

Aufgabe A19.1:

Auslegung einer Batterie für ein dezentrales Energieversorgungssystem.

Im Energiepark Clausthal existiert ein hochwertiges (Spannungs- und Frequenzhaltung, Oberschwingungen) stabiles Stromnetz, das im Inselbetrieb aus erneuerbaren und dezentralen Energiequellen gespeist wird. Die Batterie des Gesamtsystems dient dazu, das Netz zu stabilisieren, da die Regelgeschwindigkeit der steuerbaren Erzeugungseinheiten (Biogasmotor, Stirlingmotor, Rapsölmotor, etc.) nicht ausreicht, um die Lastschwankungen des Instituts und Leistungsänderungen der installierten Windkraft- und PV-Anlagen auszugleichen. Sollwerte für die Stromproduktion der steuerbaren Erzeugungseinheiten werden im Abstand von einigen Minuten dem Lastbedarf und der Prognose des Lastbedarfs unter Berücksichtigung von Mindestlaufzeiten und Mindeststillstandszeiten pro Aggregat angeglichen. Das Vorgehen ist weitgehend identisch zum Vorgehen einer Netzleitzentrale mit Kraftwerkseinsatzplanung.

Die Batterie soll im vollgeladenen Zustand in der Lage sein, bei Ausfall aller Erzeugungseinheiten und einem Ausfall des öffentlichen Netzes die Stromversorgung für eine Dauer von 30 Minuten zu gewährleisten. Bei Betrieb aller Erzeugungseinheiten im Energiepark Clausthal ist eine "unbegrenzte" Versorgung des Instituts unabhängig von der öffentlichen Energieversorgung möglich.

Daten für die Auslegung:

Maximaler durchschnittlicher Energiebedarf pro Stunde:	180 kWh, Auslegungswert 200 kWh
Minimaler Energiebedarf pro Stunde	15 kWh
Durchschnittlicher Energiebedarf pro Stunde	50 kWh
Spitzenleistung im Netz (Anfahren von Motoren, etc.) und Auslegung des Umrichters	700 kVA
Kurzfristige /einige Minuten) Maximale Wirkleistung	250 kW
Wahrscheinliche Abweichung zwischen Prognosewert für den Lastbedarf und Prognosewert für die regenerative Eigenerzeugung	Max. 20 % der Wirkleistung pro Prognoseintervall (10 Minuten), im Durchschnitt 10 %
Mindestspannung für Umrichter	350 V
Maximalspannung für Umrichter im Betrieb	650 V
Ohne Versorgung der Lasten	700 V

Nehmen Sie Batteriedaten von Herstellern. Die Beispiellösung wird mit Datenblattangaben von BAE für Blei-Säure-Batterien und Toshiba für Lithium-Ionen-Batterien. Als maximale Ladespannung nehmen Sie bitte für Blei-Säure-Batterien 2,5 V/Zelle für eine Ausgleichsladung und für Lithium-Ionen-Zellen 4,2 V/Zelle.

Fragen:

1. Welcher Bereich für die Batterienennspannung (Zahl von Zellen in Reihe) ist zulässig und welche Nennspannung sollte angestrebt werden?
2. Welche Batteriegröße (Ah) wird in Abhängigkeit von welcher Nennspannung benötigt?
3. Wie viel Energie muss die Batterie zu jedem Zeitpunkt aufnehmen oder abgeben können?
4. Was ist ein möglicher und was ein sinnvoller Sollladezustand der Batterie?
5. Wie groß müsste die Batterie sein, wenn zu jedem Zeitpunkt 30 Minuten lang 100 kWh zur Verfügung stehen müssten?
6. Mit welchem Energiedurchsatz muss für die Batterie gerechnet werden?
7. Welche Batterietechnologie wählen Sie aus? Wie rechtfertigen Sie den höheren Preis der Lithium-Ionen-Batterie?
8. Was ist der durchschnittliche Energiedurchsatz und mit welcher Wärmelast ist im Betrieb und, bei Verwendung von Blei-Säure-Batterien, bei einer Ausgleichladung zu rechnen?
9. Mit welcher Überbrückungszeit durch die Batterie kann sicher gerechnet werden, wenn alle Erzeugungseinheiten bei dem maximalen durchschnittlichen Energiebedarf von 180 kWh ausfallen.
10. Welche maximale Strombelastung hat die Batterie für die maximalen Leistungsspitzen?
11. Reicht die Kurzschlussleistung der Batterie aus, um Sicherungen auszulösen?
12. Mit welcher Wärmebelastung der Batterie (Temperaturerhöhung der Zellen) und Wärmeentwicklung im Aufstellungsraum ist zu rechnen?
13. Was sind bei Blei-Säure-Batterien die Anforderungen an das Lüftungsvolumen?

Lösung

Diese Aufgabe basiert auf einem Demonstrationsprojekt zur Integration von erneuerbaren Energiequellen in ein lokales Netz, das ohne Austausch von Energie mit dem Versorgungsnetz und auch bei Ausfall des Versorgungsnetzes eine hochwertige und stabile Stromversorgung bereitstellen sollte. Zum Zeitpunkt der Ausführung gab es noch keine Lithium-Ionen-Batterien ausreichender Leistung, so dass nur Blei-Säure-Batterien in Frage kamen.

Grundsätzliche Überlegungen / Ausgangsbasis von Batterieauslegungen:

- Energiebedarf, der aus der Batterie entnommen werden soll, ggf. in Abhängigkeit von bestimmten Betriebsbedingungen (z.B. Temperatur, Ladezustand, etc.)
- Durchschnittsleistung während der Energieentnahme (Entladezeit), wenn möglich genauer Leistungsverlauf $P(t)$; Insbesondere, wenn am Ende der Entladung hohe Leistungen notwendig sind, z.B. kontrolliertes Herunterfahren eines technischen Systems) ist der Leistungsverlauf und die dann zu erwartende Spannungslage der Batterie wichtig. Ggf. muss der zeitliche Leistungsverlauf bestimmt werden und die Planung auf ein, mit dem Kunden vereinbartes Leistungsprofil abgestellt werden.
- Maximale Leistung und Energiemenge, die von der Batterie im Betrieb durch Rückspeisung (Bremsen von Fahrzeugen oder Lasten, ungeplanter

Energieüberschuss) aufgenommen werden muss inkl. der mindestens und im Durchschnitt dazwischen liegenden Zeiten.

- Zur Verfügung stehende Ladezeit und Ladeleistung
- Maximal zulässige Spannung des Umrichters, ggf. Unterscheidung zwischen normalem Betrieb und Phasen der Ausgleichsladung, in denen die Funktion der Batterie nur eingeschränkt zur Verfügung steht. Die Nennspannung des Umrichters muss auf die Nennspannung der Batterie abgestimmt werden.
- Minimal zulässige Spannung des Umrichters und dabei Unterscheidung zwischen der minimalen Systemspannung zur Versorgung von Lasten und der Spannung der Batterie, die aus Lebensdauergründen nicht oder nicht häufig unterschritten werden sollte.

1. Schritt: Bestimmung der Zellenzahl/Nennspannung

Spannungswerte pro Zelle (Ladeschluss- und Entladeschlussspannung) festlegen, wobei die Mindestspannung bzgl. der Lebensdauerwirkungen je nach der Entladezeit festgelegt werden muss. Bei 30-minütiger Entladung ist die Entladeschlussspannung anders als bei 10-stündiger Entladung und der Teil der Kapazität, der aus Lebensdauergründen nicht verwendet werden sollte, ebenfalls. Bei 30-minütiger Entladung darf bei manchen Herstellern ohne Lebensdauerwirkungen auf die Entladeschlussspannung entladen werden, bei 10-stündiger Entladung dürfen üblicherweise nur 80% der Kapazität entnommen werden, d.h. dass die Entladeschlussspannung dann höher ist. Diese Abhängigkeit gilt vor allem bei Batterien mit ausgeprägter Abhängigkeit der Kapazität von der Entladezeit (Blei, NiCd/NiMH), aber nicht für Lithium-Batterien, bei denen eine derartige Abhängigkeit kaum vorhanden ist.

Am Ende der Musterlösung sind Datenblätter der später auch eingesetzten Blei-Säure-Batterien enthalten

Im Datenblatt ist für die 30-minütige Entladung (C1/2) eine Entladeschlussspannung von 1,7 V/Zelle angegeben. 30 Minuten Entladezeit entspricht der maximal geforderten Überbrückungszeit der Batterie. Unter "5. Entladeeigenschaften" des Datenblattes wird empfohlen, die Batterie nicht über 80% Entladetiefe (= 20 % Ladezustand) zu entladen. Diese Einschränkung wird unabhängig von der Entladedauer gemacht, eine dazugehörige Spannungsgrenze wird allerdings nicht angegeben. Ein Schätzwert für die Spannung nach 80% Entladetiefe bei 30-minütiger Entladung ist 1,85 V/Zelle. Ein Vergleichbarer Wert für Lithium-Ionen-Zellen ist z.B. für NC/Graphit-Zellen 3,0 V/Zelle.

Die Mindestzahl der Zellen beträgt für Blei-Säure-Batterien $350\text{V}/1,7\text{V/Zelle} = 206$ Zellen, d.h. am Ende der Entladung der Zellen ist auch die Mindestspannung des Umrichters erreicht. Unabhängig von Batterierestriktionen ist eine weitere Entladung technisch nicht möglich.

Besser wäre eine Mindestzahl, die sich aus $350\text{V}/1,85\text{ V/Zelle} = 190$ Zellen berechnet.

Die maximale Zellzahl berechnet sich aus der maximalen Ladespannung im Betrieb ($650\text{ V}/2,35\text{ V/Zelle} = 276$ Zellen) bzw. der Ausgleichsladespannung während Wartungszeiten ($700\text{V}/2,5\text{ V/Zelle} = 280$ Zellen).

Die zulässige Zellenzahl liegt somit zwischen 190 und 276 Zellen, entsprechend einer Nennspannung von 380 bis 552 V.

Bei einer hohen Batteriespannung (hohe Zellenzahl) können in Extremsituationen die Lasten länger versorgt werden, weil ggf. die Batterie innerhalb des zulässigen Spannungsbereichs des Wechselrichters tiefer entladen werden kann, wenn das unbedingt erforderlich ist (Anwendungen mit extrem hohen Sicherheitsanforderungen, eine Schädigung der Batterie wird zur Sicherstellung der Anwendung in Kauf genommen). Die Batteriespannung sollte nur dann niedriger als der maximal mögliche Wert sein, wenn dadurch der Gesamtaufwand (Zahl der Kabel, Einzelzellenspannungsüberwachung, ggf. weniger Aufstellungsraum (Kapazität der Zellen ist aber größer als bei höherer Zellenzahl!), etc.) deutlich verringert werden kann. Bei einer hohen Zellenzahl sinkt der Strom bei gleicher Leistungsentnahme und damit entfällt ggf. die Notwendigkeit für dickere Kabel. Allerdings führt eine hohe Zellenzahl zu mehr Teilen (Zellen, Verbinder, Polschrauben, etc.) und damit prinzipiell auch zu höherem Fehlerrisiko.

Die Zellenzahl sollte gerade sein, damit zur Überwachung der Batterie die Zellenspannung in der Mitte der Batterie abgegriffen werden kann und, bei kleineren Kapazitäten durch 3 oder 6 teilbar sein, weil bei geringer Kapazität keine Einzelzellen produziert werden, sondern 6V- oder 12V-Blöcke.

Mit der so festgelegten Zahl von Zellen (276, entsprechend 552 V Nennspannung) wird im Folgenden weitergerechnet.

Bei Lithium-Ionen-Zellen ergibt sich bei Orientierung an der maximalen Umrichterspannung eine Zellenzahl von $650/4,2 = 154$ Zellen in Reihe, deren niedrigste Entladespannung pro Zelle (2,5 V/Zelle) bei 385 V beträgt, so dass die Kapazität der Zellen vollständig ausgenutzt werden kann.

2. Schritt: Bestimmung der Zellkapazität

Aus dem geforderten Energiebedarf (Wh der Gesamtanlage bzw. Wh pro Zelle) kann die Zellkapazität berechnet werden, wenn die durchschnittliche Entladespannung bekannt ist. Diese wird manchmal für unterschiedliche Entladeströme angegeben. Hier wurde 1,95 V/Zelle als Schätzwert für eine 30-minütige Entladung festgelegt, weil keine Herstellerangaben verfügbar waren. Wenn sich die Batterie bei Beginn der Entladung betriebsbedingt (z.B. weil immer Leistung aufgenommen werden muss) nicht im Volladezustand befindet, dann muss ein niedrigerer Wert als die durchschnittliche Entladespannung verwendet werden. Als unterer Grenzwert (sehr konservative Schätzung) kann der Wert für die Entladeschlussspannung (1,85 oder 1,7 V bei 100% Entladetiefe) verwendet werden.

Bei 100kWh Energieinhalt bei einer 30-minütigen Entladung ergibt sich:

$$100\,000\text{ Wh} / (1,95\text{ V/Zelle} \times 276\text{ Zellen}) = 186\text{ Ah}$$

Für Lithium-Ionen-Zellen ergibt sich bei Annahme einer mittleren Entladespannung von 3,4V

$$100\,000\text{ Wh} / (3,4\text{ V/Zelle} \times 154 \text{ ` } 177\text{ Zellen}) = 191\text{ Ah}$$

Festlegung des Sicherheitswertes, um Alterungseffekte zu berücksichtigen:
Üblicherweise erfolgt eine Überdimensionierung um 20 %, so dass bei Erreichen der Lebensdauergrenze (häufig als 80% der Anfangskapazität definiert, im Einzelfall ist das zu prüfen) noch eine ausreichende Energiemenge zur Verfügung steht. Außerdem wird hier mit einer maximalen Entnahme der Kapazität von 80% gerechnet, da im Datenblatt nur eine Entladung von 80% Entladetiefe empfohlen wird. Die gleichen Einschränkungen werden üblicherweise für Lithium-Ionen-Batterien gemacht.

Gesuchte Kapazität:

Blei-Säure-Batterien: $186 \cdot 1,2 / 0,8 = 279 \text{ Ah}$

Lithium-Ionen-Batterien: $191 \cdot 1,2 / 0,8 = 287 \text{ Ah}$

Der Kapazitätswert wird in den Datenblättern oft für verschiedene Entladezeiten angegeben. Wenn keine Daten für die benötigte Entladezeit angegeben werden, dann muss der Kapazitätswert unter Nutzung des Peukertgesetzes interpoliert werden. Das Peukertgesetz sagt, dass der Entladestrom I und die Entladezeit t bei Nutzung der Formel $I^n \times t$ einen konstanten Wert bilden. Der aus dem Datenblatt errechnete Wert (Parameterfit) von $n = 1,34$ ist relativ hoch für Bleibatterien. Der Peukertkoeffizient n ist ein empirischer Wert und könnte, für die gleiche Batterie, bei alleiniger Betrachtung niedrigerer Ströme einen anderen Wert haben als bei alleiniger Betrachtung höherer Ströme. Wenn keine Kapazitätswerte außer der Nennkapazität angegeben werden, dann muss mit Standardwerten für den Peukertkoeffizienten gerechnet werden: $n = 1,2$ für Bleibatterien und $n = 1,05$ für Nickel-Cadmium-Batterien. Für Lithium-Ionen-Batterien ist der Wert fast 1 (keine besondere Abhängigkeit der Batterie von der Entladerate).

Weil der präferierte Hersteller BAE keine Zellen einer passenden Größe hatte, wurden Zellen ausgewählt, die bei Parallelschaltung die richtige Gesamtkapazität haben, nämlich 2 parallel Stränge aus 6V 90GiV 225 Blöcken, die bei 30-minütiger Entladung 135 Ah pro Strang liefern können, zusammen (bei identischer Belastung!) also 270 Ah, 3 % weniger als berechnet.

Für Lithium-Ionen-Batterien muss zwar keine Anpassung der Kapazität an die Entladezeit von einer halben Stunde erfolgen, dafür sollte aber in Erwägung gezogen werden, dass die Lebensdauer bei Betrieb in sehr hohem Ladezustand abnimmt, und viele Hersteller einen maximalen Ladezustand von 90 oder 95 % vorschlagen. Die Gesamtkapazität der Zellen sollte somit auf 300 bis 320 Ah festgelegt werden. Dieser Kapazitätswert führt zu mehreren parallelen Strängen, weil es noch schwierig ist, Einzelzellen mit entsprechend großer Kapazität zu erhalten. Bei Blei-Säure-Batterien sind dagegen Zellen mit einer Kapazität von bis zu 3000 Ah kommerziell erhältlich.

Parallelschaltung zweier Stränge wird oft als sicherer angesehen, weil bei einem hochohmigen Fehler in einer Zelle immer noch der andere Batteriestrang vorhanden ist. Aber man braucht doppelt so viele Verbinder und Zellen, so dass das Auftreten eines Fehlers wahrscheinlicher wird.

Schritt 3: Überprüfung der Leistung

Die Kurzschlussleistung von Batterien ist immer sehr hoch und übersteigt den Wert für kurzfristige, betriebsbedingte Entladeleistungen immer. Die maximale Last der Batterien kann aber im Prinzip größere Ströme erfordern als die, die als Dauerleistung möglich sind. Dies könnte zu einer schnellen Alterung oder Batterieversagen führen.

Als erstes muss der maximale zulässige Dauerstrom ermittelt werden. Dieser entspricht mindestens dem Wert, für den Kapazitätswerte in den Datenblättern vorhanden sind.

Die maximale betriebsbedingte Leistung für sehr kurze Zeiten tritt bei Anlaufvorgängen von Motoren und Schalthandlungen auf. Dieser Wert (kVA) entspricht auf der DC-Schiene einem kW Wert und darf nicht deutlich über dem maximalen Strom für die kürzeste Entladezeit liegen. Ggf. liegt dann bei niedrigem Ladezustand auch die Batteriespannung unterhalb der Systemspannung.

Die Datenblattangaben zeigen, dass bei einer 10-minütigen Entladung die Kapazität eines Strangs 103 Ah ist und somit ein Strom von 618 A pro Strang kontinuierlich fließt. Darauf sind Pole und Verbinder ausgelegt. Die geforderte Leistung sollte auch bei Erreichen der Entladeschlussspannung fließen können, so dass der maximale Strom aus der maximalen Kurzfristleistung (250 kW) bei 1,7 V errechnet werden muss:

$618 \text{ A} \times 1,7 \text{ V/Zelle} \times 276 \text{ Zellen} = 290 \text{ kW pro Strang}$

Die gewählte Batterie (2 Stränge) kann somit 580 kW, deutlich mehr als 250 kW für eine Dauer von 10 Minuten liefern (vom vollgeladenem Zustand aus).

Kurzfristiger Peakleistungsbedarf sind 700 kVA. Dieser Leistungsbedarf liegt außerhalb der Datenblattangaben, aber nur ca. 20 % über dem Dauerwert bei einer 10-minütigen Entladung. Ausgehend von einer Batteriemindestspannung von 496 V (1,7 V pro Zelle) fließen 746 A, bei der für den Umrichter mindestens erforderlichen Spannung von 350 V (1,27 V/Zelle) müssten dann 1000 A pro Strang fließen. Durch die Wahl der großen Zellenzahl ist bereits ein Leistungspuffer geschaffen worden. Die thermische Belastung der Zelle ist bei einer sehr kurzen Peakleistung sicher noch gegeben, zumal der Kurzschlussstrom der Zellen mit 5800 A (je Strang) angegeben ist.

Aufschlussreich ist auch die Berechnung der Leistung, die in der Zelle bei einem lastseitigen Kurzschluss frei wird. Wenn man tatsächlich einen Kurzschluss mit Null Ohm unterstellt, dann muss die Gleichgesichtsspannung des Blocks intern völlig in Wärme umgewandelt werden. Die 6,4 MW ($5800 \text{ A} \times 2 \text{ Stränge} \times 276 \text{ Zellen} \times 2 \text{ V/Zelle}$), die sich als in den Zellen umgesetzte Leistung ergeben, sind sicher nur kurzfristig vorhanden.

Für Lithium-Ionen-Zellen ist diese Überlegung nicht notwendig, weil sie, bei Raumtemperatur, immer einen kleineren Innenwiderstand als Blei-Säure-Batterien vergleichbarer Kapazität haben.

Schritt 4: Durchschnittlicher Energiedurchsatz und Ladezustandsbereich der Batterie

Batterien in Inselfahrzeugen und Hybridfahrzeugen müssen nicht nur Energie abgeben, sondern auch aufnehmen können.

Es muss berechnet werden, wie viel Energie die Batterie zu jedem Zeitpunkt aufnehmen können muss. Wenn die Batterie vollgeladen ist, dann kann sie keine Energie mehr speichern und zugeführte Energie führt nur noch zu Nebenreaktionen (Hydrolyse bei Batterien mit wässrigem Elektrolyt) oder sehr hohen Spannungen und Zerstörung, wenn keine Nebenreaktionen vorhanden sind. Umgekehrt muss die Batterie auch zu jedem Zeitpunkt Energie abgeben können. Aus diesem Grund gibt es einen Ladezustandsbereich (Ladezustand: Verhältnis zu noch entnehmbarer Ladungsmenge im Verhältnis zu Ladungsmenge, die im vollgeladenem Zustand unter den gewählten Bedingungen¹ entnommen werden kann), der nicht verlassen werden darf. Eine Überschreitung des Sollladezustands muss zu einer Reduzierung der primären Energieproduktion führen und der Ladezustand muss durch Entnahme von Energie aus der Batterie reduziert werden.

Die maximale Prognosegenauigkeit von +/- 20 % von 200 kW führt dazu, dass die Batterie im Betrieb maximal 20 % der aktuellen Leistung, maximal also 40 kW für den Prognosezeitraum von 10 Minuten aufnimmt oder abgibt. Wichtig zu wissen ist, bis zu welcher Spannung bzw. Ladezustand die Batterie die Leistung auch tatsächlich ohne Verluste (Nebenreaktionen) speichern kann. Wenn die Batterie die Leistung nicht speichern kann, dann bedeutet das, dass die angebotene Leistung zu einem mehr oder weniger großen Teil, ggf. sogar ausschließlich (bei 100% Ladezustand) bei Blei-Säure-Batterien in Elektrolyse (Gasungsreaktion) umgewandelt werden müsste. Bei Überschreiten der maximalen Ladespannung ist von einer Schädigung der Zelle auszugehen. Bei Überschreitung der maximalen Spannung im Zwischenkreis muss die zurückgespeiste Energie über einen Bremswiderstand vernichtet werden oder der Wechselrichter schaltet aus Sicherheitsgründen ab.

Maximale Differenzleistung sind 40 kW, bezogen auf 10 Minuten 6,7 kWh Energie, die aufgenommen oder abgegeben werden muss.

Der maximale Strom, basierend auf der niedrigsten zulässigen Zellspannung von 1,7 V/Zelle bei Blei-Säure-Batterien, beträgt 85,3 A ($40 \text{ kW} / (1,7 \cdot 276)$) und pro Strang nur noch 42,6 A. Der Ladestrom, eine maximale Ladespannung von 2,35 V/Zelle unterstellt, ist noch niedriger (30,8 A. Der Strom ist moderat und beträgt somit weniger als ca. $2 \times I_{10}$ (229 Ah bei 10-stündiger Kapazität).

Bei diesem Ladestrom und Entladestrom hat die Batterie in etwa die fünfstündige Kapazität von 203 Ah (nach Datenblatt) entsprechend 218 kWh ($203 \cdot 276 \cdot 1,95 \text{ V} \cdot 2$). Wenn es keine Nebenreaktionen gäbe, dann dürfte die Batterie auf einen maximalen Energieinhalt von 211,3 kWh entsprechend ca. 97% vollgeladen sein. Bei

¹ Die Verwendung der Nennkapazität (bezogen auf 10-stündige Entladung) würde in diesem Fall zu einem völlig anderen Ladezustandsbereich führen, als der hier dargestellte. Referenzwert der Kapazität muss also für die Ladezustandsbestimmung immer präzise überlegt werden.

dem 30-minütigem Entladestrom beträgt der Energieinhalt nur ca. 100 kWh und der maximale Energieinhalt dürfte dann nur 93,3 kWh betragen. Mit diesem Wert wird weiter gerechnet, weil dieser Wert dem Auslegungspunkt besser entspricht.

Der maximale Ladezustand beträgt somit 93,3 % $((100\text{kWh}-6,7\text{kWh})/100\text{kWh})$. Bei Blei-Säure-Batterien muss berücksichtigt werden, dass der Ladewirkungsgrad ab einem Ladezustand von 80 % abnimmt und die Nebenreaktionen zunehmen. Für Blei-Säure-Batterien ist somit ein Sollladezustand von ca. 73,3 % anzustreben. Für Lithium-Ionen-Batterien muss ebenfalls verhindert werden, dass bei sehr hohem Ladezustand eine hohe Ladeleistung aufgenommen werden muss. Zur Vereinfachung wird im Folgenden mit dem gleichen Sollladezustand für beide Batteriesysteme weitergerechnet.

Der Sollladezustand beträgt also ca. 73 %, damit ein genügend großer Sicherheitsspielraum bleibt, wenn bei einem großen Prognosefehler die Batterie die Überschussenergie sicher aufnehmen können muss. Umgekehrt soll der Ladezustand nicht unter 27 % sinken, damit die Batterie innerhalb des zulässigen Bereichs bleibt, wenn sie viel Energie liefern muss. Die Wahl des oberen Sollladezustands ermöglicht eine größere Sicherheitsreserve, wenn die Batterie bei Versagen von Erzeugungseinheiten eine längere Überbrückungszeit gewährleisten muss.

Für die meisten Batterien gibt es ein Ladezustandsfenster, das bei sonst gleichen Bedingungen abhängt von

- der Ladefähigkeit bei hohem Ladezustand (um hohe Spannungen zu vermeiden, muss die Ladeleistung verringert werden, wenn es keine Nebenreaktionen gibt; Wenn Nebenreaktionen vorhanden sind, ist die dadurch verursachte Schädigung und die erhöhte Spannung zu beachten) und
- der Alterungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Ladezustands (Bei Blei-Säure-Batterien ist die Alterung bei 100 % Ladezustand am geringsten, bei Lithium-Ionen-Batterien ist die Alterung im Bereich von 100 % hoch und der maximale Ladezustand sollte 90 % nicht überschreiten – abhängig von den Materialien).

Durch die Begrenzung des Ladezustands auf maximal 73 % als Sollwert sinkt die ursprünglich geplante Überbrückungszeit ab. Als Folge muss ggf. die Größe der Batterie neu festgelegt werden.

Alternativ könnte man auch die Begrenzung des Ladezustands als Ausgangsbasis für die Festlegung der Größe verwenden.

Schritt 5: Betriebsführung

In der Cutec-Anlage wurde die Beeinflussung des Lastverlaufs oder auch die Reduzierung von kurzfristigen Leistungsspitzen, z.B. verursacht durch Anlaufströme etc., nie betrachtet, weil dann mit Akzeptanzproblemen zu rechnen gewesen wäre.

1. Startpunkt: Batterie in den Solladezustand (Berechnung auf Basis der 30-minütigen Kapazität) bringen.
2. Am Ende des jeweiligen Zeitschrittes: Tatsächlichen Leistungsverlauf mit Prognosewert vergleichen und Energieüberschuss oder –mangel berechnen.
3. Neuen Produktionswert für den nächsten Zeitschritt berechnen. Unterschiedliche Prognoseverfahren stehen dafür zur Verfügung, z.B. Ursprünglicher Prognosewert abzüglich der Differenz der Durchschnittsleistung des abgelaufenen Zeitschrittes.
4. Produktion um den Betrag verändern, der es erlaubt, die Batterie innerhalb des nächsten Zeitschrittes wieder auf den Solladezustand zu bringen.
5. Mitrechnen des Ladezustands durch Vergleich mit Regeln, und bei Abweichungen den Ladezustandswert korrigieren.

Schritt 6: Berechnung der Wärmeleistung

Die folgenden Überlegungen werden nur für Blei-Säure-Batterien durchgeführt, weil diese wegen des höheren Innenwiderstands eine höhere Wärmeerzeugung haben. Das Ergebnis, ca. 0,5kW, ist für Lithium-Ionen-Batterien sicher zu hoch. Trotzdem ist bei dem hier beschriebenen Betrieb davon auszugehen, dass im Aufstellungsraum der Zellen eine Wärmeleistung im Bereich von 100 W zu erwarten ist, die abgeführt werden muss.

Die Wärmeleistung muss sowohl im Betrieb als auch im Ladeerhaltungsbetrieb berechnet werden. Die Wärmeleistung im Ladeerhaltungsbetrieb kann sehr viel größer sein als im Betrieb selber.

Die bisher berechneten Stromwerte sind gering im Vergleich zur Kapazität. Da bei einer vollständigen Entladung mit diesen, auf die Batteriekapazität bezogenen geringen Strömen keine besondere Erwärmung stattfindet, ist von folgendem auszugehen:

- Die Batterietemperatur wird sich nur langsam erhöhen, Ausgangspunkt der Überlegungen ist deshalb der dauernd zu erwartende Strom, und nicht ein kurzfristiger Spitzenstrom.
- Auf die Berechnung kann wegen der Dauerbelastung nicht verzichtet werden.

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Wärmeleistung abzuschätzen:

1. Spannungsdifferenz:

Die Nennelektrolytdichte beträgt 1,24 kg/Liter entsprechend 2,09V/Zelle im Ruhezustand bei Vollladung. Im entladenen Zustand beträgt die Ruhespannung ca. 2,0 V/Zelle. Bei einer durchschnittlichen Entladespannung von 1,95 V und einer Begrenzung auf 80% Entladetiefe, entsprechend ca. 1,85 V/Zelle, ist die Differenz zwischen Ruhespannung und Entladespannung maximal ca. 0,1 bis 0,15 V/Zelle. Wegen des symmetrischen Verhaltens der Butler-Volmer-Gleichung ist bei niedrigem Ladezustand (keine Nebenreaktionen) in Laderichtung die gleiche Spannungsdifferenz zu erwarten.

Der maximale Betriebsstrom innerhalb des erwarteten maximalen

Prognosefehlers (20% von 50 kW Durchschnittsleistung) beträgt 21,3 A für beide Strang
 (10kW ständige Lade- oder Entladeleistung / minimale Betriebsspannung (1,7V*276 = 469,2V)
 Die maximale Wärmeleistung beträgt somit insgesamt
 $\text{Wärmeleistung} = 0,15 \text{ V} \times 21,3 \text{ A} \times 276 \text{ Zellen} = 0,88 \text{ kW}$
 Da im Durchschnitt der Prognosefehler nur halb so groß ist, ist mit 0,44 kW Wärmeleistung zu rechnen.

Da bei den hier verwendeten Spannungswerten mit der Klemmspannung der Batterie und nicht dem Elektrodenpotential gerechnet wird, enthält dieser Wert bereits die ohmschen Verluste.

2. Innenwiderstand

Der Innenwiderstand der Zelle (berechnet für den Kurzschlussstrom ist $1,07/3 = 0,36$ Milliohm (Faktor 3, weil die Angabe im Datenblatt für einen 6-Volt Block gemacht wurde).

Daraus errechnet sich eine Wärmeleistung von

$$0,00036 \times 10,75 \times 10,75 \times 276 = 11,5 \text{ Watt pro Strang bzw. } 23 \text{ W.}$$

Dieser Wert ist signifikant geringer als der obige Wert, was auf die große Abhängigkeit des Innenwiderstands vom Strom zurückgeführt werden kann.

3. Reversibler Wärmeeffekt:

Kann für Blei-Säure-Batterien für die Hauptreaktion vernachlässigt werden.

Sie sind auch wegen des im Durchschnitt gleichbleibenden Ladezustands und der Wärmeerzeugung bei Ladung und Abkühlung bei Entladung ohne Bedeutung.

Im Ladeerhaltungsbetrieb bezieht sich die Spannung auf die Gleichgewichtsspannung der Reaktion, die tatsächlich abläuft. Dies ist bei der Elektrolyse von Wasser 1,23 Volt. Außerdem muss der Ripplestrom des Ladeerhaltungstroms als Basis verwendet werden.

1. Ripplestrom

Der maximale Ripplestrom beträgt $5 A_{\text{eff}} / 100 \text{ Ah}$, d.h. 11,25 A (bezogen auf die Nennkapazität von 225 Ah). Bei Nutzung des für den Kurzschluss berechneten Innenwiderstands ergibt sich somit eine Wärmebelastung pro Strang durch den Ripplestrom von

$$0,00036 \times 11,25 \times 11,25 \times 276 = 12 \text{ Watt}$$

wenn davon ausgegangen wird, dass für diesen Fall auch der Kurzschlusswiderstand verwendet werden kann.

2. Ladeerhaltungstrom:

Als maximaler Ladeerhaltungstrom ist bei Raumtemperatur und 2,25 V/Zelle bei einer gealterten Batterie mit einem Ladeerhaltungstrom von 100 mA/100 Ah (DIN IEC 21/455/CD) zu rechnen. Bezogen auf 225 Ah und einer Spannung von 2,45 V statt 2,25 V/Zelle ergibt sich dann ein maximal zu erwartender Ladeerhaltungstrom während der Ausgleichladung von $0,1 \times 2,25 \times 10 = 2,25 \text{ A}$ (Faktor 10: pro 0,2 V verzehnfacht sich der Ladeerhaltungstrom

Die Wärmeerzeugung ergibt sich daraus zu:

$2,25 \text{ A} \times (2,45 \text{ V} - 1,23 \text{ V}) \times 276 = 758 \text{ Watt (pro Strang)}, \text{ insgesamt also } 1,519 \text{ kW}.$

3. Der reversible Wärmeeffekt durch die Wasserelektrolyse verringert die Wärmeentwicklung, wird aber bei Auslegungen meistens nicht berücksichtigt.

Die Überlegungen zeigen, dass ohne genaue Modelle nicht wirklich klar ist, wie hoch die Wärmeentwicklung sein wird.

Die Wärmekapazität des Batterieraums und die natürliche Wärmeabfuhr muss auf ca. 0,5 kW ausgelegt sein, die Ausgleichladung erfolgt selten und kurzfristig und muss deshalb nicht berücksichtigt werden.

Für einen Dauerbetrieb und Einsatz der Batterie in einem isolierten Raum wären ggf. ein Kühlsysteme erforderlich, für den hier vorliegenden Demonstrationsbetrieb dagegen nicht. Außerdem wird durch die zu installierende Entlüftung bereits Wärme abgeführt.

Schritt 7: Lüftungsauslegung

Diese Überlegungen müssen nur für Blei-Säure-Batterien durchgeführt werden, um das im Betrieb entstehende Knallgas sicher abführen zu können.

Die Lüftungswerte beziehen sich auf die in der einschlägigen Sicherheitsnorm DIN EN 50272-2) vorgegebene Werte.

In der einschlägigen Sicherheitsnorm wird für eine Starkladung (entspricht einer Ausgleichladung mit üblicherweise 2,4 V/Zelle) geschlossener Bleizellen (flüssiger Elektrolyt von 2000 mA/100 Ah ausgegangen. Dieser Wert berücksichtigt mögliche Ladegerätefehler und Zellfehler. Für verschlossene Batterien (Gel oder Vlies) wie bei den Cutec-Batterien ist der entsprechende Wert 800 mA/100 Ah

Benötigtes Luftaustauschvolumen:

$0,054 \times 0,8 \text{ A/100Ah} \times 2,25 \times 100 \text{ Ah} \times 276 \times 2 = 53,65 \text{ m}^3/\text{h}.$

Der Faktor 0,054 bezieht sich darauf, dass erst ab einer Konzentration von 4 % Knallgas eine Explosion möglich ist.

Bei 2,5 V/Zelle ist der Strom erfahrungsgemäß um den Faktor 3,3 größer, so dass mit einem Luftaustauschvolumen von 162 m³/h zu rechnen ist.

Weil es sich um eine verschlossene Batterie mit Rekombinationswirkung handelt, bei der so gut wie gar kein Knallgas ans Freie gelangt (bei ordnungsgemäßigem Betrieb des Ladegeräts und einer intakten Batterie), wird das geforderte Luftaustauschvolumen um einen Faktor 2 verringert, also auf 80,5 m³/h, entsprechend 22,4 l/s .

Bei Zellfehlern ist allerdings zu erwarten, dass die Rekombinationsrate fast Null wird, so dass der Faktor 2 kritisch zu beurteilen ist.

Die Sicherheitsnorm verlangt weiterhin, dass das Ladegerät überwacht wird, so dass nicht bei einem Ladegerätefehler ein deutlich höherer Ladungsstrom fließen kann.

Schritt 8: Sonstiges

1. Boden muss isolierend, aber elektrostatisch ableitend sein: Ableitwiderstand so hoch, dass elektrostatische Aufladung unmöglich ist, aber Durchstürmen des Körpers effektiv unterdrückt wird.
2. Isolation der Gestelle gegen Erde und gegen die Batterie
3. Boden elektrolytdicht, damit bei einer Leckage keine Schwefelsäure auslaufen kann (nur Blei-Säure-Batterien).

Wahl der Batterietechnologie

Beide Technologien sind in der Lage, die geforderten Anforderungen zu erfüllen. Allerdings gibt es einige wichtige Unterschiede:

1. Lebensdauer
Es ist zu erwarten, dass Lithium-Ionen-Batterien die höhere Lebensdauer haben werden. Allerdings ist bei hochwertigen Blei-Säure-Batterien mit einer durchaus vergleichbaren Lebensdauer zu rechnen (10 – 12 Jahre).
Der Austausch einer defekten Zelle bzw. Blocks ist bei Blei-Säure-Batterien durch geschulte Betriebselektriker leicht möglich, was das Lebensdauerende, wenn es durch einen Ausfall von Einzelzellen verursacht wird, hinauszögert.
2. Investitionskosten
Blei-Säure-Batterien sind preiswerter und werden das auch über viele Jahre bleiben. Allerdings sind die Aufstellungskosten höher, und auch die Kosten für den Aufstellungsraum sind höher. Der Raum muss größer sein, eine höhere Bodentragkraft haben, mit einer Belüftungsanlage ausgestattet sein und der Boden muss entsprechend beschichtet werden.
Zusätzlich sind die Planungskosten bei Blei-Säure-Batterien höher, weil das Batteriesystem nicht einfach als „Schrank“ geliefert werden kann.
3. Betriebskosten
Bei Lithium-Ionen-Batterien sind vergleichsweise geringe Wartungsarbeiten (Filter von Lüftern, etc.) zu erwarten und die Überwachung der Batterie ist üblicherweise integraler Bestandteil des Systems, die über die Investitionskosten bezahlt wird. Bei Blei-Säure-Batterien ist der Aufwand dagegen viel höher und nur dann vergleichbar, wenn verschlossene Blei-Säure-Batterien eingesetzt werden und ein vollständiges Überwachungssystem installiert wird, was den Preis aber deutlich erhöhen wird.

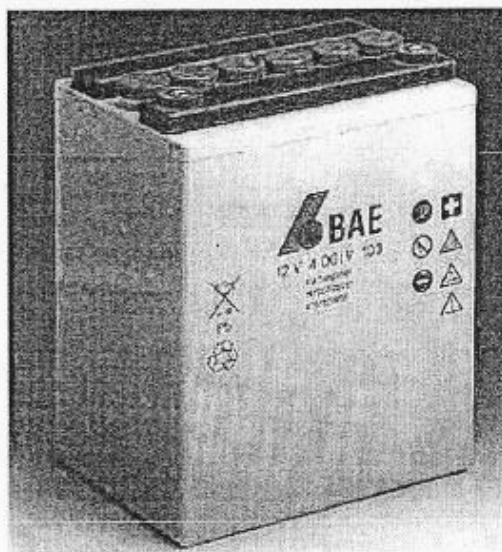
Welches Batteriesystem also das bessere ist, ist alles andere als eindeutig.

Technische Spezifikation für verschlossene Stationäre Blockbatterien

1. Anwendung

BAE OGIV - Batterien gehören der besten EUROBAT Klassifizierung für wartungsfreie Bleibatterien 10+ Sondereinsatz an. In Anwendungen mit den höchsten Anforderungen an Betriebssicherheit und Überbrückungszeiten zwischen 15 min und einigen Stunden ist die Batterie BAE OGIV die richtige Wahl.

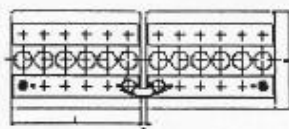
Sie werden zur Ersatzstromversorgung von Telekommunikationseinrichtungen, Richtfunkstationen, Daten- und Signalanlagen der Verkehrssysteme, Schaltanlagen der Energieversorger und anderer Anlagen eingesetzt.



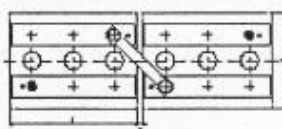
2. Typen, Kapazitäten, Abmessungen, Masse

Type	C10	C5	C3	C1	C1/2	C1/6	Ri 1)	I _k 2)	Länge	Breite	Höhe max	Masse
	Ah	Ah	Ah	Ah	Ah	Ah	mΩ	kA	mm	mm	mm	kg
U _e V / Zelle	1,80	1,79	1,78	1,74	1,70	1,60						
12V 1 OGIV 25	28	23	22,2	18,3	15,7	12,1	19,20	0,65	272	205	385	35
12V 2 OGIV 50	51	46,5	44,4	36,6	31,5	24,1	9,60	1,29	272	205	385	44
12V 3 OGIV 75	77	70	66,6	54,6	47,2	36,3	6,40	1,94	272	205	385	53
12V 4 OGIV 100	101	93,5	89,1	73,2	63	48,3	4,80	2,59	272	205	385	62
12V 5 OGIV 125	130	113	108	91	78	59,8	3,84	3,23	380	205	385	84
12V 6 OGIV 150	157	136	130	108	93	71	3,20	3,88	380	205	385	93
6V 7 OGIV 175	178	153	150	125	107	82,2	1,37	4,53	272	205	385	53
6V 8 OGIV 200	205	179	172	142	122	93,3	1,20	5,18	272	205	385	57
6V 9 OGIV 225	229	203	191	161	135	103	1,07	5,80	380	205	385	73
6V 10 OGIV 250	255	228	218	180	148	112	0,96	6,47	380	205	385	78
6V 11 OGIV 275	281	255	241	198	161	121	0,87	7,14	380	205	385	81
6V 12 OGIV 300	308	281	266	216	175	130	0,80	7,76	380	205	385	85
2V 24 OGIV 600	615	536	517	427	366	280	0,13	15,92	205	272	385	57
2V 30 OGIV 750	765	684	653	539	444	335	0,11	18,82	205	380	385	81
2V 36 OGIV 900	924	843	799	648	525	390	0,09	23,00	205	380	385	85

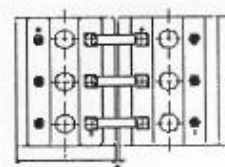
1, 2) Innenwiderstand und Kurzschlußstrom nach IEC 896-2



12V 1 OGIV 25 bis 12V 6 OGIV 150



6V 7 OGIV 175 bis 6V 12 OGIV 300



2V 24 OGIV 600 bis 2V 36 OGIV 900

3. Konstruktion

Positive Elektrode

Rund-Gitterplatte mit kreisrunden Gitterstegen in einer korrosionsfesten PbCaSn - Legierung

Negative Elektrode

Gitterplatte in PbCaSn- Legierung mit Langzeitspreizstoff

Separation

mikroporöser Separator

Elektrolyt

Schwefelsäure der Dichte 1,24 kg/l, durch pyrogene Kieselsäure als GEL fixiert

Gefäß

SAN (Styrol-Acryl-Nitril) in erprobter Batteriequalität, grau eingefärbt

Deckel

SAN grau eingefärbt

Musterlösung g für Aufgaben

Blöcke mit Blindzellen	4V, 6V, 8V, 10V
Ventil	Pro Zelle ein Ventil mit Rückzündungsschutz, Öffnungsdruck ca. 100 mbar, Schließdruck ca. 50 mbar
Poldurchführung	100% gas- und elektrolytdicht, Gleitpol
Polausführung	M10 Messingeinlage
Verbinder	Flexible isolierte Kupferkabel mit Querschnitten von 35, 50, 70, 95 oder 120 mm ²
Schutzart	IP 25 entsprechend DIN 40050, berührungsgeschützt nach VBG 4
4. Ladung	
IU - Kennlinie	Imax ohne Begrenzung möglich U = 2,23 V/Zelle +/- 1%, zwischen 10°C und 45°C D U/D T = -0,004 V/K unterhalb 10°C im Monatsmittel
Starkladung	U = 2,35 bis 2,40V/Zelle, zeitlich begrenzt
Ladezeit bis 92%	6h mit 1,5*I ₁₀ Anfangsstrom, 2,23 V/Zelle, 50% C10 entladen
5. Entladeeigenschaften	
Referenztemperatur	20°C
Anfangskapazität	100%
Entladetiefe	normal bis 80%
Tiefentladungen	Entladetiefen über 80% und Entladungen über die stromabhängigen Entladeschlußspannungen sind zu vermeiden.
Erholung nach Tiefentladung	Das GEL-System erlaubt eine komplette Wiederaufladung und Erholung nach unbeabsichtigten Tiefentladungen.
6. Wartung	
alle 6 Monate	Batteriespannung; Pilotblockspannungen und Temperaturen prüfen
alle 12 Monate	Batteriespannung, Blockspannungen und Temperaturen protokollieren
7. Betriebseigenschaften	
Klassifizierung nach EUROBAT	10 + , Sondereinsatz
Brauchbarkeitsdauer	>12 Jahre bei 20°C >6 Jahre bei 30°C >3 Jahre bei 40°C
wartungsfrei	kein Wassernachfüllen während der Gebrauchsdauer
IEC 896-2 Zyklen	800
Selbstentladung	ca. 2% pro Monat bei 20°C
Betriebstemperatur	-20°C bis 45°C empfohlen 10°C bis 30°C 45°C bis 55°C kurzzeitig
Lüftungsanforderung	25% (f1=0,5 x f2=0,5) entsprechend VDE 0510 Teil 2
Abmessungen gemäß	DIN 40 737 Teil 3
Prüfungen gemäß	IEC 896-2,
Sicherheitsstandard	VDE 0510, Teil 2
Transport	kein Gefahrgut bei Luft-, See- und Landtransport

Nennen Sie uns Ihr Anwendung. Wir unterstützen Sie gern bei der Batterieauswahl.
Wollen Sie dieses Kennblatt auf Ihren Rechner laden? Das ist hier möglich!



BAE Berliner Batterie GmbH
Wilhelminenhofstraße 69/70
12459 BERLIN

Postfach 9 - 12442 Berlin
Tel. +49 30 5 30 01-6 87
Fax +49 30 5 30 01-3 36
<http://www.bae-berlin.de>

Export:
Tel. +49 30/5 30 01-6 65
Fax +49 30/5 30 01-6 75