

**Titel: Vorhersage der Lebensdauer von Akkumulatoren****Autor/en: Trong Tran****Unternehmenseinheit: Diehl Aerospace GmbH**

---

**Beschreibung:**

Bei dem vorliegenden technischen Lösungsvorschlag handelt es sich um ein Verfahren bzw. einen Algorithmus zur Vorhersage der Lebensdauer von Akkumulatoren.

**Motivation**

Die Bedeutung elektrischer Energiespeicher stieg in den letzten Jahren rasant an. Dies resultiert aus der steigenden Nachfrage in verschiedensten Anwendungsgebieten. Dazu zählen zum Beispiel die Speicherung von Strom aus regenerativen Energiequellen, die Entwicklung immer leistungsfähigerer, tragbarer Geräte und die Forschungen im Bereich von Elektro-Fahrzeugen. Dabei erfährt auch der vor fast 200 Jahren erfundene Akkumulator - im Folgenden auch kurz "Akku" genannt - einen großen Entwicklungsschub. Einer der bekanntesten, und auch technisch interessantesten Typen dieser Ladungsspeicher ist ein auf Lithium basierender Akkumulator. Dieser zeichnet sich durch einen hohen Wirkungsgrad, eine hohe Energiedichte und eine kurze Ladezeit aus. Leider weisen diese Ladungsspeicher nicht nur Vorteile auf: Eine ständige Überwachung von Spannung und Strom ist nötig, damit es zu keiner Über- oder Tiefentladung kommt, durch die einzelne Zellen zerstört werden können. Bei falschem Umgang mit dem Ladungsspeicher kann es durch dessen hohe Brennbarkeit zur Gefährdung der Umwelt kommen. Auch die Alterung der Zellen stellt ein Problem dar.

Um diese Schwierigkeiten in den Griff zu bekommen, produzieren viele Firmen Lademanagement-Systeme für Lithium-Akkumulatoren, die Strom, Spannung, Temperatur usw. messen und im Notfall den Akkumulator abschalten können. Ein Produkt dieser Art ist der IC „bq20z65“ der Firma Texas Instruments (TI). Dabei handelt es sich um ein komplettes Akkumulator-Managementsystem, das zusätzlich zu den oben genannten Größen den

Innenwiderstand, die vorhandene Kapazität, die verbleibende Kapazität und vieles mehr am betreffenden Akkumulator messen bzw. berechnen kann. Zusammen mit dem eigentlichen Akkumulator entsteht somit ein komplettes Akkumulator-„Pack“.

In der Luftfahrtbranche werden zur Notstromversorgung von Flugzeugen ebenfalls Lithium-Ionen-Akkumulator-Packs eingesetzt. Dazu stellt die Firma DIEHL Aerospace sogenannte „Emergency Power Supply Units“ (EPSU) her. Sie haben die Aufgabe, im Notfall Energie für die Notbeleuchtung im Flugzeug zu liefern. Laut Vorgaben muss die Versorgung für 12 Minuten gewährleistet werden, weshalb der Akkumulator eine minimale Kapazität nicht unterschreiten darf. Zudem ist gefordert, dass während dieser Zeitdauer vom Akkumulator eine Leistung von 72W abgegeben werden muss, womit auch Höchstgrenzen für einen erlaubten Innenwiderstand des Akkumulators vorhanden sind. Damit die genannten Vorgaben erfüllt werden, müssen derzeit alle 6 Monate sämtliche betreffende Akkus eines Flugzeugs von Wartungspersonal ausgebaut und überprüft werden. Nach 36 Monaten wird der Akkumulator vorsorglich ausgewechselt und entsorgt.

Dieses Verfahren bringt offensichtlich einen sehr hohen Akkuverschleiß mit sich. Deshalb strebt DIEHL Aerospace im Rahmen des Projekts CleanSky ein Verfahren an, das den Lebensdauer-Zustand eines Akkumulators vorhersagen kann. Somit wird es möglich, die Akkumulatoren nur nach tatsächlichem Bedarf und nicht nach starren Intervallen auszuwechseln. Hierdurch werden Kosten für Wartung, Neugeräte und Entsorgung der Altgeräte eingespart.

Um eine Vorhersage für den Lebensdauer-Zustand eines Akkumulators erstellen zu können, ist es nötig einen Algorithmus zu entwickeln, der aus vorhandenen Daten zukünftige Ereignisse voraussagen kann.

## **Der Algorithmus**

Es soll eine Voraussage getroffen werden, wie viele Auf-und Entladezyklen bei einem Akkumulator - hier stellvertretend auch für ein Akkumulator-Pack - verbleiben, bis dieser die oben genannten Vorgaben nicht mehr erfüllt und getauscht werden muss. Hierzu muss ein Algorithmus implementiert werden, welcher die vermutlich verbleibenden Restzyklen möglichst genau bestimmen kann bzw. angeben kann, in welchem der Zyklen der Akku voraussichtlich ausfällt. Der vorgestellte Algorithmus baut auf jeweiligen Messungen des Innenwiderstandes  $R_i$  des Akkumulators auf, da sich bei steigendem Innenwiderstandes die verbleibende Rest-Zyklenzahl vermindert.

Die Berechnungen des Algorithmus können in mehrere Schritte aufgeteilt werden:

## 1.) Berechnung der Referenzsteigung $m_{ref}$ des Innenwiderstandes $R_i$

Im Folgenden werden jeweilige Werte- bzw. Kurvenverläufe des Innenwiderstands  $R_i$  des Akkumulators über dessen Zyklenzahl  $n$  betrachtet. Ein bestimmter Zyklus ist dabei immer dann vollständig durchlaufen, wenn der Akkumulator einmal zu 100% geladen und wieder zu 100% entladen wurde. Eine tatsächliche derartige Ladung und Entladung kommt in der Praxis kaum vor. In der Regel wird der Akku zu einem Teil geladen und dann wieder zu einem Teil entladen. Für das vorliegende Verfahren werden daher tatsächliche nacheinander auftretende Teil-Ladungen und Teil-Entladungen aufsummiert. Ein Zyklus gilt dann als beendet, wenn die Summe der Teil-Auf- und -Entladungen 100% erreicht. Wird der Akkumulator z. B. in vier aufeinanderfolgenden tatsächlichen Teil-Zyklen um jeweils 20%, 30%, 10% und 40% geladen und wieder entladen, so ergeben sich als Summe 100%, so dass die vier tatsächlichen Teil-Zyklen als ein "voller" bzw. "nomineller" Zyklus der Zyklenzahl  $n$  gewertet werden.

Eine Steigung  $m$  bezeichnet im Folgenden stets eine Änderung  $\Delta R_i$  des Innenwiderstands  $R_i$  über einer Änderung  $\Delta n$  der Zyklenzahl  $n$ , also  $m = \Delta R_i / \Delta n$ .

Um die Referenzsteigung  $m_{ref}$  zu berechnen, werden folgende spezifische Daten des Akkumulators benötigt:

- Innenwiderstand beim ersten Zyklus  $n=0$ :  $R_i(0)$
- Maximaler erlaubter Innenwiderstand  $R_i$ , nach dessen Überschreiten der Akku nicht mehr betrieben werden darf, d. h. ausfällt:  $R_i(n_{max})$
- Voraussichtliche maximale Anzahl von Zyklen, nach denen der Akku den erlaubten Innenwiderstand  $R_i(n_{max})$  erreicht bzw. überschreitet:  $n_{max}$

Der Wert  $R_i(0)$  wird als Innenwiderstand nach Beendigung des ersten ( $n=0$ ) Lade- und Entladezyklus nach dessen Herstellung bzw. Inbetriebnahme gemessen. Der Wert  $R_i(n_{max})$  ergibt sich aus dem Verwendungszweck des Akkumulators bzw. aus dem Systemdesign des Systems, in dem der Akkumulator eingesetzt wird. Der Wert ist insbesondere durch die elektrische Schaltung, die der Akkumulator zu speisen hat, gegeben. Der Wert  $R_i(n_{max})$  ist dabei derjenige Wert des Innenwiderstandes des Akkus, bei dem das Gesamtsystem aus Akkumulator und Schaltung gerade noch funktioniert.

Der Wert  $n_{max}$  bezeichnet die vermutliche Zyklenzahl von vollständigen, d. h. 100%-Lade- und Entladevorgängen, nach deren Ablauf der Akkumulator ausfällt, d. h. vermutlich den Innenwiderstand  $R_i(n_{max})$  annimmt oder übersteigt. Die Zahl  $n_{max}$  wird in der Regel vom Hersteller des Akkumulators vorgegeben bzw. geliefert und liegt beispielsweise in der Größenordnung um  $n_{max}=1000$ .

Die Referenzsteigung  $m_{ref}$  beschreibt die vermutliche lineare Zunahme des Innenwiderstandes über der Zyklenzahl ausgehend vom Zyklus  $n=0$  bis zum Zyklus  $n=n_{max}$ . Der Wert steigt dabei linear über der Zyklenzahl  $n$  vom Wert  $R_i(0)$  zum Wert  $R_i(n_{max})$ . Die Referenzsteigung  $m_{ref}$  des Innenwiderstandes ist ein wichtiger Bestandteil zur Berechnung der Restzyklenzahl und dient als Orientierungswert der Zunahme des Innenwiderstandes. Die Steigung  $m_{ref}$  ergibt sich zu

$$m_{ref} = \frac{R_i(n_{max}) - R_i(0)}{n_{max}}$$

Für die Berechnung der tatsächlichen Steigung des Verlaufs des Innenwiderstandes  $R_i$  gibt es zwei Alternativen gemäß der folgenden Verfahrensschritte 2a oder 2b.

## **2a.) Berechnung der tatsächlichen Steigung $m(n)$ des Innenwiderstandes $R_i$ mit gleicher Intervalllänge $i/2$**

Um die tatsächliche Steigung  $m(n)$  des Innenwiderstandes  $R_i$  über der Zyklenzahl  $n$  für die Zyklen  $n=1,2,\dots$  zu bestimmen, werden zum Zeitpunkt bzw. an der Stelle eines aktuellen Zyklus  $n_a$  die letzten  $i$  vor dem Zyklus  $n_a$  liegenden Zyklen betrachtet, um eine Aussage über den zukünftigen Verlauf des Innenwiderstandes für Zyklen  $n_{a+1}, n_{a+2}, \dots$  zu prognostizieren. Beispielsweise befindet sich der Akku gerade im Zyklus  $n_{a+1}$ , d. h. die Messung des Innenwiderstandes  $R_i(n_a)$  zum Zyklus  $n_a$  liegt bereits vor. Die Messung des Innenwiderstandes  $R_i(n_{a+1})$  usw. für Zyklen größer  $n_a$  ist jedoch noch nicht bekannt.

Der Wert  $i$  wird dabei vorgegeben, z. B. empirisch ermittelt, aus Erfahrungswerten oder durch Versuche oder Simulationen gewonnen. Vorzugsweise wird der Wert  $i$  als ganze, insbesondere gerade ganze Zahl gewählt.  $i$  wird insbesondere für jeden Akku-Typ spezifisch gewählt.

Die letzten  $i$  Zyklen vor dem Zyklus  $n_a$  werden außerdem in zwei gleich große Abschnitte von jeweils  $i/2$  Zyklen geteilt. Die beiden Teilbereiche lassen sich daher folgendermaßen beschreiben:

1. Bereich von Zyklus  $n_a-i$  bis Zyklus  $n_a-(i/2)$ ,
2. Bereich von Zyklus  $n_a-(i/2)$  bis Zyklus  $n_a$ .

In beiden Teilbereichen werden Mittelwerte  $R_{m1}$  und  $R_{m2}$  der Widerstandswerte  $R_i$  gebildet. Hierzu werden die betreffenden Widerstandswerte  $R_i$  summiert und durch ihre Anzahl - das sind jeweils  $(i/2)+1$  Werte in beiden Bereichen - dividiert. Anschließend wird die Differenz der Mittelwerte durch deren Abstand - das sind  $i/2$  Zyklen - dividiert, um zur aktuellen Steigung  $m(n_a)$  beim Zyklus  $n_a$  zu gelangen. Damit ergibt sich folgende allgemeine Formel:

$$m(n) = \frac{Rm2 - Rm1}{\left(\frac{l}{2}\right)} = \frac{\sum_{j=n-\frac{l}{2}}^n Ri(j) - \sum_{j=n-l}^{j=n-\frac{l}{2}} Ri(j)}{\left(\frac{l}{2}\right)\left(\frac{l}{2}+1\right)},$$

mit

$$Rm2 = \frac{\sum_{j=n-\frac{l}{2}}^n Ri(j)}{\left(\frac{l}{2}+1\right)} \text{ für den zweiten Bereich und } Rm1 = \frac{\sum_{j=n-l}^{j=n-\frac{l}{2}} Ri(j)}{\left(\frac{l}{2}+1\right)} \text{ für den ersten Bereich.}$$

Die Steigung  $m(na)$  über den letzten  $i$  Zyklen vor dem aktuellen bzw. letzten Zyklus  $na$  dient zur Prognose für den weiteren Verlauf des Innenwiderstandes in nachfolgenden Zyklen  $na+1$ ,  $na+2$ , usw. Die Prognose des Verlaufs zukünftiger Werte von  $Ri$  für Zyklen nach Zyklus  $na$  geschieht durch Verlängerung der Steigungsgeraden durch die Mittelwerte  $Rm1$  und  $Rm2$  mit der Steigung  $m(na)$  über den Zyklus  $na$  hinaus zu den Zyklen  $na+1$ ,  $na+2$ , ...

## 2b.) Berechnung der tatsächlichen Steigung $m(n)$ des Innenwiderstandes $Ri$ mit zwei verschieden großen Teilintervallen $I_1$ und $I_2$

Eine Erweiterung der zuvor beschriebenen Methode 2a.) zur Bestimmung des Innenwiderstandes mittels zwei gleich großer Teilintervalle der jeweiligen Länge  $i/2$  ist die Unterteilung in zwei verschieden große Teilintervalle  $I_1$  und  $I_2$  gemäß der Verfahrensvariante 2b.). Diese beruht auf folgenden Überlegungen: Im Normalfall, d. h. bei linear ansteigendem  $Ri$ , ist es sinnvoll, über möglichst viele Werte zu mitteln, um eine Gerade für die mittlere Steigung  $m$  und damit eine genaue Vorhersage für den Verlauf von  $Ri$  treffen zu können. Es gibt jedoch auch Fälle, in denen die Werte des Innenwiderstandes  $Ri$  über der Zeit bzw. über der Zyklenzahl verschieden stark ansteigen, d. h. sich die Anstiegsrate ändert. Hierbei sollten die aktuelleren Werte eines z. B. steileren Anstiegs mehr gewichtet werden als z. B. länger zurückliegende Werte mit langsamerem Anstieg. Zur Berechnung der aktuelleren prognostizierten - von der früheren Steigung abweichenden - Steigung sollten zurückliegende Werte eher vernachlässigt werden. Zur Lösung dieses Problems wird die Berechnung der Steigung  $m(n)$  durch zwei verschieden große Teilintervalle  $I_1$  und  $I_2$  variabel gestaltet. Das Verhältnis der beiden Teilintervalle wird dabei abhängig von dem aktuell, d. h. zuletzt gemessenen Wert des Innenwiderstandes  $Ri(na)$  gewählt. Die beiden Teilbereiche lassen sich folgendermaßen beschreiben:

1. Bereich von Zyklus  $na-I_1-I_2$  bis Zyklus  $na-I_2$ ,
2. Bereich von Zyklus  $na-I_2$  bis Zyklus  $na$ .

Zunächst sind die Intervallgrößen  $I_1$  und  $I_2$  zu bestimmen. Hierzu wird eine aktuelle Widerstandssteigung  $a(na)$  zum Wert  $Ri(na)$  im Zyklus  $na$  bestimmt. Hierzu wird vom aktuell

bzw. zuletzt gemessenen Innenwiderstandswert  $R_i(n_a)$  der Mittelwert  $R_{ma}$  der letzten  $I_2$  Zyklen vor dem Zyklus  $n_a$  - unter dessen Ausschluss - subtrahiert und anschließend durch den Abstand der beiden Werte - dieser beträgt  $(I_2+1)/2$  - dividiert. Der Wert  $I_2$  wird dabei wieder vorgegeben, z. B. empirisch ermittelt, aus Erfahrungswerten oder durch Versuche oder Simulationen gewonnen.  $I_2$  wird insbesondere für jeden Akku-Typ spezifisch gewählt.

Die Steigung  $a(n)$  ergibt sich also wie folgt:

$$a(n) = \frac{R_i(n) - R_{ma}}{\frac{I_2+1}{2}} = \frac{R_i(n) - \frac{\sum_{j=n-I_2}^{n-1} R_i(j)}{I_2}}{\frac{I_2+1}{2}},$$

mit

$$R_{ma} = \frac{\sum_{j=n-I_2}^{n-1} R_i(j)}{I_2}.$$

Die Steigung  $a(n)$  dient nur zur Bestimmung der Intervalllänge  $I_1$  und darf auf keinen Fall mit der Steigung  $m(n)$  verwechselt werden, welche zur Prognose der Restzyklenzahl verwendet wird. Aus dem Wert  $a(n)$  wird ein Faktor  $k(n)$  errechnet, der die Intervalllänge  $I_1$  in Abhängigkeit der aktuellen Steigung  $a(n)$  bestimmt. Der Faktor  $k(n)$  sowie  $I_1$  errechnen sich durch:

$$k(n) = \frac{k_{max} + m_{resf}}{a(n)} \text{ und } I_1 \approx k(n) * I_2.$$

Da  $k(n)$  nicht zwangsweise eine ganze Zahl ist, wird das Ergebnis  $k(n)*I_2$  zur nächstliegenden ganzen Zahl  $I_1$  hin gerundet.

$k_{max}$  ist dabei als variabler Faktor einstellbar und muss durch Testen ermittelt werden.

Nun erst wird die eigentliche Steigung der Widerstandswerte berechnet: Die Steigung  $m(n)$  ergibt sich wieder wie folgt: In beiden Teilbereichen  $I_1$  und  $I_2$  werden wieder Mittelwerte  $R_{mI1}$  und  $R_{mI2}$  über jeweils  $I_1+1$  und  $I_2+1$  Werte von  $R_i$  gebildet, die Mittelwerte voneinander subtrahiert und durch deren Abstand - der  $(I_1+I_2)/2$  beträgt - dividiert. Es ergibt sich

$$m(n) = \frac{R_{mI2} - R_{mI1}}{\frac{I_1+I_2}{2}} = \frac{\frac{\sum_{j=n-I_2}^n R_i(j)}{I_2+1} - \frac{\sum_{j=n-I_1-I_2}^{n-I_2} R_i(j)}{I_1+1}}{\frac{I_1+I_2}{2}},$$

$$\text{mit } R_{mI1} = \frac{\sum_{j=n-I_1-I_2}^{n-I_2} R_i(j)}{I_1+1} \text{ und } R_{mI2} = \frac{\sum_{j=n-I_2}^n R_i(j)}{I_2+1}.$$

### 3.) Berechnung der Restzyklenzahl $V(n)$

Das eigentliche Ziel des Algorithmus ist die Bestimmung der verbleibenden Restzyklenzahl  $V(n)$  welche die verbleibenden Zyklen in Abhängigkeit von den bereits durchlaufenen Zyklen angibt. Dazu wird zunächst die Annahme getroffen, dass bei einem neuen Akku, also im Zyklus  $n=0$ , die Restzyklenzahl  $V$  gleich der ursprünglich angenommenen Gesamtzyklenzahl  $n_{max}$  ist, also  $V(0)=n_{max}$  beträgt. Außerdem wird angenommen, dass sich die Restzyklenzahl  $V(n)$  pro Zyklus um den Wert Eins vermindert. Damit ergibt sich in einem Diagramm, in dem die Restzyklenzahl  $V(n)$  über der Zyklenzahl  $n$  aufgetragen ist, eine Referenzgerade  $Gr$ . Die Steigung der Referenzgeraden  $Gr$  beträgt  $-1$ .

Um die gemäß oben aktuell ermittelten Werte  $m(n)$  für die jeweils aktuelle Steigung des Innenwiderstandes  $R_i$  in die Berechnung der Restzyklenzahl  $V$  einfließen zu lassen, und um eine möglichst genaue Prognose der verbleibenden Restzyklen abzugeben, wird die aktuell ermittelte Steigung  $m(n)$  in das Verhältnis zur Referenzsteigung  $m_{ref}$  gesetzt. Dieses Verhältnis wird als Faktor  $Km(n)$  bezeichnet, mit

$$Km(n) = \frac{m(n)}{m_{ref}}$$

Um die tatsächlich verbleibenden Zyklen  $V$  zu bestimmen, muss iterativ nach jedem Zyklus  $n$  bzw. jeder Bestimmung der Steigung  $m(n)$  ein neuer Wert für  $V(n)$  ermittelt werden. Dazu wird nach jedem abgelaufenen Zyklus die folgende Gleichung für die Berechnung der ausstehenden Restzyklen  $V$  angewendet:

$$V(n) = V(n - 1) - Km(n).$$

Dabei ist optional darauf zu achten, dass der Faktor  $Km$  keinen negativen Werte annehmen darf, da es nicht sinnvoll ist, bei zunehmender Zyklenzahl  $n$  die Restzyklenzahl  $V$  ansteigen bzw. größer werden zu lassen. Der kleinste Wert, den  $Km$  annehmen darf, ist dann  $Km=0$ . Dies bedeutet, dass die Restzyklenzahl  $V(n_a)$  bei einem bestimmten Zyklus  $n_a$  auf dem vorherigen Wert  $V(n_a-1)$  des vorherigen Zyklus  $n_a-1$  stagniert.

Des Weiteren lässt sich zu jedem Zyklus  $n$  eine Geradengleichung mit der Variablen  $x$  für die neue prognostizierte Restzyklenzahl  $V$  aufstellen.  $x=0$  beschreibt dabei den letzten Zyklus  $n-1$ ,  $x=1$  den aktuellen Zyklus  $n$ ,  $x=2$  den nächsten zu erwartenden Zyklus  $n+1$  usw. Die Geradengleichung bestimmt sich wie folgt:

$$V(n, x) = V(n - 1) - Km(n) * x.$$

Nun kann bei einem Zyklus  $n_a$  der Schnittpunkt der Geraden  $V(n_a, x)$  mit der Abszisse bestimmt werden. Der Schnittpunkt gibt an, bei welcher Zyklenzahl  $n$  mit einem Ausfall des Akkus zu rechnen ist.

## Glättung der Werte

Zur Verschönerung und zur Optimierung der Anzeige der Werte  $V(n)$  gibt es alternativ oder zusätzlich die Möglichkeit, die ermittelten und darzustellenden Werte bzw. deren Verlauf in einer Darstellung zu glätten. Außerdem kann die Vorhersage bzw. Darstellung bzw. Anzeige der vermutlich noch verbleibenden Zyklen  $V(n)$  noch weiter verbessert werden. Dabei wird die berechnete Zyklenzahl  $V(n)$  als Wert in den oben genannten Berechnungen unverändert weitergeführt. Lediglich angezeigt bzw. zur Anzeige verwendet wird ein gegebenenfalls abweichender Anzeigewert  $A(n)$ . Hierzu wird nach jedem Zyklus abgefragt, ob die vorherige angezeigte Zyklenzahl  $A(n-1)$  kleiner ist als die aktuelle bzw. tatsächlich ermittelte Anzahl der noch verbleibenden Zyklen  $V(n)$ . Der Wert  $V(n)$  wird dann gegebenenfalls in einen weiteren (abweichenden) Anzeigewert  $A(n)$  korrigiert und dieser angezeigt. Für diesen Zweck gibt es zwei Korrekturmethoden:

- Konstante Vorhersage
- Abnehmende Vorhersage

### Konstante Vorhersage

Bei diesem Vorgehen wird abgefragt, ob die tatsächlich ermittelten verbleibenden Zyklen  $V(n)$  sich im Vergleich zur vorherigen Anzeige  $A(n-1)$  erhöht haben oder nicht. Wenn sie sich nicht erhöht haben, soll der neue Wert  $V(n)$  als aktueller anzuzeigender Wert  $A(n) = V(n)$  übernommen werden. Wenn sie sich erhöht haben, soll nicht mit die neue erhöhte Anzahl  $V(n)$ , sondern die vorherig angezeigte Anzahl  $A(n-1)$  angezeigt werden. Somit wird erreicht, dass sich die Anzahl der noch verbleibenden Zyklen  $V(n)$  in der Anzeige als  $A(n)$  niemals erhöht, sondern bei steigender Zyklenzahl  $n$  allenfalls konstant bleibt oder fällt. Als programmtechnische Abfrage wird dies so ausgedrückt:

Wenn  $(V(n) > A(n-1))$ , dann  $(A(n) = A(n-1))$ , sonst  $(A(n) = V(n))$ .

### Abnehmende Vorhersage

Bei diesem alternativen Vorgehen wird abgefragt, ob die aktuelle Anzahl an verbleibenden Zyklen  $V(n)$  kleiner ist als die vorherige angezeigte Anzahl  $A(n-1)$ . Wenn dies der Fall ist, wird der neue ermittelte Wert  $V(n)$  als aktueller Anzeigewert  $A(n)$  übernommen, ansonsten wird die Anzeige um den Wert "Eins" erniedrigt, das heißt es wird  $A(n)$  gewählt als  $A(n-1) - 1$ . Die Abfrage hierzu sieht folgendermaßen aus:

Wenn  $(V(n) < A(n-1))$ , dann  $(A(n) = V(n))$ , sonst  $(A(n) = A(n-1) - 1)$ .



## Trendkurve

In der Anzeige bzw. Darstellung der Werte  $V(n)$  bzw.  $A(n)$  kann auch zusätzlich eine Trendlinie bzw. Trendkurve angezeigt werden. Drei Arten von Trendkurven stehen zur Auswahl:

- „gleitender Mittelwert“
- „Polynom höheren Grades“
- selbstberechnete „eigene Trendlinie (Gerade)“

Bei den Trendkurven „gleitender Mittelwert“ und „Polynom höheren Grades“ werden die Werte und Koeffizienten der Trendkurven aus den Angaben des vorhandene Diagrammes selbst, d. h. aus den Werten  $V(n)$  bzw.  $A(n)$  ermittelt, die Trendkurve berechnet und schließlich zusammen mit dem Verlauf der Werte  $V(n)$  bzw.  $A(n)$  dargestellt. Dies kann z. B. durch ein Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen. Die selbstberechnete „eigene Trendlinie (Gerade)“ wird über eine Steigung für eine übliche Geradengleichung wie folgt berechnet:

$$mT(na) = \frac{\Delta V}{\Delta n} = \frac{V(na) - V(na-k)}{k}$$

Dabei ist  $V(na)$  der letzte im Diagramm angezeigte Wert, also der beim aktuellen Zyklus  $na$ .  $k$  wird so gewählt, dass  $V(na-k)$  der vorherige im Diagramm angezeigte Wert ist. Dies gilt nur, falls der vorherige Wert  $V(na-k)$  größer als  $V(na)$  ist, d. h. die angezeigte Kurve  $V(n)$  vom vorletzten zum letzten Wert gefallen ist. Die Gerade verläuft dann durch die beiden letzten angezeigten Werte. Falls beide Werte gleich sind, wird  $k=n$  gewählt, d. h.  $V(na-k)$  ist der ursprüngliche Wert  $V(n=0)=n_{max}$ . Die Gerade verläuft mit der ermittelten Steigung  $mT(na)$  durch den letzten dargestellten Wert  $V(na)$ .

Als Geradengleichung ergibt sich dann ausgehend von  $V(na)$

$$V(x) = V(na) + mT(na) * x.$$

Die Variable durchläuft hierbei den Bereich  $x=0$  bis zu einem beliebigen positiven Wert, der angibt, über wie viele Zyklen, ausgehend vom aktuellen Zyklus  $na$ , die Gerade in der Anzeige dargestellt werden soll.

Mit dieser Formel, und der Angabe für  $x$  ist man in der Lage, eine Vorhersage für z. B. die nächsten  $x=100$  Zyklen zu treffen, und diese als Fortführung der Kennlinie in die Zukunft mit darzustellen.

Der „gleitende Mittelwert“ kann eine sehr gute Annäherung an die berechneten Werte abgeben, aber es ist wegen der fehlenden Werte zur Mittelung für  $n > n_a$  nicht möglich einen Trend der Geraden über den aktuellen Zyklus  $n_a$  hinaus auszugeben.

Hierzu wurde alternativ die Trendkurve „Polynom höheren Grades“, z. B. 5ten Grades eingefügt. Diese Variante erlaubt, neben der Annäherung an die berechnete bzw. dargestellte Kurve auch deren Weiterführung, also eine Vorhersage der Kurve für zukünftige Zyklen.

Als Bereich von Zyklen für die Trendkurvenvorhersage ist ein zumindest ungefährender Wert von  $x=100$  im Flugzeubereich sinnvoll, da im Regelfall Flugzeug-Checks alle 250 bis 650 Flugstunden, oder ca. alle zwei Monate, durchgeführt werden.

### **Vorhersage-Ampel**

Der geeignete Parameter für die Vorhersage der Akku-Restlebensdauer ist der Wert des Innenwiderstandes  $R_i$ . Dieser Wert wird normalisiert, so dass sich am Ende der Lebensdauer die Zahl Null an Restzyklen ergibt. Die oben genannten Formeln des Algorithmus gelten daher für alle Betriebsbedingungen.

Bei normalem Betrieb bewegt sich der Innenwiderstand  $R_i$  innerhalb der erwarteten Bandbreite. Die tatsächliche endgültige Lebensdauer des Akkumulator-Packs entspricht dann etwa dem erwarteten Wert (z. B. tatsächlich 900 bis 1100 Zyklen bei  $n_{max} = 1000$  Zyklen).

Wenn ein Akkumulator-Pack allerdings unter außergewöhnlichen Bedingungen betrieben wird, wie z. B. bei starken Temperatur- oder Lastschwankungen, verkürzt sich dessen Lebensdauer. Diese Betriebsbedingungen spiegeln sich in starken Veränderungen des Innenwiderstandes  $R_i$  wieder.

Wird dagegen das Akkumulator-Pack des Öfteren unter idealen Bedingungen betrieben, ist zu erwarten, dass sich seine Lebensdauer verlängert.

Die Anzeige der Restlebensdauer  $V(n)$  als Zahlenwerte vermittelt oft einen zu wenig greifbaren Eindruck des Akkumulator-Zustandes.

Für diesen Fall wird die Darstellung einer Verkehrsampel bevorzugt, die die Restlebensdauer des Akkus versinnbildlichen soll. Die Erkennung des Akkumulator-Zustandes wird dadurch klarer.

Alternativ oder zusätzlich kann also auch eine Ampelanzeige für den Akkuzustand erfolgen. So soll eine mehr pauschale Aussage über den Zustand des Akkus getroffen werden. Hierzu

wird das Schema einer Ampel verwendet. Ein neuer Akkumulator startet zunächst sinnbildlich in grünem Zustand. Wenn der Akku in Ordnung ist, d. h. noch "lange" benutzt werden kann, soll die Ampel „grün“ anzeigen. Wenn sich der Akku in einem kritischen Bereich befindet, d. h. dessen Lebensdauerende nur noch eine bestimmte Anzahl  $V_{gelb}$ , z. B. einige Zyklen entfernt liegt, soll sie „gelb“ anzeigen und schließlich, wenn der Akku nur noch wenige Zyklen  $V_{rot}$  zu leben hat bzw. nicht mehr genügend Kapazität für eine bestimmte Anwendung, z. B. für die Notstromversorgung der Notbeleuchtung eines Flugzeugs, aufweist, soll „rot“ angezeigt werden.

Wenn sich der Akku allerdings "ungewöhnlich" verhält, gibt es zusätzlich noch eine weitere separate Anzeige „ $n < n_{gelb}$ “, wenn bereits bei einer vergleichsweise geringen Zyklenzahl  $n$  unterhalb der Grenzzahl  $n_{gelb}$  der Innenwiderstand kritisch wird, d. h. die verbleibende Zyklenzahl unterhalb  $V_{gelb}$  liegt. Eine weitere separate Anzeige „ $n < n_{rot}$ “ zeigt an, wenn der Akku bei vergleichsweise kurzer Einsatzdauer, d. h. unterhalb der Grenzzahl  $n_{rot}$  schon nicht mehr die erforderliche Kapazität  $V_{rot}$  aufweist. Es werden Grenzen für die ermittelten voraussichtlichen Restzyklen  $V(n)$ , nämlich  $V_{gelb}$  und  $V_{rot}$ , sowie für die tatsächlich durchlaufenen Zyklen  $n$ , nämlich  $n_{gelb}$  und  $n_{rot}$  definiert.

Die für die Ampelanzeige formulierte Abfrage sieht wie folgt aus:

Wenn  $(V(n) > V_{gelb})$  UND  $(n < n_{gelb})$ , dann Anzeige = „grün“

oder

Wenn  $(V(n) > V_{rot})$  UND  $(n_{gelb} < n < n_{rot})$ , dann Anzeige = „gelb“

oder

Wenn  $(V_{gelb} > V(n) > V_{rot})$  UND  $(n < n_{gelb})$ , dann Anzeige = "gelb" und „ $n < n_{gelb}$ “

oder

Wenn  $(V(n) < V_{rot})$  UND  $(n < n_{rot})$ , dann Anzeige = "rot" und „ $n < n_{rot}$ “

Sonst

Anzeige = „rot“

### **Füllstandsanzeige**

Die restliche Lebensdauer des Akkus kann auch als Kraftstofftank, d. h. als Gangreserve für noch verfügbare Zyklen versinnbildlicht werden. Hier startet der Akku im Zyklus Null mit einem "vollen Tank". Mit jedem Zyklus wird der Tank - als Funktion der Betriebsart des Akkus

- um eine bestimmte Menge geleert. Nebenbei sollte ein stärkerer Anstieg des Innenwiderstandes das Leeren des Tanks beschleunigen, ein schwächerer Anstieg das Leeren verlangsamen.

Alternativ oder zusätzlich kann daher auch eine symbolische Anzeige eines "Füllstandes" des Akkus erfolgen. Der Füllstand symbolisiert die verbleibende Zyklenzahl. Für die Berechnung der Füllstandsanzeige wurde eine Anzeigeeinheit mit mehreren einzelnen, z. B. zehn, Anzeigen entworfen. Sie ist so aufgebaut, dass sich an jeweiligen Grenzen, die für eine Anzeige zur Verfügung stehen, z. B. nach jeweils einem Zehntel der ursprünglichen Maximalzyklenzahl  $n_{max}$ , die Anzeige ändert. Bei einem neuen Akku mit der maximalen Anzahl  $n_{max}$  an verbleibenden Zyklen werden alle - im Beispiel zehn - Anzeigeelemente angezeigt bzw. sind aktiv, also leuchten z. B. auf. Während des Betriebes erlischt eine der Anzeigen nach Durchlaufen des jeweiligen der Anzeige zugeordneten Anteils von Restzyklen. Im Beispiel nimmt die Anzeige immer ab, wenn die verbleibende Zyklenzahl  $V(n)$  um 10% der maximalen Zyklenzahl, also um  $n_{max}/10$  gesunken ist, bis schließlich im letzten Zehntel nur noch die unterste und letzte, z. B. „rote“ Anzeige „aufleuchtet“. Auch hier können die Anzeigestufen also farblich, z. B. in Gruppen von grünen, gelben und roten Anzeigen, gekennzeichnet werden.

### **Ausführungsbeispiel**

Weitere Merkmale, Wirkungen und Vorteile des Algorithmus ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines bevorzugten Ausführungsbeispiels der Erfindung sowie der beigefügten Figuren. Dabei zeigen in einer schematischen Prinzipskizze:

- Figur 1 Messwerte eines Innenwiderstandes und eine Referenzsteigung,
- Figur 2 die Ermittlung der aktuellen Steigung mit gleich großen Intervallen,
- Figur 3a die Ermittlung der ersten aus der zweiten Intervallgröße,
- Figur 3b die Ermittlung der aktuellen Steigung mit unterschiedlich großen Intervallen,
- Figur 4 die aktuelle Vorhersage des Ausfallzyklus,
- Figur 5 Anzeigewerte  $A(n)$  für konstante Vorhersage,
- Figur 6 Anzeigewerte  $A(n)$  für abnehmende Vorhersage,
- Figur 7 Anzeigewerte  $A(n)$  mit Trendkurven,
- Figur 8 Eine Verlaufskurve  $V(n)$  mit Zuordnung zu einer Ampelanzeige,

Figur 9 die Verlaufskurve aus Fig. 9 mit einer Zuordnung zu einer Tankanzeige.

Fig.1 zeigt Messwerte des Innenwiderstandes  $R_i(n)$  eines Akkus für die Zyklen  $n=0$  bis  $n=6$  und den theoretischen Verlauf des Innenwiderstandes gemäß der Referenzsteigung  $m_{ref}$  über der gesamten geschätzten Lebensdauer des Akkus von  $n=0$  bis  $n=n_{max}$  nach Herstellerangaben.

Fig. 2 erläutert die Bestimmung einer aktuellen Steigung  $m(n_a)$  anhand gleich großer Intervalle bzw. Bereiche und zeigt für  $i=4$  und ausgehend von einem aktuellen Zyklus  $n_a$  Messwerte von  $R_i(n_a-i)$  bis  $R_i(n_a)$ . Die Mittelwerte  $R_{m1}$  und  $R_{m2}$  (gestrichelt gezeichnet) für ersten und zweiten Bereich werden wie folgt gebildet: Die jeweiligen zugehörigen  $(i/2)+1 = 3$  Werte von  $R_i$ , die zur jeweiligen Mittelwertbildung im ersten oder zweiten Bereich beitragen, sind durch jeweilige Umrisslinien angedeutet, werden aufsummiert und durch ihre jeweilige Anzahl geteilt. Die aktuelle Steigung wird als Differenz der Mittelwerte  $R_{m2}-R_{m1}$ , geteilt durch deren Abstand in Abszissenrichtung  $i/2$ , ermittelt. Die Prognose des Verlaufs zukünftiger Werte von  $R_i$  für Zyklen nach Zyklus  $n_a$  durch Verlängerung der Steigungsgeraden ist durch eine gestrichelte Linie angedeutet.

Fig. 3a zeigt die Ermittlung der Intervallgröße  $I_1$  aus der Intervallgröße  $I_2$ .  $I_2$  wurde hier zu  $I_2=3$  gewählt. Zunächst werden daher die  $I_2$ , also drei, Werte von  $R_i$  für  $n_a-3$  bis  $n_a-1$  zu  $R_{ma}$  gemittelt und die Steigung  $a(n_a)$  ermittelt. Hierzu wird die Differenz aus dem aktuellen Wert von  $R_i(n_a)$  und dem Mittelwert  $R_{ma}$  durch deren Abstand  $(I_2+1)/2$  geteilt. Die Steigung wird dann zu  $m_{ref}$  ins Verhältnis gesetzt und hieraus die Länge  $I_1$  anhand  $k_{max}$  ermittelt. Für die ermittelte Steigung  $a(n_a)$  ergibt sich im Beispiel der Wert  $a(n_a) = 0,7$ .  $m_{ref}$  ist im Beispiel  $m_{ref} = 0,5$ . Als Wert  $k_{max}$  wurde  $k_{max} = 3$  gewählt. Somit ergibt sich  $k(n_a) = 2,14$  und daher  $I_1 = 6$ .

Fig. 3b zeigt die Ermittlung der eigentlichen aktuellen Steigung  $m(n_a)$  des Innenwiderstandes  $R_i$ . Der Werteverlauf von  $R_i$  ist derjenige von Fig. 3a. Im ersten Bereich werden die  $I_1+1$ , also sieben Werte von  $R_i$  von  $n_a-I_1-I_2 = n_a-9$  bis  $n_a-I_2 = n_a-3$  zu  $R_{m1}$  gemittelt. Im zweiten Bereich werden die  $I_2+1$ , also vier Werte, von  $R_i$  von  $n_a-I_2=n_a-3$  bis  $n_a$  zu  $R_{m2}$  gemittelt. Die Mittelwerte  $R_{m1}$  und  $R_{m2}$  sind gestrichelt gezeichnet, die jeweils beitragenden Werte  $R_i$  durch Umrisslinien umgrenzt. Aus der Differenz der Mittelwerte  $R_{m2}$  und  $R_{m1}$  und deren Abstand von  $(I_1+I_2)/2$  wird dann die Steigung  $m(n_a)$  berechnet. Die über den aktuellen Zyklus  $n_a$  hinausgehende verlängerte Steigungsgerade dient wieder zur Vorhersage kommender Werte von  $R_i$ .

Figur 4 zeigt die Ermittlung der Vorhersagegeraden  $V(n,x)$  für verbleibende Restzyklen für  $n_{max}=8$ .

Im ersten Beispiel ist der aktuelle Zyklus derjenige mit Zykluszahl  $n_a = 3$ . Im Zyklus  $n = 1$  ergab sich eine Steigung  $m(1) = 0,8$ , die kleiner der Referenzsteigung  $m_{ref} = 1$  ist. Mit  $V(0) = n_{max} = 8$  und  $K_m(1) = 0,8$  ergibt sich  $V(1) = V(0)-0,8 = 7,2$ . Im zweiten Zyklus ergab sich

$m(2) = 1$  und somit  $Km(2) = 1$  und  $V(2) = 6,2$ . Im aktuellen dritten Zyklus ergibt sich  $m(3) = 1,3$  und damit  $Km(3) = 1,3$  und  $V(3) = 4,9$ .

Im aktuellen Zyklus  $n_a=3$  wird nun auch die Geradengleichung  $V(3,x)$  aufgestellt und ergibt sich zu

$$V(3,x) = V(2) - Km(3) * x = 6,2 - 1,3x.$$

Diese Gerade schneidet die Abszisse bei etwa  $n=6,8$ , d. h. zum Zeitpunkt, als der dritte Zyklus  $n_a=3$  durchlaufen wurde, ist zu erwarten, dass der Akku nach etwa 6,8 Zyklen ausfällt.

In einem zweiten Beispiel ist ausgehend vom ersten Beispiel noch ein weiterer Zyklus vergangen: Nach Abschluss des vierten Zyklus wird nun eine weitere Messung des Innenwiderstandes  $R_i(4)$  durchgeführt. Nun gilt  $n_a=4$ . Es ergibt sich  $m(4) = 0,9$  und damit  $Km(4) = 0,9$  und  $V(4) = 4,0$ . Die nun gültige Gerade  $V(4,x)$  ergibt sich zu

$$V(4,x) = V(3) - Km(4) * x = 4,9 - 0,9x.$$

Diese Gerade schneidet die Abszisse bei etwa  $n=8,9$ , d. h. zum Zeitpunkt, als der vierte Zyklus  $n_a=4$  durchlaufen wurde, hat sich die Lebenserwartung des Akkus geändert. Nun ist zu erwarten, dass der Akku nach ca. 8,9 Zyklen ausfällt.

Fig. 5 zeigt eine Glättung der Werte mit konstanter Vorhersage in einem beispielhaften Anzeigediagramm. Dargestellt ist der Anzeigewert  $A(n)$ . Es ist zu erkennen, dass selbst bei einer Reduzierung des Innenwiderstandes  $R_i$ , und damit einem Anstieg von  $V(n)$ , die eine lokale Erhöhung der Zyklenzahl  $V(n)$  mit sich bringen würde, der Kurvenverlauf  $A(n)$  konstant bleibt. Bei Erhöhung des Widerstandes  $R_i$  nimmt die dargestellte Kurve  $A(n)$  weiterhin ab. In Fig. 5 gilt  $n_{max} = 3000$ . Wegen eines unerwartet starken Anstiegs des Innenwiderstandes ab ca. Zyklus  $n=1000$  sinkt die Lebenserwartung des Akkus allerdings auf unter 1200 Zyklen ab.

Fig. 6 zeigt bei denselben Daten für  $V(n)$ , die Fig. 5 zugrunde liegen, eine alternative Darstellung  $A(n)$  mit Glättung der Werte mit abnehmender Vorhersage in einem beispielhaften Anzeigediagramm. In Figur 6 ist zu erkennen, dass die angezeigte Anzahl der Zyklen  $A(n)$  stets pro Zyklus abnimmt, auch wenn der Innenwiderstandswert und damit der Wert  $V(n)$  gleich bleibt oder gar abnimmt.

Fig. 7 zeigt für einen alternativen Verlauf von  $A(n)$  drei Trendkurven, nämlich eine jeweilige zum "gleitender Mittelwert", zum "Polynom", im Beispiel 5ten Grades und zur "eigenen Trendlinie (Gerade)" in einem Diagramm. Die Kurven beginnen jeweils beim Zyklus  $n=1$  und reichen bis zum aktuellen Zyklus  $n_a$ . Die beiden Kurven "Polynom" und "Gerade" reichen außerdem prädiktiv über den aktuellen Zyklus  $n_a$  hinaus, jeweils ausgehend vom letzten

ermittelten bzw. dargestellten Wert  $V(n_a)$  beginnend beim aktuellen Zyklus  $n_a$  für die nächsten  $x=100$  Zyklen bis  $n_a+100$ .

Fig. 8 zeigt eine Verlaufskurve für  $V(n)$  über der Zyklenzahl  $n$  - und damit den Zustand des Akkus - und zugehörige Zonen für eine Ampeldarstellung sowie für die Anzeige der Meldungen " $n < n_{rot}$ " und " $n < n_{gelb}$ ". Gezeigt ist auch die Ampel selbst mit den drei Anzeigen "grün", "gelb" und "rot" sowie die beiden Zusatzanzeigen für Meldungen " $n < n_{rot}$ " und " $n < n_{gelb}$ "

Fig. 9 zeigt nochmals die Verlaufskurve  $V(n)$  aus Fig. 8. Zusätzlich gezeigt ist eine "Tank-" bzw. "Füllstandsanzeige" für den Akku mit zehn Anzeigesegmenten "1" bis "10". Das Segment "1" zeigt eine verbleibende Zyklenzahl zwischen 90% und 100%  $n_{max}$  an. Das Segment "2" zeigt eine verbleibende Zyklenzahl zwischen 80% und 90%  $n_{max}$  an. Das Bildungsgesetz setzt sich fort bis zum Segment "10", das eine verbleibende Zyklenzahl zwischen 0% und 10%  $n_{max}$  anzeigt. Die Segmente sind wieder in den Ampelfarben "rot", "gelb" und "grün" ausgeführt.

Die Abfrage hierfür wurde beispielhaft folgendermaßen aufgestellt: Bei zehn Anzeigen ist "1" die Anzeige für höchsten, "10" für niedrigsten "Füllstand":

Wenn  $V(n) < 0,9 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "2"

oder

Wenn  $V(n) < 0,8 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "3"

oder

Wenn  $V(n) < 0,7 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "4"

oder

Wenn  $V(n) < 0,6 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "5"

oder

Wenn  $V(n) < 0,5 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "6"

oder

Wenn  $V(n) < 0,4 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "7"

oder

Wenn  $V(n) < 0,3 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "8"

oder

Wenn  $V(n) < 0,2 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "9"

oder

Wenn  $V(n) < 0,1 * n_{max}$ , dann Füllstandsanzeige: "10"

sonst

Füllstandsanzeige: "1"



Fig. 1

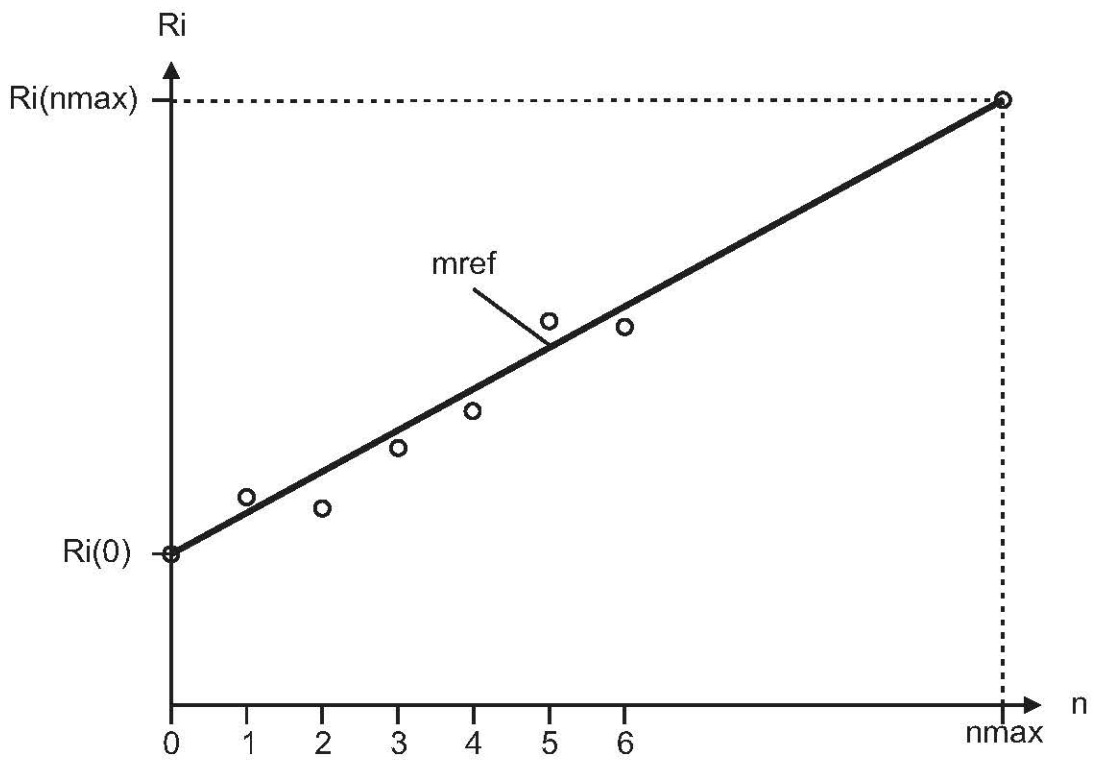


Fig. 2

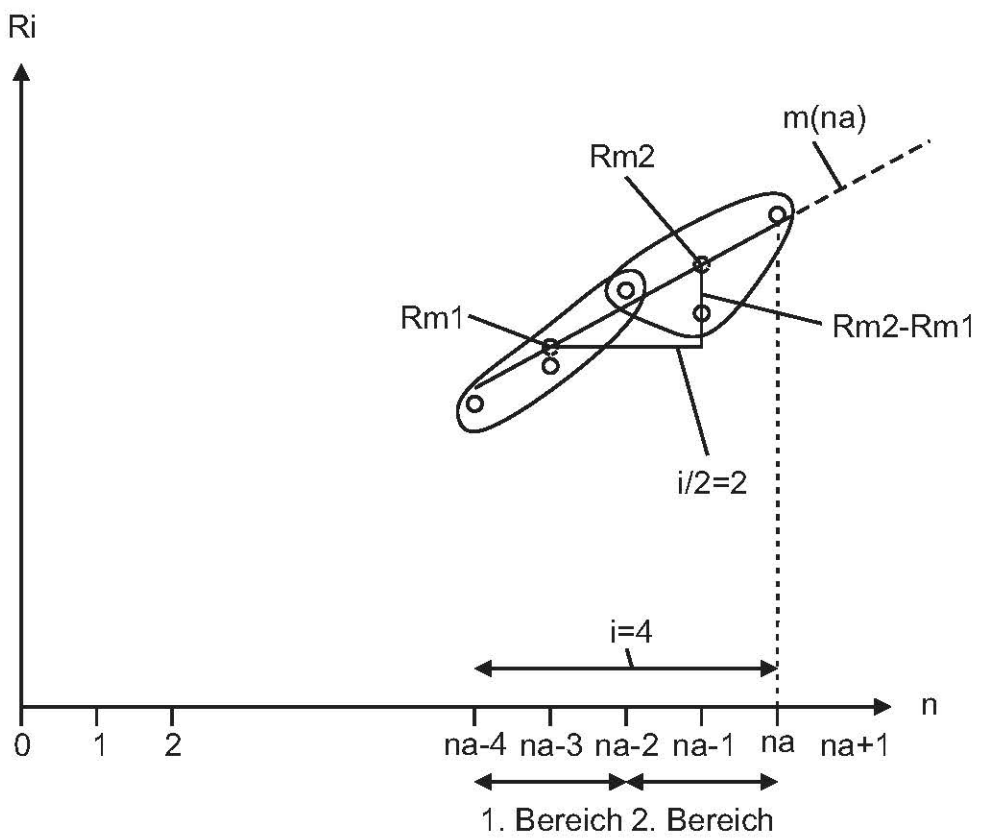


Fig. 3a

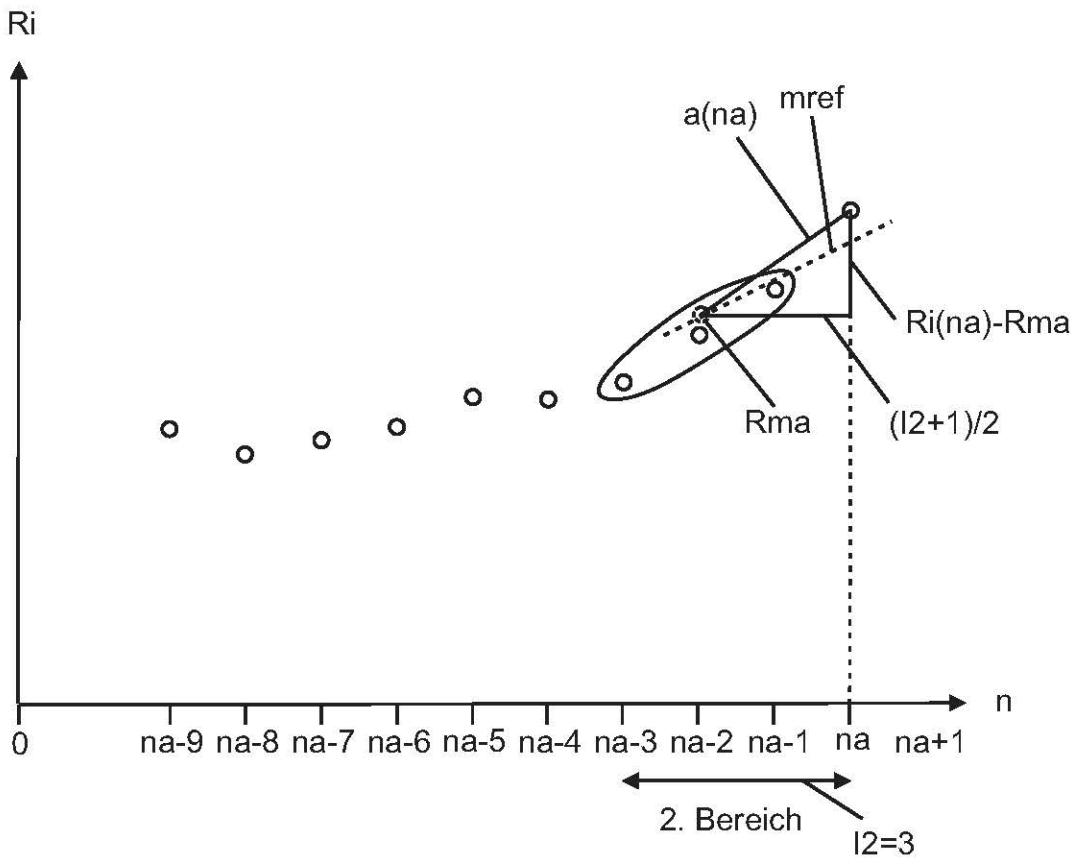


Fig. 3b

