



(10) **DE 10 2021 211 918 A1** 2023.04.27

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 211 918.2**

(22) Anmeldetag: **22.10.2021**

(43) Offenlegungstag: **27.04.2023**

(51) Int Cl.: **G01R 31/392** (2019.01)

H01M 10/48 (2006.01)

G01R 31/367 (2019.01)

(71) Anmelder:
**Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter
Haftung, 70469 Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:
**Simonis, Christian, 71229 Leonberg, DE; Woll,
Christoph, 70839 Gerlingen, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

**HU, Xiaosong, et al. Battery health prediction
using fusion-based feature selection and
machine learning. In: IEEE Transactions on
Transportation Electrification, 2020, 7. Jg., Nr. 2,
S. 382-398.**

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum Bereitstellen eines berechneten oder prädierten
Alterungszustands von elektrischen Energiespeichern mit mithilfe von maschinellen Lernverfahren
ermittelten Alterungszustandsmodellen und zum optimierten Betreiben einer Vielzahl von Energiespeichern**

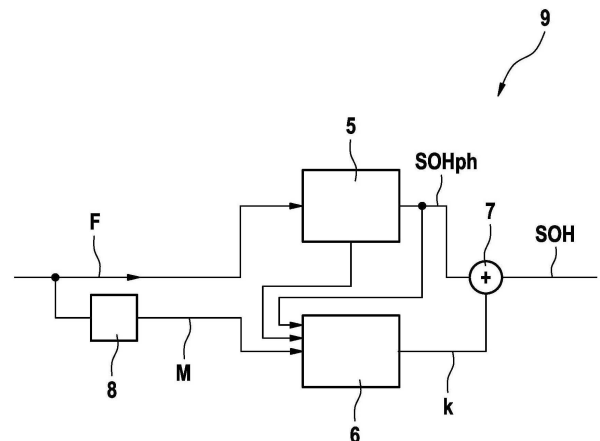
(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein computer-
implementiertes Verfahren zum jeweiligen Bereitstellen
eines globalen und mindestens eines speziellen Alterungs-
zustandsmodells (9) zum Bestimmen eines modellierten
Alterungszustands (SOH) für eine Vielzahl von elektrischen
Energiespeichern (41) mit mindestens einer elektrochemi-
schen Einheit, insbesondere einer Batteriezelle, mit folgen-
den Schritten:

- Bereitstellen (S2) von Trainingsdatensätzen, die jeweils einen Betriebsmerkmalspunkt, der durch ein oder mehrere aus Betriebsgrößenverläufen abgeleitete Betriebsmerkmale der Energiespeicher und eine entsprechende kalendarische Altersangabe bestimmt ist, einem Alterungszustand zuordnen, wobei das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale eines Betriebsmerkmalspunkts eine Belastung des jeweiligen Energiespeichers (41) angeben;

- Trainieren (S3) eines datenbasierten oder hybriden globalen Alterungszustandsmodells (MG), das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, mit den Trainingsdatensätzen, so dass das globale Alterungszustandsmodell ausgebildet wird, um die Betriebsgrößenverläufe und/oder das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale einem entsprechenden Alterungszustand zuzuordnen,

- Trainieren (S5) mindestens eines datenbasierten oder hybriden speziellen Alterungszustandsmodells (MS1, MS2), das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, mit einem ausgewählten Teil der Trainingsdatensätze, so dass das mindestens eine spezielle Alterungszustandsmodell (MS1, MS2) ausgebildet wird, um die Betriebsgrößenverläufe und/oder das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale einem entsprechenden Alterungszustand zuzuordnen,

- Bereitstellen (S7) des globalen und des mindestens einen speziellen Alterungszustandsmodells (MG, MS1, MS2).



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft netzunabhängig betriebene elektrische Geräte mit elektrischen Energiespeichern, insbesondere elektrisch antreibbare Kraftfahrzeuge, insbesondere Elektrofahrzeuge oder Hybridfahrzeuge, und weiterhin Maßnahmen zur Bestimmung eines aktuellen oder prädizierten Alterungszustands (SOH: State of Health) des elektrischen Energiespeichers. Weiterhin betrifft die Erfindung neben mobilen auch stationäre elektrische Energiespeicher.

Technischer Hintergrund

[0002] Die Energieversorgung von netzunabhängig betriebenen elektrischen Geräten und Maschinen, wie z.B. elektrisch antreibbaren Kraftfahrzeugen, erfolgt mithilfe von elektrischen Energiespeichern, in der Regel Gerätebatterien bzw. Fahrzeugbatterien. Diese liefern elektrische Energie zum Betrieb der Geräte. Als elektrischer Energiespeicher kommen jedoch auch Energiewandler, wie z.B. Brennstoffzellen-Systeme, inklusive Wasserstofftank, in Betracht.

[0003] Elektrische Energiespeicher bzw. Energiewandler degradieren über ihre Lebensdauer und abhängig von deren Belastung bzw. Nutzung. Diese sogenannte Alterung führt zu einer kontinuierlich abnehmenden maximalen Leistungs- bzw. Speicherkapazität. Der Alterungszustand entspricht einem Maß zur Angabe der Alterung von Energiespeichern. Gemäß der Konvention weist ein neuer Energiespeicher einen Alterungszustand in Bezug auf seine verfügbare Kapazität von 100% auf, der im Laufe seiner Lebensdauer zusehends abnimmt. Ein Maß der Alterung des Energiespeichers (zeitliche Änderung des Alterungszustands) hängt von einer individuellen Belastung des Energiespeichers, d. h. bei Fahrzeugbatterien von Kraftfahrzeugen vom Nutzungsverhalten eines Fahrers, externen Umgebungsbedingungen und vom Fahrzeugbatterietyp ab.

[0004] Zwar kann mithilfe eines physikalischen Alterungszustandsmodells der momentane Alterungszustand des Energiespeichers basierend auf historischen Betriebsgrößenverläufen bestimmt werden, jedoch ist dieses Modell in bestimmten Situationen ungenau. Diese Ungenauigkeit des herkömmlichen Alterungszustandsmodells erschwert eine genaue Zustandsbestimmung sowie die Prädiktion des Alterungszustandsverlaufs.

[0005] Weiterhin ist speziell zu Beginn eines Flottenlebens der Merkmalsbereich, auf den ein Alterungszustandsmodell trainiert wird, fragmentiert oder lückenhaft, was eine Parametrisierung eines globalen

Alterungsmodells erschwert bzw. zu ungenauen Zustandsschätzungen führen kann.

[0006] Jedoch ist die Prädiktion des Verlaufs des Alterungszustands der Energiespeicher eine wichtige technische Größe, da mit ihr eine Bestimmung der Restlebensdauer und eine wirtschaftliche Bewertung eines Restwerts des Energiespeichers möglich ist. Weiterhin ist die Prädiktion des Alterungszustands von Mehrwert, um vorausschauende Wartungsintervalle zu planen und durchzuführen.

Offenbarung der Erfindung

[0007] Erfindungsgemäß sind ein computerimplementiertes Verfahren zum jeweiligen Bereitstellen eines Alterungszustandsmodells zum Bestimmen eines modellierten Alterungszustands für elektrische Energiespeicher zum Bestimmen eines modellierten Alterungszustands gemäß Anspruch 1, sowie eine entsprechende Vorrichtung gemäß den nebengeordneten Ansprüchen vorgesehen.

[0008] Weitere Ausgestaltungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0009] Gemäß einem ersten Aspekt ist ein computerimplementiertes Verfahren zum jeweiligen Bereitstellen eines globalen und mindestens eines Alterungszustandsmodells zum Bestimmen eines modellierten Alterungszustands für elektrische Energiespeicher mit mindestens einer elektrochemischen Einheit, insbesondere einer Batteriezelle, mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen von Trainingsdatensätzen, die jeweils einen Betriebsmerkmalspunkt, der durch ein oder mehrere aus Betriebsgrößenverläufen abgeleitete Betriebsmerkmale der Energiespeicher und eine entsprechende kalendarische Altersangabe bestimmt ist, einem Alterungszustand zuordnen, wobei das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale eines Betriebsmerkmalspunkts eine Belastung des jeweiligen Energiespeichers angeben;
- Trainieren eines datenbasierten oder hybriden globalen Alterungszustandsmodells, das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, mit den Trainingsdatensätzen, so dass das globale Alterungszustandsmodell ausgebildet wird, um die Betriebsgrößenverläufe und/oder das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale einem entsprechenden Alterungszustand zuzuordnen,
- Trainieren mindestens eines datenbasierten oder hybriden speziellen Alterungszustandsmodells, das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, mit einem ausgewählten Teil der Trainingsdatensätze, so dass das mindestens

eine spezielle Alterungszustandsmodell ausgebildet wird, um die Betriebsgrößenverläufe und/oder das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale einem entsprechenden Alterungszustand zuzuordnen,

- Bereitstellen des globalen und des mindestens einen speziellen Alterungszustandsmodells für jeden der Energiespeicher.

[0010] Weiterhin kann vorgesehen sein, dass der Teil der Trainingsdatensätze ausgewählt wird, wenn deren Betriebsmerkmalspunkte und der zugehörige Alterungszustand einen Betriebsmerkmalsbereich bilden, bei dem die Modellvorhersage mit dem globalen Alterungszustandsmodell eine niedrige Konfidenz unter einem vorgegebenen Konfidenzschwellenwert oder eine hohe Konfidenz über einem vorgegebenen Konfidenzschwellenwert aufweist.

[0011] Energiespeicher im Sinne dieser Beschreibung umfassen Gerätebatterien, Energiewandler-Systeme mit einem elektrochemischen Energiewandler mit einem Energieträgervorrat, wie z.B. Brennstoffzellensysteme mit einer Brennstoffzelle und einem Energieträgervorrat.

[0012] Der Alterungszustand eines elektrischen Energiespeichers, insbesondere einer Gerätebatterie, wird üblicherweise nicht direkt gemessen. Dies würde eine Reihe von Sensoren in Inneren des Energiespeichers erfordern, die die Herstellung eines solchen Energiespeichers kostenintensiv sowie aufwendig machen und den Raumbedarf vergrößern würde. Zudem sind alltagstaugliche Messverfahren zur direkten Alterungszustandsbestimmung in den Energiespeichern noch nicht auf dem Markt verfügbar.

[0013] Der Alterungszustand (SOH: State of Health) ist bei Gerätebatterien die Schlüsselgröße zur Angabe einer verbleibenden Batteriekapazität oder verbleibenden proportionalen Reichweite bei voller Batterieladung. Der Alterungszustand stellt ein Maß für die Alterung der Gerätebatterie dar. Im Falle einer Gerätebatterie oder eines Batterie-Moduls oder einer Batterie-Zelle kann der Alterungszustand als Kapazitätserhaltungsrate (Capacity Retention Rate, SOH-C) angegeben werden. Die Kapazitätserhaltungsrate SOH-C ist als Verhältnis der gemessenen momentanen Kapazität zu einer Anfangskapazität der vollständig aufgeladenen Batterie angegeben. Die relative Änderung der Kapazitätserhaltungsrate SOH-C sinkt mit zunehmender Alterung der Gerätebatterie. Alternativ kann der Alterungszustand als Anstieg des Innenwiderstands (SOH-R) bezüglich eines Innenwiderstands zu einem Lebensdauerbeginn der Gerätebatterie angegeben werden. Die relative Änderung des Innenwiderstands SOH-R steigt mit zunehmender Alterung der Batterie an.

[0014] Daher wird der aktuelle Alterungszustand eines elektrischen Energiespeichers in der Regel mithilfe eines physikalischen Alterungsmodells ermittelt. Dieses physikalische Alterungszustandsmodell ist in bestimmten Situationen ungenau und weist üblicherweise Modellabweichungen, speziell im Kalibrierungs-freien Fall wie bei einer Prädiktion, bei der keine reale Ruhespannung zum Modellabgleich gemessen werden kann, von bis zu mehr als 5 % auf. Aufgrund der Ungenauigkeit des physikalischen Alterungsmodells kann dieses zudem lediglich den momentanen Alterungszustand des Energiespeichers einigermaßen genau angeben.

[0015] Um die Genauigkeit des Alterungszustandsmodells zu verbessern, können Alterungszustandsmodelle zur Ermittlung von Alterungszuständen für elektrische Energiespeicher in Form eines hybriden Alterungszustandsmodells, also einer Kombination eines physikalischen Alterungsmodells mit einem datenbasierten Modell, bereitgestellt werden. Bei einem hybriden Modell kann ein physikalischer Alterungszustand mithilfe eines physikalischen bzw. elektrochemischen Alterungsmodells ermittelt werden und dieser mit einem Korrekturwert beaufschlagt werden, der sich aus einem datenbasierten Korrekturmodell ergibt, insbesondere durch Addition oder Multiplikation. Das physikalische Alterungsmodell basiert auf elektrochemischen Modellgleichungen, welche elektrochemische Zustände eines nichtlinearen Differentialgleichungs-Systems charakterisiert, fortlaufend berechnet und diese zur Ausgabe auf den physikalischen Alterungszustand abbildet, als SOH-C und/oder als SOH-R. Die Berechnungen können typischerweise in der Cloud z.B. einmal pro Woche ausgeführt werden.

[0016] Weiterhin kann das Korrekturmodell des hybriden datenbasierten Alterungszustandsmodells mit einem probabilistischen oder auf künstlicher Intelligenz basierendem Regressionsmodell, insbesondere einem Gaußprozessmodell, ausgebildet sein und kann trainiert sein, um den durch das physikalische Alterungsmodell erhaltenen Alterungszustand zu korrigieren. Hierzu existieren folglich ein datenbasiertes Korrekturmodell des Alterungszustands zur Korrektur des SOH-C und/oder mindestens ein weiteres zur Korrektur des SOH-R. Mögliche Alternativen zum Gaußprozess stellen weitere Supervised Learning Verfahren, wie basierend auf einem Random-Forest-Modell, einem AdaBoost-Modell, einer Support-Vector-Machine oder einem Bayes'schen neuronalen Netzwerk dar.

[0017] Das Korrekturmodell kann als Eingangsgrößen Betriebsmerkmale nutzen, die aus den Betriebsgrößenverläufen mithilfe von Feature-Engineering bzw. Merkmals-Extraktions-Verfahren bestimmt worden sind, wobei die Features bzw. Merkmale mithilfe von signalverarbeitungstechnischen Operationen

berechnet werden. Die einem Betriebsgrößenverlauf zugeordneten Betriebsmerkmale definieren einen Betriebsmerkmalspunkt für den betreffenden Energiespeicher, der den Belastungszustand durch zyklischen Betrieb (zyklische Alterung) und die kalendrische Alterung des Energiespeichers (verstrichene Zeitdauer seit Inbetriebnahme bzw. Lebensdauerbeginn) abbilden.

[0018] Die Betriebsmerkmale können kumulierende lastbasierte Merkmale und/oder über die gesamte bisherige Lebensdauer ermittelte statistische Größen umfassen. Insbesondere können als Betriebsmerkmale Merkmale aus Histogramm Daten ermittelt werden, die aus den Verläufen der Betriebsgrößen erstellt worden sind. So können beispielsweise Histogramme bezüglich des Batteriestroms über der Batterietemperatur und dem Ladezustand der Fahrzeugbatterie, ein Histogramm der Batterietemperatur über dem Ladezustand der Fahrzeugbatterie, ein Histogramm des Ladestroms über einer Batterietemperatur und ein Histogramm eines Entladestroms über der Batterietemperatur erstellt werden. Ferner können als Betriebsmerkmale die akkumulierte Gesamtladung (Ah), eine durchschnittliche Kapazitätzunahme bei einem Ladevorgang (insbesondere für Ladevorgänge, bei denen die Ladungszunahme über einem Schwellenanteil [z. B. 20 % Δ SOC] der gesamten Batteriekapazität liegt), die Ladekapazität sowie ein Extremwert (z.B. ein lokales Maximum) der geglätteten differentiellen Kapazität während eines gemessenen Ladevorgangs mit ausreichend großem Hub des Ladezustands (geglätteter Verlauf von dQ/dU : Ladungsänderung dividiert durch Änderung der Batteriespannung) oder die akkumulierte Fahrleistung jeweils seit Inbetriebnahme der Gerätebatterie berücksichtigt werden. Weitere Betriebsmerkmale können einem lokalen Extremwert der spektralen Kurtosis, ausgewertet auf einem Ladevorgang für Strom oder Spannungssignal, einem oder mehreren Koeffizienten einer Wavelet-Transformation, ausgewertet auf einem Ladevorgang für ein Strom oder ein Spannungssignal oder einen transformierter Spektralwert, zugeordnet zu einem definierten Frequenzband; und einem oder mehreren Koeffizienten der Fourier-Transformation, ausgewertet auf einem Ladevorgang für ein Strom- oder Spannungssignal oder transformierter Spektralwert, zugeordnet zu einem definierten Frequenzband entsprechen.

[0019] Betriebsmerkmale können somit aus Histogrammen hinsichtlich der Betriebsgrößen abgeleitet werden, insbesondere bei Gerätebatterien als Energiespeicher, können die Histogramme ein Histogramm des Batteriestroms über der Batterietemperatur und den Ladezustand der Gerätebatterie, ein Histogramm des Ladestroms über der Batterietemperatur, ein Histogramm des Entladestroms über der Temperatur und den kumulierten Stromdurchsatz in Amperestunden angeben. Hieraus können mithilfe

Feature-Engineering bzw. Merkmals-Extraktions-Verfahren Betriebsmerkmale extrahiert werden, wie beispielsweise der Mittelwert, die Standardabweichungen der Histogramme sowie mehrdimensionale statistische Werte, wie Mittelwert, Median, Minimum, Maximum, Momente der Verteilung und dergleichen.

[0020] Weiterhin ist es zum Parametrisieren des physikalischen Alterungsmodells und zum Training des Korrekturmodells notwendig, Daten aus einer Vielzahl von gleichartigen Energiespeichern zu verwenden, um eine ausreichende Datenbasis für die Ausbildung des Alterungszustandsmodells bereitzustellen.

[0021] Zur Modellierung eines Alterungszustands eines Energiespeichers mithilfe eines physikalischen bzw. elektrochemischen Alterungszustandsmodells und einer optionalen Präzisierung durch ein datenbasiertes Korrekturmodell (in Kombination also ein hybrides Alterungszustandsmodell) ist es notwendig, die Zeitverläufe von Betriebsgrößen relativ hochfrequent bereitzustellen. Diese Zeitverläufe der Betriebsgrößen müssen weiterhin für die erforderlichen Genauigkeitsanforderungen lückenlos bereitgestellt werden, um den Alterungszustand zu einem aktuellen Zeitpunkt für einen Energiespeicher zu bestimmen.

[0022] Alternativ kann der Alterungszustand auch durch ein rein datenbasiertes Alterungszustandsmodell ermittelt werden, das insbesondere als Regressionsmodell, wie z.B. einem Gaußprozessmodell, ausgebildet ist. Auch das rein datenbasierte Alterungszustandsmodell kann durch Vorgabe eines Betriebsmerkmalspunkts ausgewertet werden. Das datenbasierte Alterungszustandsmodell erfordert wie das hybride Alterungszustandsmodell zum Training Daten aus einer Vielzahl von gleichartigen Energiespeichern.

[0023] Basierend auf einem solchen datenbasierten bzw. hybriden Alterungszustandsmodell kann ein aktueller Alterungszustand der betrachteten Gerätebatterie sowie auch prädizierte Alterungszustände basierend auf prädizierten Belastungsgrößen, die eine prognostizierte Last des Energiespeichers angeben, erstellt werden. Beispielsweise kann als Restlebensdauer des Energiespeichers eine Zeitdauer bis zu einem Lebensdauerende bestimmt werden, der einen Zeitpunkt angibt, an dem der prädizierte Alterungszustand einen vorgegebenen Schwellenwert, der das Lebensdauerende angibt und z.B. einer Hersteller-Garantie-Grenze entspricht, unterschreitet.

[0024] Zur Modellierung und Prädiktion eines Alterungszustands für eine Gerätebatterie als Energiespeicher kann ein physikalisches Alterungsmodell verwendet werden, das fortlaufende Betriebsdaten

auswertet, insbesondere indem eine Differentialgleichung per numerischem Zeitintegrationsverfahren gelöst wird. Hierzu müssen die Betriebsgrößen, wie beispielsweise ein Batteriestrom, eine Batterietemperatur, eine Batteriespannung und dergleichen, als hochaufgelöste Zeitreihen vorliegen. Die Modellierung eines solchen physikalischen Alterungsmodells ist aufwändig und erfordert die Auswertung von Messungen an einer Vielzahl gleichartiger Energiespeicher. Deswegen und auch aufgrund mangelnder Rechenkapazitäten kann diese Modellierung nicht in einem Steuergerät des jeweiligen technischen Geräts ausgeführt werden. Auch die Auswertung des physikalischen Alterungsmodells Diesbezüglich kann die Auswertung in einer geräteexternen Zentraleinheit, die mit dem technischen Gerät in Kommunikationsverbindung steht, vorgenommen werden.

[0025] Eine Idee des obigen Verfahrens beruht darauf, zur Ermittlung eines aktuellen Alterungszustands oder zur Prädiktion eines Alterungszustands von Energiespeichern Betriebsgrößenverläufe und Feldmessungen (d.h. gelabelten Betriebsgrößenverläufe) einer Vielzahl von gleichartigen Energiespeichern zu nutzen, um ein datenbasiertes bzw. hybrides Alterungszustandsmodell zu erstellen/trainieren. Für den Fall, dass der Merkmalsraum jedoch fragmentiert oder lückenhaft ist, können in gewissen Situationen mit einem oder mehreren speziellen Alterungszustandsmodellen mit jeweils kleinerem Gültigkeitsbereich eine genauere und oder robustere Zustandsberechnung realisiert werden als mit einem globalen Alterungsmodell.

[0026] Wie oben beschrieben, kann das Alterungszustandsmodell basierend auf gelabelten, d.h. mit zugeordneten aus Feldmessungen erhaltenen Alterungszuständen versehenen Betriebsgrößenverläufen als Trainingsdaten mit einer Vielzahl von Energiespeichern trainiert werden und kann mit zunehmender Betriebszeit und zunehmender Anzahl von Trainingsdaten immer präziser die Alterungszustände der Energiespeicher für unterschiedliche Belastungszustände und kalendarischen Alter vorhersagen.

[0027] Insbesondere wenn die Vielzahl der Energiespeicher noch geringe Betriebsalter aufweist und/oder bei einer geringen Anzahl von Trainingsdaten, ist der Merkmalsraum zur Auswertung des datenbasierten Alterungszustandsmodells bereichsweise nicht ausreichend trainiert und weist in Bereichen hohe Unsicherheiten bzw. niedrige Konfidenzen auf. Durch das kontinuierliche Training des Alterungszustandsmodells basierend auf Betriebsgrößenverläufen von Energiespeichern der Vielzahl von Geräten und entsprechenden Label-Generierungen wird zwar das Alterungszustandsmodell zusehends verbessert, jedoch schließen sich die Bereiche hoher Vorhersageunsicherheit erst nach längerer Nutzung und

regelmäßiges Training des datenbasierten Alterungszustandsmodells.

[0028] Erfindungsgemäß werden nun neben einem mit allen Trainingsdaten trainiertes globales Alterungszustandsmodell ein oder mehrere spezielle Alterungszustandsmodelle bereitgestellt, die nur für die Auswertung in Bereichen trainiert sind, in denen eine Modellvorhersage des globalen Alterungszustandsmodells eine niedrige bzw. hohe Konfidenz aufweist.

[0029] Es kann vorgesehen sein, dass der Teil der Trainingsdatensätze zum Trainieren des speziellen Alterungszustandsmodells ausgewählt wird, indem ein Clusteringverfahren auf die Betriebsmerkmalepunkte und zugeordneten Alterungszustände der Trainingsdatensätze durchgeführt wird, um mindestens einen Betriebsmerkmalsbereich mit der niedrigen Konfidenz zu ermitteln, wobei die Trainingsdatensätze, die in dem mindestens einen Betriebsmerkmalsbereich mit der niedrigen Konfidenz liegen, als Teil der Trainingsdatensätze ausgewählt werden. Im Speziellen kann die Clusterbildung auch so erfolgen, dass der mindestens eine Merkmalsbereich, zu dem eine erhöhte Unsicherheit vorliegt, zumindest im Randbereich des Clusters liegt.

[0030] Wird somit festgestellt, dass ein Alterungszustand für einen Energiespeicher ermittelt bzw. prädiziert werden soll, dessen Belastungszustand durch Betriebsmerkmale charakterisiert ist, an dem das globale, d.h. allgemein basierend auf der Gesamtmenge der Trainingsdaten oder auf einer relevanten Untermenge davon trainierte Alterungszustandsmodell eine hohe Vorhersageunsicherheit (niedrige Konfidenz) aufweist, so wird auf das entsprechende spezielle Alterungszustandsmodell zurückgegriffen, das nur für den Betriebsmerkmalsbereich Gültigkeit hat, in dem der auszuwertende Energiespeicher liegt und in dem mit dem globalen Alterungszustandsmodell nur eine unsichere/unzuverlässige Auswertung eines Alterungszustands möglich ist.

[0031] Die Bewertung, ob eine Modellauswertung unsicher bzw. unzuverlässig ist, erfolgt bei Nutzung eines probabilistischen datenbasierten Modells, wie z.B. eines Gaußprozessmodells, als Korrekturmodell (beim hybriden Alterungszustandsmodell) oder als rein datenbasiertes Alterungszustandsmodell implizit, da diese zusätzlich zur Modellauswertung einen Konfidenzwert bereitstellen können. Als unsicher/unzuverlässig wird eine Auswertung angesehen, wenn ein ermittelter Konfidenzwert den vorgegebenen Konfidenzschwellenwert unterschreitet. Die Konfidenz kann im Gaußprozessmodell direkt als Output für jeden beliebigen Betriebsmerkmalspunkt (Merkmalskombination) ausgewertet werden.

[0032] Das obige Verfahren sieht daher vor, für einen Energiespeicher, dessen aktueller Alterungszustand ermittelt oder für den ein Alterungszustand prädiziert werden soll, und für den eine Modellauswertung mithilfe des globalen Alterungszustandsmodells keine ausreichend sichere/zuverlässige Auswertung (niedrige Konfidenz) möglich ist, das für den betreffenden Betriebsmerkmalsbereich und Alterungszustand ermittelte spezielle Alterungszustandsmodell auszuwerten.

[0033] Das spezielle Alterungszustandsmodell wird basierend auf einer Auswahl von gelabelten Betriebsgrößenverläufen, d.h. Trainingsdatensätze, trainiert, die zu dem Betriebsmerkmalspunkt des auszuwertenden Energiespeichers ähnlich sind. Alternativ kann für den Betriebsmerkmalspunkt des auszuwertenden Energiespeichers mit der niedrigen Konfidenz dasjenige zuvor trainierte spezielle Alterungszustandsmodell verwendet werden, das einem Betriebsmerkmalsbereich zugeordnet ist, in dem der Betriebsmerkmalspunkt des auszuwertenden Energiespeichers liegt.

[0034] Der Betriebsmerkmalspunkt ist für einen bestimmten Energiespeicher als die Kombination der verschiedenen Werte der Betriebsmerkmale des betreffenden Energiespeichers bei einem Alterungszustand definiert. Das spezielle Alterungszustandsmodell wird somit nur auf einer repräsentativen Untermenge der Trainingsdaten trainiert. Der dafür verwendete Teil der Trainingsdatensätze ergibt sich aus einer Auswahl aus allen Trainingsdatensätzen derjenigen Energiespeicher, die zu dem Energiespeicher, für den ein Alterungszustand zu ermitteln ist, ähnlich sind. Alternativ können ein oder mehrere spezielle Alterungszustandsmodelle für Betriebsmerkmalsbereiche mit zumindest teilweise niedriger Konfidenz, also teilweise hoher Unsicherheit, trainiert sein, so dass das für einen auszuwertenden Energiespeicher, der durch einen Betriebsmerkmalspunkt innerhalb des Betriebsmerkmalsbereichs des speziellen Alterungszustandsmodells charakterisiert ist, das entsprechende zuvor trainierte spezielle Alterungszustandsmodell verwendet wird.

[0035] Alternativ und vorteilhafterweise kann der Teil der Trainingsdatensätze zum Trainieren des speziellen Alterungszustandsmodells ausgewählt werden, indem ein Clusteringverfahren auf die Betriebsmerkmalspunkte und zugeordneten Alterungszustände der Trainingsdatensätze durchgeführt wird, um in Bereichen guter Datenabdeckung spezialisierte Modelle zu trainieren, mit dem Ziel, für jedes Cluster, d.h. Häufung von Betriebsmerkmalspunkten, ein spezielles Alterungsmodell zu trainieren, welches aufgrund der vorteilhaften Datenabdeckung eine hohe Konfidenz und damit eine niedrige Unsicherheit insbesondere in der Prädiktion ermöglicht.

[0036] Wird somit festgestellt, dass ein Alterungszustand für einen Energiespeicher ermittelt bzw. prädiziert werden soll, dessen Belastungszustand durch Betriebsmerkmale charakterisiert ist, an dem das globale, d.h. allgemein basierend auf der Gesamtmenge der Trainingsdaten trainierte Alterungszustandsmodell eine niedrige Vorhersageunsicherheit (hohe Konfidenz) aufweist, so wird auf das entsprechende spezielle Alterungszustandsmodell zurückgegriffen, das nur für den Betriebsmerkmalsbereich Gültigkeit hat, in dem der auszuwertende Energiespeicher liegt und in dem mit dem globalen Alterungszustandsmodell eine sichere/zuverlässige Auswertung eines Alterungszustands möglich ist.

[0037] Das spezielle Alterungszustandsmodell, das gezielt für den aktuellen Betriebsmerkmalspunkt des auszuwertenden Energiespeichers trainiert ist, ermöglicht es, den Alterungszustand mit höherer Genauigkeit zu bestimmen, als dies mit dem globalen Alterungszustandsmodell der Fall ist. Dem liegt die Beobachtung zugrunde, dass auf Grundlage von vorgegebenen Trainingsdatensätzen als Datenbasis das datenbasierte Alterungszustandsmodell für bestimmte Teilbereiche des gesamten Merkmalsraums tendenziell bessere Vorhersagegenauigkeiten liefert als ein globales, mit allen Trainingsdatensätzen trainiertes Alterungszustandsmodell.

[0038] Um die Betriebsmerkmalsbereiche niedriger bzw. hoher Konfidenz zu ermitteln, kann vorgesehen sein, regelmäßig oder vor jeder Modellauswertung den Merkmalsraum zu analysieren, um Betriebsmerkmalsbereiche zu finden, die lückenhaft sind oder nicht repräsentativ sind, um für jeden Energiespeicher mit einem Betriebsmerkmalspunkt innerhalb oder nahe eines solchen Betriebsmerkmalsbereichs eine ausreichend genaue Vorhersage zu finden. Weiterhin kann der Betriebsmerkmalsbereich durch regelmäßige Cluster-Analysen bewertet werden, um die Cluster-Wahl bei neuen Datenverteilungen zu aktualisieren und die spezialisierten Alterungsmodelle durch ein Training entsprechend nachzuführen.

[0039] Zum Auffinden der obigen Betriebsmerkmalsbereiche kann nach erfolgtem Training des globalen Alterungszustandsmodells ein fein diskretisiertes Feature-Screening durchgeführt werden, wobei vom minimal bekannten Wert jedes Betriebsmerkmals bis zum maximal bekannten Wert des Betriebsmerkmals das Betriebsmerkmal variiert wird. Die entsprechenden Modellauswertungen des globalen Alterungszustandsmodells werden nun hinsichtlich ihrer Konfidenzwerte ausgewertet.

[0040] Für Betriebsmerkmalsbereiche, in denen der Konfidenzschwellenwert (z.B. von 90% Konfidenz) unterschritten wird, wird bei dem variierten Betriebsmerkmal eine Merkmalslücke erkannt. Eine Merk-

malslücke ist definiert durch einen Minimal-Wert und einen Maximal-Wert des variierten Betriebsmerkmals, wobei in diesem Merkmalsbereich alle durch Auswertungen erhaltenen Konfidenzwerte den vorgegebenen entsprechenden Konfidenzschwellenwert unterschreiten.

[0041] Eine Merkmalshäufung wird durch ein Clustering-Verfahren mithilfe eines K-Means-Clustering Verfahren und der Elbow-Methode ermittelt, um eine optimale Cluster-Anzahl zu ermitteln und um anschließend spezialisierte Alterungsmodelle zu parametrisieren.

[0042] Alternativ kann für Betriebsmerkmalsbereiche, in denen eine Konfidenz-Bedingung, ausgewertet über das Konfidenzintervall des Gaußprozesses, (z.B. Unsicherheit $< 0.5\%$ SOHC für 90% Konfidenz)) erfüllt wird, wird bei dem variierten Betriebsmerkmal eine Merkmalshäufung erkannt.

[0043] Dazu können für jeden der als Merkmalslücke bzw. Merkmalshäufung identifizierten Betriebsmerkmalsbereiche diejenigen Trainingsdatensätze identifiziert werden, dessen Betriebsgrößenverläufe Betriebsmerkmalspunkte definieren, die innerhalb und/oder nahe des als Merkmalslücke bzw. Merkmalshäufung definierten Betriebsmerkmalsbereichs liegen. Zudem kann die Lage des Betriebsmerkmalsbereichs in dem Merkmalsraum charakterisiert werden, insbesondere durch charakteristische Betriebsmerkmale wie AH-Durchsatz, $\max(dQ/dU)$, Temperatur usw.. Weiterhin kann für jeden der als Merkmalslücke bzw. Merkmalshäufung identifizierten Betriebsmerkmalsbereiche diejenigen Trainingsdatensätze ausgewählt werden, die innerhalb des Merkmalsraums der Merkmalslücke bzw. Merkmalshäufung liegen.

[0044] Zu dem als Merkmalslücke bzw. Merkmalshäufung identifizierten Betriebsmerkmalsbereich soll ein spezielles Alterungszustandsmodell erstellt werden. Dazu werden entsprechende Trainingsdatensätze mit ähnlichen Betriebsmerkmalspunkten beispielsweise durch ein Clustering-Verfahren ermittelt, wobei die Trainingsdatensätze, die Betriebsmerkmalspunkte aufweisen, die sich in dem Betriebsmerkmalsbereich niedriger bzw. hoher Konfidenz befinden, als ähnlich angenommen und ausgewählt werden.

[0045] Alternativ können Trainingsdatensätze zum Trainieren des speziellen Alterungszustandsmodells ausgewählt werden, indem zu einem bestimmten Betriebsmerkmalspunkt eines der Energiespeicher, zu dem die Modellvorhersage des globalen Alterungszustandsmodell eine geringe bzw. hohe Konfidenz aufweist, diejenigen Trainingsdatensätze ausgewählt werden, deren Betriebsmerkmalspunkte von dem bestimmten Betriebsmerkmalspunkt einen

Abstand von weniger als einem vorgegebenen Abstandsschwellenwert aufweisen.

[0046] Entsprechend kann die euklidische Distanz im mehrdimensionalen Betriebsmerkmalsraum genutzt werden, um ähnliche Betriebsmerkmalspunkte von Trainingsdatensätzen zu identifizieren. Insbesondere Trainingsdatensätze (gelabelte Betriebsmerkmalspunkte), die innerhalb des durch die gesamten Trainingsdatensätze definierten Betriebsmerkmalsraums eine euklidische Distanz von dem Betriebsmerkmalspunkt des auszuwertenden Energiespeichers (für den der Alterungszustand bestimmt werden soll) einen Schwellenwert unterschreitet, können als ähnliche Trainingsdatensätze ausgewählt werden. Sämtliche Trainingsdatensätze lassen sich somit eindeutig einem Cluster zuordnen.

[0047] Die so ausgewählten ähnlichen Trainingsdatensätze werden dann zum Training des speziellen Alterungszustandsmodells für das jeweilige Cluster verwendet, das zum Ermitteln und Prädizieren eines Alterungszustands für den betreffenden auszuwertenden Energiespeicher verwendet wird.

[0048] Weiterhin kann vorgesehen sein, dass basierend auf dem Bereich des globalen Alterungszustandsmodells, in dem zumindest in einem Teilbereich eine hohe Modellunsicherheit vorliegt, bevorzugt Trainingsdatensätze erstellt werden. In einem solchen Active Learning-Verfahren kann einer oder mehrere Energiespeicher identifiziert werden, der für die Verbesserung des globalen Alterungszustandsmodells die maximal repräsentative Information bereitstellt. Der so identifizierte Energiespeicher wird nun für eine Label-Generierung verwendet, indem z.B. durch eine durch eine Felddiagnosemessung ein neuer Trainingsdatensatz generiert wird.

[0049] Durch das sukzessive Ermitteln weiterer Trainingsdatensätze, z.B. mithilfe von Active-Learning-Verfahren, werden die Bereiche hoher Unsicherheit im globalen Alterungszustandsmodell verringert und über die höhere Anzahl der Trainingsdatensätze, die Qualität der Modellvorhersage des globalen Alterungszustandsmodells verbessert. Auch werden durch die Erhöhung der Anzahl der Trainingsdatensätze die speziellen Alterungszustandsmodelle verbessert. So werden im Laufe der Nutzungszeit die Bereiche hoher Unsicherheit im globalen Alterungszustandsmodell weniger und die Anzahl der speziellen Alterungszustandsmodelle verringert sich, da das globale Alterungszustandsmodell eine zunehmend bessere Vorhersagequalität aufweist und dadurch die Bereiche hoher Unsicherheit schrumpfen.

[0050] Gemäß einem weiteren Aspekt ist ein Verfahren zur Bestimmung von Alterungszuständen für Energiespeicher mithilfe eines globalen und mindes-

tens eines speziellen Alterungszustandsmodells, mit folgenden Schritten:

- Bestimmen eines Betriebsmerkmalspunkt eines jeweiligen Energiespeichers, der durch ein oder mehrere aus Betriebsgrößenverläufen abgeleitete Betriebsmerkmale der Energiespeicher und eine entsprechende kalendarische Altersangabe bestimmt ist,
- Jeweiliges Ermitteln eines Alterungszustands für den entsprechenden Energiespeicher und eines zugeordneten Konfidenzwerts mithilfe eines datenbasierten oder hybriden globalen Alterungszustandsmodells, das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, und eines datenbasierten oder hybriden speziellen Alterungszustandsmodells, das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, und die mithilfe des obigen Verfahrens erstellt sind,
- Ermitteln desjenigen Alterungszustand als zu bestimmenden Alterungszustand für den entsprechenden Energiespeicher, dessen Konfidenzwert höher ist.

[0051] Bei der Bestimmung des Alterungszustands für einen bestimmten Energiespeicher können nun beide Alterungszustandsmodelle, nämlich das globale datenbasierte Alterungszustandsmodell und das spezialisierte datenbasierte Alterungszustandsmodell, hinsichtlich ihrer Vorhersagegenauigkeiten bewertet werden. Die Bewertung berücksichtigt die Konfidenzwerte bzw. die Vorhersageunsicherheiten für eine Berechnung oder Prädiktion des Alterungszustands mit beiden Alterungszustandsmodellen. D.h. es wird dasjenige Alterungszustandsmodell zur Auswertung des Alterungszustands für den bestimmten Energiespeicher verwendet, das für die Bestimmung des Alterungszustands einen höheren Konfidenzwert ausgibt. Die Konfidenzwerte ergeben sich in Verbindung mit der Auswertung, wenn ein probabilistisches Regressionsmodell als Alterungszustandsmodell oder als Korrekturmodell verwendet wird.

[0052] Weiterhin kann die Bewertungsfunktion auch eine historische Modellunsicherheit der Alterungszustandsmodelle auswerten.

[0053] Gemäß einer Ausführungsform können Nutzungsaufgaben jeweilig einem Energiespeicher abhängig davon zugeordnet werden, welche Alterung, insbesondere welche Alterungszustandsänderung, durch Ausführen der betreffenden Nutzungsaufgabe in dem Energiespeicher gemäß dem jeweils zugeordneten globalen oder speziellen Alterungszustandsmodell bewirkt wird.

[0054] Somit können die Alterungszustandsmodelle genutzt werden, um für Energiespeicher der Vielzahl von Energiespeichern eine optimierte Nutzung vorzusehen. Basierend auf der obigen Auswahl der Alterungszustandsmodelle für jeden der Energiespeicher kann nun eine Verteilung der Belastung durch die weitere Nutzung der Energiespeicher vorgenommen werden.

[0055] Insbesondere können die Nutzungsaufgaben den Energiespeichern so zugeordnet werden, dass die Verteilung der Alterungszustände aller Energiespeicher eine möglichst geringe Streuung aufweist oder dass die Verteilung der aktuellen Betriebsmerkmalspunkte der Energiespeicher eine möglichst große Streuung aufweist.

[0056] Mithilfe der Zuordnung des globalen Alterungszustandsmodells oder des speziellen Alterungszustandsmodells zu jedem der Energiespeicher der Vielzahl der Geräte und eine entsprechende Zuordnung einer Belastungsangabe einer anstehenden vorausliegenden Nutzungsaufgabe, wie beispielsweise bei Fahrzeugen eine Kilometerleistung pro Zeiteinheit, kann eine sortierte Liste der zu erwartenden Alterung der Energiespeicher erstellt werden. Diese Liste kann entsprechend einer zu erwartenden Alterung der Energiespeicher bezogen auf eine vorgegebene Lebensdauerende-Bedingung, wie beispielsweise einer Zeitdauer bis zum Erreichen eines prädizierten Alterungszustand, der einem Lebensdauerende-Alterungszustand entspricht, sortiert werden. Mit anderen Worten werden für die Energiespeicher Alterungszustände oder Restlebensdauern basierend auf der anstehenden Belastungsangabe, basierend auf dem jeweils aktuellen Alterungszustand und basierend auf dem jeweils zugeordneten Alterungszustandsmodell ermittelt.

[0057] Anstehende Nutzungsaufgaben können für den Energiespeicher verschiedene Belastungen darstellen. Die anstehenden Nutzungsaufgaben können in eine Liste sortiert werden, je nach der Belastung, die ihre Durchführung für einen Energiespeicher darstellt. Die Belastung kann beispielsweise in Ah-Durchsatz quantifiziert werden. Entsprechend können die Nutzungsaufgaben den entsprechenden Energiespeichern so zugeordnet werden, z. B. dass Energiespeicher mit einer geringen Alterung einer anspruchsvollen, d. h. stärker belastenden Nutzungsart zugeordnet werden und stärker gealterte Energiespeicher mit einem geringen Alterungszustand einer Nutzungsart mit geringerem Alterungsstress zugeordnet werden. Dadurch kann eine gleichmäßige Alterung aller Energiespeicher in der Vielzahl von Geräten erreicht werden.

[0058] Durch eine modellprädiktive Regelung bzw. Einsatz von Energiespeichern wird möglich, die Merkmalslücken aktiv zu schließen. Durch gezielte

Last-Variation durch Zuweisen einer entsprechenden Nutzungsaufgabe können einzelne Betriebsmerkmale so modifiziert werden, dass sich für einzelne ausgewählte Energiespeicher Betriebsmerkmalspunkte in den Merkmalslücken ergeben, für die dann Feldmessungen des Alterungszustands vorgenommen werden, um Trainingsdatenpunkte zu generieren. Als mögliche Maßnahmen kommen für Fahrzeugbatterien als Energiespeicher und zu absolvierende Fahrstrecken als Nutzungsaufgaben in Betracht, diejenigen Fahrzeuge für eine jeweilige Fahraufgabe mit Lastanforderungen (Länge der Fahrstrecke, Geschwindigkeitsprofil, Temperatur, Höhenprofil) durch flottenübergreifende Optimierung zuzuweisen. Weiterhin kann in eine Betriebsstrategie eines Fahrzeugs eingegriffen werden, um eine definierte Last-Situation zu erzeugen, um kurz- oder langfristig ein Betriebsmerkmal oder eine Merkmalskombination hervorzurufen.

[0059] Ein alternativer Ansatz kann sein, die Nutzungsaufgaben so zu verteilen, dass die Betriebsmerkmalsbereiche möglichst gleichmäßig durch Betriebsmerkmalspunkte der einzelnen Energiespeicher abgedeckt sind.

[0060] Für jeden der Energiespeicher können abhängig von dem ausgewählten Alterungszustandsmodell die Betriebsgrenzen, wie beispielsweise maximale Stromflüsse oder Derating-Grenzen, ermittelt werden, um den Alterungsverlauf zu reduzieren und den Restwert bei Eintreten der Lebensdauerende-Bedingung zu beeinflussen.

[0061] Weiterhin kann die Verfügbarkeit durch verkürzte Stand- und Ladezeiten unter Berücksichtigung der definierten Betriebsgrenzen für jeden der Energiespeicher zur Optimierung der Nutzung der Energiespeicher der Vielzahl von Geräten optimiert werden. Weiterhin können auf Basis der Prädiktion des Alterungszustands prädiktive Wartungsintervalle bestimmt werden, um Reparaturen und größere Schäden zu vermeiden.

[0062] Es kann vorgesehen sein, dass die elektrischen Energiespeicher abhängig von dem Verlauf des prädizierten modellierten Alterungszustands betrieben werden, wobei insbesondere eine Restlebensdauer der elektrischen Energiespeicher abhängig von dem Verlauf des prädizierten modellierten Alterungszustand signalisiert wird. Weiterhin kann die Planung und Durchführung prädiktiver Inspektions- und Wartungs-Intervalls auf Basis der Alterungsprädiktion vorgesehen sein.

[0063] Weiterhin kann vorgesehen sein, dass je nach Restlebensdauer die Anzahl der verbleibenden Schnell-Lade-Zyklen erhöht oder verringert werden oder eine Anpassung der Betriebsgrenzen (Strom-Begrenzung) oder Betriebs-Strategie, z.B. im Hin-

blick auf das Thermo-Management (De-Rating) erfolgt. Weiterhin kann eine alterungsabhängige bzw. eine von einem prädizierten Alterungszustandsverlauf abhängige Anpassung der Ladestrategie erfolgen. Dazu können Schnell-Lade-Zyklen zugelassen oder blockiert werden, je nachdem, ob die Anzahl der verbleibenden Schnell-Lade-Zyklen erreicht worden ist.

[0064] Gemäß einer Ausführungsform kann das Verfahren in einer geräteexternen Zentraleinheit ausgeführt werden, wobei das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale in dem technischen Gerät ermittelt werden und an die Zentraleinheit übertragen werden. Dadurch können die Betriebsmerkmale für das datenbasierten Alterungsmodells verteilt berechnet werden und dadurch die Zentraleinheit entlastet werden. Da die Betriebsmerkmale nicht kontinuierlich in der Zentraleinheit bereitstehen müssen, können diese an die Zentraleinheit zu geeigneten Zeitpunkten übertragen werden.

[0065] Es kann vorgesehen sein, dass der Energiespeicher zum Betrieb eines Geräts, wie einem Kraftfahrzeug, einem Pedelec, einem Fluggerät, insbesondere einer Drohne, einer Werkzeugmaschine, einem Gerät der Unterhaltungselektronik, wie ein Mobiltelefon, einem autonomen Roboter und/oder einem Haushaltsgerät verwendet wird.

[0066] Gemäß einem weiteren Aspekt ist eine Vorrichtung zur Durchführung eines der obigen Verfahren vorgesehen.

Figurenliste

[0067] Ausführungsformen werden nachfolgend anhand der beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Systems zur Bereitstellung von fahrer- und fahrzeugindividuellen Betriebsgrößen zur Bestimmung eines Alterungszustands einer Fahrzeugbatterie in einer Zentraleinheit;

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines funktionalen Aufbaus eines datenbasierten Alterungszustandsmodells;

Fig. 3 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung eines Verfahrens zum Erstellen des datenbasierten Alterungszustandsmodells; und

Beschreibung von Ausführungsformen

[0068] Im Folgenden wird das erfindungsgemäße Verfahren anhand von Fahrzeugbatterien als elektrische Energiespeicher in einer Vielzahl von Kraftfahrzeugen als gleichartige Geräte beschrieben. Das Alterungszustandsmodell kann, wie nachfolgend beschrieben, in einer fahrzeugexternen Zentralein-

heit kontinuierlich basierend auf Betriebsgrößen und/oder Merkmalen der Fahrzeugbatterien aus der Fahrzeugflotte aktualisiert bzw. nachtrainiert werden. Das Alterungszustandsmodell kann in der Zentraleinheit betrieben und zur Alterungsberechnung und Alterungsprädiktion eingesetzt werden. Weiterhin kann das Alterungszustandsmodell in Summe, speziell jedoch das datenbasierte Alterungszustandsmodell im Fahrzeug zur effizienten Datenverarbeitung eingesetzt werden, sodass der Datentransfer in die Cloud optimiert durchgeführt wird.

[0069] Das obige Beispiel steht stellvertretend für eine Vielzahl von stationären oder mobilen Geräten mit netzunabhängiger Energieversorgung, wie beispielsweise Fahrzeuge (Elektrofahrzeuge, Pedelecs usw.), Anlagen, Werkzeugmaschinen, Haushaltsgeräte, IOT-Geräte und dergleichen, die über eine entsprechende Kommunikationsverbindung (z. B. LAN, Internet) mit einer geräteexternen Zentraleinheit (Cloud) in Verbindung stehen.

[0070] Fig. 1 zeigt ein System 1 zum Sammeln von Flottendaten in einer Zentraleinheit 2 zur Erstellung und zum Betrieb sowie zur Auswertung eines Alterungszustandsmodells. Das Alterungszustandsmodell dient zur Bestimmung eines Alterungszustands eines elektrischen Energiespeichers, wie z. B. einer Fahrzeugbatterie oder einer Brennstoffzelle in einem Kraftfahrzeug. Fig. 1 zeigt eine Fahrzeugflotte 3 mit mehreren Kraftfahrzeugen 4.

[0071] Eines der Kraftfahrzeuge 4 ist in Fig. 1 detaillierter dargestellt. Die Kraftfahrzeuge 4 weisen jeweils eine Fahrzeugbatterie 41 als wiederaufladbaren elektrischen Energiespeicher, einen elektrischen Antriebsmotor 42 und eine Steuereinheit 43 auf. Die Steuereinheit 43 ist mit einem Kommunikationsmodul 44 verbunden, das geeignet ist, Daten zwischen dem jeweiligen Kraftfahrzeug 4 und einer Zentraleinheit 2 (einer sogenannten Cloud) zu übertragen.

[0072] Die Kraftfahrzeuge 4 senden an die Zentraleinheit 2 die Betriebsgrößen F, die zumindest Größen angeben, welche den Alterungszustand der Fahrzeugbatterie 41 beeinflussen. Die Betriebsgrößen F können im Falle einer Fahrzeugbatterie Zeitreihen eines Batteriestroms, einer Batteriespannung, einer Batterietemperatur und eines Ladezustands (SOC: State of Charge), sowohl auf Pack-, Modul- und / oder Zellebene. Die Betriebsgrößen F werden in einem schnellen Zeitraster von 1 Hz bis 100 Hz erfasst und können in unkomprimierter und/oder komprimierter Form regelmäßig an die Zentraleinheit 2 übertragen werden.

[0073] Weiterhin können die Zeitreihen unter Ausnutzung von Kompressions-Algorithmen zwecks Minimierung des Datenverkehrs zur Zentraleinheit 2 im Abstand von mehreren Stunden bis zu mehreren

Tagen blockweise an die Zentraleinheit 2 übertragen werden.

[0074] Die Zentraleinheit 2 weist eine Datenverarbeitungseinheit 21, in der das nachfolgend beschriebene Verfahren ausgeführt werden kann, und eine Datenbank 22 zum Speichern von Datenpunkten, Modellparametern, Zuständen und dergleichen auf.

[0075] In der Zentraleinheit 2 ist ein Alterungszustandsmodell implementiert, das als hybrides oder semi-hybrides Modell datenbasiert ist. Das Alterungszustandsmodell kann regelmäßig, d. h. z.B. nach Ablauf der jeweiligen Auswertungszeitdauer, verwendet werden, um basierend auf den zeitlichen Verläufen der Betriebsgrößen (jeweils seit Inbetriebnahme der jeweiligen Fahrzeugbatterie) und daraus ermittelten Betriebsmerkmalen eine Ermittlung des momentanen Alterungszustands der betreffenden Fahrzeugbatterie 41 der zugeordneten Fahrzeugflotte vorzunehmen. Mit anderen Worten ist es möglich, basierend auf den Verläufen der Betriebsgrößen von einer der Fahrzeugbatterien 41 der Kraftfahrzeuge 4 der zugeordneten Fahrzeugflotte 3 und den Betriebsmerkmalen, die sich aus diesen Verläufen der Betriebsgrößen ergeben oder daraus bestimmt werden, einen Alterungszustand der betreffenden Fahrzeugbatterie 41 zu ermitteln.

[0076] Der Alterungszustand (SOH: State of Health) ist die Schlüsselgröße zur Angabe einer verbleibenden Batteriekapazität oder verbleibenden Batterieladung. Der Alterungszustand stellt ein Maß für die Alterung der Fahrzeugbatterie oder eines Batterie-Moduls oder einer Batterie-Zelle dar und kann als Kapazitätserhaltungsrate (Capacity Retention Rate, SOH-C) oder als Anstieg des Innenwiderstands (SOH-R) angegeben werden. Die Kapazitätserhaltungsrate SOH-C ist als Verhältnis der gemessenen momentanen Kapazität zu einer Anfangskapazität der vollständig aufgeladenen Batterie angegeben. Die relative Änderung des Innenwiderstands SOH-R steigt mit zunehmender Alterung der Batterie an.

[0077] In einer vorteilhaften Ausführungsform können die Betriebsmerkmale auch sensornah, also im jeweiligen Kraftfahrzeug 4, erzeugt werden, sodass der Datentransfer zur Zentraleinheit 2 optimiert werden kann.

[0078] Wie für die Zeitreihen können zur Übertragung Kompressions-Algorithmen zwecks Minimierung des Datenverkehrs zur Zentraleinheit 2 genutzt werden, nachdem eine Vorverarbeitung im Fahrzeug stattgefunden hat. Weiterhin kann ein ereignisgestütztes Übertragen stattfinden, sodass der Datentransfer ausgelöst wird und erfolgt, wenn z.B. eine stabile oder bekannte WLAN-Netzwerk-Verbindung identifiziert wurde.

[0079] Fig. 2 zeigt beispielhaft schematisch den funktionalen Aufbau einer Ausführungsform eines hybriden datenbasierten Alterungszustandsmodells 9, das in einer hybriden Weise aufgebaut ist. Das hybride Alterungszustandsmodell 9 umfasst ein physikalisches Alterungsmodell 5 und ein Korrekturmodell 6. Diese erhalten Betriebsgrößen F bzw. Betriebsmerkmale M eines aktuellen Auswertungszeitraums/Alterungszeitpunkts (Alter der Fahrzeugbatterie seit Inbetriebnahmezeitpunkt). Die Betriebsmerkmale M des aktuellen Auswertungszeitraums/Alterungszeitpunkts werden in einem Merkmalsextraktionsblock 8 basierend auf den Zeitreihen der Betriebsgrößen F erzeugt.

[0080] Die Betriebsgrößen F gehen als Zeitreihendaten, umfassend Temperatur und Strom, direkt in das physikalische Alterungszustandsmodell 5 ein, welches vorzugsweise als elektrochemisches Modell ausgeführt ist und entsprechende elektrochemische Zustände, wie Schichtdicken (z.B. SEI-Dicke), Änderung des zyklisierbaren Lithiums aufgrund von Anode/Kathode-Nebenreaktionen, schneller Verbrauch von Elektrolyten, langsamer Verbrauch von Elektrolyten, Verlust des Aktivmaterials in Anode, Verlust des Aktivmaterials in Kathode, etc....), mithilfe von nichtlinearen Differentialgleichungen beschreibt.

[0081] Das physikalische Alterungsmodell 5 kann einem elektrochemischen Modell der Batteriezelle und der Zellchemie entsprechen. Dieses Modell ermittelt abhängig von den Betriebsgrößen F interne physikalische Batteriezustände, um einen physikalisch basierten Alterungszustand SOH_{ph} der Dimension von mindestens eins in Form der oben genannten elektrochemischen Zustände, welche linear oder nichtlinear auf eine Kapazitätserhaltungsrate ($SOH-C$) und/oder eine Innenwiderstandanstiegsrate ($SOH-R$) abgebildet werden, um diese ($SOH-C$ und $SOH-R$) bereitzustellen. Das physikalische Alterungsmodell 5 kann mithilfe von Trainingsdatensätzen aus den Fahrzeugen 4 der Fahrzeugflotte 3 und / oder mithilfe von Labordaten parametrisiert werden.

[0082] Bei dem zugrunde liegenden physikalischen Alterungsmodell handelt es sich um ein nichtlineares, mathematisches Modell, das auf Differenzialgleichungen basiert. Ein solches Modell ist aus dem Stand der Technik bekannt und ermöglicht es, durch Auswerten der Differenzialgleichungen durch Zustandsfortschreibung basierend auf den Betriebsgrößenverläufen (seit dem Inbetriebnahmezeitpunkt, bis zu dem zu betrachteten Zeitpunkt) einen jeweiligen physikalischen Alterungszustand zu bestimmen. Das Auswerten des physikalischen Alterungsmodells des Alterungszustandsmodells mit Betriebsgrößenverläufen, insbesondere seit Lebensdauerbeginn der Gerätebatterie, führt dazu, dass sich ein interner Zustand des Gleichungssystems der physikalischen Differenzialgleichungen einstellt, der einem physika-

lischen internen Zustand der Gerätebatterie entspricht.

[0083] Die durch das elektrochemische Modell bereitgestellten Modellwerte für den physikalischen Alterungszustand SOH_{ph} sind jedoch in bestimmten Situationen ungenau, und es ist daher vorgesehen, diese mit einer Korrekturgröße k zu korrigieren. Die Korrekturgröße k wird von dem datenbasierten Korrekturmodell 6 bereitgestellt, das mithilfe von Trainingsdatensätzen aus den Fahrzeugen 4 der Fahrzeugflotte 3 und / oder mithilfe von Labordaten trainiert wird.

[0084] Für die Bestimmung eines korrigierten auszugebenden Alterungszustands SOH werden die Ausgänge SOH_{ph} , k des physikalischen Alterungsmodells 5 und des Korrekturmodells 6, welches vorzugsweise als Gauß-Prozess-Modell ausgeführt ist, miteinander beaufschlagt. Insbesondere können diese in einem Summierblock 7 addiert oder multipliziert (nicht gezeigt) werden, um den auszugebenden modellierten Alterungszustand SOH zu einem aktuellen Auswertungszeitraum bzw. Alterungszeitpunkt zu erhalten. Die Konfidenz des Gaußprozesses kann im Additions-Fall weiterhin als Konfidenz des auszugebenden korrigierten Alterungswert SOH des hybriden Modells verwendet werden.

[0085] Das Korrekturmodell 6 erhält eingangsseitig Betriebsmerkmale M , die aus den Verläufen der Betriebsgrößen F ermittelt und auch einen oder mehrere der internen elektrochemischen Zustände des Differentialgleichungssystems des physikalischen Alterungsmodells umfassen können.

[0086] Weiterhin kann das Korrekturmodell 6 eingangsseitig den aus dem physikalischen Alterungsmodell 5 erhaltenen physikalischen Alterungszustand SOH_{ph} erhalten. Die Betriebsmerkmale M des aktuellen Auswertungszeitraums werden in einem Merkmalsextraktionsblock 8 basierend auf den Zeitreihen der Betriebsgrößen F erzeugt. Zu den Betriebsmerkmalen M zählen weiterhin die inneren Zustände aus dem Zustandsvektor den elektrochemischen physikalischen Alterungsmodells 5 sowie vorteilhafterweise der physikalische Alterungszustand (SOH_{ph}).

[0087] Die Betriebsmerkmale M können beispielsweise auf den Auswertungszeitraum bezogene Merkmale und/oder akkumulierte Merkmale und/oder über die gesamte bisherige Lebensdauer ermittelte statistische Größen umfassen. Insbesondere können die Betriebsmerkmale beispielsweise umfassen: Elektrochemische Zustände, wie z.B. SEI-Schichtdicke, Änderung von zyklisierbarem Lithium aufgrund von Anoden/Kathoden-Nebenreaktionen, schnelle Aufnahme von Elektrolytlösungsmittel, langsame Aufnahme von Elektrolytlösungsmitteln, Lithiu-

mabscheidung, Verlust von aktivem Anodenmaterial und Verlust von aktivem Kathodenmaterial, Informationen zu Impedanzen bzw. den Innenwiderständen, Histogrammmerkmale, wie Temperatur über Ladezustand, Ladestrom über Temperatur und Entladestrom über Temperatur, insbesondere mehrdimensionale Histogrammdaten bezüglich der Batterietemperaturverteilung über dem Ladezustand, der Ladestromverteilung über der Temperatur und/oder der Entladestromverteilung über der Temperatur, den Stromdurchsatz in Amperestunden, die akkumulierte Gesamtladung (Ah), eine durchschnittliche Kapazitätzunahme bei einem Ladevorgang (insbesondere für Ladevorgänge, bei denen die Ladungszunahme über einem Schwellenanteil (z. B. 20 %) der gesamten Batteriekapazität liegt), die Ladekapazität sowie ein Extremwert (Maximum) der differentiellen Kapazität während eines gemessenen Ladevorgangs mit ausreichend großem Hub des Ladezustands (dQ/dU : Ladungsänderung dividiert durch Änderung der Batteriespannung) oder die akkumulierte Fahrleistung. Diese Größen werden vorzugsweise so umgerechnet, dass sie das reale Nutzungsverhalten bestmöglich charakterisieren. Die Betriebsmerkmale M können insgesamt oder nur teilweise für das nachfolgend beschriebene Verfahren verwendet werden.

[0088] Andere Ausgestaltungen des datenbasierten Alterungszustandsmodells sind ebenfalls möglich, beispielsweise kann das datenbasierte Alterungszustandsmodell als nicht-hybrides, rein datenbasiertes Modell basierend auf einem probabilistischen oder einem auf künstlicher Intelligenz basierendem Regressionsmodell, insbesondere einem Gauß-Prozess-Modell, oder einem Bayes'schen neuronalen Netz ausgebildet sein. Dieses ist trainiert, um einen modellierten Alterungszustand SOH aus einem Betriebsmerkmalspunkt, der durch aktuelle Betriebsmerkmale M des aktuellen Auswertungszeitraums/Alterungszeitpunkt bestimmt ist, bereitzustellen, wobei die Betriebsmerkmale M in einem Merkmalsextraktionsblock 8 basierend auf den Zeitreihen der Betriebsgrößen F ermittelt werden.

[0089] Für die Skalierung und die Dimensionsreduzierung der Betriebsmerkmale kann eine PCA (Principal Components Analysis) verwendet werden, um redundante linear-abhängige Information im Merkmalsraum entsprechend vor dem Trainieren des Korrekturmodells (unsupervised) zu reduzieren. Alternativ kann auch eine Kernel-PCA verwendet werden, um in der Komplexitätsreduktion der Daten auch nichtlineare Effekte abzubilden zu können. Sowohl vor der Dimensionsreduzierung und speziell danach findet eine Normalisierung des gesamten Betriebsmerkmalsraums (bzw. des Hauptkomponentenraums) statt, z. B. mit Min/Max-Scaling oder der Z-Transformation.

[0090] Die Berechnung des Alterungszustands und die Prädiktion des Alterungszustands sind daher möglich für Energiespeicher bzw. Fahrzeugbatterien mit mindestens einer elektrochemischen Einheit, z. B. einer Batterie-Zelle. Das Verfahren ist durch regel- und / oder datenbasierte Abbildung auch auf das Gesamtsystem des Energiespeichers anwendbar. Am Beispiel der Batterie kann die Alterungsprädiktion neben Zell-Ebene somit direkt auch auf Modulebene und Packebene angewandt werden.

[0091] Zum Trainieren des hybriden Alterungszustandsmodells werden Trainingsdatensätze definiert. Diese Trainingsdatensätze können in der Zentraleinheit 2 von einer Vielzahl von Fahrzeugen gesammelt werden. Während das physikalische Alterungszustandsmodell in an sich bekannter Weise durch Vermessung von Fahrzeugbatterien bzw. deren Batteriezellen parametrisiert werden kann, kann das Korrekturmodell 6 auf eine Abweichung eines tatsächlichen Alterungszustands und ein durch das physikalische Alterungszustandsmodell 5 modellierten Alterungszustand SOH_{ph} trainiert werden. Die Trainingsdatenpunkte bilden daher die Betriebsmerkmale eines Betriebsmerkmalspunktes auf die entsprechende Abweichung zwischen dem tatsächlichen Alterungszustand und dem durch das physikalische Alterungszustandsmodell modellierten Alterungszustand SOH_{ph} ab.

[0092] Die Betriebsmerkmale M und auch weitere Betriebsmerkmale, die in dem Merkmalsextraktionsblock 8 generiert werden, können zudem dem datenbasierten Korrekturmodell 6 zugeführt werden, das vorzugsweise als Gauß-Prozess-Modell ausgeführt ist. Dem datenbasierten Korrekturmodell ist vorteilhafterweise eine Reduktion des Merkmalsraums, speziell mithilfe einer Hauptkomponenten (PCA)-Transformation, vorgeschaltet. Das datenbasierte Korrekturmodell 6 dient zum Bereitstellen einer Korrekturgröße k zur Beaufschlagung des durch das datenbasierte Alterungsmodell ermittelten physikalischen Alterungszustands, um einen korrigierten Alterungszustand SOH für den betrachteten Zeitpunkt zu erhalten. Das datenbasierte Korrekturmodell 6 ist auf das Residuum des datenbasierten Alterungsmodells 5 trainiert und mit real gemessenen Alterungszuständen als Labels trainiert und validiert.

[0093] Die Konfidenz des Gauß-Prozesses kann im Additionsfall weiterhin als Konfidenz des auszugebenden korrigierten Alterungszustands des datenbasierten Alterungszustandsmodells 9 verwendet werden. Die Konfidenz des Gauß-Prozess-Modells charakterisiert somit die Modellierungsunsicherheit der Abbildung von Betriebsmerkmalspunkten.

[0094] Ferner können in dem datenbasierten Korrekturmodell 6 als Eingangsgrößen elektrochemische Zustände, die sich durch Auswerten des daten-

basierten Alterungsmodell für einen Alterungszustand ergeben, berücksichtigt werden. Elektrochemische Zustände können z.B. eine oder mehrere der folgende Größen umfassen: eine SEI-Schichtdicke, eine Änderung von zyklisierbarem Lithium aufgrund von Anoden/Kathoden-Nebenreaktionen, eine Rate der schnellen Aufnahme von Elektrolytlösungsmittel, eine Rate der langsamen Aufnahme von Elektrolytlösungsmitteln, eine Rate der Lithiumabscheidung, einen Verlust von aktivem Anodenmaterial und einen Verlust von aktivem Kathodenmaterial, sowie Informationen zu Impedanzen bzw. den Innenwiderständen.

[0095] Fig. 3 veranschaulicht anhand eines Flussdiagramms ein Verfahren zum Bereitstellen eines globalen und mindestens einen speziellen Alterungszustandsmodells für die Vorhersage und Prädiktion eines Alterungszustands einer Fahrzeugbatterie 41 eines Fahrzeugs 4 in einer Fahrzeugflotte 3. Das Verfahren wird in der Zentraleinheit 2 ausgeführt und ermöglicht es, für jede der Fahrzeugbatterien 41 ein zugeordnetes Alterungszustandsmodell bereitzustellen.

[0096] In Schritt S1 werden zunächst Betriebsgrößenverläufe der Fahrzeugbatterien kontinuierlich erfasst, wie oben beschrieben.

[0097] In Schritt S2 werden für einzelne Fahrzeuge durch Feld-Diagnosemessungen Alterungszustände der Fahrzeugbatterie 41 ermittelt. Die Zuordnung der mit aus den Betriebsgrößenverläufen der betreffenden Fahrzeugbatterie 41 ermittelten Betriebsmerkmale (siehe oben) zu dem gemessenen Alterungszustand stellt einen Trainingsdatensatz für die zu erstellenden Alterungszustandsmodelle dar. Die Betriebsmerkmale eines Energiespeichers bezogen auf einen kalendarischen Alterungszustand stellt einen Betriebsmerkmalspunkt des Energiespeichers dar. Durch Messen eines Alterungszustands eines Energiespeichers können sich für diesen mehrere Trainingsdatensätze zu verschiedenen kalendarischen Alterungszuständen ergeben.

[0098] In Schritt S3 werden basierend auf den gesamten zur Verfügung stehenden Trainingsdatensätzen ein globales Alterungszustandsmodell trainiert, das wie oben beschrieben als rein datenbasiertes oder als hybrides Alterungszustandsmodell ausgebildet sein kann.

[0099] In Schritt S4 wird das globale Alterungszustandsmodell analysiert und Bereiche hoher Unsicherheit der Modellvorhersage bzw. Bereiche niedriger Konfidenz ermittelt. Die Bereiche niedriger Konfidenz können beispielsweise basierend auf einer Konfidenzangabe, die bei probabilistischen Regressionsmodellen für jeden Auswertungspunkt ermittelbar ist, insbesondere durch einen Schwell-

wertvergleich mit einem vorgegebenen Konfidenzschwellenwert bestimmt werden. Beispielsweise können als Bereiche hoher Unsicherheit diejenigen Betriebsmerkmalsbereiche identifiziert werden, bei denen ein Konfidenzkriterium erfüllt ist, wie z.B. die Unsicherheit des Gaußprozesses unterschreitet bei 90% Konfidenz einen Grenzwert, z.B. 0.5 % SOHC.

[0100] Zum Auffinden der Betriebsmerkmalsbereiche kann ein fein diskretisiertes Feature-Screening durchgeführt werden, wobei vom minimal bekannten Wert jedes Betriebsmerkmals bis zum maximal bekannten Wert des Betriebsmerkmals das Betriebsmerkmal variiert wird. Die entsprechenden Modellauswertungen des globalen Alterungszustandsmodells werden nun hinsichtlich ihrer Konfidenzwerte ausgewertet. Die Bereiche niedriger Konfidenz ergeben sich als Bereiche eines oder mehrerer Betriebsmerkmale, in denen der Konfidenzschwellenwert kontinuierlich niedriger ist als der vorgegebene Konfidenzschwellenwert. Vorteilhafterweise wird ein Clustering-Verfahren durchgeführt, um repräsentative Cluster zu ermitteln, welche zumindest in der Untermenge, speziell in den Rändern, eine dünn besetzte Datensituation aufweist.

[0101] In einem nachfolgenden Schritt S5 wird für jeden der identifizierten Cluster-Bereiche ein spezielles Alterungszustandsmodell ermittelt. Dazu werden Trainingsdatensätze, deren Betriebsmerkmalspunkte in dem identifizierten Cluster-Bereich liegen, ausgewählt und darauf ein spezielles datenbasiertes Alterungszustandsmodell, das als hybrides Alterungsmodell oder reines datenbasiertes Alterungszustandsmodell in Form eines probabilistischen Regressionsmodells ausgebildet sein kann, trainiert.

[0102] Alternativ kann ein spezielles Alterungszustandsmodell für jede der Fahrzeugbatterien, für die die Konfidenz nach Auswertung durch das globale Alterungszustandsmodell unter einem Schwellenbetrag liegt und somit eine hohe Schätzunsicherheit aufweist, trainiert werden, indem Trainingsdatensätze mit hoher Ähnlichkeit zu dem für die jeweilige Fahrzeugbatterie vorliegenden Trainingsdatensatz bestimmt werden, was beispielsweise durch die euklidische Distanz bezüglich des mehrdimensionalen Betriebsmerkmalsraum bestimmt werden kann. Dabei gelten Betriebsmerkmalspunkte als ähnlich, wenn sie zu dem Betriebsmerkmalspunkt der jeweiligen Fahrzeugbatterie einen euklidischen Abstand von weniger als einen vorgegebenen Abstandsschwellenwert aufweisen.

[0103] Die ähnlichen Betriebsmerkmalspunkte können auf Betriebsmerkmalen des Betriebsmerkmalsraums basieren, wie er auch eingangsseitig zur Auswertung durch das datenbasierte Alterungszustandsmodell bzw. Korrekturmodell des Alterungszustandsmodells verwendet wird. Altern-

tiv kann der für die Bestimmung der Ähnlichkeit verwendete Betriebsmerkmalsraum auch ein reduzierter Betriebsmerkmalsraum sein, der lediglich einige charakterisierende Betriebsmerkmale, wie Ah-Durchsatz, $\max(dq/du)$, Temperatur und dergleichen berücksichtigt.

[0104] Sind die Trainingsdatensätze für das spezielles Alterungszustandsmodell bestimmt, wird dieses entsprechend an sich bekannter Weise trainiert.

[0105] Alternativ kann in einem alternativen Schritt S4 das globale Alterungszustandsmodell analysiert werden und Bereiche geringer Unsicherheit der Modellvorhersage bzw. Bereiche hoher Konfidenz ermittelt. Die Bereiche hoher Konfidenz können beispielsweise basierend auf einer Konfidenzangabe, die bei probabilistischen Regressionsmodellen für jeden Auswertungspunkt ermittelbar ist, insbesondere durch einen Schwellwertvergleich mit einem vorgegebenen Konfidenzschwellenwert bestimmt werden. Beispielsweise können als Bereiche niedriger Unsicherheit diejenigen Betriebsmerkmalsbereiche identifiziert werden, bei denen ein Konfidenzkriterium erfüllt ist, wie z.B. die 90% Konfidenz des Gaußprozesses unterschreitet einen Grenzwert, z.B. 0.5 % SOHC.

[0106] Zum Auffinden der Betriebsmerkmalsbereiche kann wie oben beschrieben ein fein diskretisiertes Feature-Screening durchgeführt werden, wobei vom minimal bekannten Wert jedes Betriebsmerkmals bis zum maximal bekannten Wert des Betriebsmerkmals das Betriebsmerkmal variiert wird. Die entsprechenden Modellauswertungen des globalen Alterungszustandsmodells werden nun hinsichtlich ihrer Konfidenzwerte ausgewertet. Die Bereiche hoher Konfidenz ergeben sich als Bereiche eines oder mehrerer Betriebsmerkmale, in denen der Konfidenzschwellenwert kontinuierlich höher ist als der vorgegebene entsprechende Konfidenzschwellenwert.

[0107] In einem nachfolgenden alternativen Schritt S5 kann entsprechend für jeden der identifizierten Bereiche niedriger Unsicherheit (hoher Konfidenz) ein spezielles Alterungszustandsmodell ermittelt. Dazu werden Trainingsdatensätze, deren Betriebsmerkmalspunkte in dem identifizierten Merkmalsbereich liegen, ausgewählt und darauf ein spezielles datenbasiertes Alterungszustandsmodell, das als hybrides Alterungsmodell oder reines datenbasiertes Alterungszustandsmodell in Form eines probabilistischen Regressionsmodells ausgebildet sein kann, trainiert.

[0108] Alternativ kann ein spezielles Alterungszustandsmodell für jede der Fahrzeugbatterien, für die der Konfidenzwert nach Auswertung durch das globale Alterungszustandsmodell über einem vorgege-

benen Konfidenzschwellenbetrag liegt und somit eine geringe Schätzunsicherheit aufweist, trainiert werden, indem Trainingsdatensätze mit hoher Ähnlichkeit zu dem für die jeweilige Fahrzeugbatterie vorliegenden Trainingsdatensatz bestimmt werden, was beispielsweise durch die euklidische Distanz bezüglich des mehrdimensionalen Betriebsmerkmalsraum bestimmt werden kann. Dabei gelten Betriebsmerkmalspunkte als ähnlich, wenn sie zu dem Betriebsmerkmalspunkt der jeweiligen Fahrzeugbatterie 41 einen euklidischen Abstand von weniger als einen vorgegebenen Abstandsschwellenwert aufweisen.

[0109] In einem nachfolgenden Schritt S7 wird jeder der Fahrzeugbatterien 41 ein entsprechendes globales oder spezielles Alterungszustandsmodell zugeordnet. Fahrzeugbatterien 41, deren aktueller Zustand durch einen Betriebsmerkmalspunkt charakterisiert wird, für den eine Konfidenz gemäß der Auswertung durch das globale Alterungszustandsmodell über dem vorgegebenen Konfidenzschwellenwert vorliegt, wird das globale Alterungszustandsmodell zugeordnet. Für die übrigen wird durch Auswertung des entsprechenden Betriebsmerkmalspunkts abhängig von der sich ergebenden Konfidenz des globalen oder des speziellen Alterungszustandsmodell nach der Höhe des Konfidenzwerts entschieden, welches Alterungszustandsmodell der betreffenden Fahrzeugbatterie zugeordnet oder genutzt wird.

[0110] Alternativ können die Konfidenzwerte zur Festlegung einer Zuordnung auch basierend auf prädiagnostischen Alterungszuständen bestimmt sein.

[0111] Somit wird für jede der Fahrzeugbatterien 41 dasjenige Alterungszustandsmodell, das globale oder das spezielle Alterungszustandsmodell ausgewählt und/oder genutzt, für das eine Bestimmung des Alterungszustands eine bessere Konfidenz, d. h. eine geringere Modellierungsunsicherheit aufweist. Somit wird jeder der Fahrzeugbatterien 41 ein Alterungszustandsmodell entsprechend der Vorhersageunsicherheit bzw. des Konfidenzwerts der Modellvorhersage des Alterungszustands abhängig von dem entsprechenden Betriebsmerkmalspunkt der Fahrzeugbatterie 41 bereitgestellt.

[0112] In Fig. 4 sind beispielhaft Alterungszustandsverläufe SOH1...SOH6 von verschiedenen Fahrzeugbatterien über einer Zeit (in Tagen) aufgezeigt, denen jeweils unterschiedliche Alterungszustandsmodelle zugeordnet werden. Während die typischen Lastverläufe entsprechenden Alterungszustandsverläufe SOH2-SOH5 das globale Alterungszustandsmodell MG zugeordnet werden, werden den Alterungszustandsverläufen SOH1 und SOH6 jeweils spezielle Alterungszustandsmodelle MS1, MS2 zugeordnet.

[0113] Die Label-Generierung für die Trainingsdatensätze des Schritts S2 kann durch Felddiagnosemessungen erfolgen. Dazu werden bestimmte Fahrzeug ausgewählt, deren Fahrzeugbatterie vermessen werden soll. Bei Verwendung von probabilistischen Regressionsmodellen können mithilfe eines Active Learning-Verfahrens diejenigen Fahrzeuge identifiziert werden, bei denen eine Felddiagnosemessung vorzugsweise ausgeführt werden soll. Diese Fahrzeuge werden so ausgewählt, dass eine Vermessung der entsprechenden Fahrzeugbatterie 41 zu einem Trainingsdatensatz führt, der das zugrundeliegende Alterungszustandsmodell bestmöglich weiterbildet. Insbesondere soll der betreffende Trainingsdatensatz die Information über eine Vorhersage des Alterungszustands maximal möglich optimieren.

[0114] Das Verfahren der Schritte S1 bis S6 kann regelmäßig durchgeführt werden, um die Betriebsmerkmalsbereiche niedriger Konfidenz im globalen Alterungszustandsmodell zu schließen, die Zahl der benötigten speziellen Alterungszustandsmodelle sukzessive zu verringern und durch eine bessere Datensituation im Laufe des Flottenbetriebs bessere und relevantere Cluster von Betriebsmerkmalspunkten zu erhalten. Idealerweise können im Laufe des Flottenbetriebs Cluster fusioniert werden, indem systematisch Merkmalslücken geschlossen werden und schon früh im Flottenbetrieb eine hinreichend hohe Datenabdeckung realisiert wird.

[0115] In einem nachfolgenden Schritt S8 können beispielsweise die Fahrzeuge entsprechend ihres Alterungszustands und ihres zugeordneten globalen oder speziellen Alterungszustandsmodells verschiedenen Nutzungsaufgaben/Fahraufgaben zugewiesen werden, abhängig von einem mithilfe des zugeordneten Alterungszustandsmodells prädizierten Alterungszustand, und insbesondere abhängig von einem Alterungsstress, dem die jeweilige Fahrzeugbatterie durch die Zuordnung einer der Nutzungsaufgaben ausgesetzt ist. Der Alterungsstress entspricht einer durch die Durchführung der Nutzungsaufgabe in dem betreffenden Fahrzeug bewirkte Änderung des Alterungszustands.

[0116] Die Fahrzeuge können für jede Nutzungsaufgabe beispielsweise in einer Liste nach Alterungsstress sortiert werden. Weiterhin werden basierend auf der Modellauswahl und einer Bestimmung einer Restlebensdauer die Fahrzeugbatterien entsprechend der verbleibenden Restlebensdauer sortiert.

[0117] Basierend auf den so erstellten Listen erfolgt nun eine Zuordnung der Fahrzeugbatterien zu den Nutzungsaufgaben. Beispielsweise können Fahrzeuge mit einem hohen Alterungszustand der Fahrzeugbatterie, d. h. einer geringen Alterung, einer anspruchsvollen Nutzungsaufgabe, d. h. einer Nut-

zungsart mit einer höheren Belastung zugeordnet werden, und Fahrzeuge mit einem niedrigen Alterungszustand, d. h. einer hohen Alterung, einer Nutzungsaufgabe mit einer geringeren Belastung zugeordnet werden, um eine gleichmäßige Alterung aller Fahrzeug der Fahrzeugflotte zu ermöglichen. Dies kann für einen Flottenbetreiber, wie z.B. eine Fahrzeugvermietung wünschenswert sein.

[0118] Auch andere Zielsetzungen bei der Zuordnung der Fahrzeuge zu den Nutzungsaufgaben können verfolgt werden. Beispielsweise können unter Berücksichtigung weiterer Belastungsmerkmale der Fahrzeugbatterie, wie z.B. kalendarisches Alter oder Kilometerleistung, Ah-Durchsatz und dergleichen, zusammen mit dem modellierten Alterungszustand ein Belastungsmerkmalsraum erstellt werden, wobei die Zuordnung der Nutzungsaufgabe zu den Fahrzeugen so erfolgt, dass die Verteilung im Belastungsmerkmalsraum möglichst gleichmäßig erfolgt, um so die Fahrzeugbatterien in Zustände zu bringen, in denen durch eine Feldmessung des Alterungszustands eine vorteilhafte Verbesserung des globalen Alterungszustandsmodells nach einem Neutraining erreicht wird.

[0119] Das Alterungszustandsmodell kann alternativ oder zusätzlich auch zur Bestimmung von Betriebsgrenzen für maximale Stromflüsse oder Derating-Grenzen benutzt werden, um die Alterung der Fahrzeugbatterie zu reduzieren und den verbleibenden Alterungszustand nach Ablauf einer vorbestimmten Betriebsdauer zu beeinflussen.

Patentansprüche

1. Computerimplementiertes Verfahren zum jeweiligen Bereitstellen eines globalen und mindestens eines speziellen Alterungszustandsmodells (9) zum Bestimmen eines modellierten Alterungszustands (SOH) für eine Vielzahl von elektrischen Energiespeichern (41) mit mindestens einer elektrochemischen Einheit, insbesondere einer Batteriezelle, mit folgenden Schritten:

- Bereitstellen (S2) von Trainingsdatensätzen, die jeweils einen Betriebsmerkmalspunkt, der durch ein oder mehrere aus Betriebsgrößenverläufen abgeleitete Betriebsmerkmale der Energiespeicher und eine entsprechende kalendarische Altersangabe bestimmt ist, einem Alterungszustand zuordnen, wobei das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale eines Betriebsmerkmalspunkts eine Belastung des jeweiligen Energiespeichers (41) angeben;

- Trainieren (S3) eines datenbasierten oder hybriden globalen Alterungszustandsmodells (MG), das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, mit den Trainingsdatensätzen, so dass das globale Alterungszustandsmodell ausgebildet wird, um die

Betriebsgrößenverläufe und/oder das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale einem entsprechenden Alterungszustand zuzuordnen,

- Trainieren (S5) mindestens eines datenbasierten oder hybriden speziellen Alterungszustandsmodells (MS1, MS2), das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, mit einem ausgewählten Teil der Trainingsdatensätze, so dass das mindestens eine spezielle Alterungszustandsmodell (MS1, MS2) ausgebildet wird, um die Betriebsgrößenverläufe und/oder das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale einem entsprechenden Alterungszustand zuzuordnen,
- Bereitstellen (S7) des globalen und des mindestens einen speziellen Alterungszustandsmodells (MG, MS1, MS2).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Teil der Trainingsdatensätze ausgewählt wird, wenn deren Betriebsmerkmalspunkte und der zugehörige Alterungszustand einen Betriebsmerkmalsbereich bilden, bei dem die Modellvorhersage mit dem globalen Alterungszustandsmodell (MG) eine niedrige Konfidenz unter einem vorgegebenen Konfidenzschwellenwert oder eine hohe Konfidenz über einem vorgegebenen Konfidenzschwellenwert aufweist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei der Teil der Trainingsdatensätze zum Trainieren des speziellen Alterungszustandsmodells ausgewählt wird, indem ein Clusteringverfahren auf die Betriebsmerkmalspunkte und zugeordneten Alterungszustände der Trainingsdatensätze durchgeführt wird, um mindestens einen Betriebsmerkmalsbereich mit bezüglich des globalen Alterungszustandsmodells (MG) niedriger Konfidenz zu ermitteln, wobei die Trainingsdatensätze, die in dem mindestens einen Betriebsmerkmalsbereich mit der niedrigen Konfidenz liegen, als Teil der Trainingsdatensätze ausgewählt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, wobei der Teil der Trainingsdatensätze zum Trainieren des speziellen Alterungszustandsmodells ausgewählt wird, indem ein Clusteringverfahren auf die Betriebsmerkmalspunkte und zugeordneten Alterungszustände der Trainingsdatensätze durchgeführt wird, um mindestens einen Betriebsmerkmalsbereich mit bezüglich des globalen Alterungszustandsmodells (MG) hoher Konfidenz zu ermitteln, wobei die Trainingsdatensätze, die in dem mindestens einen Betriebsmerkmalsbereich mit der hohen Konfidenz liegen, als Teil der Trainingsdatensätze ausgewählt werden.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei der Teil der Trainingsdatensätze zum Trainieren des speziellen Alterungszustandsmodells ausgewählt wird, indem mindestens ein Betriebsmerkmalsbereich als Cluster der Betriebsmerkmalspunkte insbesondere mit

einem K-Means-Clustering-Verfahren und einer Elbow-Methode bestimmt wird, wobei die Betriebsmerkmalspunkte des mindestens einen Betriebsmerkmalsbereichs eine niedrige Konfidenz im globalen Alterungszustandsmodell und/oder eine dünne Datenbesetzung aufweist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei das Trainieren des datenbasierten oder hybriden globalen Alterungszustandsmodells (MG) regelmäßig oder zu vorgegebenen Zeitpunkten wiederholt durchgeführt wird und jeweils anschließend das Trainieren des mindestens einen datenbasierten oder hybriden speziellen Alterungszustandsmodells (MS1, MS2) durchgeführt wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale mindestens eines der folgenden Merkmale umfassen:

- mindestens eine aus Histogrammdaten ermittelte statistische Größe, insbesondere ein Mittelwert, ein Median, Minimum, Maximum, Momente der Verteilung und/oder eine Standardabweichung, oder ein histogrammbasiertes Merkmal, das insbesondere aus kumulativen Lastpunkten abgeleitet ist und das mithilfe einer Penalty-Funktion hinsichtlich der Degradations-Schwere bewertet ist, wobei die Histogrammdaten aus Verläufen von Betriebsgrößen des Energiespeichers (41) erstellt werden und insbesondere ein Histogramm bezüglich des Stroms über der Temperatur und dem Ladezustand des Energiespeichers (41), ein Histogramm der Temperatur über dem Ladezustand des Energiespeichers (41), ein Histogramm eines Ladestroms über einer Temperatur des Energiespeichers und ein Histogramm eines Entladestroms über der Temperatur des Energiespeichers (41) umfassen,
- eine akkumulierte Gesamtladung des Energiespeichers (41),
- die Ladekapazität des Energiespeichers (41), und
- ein lokaler Extremwert der spektralen Kurtosis, ausgewertet auf einem Ladevorgang für Strom oder Spannungssignal;
- ein oder mehrere Koeffizienten einer Wavelet-Transformation, ausgewertet auf einem Ladevorgang für ein Strom oder ein Spannungssignal oder ein transformierter Spektralwert, zugeordnet zu einem definierten Frequenzband;
- Ein oder mehrere Koeffizienten der Fourier-Transformation, ausgewertet auf einem Ladevorgang für ein Strom- oder Spannungssignal oder transformierter Spektralwert, zugeordnet zu einem definierten Frequenzband;
- ein Extremwert der geglätteten, differentiellen Kapazität während eines gemessenen Ladevorgangs.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei das Verfahren in einer geräteexternen Zent-

raleinheit (2) ausgeführt wird, wobei das eine oder die mehreren Betriebsmerkmale (M) in dem technischen Gerät ermittelt werden und an die geräteexterne Zentraleinheit (2) übertragen werden.

9. Verfahren zur Bestimmung von Alterungszuständen für Energiespeicher (41) mithilfe eines globalen und mindestens eines speziellen Alterungszustandsmodells (MG, MS1, MS2), mit folgenden Schritten:

- Bestimmen eines Betriebsmerkmalspunkt eines jeweiligen Energiespeichers (41), der durch ein oder mehrere aus Betriebsgrößenverläufen abgeleitete Betriebsmerkmale der Energiespeicher (41) und eine entsprechende kalendarische Altersangabe bestimmt ist,
- Jeweiliges Ermitteln eines Alterungszustands für den entsprechenden Energiespeicher (41) und eines zugeordneten Konfidenzwerts mithilfe eines datenbasierten oder hybriden globalen Alterungszustandsmodells (MG), das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, und eines datenbasierten oder hybriden speziellen Alterungszustandsmodells (MS1, MS2), das zumindest teilweise als probabilistisches datenbasiertes Regressionsmodell ausgebildet ist, und die mithilfe eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8 erstellt sind,
- Ermitteln desjenigen Alterungszustands als den zu bestimmenden Alterungszustand für den entsprechenden Energiespeicher (41), dessen zugeordneter Konfidenzwert höher ist.

10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei Nutzungsaufgaben jeweils einem der Vielzahl von Energiespeichern (41) abhängig davon zugeordnet werden, welche Alterung, insbesondere welche Alterungszustandsänderung, durch Ausführen der betreffenden Nutzungsaufgabe in dem Energiespeicher (41) gemäß dem jeweils zugeordneten globalen oder speziellen Alterungszustandsmodell (MG, MS1, MS2) bewirkt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 10, wobei die Nutzungsaufgaben den Energiespeichern (41) so zugeordnet werden, dass die Verteilung der Alterungszustände aller Energiespeicher (41) eine möglichst geringe Streuung aufweist oder dass die Verteilung der Betriebsmerkmalspunkte eine möglichst große Streuung aufweist.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, wobei mithilfe einer modellprädiktiven Regelung mindestens einer der Vielzahl der Energiespeicher (41) ausgewählt wird und durch Änderung seiner Betriebsart so betrieben wird, dass der den Belastungszustand des betreffenden Energiespeichers (41) charakterisierender Betriebsmerkmalspunkt in Richtung eines des einen oder der mehreren Betriebsmerkmalsbereiche geändert wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei der Energiespeicher (41) zum Betrieb eines Geräts, wie einem Kraftfahrzeug, einem Pedelec, einem Fluggerät, insbesondere einer Drohne, einer Werkzeugmaschine, einem Gerät der Unterhaltungselektronik, wie ein Mobiltelefon, einem autonomen Roboter und/oder einem Haushaltsgerät verwendet wird.

14. Vorrichtung zur Durchführung eines der Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13.

15. Computerprogrammprodukt umfassend Befehle, die bei der Ausführung des Programms durch mindestens eine Datenverarbeitungseinrichtung diese veranlassen, die Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 auszuführen.

16. Maschinenlesbares Speichermedium, umfassend Befehle, die bei der Ausführung durch mindestens eine Datenverarbeitungseinrichtung diese veranlassen, die Schritte des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 auszuführen.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

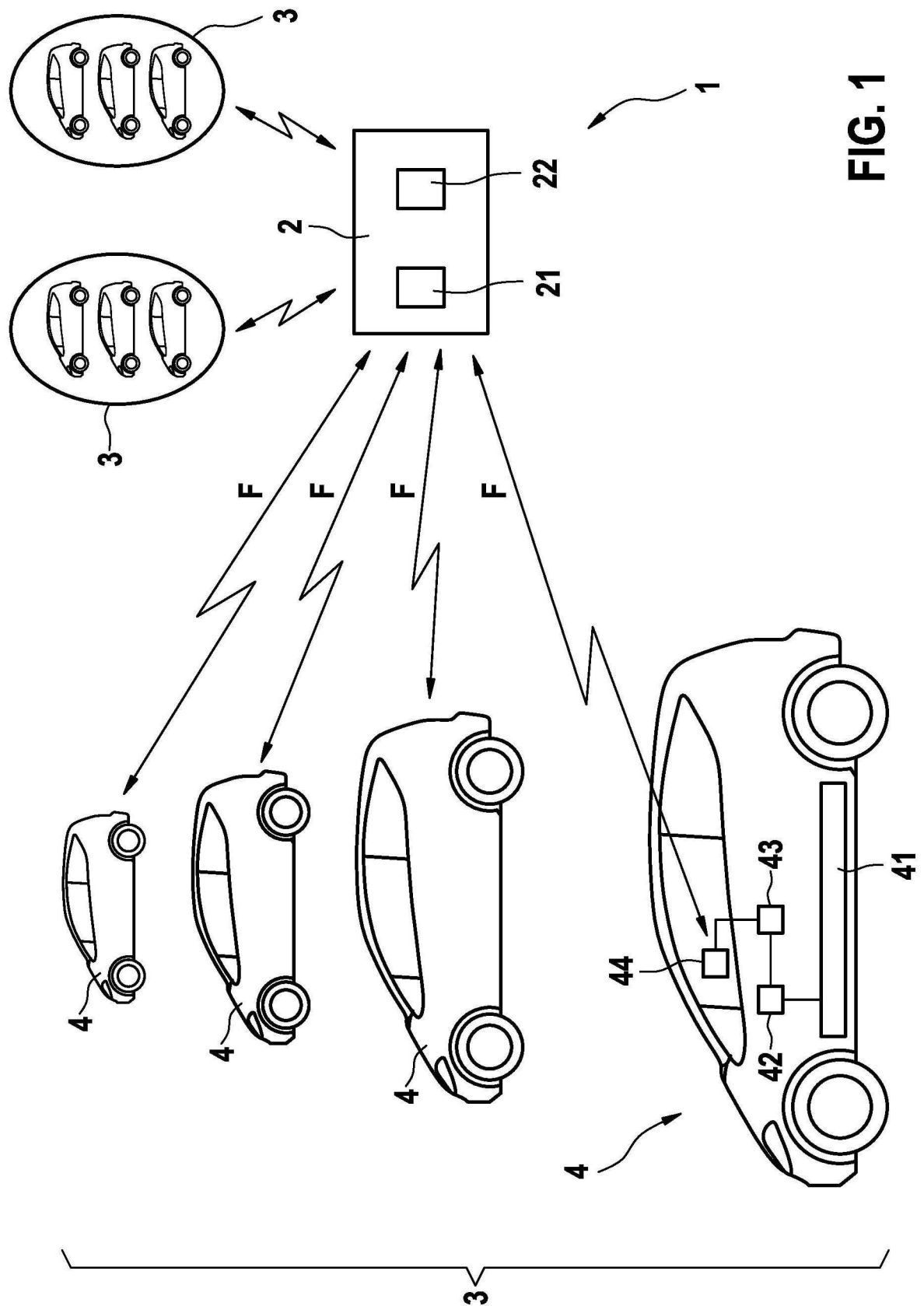


FIG. 1

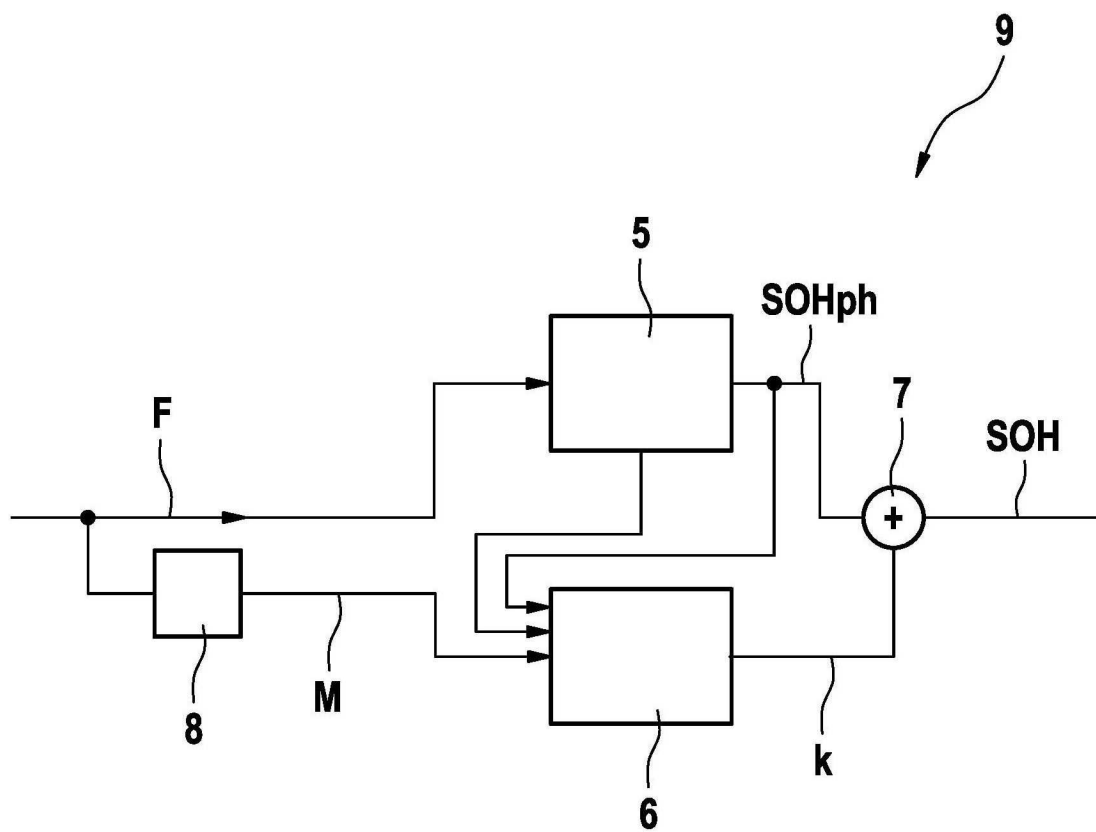


FIG. 2

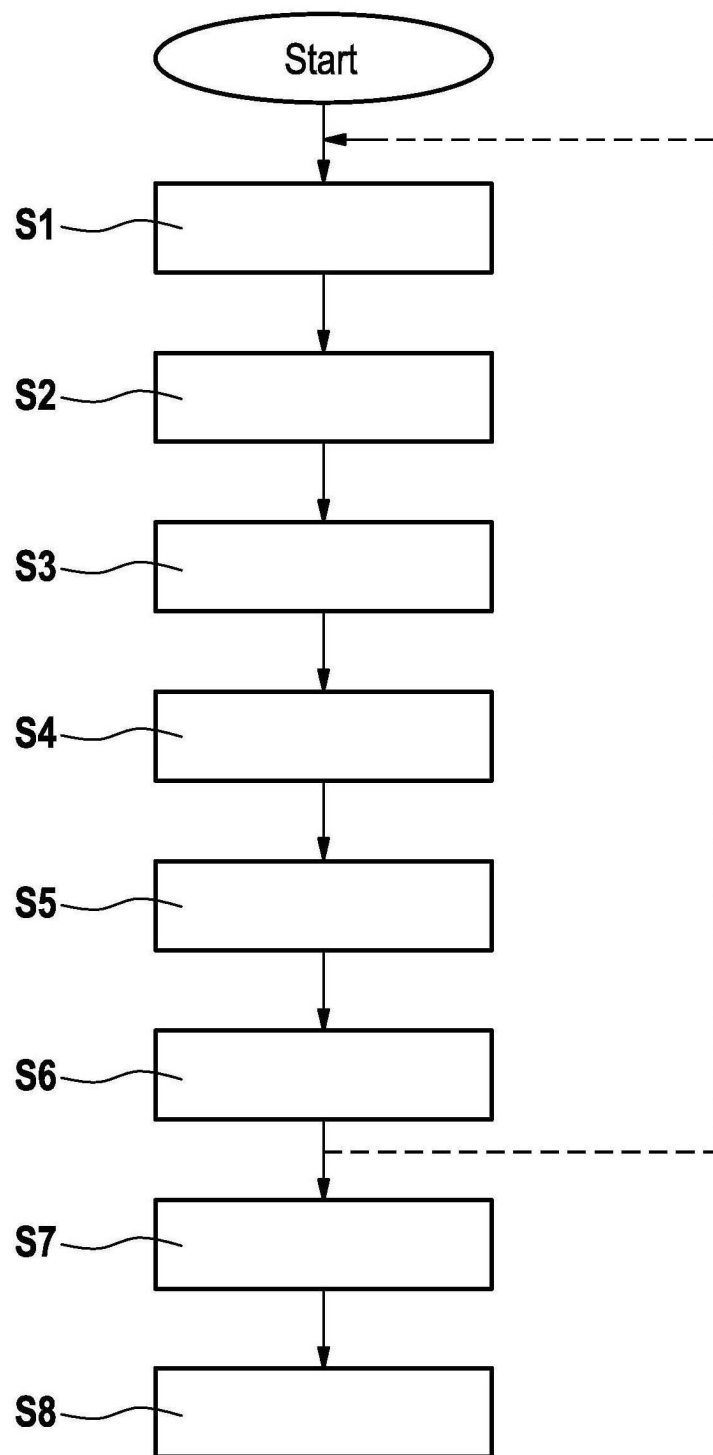


FIG. 3

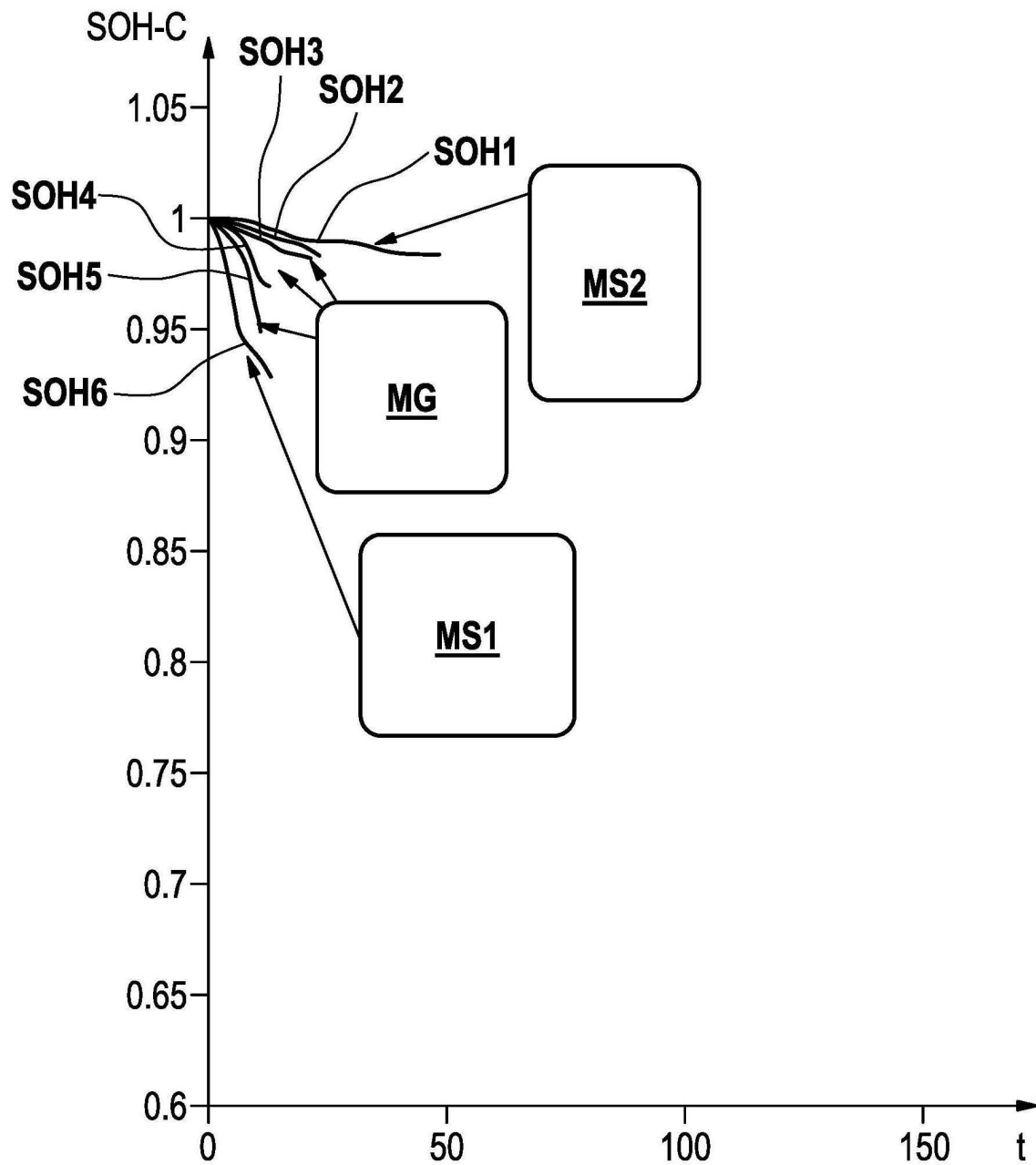


FIG. 4