

Was bedeutet Lebensdauerende bei einem Produkt, das im Normalfall nicht plötzlich versagt, sondern dessen zahlreiche Eigenschaften sich nur langsam und kontinuierlich verschlechtern?

Das Ende der Lebensdauer ist erreicht, wenn die Batterie nicht mehr in der Lage ist, eine der verschiedenen Anforderungen zu erfüllen:

State of function – Zwei Definitionen:

1. Definition einer Skala zwischen 100 % und 0 %
2. Wert ist entweder 1 (Anforderung ist erfüllt) oder 0 (Anforderung wird nicht erfüllt)

:

State of health:
$$\frac{\text{Aktuelle Kapazität unter Nennbedingungen}}{\text{Nennkapazität}}$$

Im Normalfall kann das Ende der Lebensdauer mit einem Kapazitätswert verbunden werden.

Lebensdauer



Anforderungen an Batterien

Anwendung	Kapazität am Lebensdauerende	Woran wird das Ende der Lebensdauer erkannt?
Erneuerbare Energiesysteme	Ca. 20 – 30 %	Geforderte Leistung (Licht, Kommunikation, etc.) kann immer häufiger nicht mehr erbracht werden; Kosten für Dieseltreibstoff steigen
Startleistung für Verbrennungsmotoren	Ca. 20 – 30 % (auch bei kalten Temperaturen!)	Start ist nicht mehr möglich oder dauert zu lange
USV, Notstrom, Notbeleuchtung	Je nach Auslegung ca. 60 – 80 %	Vorschriften werden nicht mehr eingehalten, Zeit für Überbrückung liegt unterhalb der geforderten Zeiten
Gabelstapler	Je nach Auslastung ca. 40 – 80 %	Batterie muss während der Schicht gewechselt werden, große Lasten können nicht mehr gehoben werden,

Die Kriterien in Normen und technischen Standards für „Lebensdauerende“ sind in vielen Anwendungen nicht relevant.

Für jede Anwendung muss das Lebensdauerende individuell bestimmt werden. Das bedingt, dass die Kosten für den Verlust der Leistung abgeschätzt werden müssen und die Zeit bis zur Reparatur/Ersatz der Batterie berücksichtigt werden muss.

Lebensdauer



Eigenschaften von Batterien in Normen:	Alterung	Wert aus Messvorschrift
1. Kapazität unter Nennbedingungen	Ja	Ah
2. Kaltstartkapazität	Ja	Ah
3. Kaltstartstrom	Ja	A
4. Ladungsaufnahme	Ja	A
5. Ladungserhaltung / Selbstentladung	Ja	Ah
6. Wasserverbrauch	Ja	Gramm
7. Isolationswiderstand	? / Wartung	Ohm/A
8. Ladewirkungsgrad	Ja	% Ah
9. Rüttelfestigkeit	?	Ja/Nein
10. Elektrolytrückhaltung	Nein ?	Ja/Nein
11. Haltbarkeit (Zeit, Ah, Zyklenzahl, Hochstrombelastbarkeit, etc.) aus standardisierten Tests.	Nicht anwendbar	Zyklenzahl / Zeit

Es fehlen z.B.: Kosten der bereitgestellten Energie, Energiewirkungsgrad, Vollladezeit, etc.

Die "Haltbarkeit" der Batterie ist eine Aussage über die Lebensdauer einer neuen Batterie unter standardisierten Bedingungen (beschleunigte Alterung) unter Nutzung von Kriterien für Lebensdauerende, die oft ohne einen relevanten Bezug zur Anwendung festgesetzt werden, z.B. Kapazität kleiner als 80 % der Nennkapazität.

Wie misst man die Haltbarkeit = verbleibende Restnutzungsdauer einer Batterie während des Betriebs/der Nutzung? 3

Lebensdauer

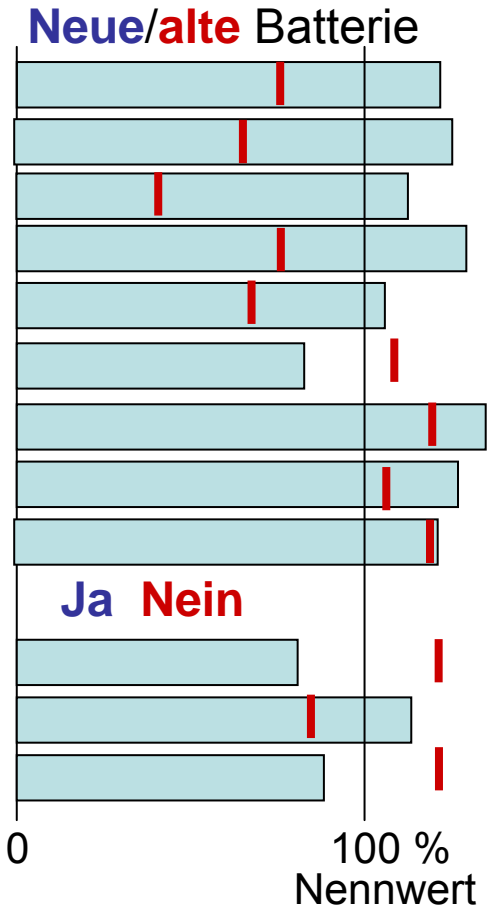


Eigenschaften von Batterien/Systemen:

1. Kapazität unter Nennbedingungen
2. Kaltstartkapazität
3. Kaltstartstrom
4. Ladungsaufnahme
5. Ladungserhaltung / Selbstentladung
6. Wasserverbrauch
7. Isolationswiderstand
8. Ladewirkungsgrad
9. Rüttelfestigkeit
10. Elektrolytrückhaltung
11. Kosten der bereitgestellten Energie
12. Energiewirkungsgrad
13. Zeit bis zur Vollladung

Wert aus Messung

- Ah
- Ah
- A
- A
- Ah
- Gramm
- Ohm/A
- % Ah
- Ja/Nein
- Ja/Nein
- €/kWh
- % Wh
- h



Was sind die anwendungsbezogenen Grenzen und Messvorschriften?

Beschreibung der Batterie über einen Zustandsvektor!

Lebensdauer

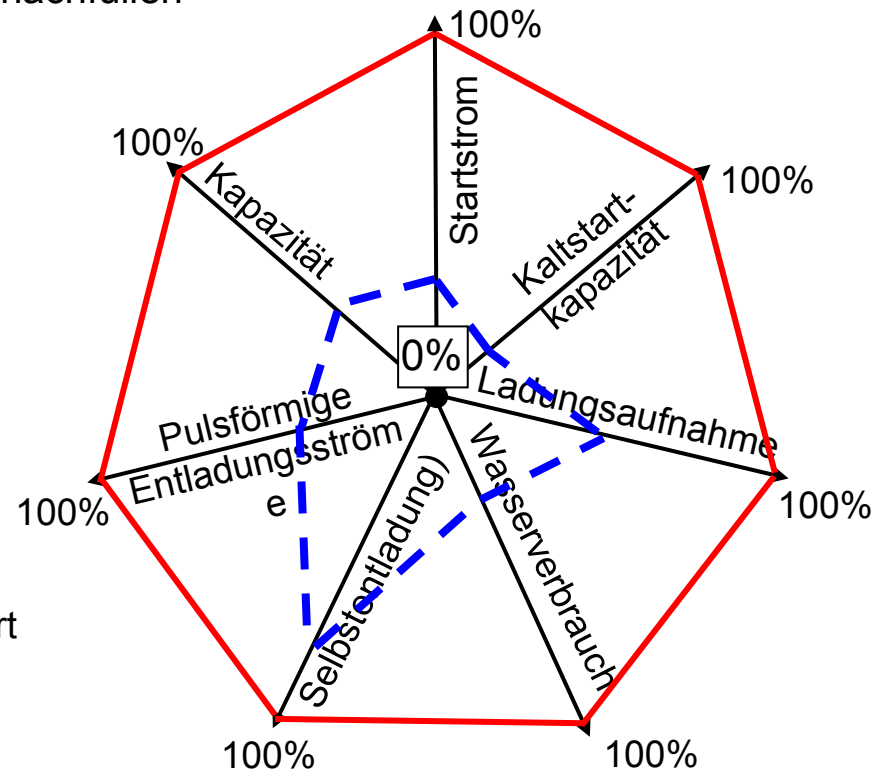


Betriebsbedingungen/geforderte Eigenschaften im Fahrzeug (Harz, Sebastian Mathes)

1. Sehr hohe Startströme bei tiefen (ca. - 25 °C) Temperaturen
2. Hohe Kaltstartkapazität, weil Motor nicht schnell anspringt
3. Hohe Ladungsaufnahme bei tiefen Temperaturen, weil Batterie während kurzer Fahrt wieder geladen werden muss.
4. Geringe Selbstentladung, weil Fahrzeug lange nicht fährt
5. Geringer Wasserverbrauch (kein Wassernachfüllen während der ganzen Lebensdauer)
6. Rüttelfestigkeit (Waldwege)
7. Hohe Kapazitive Belastung (Camping) mit geringen Belastungsströmen
8. Hohe pulsformige Entladeströme (Lautsprecher)

Zustandsvektor:

- Geringster akzeptaler Wert, der sicher zur Funktionserfüllung führt
- Werte einer neuen Batterie



Das Ende der Gebrauchsdauer ist erreicht, wenn auch nur einer der Eigenschaftswerte der Batterie unter den kleinsten akzeptablen Wert gefallen ist.

Man muss die Anwendung inkl. der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen verstehen, um die Kriterien für das Lebensdauerende festlegen zu können.

Lebensdauerende bei Brennstoffzellen, z..B. stationäre Anwendung / BHKW

- Ab welcher Änderung der Wirkungsgrade ist die Funktion "Wärmeversorgung, die sich durch Produktion und Verkauf elektrischer Energie bezahlt" aus Kundensicht nicht mehr erfüllt?
- Unzureichende Wärmeproduktion?
- Kleinere Stromzahl (mehr Wärme im Verhältnis zu Strom) bei gleichem Gesamtwirkungsgrad?
- Geringer Gesamtwirkungsgrad?

- Wann merkt der Kunde eine Änderung?

- Wie wägt der Kunde Ersatz- oder Reparaturkosten gegenüber einer wirtschaftlichen Verschlechterung ab?

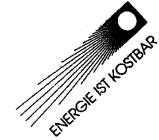
Ziel von Lebensdauertests:

Abschätzung der Gebrauchsdauer unter den erwarteten Betriebsbedingungen von Beginn der Nutzung an. (Annahme: Keine Änderung der Nutzungsbedingungen!)

Möglichkeiten für Tests:

1. Tests basierend auf Erfahrungswerten
Z.B. Starterbatterien für Fahrzeuge: Batterien mit guten Testergebnissen halten lange, auch wenn die Testbedingungen die Betriebsbedingungen nur sehr ungenau abbilden.
2. Tests, die die gestellten Anforderungen nachbilden (nur für sehr genaue Einsatzbedingungen bzw. Monoanforderungen möglich – und bei Kenntnissen über den Zusammenhang zwischen beschleunigten Tests und normalen Betriebsbedingungen)
Nutzung z.B. für Batterien in USV-Anlagen und Gabelstaplern
3. Tests, die am Ende des Tests die gleiche Kombination von Schäden verursacht haben wie sie unter normalen Betriebsbedingungen entstehen.

Lebensdauer



Starterbatterien: EN 50342:2001 - Erfahrungsbasierte Testverfahren

Anforderung 1 für geschlossene Batterien

Korrosionsprüfung (Beginn mit vollgeladener Batterie = 24h IU-Ladung $5xI_n/16V/25-35^\circ C$)

- a) $60^\circ C$, 13 Tage bei 14,0 V Konstantspannungsladung
- b) $60^\circ C$, 13 Tage, ohne Ladung
- c) $25^\circ C$, ggf. Wasser nachfüllen, Vollladung mit IU-Ladung ($I = 5 \times I_n$; $U = 16 V$)
für 24 Stunden
- d) $25^\circ C$, Entladen mit $0,6 \times$ Kälteprüfstrom bis 6 V erreicht sind

Viermalige Wiederholung

Test ist erfolgreich, wenn die Entladezeit bei $0,6 \times$ Kälteprüfstrom größer als 30 Sekunden ist.

Zyklenprüfung (andere Batterie – Beginn mit vollgeladener Batterie)

- a) $25^\circ C$, 180-mal folgenden Entlade- und Ladezyklus durchführen:
 - 1 Stunde entladen mit Strom von $C_n/4$ und Laden mit IUI-Kennlinie
(IU: Insgesamt 2 h 55 min, $I_{max} = 10 \times I_n$, $U = 14,8V$ und I: 5 Minuten mit $I = C_n/8$)
Wassernachfüllen ist nicht bei Batterien erlaubt, die als "niedriger Wasserverbrauch"
gekennzeichnet sind.

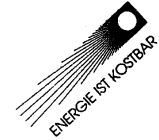
Testkriterium ist erfüllt, wenn Spannung beim Entladen über 10,5 V bleibt)

- b) $-18^\circ C$, Entladen mit $0,6 \times$ Kälteprüfstrom für 30 Sekunden

Testkriterium ist erfüllt, wenn Spannung nach 30 Sekunden Entladung größer als 7,2 V ist

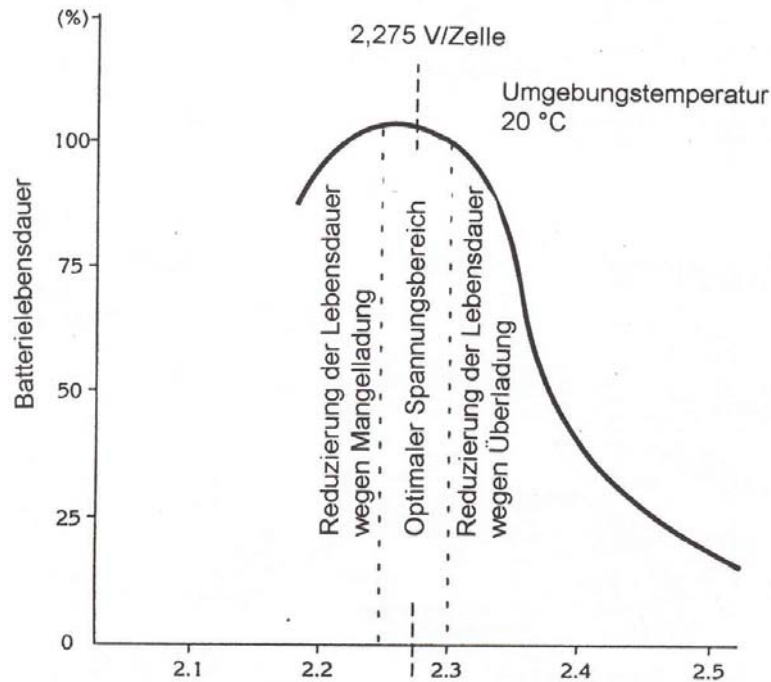
Anforderungen 2 und 3 stellen höhere Anforderungen bzgl. einer zyklischen Belastung!

Lebensdauer

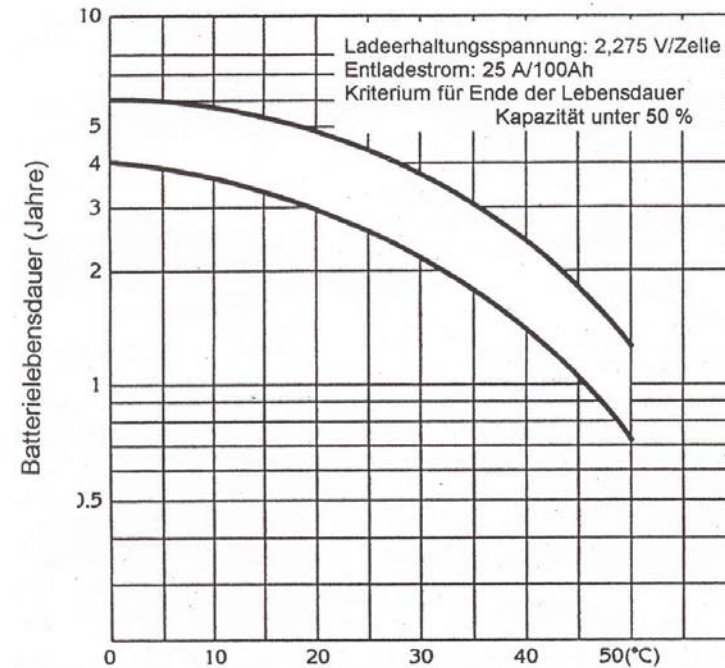


Lebensdauertests – Monoanforderungen bei USV-Batterien

Ladeerhaltungsspannung

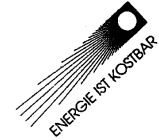


Temperatur



Lebensdauer in USV-Anwendungen kann aus derartigen Daten gut abgeschätzt werden, weil der tatsächliche Betrieb und die Testbedingungen gut übereinstimmen.

Lebensdauer



Tests bei komplexen/stark veränderlichen Betriebsbedingungen – bei konstanten Leistungsanforderungen erfolgen bereits Änderungen der Betriebsbedingungen wegen Alterungseffekten

Übliche Daten für Lebensdauervorhersagen:

- Temperatur: "Halbierung" der Lebensdauer bei Temperaturerhöhung um 10 °C
- Kumulierter Energiedurchsatz bzw. Zahl der Zyklen
- Entladetiefe (ohne unzulässige Tiefentladungen, mit vollständiger Wiederaufladung nach jeder Entladung)
- Spannung während der Ladeerhaltung
- Zeit seit Inbetriebnahme

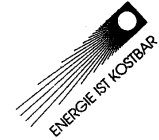
Zusätzlich sind relevant:

- Häufigkeit einer Vollladung mit kompletter Umwandlung des entladenen Materials
- Verweildauer im entladenen Zustand und mit Säureschichtung
- Überladung (Insgesamt produzierte Gasmenge)
- Dauer von Ruhezuständen im vollgeladenem Zustand
- Ladekennlinie, Kennlinienparameter und Ladegerätetechnik (z.B. Stromripple)
- Gleichmäßigkeit der Temperatur

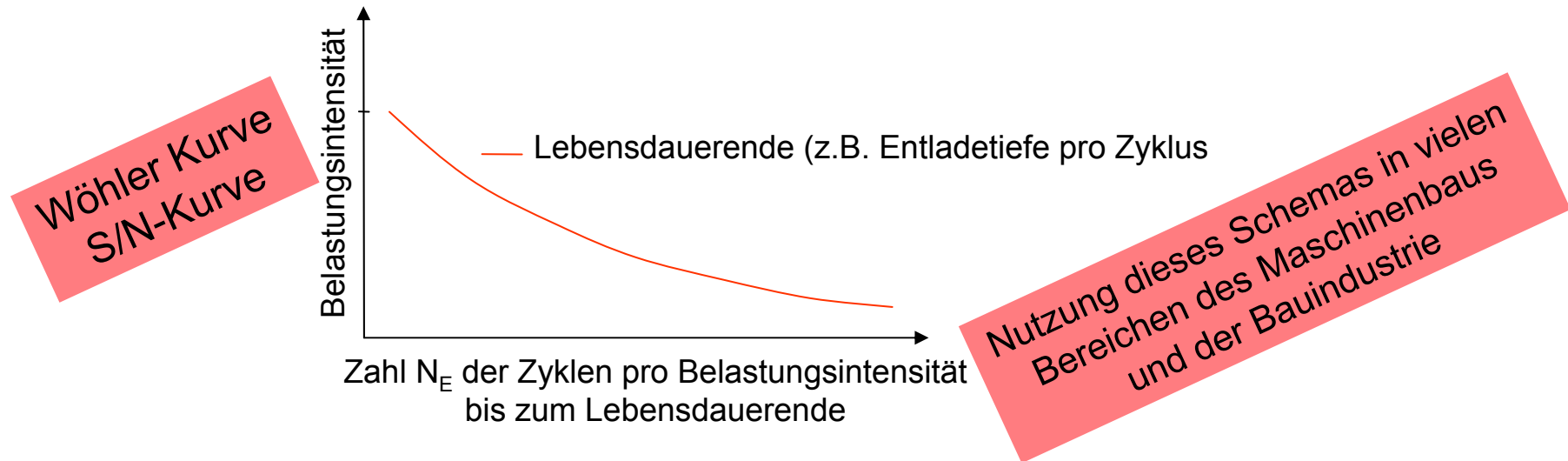
Problem:

- Ende der Nutzungsdauer wird unterschiedlich definiert (Kapazität bei Nennbedingungen um 20%, 40% oder 50% gesunken)
- **Batterien unterliegen komplexen Belastungsprofilen**, die sich gegenseitig verstärken und nicht einfach addiert werden können.

Lebensdauer



Lebensdauermodell bei schwankenden Belastungen "Zykluszahlmodell" oder "gewichtetes Ah-Modell"



N_E : Zahl gleicher Belastungen bis zum Lebensdauerende,

n_E : Zahl der tatsächlichen Belastungen während des Betrachtungszeitraums

Anteil der Lebensdauer, der durch Belastungstyp "E" verbraucht wurde = $n_E \times 1/N_E$

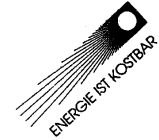
Lebensdauerende wenn $\sum n_E \times 1/N_E = 1$

Annahmen:

1. Einzelbelastungen führen nur zu einer geringen, inkrementalen Schädigung.
2. Der Verbrauch von Lebensdauer durch eine Belastung hängt nicht von der vorhergehenden Belastungen oder der insgesamt bereits erfolgten Schädigung ab.
3. Belastungen sind statistisch verteilt oder hängen nicht von der Reihenfolge ab.

11

Lebensdauer

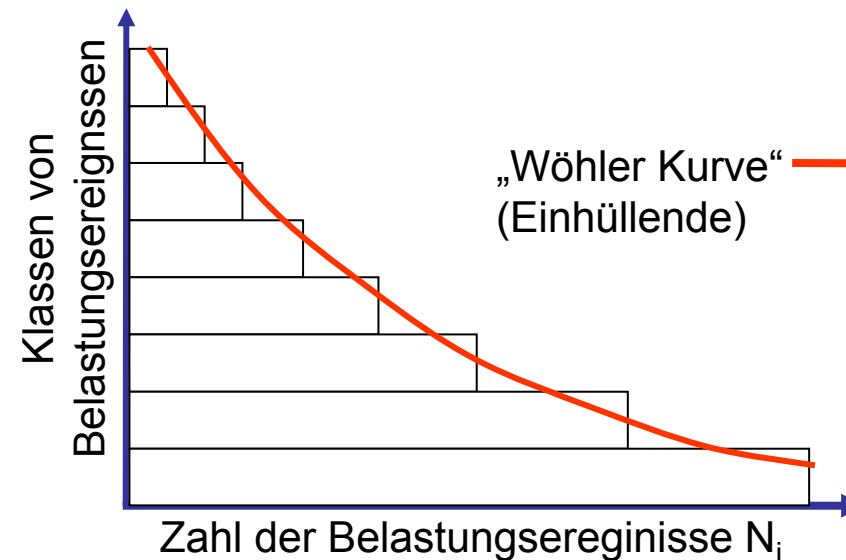


Tests bei komplexen/stark veränderlichen Betriebsbedingungen Betriebsparameter mit Auswirkungen auf die Lebensdauer

Beispiele für Belastungsklassen:

1. Überladen mit hoher Temperatur
2. Entladung bis 20 % Entladetiefe
3. Entladung bis 80% Entladetiefe
4. Betrieb im teilentladetem Zustand und langer Zeit bis zur nächsten Vollladung
5. Ruhephase im teilentladetem Zustand

IMMER gefolgt von einer Vollladung,
weil sonst die Schädigung von der
Reihenfolge der Ereignisse abhängen würde!



N_E : Zahl gleicher Belastungen,

n_E : Zahl der tatsächlichen Belastungen

Anteil der Lebensdauer, der verbraucht wurde = $n_E \times 1/N_E$

Lebensdauerende wenn $\sum n_E \times 1/N_E = 1$

Zyklenzähl-Modell

1. Jedes Ereignis muss durch eine Vollaadung abgeschlossen werden, weil sonst die Schädigung pro Ereignis nicht mehr unabhängig von der Reihenfolge ist.
2. Jedes Ereignis schädigt die gleichen Komponenten bzw. die Batterie als ganzes. Eine "selektive Schädigung von Komponenten ohne Einfluss auf andere Komponenten entwertet den Ansatz.
3. Es müssen so viele unterschiedliche Klassen gebildet werden, bis die Nutzung der Batterie vollständig in diese Klassen abgebildet werden kann.

Für andere Anwendungen müssen andere Belastungsklassen gebildet werden.

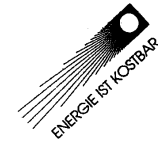
4. Da es nicht möglich ist, für jede Klasse die Zahl N_E (Zahl der Belastungen, die innerhalb der Lebensdauer möglich ist wenn keine andere Belastung auftritt) zu ermitteln, müssen ausgehend von Referenzwerten Abschätzungen getroffen werden.

Zyklenzähl-Modell

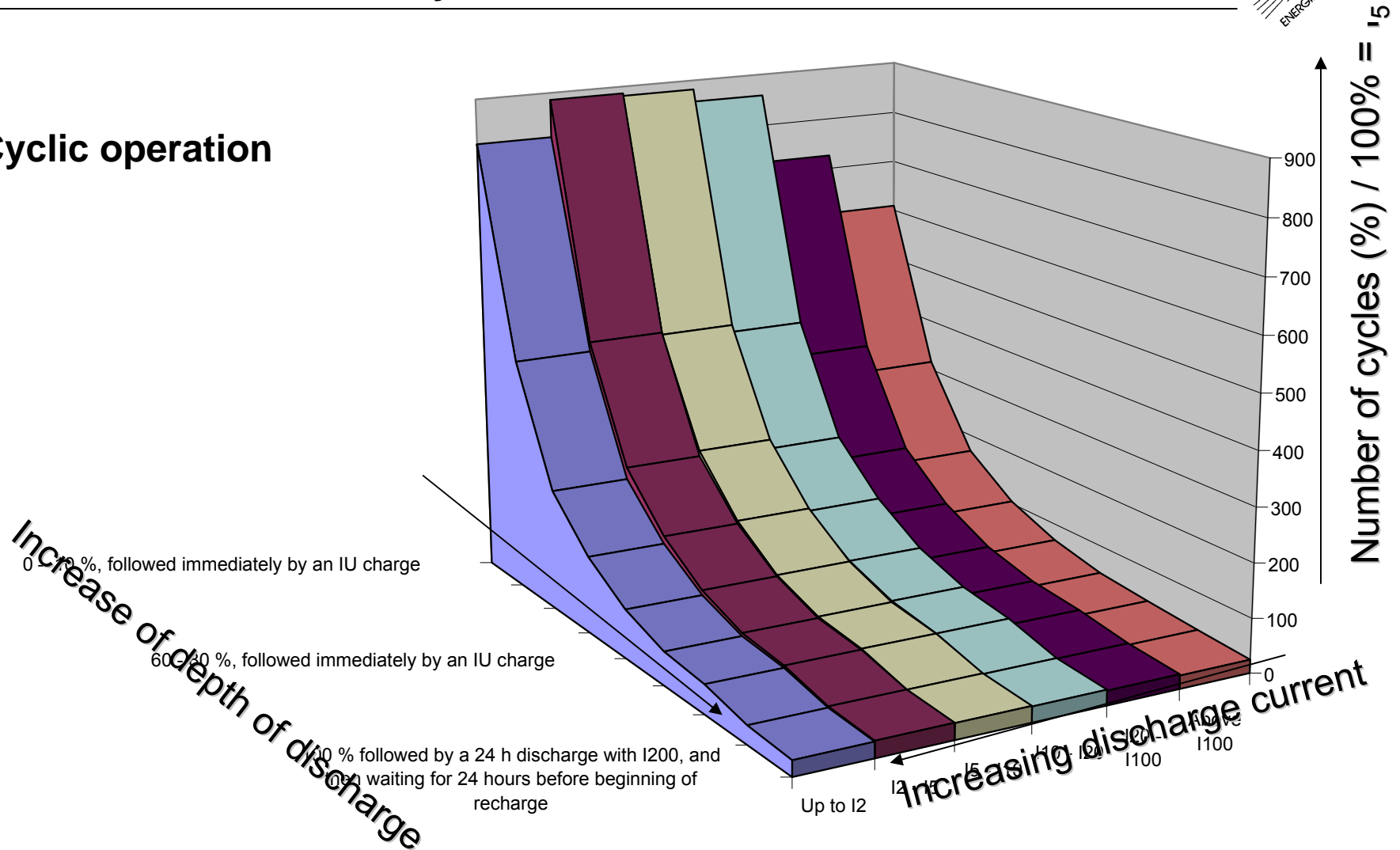
Drei Belastungsklassen

- Ladeerhaltungsbetrieb
Lebensdauer ist von der Temperatur, der Ladespannung und der Zahl kurzer Hochstrombelastungen abhängig
- Zyklische Belastung
Lebensdauer ist vom Belastungsstrom und der erreichten Entladetiefe abhängig.
Annahme: Batterie wird entladen und dann wieder vollgeladen, es gibt keine kurzen Ladephasen während der Entladung und keine kurzen Entladephasen während des Ladens sowie keine Ruhezeiten im teilentladetem Zustand
- Zyklisieren im teilentladetem Zustand
Erste Ladung nach einer kontinuierlichen Entladphase wird vor Erreichen der Volladung abgebrochen und eine neue Entladung beginnt.

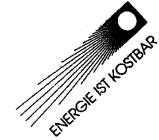
Lebensdauer Zyklenzähl-Modell



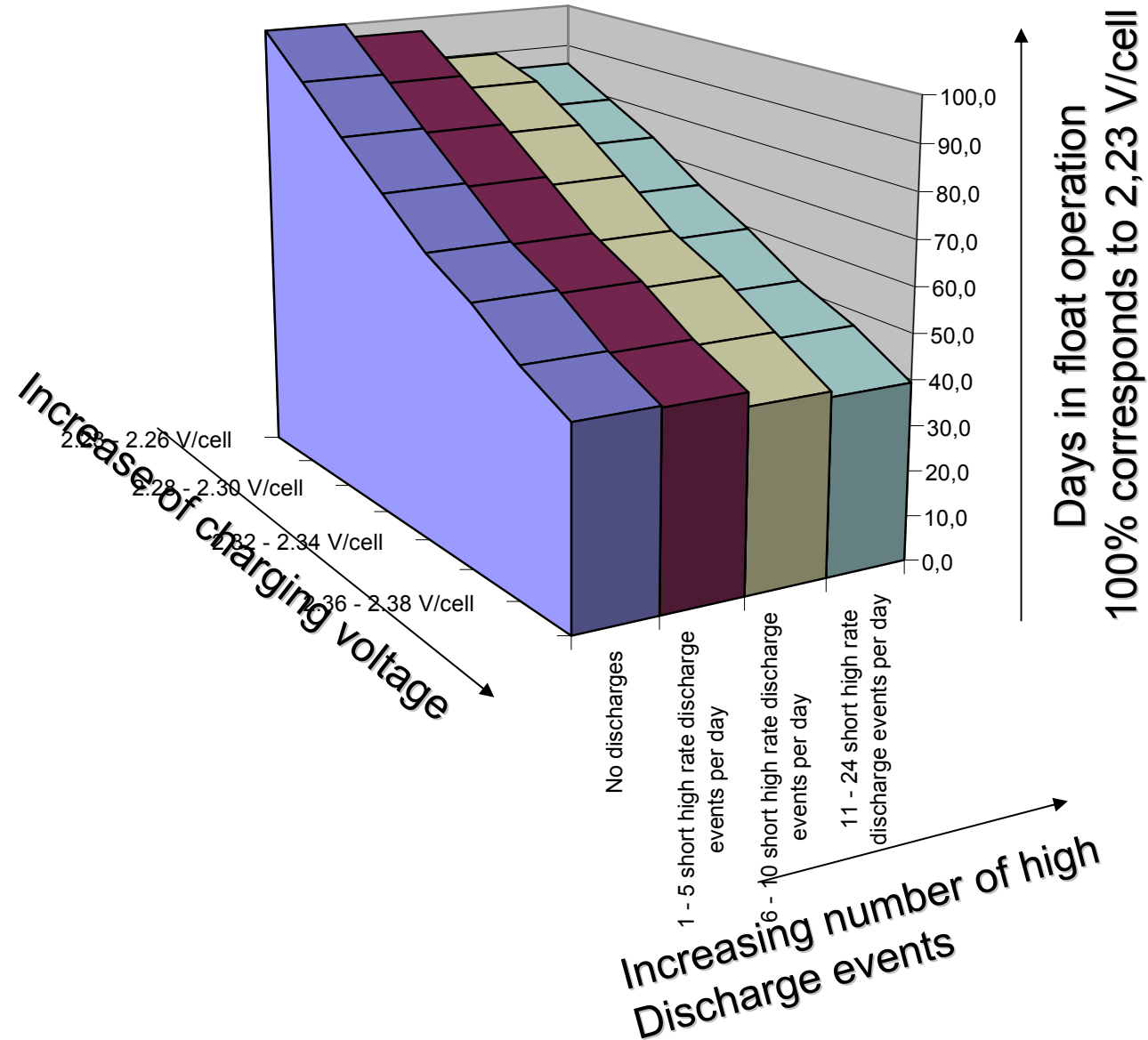
Cyclic operation



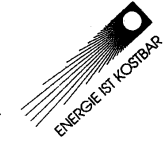
Lebensdauer zyklenzähl-Modell



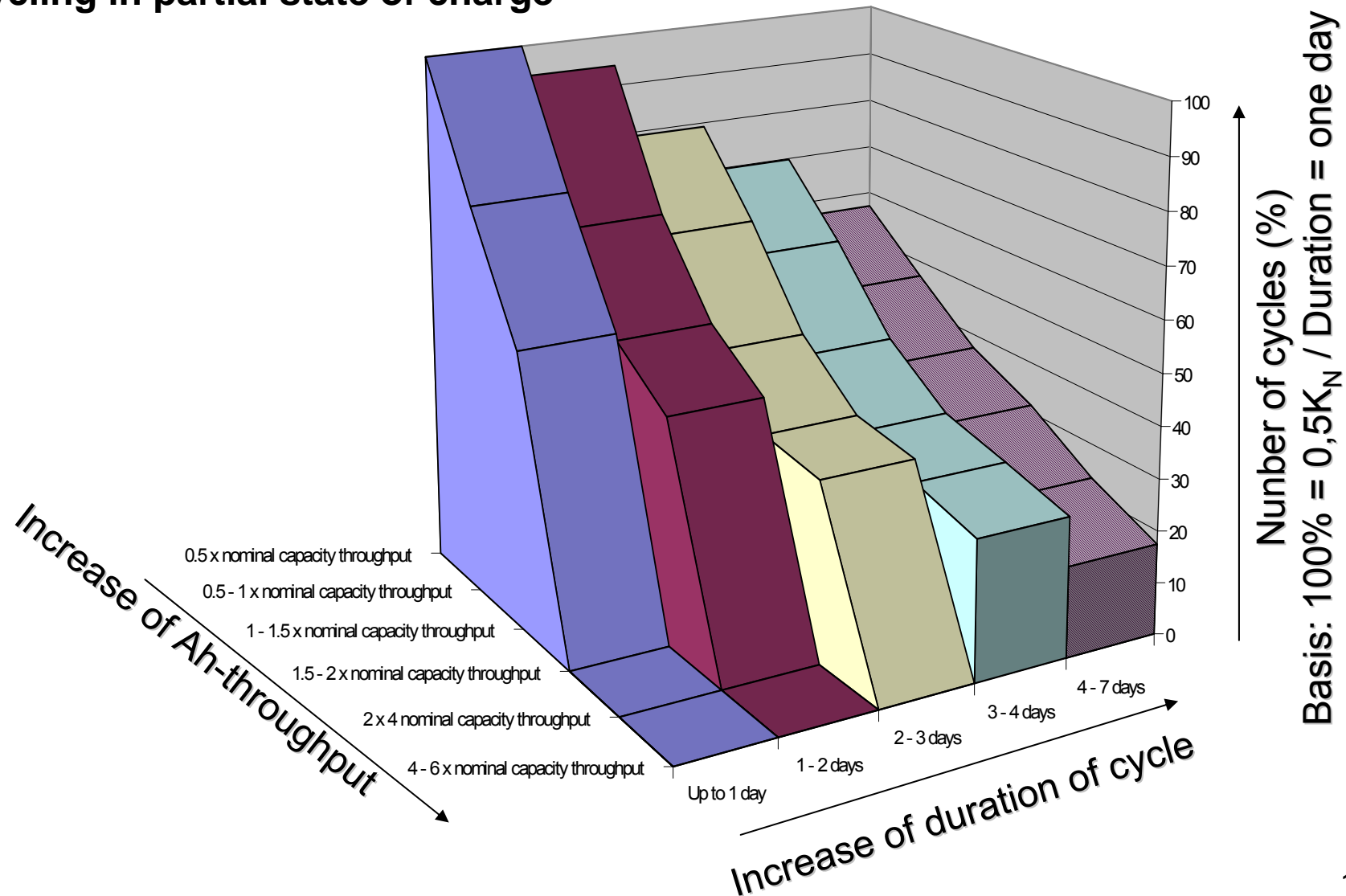
Float operation



Lebensdauer Zyklenzähl-Modell



Cycling in partial state of charge



Gewichtetes Ah-Durchsatz-Modell

Das Ende der Lebensdauer ist erreicht, wenn eine bestimmte Ah-Menge aus der Batterie entnommen wurde.

Die unterschiedlichen Belastungen der Batterie bei unterschiedlichen Entladebedingungen werden durch einen Gewichtungsfaktor w_E berücksichtigt, der pro Belastungsklasse unterschiedlich ist (w_E kann kleiner und größer als 1 sein):

Effektiver Ah-Durchsatz pro Ereignis = $w_E \times Ah_E$

Ende der Lebensdauer:

Maximaler Ah-Durchsatz = \sum effektiver Ah-Durchsatz = $\sum w_E \times n_E \times Ah_E$

Der ungewichtete Ah-Durchsatz kann kleiner oder größer als der maximale Ah-Durchsatz bei Nennbedingungen ($w_E = 1$) sein!

Ah_E : Ah-Durchsatz pro Ereignis E

n_E : Zahl der Ereignisse E, die bereits stattgefunden haben oder erartet werden

w_E : Gewichtungsfaktoren für die möglichen Ereignisse E

Gewichtetes Ah-Durchsatz-Modell

Im Lebensdauermodell des Fraunhofer-Instituts (ISE, Freiburg) wird der Faktor w_E wie folgt quantifiziert (Details sind komplexer):

Tiefe der Entladung

Je tiefer die Batterie entladen wird, desto höher ist der Faktor. Bei Zwischenladung bleibt der Faktor konstant bis entweder die Vollladung erreicht wird (Rücksetzen auf 1) oder die Batterie noch tiefer entladen wird (Faktor wird vergrößert)

Dauer der Entladung bis zur nächsten Vollladung

Der Belastungsfaktor steigt mit der Dauer unabhängig vom Ladungsdurchsatz bzw. Ladezustand an.

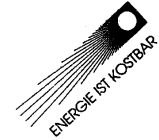
Temperatur

Bei Temperaturen über 20 °C Verdoppelung des Faktors alle 10 °C.

$$w_E = w_1 \times w_2 \times w_3$$

Die Faktoren bzgl. Entladetiefe und Zeit zwischen Vollladungen werden durch Vergleich mit Messungen gefittet.

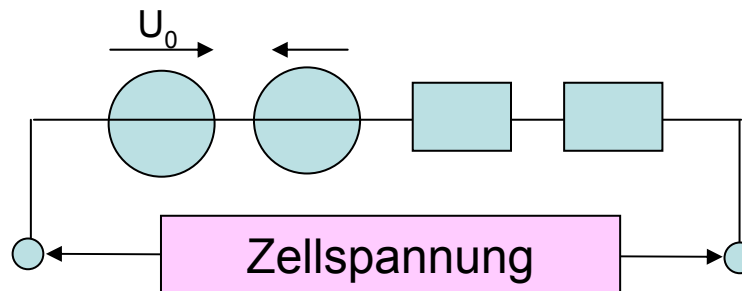
Lebensdauer



Warum kein Shepherd Modell oder andere Ersatzschaltbildmodelle?

$$U_{\text{Zelle}} = U_{o,d} - G_d \times (Q_0 - Q_t) + r_d \times I + k_d \times I \times Q_0 / (Q_0 - Q_t)$$

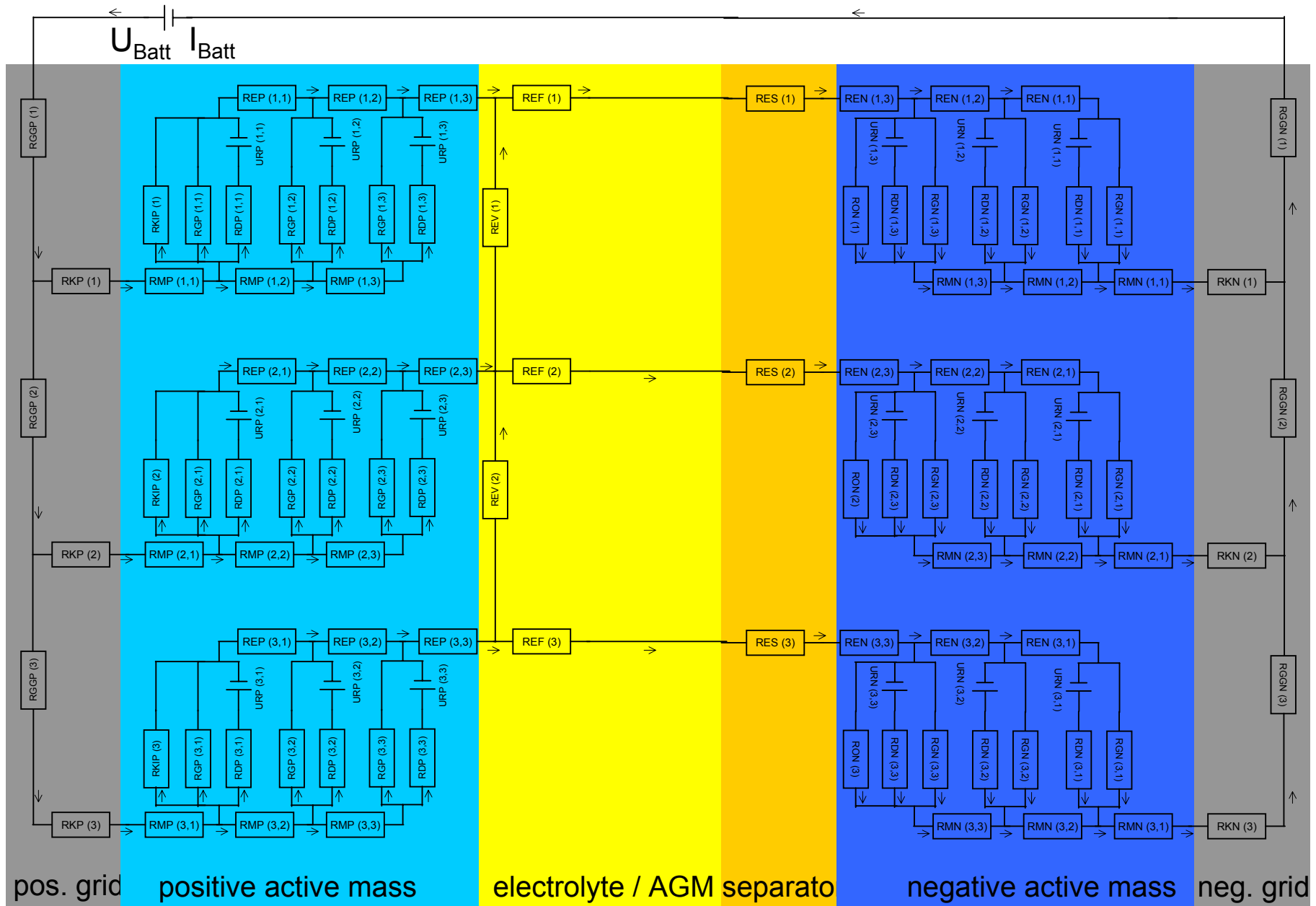
- d: Index, der Gültigkeit des Modells für die Entladerichtung anzeigt
- U_o : Ruhespannung der Batterie
- G: Elektrolytkoeffizient der Zellenspannung
- Q_0 : Gesamte aktive Masse der Elektroden
- Q_t : Zum Zeitpunkt der Betrachtung bereits umgewandelte aktive Masse
- r: ohmscher Widerstand der Zelle
- K: Parameter der Durchtrittsüberspannung



Die Auswirkungen einzelner Belastungsfaktoren auf die Parameter der vorhandenen Modelle können nicht mathematisch dargestellt werden. Grund: mangelndes Wissen!

Vorteil von Modellen wäre:

Die Eigenschaften der Batterie durch Alterung würden ständig mitberechnet!

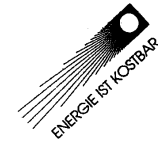


Aber so geht es doch!

Gesamtsystem für eine Lebensdauerprognose

1. Betriebsbedingungen:
Verlauf von Strom, Spannung, Temperatur (und Ladezustand als abgeleitete Größe)
2. Belastungsfaktoren:
Namen von bestimmten Teilbereichen der Betriebsbedingungen, deren Auswirkungen auf die Lebensdauer bekannt sind (z.B. Zeit zwischen zwei Volladungen).
 - Intensität der Belastungsfaktoren kann quantitativ beschrieben werden.
 - Belastungsfaktoren initiieren Alterungsprozesse oder beschleunigen ihren Verlauf.
3. Klassifizierung von Anwendungen
Die Summe der Belastungsfaktoren beschreibt die Anwendung eindeutig, wenn die Belastungen statistisch verteilt sind.
Batterien, die einen hohe Robustheit gegenüber den, einer Klasse von Anwendungen entsprechen Belastungsfaktoren zeigen, sind für diese Anwendung besonders geeignet.
4. Lebensdauererests für einen bestimmte Klasse von Anwendungen
Tests, die die Belastungsfaktoren wiederholen, die für die Klasse von Anwendungen typisch sind.

Lebensdauer

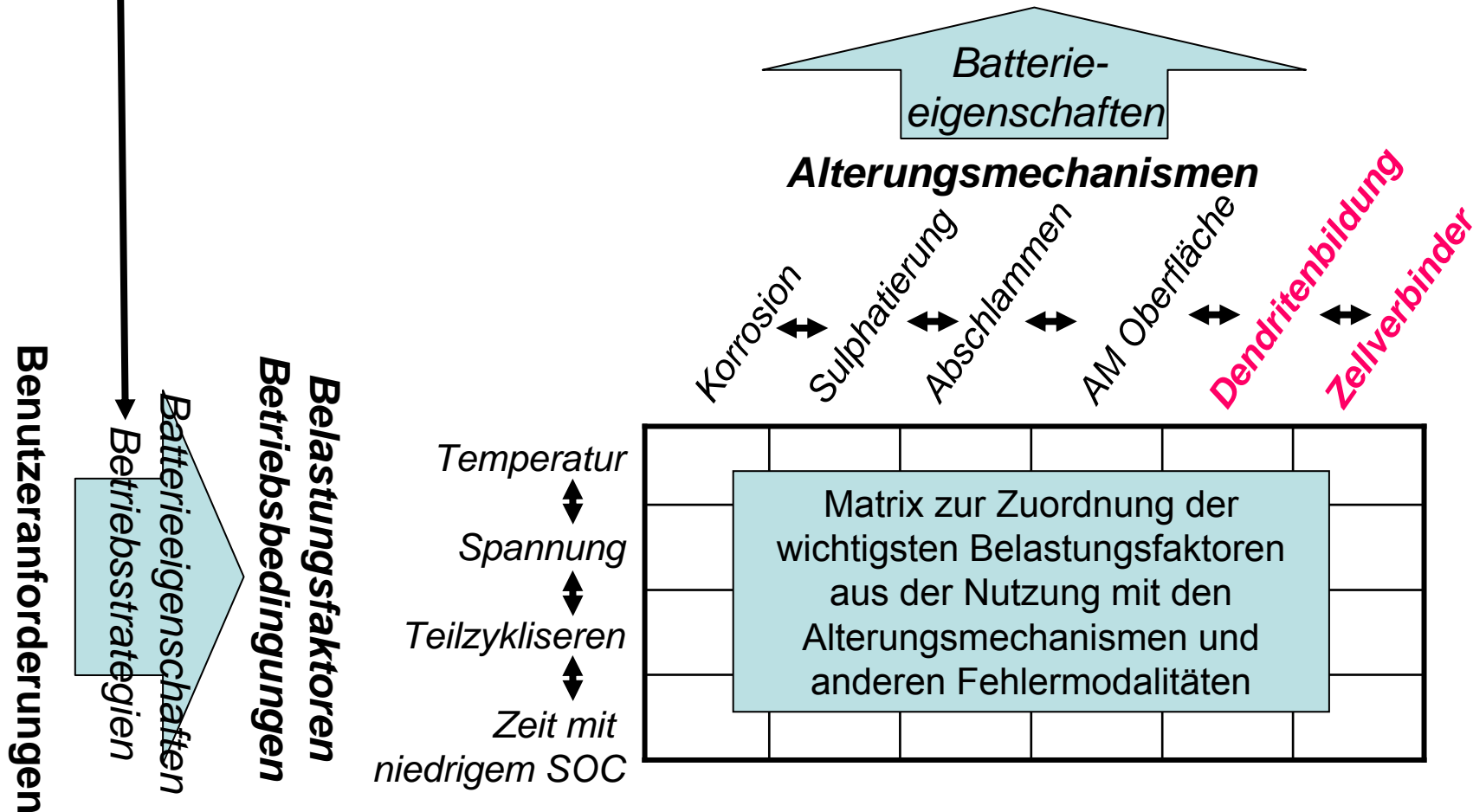


Konzept für Lebensdauervorhersage

OK / Nicht OK = Ende der Lebensdauer

----- Filter

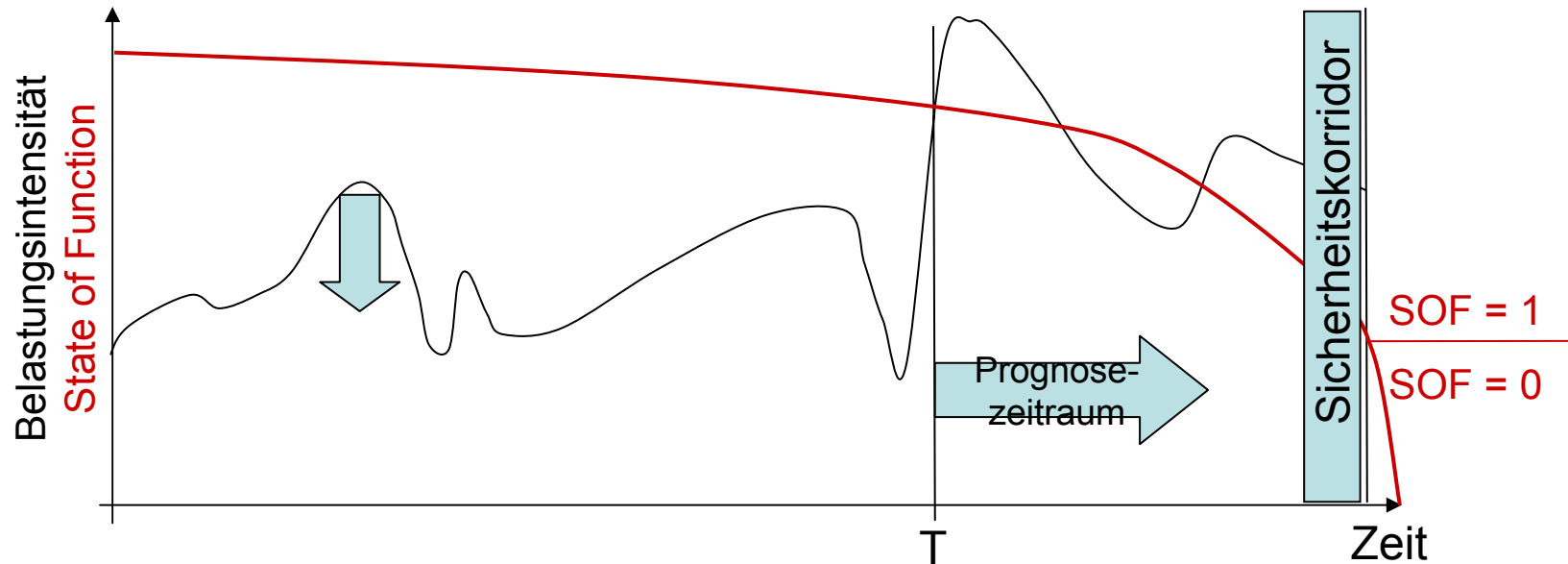
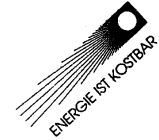
Auswirkung auf Eigenschaften / State of function



Ziel von Lebensdauerprognosen

1. Lebensdauerprognose für Planung, Entwicklung und Produktauswahl
2. Lebensdauerprognose für Wartung, Reparatur und Zuverlässigkeit
3. Lebensdauerprognose für die Betriebsführung

Lebensdauer



Zweck	Charakterisierung	Belastung	Sonstiges
Für Planung, Beschaffung und Entwicklung	Genau charakterisiertes Durchschnittsprodukt	Lastkollektiv-Statistik	Nur für gesamte Nutzungsdauer relevant
Für Wartung und Reparatur	Genau charakterisiertes Einzelprodukt; Zustandsdiagnose erforderlich	Erwartetes Lastkollektiv innerhalb der nächsten Wartungs- oder Eingriffsperiode	Für Prognosezeitraum zum Zeitpunkt T
Für Betriebsführung Verringerung der Belastungsintensität	Genau charakterisiertes Durchschnitts- und Einzelprodukt – Zustandsdiagnose	Erwartetes Lastkollektiv innerhalb der nächsten Wartungs- oder Eingriffsperiode	Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Belastungen, Alterung und Auswirkungen auf Funktion