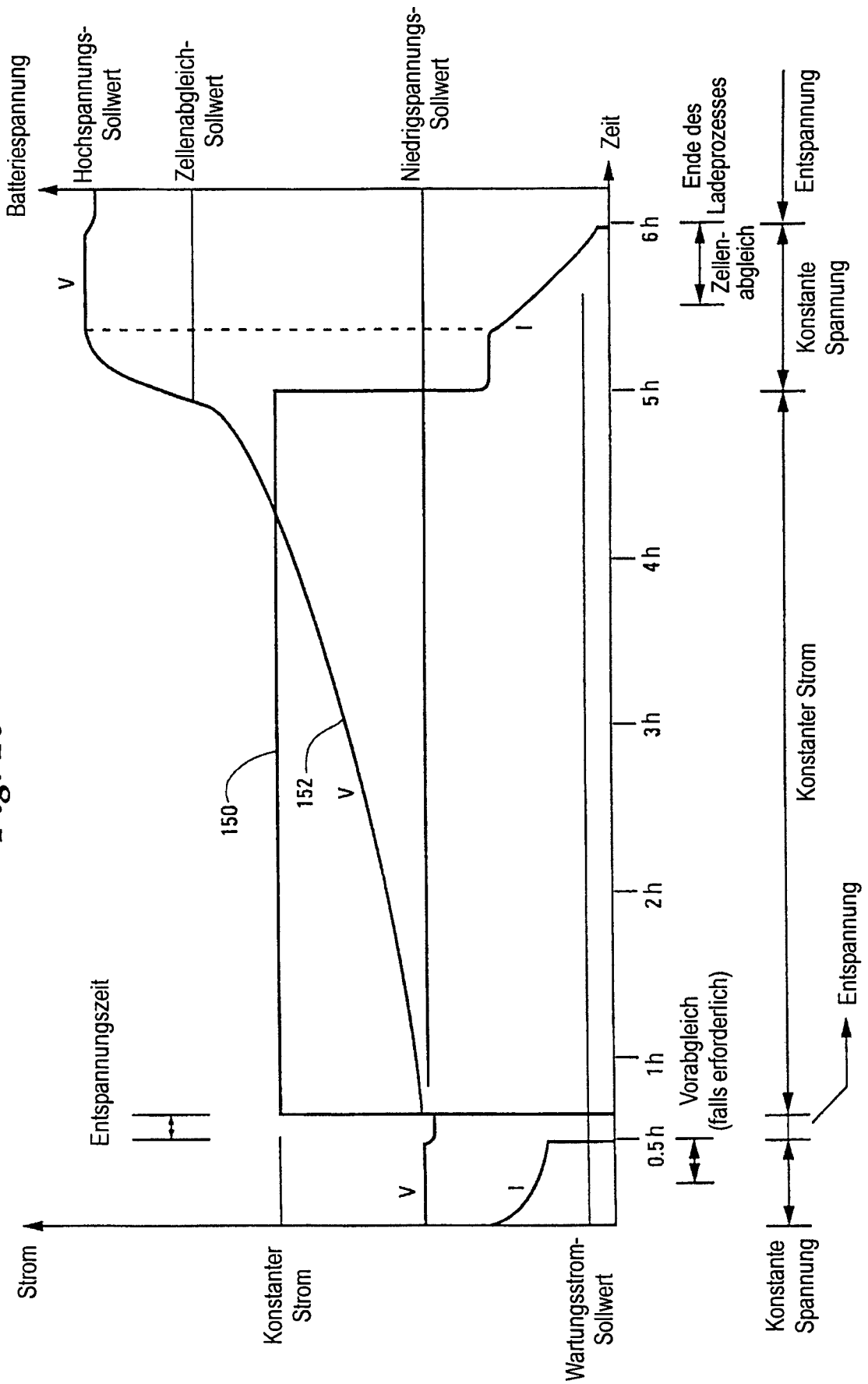
Fig. 8



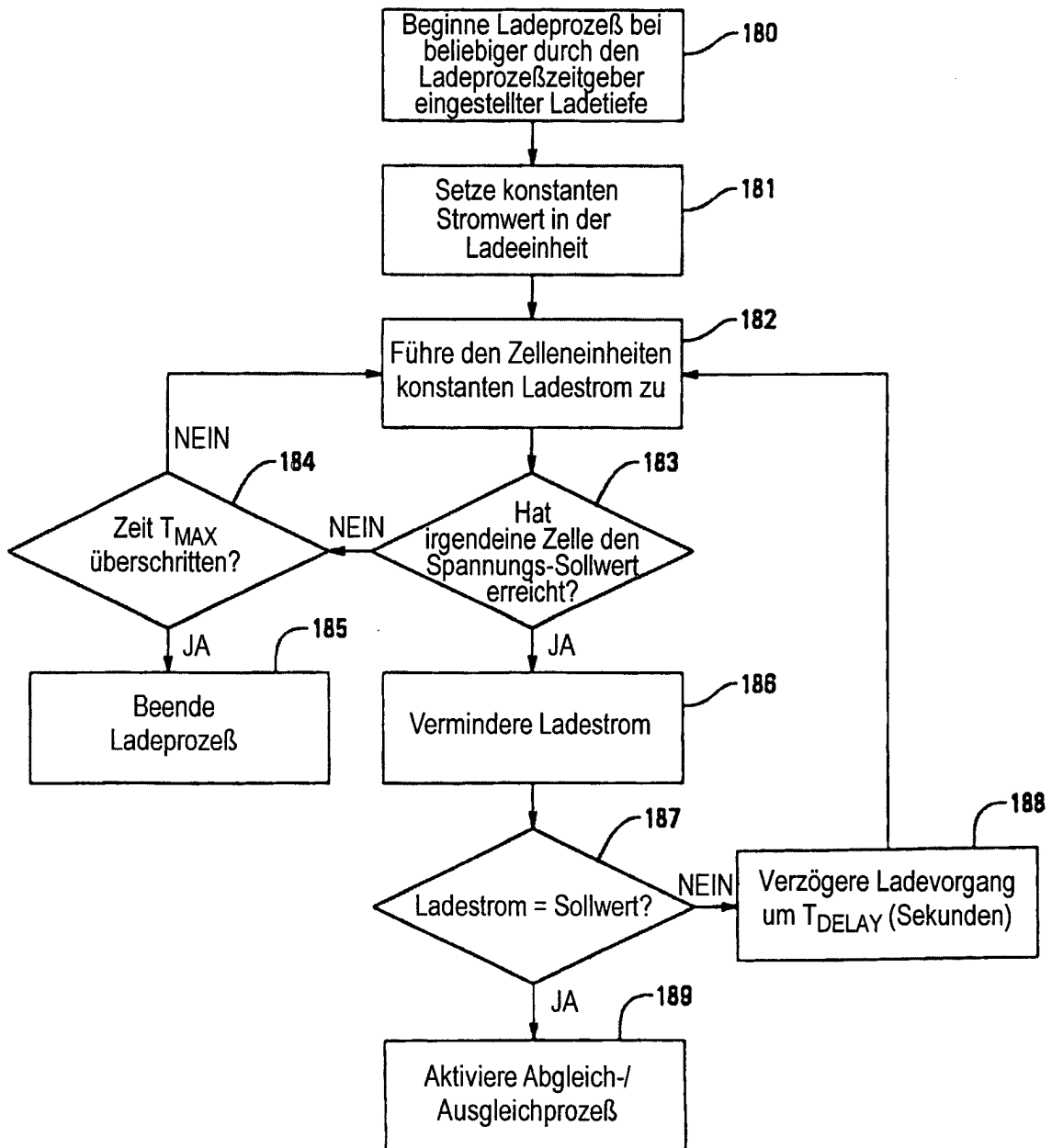
**Fig. 9**



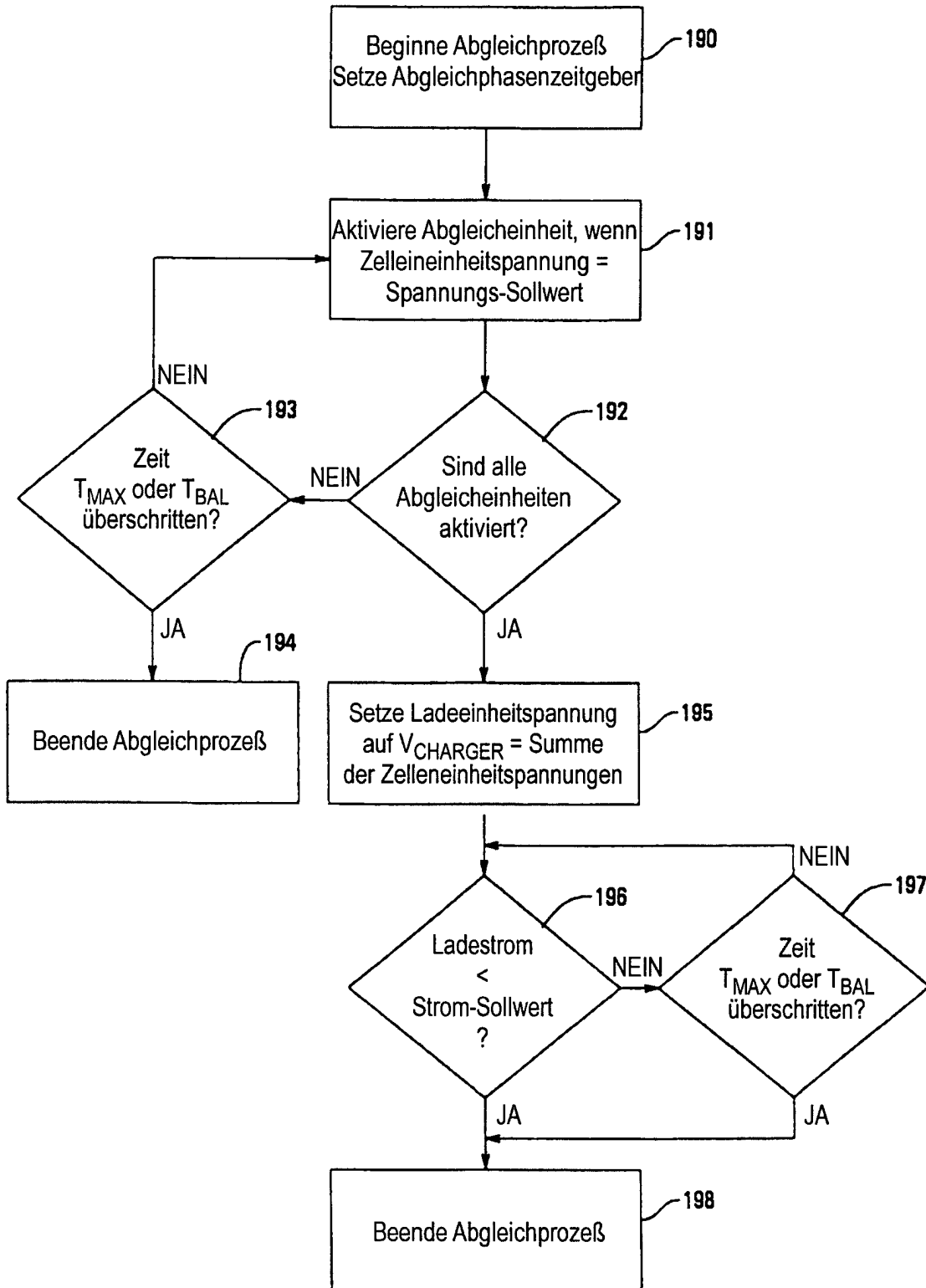
**Fig. 10**



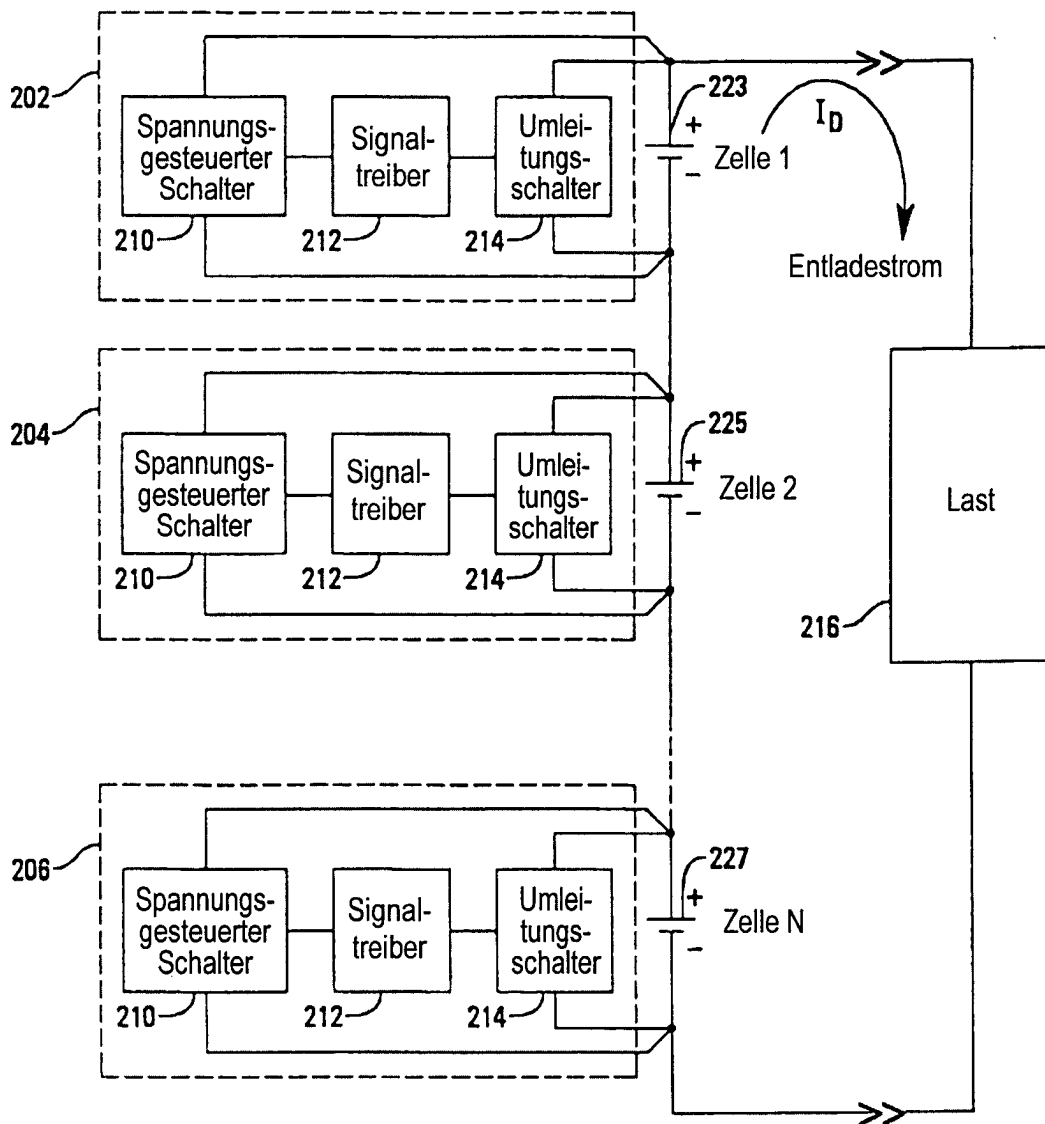
**Fig. 11**



**Fig. 12**



**Fig. 13**



**Fig. 14**

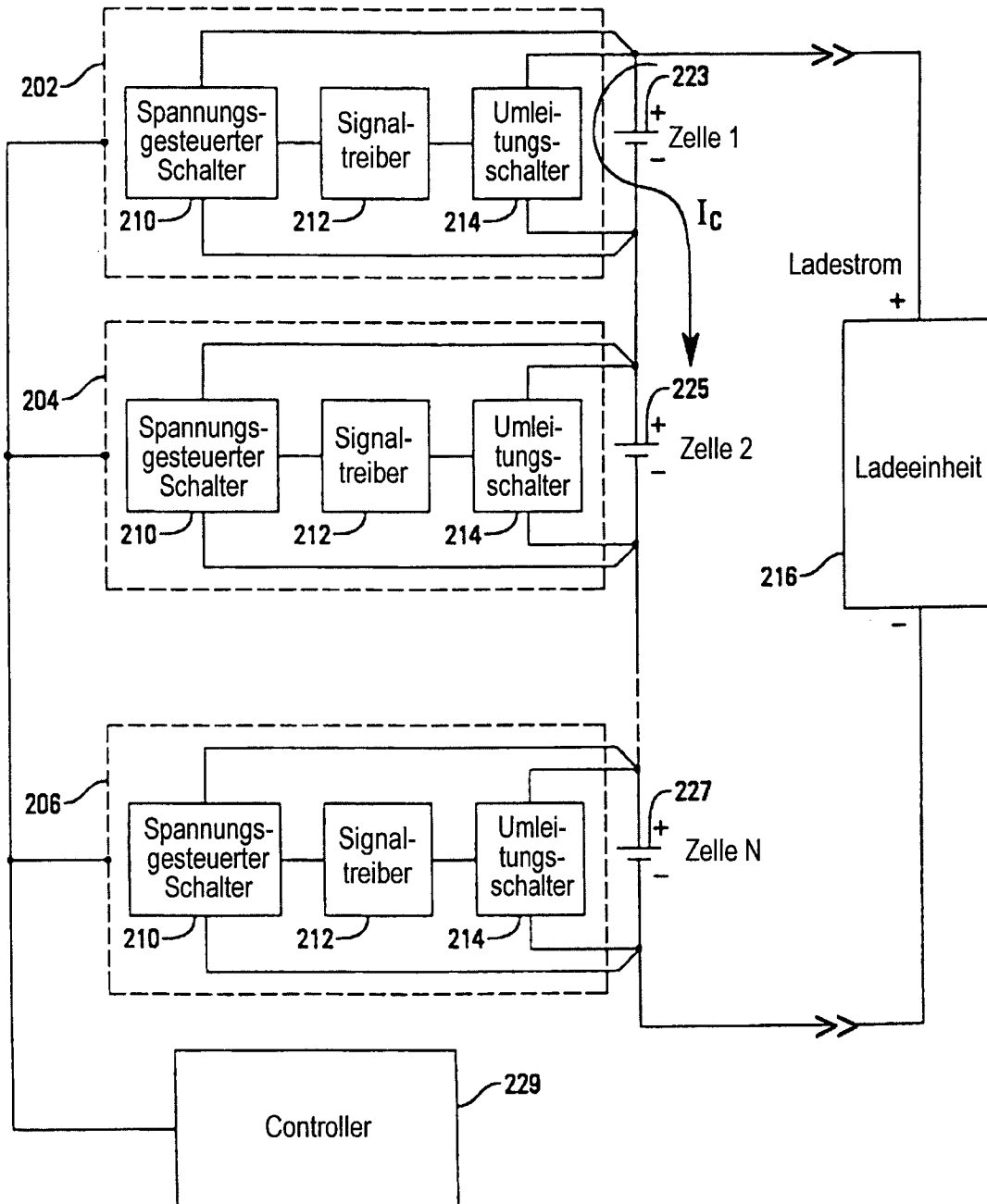
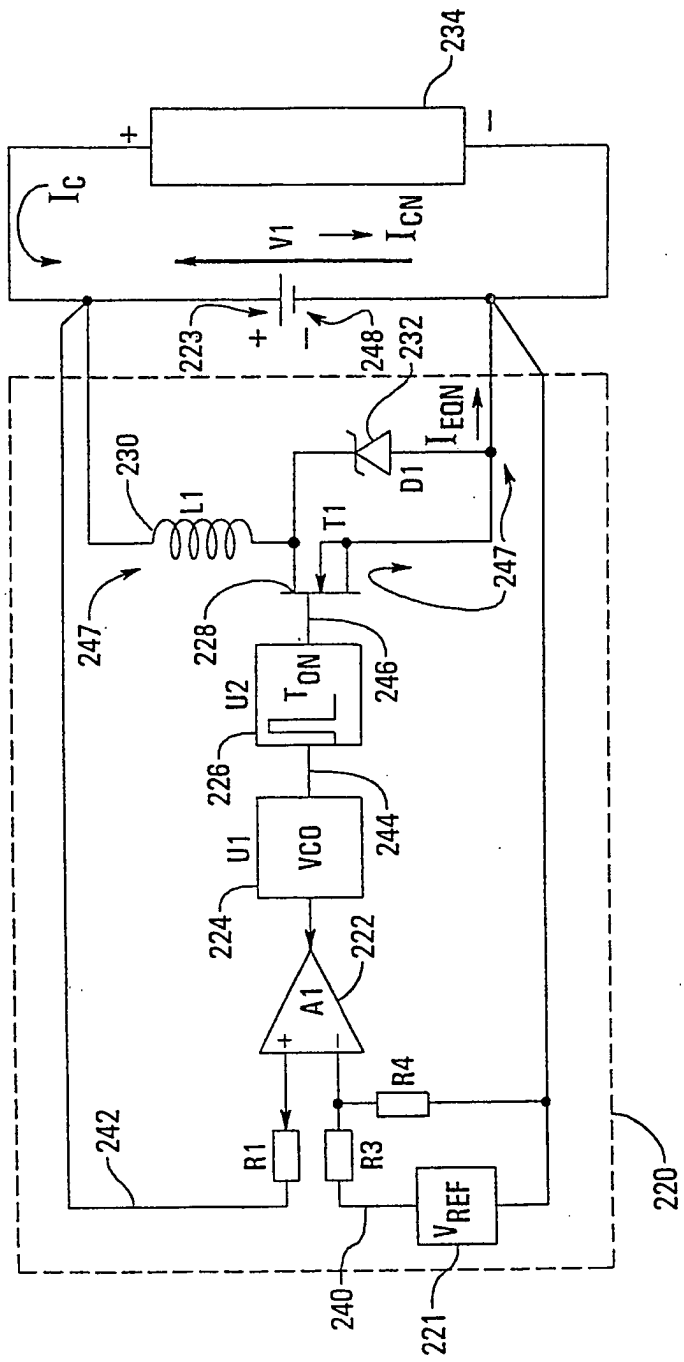
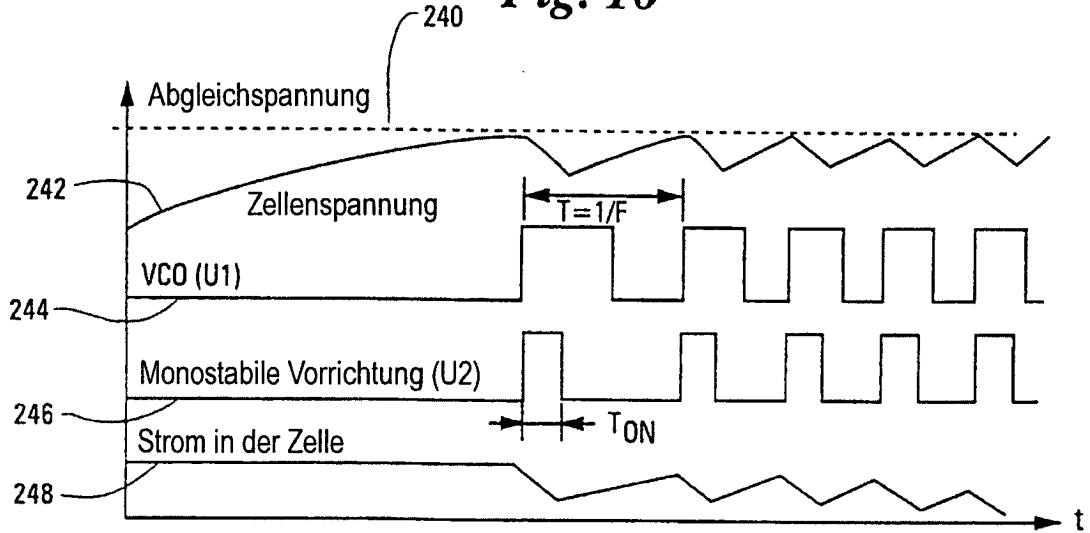


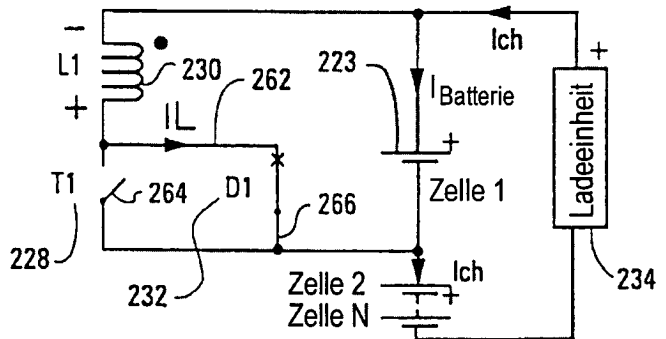
Fig. 15



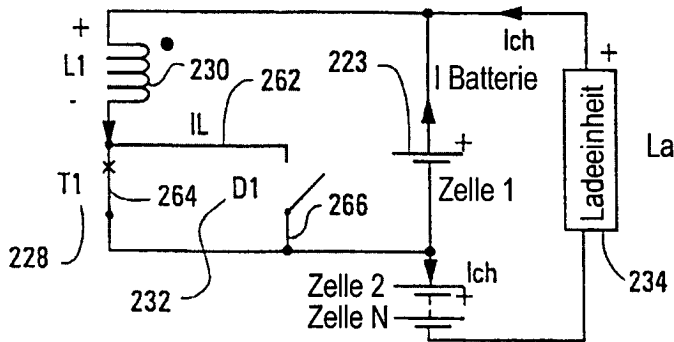
**Fig. 16**



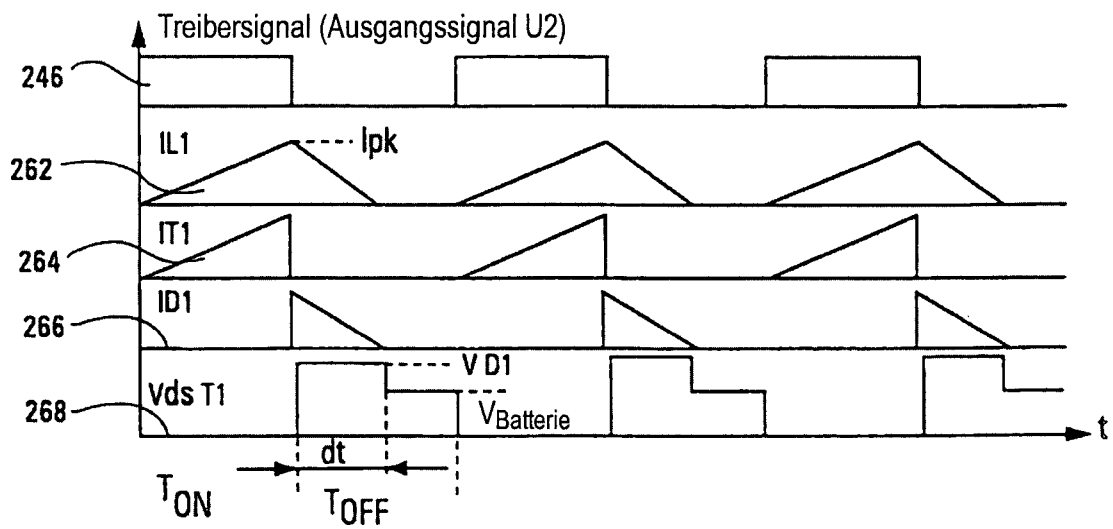
**Fig. 17B**



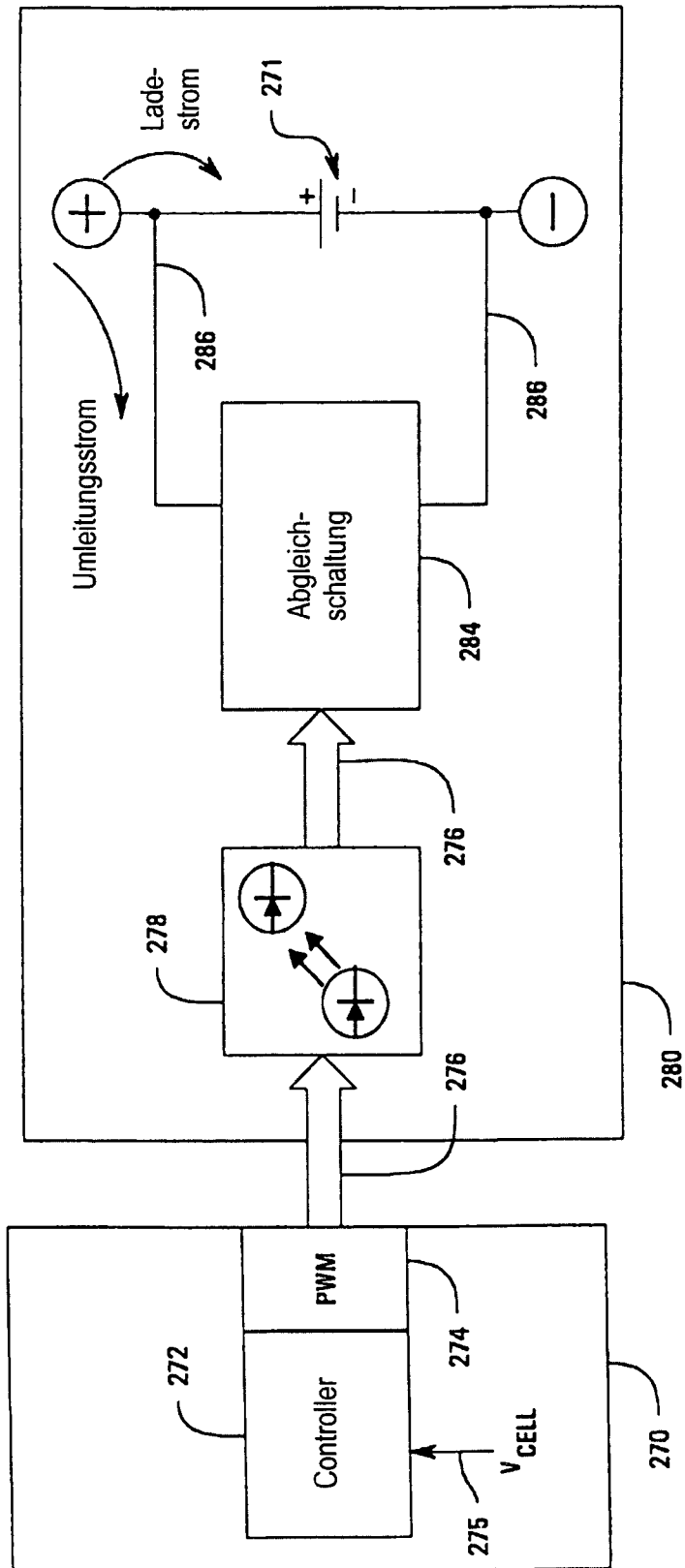
**Fig. 17A**



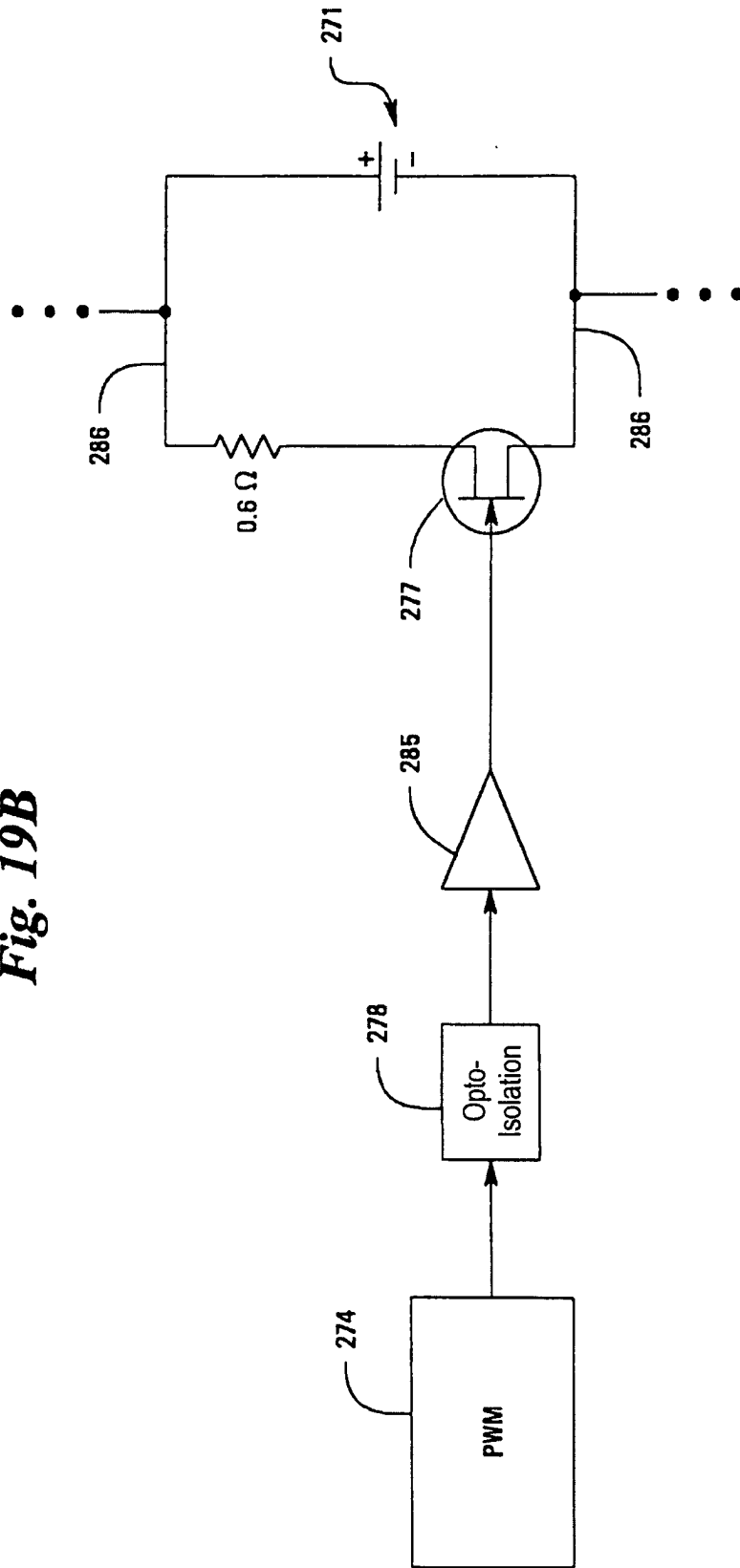
*Fig. 18*

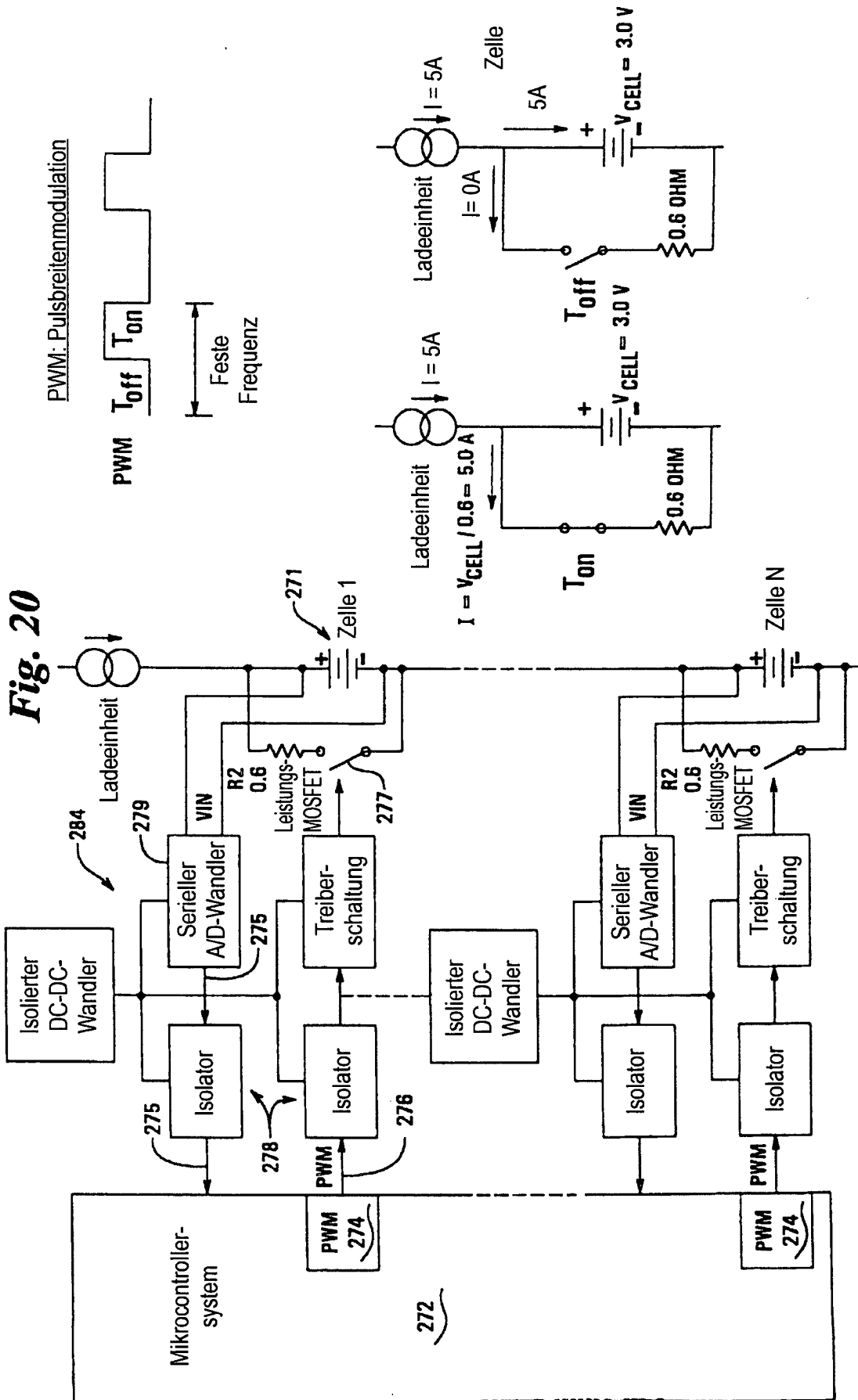


**Fig. 19A**

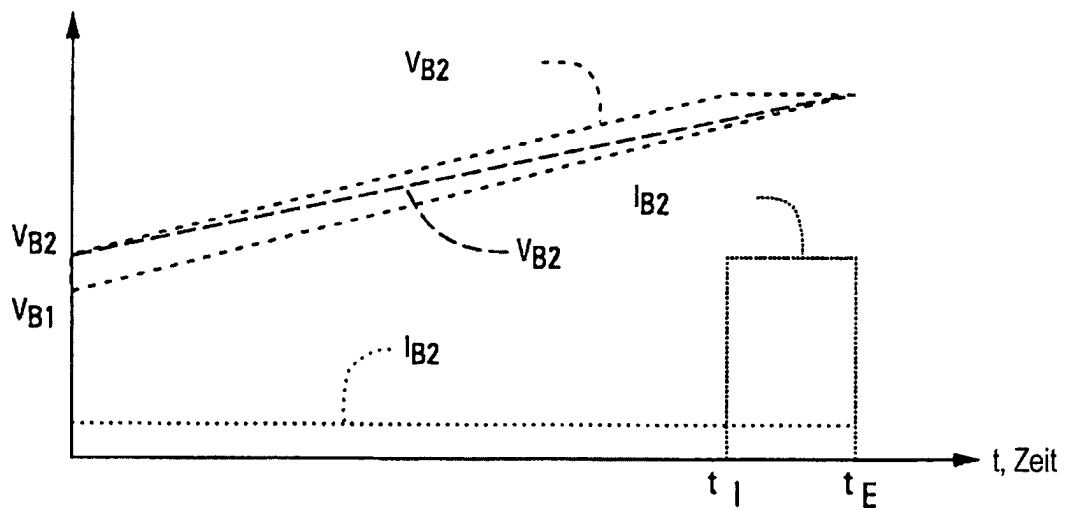


**Fig. 19B**

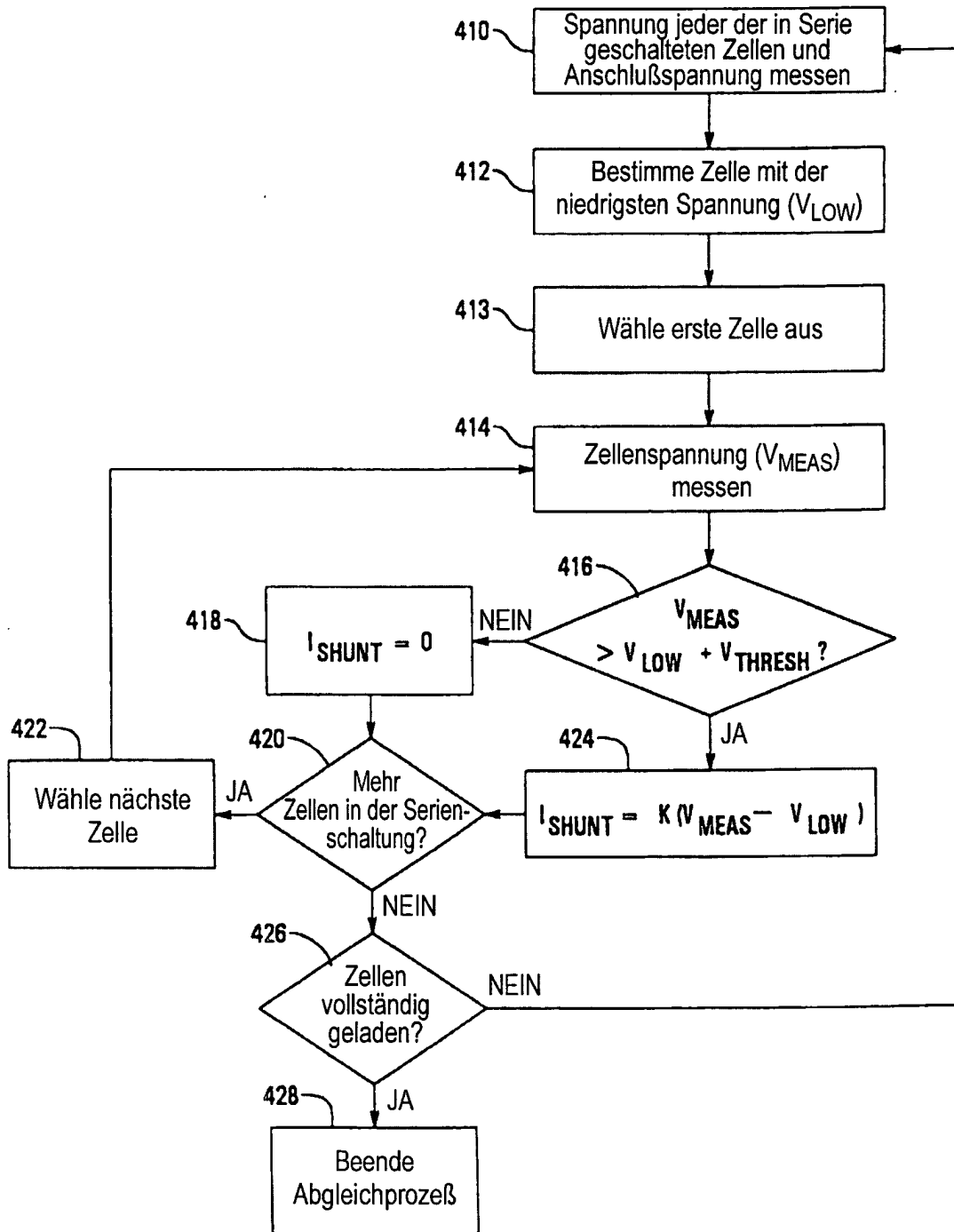




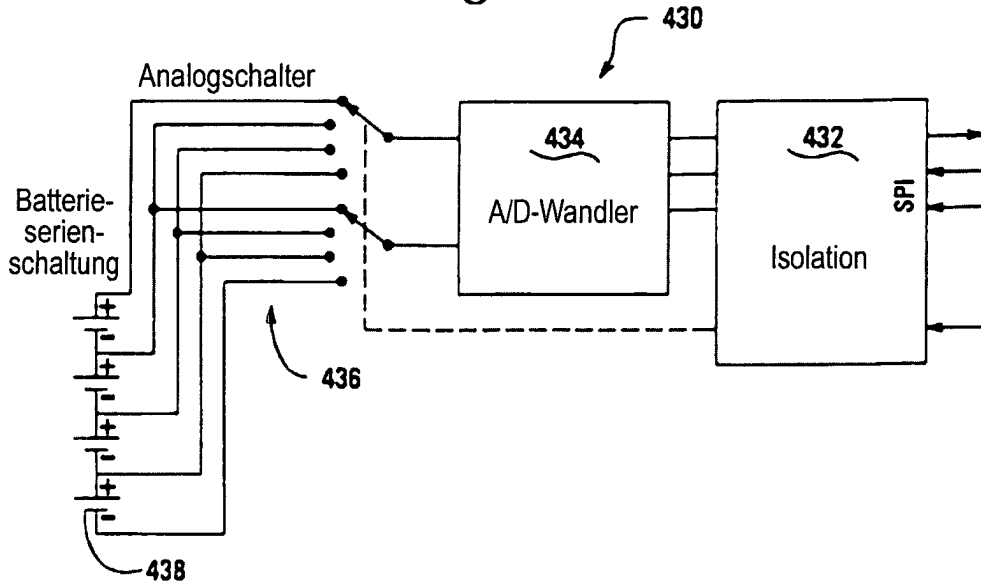
**Fig. 21**



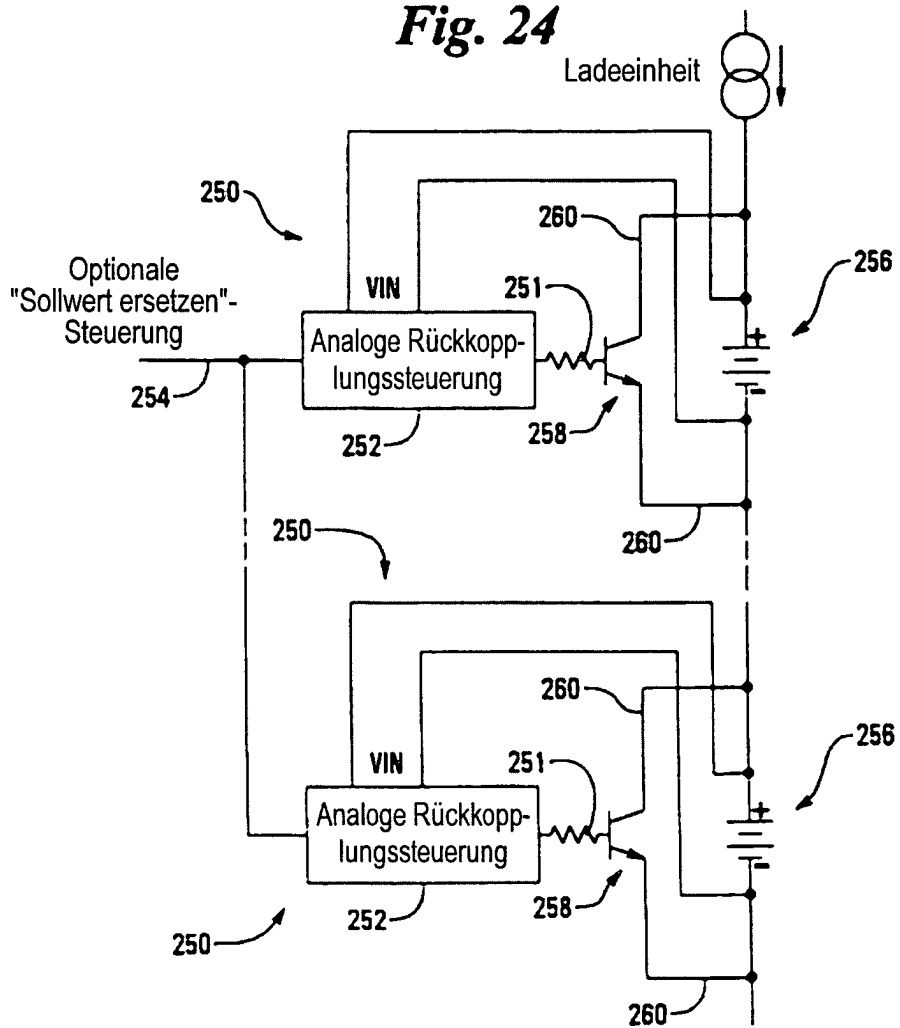
**Fig. 22**



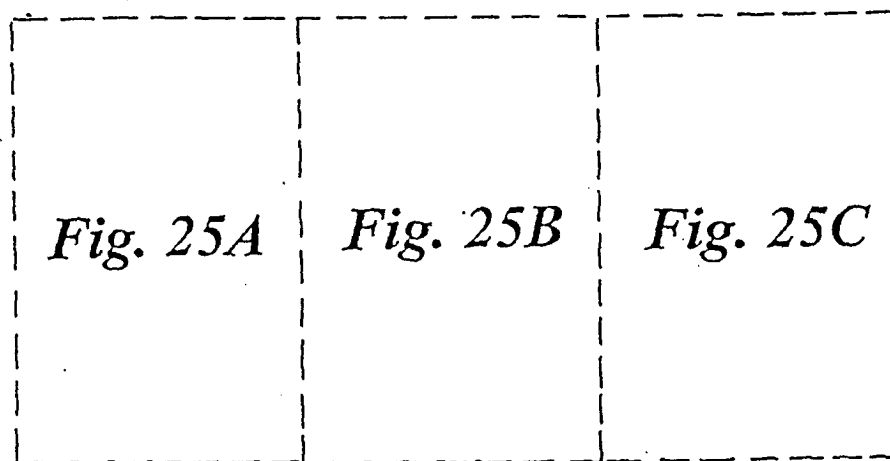
**Fig. 23**

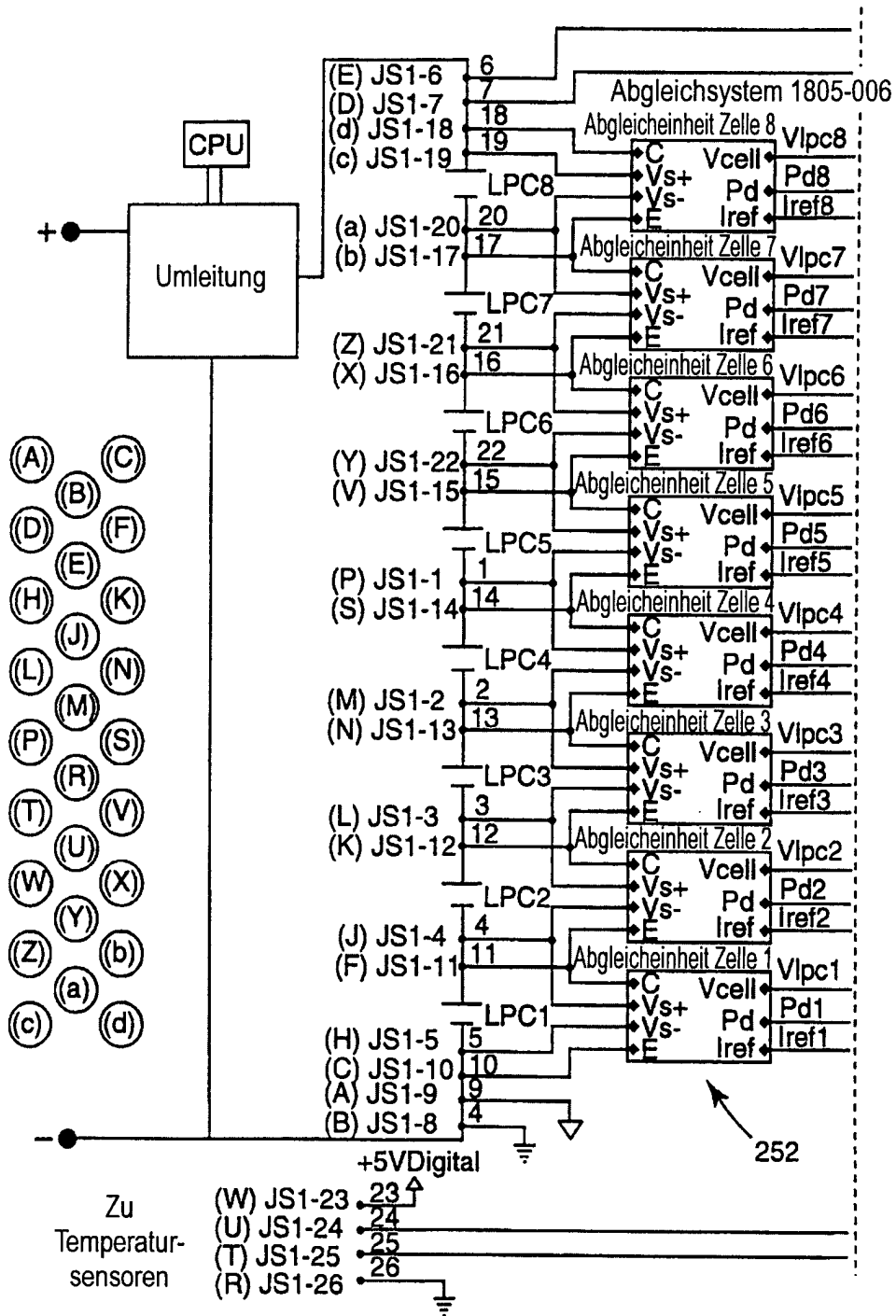


**Fig. 24**

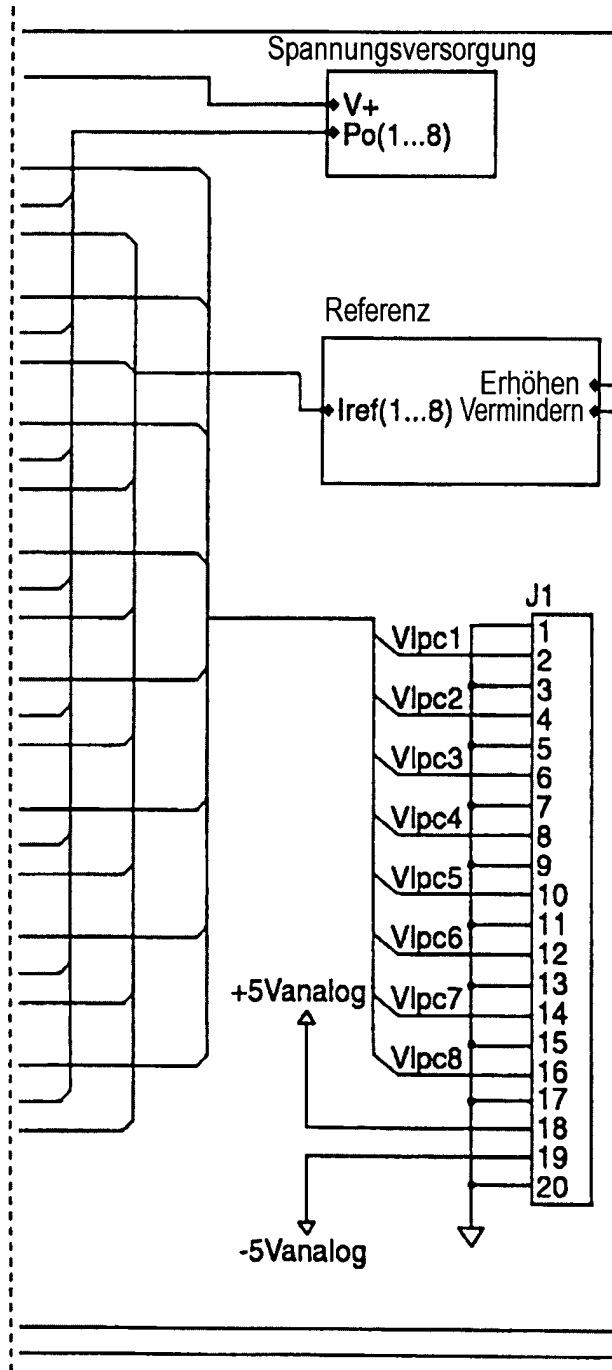


*Fig. 25*

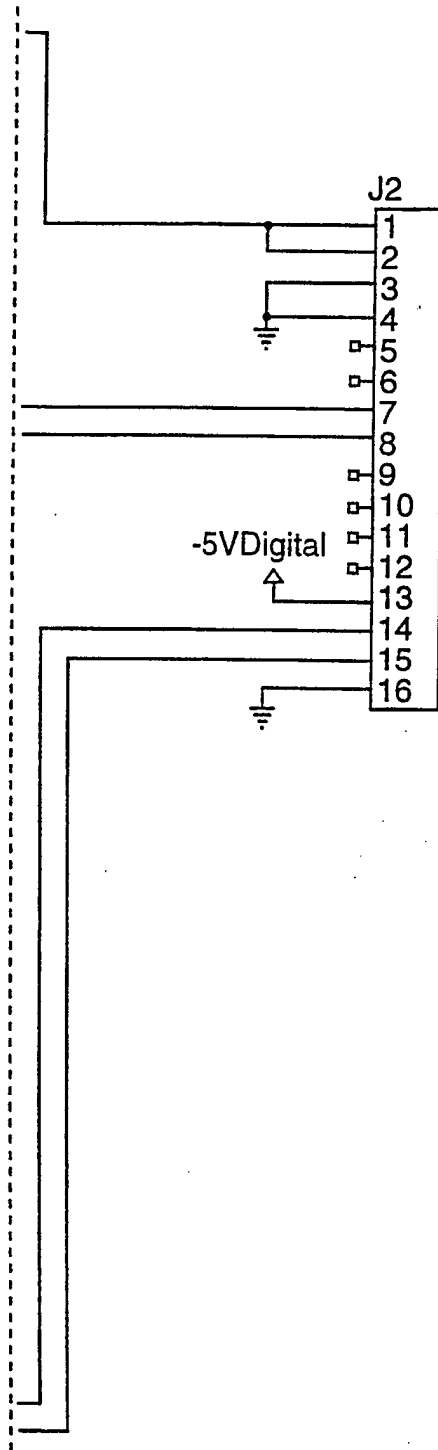




**Fig. 25A**

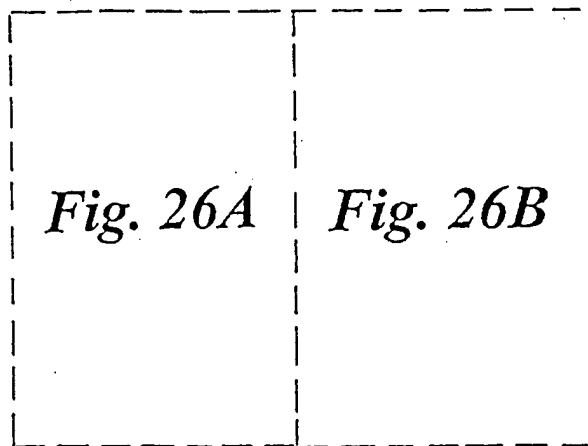


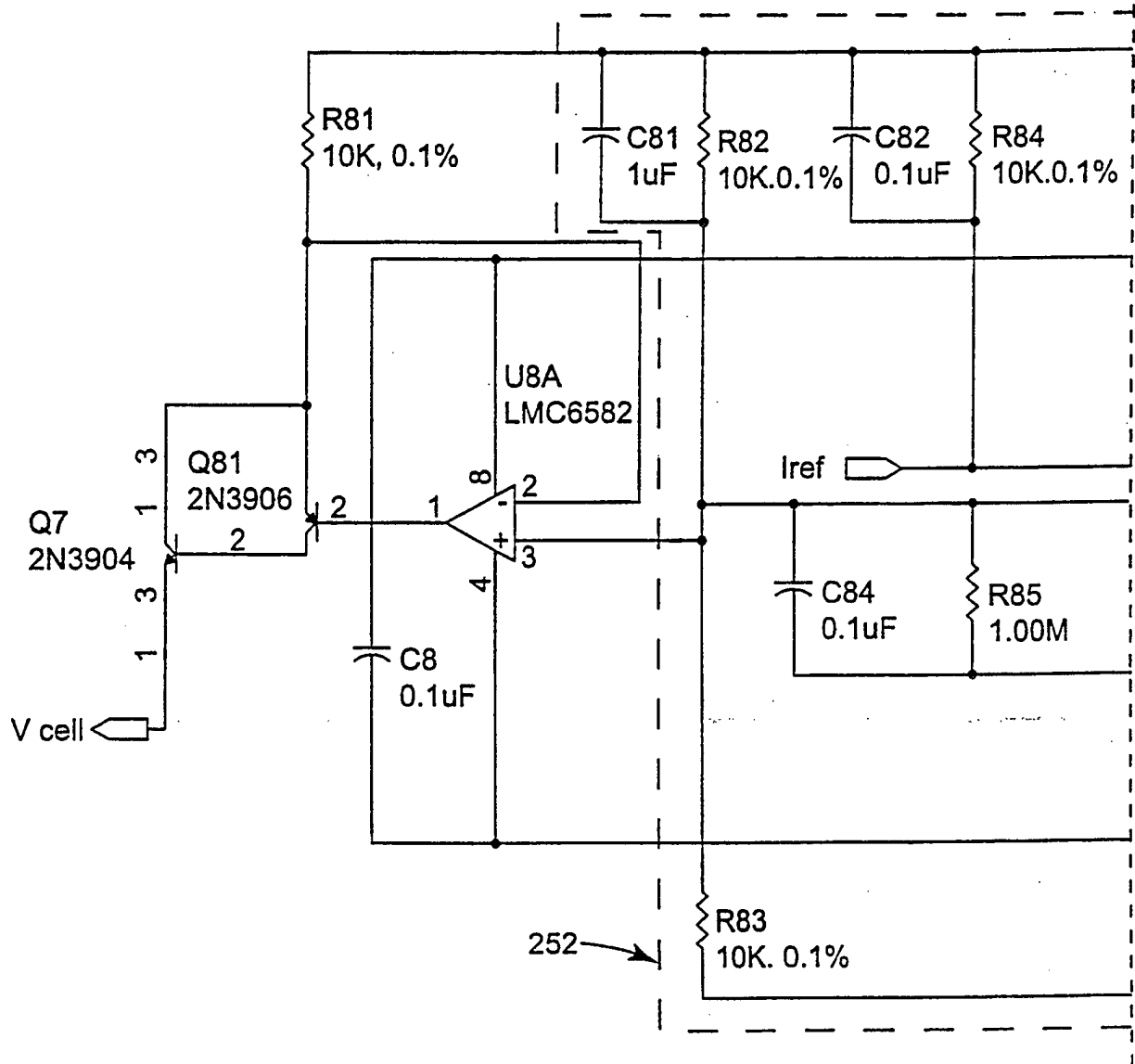
**Fig. 25B**



**Fig. 25C**

*Fig. 26*





*Fig. 26A*

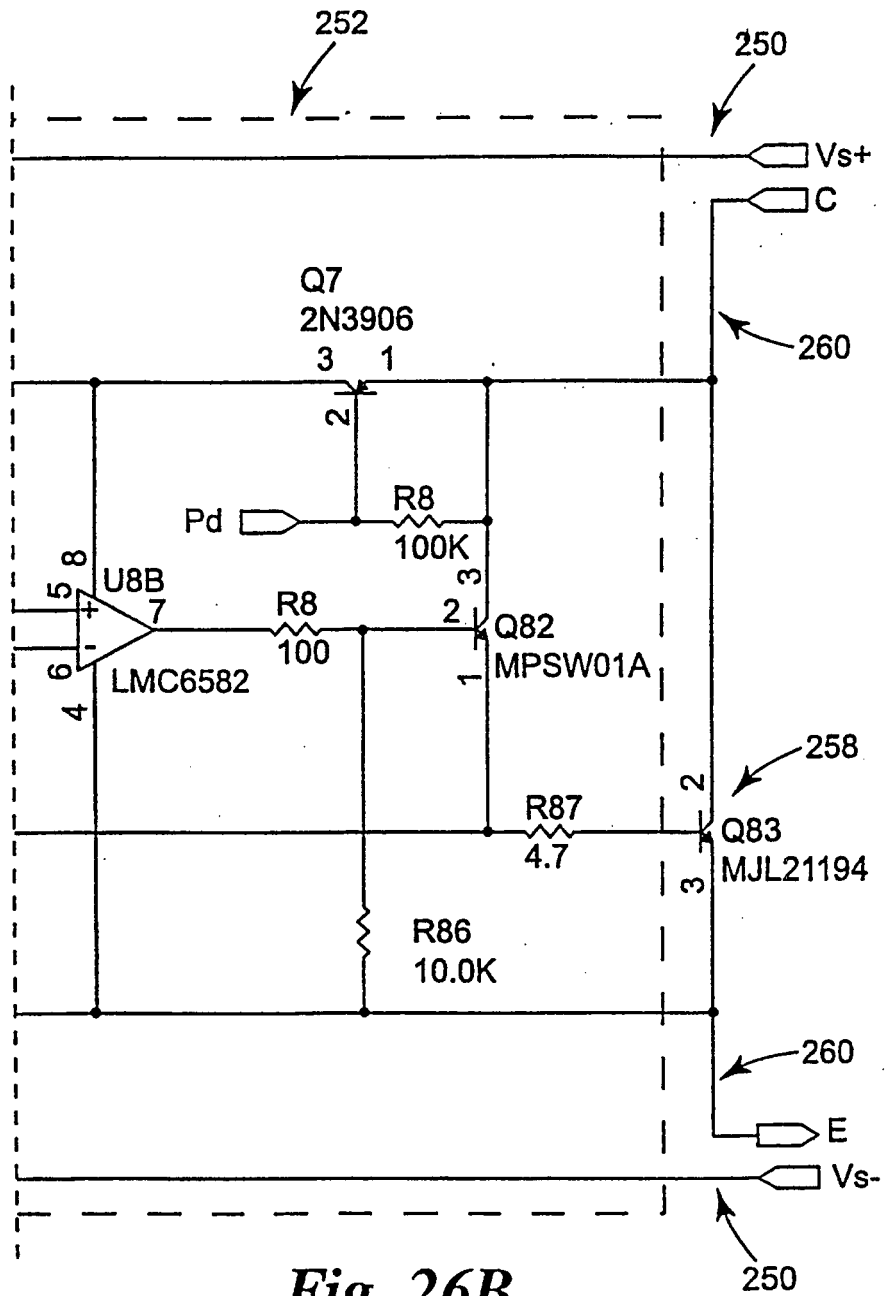
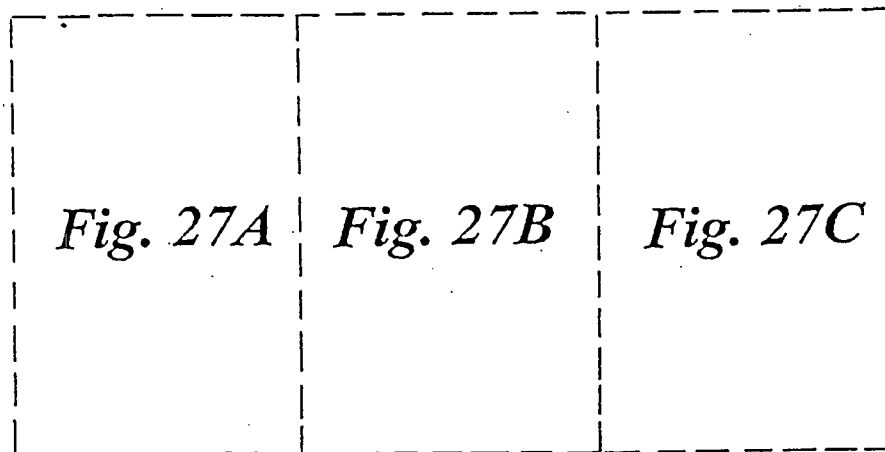
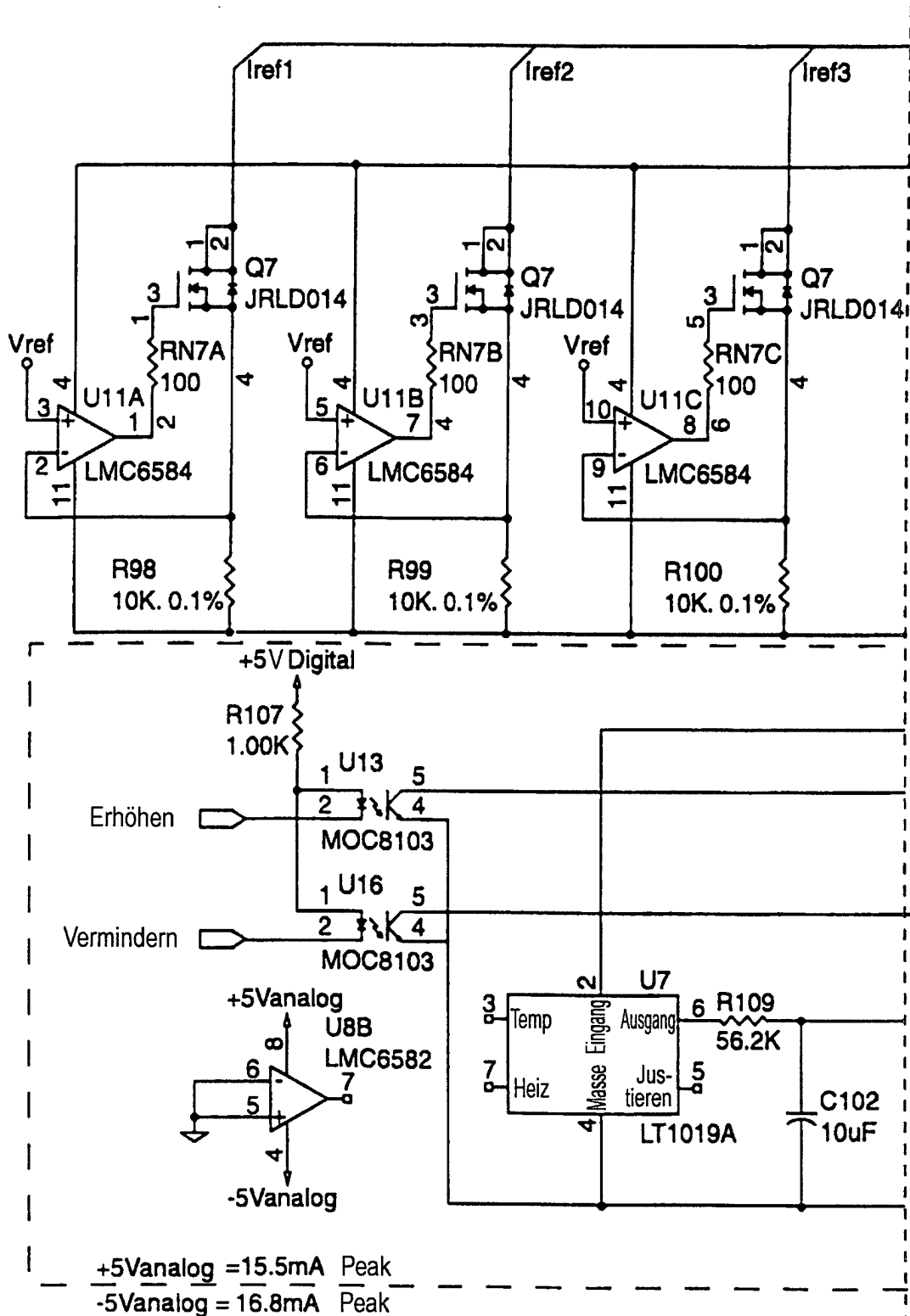


Fig. 26B

*Fig. 27*





**Fig. 27A**

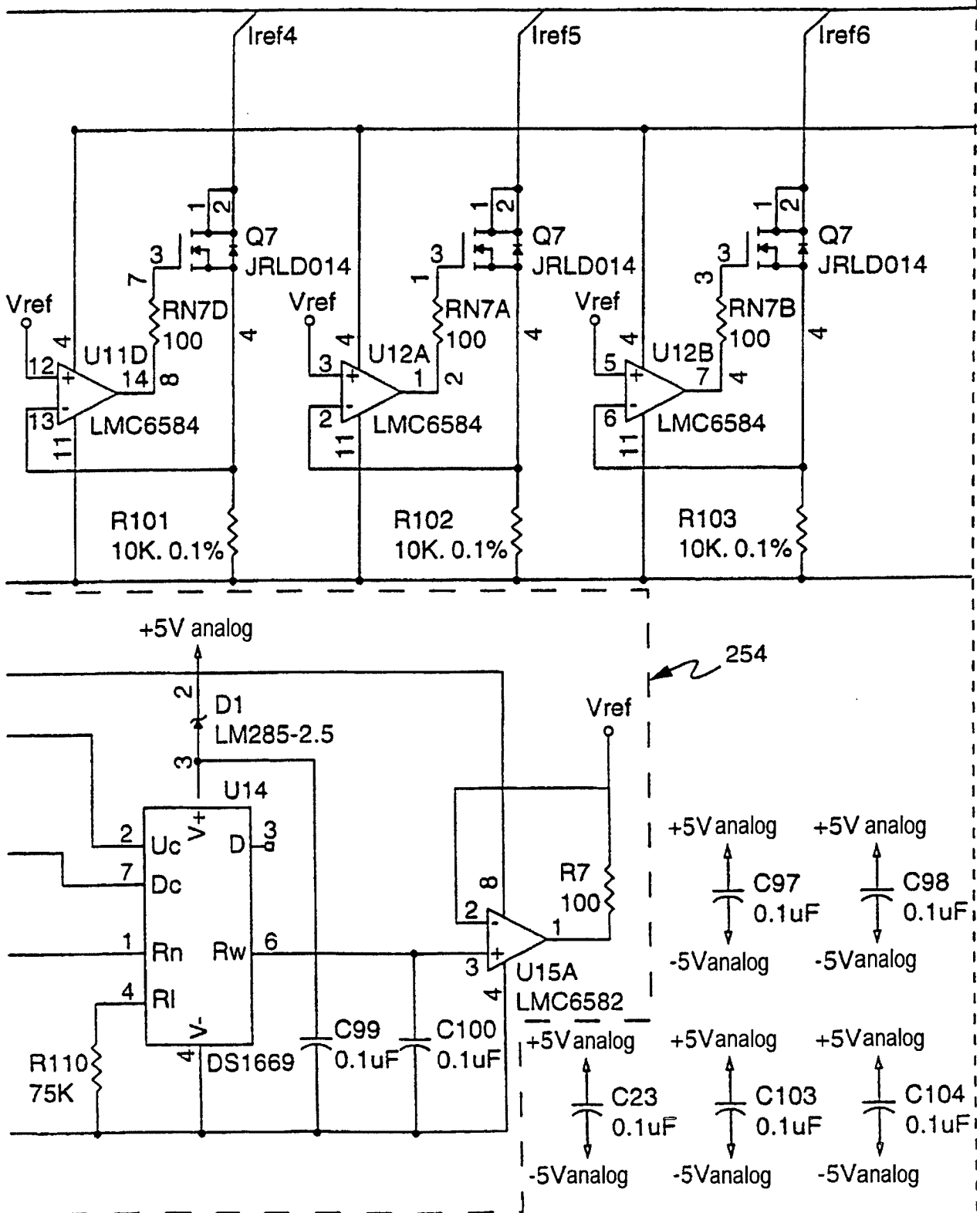
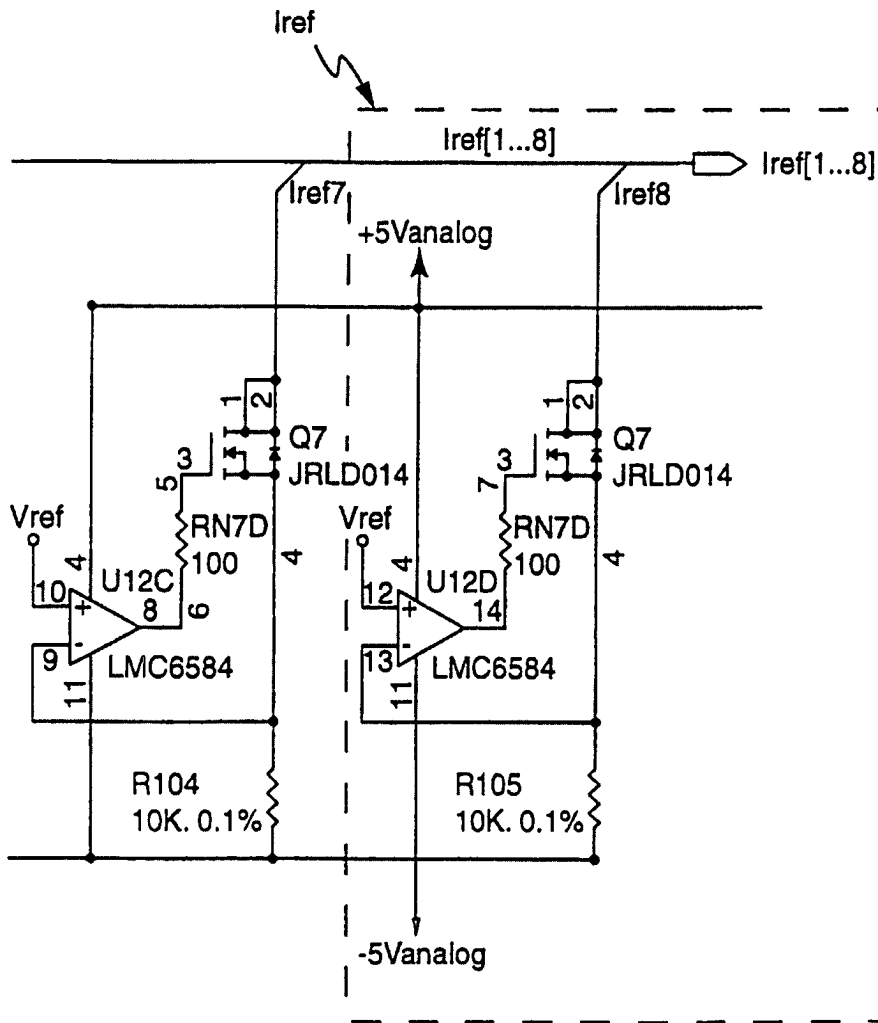
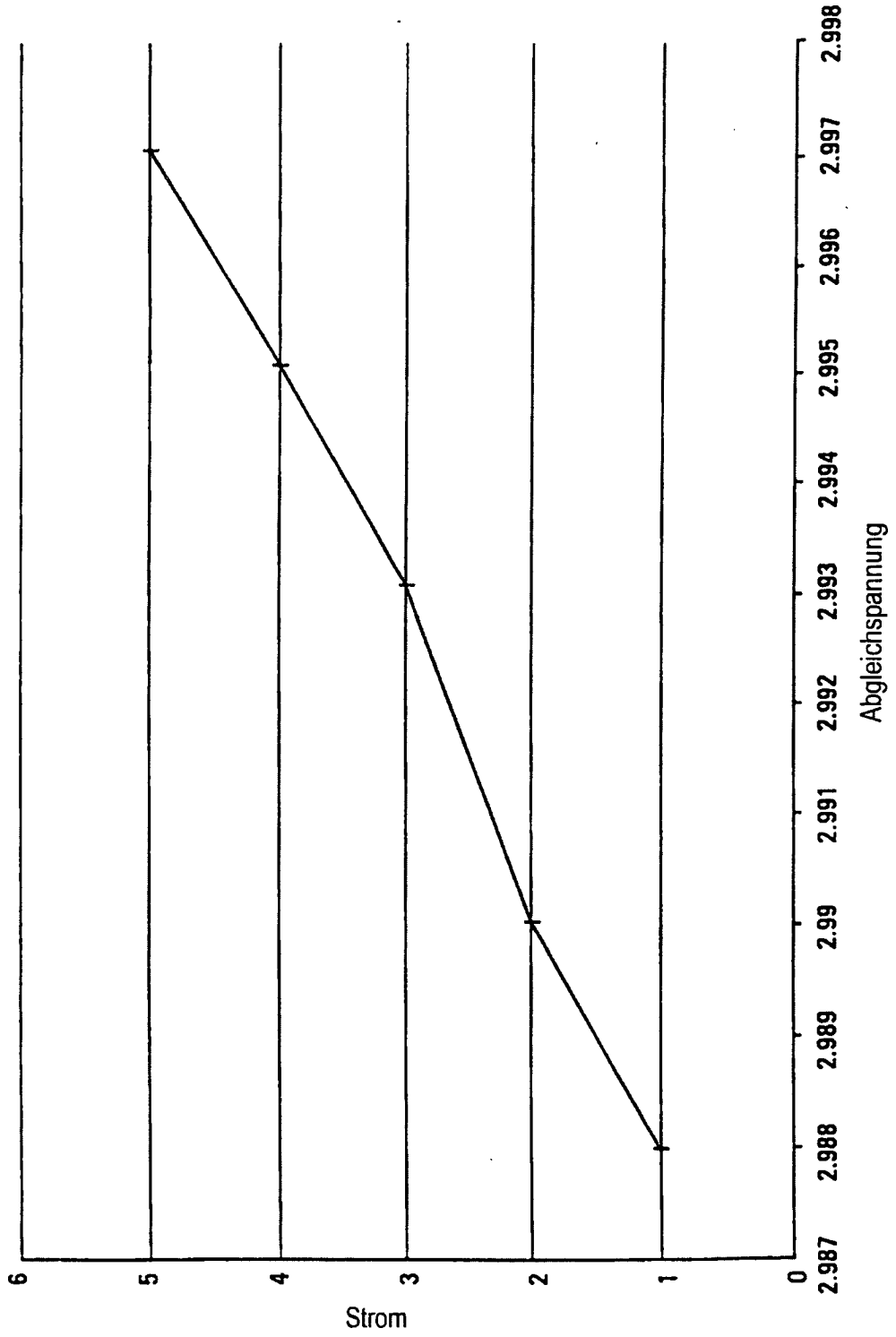


Fig. 27B

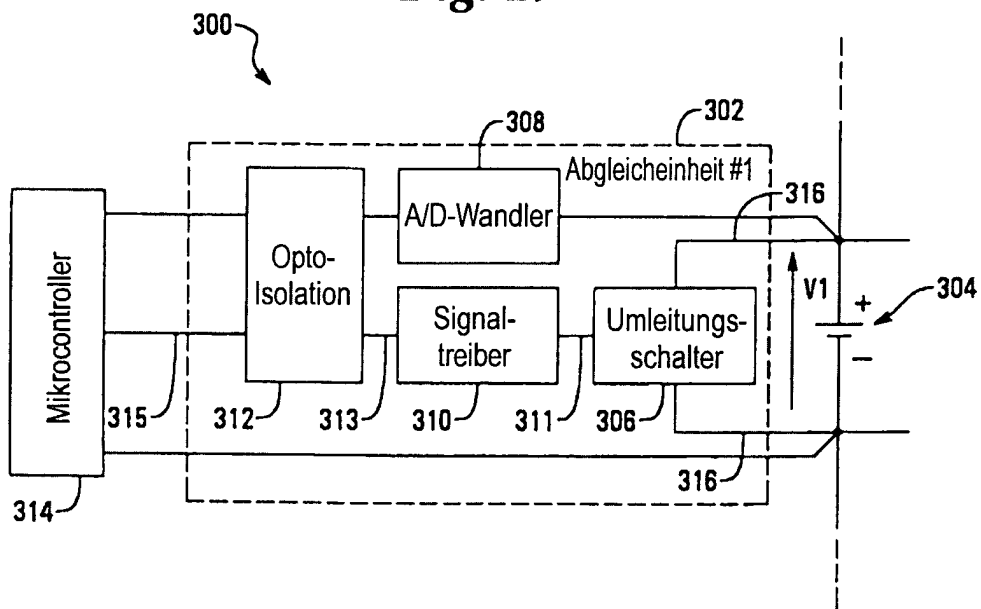


**Fig. 27C**

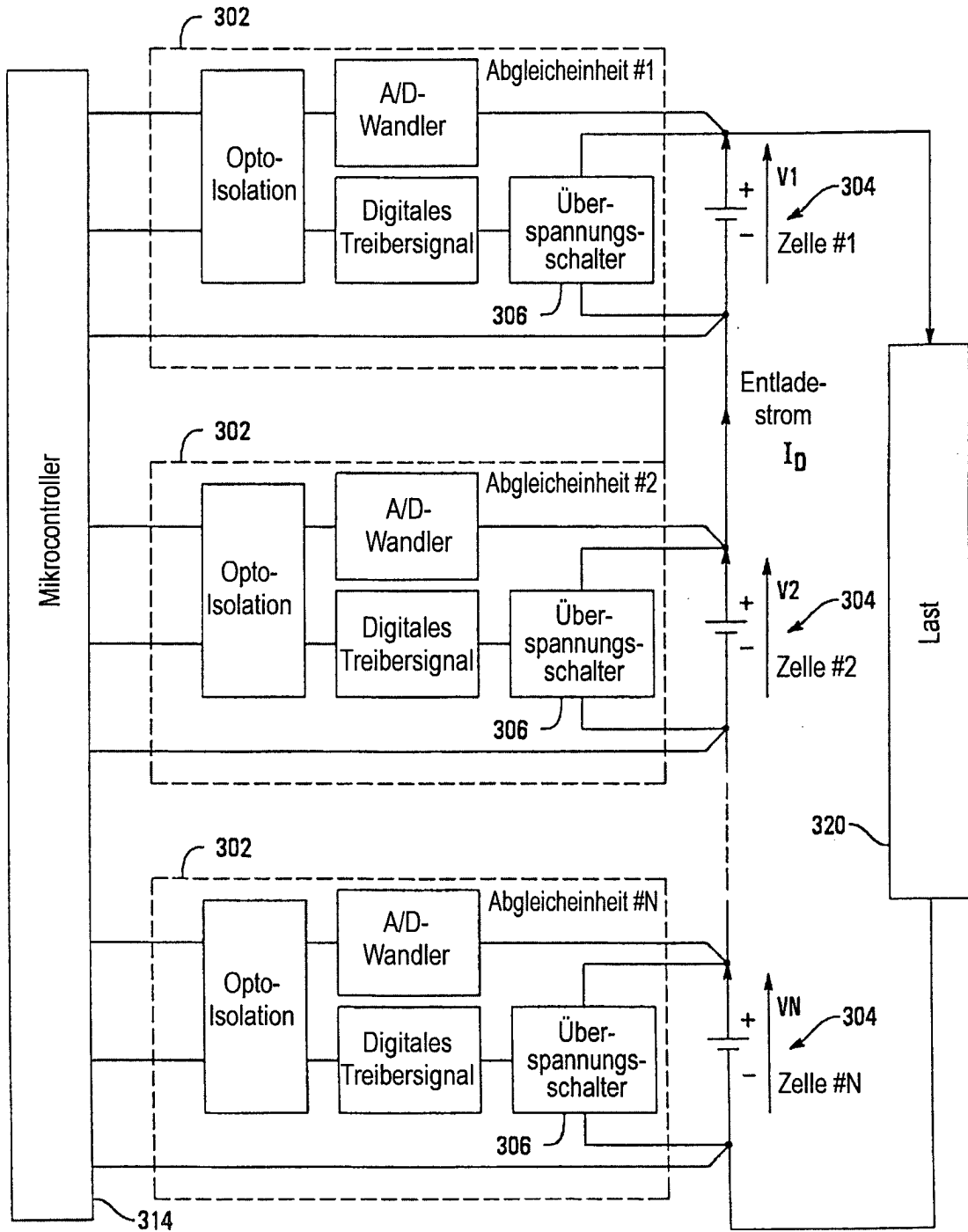
**Fig. 28**



**Fig. 29**



**Fig. 30**



**Fig. 31**

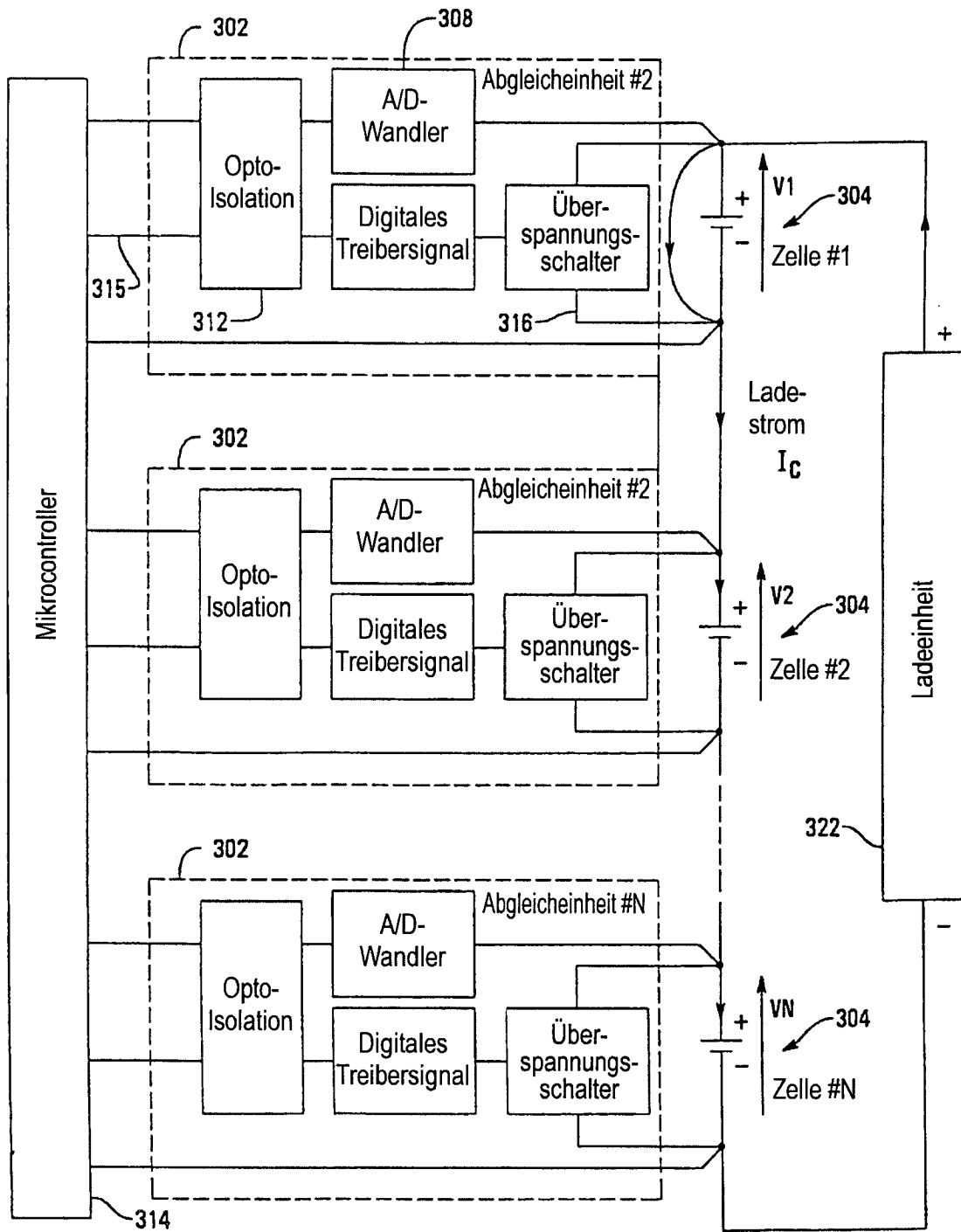
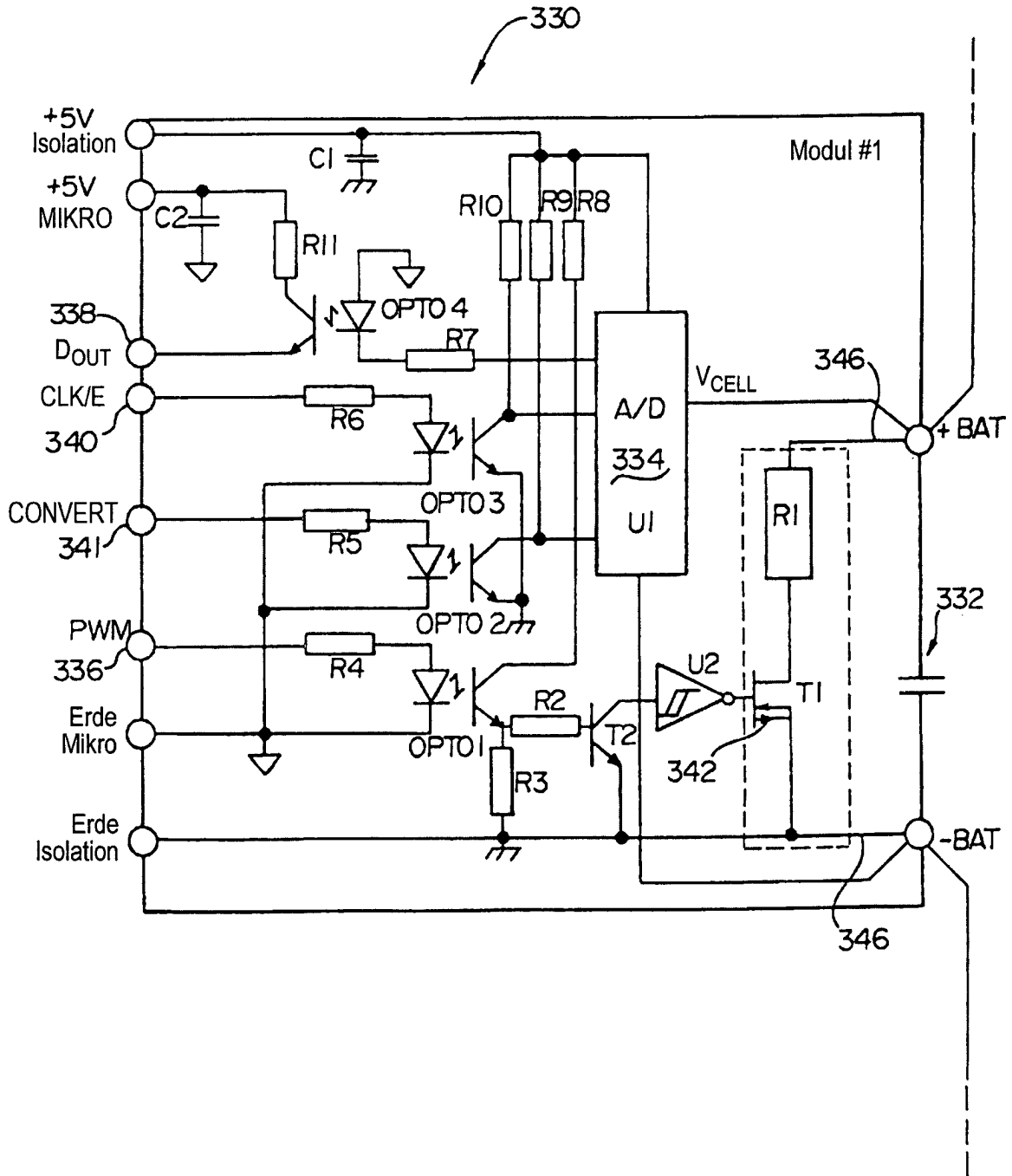
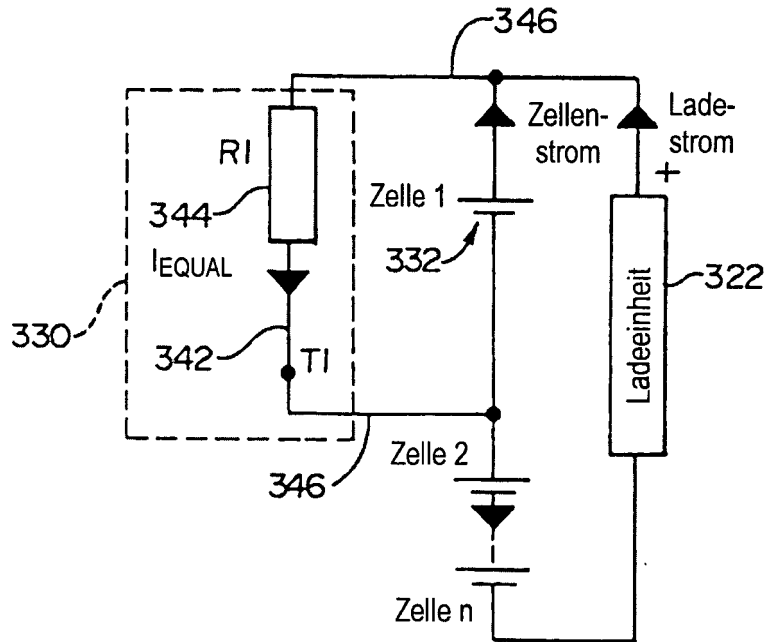


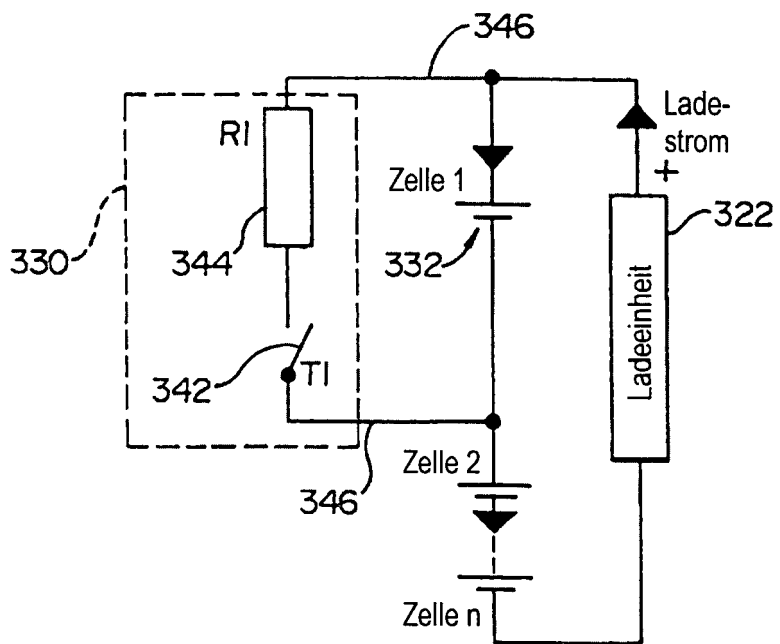
Fig. 32



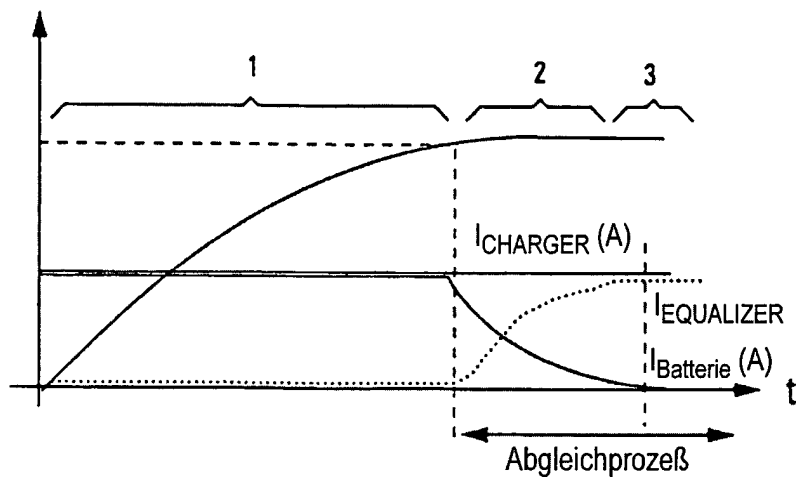
**Fig. 33A**



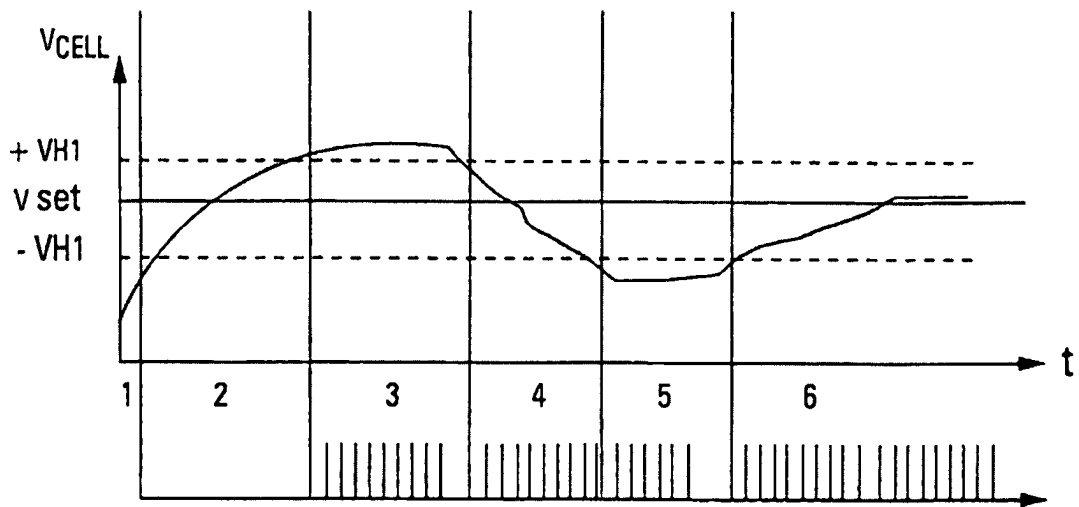
**Fig. 33B**



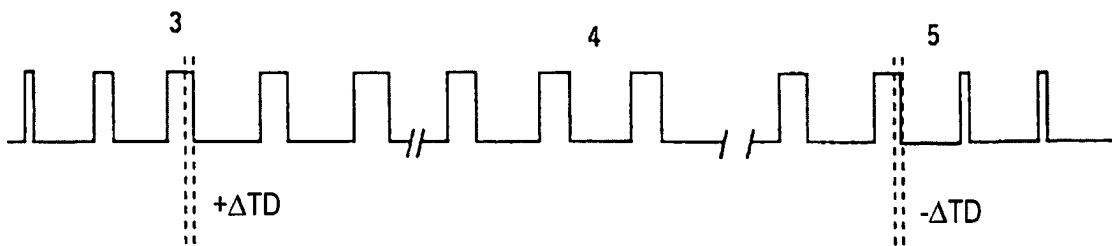
**Fig. 34**



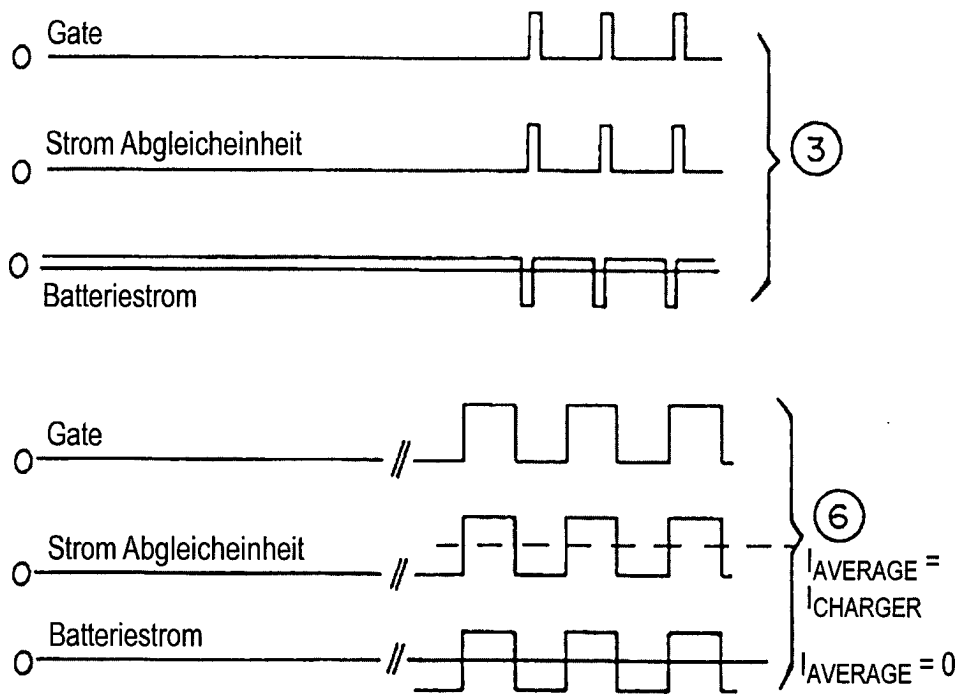
*Fig. 35*



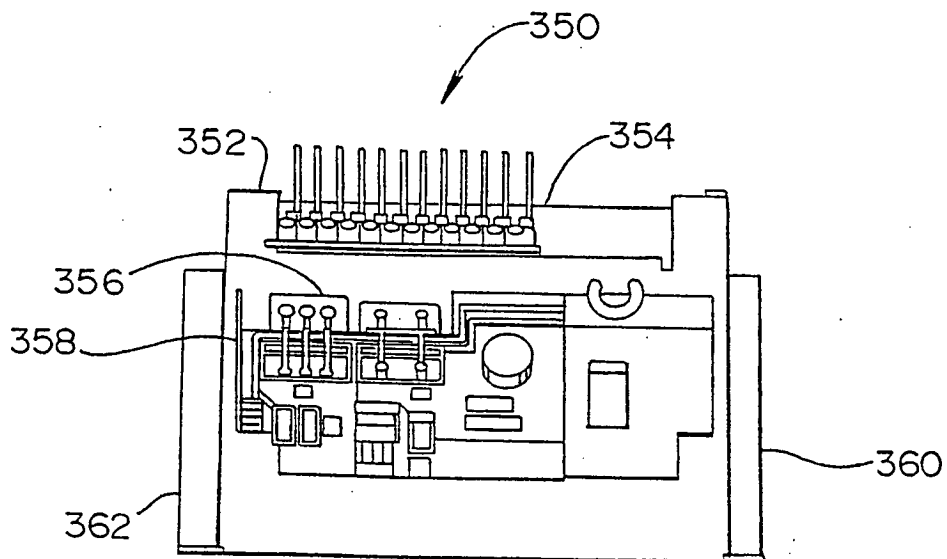
*Fig. 36*



*Fig. 37*



*Fig. 38*



*Fig. 39*

