

Eigenschaften einer Nickel-Eisen-Batterie

Überblick

Vorteile

Eigenschaften

Laden

Ladungserhaltung

Kapazität

Wirkungsgrad

Kosten

Systemtechnik

Netzgekoppelte Anlagen

Solarladeregler

Ampèrestundenmeter

Wechselrichter und Lader

Graphische Darstellung der Messergebnisse

Bild 1 Typischer Lade/Entlade-Zyklus

Bild 2 Kapazitätsmessung

Tabelle 1 Entnehmbare Kapazitäten bei verschiedenen Strömen

Bild 3 Normales und schnelles Laden

Bild 4 Verhalten bei sehr hohen Lasten bis zu 340W/17A

Bild 5 Hohe Ströme: Laden (10A) und Entladen (130W)

Bild 6 Laden bei einer niedrigen Spannung (31V)

Bild 7 Zyklisches Verhalten bei sehr niedrigem Ladezustand

Bild 8 Zyklisches Verhalten bei mittlerem Ladezustand

Bild 9 Zyklisches Verhalten bei hohem Ladezustand

Anhang

Bild 10 Selbstentladung

Bild 11 Ladewirkungsgrad

Bild 12 Wasserverbrauch

Bild 13 Lebensdauer

Bild 14 Kapazität in Abhängigkeit vom Entladestrom

Bild 15 Messaufbau

Bild 16 Peukertkoeffizient

Überblick

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse einer umfangreichen Messreihe von Lade- und Entladezyklen an einer Nickel-Eisen-Batterie (NiFe-Batterie) des Typs Changhong NF-S.

Nickel-Eisen-Batterien sind in Europa etwas in Vergessenheit geraten. Das liegt einerseits an ihrem hohen Anschaffungspreis und andererseits sind sie von der Nickel-Kadmium-Batterie (NiCd-Batterie) weitgehend verdrängt worden.

Changhong stellt sowohl NiFe-Batterien wie auch NiCd-Batterien zum selben Preis her. Die Herstellung und die Eigenschaften der beiden Typen unterscheiden sich wenig voneinander. Dagegen ist der Unterschied zu den gebräuchlichen Blei-Säure-Batterien groß.

Weil der Hersteller allen Größen der Reihe NF-S dieselben Eigenschaften zuschreibt, wurde die zweitkleinste Batterie mit der Nennkapazität von 20Ah (NF20-S) gewählt, um mit wenig Aufwand viele Zyklen in kurzer Zeit durchlaufen zu können.

Als Systemspannung wurde 24V gewählt. 12V-Systeme können zwar auch realisiert werden, aber Lader und Wechselrichter mit einer Systemspannung von 12V sind meistens etwas teurer. Für Systeme mit einer Batteriespannung von 48V besteht meistens kein nachvollziehbarer Grund, die Ströme sind zwar nur halb so groß, aber sie fließen eben auch nur auf den ein bis zwei Metern Kabel zwischen der Batterie und der Elektronik. Andererseits gibt es dann 40 statt 20 Zellen zu installieren und überwachen.

Alle Messungen wurden bei 20°C durchgeführt. Das Verhalten bei anderen Temperaturen ist in der Changhong-Dokumentation zu finden.

Viele Messungen wurden mit 3Ah-Zyklen gemacht. Wenn diese scheinbar geringe Ladungsmenge übersetzt wird auf eine typische Solaranlage mit einer 600Ah-Batterie, dann sind das 30mal soviel, nämlich 90Ah. Man kann davon bei einem Strom von 30A bei 26V über 88Ah wiedergewinnen. Die Integration von Spannung und Strom während der 2.9stündigen Entladung ergibt für die 20Ah-Batterie 76Wh, das entspräche 2.3kWh aus einer 600Ah-Batterie. Berücksichtigt man auch den Wirkungsgrad des Wechselrichters, dann hat man damit über 2.1kWh zur Verfügung und knapp drei Stunden lang 10A bei 220V (die Ausgangsspannung ist bei den meisten besseren Wechselrichtern einstellbar, das spart auch Strom und Lampenlebensdauer!).

Die Kapazität der Batterie ist überraschend hoch, in den meisten Betriebsfällen konnten statt der erwarteten 20Ah über 30Ah genutzt werden.

Der Innenwiderstand der Batterie ist sehr niedrig, der Peukertkoeffizient liegt nahe bei 1. Entsprechend kann mit sehr hohem Strom geladen werden.

Die Batterie kann auch bei verhältnismäßig niedrigen Spannungen in akzeptabler Zeit aufgeladen werden.

Der Wirkungsgrad liegt in vernünftig gewählten Betriebsbereichen über 85%, der Ah-Wirkungsgrad bei nahe 100% (bei 20°C).

Vorteile

Nickel-Eisen-Batterien können ohne Einschränkung in sehr kurzer Zeit aufgeladen werden. Es ist möglich, eine NiFe-Batterie ohne übermäßige Erwärmung in einer Stunde halb aufzuladen und damit wieder uneingeschränkt benutzbar zu machen.

Beim Laden aus nicht steuerbaren Quellen (Sonne/Wind/Wasser) gibt es weniger Verluste durch die Spannungsbegrenzung, wie sie bei Bleibatterien eingehalten werden muss.

Es gibt keine Schichtung des Elektrolyten und damit entfällt auch die regelmäßige Gasungsladung (Egalisierung), die auch Energie kostet.

Die Selbstentladung ist äußerst gering.

Man kann die Batterie ständig in einem teilentladenen Zustand betreiben.

Eine falsche Einstellung der Ladeparameter (Ströme und Ladeschlussspannungen) hat keine nennenswerten Einflüsse auf die Lebensdauer.

Ein Ausfall der Überwachung führt auch über längere Zeit trotz Tiefentladung oder Überladung nicht zu Schäden an der Batterie.

Wenn eine Zelle nicht richtig funktioniert, dann führt dies nicht zu ihrer Zerstörung oder wie bei Bleibatterien möglicherweise gar zum Verlust der gesamten Batteriebank.

Sie ist reparierbar durch Austausch des Elektrolyten.

Geringe Temperaturempfindlichkeit

Und es gibt keine unvorhergesehenen Löcher in der Hose...

Die Eigenschaften und auch die Anschaffungskosten von Nickel-Eisen-Batterien und Nickel-Kadmium-Batterien sind ähnlich. Darüber hinaus enthalten die NiFe-Zellen weniger bedenkliche Materialien.

Nickel-Eisen-Batterien haben natürlich nicht nur Vorteile. Der wesentliche Nachteil ist die hohe Spannung, bei der die Batterie geladen werden muss. Das reduziert zwar nicht so sehr den Wirkungsgrad, überfordert aber die üblichen Batterielader und Wechselrichter-Lader-Kombinationen. In vielen Fällen kann der Nachteil der hohen Ladespannung durch 19 statt 20 Zellen im 24V-System verringert werden. Das ist besonders dann sinnvoll, wenn die Batterie relativ groß ist und die maximalen Ströme im normalen Betrieb die Spannung nicht zu sehr

einbrechen lassen. Damit reduziert man die minimale Ladespannung von zum Beispiel 33V beim Laden mit einem Dieselgenerator auf 31.5V.

Beim Entladen entspricht eine Abschaltspannung von 20V in einer 20-Zellen-Batterie einer Abschaltspannung von 19V in einer 19-Zellen-Batterie. Da die meisten Wechselrichter bis 19V herunter arbeiten, kann also auch bei hohen Lasten sehr tief entladen werden. Bei kleinen und mittleren Lasten ist der Unterschied ohnehin sehr gering, da die Restkapazität im Spannungsbereich 19 bis 24V bei nur etwa 15% liegt (s. z.B. [Bild 2](#)).

Eigenschaften

Laden

Die Spannung von NiFe-Batterien ist kein geeignetes Maß für die Überwachung der Kapazität beim Laden. Das normale Ladeverfahren basiert einfach auf der Tatsache, dass man soviel nachladen muss, wie man der Batterie entnommen hat, wobei auch der Ladewirkungsgrad zu berücksichtigen ist. Dabei ist es nicht wichtig, den Ladezustand genau zu kennen, da man die Batterie bei zu langem Laden nicht beschädigt. Der Hersteller empfiehlt, die Batterien in acht oder vier Stunden (Schnellladung) aufzuladen. Man muss die doppelte Nennkapazität laden, da man der Batterie daraufhin auch nahezu soviel entnehmen kann. Wenn man dagegen die Batterie bei einer relativ hohen Spannung lädt und das Laden beendet, wenn der Strom zurückgeht, ist die Batterie noch nicht komplett geladen (s. [Bild 1](#)).

Der Ladestrom für die vierstündige Schnellladung ist der C5-Wert/2 Stunden, für die 20Ah-Batterie also 10A, für die normale achtsündige Ladung 5A. Auch bei der Schnellladung mit 10A wird die Batterie nur etwa 5 °C wärmer als die Umgebung. Die kleine 20Ah-Batterie hat eine gut dreimal so große Oberfläche pro Ah wie die 1000Ah-Batterie, daher wird eine große Batterie die Wärme nicht so gut abgeben können und damit sicher deutlich wärmer. Da die Temperatur bei der Schnellladung nur etwa halb so lange wie bei der Normalladung erhöht ist, geht bei der Schnellladung nicht viel Energie verloren. Um das zu zeigen, wurden in zwei aufeinander folgenden Zyklen eine Stunde mit 10A geladen und zwei Stunden mit 5A und jeweils mit 2.5A entladen (s. [Bild 3](#)). Der Spannungsunterschied der beiden Ladeverfahren ist ziemlich hoch, aber da die erhöhte Spannung nur halb so lange aufrecht erhalten wird, sind die Verluste dennoch kaum höher.

In vielen Fällen wird man die Batterie nicht schnell aufladen müssen. Bei niedrigen Spannungen (Beispiel 31V s. [Bild 6](#)) lässt sich die Batterie auch komplett aufladen.

Die Batterie sollte möglichst nur dann vollständig aufgeladen werden, wenn man wie in solaren Inselanlagen immer wieder Überschüsse hat.

Wenn ein Dieselgenerator die Hauptstromquelle ist, hat man den besten Systemwirkungsgrad mit hohem Ladestrom. Der Generator kann dann im Bereich seines besten Wirkungsgrades laufen und die Betriebsdauer ist kurz. Ideal ist ein Nachladen in mittleren Ladezuständen bei einer Restkapazität von 25% innerhalb von zwei Stunden mit einem Strom von C5/2 auf 75%. Das ist wesentlich günstiger als ein Nachladen von 50 auf 100%. Ein weiterer Vorteil ist dabei, dass weniger Wasser verloren geht, wenn die Spannung selten hochgehalten wird.

Ladungserhaltung

Die NiFe-Batterie entlädt sich selbst nur sehr langsam. Sie verliert bei 20°C in einem mittleren Ladezustand laut Herstellerangabe 0.1% ihrer Kapazität pro Tag (s. [Bild 10](#)). Es entspricht einem Strom von etwa 1.5mA bei der 20Ah-Batterie, was durch die Messung bestätigt wird. Nach über 40 Stunden Ruhezeit in der Ladeerhaltungsspannung von 28.5V in fast vollgeladenem Zustand liegt der Strom bei 2.3mA (65mW). Übertragen auf eine 24V/1000Ah-Batterie bedeutet dies ein Verlust von 3W, das ist erheblich weniger als der Verbrauch der normalerweise angeschlossenen Überwachungselektronik mit dem Lader. Die Selbstentladung von Bleibatterien ist etwa zehnmal so hoch.

Der Hersteller empfiehlt eine Ladeerhaltungsspannung zwischen 1.42 und 1.45V/Zelle (28.4 bis 29.0V). Das Halten dieser Spannung hat wegen der geringen Verluste auch weniger eine Bedeutung als Ladungserhaltung als die Spannung, auf der man die Batterie im Pufferbetrieb wie zum Beispiel in unterbrechungsfreien Stromversorgungen halten sollte.

Kapazität

Die Kapazität wurde gemessen, indem die Batterie zuvor vollständig aufgeladen wurde. Danach wurde sie durch eine einstellbare Stromsenke mit konstantem Strom entladen. Es wurden vier verschiedene Messungen

durchgeführt, mit einer Last von 0,4, 1,0, 2,5A und mit ca. 150W. Die Batterie wurde jeweils bis herunter auf 6V tiefentladen. Die Kapazität ist bei diesem kompletten Entladen vom Strom praktisch unabhängig, sie liegt zwischen bei 33Ah beim Entladen mit Strömen zwischen 400mA und 6A.

Der Innenwiderstand der Batterie sorgt dafür, dass bei höheren Strömen eher die Endspannung erreicht ist, für die das System konzipiert wird. Diese Endspannung liegt sinnvoller Weise zwischen 19 und 23V.

Die Kapazität der Batterien NF-S wird als C5-Wert (also für 5-stündige Entladung) angegeben, für Bleibatterien gelten meistens C20 oder gar C120-Werte. Normalerweise wird der Zusammenhang der C-Werte mit dem Peukertkoeffizienten beschrieben. Für eine Batterie mit einem Widerstand von Null ist dieser Koeffizient 1. Für Bleibatterien liegt der Koeffizient bei 1.25.

Die Angabe eines Peukertkoeffizienten scheint für die NiFe-Batterie nicht besonders sinnvoll zu sein. Nimmt man aus den Herstellerangaben z.B. die Werte für die 18stündige und die 48 stündige Entladung, dann bekommt man bei einer Endspannung von 1.00V den Peukertkoeffizienten 1.04, bei einer Endspannung von 1.16V 1.08. Nimmt man die Werte zwischen den Endspannungen von 20 bis 23V aus der Messung von [Bild 2](#), bekommt man Peukertkoeffizienten, die bei 1.0 liegen. Die Berechnung findet sich im Anhang.

Die Vermutung liegt nahe, dass weniger der Innenwiderstand für die verfügbare Kapazität bestimmend ist als der Ablauf des chemischen Prozesses bei verschiedenen Strömen. Wie man sieht, heben sich die beiden gegenläufigen Effekte weitgehend auf.

Wirkungsgrad

Wegen des hohen Spannungsunterschiedes zwischen Laden und Entladen erwartet man einen schlechten Wirkungsgrad. Je nach Betriebszustand variiert der Wirkungsgrad jedoch beträchtlich. Bei einer fast vollen Batterie ist er niedrig (s. [Bild 9](#)). Das hat zumindest in autarken Stromversorgungen wenig Bedeutung, da man bei fast voller Batterie ohnehin den Strom vom Laderegler zurücknehmen muss.

Bei mittleren Ladezuständen ist der Wirkungsgrad dagegen vergleichbar mit dem von Bleibatterien. Die Grafik in der Changhong-Dokumentation zeigt den Wirkungsgrad bezogen auf die Ladungsträger (also die Kapazität in Ah), und das sieht natürlich sehr gut aus. Man kann aber kaum mehr als 85% der gespeicherten Energie wieder aus den Batterien herausziehen. Bei den NiFe-Batterien ist es wichtig, die Spannung beim Laden nicht zu hoch werden zu lassen. Daher auch die Messung bei einigen Zyklen bei mittlerer Restkapazität und frühem Nachladen ab 25V ([Bild 8](#)). Hier erreicht man einen Wirkungsgrad von über 85%, der auf die Kapazität in Ah Ladewirkungsgrad bezogene Wirkungsgrad ist sehr hoch und entspricht der Herstellerangabe ([Bild 11](#)). Der Wirkungsgrad ist viel mehr vom Ladezustand als von den Lade- und Entladeströmen abhängig ([Bild 3](#)). Der Wirkungsgrad von Batterien ist kein Wert, mit dem die Hersteller von Batterien oder Elektroautos werben, er liegt zu oft unter 50%...

Kosten

Wegen der grundsätzlich verschiedenen Eigenschaften von Blei- und NiFe-Batterien ist es nicht einfach, zwei Batteriesätze zu vergleichen. Bleibatterien werden meistens so gewählt, dass im normalen Betrieb nur 50% der Nennkapazität genutzt werden. Damit wird die sonst leicht mögliche Beschädigung der Bleibatterien vermieden. NiFe-Batterien dagegen können ohne Weiteres immer wieder tiefentladen werden, dann ist eher eine vorzusehende Reserve bestimmend für die Entladetiefe.

Bei hohen Strömen hat eine Bleibatterie mit einer bestimmten C10-Nennkapazität eine geringere Kapazität als eine NiFe-Batterie derselben Nennkapazität, bei kleineren Strömen ist es umgekehrt (s. [Bild 13](#)). Auch dies macht einen Vergleich schwer.

In vielen Fällen kann man eine NiFe-Batterie mit 2/3 der C10-Nennkapazität einer Bleibatterie vergleichen. Dann ist der Preis der NiFe-Batterie vergleichbar mit dem für die OPzS/OPzV-Bleibatterien.

Die NiFe-Batterien kosten aber natürlich mehr als Blei-Säure-Batterien des Typs Gel und AGM.

Bezogen auf die gesamte Energie, die während der Lebensdauer in der Batterie zwischengespeichert wird, ist die NiFe-Batterie jedoch eine der preiswertesten überhaupt.

Wenn man bei einer Kalkulation die Wartungskosten, unvorhergesehene Ausfälle und die Ersatzbeschaffung berücksichtigt, dann sind NiFe-Batterien langfristig billiger als Bleibatterien.

Systemtechnik

Einsatz in netzgekoppelten Anlagen

Prinzipiell kann überschüssiger Strom in einer netzgekoppelten Anlage auch in das Netz eingespeist werden. Wegen der bislang fehlenden wirklich guten Speichermöglichkeiten kann man dazu die NiFe-Batterie verwenden. Dabei muss der Wirkungsgrad möglichst hoch sein. Da die Batterie problemlos ohne Aufsicht längere Zeit teilentladen betrieben werden kann, kann der Betriebsbereich freier gewählt werden als bei der Bleibatterie, und es geht nichts durch hohe Spannung oder Gasung verloren. Der günstigste Betrieb liegt bei 15 bis 30%-Zyklen im mittleren Ladezustand (s. [Bild 8](#)).

Dazu kommt noch die sehr lange Lebensdauer. Manche versuchen ihr Glück mit 12V-Gelbatterien mit ihren 500 Zyklen. In einer Anwendung in netzgekoppelten Anlagen kann man in zwanzig Jahren aber auf 5000 50%-Zyklen kommen, und so feiert selbst die NiFe-Batterie kaum ihre Volljährigkeit.

Es gibt zur Zeit keine günstigeren Stromspeicher in diesem Maßstab.

Solarladeregler

Heute benutzt man für Solaranlagen über 1 kW Leistung fast ausschließlich MPPT-Laderegler. (Diese entkoppeln die Modulspannung von der Batteriespannung, um die Solarmodule bei der Spannung maximaler Leistung (dem MPP) halten zu können.)

Während früher das wichtigste Argument für den Einsatz dieser etwas teureren Regler der Gewinn durch die bessere Anpassung an die Batterie und der zweitwichtigste der geringere Strom zwischen Solarmodulen und Regler war, ist heute der Preisunterschied zwischen den speziell zum Batterieladen konzipierten Modulen (mit der Nennspannung von 12 bzw. 24V) und den Module für die Netzeinspeisung mit Ihrer höheren Spannung so groß geworden, dass man letztere auch für Inselanlagen verwendet.

Nickel-Eisen-Batterien benötigen eine höhere Ladespannung, für die man eher leichter angepasste Module findet, aber entscheidend ist, dass es ungünstig ist, den Strom bei irgendeiner Spannung zu begrenzen, da dies meistens zu Verlusten führt. Dies ist also ein weiterer Grund für das Laden mit einem MPPT-Regler.

Bei Bleibatterien hat man diese Verluste regelmäßig, denn beim Laden in der Konstanzspannungsphase bei 28.8V wird der Strom zurückgenommen, obwohl die Batterie noch nicht voll ist. Der Regler fährt aus dem MPP heraus zu einer höheren Modulspannung. Das ist bei NiFe-Batterien nicht nötig, man kann den gesamten Strom von den Solarmodulen nutzen, bis die Batterie vollständig geladen ist.

In Solaranlagen ist der Strom durch das Verhältnis zwischen dem Strom von den Solarmodulen und der Batteriekapazität bestimmt. Ein typischer Fall ist eine 2kW-Anlage mit einem 80A-Regler an einer 600Ah-Batterie. Der Strom wird dann sehr oft bei 60A liegen. Dies entspricht dann den 2A bei der 20Ah-Testbatterie, die Spannung wird beim Laden sehr schnell auf 31V gehen und dann bei 33V stagnieren (s. [Bild 1](#)).

Wenn der Solargenerator relativ zur Batterie groß ist, dann kann es wegen der ständig erhöhten Spannung zu höheren Wasserverlusten kommen. Diese Verluste kann man durch das Einstellen einer Ladeschlussspannung (z.B. 32V) und einer langen Absorptionszeit (damit das Laden nicht abgebrochen wird) verringern.

Wenn die Solaranlage nicht genutzt wird, sollte die Ladeschlussspannung weit herabgesetzt werden.

Diese Empfehlungen sind nicht sehr präzise, es ist am besten, man stellt alle Werte vorläufig ein und optimiert die Anlage während des Betriebes. Man kann dabei kaum gravierende Fehler begehen.

Ampèrestundenmeter

Ein bilanzierendes Ampèrestundenmeter hat es nicht leicht mit einer NiFe-Batterie. Diese Messgeräte basieren meist darauf, dass die Batterie von Zeit zu Zeit vollständig aufgeladen wird. „Vollständig aufgeladen“ bedeutet, dass das Ampèrestundenmeter die Batterie eine Weile lang bei einer festen Ladeschlussspannung bei gleichzeitig niedrigem Ladestrom sieht. Die NiFe-Batterie hat jedoch keine Ladeschlussspannung. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Ladezustand, Spannung und Strom, aber diesen Zusammenhang kann man bei den üblichen Ampèrestundenmetern nicht darstellen. Die Festlegung der Kriterien, die erfüllt sein müssen, damit die Batterie als vollständig geladen gilt und der Ladezustand auf 100% zurückgesetzt wird, ist also ein besonderes Problem. Die Festlegung der „Ladeschlussspannung“ ist stark vom Ladestrom abhängig. Man kann bei relativ niedrigen Ladeströmen die Batterie näherungsweise als voll betrachten, wenn die Spannung zwei Stunden über

31V lag (vgl. [Bild 3](#) und [Bild 6](#)). Der Ladestromparameter als Schwelle zur Bestimmung des Ladezustandes wird auf einen hohen Wert gesetzt und bleibt damit unberücksichtigt.
Ein weiteres Problem ist der Peukert-Koeffizient, der für NiFe-Batterien kein gutes Maß ist (vgl. [Bild 13](#)).

Hier ein Beispiel für die Einstellung für die 20Ah-Batterie am Ampèrestundenmeter Studer BSP (die entsprechenden Parameter im Outback FN-DC in runden Klammern dahinter):
Kapazität {6001} (Battery Amp-hours) – 30Ah (wie hier gemessen)
Entladedauer/C-Wert {6002} – C5
Selbstentladekoeffizient {6019} – 3%
Nominaltemperatur {6020}
Temperaturkoeffizient {6021} – spielt keine Rolle, weil der Wert der Ladeschlussspannung sehr willkürlich ist
Ladewirkungsgrad {6022} (Charge Factor) – 90% (hängt sehr stark vom Betriebsbereich ([Bilder 1, 6, 7, 8, und 9](#)) und von der Temperatur ab ([Bild 11](#)))
Peukert-Koeffizient {6023} (im FN-DC nicht einstellbar, es ist für Bleibatterien konzipiert) – 1.05
Ladeschlussspannung {6024} (Charged Voltage) – 31.5V
Ladeschlussstrom {6025} (Charged Return Amps) -10A
Dauer, während der die Ladeschlussspannung überschritten und der Ladeschlussstrom unterschritten sein müssen {6026} (Time) – 2 Stunden

Einsatz mit Wechselrichter/Lader-Kombinationen

Die üblichen Wechselrichter/Lader-Kombinationen sind für Bleibatterien konzipiert. Im Einsatz mit NiFe- oder NiCd-Batterien operieren sie in der Nähe Ihrer Grenzwerte. Die meisten Geräte arbeiten im Bereich 19 ... 33V. Das ist gerade ausreichend. Wenn man die Batterien sehr schnell aufladen will, sind 35 bis 36V natürlich besser, aber es ist eben auch mit höheren Verlusten verbunden und in Solaranlagen nicht zu empfehlen. Die üblichen Lader haben meist eine relativ niedrige maximale Ladeschlussspannung, bei Outback ist 32V das Maximum, bei Studer 36V, aber wenn man die Temperaturkompensation verwendet, kann es passieren, dass die eingestellte Spannung nie erreicht und damit die Absorptionsphase nicht beendet wird.

Empfehlenswert ist eine Einstellung des Laders so, dass die Batterie nicht vollständig geladen wird, damit vermeidet man Energie- und Wasserverluste. Wenn Strom aus „kostenlosen“ Quellen (Wind/Solar/Wasser) zur Verfügung steht, dann ist es besser, diesen zu nutzen. NiFe-Batterien müssen nicht von Zeit zu Zeit vollständig geladen werden. Die Ladeschlussspannung hängt stark vom Verhältnis zwischen Batteriegröße und Ladestrom ab. Man kann das [Bild 3](#) zur Bestimmung des ersten Einstellung benutzen. Links wird die leere Batterie mit einem Strom von $C5/4$ etwa halb aufgeladen. Die Endspannung beträgt dann etwas mehr als 33V. Für eine 600Ah-Batterie gilt entsprechend die Einstellung des Stroms von $C5/4 = 600Ah/4h = 150A$. Die Absorptionszeit (Laden bei der Endspannung) wird am besten auf den kleinsten möglichen Wert gesetzt, wenn zum Laden ein Generator verwendet wird, wird diese dann auch sofort abgeschaltet und nicht lange im ungünstigen Teillastbereich betrieben.

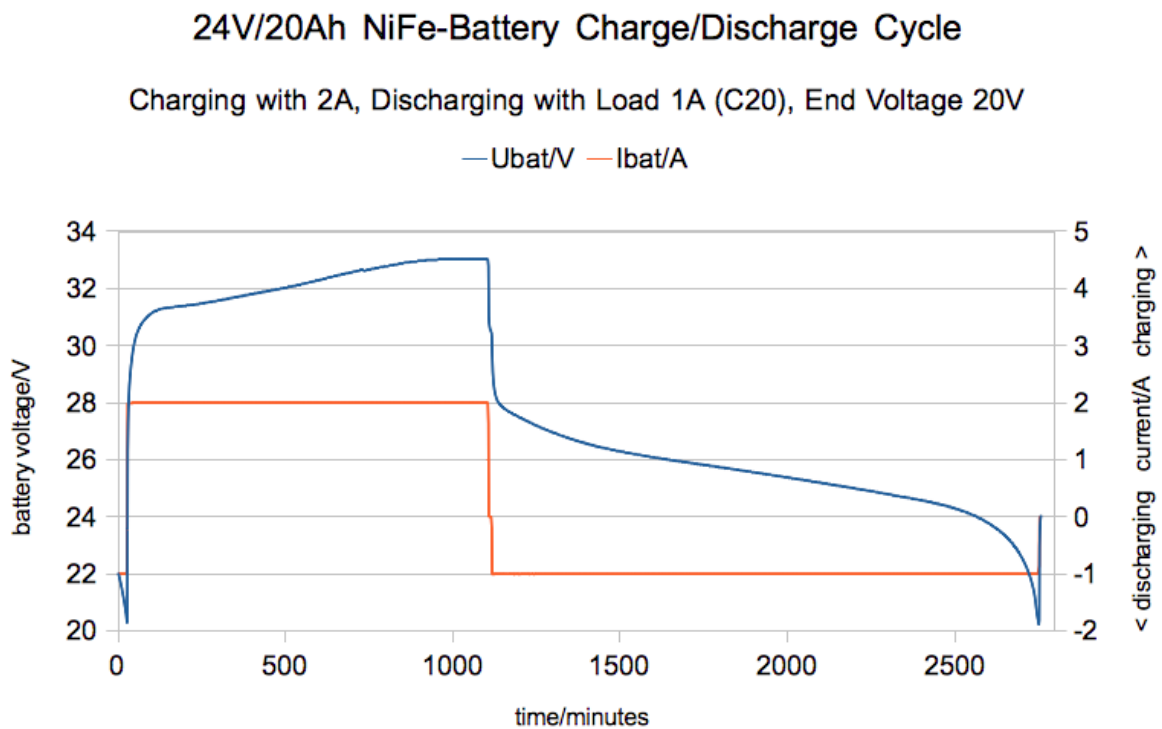


Bild 1. Typischer Zyklus: Mit 2A (nicht ganz vollständig) laden, mit 1 A bis zur Abschaltung bei 19V belasten

Die Batterie wurde mit einer Last von 1A bis auf 19V entladen (ganz links), dann 1079 Minuten mit 2A geladen (36Ah), anschließend konnten bei 1.0A Belastung 27.3Ah entnommen werden, die Batterie war also trotz stagnierender Spannung in der 1000. Minute (17. Stunde) noch nicht voll (ca. 85%). Der Ladestrom entspricht 100A bei einer 1000Ah-Batterie.

24V/20Ah NiFe-Battery Discharge Cycle

Discharging with Loads between 0.4 and 2.5A

—Ubat/V @ 0.4A —Ubat/V @ 1A —Ubat/V @ 2.5A

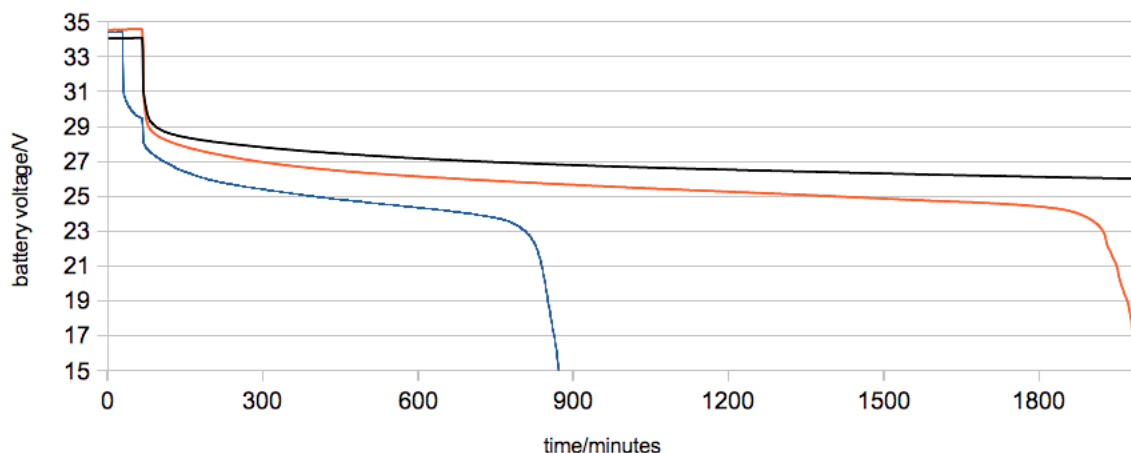


Bild 2. Kapazitätsmessung: Vollständig aufgeladene Batterie mit verschiedenen konstanten Strömen entladen

Endspannung	Strom 0.4A	Strom 1.0A	Strom 2.5 A
24V	0.94	0.93	0.77
23V	0.96	0.95	0.90
22V	0.97	0.96	0.93
21V	0.98	0.97	0.94
20V	0.98	0.97	0.95
19V	0.98	0.98	0.96
6V	1.00	1.00	1.00

Tabelle 1. Entnehmbare Kapazitäten bei verschiedenen Strömen

Die Angaben beziehen sich auf die Kapazität bei vollständiger Entladung herunter auf 6V. Diese Kapazität beträgt in allen Fällen etwa 33Ah und ist viel mehr von der Vorgeschichte der Batterien als vom Strom abhängig. (Weiteres dazu s. [Bild 13](#).)

Da die Batterie selbst nicht geschützt werden muss, muss keine Abschaltspannung bestimmt werden, man kann die Unterspannungsgrenze des Wechselrichters als Begrenzung nutzen. Dazu muss die Wiedereinschaltspannung recht hoch gesetzt werden, da die Spannung nach der Entlastung der Batterie wieder ziemlich hoch geht und sich dann der Wechselrichter mit der großen angeschlossenen Last noch längere Zeit ein- und ausschaltet. In diesem Fall ist natürlich auch keine Stromkompensation der Abschaltung oder eine entsprechende Verzögerung nötig.

Ein anderer Gesichtspunkt ist die Einhaltung einer gewissen Reserve. Aus dieser Tabelle kann der Schluss gezogen werden, dass eine Abschaltspannung von etwas über 1.15V/Zelle (23V) in den meisten Fällen angemessen ist, um noch eine Reserve von etwa 10% sicherzustellen.

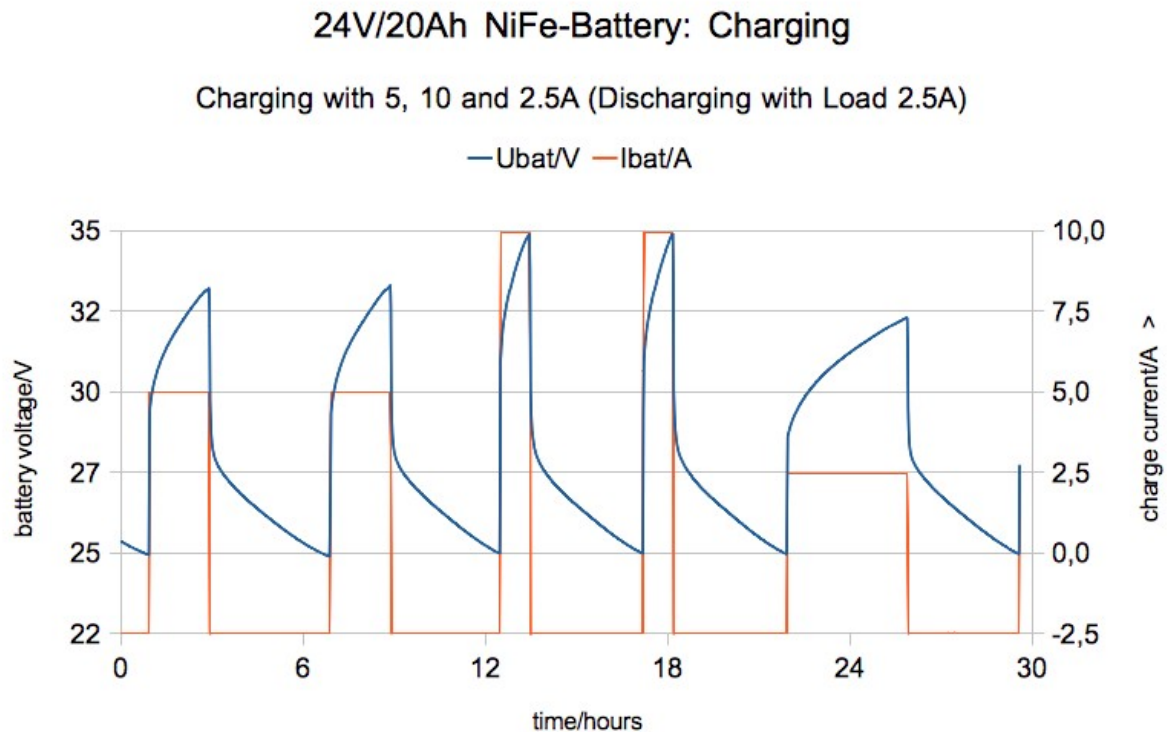


Bild 3. Normales und schnelles Laden

Es wurden mehrere Ladezyklen mit 5A und 10A Ladestrom durchgeführt. Zum Vergleich rechts mit einem kleineren Strom (2.5A, der bei einer 1000Ah-Batterie mit 125A zu übersetzen wäre). Die Spannung beim Laden ist zwar sehr stark stromabhängig (im Mittel 31.5V bei 5A, 33.5V bei 10A), aber der Wirkungsgrad wird dadurch wenig beeinflusst, weil die Spannung bei einem Ladestrom von 10A nur halb so lang hochgehalten wird wie bei 5A. Die Wirkungsgrade liegen eng zusammen bei 75%, die Unterschiede bei den verschiedenen Strömen sind kleiner als die Ergebnisse individueller Messungen (s. die ersten beiden Zyklen).

Höhere Wirkungsgrade bekommt man mit flacheren Zyklen im richtig gewählten Spannungsfenster (vgl. [Bild 8](#)).

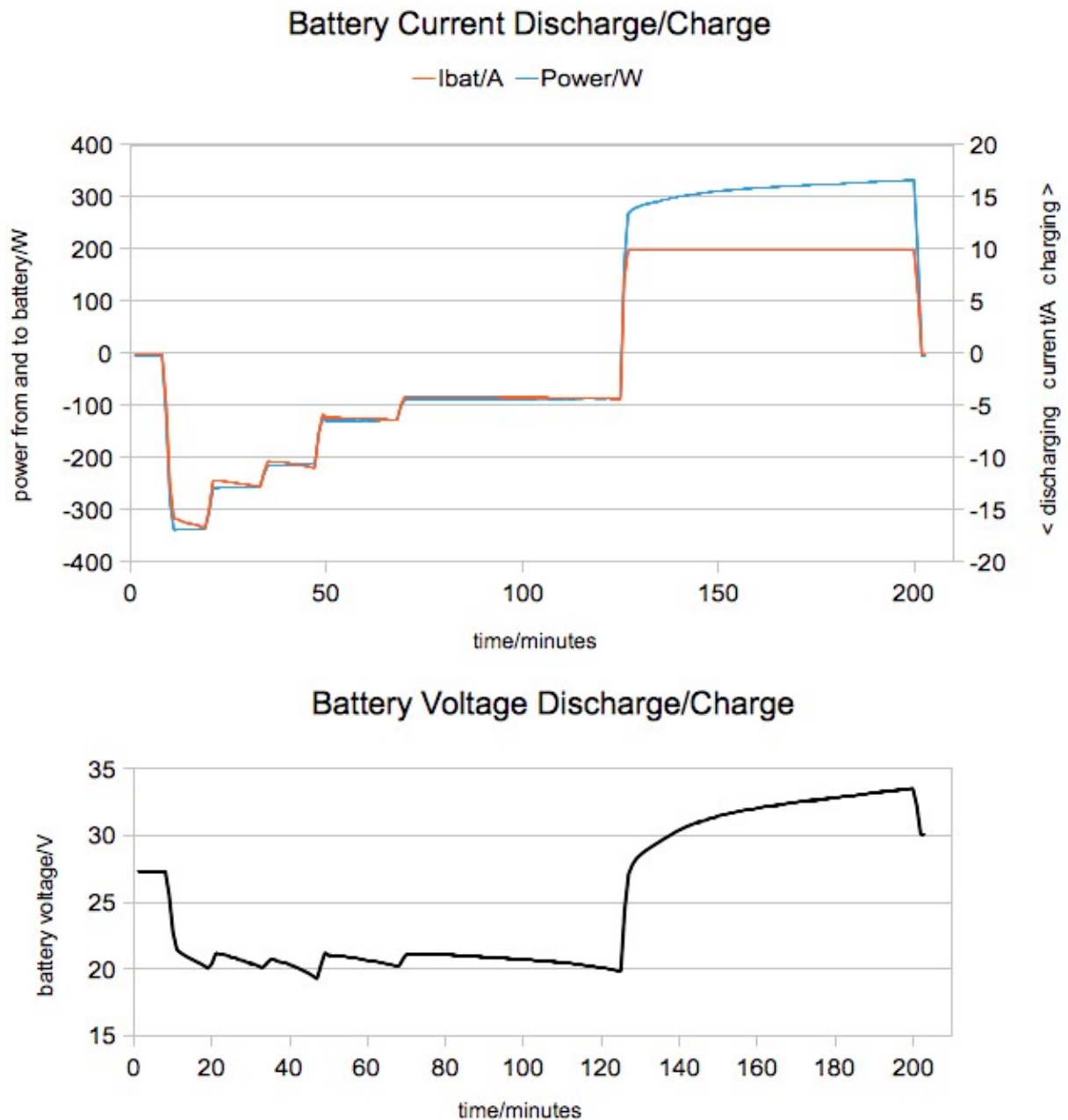


Bild 4. Verhalten bei sehr hohen Lasten bis zu 340W/17A

Zu Beginn wird die Batterie 10 Minuten lang mit 17A/340W (entsprechend 800A/16kW aus einer 1000 Ah-Batterie) bis zum Erreichen von 20V belastet. Die Belastung wurde nach und nach zurückgenommen, um die 20V nicht zu unterschreiten. Die Entladedauer betrug insgesamt 115 Minuten. Die Batterie war zuvor zu knapp 90% geladen, sie ist zuvor 20 Stunden lang mit dem Leerlaufstrom von 140 ... 150 mA des Wechselrichters belastet worden.

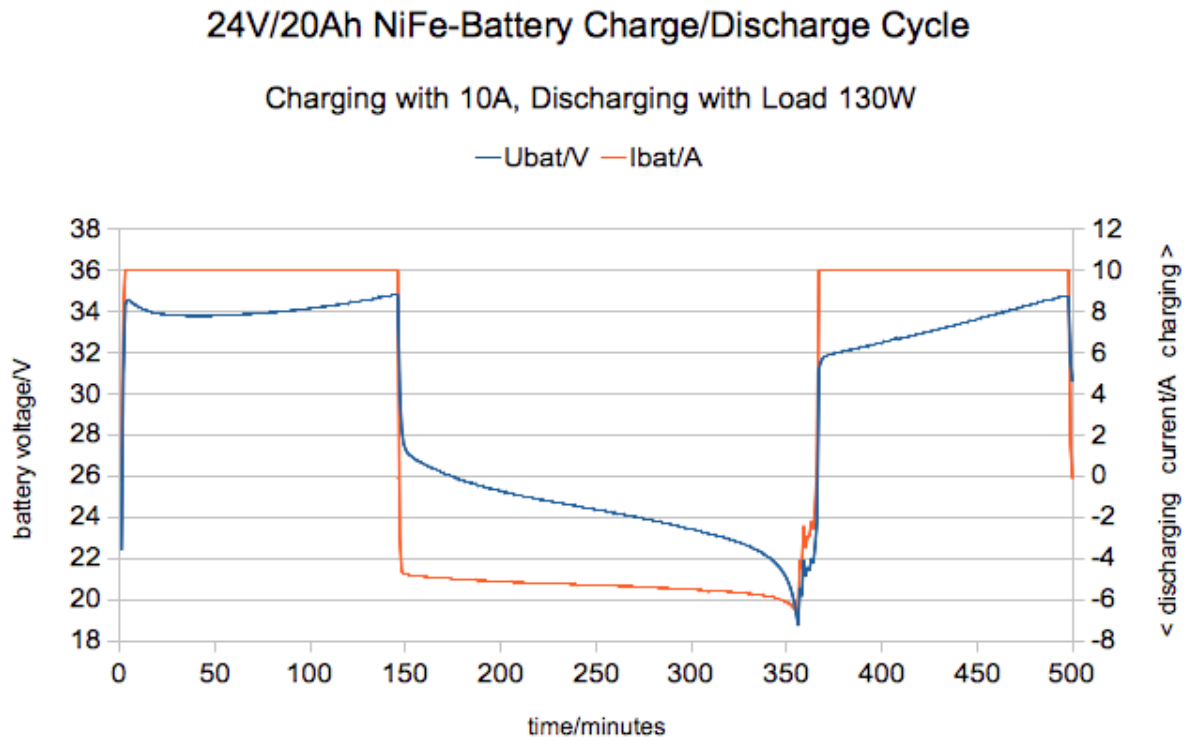


Bild 5. [Laden und Entladen mit sehr hohen Strömen](#)

Vor diesem Zyklus ist die Batterie mit einer Last von 0.2A bis auf 7V entladen worden. 145 Minuten laden mit 10A (24.1Ah), 219 Minuten Entladen bei ca. 130W Belastung (18.7Ah/452Wh).

Der Ladestrom kann ohne weiteres noch erhöht werden. Er ist bei vielen Ladern eher durch das Spannungslimit des Laders begrenzt (in diesem Fall 35V). Wenn die Batterie eine Weile lang ruht, dann wird der Strom nicht gleich richtig angenommen, es ist für etwa eine halbe Stunde eine erhöhte Spannung nötig (linkes Ladeintervall), wenn gleich nach dem Entladen wieder geladen wird, ist die Spannung bei diesem hohen Strom 3V niedriger (rechts).

Hier handelt es sich um eine 20Ah-Batterie. Eine in 2.5 Stunden nur teilweise aufgeladene 1000Ah -Batterie könnte entsprechend über 3.5 Stunden lang mit 6.5kW belastet werden.

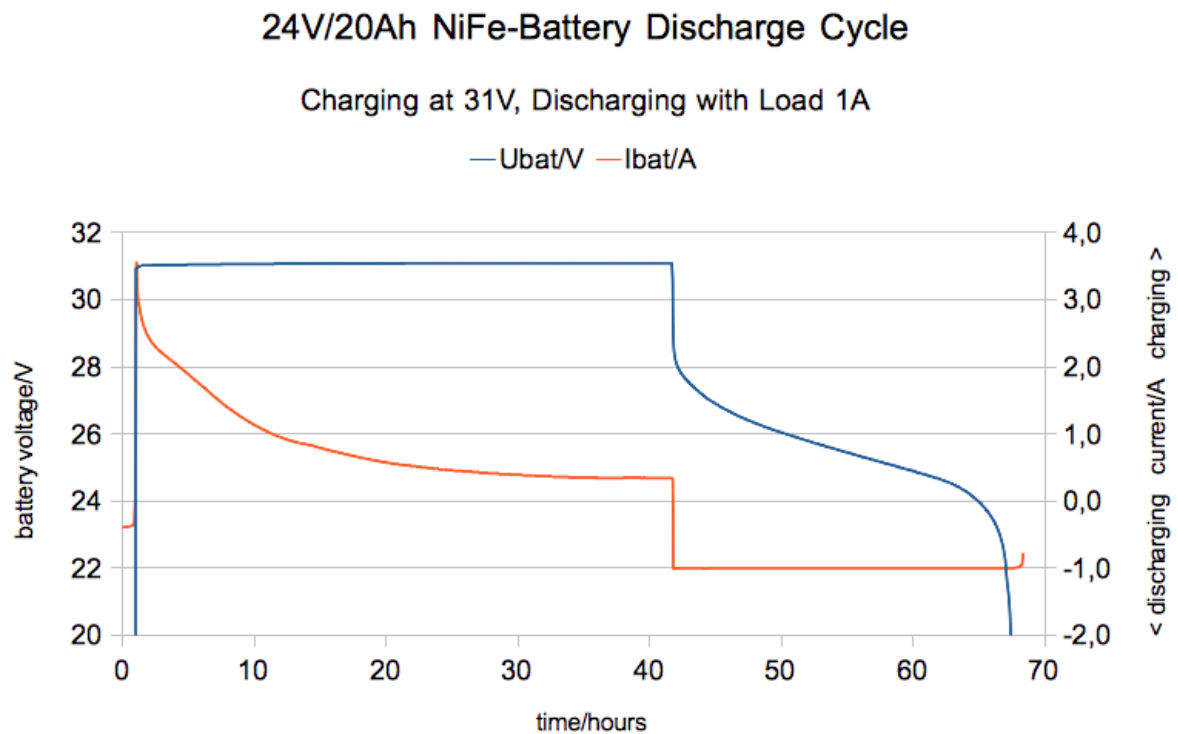


Bild 6. [Laden bei einer niedrigen Spannung \(31V\)](#)

In 14 Stunden Ladezeit in der Spannungsbegrenzung von 31V hat man die Nennkapazität (20Ah) nachgeladen. Der Strom stagniert nach 30 Stunden bei 0.35A. Hier wurde die zuvor vollständig entladene Batterie knapp 41 Stunden bei 31V mit 33.4 Ah geladen. Anschließend konnten bei einem konstanten Strom 26.6Ah zurück gewonnen werden. Sie war demnach zu etwa 85% geladen. In zwei Tagen kann die Batterie in jedem Fall bei der für eine NiFe-Batterie niedrigen Spannung von 31V (1.55V/Zelle) vollständig aufgeladen werden.

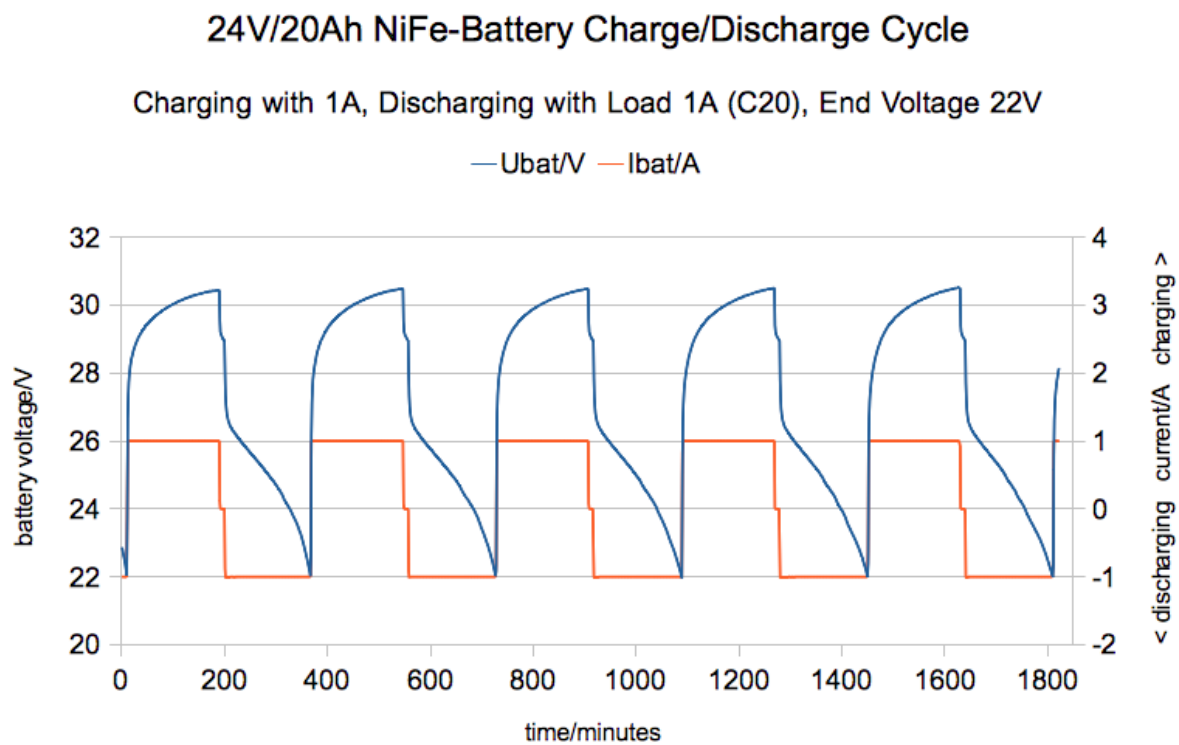


Bild 7. Verhalten bei sehr niedrigem Ladezustand

Laden und Entladen mit mittleren Strömen (1A) bei geringer Restkapazität der Batterie, Nachladen ab 22V (1.10V/Zelle) von weniger als 10% der Kapazität (3Ah), fünf Zyklen innerhalb von 30 Stunden, 445Wh bzw. 14.9Ah geladen, dann 352Wh bzw. 14.2Ah entnommen, Wirkungsgrad 79%

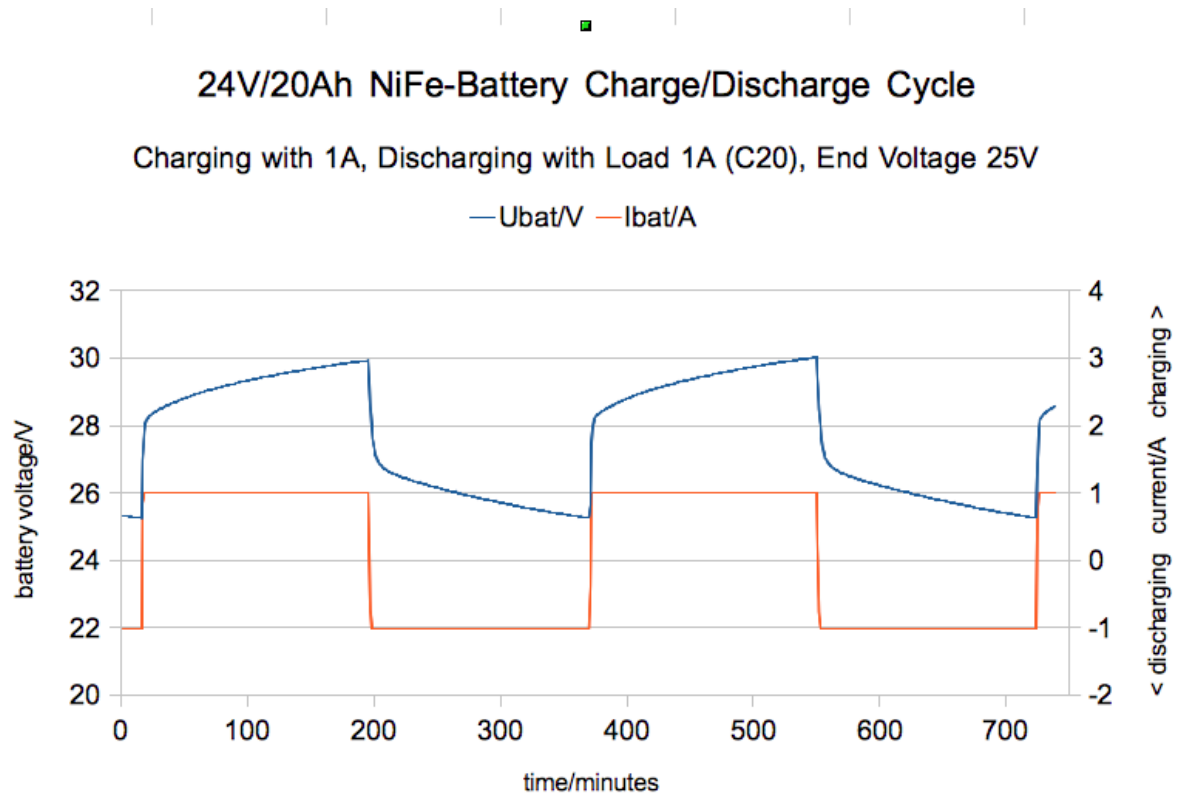


Bild 8. Verhalten bei mittlerem Ladezustand

Laden und Entladen mit mittleren Strömen (1A) bei mittlerer Restkapazität der Batterie, Nachladen ab 25V (1.25V/Zelle) von weniger als 10% der Kapazität (3Ah). Es stellt sich in diesem Bereich schon nach wenigen Zyklen ein Gleichgewicht ein. Hier zwei Zyklen aus einer Reihe von Zyklen innerhalb von 30 Stunden, es wurden 175Wh bzw. 5.97Ah geladen und 151Wh bzw. 5.84Ah entnommen. Der Wirkungsgrad ist in diesem Spannungsbereich (26V laden und bei 29V laden) bzw. mittlerem Ladungszustand relativ gut (86%). Der Ladewirkungsgrad beträgt 98%.

Die mittlere Ladespannung ist hier 1.47V/Zelle, und wenn wie hier 50% der Zeit geladen wird, dann ist der monatliche Wasserverlust etwa $\frac{1}{2} * 0.1\text{g/Ah}$ (s. [Bild 12](#)), das entspricht 20g für die 24V/20Ah-Batterie oder 1 Liter bei der 1000Ah-Batterie.

Für diesen Betriebsfall gibt der Hersteller einen Lebensdauer von über 9000 Zyklen an, das ist selbst bei unmittelbar aneinanderschließenden C20-Zyklen (vier Zyklen pro Tag) wie diesen eine Lebensdauer von über sechs Jahren. Ich habe noch nicht die Zeit gefunden, das zu überprüfen.

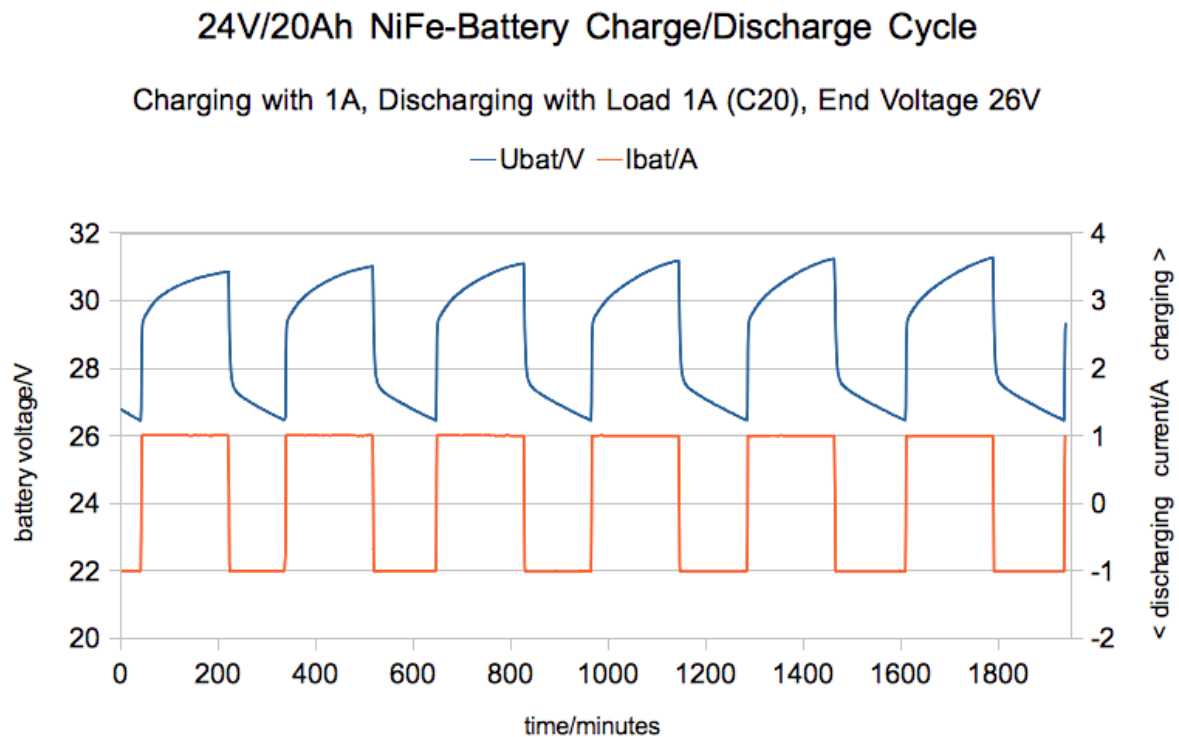


Bild 9. Verhalten bei hohem Ladezustand

Laden und Entladen mit mittleren Strömen (1A) bei hoher Restkapazität der Batterie, Nachladen ab 26.5V (1.325V/Zelle) von weniger als 10% der Kapazität (3Ah). Es stellt sich in diesem Bereich erst nach vielen Zyklen ein Gleichgewicht ein, dass sich hier auch nach acht Zyklen (einschließlich der Vorgeschichte) noch nicht eingestellt hat. Erwartungsgemäß ist der Wirkungsgrad bei hohen Spannungen bzw. Ladungszuständen nicht so gut (hier 72%).

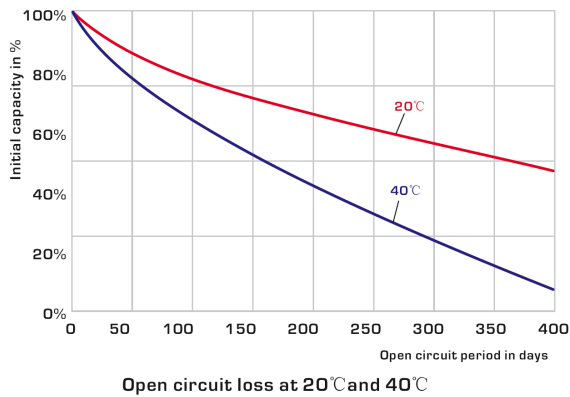


Bild 10. Selbstentladung bei 20°C und 40°C

Bei 20°C verliert die Batterie in drei Monaten typisch 10% ihrer Ladung

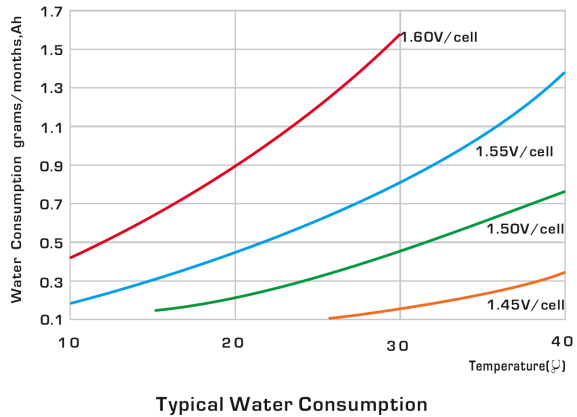


Bild 12. Wasserverbrauch bei erhöhten Spannungen

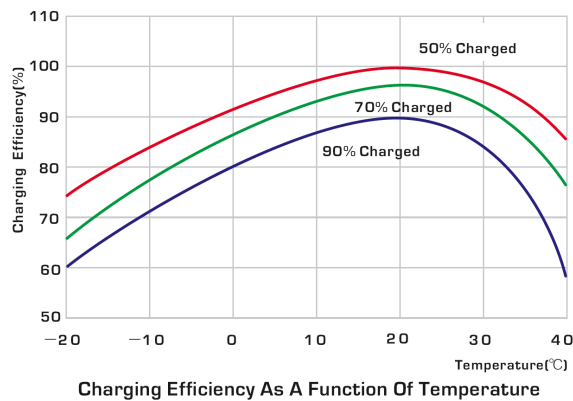


Bild 11. Ladewirkungsgrad in Abhängigkeit vom Ladezustand und von der Umgebungstemperatur

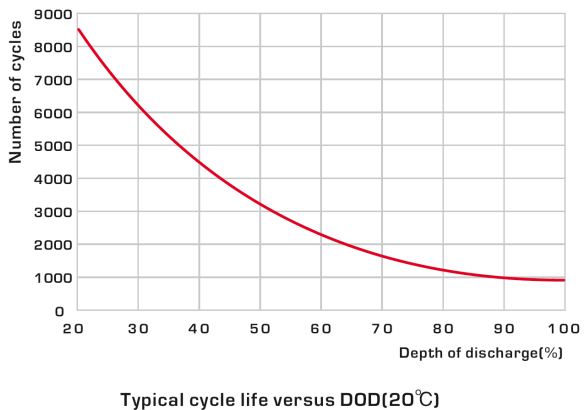


Bild 13. Lebensdauer in Abhängigkeit von der Entladetiefe

Discharge Data Table

Discharge currents and duration when battery is fully charged at 20°C ± 5°C

Final voltage = 1.16V/C

Cell Type	18h	20h	1d 24h	2d 48h	3d 72h	4d 96h	5d 120h	6d 144h	7d 168h	8d 192h	9d 216h	10d 240h
NF10-S	0.50	0.46	0.39	0.20	0.14	0.10	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05
NF20-S	1.00	0.92	0.78	0.40	0.27	0.21	0.17	0.14	0.12	0.11	0.10	0.09

Final voltage = 1.00V/C

Cell Type	18h	20h	1d 24h	2d 48h	3d 72h	4d 96h	5d 120h	6d 144h	7d 168h	8d 192h	9d 216h	10d 240h
NF10-S	0.56	0.52	0.43	0.22	0.15	0.11	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.05
NF20-S	1.13	1.03	0.87	0.44	0.30	0.23	0.18	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10

Bild 14. Kapazität in Abhängigkeit vom Entladestrom

Endspannung 1.16V/Zelle (23.2V, oben) und 1.00V (20.0V, unten)

Alle Angaben auf dieser Seite sind der Changhong-Dokumentation entnommen.

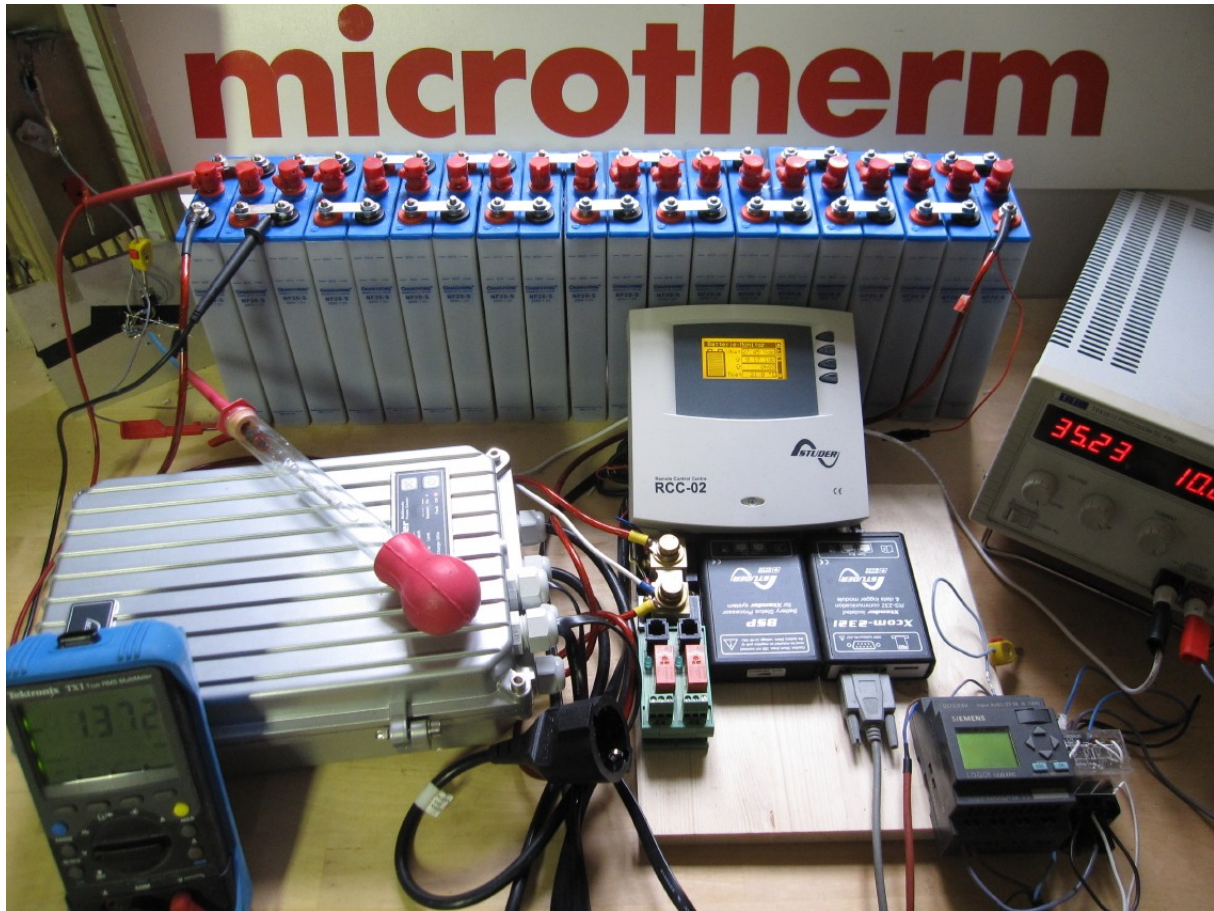


Bild 15. Messaufbau

Zur Messung der Batteriespannung und des Stromes wurde das Ampèrestundenmeter BSP-500 (mit einem 500A-Shunt) verwendet, hier zu sehen vor der Bedienungseinheit (RCC-02). Die vom BSP erfassten Stromwerte erwiesen sich als erstaunlich genau, sodass die Werte zur Berechnung dienen konnten.

Verbrauch durch zwei bis zu 1.5A einstellbare Stromsenken mit einem Regler LM317, 1% Genauigkeit (links hinten).

Alternativ der Wechselrichter mit angeschlossenen Glühlampen bis 350W

Rechts regelbares Netzteil 35V/10A als Lader, Genauigkeit besser 1%

Überprüfung der Ströme mit einem Tektronix TX1

Temperaturmessung mit PT100

Automatische Umschaltung nach definierter Ladezeit bzw. nach Erreichen einer festen Entladeschlussspannung mit einem Logikmodul (Siemens Logo, vorn rechts)

Vorn links hinter dem Multimeter Wechselrichter/Lader Studer XTS, rechts dahinter Bedienungseinheit und Logger RCC-02

Der Wechselrichter/Lader Studer XTS (Xtender) wurde als typisches Beispiel für diese Art von Geräten verwendet. Damit konnte gut die Anpassbarkeit an die NiFe-Batterie festgestellt werden. Außerdem diente er als Basis für die Überwachung und das Loggen der Betriebswerte.

Die Werte wurden mit einer Auflösung von 1 Minute erfasst.

Die Grafiken und die Rechenwerte wurden mit LibreOffice Calc erstellt.

Es wurden während der Messdauer fast 100 Zyklen mit einer Tiefe zwischen 15 und 100% durchführen.

Bestimmung des Peukertkoeffizienten

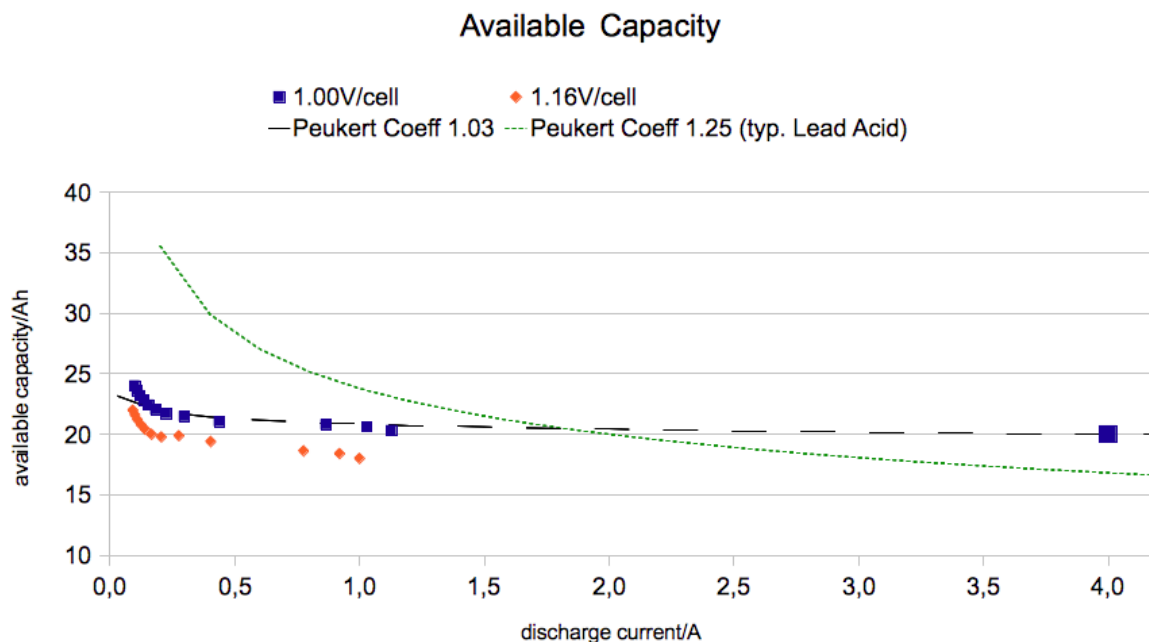


Bild 16. Entnehmbare Kapazität in Abhängigkeit vom Strom

Die Kapazität der NiFe-Batterie ist viel weniger stromabhängig als die der Blei-Säure-Batterie. Da die Werte nicht zuverlässig wenigen Messergebnissen entnommen werden können, wurden die Herstellerangaben in diese Grafik eingezeichnet. Das blaue Quadrat ganz rechts ist die Nennkapazität (C5 bei einer Entladung auf 1.00V). Die Werte stimmen mit den hier gemessenen gut überein. Man kann diese Werte nicht sinnvoll mit der Peukert-Relation annähern, die gestrichelte Linie entspricht einem Koeffizienten von 1.03. Wenn die Werte für die Entladung auf 1.00V zu Grunde gelegt wird, dann liegt der Peukert-Koeffizient bei 1.08. Die Kapazität ist viel mehr von der Unterspannungsgrenze abhängig als vom Strom, vgl. auch die Tabelle unter [Bild 2](#). Die Festlegung des Wertes in einem Ampèrestundenmeter ist entsprechend problematisch (s. Kapitel [Ampèrestundenmeter](#)). Je nach Spannungsuntergrenze sind Werte zwischen 1.03 und 1.08 richtig, bei sehr kleinen Strömen wird die Abweichung groß sein (linker Teil der gestrichelten 1.03-Linie).

Zum Vergleich ist die Funktion für eine Batterie mit der Nennkapazität 20Ah/C10 mit einem Koeffizienten von 1.25 gepunktet dargestellt, sie ist typisch für Blei-Säure-Batterien.

(Die Peukert-Relation ist $I^n \cdot t = \text{const}$ mit der Strombelastung I und der Dauer der Entladung t .)