

PLANUNGSLEITFADEN BRENNSTOFFZELLEN-ERSATZSTROMVERSORGUNGEN

www.cleanpowernet.de

UNTERBRECHUNGSFREIE STROMVERSORGUNG (USV) UND NETZERSATZANLAGEN (NEA) MIT BRENNSTOFFZELLEN

Benedikt Eska
Marcel Corneille

Keine lokalen Emissionen

Keine Lärmentwicklung

Keine Vibrationen

Lange Überbrückungszeit

Lange Lebensdauer

Hohe Zuverlässigkeit

Stationär oder mobil

Modular und erweiterbar

Erstellt für NOW GmbH – Nationale Organisation
Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
Fasanenstraße 5, 10623 Berlin

Technische Beschreibung

Technology Management SK
Münchener Straße 35a
85748 Garching

Autoren

Benedikt Eska
Marcel Corneille

Herausgeber

Clean Power Net (CPN)

PLANUNGSLEITFADEN
BRENNSTOFFZELLEN-ERSATZSTROMVERSORGUNGEN

UNTERBRECHUNGSFREIE STROMVERSORGUNG (USV)
UND NETZERSATZANLAGEN (NEA) MIT BRENNSTOFFZELLEN

Benedikt Eska
Marcel Corneille

Präambel

Zwei Kernaufgaben des 21. Jahrhunderts sind eng miteinander verbunden: Die Digitalisierung der Gesellschaft und die Energiewende. Die Digitalisierung erfordert eine sichere Stromversorgung bei Netzausfall und die Energiewende den Einsatz alternativer Technologien wie bspw. der Brennstoffzelle. Diesel-Generatoren werden hierbei zunehmend von Brennstoffzellen-Anlagen abgelöst, da sie technische, ökologische und ökonomische Überlegenheit bieten.

Die Bereitstellung von Ersatzstromversorgung mit Brennstoffzellen sei es als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) oder Netzersatzanlage (NEA) erfährt insbesondere auf dem Gebiet folgender kritischer Infrastrukturen wachsende Bedeutung:

- BOS Digitalfunk und Mobilfunk (Basisstationen)
- Übertragungs- und Verteilnetzbetriebe (Umspannwerke, Wasseraufbereitung)
- Verkehrsleittechnik (Bahn-Stellwerke, Signalsysteme, Flughafen- und Flugverkehr-Sicherungen)
- Sicherheitstechnik (Baustellenüberwachung, Mess- und Prüfstationen)
- IT-Infrastruktur (Absicherung von Rechenzentren)
- Gesundheitswesen (Krankenhäuser, mobile Krankenstationen)
- Industrieproduktion (Leit- und Steuertechnik).

Dieser Leitfaden soll planenden und beratenden Ingenieuren als praktisches Hilfsmittel dienen und den Einstieg in die Technologie sowie Planungs- und Genehmigungsprozess für Aufbau und Betrieb von Brennstoffzellen-Anlagen erleichtern.

Das Kapitel „Technische Beschreibung“ bietet einen kompakten Überblick über Planung, Errichtung, Inbetriebnahme und Betrieb von Brennstoffzellen-Ersatzstromversorgung. Es findet sich eine Check-liste im Anhang, die den Planungsprozess vereinfachen hilft.

Der Planungsleitfaden bietet darüber hinaus:

- Eine Darstellung der Vorteile von Brennstoffzellen im Vergleich zu Diesel-Netzersatzanlagen
- Eine Übersicht über verschiedene Brennstoffzellentypen und -lösungen
- Eine Betrachtung netzgekoppelter und netzentkoppelter Systeme.

Aktuelle Informationen zur Förderung von Brennstoffzellen-Anlagen sind auf der Website der NOW GmbH (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie) dargestellt: www.now-gmbh.de.

Anbieter von Brennstoffzellen-Lösungen sind mit ihren Leistungsprofilen und Ansprechpartnern auf der Website des Clean Power Net (CPN) zu finden: www.cleanpowernet.de.

Wolfgang Axthammer,
Geschäftsführer der NOW GmbH und Clean Power Net Projektmanager.

Inhalt

1	Hintergrund und Motivation	7
2	Einführung	8
2.1	Vorwort der Autoren	8
2.2	Aufbau des Leitfadens	9
	Technische Beschreibung	10
3	Übersicht	11
3.1	Brennstoffzellentechnologie – technischer Hintergrund	11
3.2	Vorteile von Brennstoffzellen im Vergleich zu Batterie- und Diesel-Netzersetzanlagen	14
3.3	Typische Anwendungen	18
4	Planung	20
4.1	Auslegung der Leistung	21
4.2	Laufzeit der ESV und Auslegung des Brennstoffspeichers	22
4.3	Elektrotechnische Einbindung	24
4.4	Auswahl der Brennstoffzelle und des Brennstoffs	27
4.5	Sicherheitskonzept	27
4.6	Anlagenbeschreibung und Aufstellungskonzept	28
5	Errichten	28
5.1	Indoor und Outdoor	28
5.2	Baustellenlogistik	28
6	Inbetriebnahme	29
7	Betrieb	29
7.1	Einsatzfall	29
7.2	Testbetrieb	29
7.3	Wartung & Instandhaltung	30
7.4	Brennstofflogistik	30
8	Zusammenfassung technische Beschreibung	31
A.1	Abkürzungsverzeichnis	32
A.2	Glossar	33
A.3	Auslegung	34
A.4	Abbildungsverzeichnis	38
A.5	Checkliste	39
A.6	Autoren	43

1 Hintergrund und Motivation

Elektrische Anlagen sind mitunter so wichtig bzw. funktionskritisch, dass Stromnetzausfälle entweder Gefahren für Leib und Leben oder große wirtschaftliche Schäden zur Folge haben würden. Solche Einrichtungen, auch als kritische Infrastrukturen bezeichnet, werden typischerweise mit einer sogenannten Ersatzstromversorgung (ESV) ausgerüstet, die bei Ausfall der regulären Stromversorgung zeit- und übergangsweise die Weiterversorgung übernimmt. Ersatzstromversorgungen werden grundsätzlich unterschieden in unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV) und Netzersatzanlagen (NEA).

Um länger andauernde Netzausfälle überbrücken zu können, werden die meist batteriebetriebenen USV-Systeme typischerweise um NEA erweitert. Dabei setzte man bisher typischerweise auf Dieselgeneratoren mit entsprechend dimensionierten Dieseltanks vor Ort. Ein hoher Bekanntheitsgrad bei Einkäufern, Projektentwicklern und Planern sowie etablierte Vertriebsstrukturen haben bisher eine starke Affinität zu Diesel-NEA hervorgebracht. Und aus der allgemein wahrgenommenen starken Verbreitung von Diesel-NEA wird häufig (unbewusst) auf einen hohen Eignungsgrad der Dieseltechnologie geschlossen. Dabei werden die technologiebedingten Nachteile für den Standby-Betrieb, wie er bei NEA in stabilen Stromnetzen sehr ausgeprägt auftritt, meist übersehen oder zumindest unterschätzt. Degradation bei Brennstoff und Motorenöl sowie Korrosion im Kühlwasserkreislauf lassen das Diesel-Aggregat vor allem im Standby merklich altern und beeinträchtigen die Anlaufverfügbarkeit massiv.

Hingegen machen eine Reihe günstiger Eigenschaften die Brennstoffzellentechnik sehr attraktiv für den Einsatz in ESV:

- Schnelles und sicheres Anlaufen bei Stromnetzausfall
- Niedriger Betreuungsaufwand und geringe Alterungstendenz im Standby
- Modulierbarkeit der Leistung über einen weiten Bereich bei gleichbleibend hohem Wirkungsgrad
- Keine Degradation von Brennstoffen

Vor allem bei hohen Verfügbarkeits- bzw. Umweltaforderungen kann die Brennstoffzellentechnik ihre technologischen Stärken ausspielen.

In mehreren durch das NIP geförderten Projekten konnten inzwischen Eignung und Alltagstauglichkeit bewiesen werden. Obwohl entsprechende Lösungen nunmehr kommerziell verfügbar sind, ist die Nachfrage immer noch sehr zögerlich. Das dürfte wesentlich an der Neuheit der Technologie liegen, wodurch es an standardisierten und allgemein bekannten Genehmigungsprozessen und Planungsunterlagen fehlt.

Dieser Leitfaden soll durch Information und konkrete Handlungsempfehlungen bestehende Wissenslücken schließen und damit Hürden und Berührungängste abbauen. Er soll ermutigen und praktisch dabei unterstützen, die innovative Brennstoffzellentechnik bei künftigen ESV-Vorhaben verstärkt zu berücksichtigen und damit zur Erreichung von Umwelt- und Klimazielen beitragen. Mit Hilfe einer Checkliste soll die Konzeption neuer BZ-Projekte für Planer vereinfacht werden.

2 Einführung

2.1 Vorwort der Autoren

Der Planungs- und Genehmigungsleitfaden, im Folgenden „Leitfaden“, richtet sich insbesondere an Fachleute mit Erfahrung bei Planung, Errichtung und Betrieb von konventionellen Ersatzstromversorgungen, die an Brennstoffzellenlösungen interessiert sind.

Der Leitfaden geht in kompakter Form auf die Besonderheiten von verschiedenen Brennstoffzellentypen und -lösungen ein. Betrachtet werden netzgekoppelte Systeme wie unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) und Netzersatzanlagen (NEA) sowie netzentkoppelte Systeme (Inselanlagen). In diesem Sinne wird für den Leitfaden der Oberbegriff Ersatzstromversorgungen (ESV) definiert.

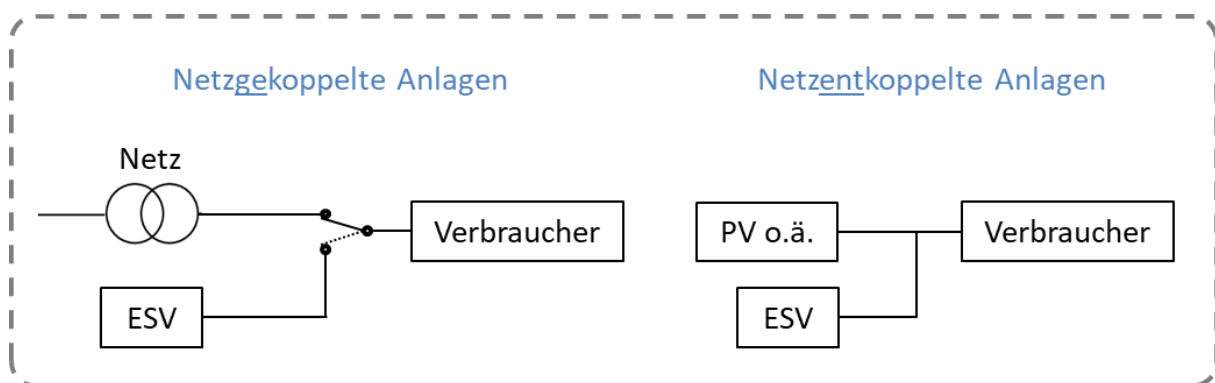


Abbildung 2-1: Unterscheidung der ESV-Anlagen in netzge- und netzentkoppelte Anlagen

Für den Leitfaden wurden die Erfahrungen der letzten Jahre bei Planung, Errichtung und Betrieb von mehreren hundert BZ-ESV, und im kleinen Leistungsbereich unterhalb von 1 kW von mehreren tausend BZ-Lösungen, aufgegriffen.

Der Leitfaden ist als Hilfsmittel bei der Planung von BZ-ESV zu verstehen. Zur Unterstützung der Planungstätigkeit steht eine Checkliste zur Verfügung. Für detaillierte Planungen werden die relevanten Normen sowie die einschlägige Fachliteratur empfohlen.

2.2 Aufbau des Leitfadens

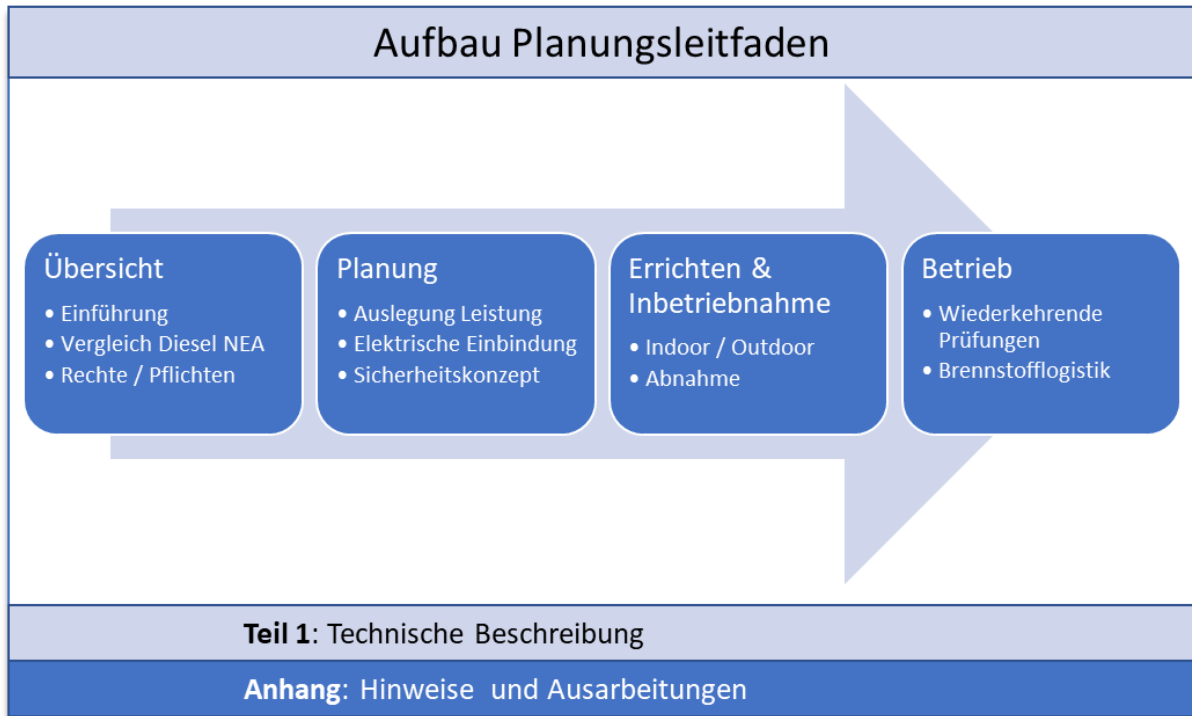


Abbildung 2-2: Übersicht zum Planungsleitfaden

Die unterschiedlichen Aufgaben der an einem Projekt Beteiligten sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst. Alle Beteiligten sollten ein Grundverständnis der rechtlichen Rahmenbedingungen entwickeln, um die Realisierung einer sicheren Anlage zu gewährleisten. Inhaltlich kann ein Beteiligter auch mehrere Rollen innehaben, beispielsweise kann der spätere Betreiber die Anlage auch selbst planen.

Die Gesamtverantwortung für die fertige Anlage liegt nach dem Gefahrenübergang formal immer bei dem Betreiber der Anlage, der sich ggf. durch Service Provider, z.B. bei der Wartung, unterstützen lässt. Unter dem Errichter werden zudem in dieser Tabelle bei den rechtlichen Aspekten auch Themen der Hardwarehersteller subsummiert.

Tabelle 2-1: Beteiligte und deren Aufgaben

Wer	Aufgaben	Querverweise
Planer	Technische Auslegung, sicherheitstechnische Anforderungen in Abstimmung mit dem Betreiber, Dokumentation	4
Errichter	Errichtung der Anlage, Produktsicherheit; Baugenehmigung, Erstinbetriebnahme, Dokumentation	5 6
Betreiber	Betrieb, Wartung & Instandhaltung, Brennstofflogistik, Betriebssicherheit, Dokumentation	6 7

Technische Beschreibung

3 Übersicht

3.1 Brennstoffzellentechnologie – technischer Hintergrund

Ganz allgemein wandeln Brennstoffzellen die chemische Energie eines Brennstoffes über einen elektrochemischen Prozess direkt in Strom (und Wärme). Diese Umwandlung erfolgt je nach Brennstoff emissionsfrei und es fällt kein Feinstaub an, anders als bei Verbrennungsmotoren.

Eine Brennstoffzelle ist eine Gleichspannungsquelle. Verschiedene Brennstoffzellentypen unterscheidet man nach den eingesetzten Elektrolyten (analog zu Batterien) und den verwendeten Brennstoffen. Dabei können je nach Brennstoffzellentyp unterschiedliche Brennstoffe, wie z.B. Wasserstoff, Methanol oder Flüssiggas (Propan und Butan) eingesetzt werden. **Brennstoffzellentyp und Brennstoff bilden eine Einheit und können nicht separat betrachtet werden.**

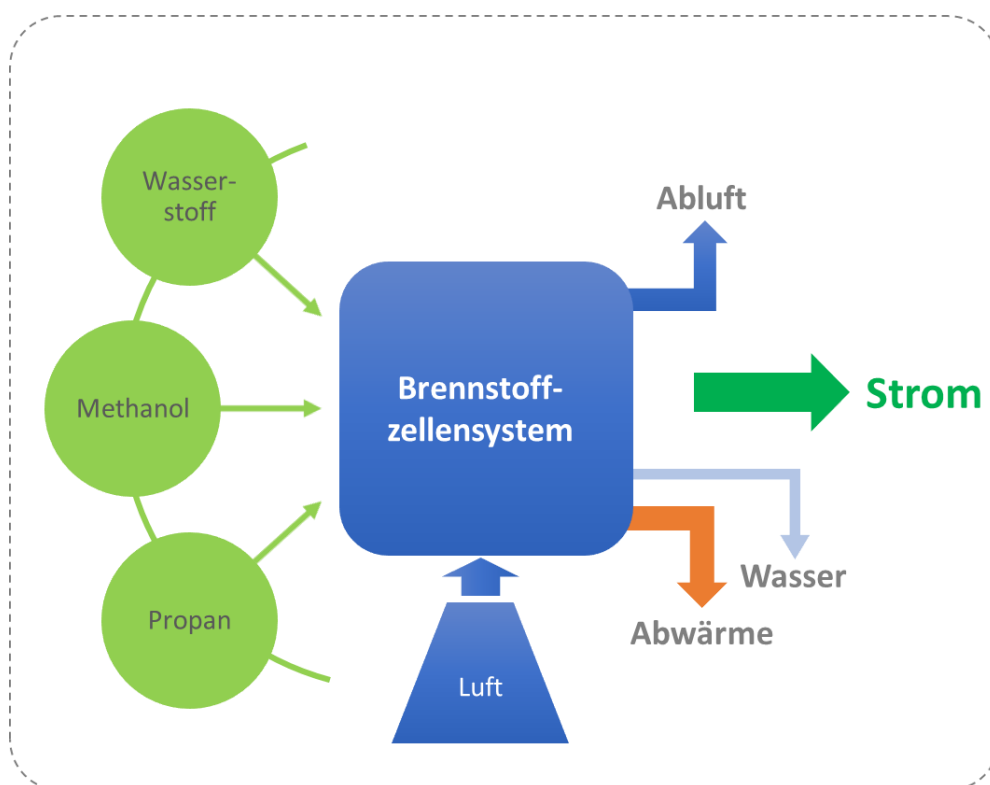


Abbildung 3-1: Prinzipschaltbild Brennstoffzellensystem

Die eigentliche Stromwandlung erfolgt in einer einzelnen Zelle unter Zuführung von Brennstoff und Luft und skaliert mit der Fläche der Zelle. Je größer die Fläche desto höher der Strom. Jede Zelle liefert dabei, je nach Betriebspunkt, eine bestimmte Spannung. Ein typisches Betriebsfenster liegt bei PEM-BZ zwischen 0,8 und 0,6 Volt pro Zelle. Für eine ausreichende Spannung werden die Zellen gestapelt – also elektrisch in Serie geschaltet – zu einem Brennstoffzellenstapel.

Der Brennstoffzellenstapel muss mit Brennstoff und Luft versorgt werden. Zudem muss die entstehende Abwärme entweder über eine Luft- oder Wasserkühlung abgeführt werden. Dafür werden Komponenten wie Ventile, Sensoren und Lüfter zusammen mit dem Brennstoffzellenstapel zu einem Brennstoffzellensystem verschaltet. Die Nebenaggregate werden häufig als Peripherie oder Balance-of-Plant (BoP) bezeichnet.

Der Brennstoff selbst wird in passenden Tanks gespeichert und dem BZ-System über Zuleitungen zugeführt. Je nach Brennstoff gibt es unterschiedliche Gebinde. Die Laufzeit der Gesamtanlage wird durch die Auslegung dieser Gebinde bestimmt.

Je nach Anforderung an die BZ-ESV besteht diese typischerweise aus den folgenden Hauptkomponenten:

- Brennstoffzellensystem
(inkl. Kühlsystem und ggf. Verdichter-Expander Einheit)
- Brennstoffbevorratung und ggf. Aufbereitung
- ggf. notwendige Wechselrichter
- Steuerungseinheit
- Batterie zur Stützung der Spannung während des Einschaltvorgangs
- ggf. Gehäuse mit ggf. notwendiger Heizung/Klimatisierung

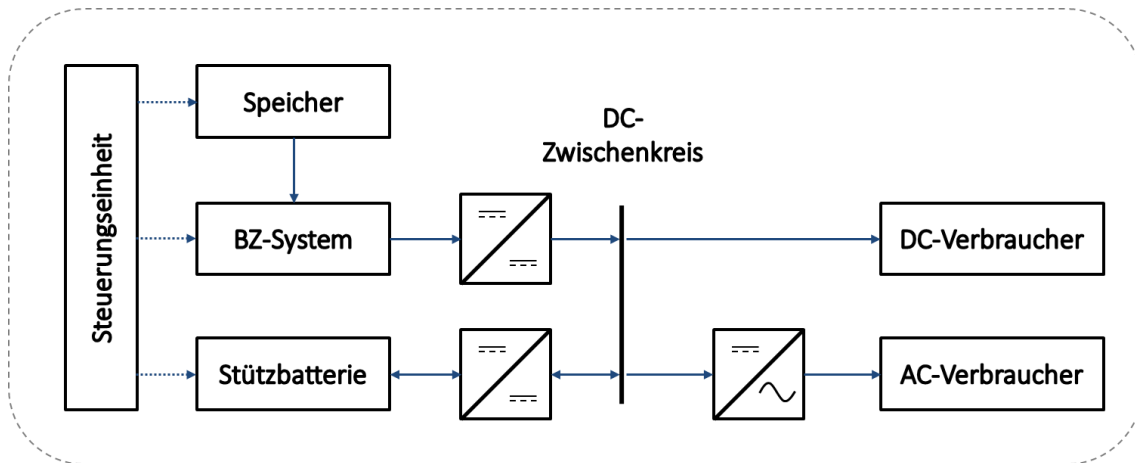


Abbildung 3-2: Prinzipschaltbild einer BZ-ESV

Je nach Konzept der verschiedenen Hersteller, können die Hauptkomponenten in einem oder mehreren Modulen, meist als 19 Zoll Rack, zusammengefasst sein. Viele Hersteller verfolgen einen modularen Ansatz und können so in gewissen Bandbreiten die angebotene Leistung variieren bzw. Redundanz anbieten.

Die am Markt verfügbaren Systeme weisen auf Grund ihrer betrieblichen Eigenschaften bevorzugte Anwendungsgebiete auf. Die folgenden Werte sind Anhaltswerte und unterscheiden sich je nach Anbieter und Konfiguration. Alle betrachteten Konfigurationen enthalten eine Stützbatterie, die je nach Anwendung und System in der Kapazität unterschiedlich ausfällt.

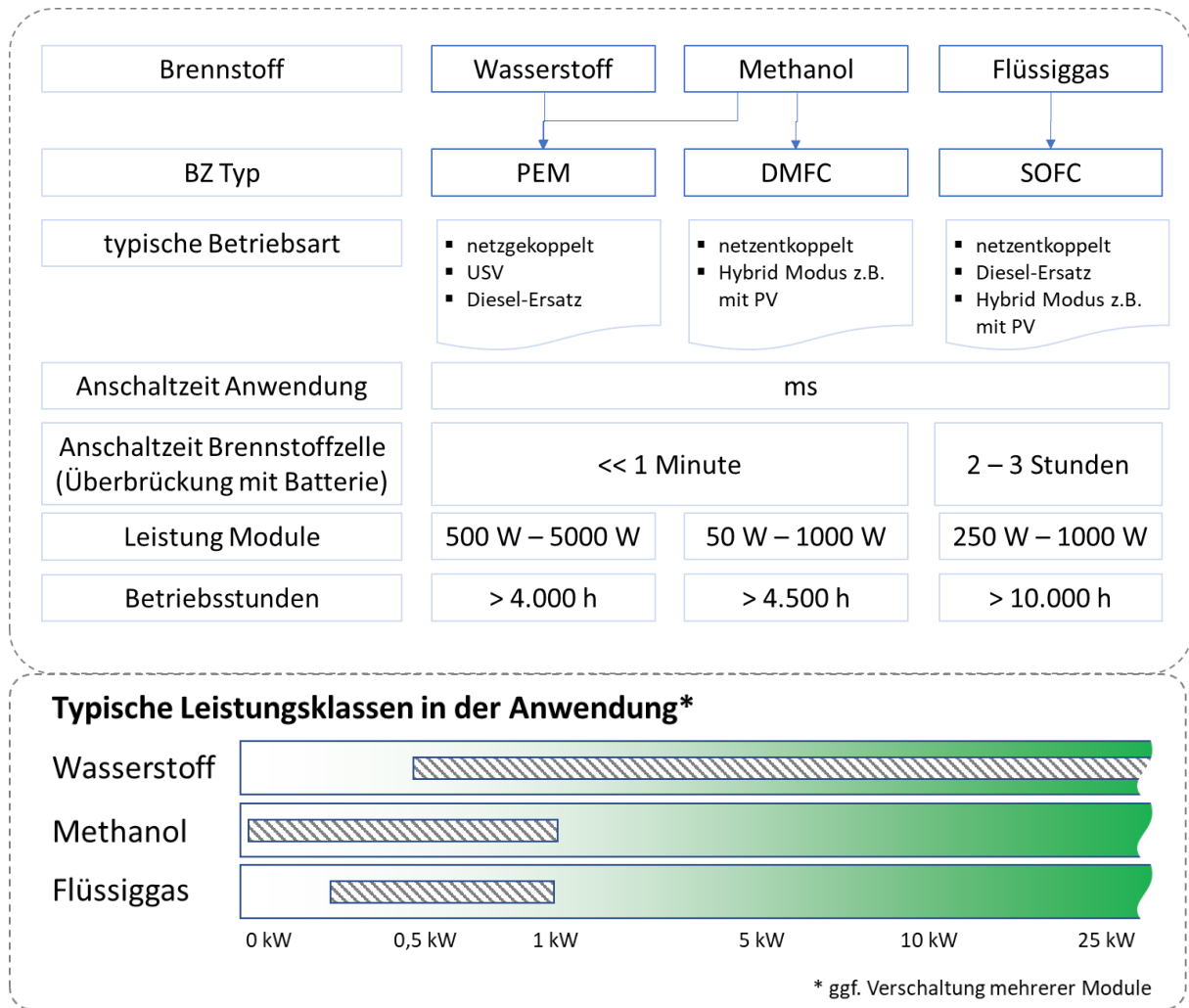


Abbildung 3-3: Typische Kennwerte von kommerziell verfügbaren Brennstoffzellensystemen

Es gilt dabei zu beachten, dass bei Verwendung von Methanol nicht jede PEM BZ geeignet ist.

3.2 Vorteile von Brennstoffzellen im Vergleich zu Batterie- und Diesel-Netzersatzanlagen

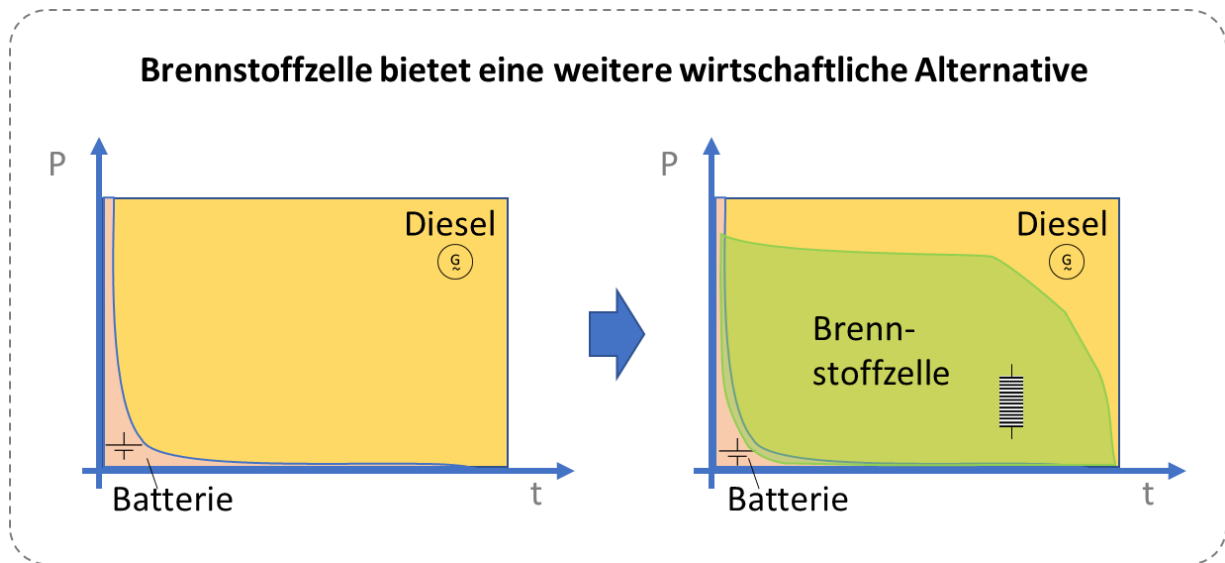


Abbildung 3-4: Brennstoffzellen sind besonders geeignet für lange Überbrückungszeiten

BZ-ESV verbinden die Vorteile von Batterie- und Diesel-Lösungen. Je nach Brennstoff operieren sie emissionsarm oder -frei wie eine Batterie, bieten aber Laufzeiten wie Diesel-Aggregate. Zudem gibt es technisch keine Beschränkung bezüglich der zu installierenden Leistung oder Tankgröße. Das wichtigste funktionale Kriterium – die Verfügbarkeit im Ernstfall (meist sind 72 h spezifiziert) – wurde bereits deutschlandweit in mehreren hundert Anlagen erfolgreich im Feld nachgewiesen.

Entscheidende Vorteile bietet die Brennstoffzelle bei kleinen bis mittleren Leistungen und relativ langer Laufzeit/Überbrückungszeit bei gleichzeitiger Hochverfügbarkeit. Bei einer *total-cost-of-ownership* (TCO) Betrachtung erreicht die Brennstoffzelle, durch die geringeren Wartungskosten, hier nach wenigen Jahren einen Break-Even gegenüber einer Diesel- oder Batterie-NEA.

In Tabelle 3-1 sind verschiedene Kriterien vergleichend dargestellt:

Kriterium	Batterie-USV	Diesel-ESV	Brennstoffzellen-ESV
TCO			
Anlaufverfügbarkeit			
Lebensdauer	 Batterien altern auch im Standby. Der Zustand einzelner Zellen ist nur mit großem Aufwand einzuschätzen; daher werden in kritischen Anwendungen die Batterien z.B. alle 2 Jahre getauscht.	 Bei richtiger Wartung unproblematisch.	 Brennstoffzellen in BZ-ESV sind meist für 4.000 Betriebsstunden ausgelegt. BZ für Dauerbetrieb erreichen auch 60.000 h. Von den Herstellern werden Systemstandzeiten von 15 - 20 Jahre erwartet.
Alterung Standby			
Wartung & Service	 wartungsfrei	 wartungsintensiv	 wartungsfrei bzw. wartungsarm je nach Hersteller und Anwendung
Abgase	 • Emissionsfrei	 • NO _x • CO ₂ • CO • Feinstaub	 • Emissionsfrei bei Betrieb mit Wasserstoff • CO ₂ bei Betrieb mit Methanol und Flüssiggas
Geräusch	 Geräuschlos	 Je nach Kapselung und Anbieter, typische Werte 65 dB (A) +/- 10% (7m).	 Geräuscharm. Das Geräusch wird durch die Luftansaugung verursacht.
Temperatur (ggf. mit Zusatzmaßnahmen)	 Enges Betriebsfenster um Alterung bzw. Kapazitätsverluste der Batterie zu vermeiden.	 Bei sehr niedrigen Temperaturen muss ggf. der Diesel vorgeheizt werden.	 Je nach Brennstoffzellentyp und Hersteller werden unterschiedliche Temperaturfenster angegeben. Ggf. werden Heizungen in Outdoor-schränken eingesetzt.

Tabelle 3-1: Vergleich von Batterie-USV, Diesel-NEA und BZ-ESV

3.2.1 Eigenschaften der verschiedenen Brennstoffe

Für die zurzeit am Markt verfügbaren BZ-ESV Systeme kommen die drei Brennstoffe Wasserstoff, Flüssiggas und Methanol in Frage. Alle diese Brennstoffe sind in Deutschland gut verfügbar. Die Eigenschaften der Brennstoffe unterscheiden sich wesentlich in Bezug auf Energiegehalt, Speicherform und Gefährdung:

- Wasserstoff ist gasförmig und wird typischerweise in Druckgasflaschen von 200 bis 300 bar gespeichert. Wasserstoff hat – bezogen auf das Gewicht – eine sehr hohe Energiedichte. Für die Speicherung ist das Gewicht der Druckgasflaschen zu berücksichtigen. Wasserstoff ist für die Umwelt unbedenklich und für Menschen ungiftig.
- Flüssiggas ist unter Umgebungsdruck gasförmig, bei Speicherung unter Druck (typischerweise bei 8 bar in Druckgasflaschen) allerdings flüssig. Es besteht zu veränderlichen Anteilen aus Propan und Butan und variiert dadurch leicht in der Energiedichte. Flüssiggas ist wie Wasserstoff nicht umweltgefährdend oder giftig.
- Methanol ist flüssig und wird drucklos in Tankgrößen von wenigen Litern bis zu 1 m³ gespeichert. Die Umwelteigenschaften (schwach wassergefährdend) schränken den Einsatz in sensiblen Ökosystemen ein. Zudem muss bei der Handhabung beachtet werden, dass Methanol bei direktem Kontakt – allerdings in geringerem Maße als Diesel – gesundheitsschädlich ist.

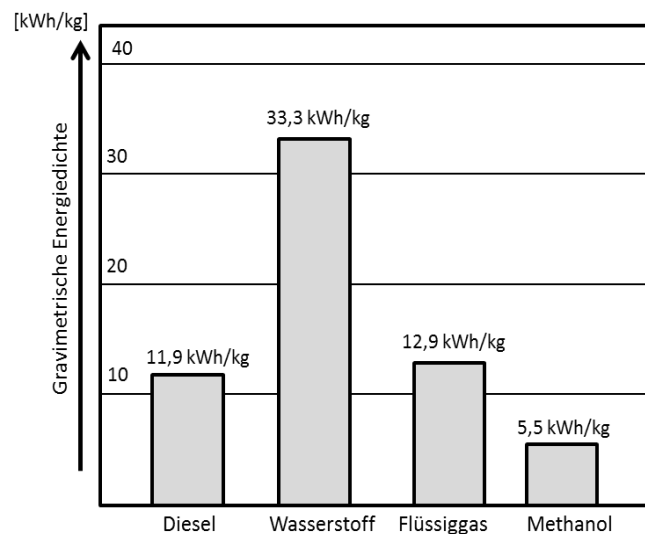


Abbildung 3-5: Gravimetrische Energiedichten verschiedener Brennstoffe

Abbildung 3-5 vergleicht die Energieinhalte der Brennstoffe bezogen auf ihre Masse (gravimetrische Energiedichte). Aus diesem Wert lässt sich die benötigte Brennstoffmasse aus dem Energiebedarf berechnen. Für die Auslegung der dann benötigten Speichergröße ist der Energieinhalt bezogen auf das Volumen (volumetrische Energiedichte) wesentlich. Diese hängt von der verwendeten Speicherart ab. Flüssige Brennstoffe haben hier deutliche Vorteile, da diese ein geringeres Speichervolumen benötigen.

In ihrer Lagerfähigkeit unterscheiden sich die Brennstoffe stark. Diese spielt in der Praxis besonders bei USV/NEA und Anwendungen mit geringen Betriebsstunden eine Rolle.

Wasserstoff und Flüssiggas sind beliebig lange lagerfähig und für die Anwendung dauerhaft nutzbar.

Bei Methanol hängt es vom Material des Gebindes ab. Direktmethanol-BZ (DMFC) benötigen einen hohen Reinheitsgrad des verwendeten Brennstoffes. Bei Kunststoffgebinden kann es zu Auswaschungen kommen und somit zu einer Überlagerung. Derzeit wird empfohlen, die Gebinde nicht länger als drei Jahre zu nutzen. Meist werden spezielle Kartuschen angeboten, die einen Kontakt mit dem Methanol verhindern und so eine Gefährdung für das Personal ausschließen. Solche Systeme sind beispielsweise im Freizeitbereich (Reisemobile, Boote) schon zu Tausenden im Einsatz.

Die Lagerfähigkeit von Diesel ohne Veränderung der Eigenschaften wird mit 90 Tagen angegeben (DIN EN 590:2017). So kann sich beispielsweise der Wasseranteil verändern. Durch Wachstum von Mikroorganismen kann es zur sogenannten „Dieselpest“ kommen. Je nach Stärke der Veränderung führt dies zu Ausfällen der Diesel-NEA. Deshalb muss der Dieselmotorenstoff regelmäßig getauscht werden und i.d.R. fallen Entsorgungskosten an.





















	Diesel	Methanol	Flüssiggas	Wasserstoff
Lagerfähigkeit				
Energiedichte in der Anwendung				
Umweltverträglichkeit des Brennstoffes				
Umweltverträglichkeit bei Nutzung				
Kennzeichnung				

Tabelle 3-2: Vergleich verschiedener Brennstoffe

→ Weitere Hinweise zu den Speichersystemen gibt Abschnitt 4.2.

3.2.2 Kostentreiber

Folgende Konstellationen treiben die Kosten für BZ-ESV und sollten bei der Planung berücksichtigt werden:

- Überdimensionierung der geforderten elektrischen Leistung: Dies erhöht sowohl das Investment für das BZ-System als auch für die Tankanlage.
- Kurze Ausschreibungsfristen erhöhen das Planungsrisiko für den Hersteller bzw. Errichter. Das Risiko wird über den Preis an den Ausschreibenden zurückgegeben.
- Forderungen nach unnötiger Redundanz.
- Nicht ausreichend durchdachte Sicherheitskonzepte.
- Bisher noch nicht realisierte Konstellationen führen zu erhöhtem Engineeringaufwand:
 - Beispielsweise Forderungen nach speziellen Gehäusen, z.B. hohe Widerstandsklassen, oder
 - die Verwendung bestimmter Komponenten, z.B. spezielle Spannungswandler.
- Die Einbindung in bestehende Softwarearchitekturen für z.B. Fernwartung.

Der frühzeitige fachliche Austausch mit Herstellern, Fachleuten und anderen Betreibern kann helfen, die Kostentreiber bei der konkreten Planung zu identifizieren und die Kalkulation zu optimieren.

3.3 Typische Anwendungen

Die folgenden Anwendungsbeispiele sollen helfen, sich eine Vorstellung von der Umsetzung einer BZ-ESV zu machen. Die Beispiele stellen keine Empfehlung für oder gegen eine Technologie dar. Gewählt wurden Beispiele, die heute in Deutschland mit über hundert Anlagen im Feld sind. Vorgestellt werden eine netzgekoppelte Telekommunikationslösung und eine netzferne Stromversorgung zur Versorgung einer Betriebsdatenerfassung.

Beispiel 1: BZ-USV für einen netzgekoppelten Mobilfunkstandort



Abbildung 3-6: Beispiel für eine wasserstoffbetriebene BZ-USV

Bei Abbildung 3-6 handelt es sich um eine wasserstoffbetriebene PEM-BZ mit luftgekühlten Modulen von je 2,5 kW Leistung. Die BZ-USV besteht aus zwei Outdoor Schränken. Ein Schrank beinhaltet die BZ mit Wandler, Stützbatterie und Steuerelektronik. Dieser Schrank ist separiert von der Wasserstoffversorgung.

Der Wasserstoff ist in einem eigenen Schrank untergebracht und wird bei 300 bar in mehreren 50 Liter Stahlflaschen gespeichert. Die gespeicherte Menge Brennstoff ermöglicht eine Überbrückungszeit von mindestens 72 Stunden.

Die Flaschen sind in zwei unterschiedlich große Versorgungsstränge aufgeteilt, die automatisch umschalten. Dadurch werden beim regelmäßigen, automatischen Testbetrieb nur einzelne Flaschen betrieben und die geforderte Überbrückungszeit über den größeren Versorgungsstrang sichergestellt (siehe auch Abschnitt 4.2).

Die Anlage hat einen Remotezugriff und kann durch Fernwartung überprüft werden. Dies vermeidet Fahrten zu entlegenen Standorten.

Beispiel 2: BZ-ESV für eine netzferne Stromversorgung



Abbildung 3-7: Beispiel einer methanolbetriebenen BZ-ESV

Eine PV-Anlage lädt hier eine Batteriebank. Zusätzlich ist die Anlage mit einem BZ-System gekoppelt, welche die Energieversorgung bei ungünstigen Witterungsverhältnissen sicherstellt. Das System ist in einem kleinen Outdoor-Kabinett untergebracht (Abbildung 3-7).

Im Einsatz ist eine DMFC mit einer Dauerleistung von ca. 100 W. Die beiden Methanoltankpatronen enthalten zusammen 56 Liter. In dieser Hybridkonfiguration und der anliegenden Last ist ein Dauerbetrieb über ein Jahr möglich. In dieser Zeit fährt das BZ-System je nach Bedarf selbstständig an. Das System ist bis auf den Tankpatronenwechsel wartungsfrei. Beim Tausch der Tankpatronen ist ein Kontakt mit dem Methanol ausgeschlossen.

4 Planung

Eine BZ-ESV ist in den meisten Punkten nicht anders zu behandeln als eine konventionelle ESV. Wie bei allen ESV ist das wichtigste Kriterium die elektrische Last und als kritischer Pfad in der Umsetzung gilt auch hier die elektrotechnische Einbindung der ESV.

In die Auswahl des richtigen BZ-Typs - und damit des Brennstoffes – gehen verschiedene Randbedingungen ein. Der Prozess der Auswahl wird meist iterativ durchgeführt.

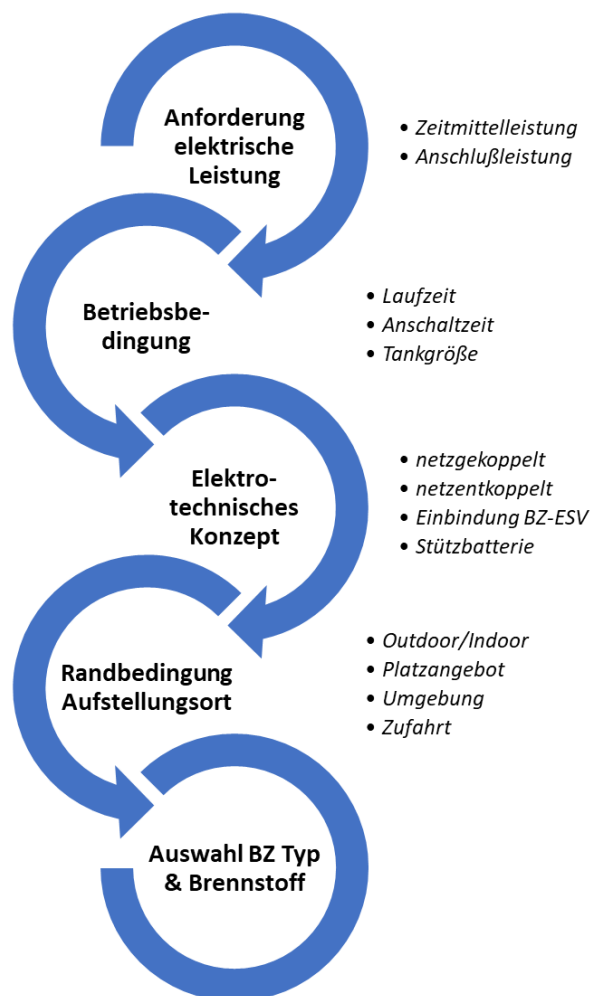


Abbildung 4-1: Auswahl Brennstoffzelle und zugehörigen Brennstoff

Hinweis:

Die Charakteristik einer Brennstoffzelle lässt sich mit einer ständig aufgeladenen Batterie vergleichen. Auch die Brennstoffzelle hat eine entsprechende Strom-Spannungs-Kennlinie (U-I-Kennlinie). Im Unterschied zur Batterie gibt es keine Entladekennlinie über die Zeit, sondern die BZ bleibt lastabhängig an einem bestimmten Arbeitspunkt der U-I-Kennlinie.

4.1 Auslegung der Leistung

Prinzipiell können BZ-ESV für jede benötigte Leistung ausgelegt werden. Ihre Modularität bietet Planern die Möglichkeit, die Leistung je nach Bedarf anzupassen.

Für die Auswahl der geeigneten BZ-Leistung ist generell zu empfehlen, nicht die Peak-Leistung, sondern den zeitlichen Mittelwert der Leistung der Verbraucher zu betrachten (Zeitmittelleistung). Bei Diesel-NEA müssen aufgrund der direkten Koppelung von Dieselmotor und Generator beide Komponenten für die möglicherweise auftretenden Leistungs- bzw. Drehmomentspitzen ausgelegt sein. Bei BZ-ESV müssen ggf. vorhandene Spannungswandler die erforderlichen Lastspitzen liefern können, wobei sie sich dabei primärseitig auf der Batterie abstützen können, weshalb die BZ nicht auf die Spitzenleistung ausgelegt werden muss.

Bei BZ-Systemen skalieren die Investitionskosten in der Regel deutlich stärker mit der Spitzenleistung als bei anderen ESV. Durch eine detaillierte Betrachtung der im Ersatzstromfall zu versorgenden Verbraucher, können die Investitionskosten minimiert werden und somit die TCO Potentiale gehoben werden.

Die Analyse der Verbraucher muss wie bei anderen ESV folgende typische Fragen klären:

- Anzahl und Art der Verbraucher?
- Mindestdauer der Versorgung?
- Sind motorische Drehstromverbraucher zu versorgen?
- Spitzenlast (Anlaufströme?) und Durchschnittslast?
- Welche Verbraucher sollen im Notstromfall versorgt werden und an welche Phasen sind diese angeschlossen?
- Ist eine Redundanz erforderlich?

Einige Betreiber veranlassen eine Messung des tatsächlichen Strombedarfes an dem zu versorgenden Standort. Dabei wird nicht selten festgestellt, dass die berechnete Anschlussleistung bis zu drei Mal höher als der tatsächliche Bedarf ist.

Für die elektrische Auslegung ist der Unterschied zwischen kVA und kW zu beachten (siehe auch ausführlicher im Anhang A.3.1). Formal handelt es sich um die gleiche physikalische Einheit, aber bei der Interpretation ist darauf zu achten, dass im Sprachgebrauch mit kW nur die Wirkleistung und mit kVA die Scheinleistung (Wirkleistung plus Blindleistung) bezeichnet wird. In einem Gleichspannungsnetz und bei reinen ohmschen Verbrauchern sind beide identisch. Brennstoffzellen sind Gleichspannungsquellen und es wird immer die Wirkleistung in kW angegeben.

Müssen elektrische Maschinen, wie z.B. Elektromotoren, versorgt werden, so sind außerdem hohe Anlaufströme zu berücksichtigen. Dadurch kann die Last kurzzeitig auf etwa das 3-fache der Nennlast steigen. Diese Spitzenlast muss durch die ESV-Anlage abgedeckt werden (siehe Abbildung 4-2). Bei BZ-ESV wird diese typischerweise durch die Stützbatterie abgefangen – für die Auslegung der BZ wird die Zeitmittelleistung herangezogen.

→ Weitere Informationen in Anhang A.3.1 und A.3.2

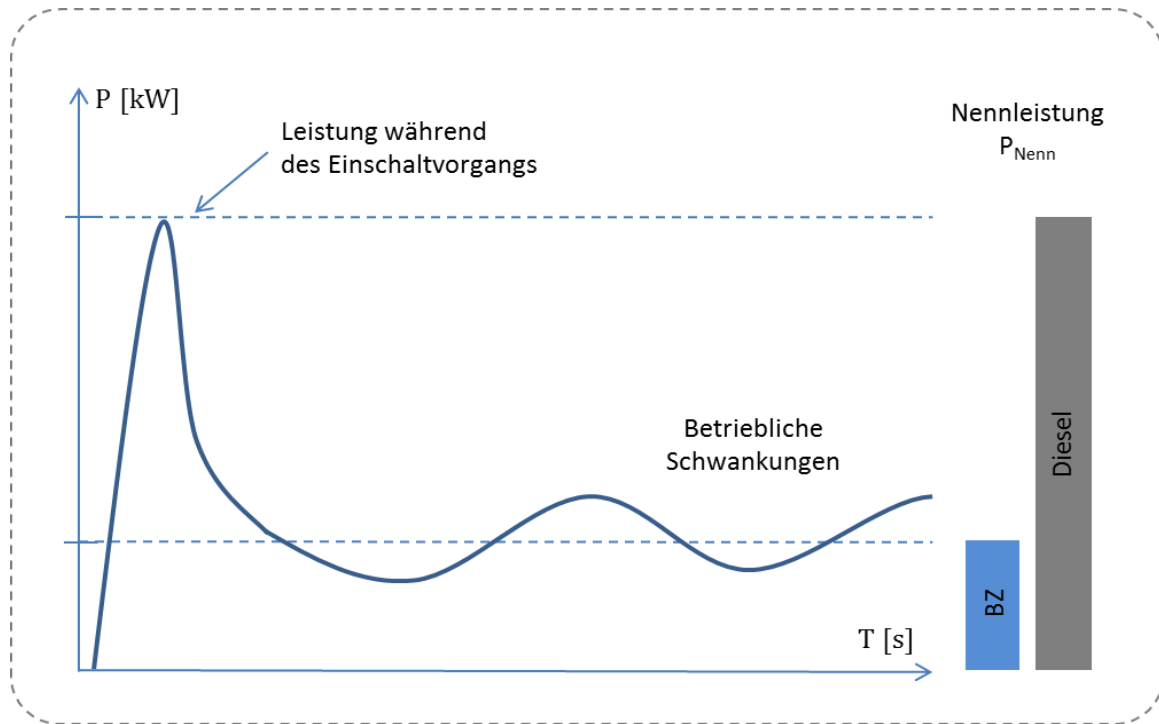


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung eines Lastverlaufs und die resultierende Auslegung von BZ- und Diesel-ESV.

4.2 Laufzeit der ESV und Auslegung des Brennstoffspeichers

4.2.1 Ermittlung der Speichergröße auf Basis der ermittelten Leistung

Die Speichergröße des BZ-Systems bestimmt die maximale Laufzeit und kann über die ermittelte mittlere Leistung bestimmt werden.

Die erforderliche Speichergröße ergibt sich aus

- der gewünschten Laufzeit der Anlage und
- dem Verbrauch der Brennstoffzelle bei gewünschter Leistung. Die Verbrauchsdaten der BZ sind den Herstellerangaben zu entnehmen.

$$\text{Speichergröße} = \text{Laufzeit der Anlage} \cdot \text{Verbrauch der BZ bei mittlerer Leistung}$$

Beispielhafte Speichergrößen für typische Systeme und Leistungsklassen sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Die Berechnungsgrundlage findet sich in Anhang A.3.3.

Es ist zu beachten, dass die berechneten Laufzeiten die mindestens erreichbaren Laufzeiten darstellen. In der Regel wird die erreichbare Laufzeit deutlich höher sein, da hier eine Worst-Case-Betrachtung bei maximaler Lastabfrage zu Grunde gelegt wurde.

BZ-System	Brennstoff	Mittlere Last	Gewünschte Betriebszeit	Verbrauch BZ-System bei mittlerer Last	Benötigte Speichergröße und -anzahl
PEM	Wasserstoff	1 kW	24 h	0,06 kg/h	1,4 kg 2 Flaschen
DMFC	Methanol (Direkt)	0,1 kW	24 h	0,09 l/h	2,2 L 1 Kanister
SOFC	Flüssiggas	1 kW	24 h	0,20 kg/h	4,8 kg 1 Flasche

Tabelle 4-1: Berechnung der Tankvolumina für verschiedene beispielhafte BZ-Systeme

Ein detaillierteres Berechnungstool zur Abschätzung der Speichermenge in Abhängigkeit von BZ-Typ, Betriebsdauer und Last ist in der Checkliste zum Leitfaden enthalten (Anhang A.5).

4.2.2 Speicher für den Testbetrieb

Einige ESV-Systeme, insbesondere USV-Anlagen für kritische Verbraucher, führen regelmäßige Selbsttests durch. Die Auslegung des Speichers sollte den Testbetrieb berücksichtigen. So kann beispielsweise ein zweistufiges Tanksystem verwendet werden, das einen kleineren Speicher für den Testbetrieb und einen größeren Speicher für den Notfallbetrieb vorhält. Dadurch wird der Füllstand des Notfallspeichers nicht durch regelmäßigen Testbetrieb belastet. Insbesondere bei Gasspeichern kann auf diese Weise ein vorzeitiger Tausch von teil-entleerten Gebinden vermieden werden. Der Speicher für den Testbetrieb kann dann bei Bedarf befüllt oder ausgetauscht werden. Die Auslegung erfolgt über die mittlere Leistung im Testbetrieb.

In Tabelle 4-2 ist beispielhaft die Auslegung für den Testbetrieb und den ESV-Betrieb einer Wasserstoff-PEM dargestellt. Dabei soll der Test alle 14 Tage für 15 Minuten gestartet werden. Der Speichertank soll bei einer im Testbetrieb vorhandenen mittleren Last von 500 W für eine Projektdauer von 5 Jahren ausreichen. Dafür ist eine 50 l Druckgasflasche (300 bar) ausreichend.

Einsatz des Speichertanks	Mittlere Last	Gewünschte Betriebszeit	Verbrauch Gesamtsystem	Benötigte Speichergröße und -anzahl
Testbetrieb	0,5 kW	0,25 h	0,03 kg/h	0,98 kg 1 Flasche pro 5 Jahre
Ersatzstromversorgung	2 kW	72 h	0,12 kg/h	8,6 kg 9 Flaschen pro Einsatz

Tabelle 4-2: Auslegung der Speicher für den Testbetrieb und für den ESV-Betrieb am Beispiel einer Wasserstoff-PEM

→ Weitere Informationen in Anhang A.3.3

4.3 Elektrotechnische Einbindung

4.3.1 Allgemeines

Alle Richtlinien, die für die Einrichtung und den Betrieb von Ersatzstromversorgungen gelten, sind ebenfalls bei BZ-ESV einzuhalten. Dazu gehört unter anderem

- die Trennung aller Phasen,
- keine Rückspeisung ins Netz oder
- die Vermeidung von Netzparallelbetrieb bei Probebetrieben.

Ebenso ist bei der Einbindung zu beachten, dass die Möglichkeit bestehen muss, am Hauptverteiler alle Anlagenteile – also auch die BZ-Anlage – stromlos zu schalten. Diese Abschaltung ist notwendig, damit alle Arbeiten gemäß den Normen und Richtliniendurchgeführt werden können.

Für eine optimale Einbindung wird eine enge Absprache mit den Herstellern empfohlen.

4.3.2 Redundanz und Modularität

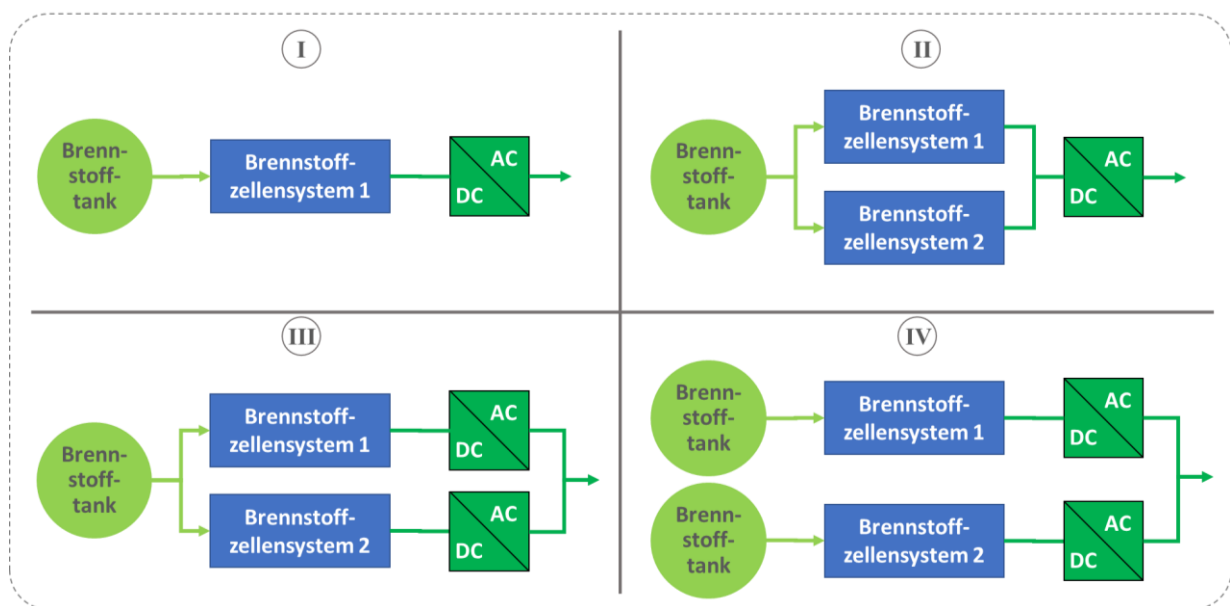


Abbildung 4-3: Unterschiedliche modulare Konzepte

Bei ESV-Anlagen sind Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit entscheidend. Beide lassen sich durch redundante Teilsysteme erhöhen. Ob eine redundante Auslegung Sinn macht, hängt von den Anforderungen des Anwenders ab. Redundanzforderungen sollten immer unter dem Aspekt der gesamten Kette an Abhängigkeiten betrachtet werden. Ist beispielsweise der notwendige Umschalter im Fall IV von Abbildung 4-3 nur einfach ausgeführt und alle nachgelagerten Komponenten (wie Wandler, Schütze, Heizung/Klima) ebenfalls, so wird dieser Teil der Anlage zum schwächsten Glied der Kette. Sinnvoll kann dies nur durch eine gesamtheitliche Betrachtung inklusive Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Komponenten gelöst werden.

In den meisten Anlagen ist die BZ-ESV bereits das redundante System zum Netzanschluss. Dennoch werden BZ-Systeme häufig modular aufgebaut (Fall II von Abbildung 4-3). Neben der zusätzlichen Redundanz ergeben sich je nach Anwendung weitere Vorteile aus einem modularen Aufbau:

Wird durch Neuinstallationen auf der Verbrauchsseite die Last erhöht, kann dies durch Hinzufügen eines weiteren BZ-Moduls kompensiert werden. Dafür muss bei der Anlagenplanung die Infrastruktur, wie Gehäusegröße oder Luftzuführung ggf. bereits auf die größere Leistung ausgelegt werden. Folglich können konzeptionell Sicherheitszuschläge für spätere Erweiterungen und damit Kosten für das BZ-System verringert werden.

Modulare Konzepte zeigen zudem Vorteile bei Verbrauchern mit zeitlich stark unterschiedlichen Lastgängen, beispielsweise Sommer- und Winterbetrieb einer Heizung. Beim Einsatz von zwei Modulen muss in diesem Beispiel im Sommer nur ein Modul betrieben werden, wodurch ein extremer Teillastbetrieb vermieden und die Anlageneffizienz verbessert werden kann. Die Um- bzw. Zuschaltung einzelner Module erfolgt dabei automatisch, je nach anliegender Last.

4.3.3 Beispiele möglicher Einbindungen von BZ ESV

Die folgenden Darstellungen sind stark vereinfacht und sollen nur einen prinzipiellen Überblick über mögliche Konfigurationen im netzgekoppelten Fall geben.

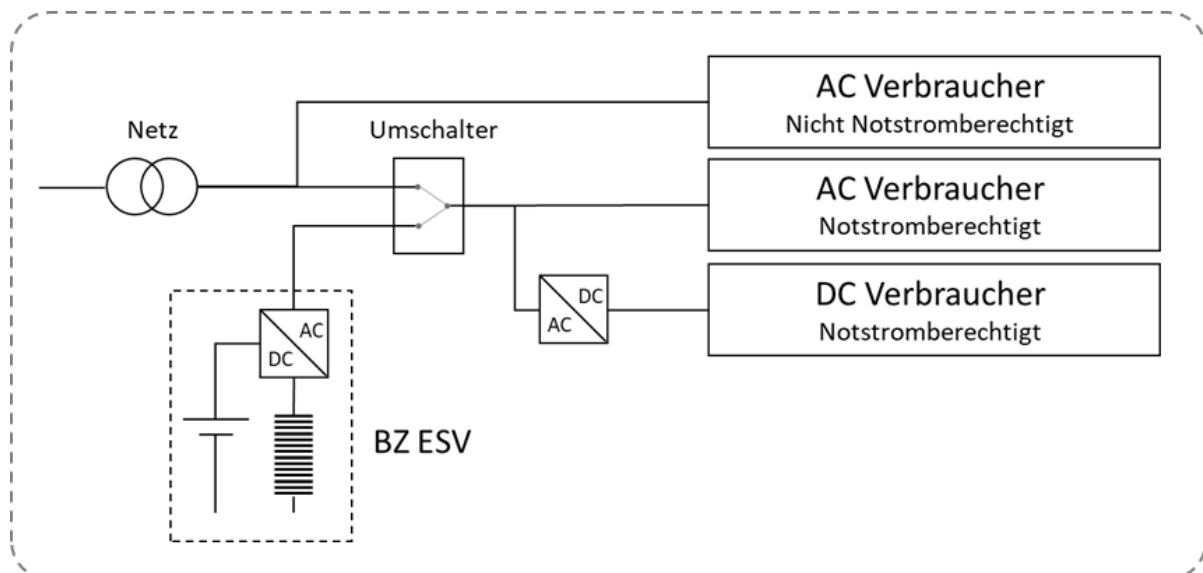


Abbildung 4-4: Beispiel einer Verschaltung zur Versorgung von AC und DC-Verbrauchern

In Abbildung 4-4 ist eine BZ-ESV mit einem DC/AC Wandler dargestellt. Hier wird, analog zu einer Diesel-NEA, ein Umschalter benötigt. Der Startvorgang der BZ-ESV kann zum Beispiel über einen Phasenwächter initiiert werden. Die Batterie stützt während des Startvorganges die Spannung und stellt die unterbrechungsfreie Stromversorgung sicher.

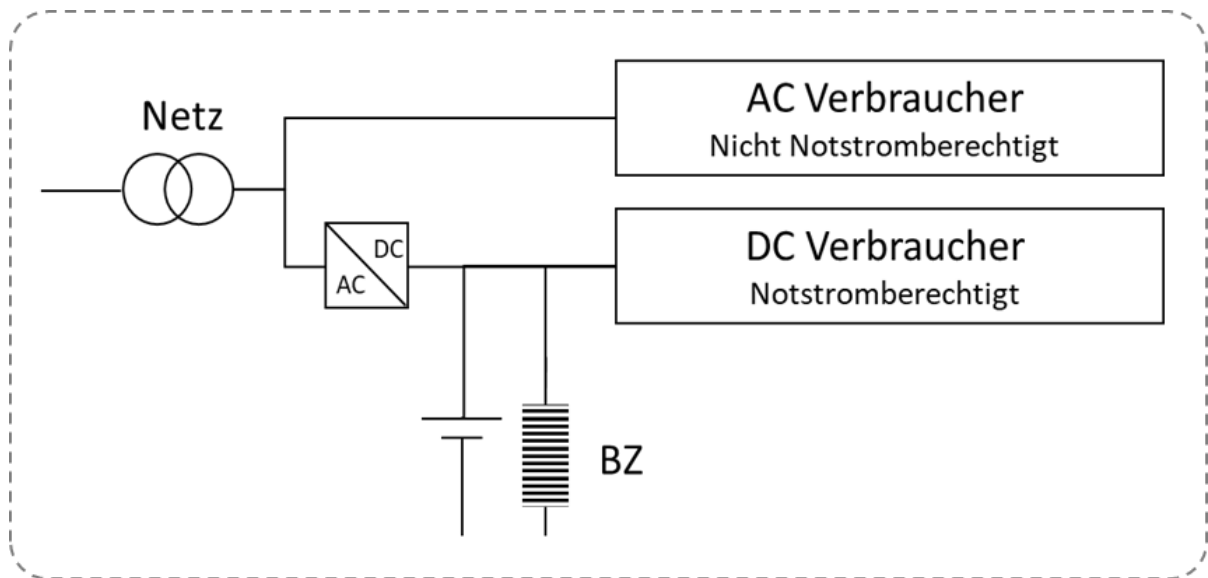


Abbildung 4-5: Beispiel einer Verschaltung zur Versorgung von reinen DC-Verbrauchern

Müssen nur DC-Verbraucher versorgt werden, z.B. in Telekommunikationsanwendungen, lässt sich meist ein Wandler einsparen und ein deutlich einfacheres Konzept realisieren. BZ-System und Batterie liegen dann auf DC-Seite, wie in Abbildung 4-5 skizziert.

Die tatsächliche Realisierung ist u.a. von der Ausgangsspannung der Brennstoffzelle abhängig. Es kann auch hier günstiger sein einen zusätzlichen Hoch- bzw. Tiefsetzsteller einzusetzen.

4.3.4 Hinweis für Niederspannungsanwendungen und autarke Lösungen

Die Thematik der elektrischen Einbindung gestaltet sich einfacher – wie bei konventionellen Lösungen auch – wenn die Anlage

- nicht unter die Niederspannungsrichtlinie fällt, da die Nennspannung kleiner als 75 V DC ist oder
- nicht netzgekoppelt ist.

In der Regel sind hier die Anforderungen eher auf Dauerbetrieb und für autarke Lösungen ausgelegt. Die Brennstoffzelle erweitert in diesen Fällen meist eine PV-Anlage, um die Betriebssicherheit auch während Schlechtwetterperioden oder im Winter zu gewährleisten. Diese Brennstoffzellen laufen deutlich mehr Betriebsstunden und weniger zyklisch als in USV-Anwendungen.

4.3.5 Umschalter

Brennstoffzellen müssen – analog zu Diesel-Aggregaten – aktiv eingeschaltet werden. Dafür wird ein Auslöser benötigt. In Anlagen zur unterbrechungsfreien Stromversorgung kann dies z.B. ein Phasenwächter sein oder eine Leistungsentnahme an der Stützbatterie, auf Grund dessen ein Signal an die BZ-Steuerung weitergeleitet wird. Durch das Signal wird die Brennstoffzelle hochgefahren und übernimmt die Stromversorgung.

Soll ein Testbetrieb der BZ-ESV per Fernzugriff möglich sein – wie in den meisten Fällen gewünscht –

ist bei der Verschaltung darauf zu achten, dass das Netz sicher weg- und wieder zugeschaltet werden kann. Ein Netzparallelbetrieb bzw. eine Rückspeisung ins Netz ist analog zu Diesel-ESV nicht zulässig.

Geeignete Umschalter sind als Standardbauteile am Markt verfügbar. Dennoch zeigt die Erfahrung, dass es bei der Umschaltung, je nach Konfiguration der gesamten elektrischen Anlage, wiederholt zu vermeidbaren Fehlern gekommen ist.

4.3.6 Sicherungen

Im Falle eines Kurzschlusses muss sichergestellt sein, dass die Sicherungen zuverlässig auslösen. Der dafür notwendige Kurzschlussstrom $I(t)$ kann nicht bei allen Systemen durch die Brennstoffzelle alleine bereitgestellt werden. Die notwendigen Abschaltströme können durch geeignete Wandler oder durch parallel geschaltete Batterien bereitgestellt werden.

In den Planungs- bzw. Ausschreibungsunterlagen sollten Angaben zu den geplanten Sicherungsautomaten bzw. zu den geforderten Abschaltströmen enthalten sein.

Hintergrund:

Dass der Kurzschlussstrom durch die Brennstoffzelle z.T. nicht bereitgestellt werden kann, liegt an der notwendigen Nachführung der Reaktionsgase, z.B. Luft in der Brennstoffzelle. Die hohen Ströme im Kurzschlussfall lassen die Spannung der Brennstoffzelle i.d.R. kurz einbrechen – ein typisches Abschaltkriterium. BZ Hersteller verwenden meist Strombegrenzer um diesen Vorgang zu vermeiden.

4.4 Auswahl der Brennstoffzelle und des Brennstoffs

Da viele unterschiedliche Kriterien des späteren Betreibers und der geplanten Anlage in die Auswahl eingehen, kann keine allgemein gültige Empfehlung für bestimmte BZ-Brennstoff Kombinationen gegeben werden. Zudem entwickeln die BZ-Hersteller ihre Produkte ständig weiter und zusätzliche kommerziell verfügbare Lösungen kommen auf den Markt. Die Hersteller im Clean Power Net können hier durch weiterführende Informationen unterstützen.

Dennoch gilt, dass auf Basis der benötigten Leistung und der geplanten elektrotechnischen Einbindung i.d.R. eine Vorauswahl von BZ und Brennstoff vorgenommen werden kann.

Kommen hierbei unterschiedliche Brennstoff- und BZ-Lösungen in die engere Auswahl, empfiehlt es sich den Aufwand für Brennstofftank und -logistik zu bewerten. Hierzu müssen auch weitere Randbedingungen des geplanten Aufstellungsortes berücksichtigt werden, unter anderem der verfügbare Platz für den Brennstoff.

4.5 Sicherheitskonzept

Die Umfänge der Maßnahmen für die Arbeits- und Betriebssicherheit unterscheiden sich nur unwesentlich von denen bekannter ESV Anlagen mit Diesel- oder Batterieaggregaten.

Generell sind bei allen Anlagen die gesetzlichen Bestimmungen zum Produkt- und Betriebssicherheitsrecht zu beachten.

4.6 Anlagenbeschreibung und Aufstellungskonzept

Für die Realisierung der Anlage ist eine Beschreibung mit allen Lieferschnittstellen und vorhandenen Informationen erforderlich. Das Dokument sollte mindestens folgende Informationen enthalten:

- elektrische Rahmenbedingungen und geplante Einbindung
- Beschreibung des Aufstellungsortes, z.B. vorhandener Platz
- weitere Hinweise wie z.B. Erreichbarkeit, Fernwartung, Naturschutzgebiet oder ähnliches

Die Beschreibung kann zur Kommunikation mit potentiellen Lieferanten genutzt werden und die Planung sukzessive weiter verfeinert werden. Klare Schnittstellen (Lasten- bzw. Pflichtenheft) unterstützen dabei eine kostengünstige Umsetzung.

Hieraus leiten sich dann die Detailplanung und die Aufstellungsplanung in Analogie zu konventionellen ESV ab.

5 Errichten

Grundsätzlich können BZ-ESV sowohl Indoor als auch Outdoor errichtet werden. In Abhängigkeit der äußeren Gegebenheiten müssen beim Errichten eines Brennstoffzellensystems einige Punkte berücksichtigt werden.

5.1 Indoor und Outdoor

Beim Einsatz innerhalb von Gebäuden wird angeraten, das BZ-System durch ein Gehäuse gegen äußere Einflüsse (z.B. Schutz gegen Berühren) zu sichern. Wie bei Batterie- und Diesel-Anlagen, ist für eine ausreichende Belüftung der Räumlichkeiten zu sorgen. Je nach Hersteller und System sind ggf. Abluftströme zusätzlich abzuführen.

Bei Outdooranwendungen ist beim Entwurf des Gehäuses die Witterung zu beachten. So muss ein ausreichender Schutz gegenüber Schnee, Regen und Feuchtigkeit berücksichtigt werden. Wird die ESV-Anlage in einer sensiblen Umwelt (z.B. Natur- oder Wasserschutzgebiet) errichtet, sind bei umweltgefährdenden Brennstoffen Maßnahmen für den Fall eines ungewollten Austritts des Brennstoffs zu treffen. Dies kann bei Flüssigbrennstoffen wie Methanol - analog zu Dieselanwendungen - eine Auffangwanne bedeuten. Alternativ kann ein Brennstoff (und das entsprechende System) gewählt werden, der keine umweltgefährdenden Eigenschaften hat.

5.2 Baustellenlogistik

Die Brennstoffzelle erfordert keine gesonderten Maßnahmen für die Baustellenlogistik. Diese wird durch die Randbedingungen wie Gewichte und Maße der größten bzw. schwersten Einzelteile bestimmt.

Sollen entlegene Standorte ausgestattet werden, sind Hinweise auf die Erreichbarkeit für die Umsetzung wichtig - beispielsweise Steigungen im Gebirge oder enge Kehren bei der Zufahrt. Dies unterscheidet sich nicht von konventionellen ESV.

Für die spätere Brennstofflogistik kann es sinnvoll sein, errichtete Baustraßen nicht zurückzubauen.

6 Inbetriebnahme

Wie bei jeder ESV-Installation sind auch bei BZ-ESV besondere Maßnahmen bei der Inbetriebnahme zu beachten. Besonders bei großen und aufwendigen Anlagen bietet es sich an, Anlagenteile separat abnehmen zu lassen.

Um die Funktionalität sicherzustellen, müssen Funktionstests aller Anlagenteile - insbesondere sicherheitsrelevante Funktionen - durchgeführt werden. Dies umfasst z.B.

- die Dichtigkeitsprüfung der Brennstoffanlage oder
- die Umschaltung im Notstromfall.

Gegebenenfalls kann es sinnvoll sein, Brennstoffspeicher vorzubereiten. So können z.B. Tanks oder Flaschen an einem Zentrallager gespült und befüllt werden, so dass nach Montage allenfalls noch eine Dichtheitsprüfung durchgeführt werden muss.

7 Betrieb

Im Folgenden werden die Einzelheiten des Betriebs einer BZ-ESV im Einsatzfall sowie im Testbetrieb erläutert. Zudem werden Hinweise zur Wartung und Instandhaltung sowie zur Brennstofflogistik gegeben.

7.1 Einsatzfall

Bei einem Ausfall der Hauptstromversorgung gewährleistet die Stützbatterie der ESV die unterbrechungsfreie Stromversorgung. Sobald die Brennstoffzelle gestartet ist und die Nennleistung liefert, übernimmt sie die Stromversorgung. Weitere Spitzenlasten werden wiederum durch die Stützbatterie gedeckt. Je nach Gesamtkonzept wird die Batterie entweder direkt aus der BZ oder erst nach erneuter Netzverfügbarkeit aufgeladen. Die Betriebs- bzw. Überbrückungsdauer kann durch die Anpassung der Speichergröße (siehe Abschnitt 4.2) beliebig verändert werden.

Um während des Einsatzes Informationen über die Restlaufzeit bzw. den Restbrennstoff des Systems abrufen zu können und um gegebenenfalls eine Leistungs- oder Fehlerdiagnose zu ermöglichen, kann die Realisierung eines Fernzugriffes auf die BZ-ESV sinnvoll sein.

Bei Änderungen am System sollte die mittlere Leistung im Betrieb sowie die erforderliche Brennstoffmenge erneut verifiziert werden.

7.2 Testbetrieb

Zur Sicherstellung des zuverlässigen Betriebs sowie zur Erhaltung der Funktionalität werden typischerweise regelmäßig automatisierte Testläufe durchgeführt. Die Testläufe können beispielsweise in einem zeitlichen Abstand von 14 Tagen stattfinden. Während des Tests werden einzelne Komponenten des Systems eingeschaltet und mit Strom aus der Brennstoffzelle betrieben. Der Testbetrieb sollte eine möglichst große Breite von Anwendungsfällen der ESV abdecken. Die

Dauer des Selbsttests beträgt üblicherweise einige Minuten. Der Brennstoffverbrauch für den Testbetrieb kann anhand der Überlegungen in Abschnitt 4.2 abgeschätzt werden.

Die Intervalle und die Dauer der Selbsttests unterscheiden sich je nach Hersteller im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung.

7.3 Wartung & Instandhaltung

Grundsätzlich:

Bei der Planung ist darauf zu achten, dass die Voraussetzungen für die wiederkehrenden Prüfungen erfüllt sind:

*Betreffende Teile sind zugänglich und sichtbar (z.B. Anschlüsse, Verteiler).
Der elektrische Anschluss ist so zu gestalten, dass die regelmäßigen Prüfungen für die Betriebssicherheit möglich sind.*

In der Regel bieten die BZ-ESV-Hersteller Vollwartungsverträge an. Damit übernehmen Sie die Verantwortung für die durchzuführenden Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten. Dies kann auch über eine Dienstleistungsgesellschaft erfolgen. Der Anbieter garantiert Reaktions- und Reparaturzeiten und kümmert sich um das Ersatzteilmanagement.

Ist dies nicht der Fall, muss der Betreiber der Anlage für die Einhaltung der wiederkehrenden Prüfungen sorgen. Hierzu sind u.a. zu beachten:

- Festlegung von Serviceintervallen / Prüffristen,
- Beschreibung der durchzuführenden Arbeiten (z.B. Dichtheitsprüfung),
- Notwendige Qualifikation der Servicemitarbeiter,
- ob Teile – und wenn ja, welche – durch eingewiesenes Personal getauscht werden dürfen (z.B. komplette Module)
- Geplante Ersatzteilkhaltung

Besteht die Möglichkeit zur Fernwartung kann der Zustand der Anlage remote überwacht werden. Dies umfasst u.a. Füllstände des Brennstoffes, Anfahren zum Testbetrieb und ggf. die Auswertung von Fehlermeldungen.

7.4 Brennstofflogistik

Zum reibungslosen Ablauf der Brennstoffversorgung sind frühzeitig Beschaffungs- und Kommunikationswege zu klären. So sollte ein Lieferplan in Abhängigkeit des durchschnittlichen Verbrauchs und unter Berücksichtigung saisonaler oder betrieblicher Schwankungen (Winter/Sommer) für den Brennstoff erstellt werden.

Nach einer Nutzung der ESV im Stromausfall oder nach Testbetrieb, der über die bisher geplante Dauer hinausgeht, muss der verbrauchte Brennstoff ersetzt werden. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, entleerte Brennstoffgebinde zu tauschen, oder sie vor Ort wieder zu befüllen.

Es ist darauf zu achten, dass die Anlieferung durch geschultes Personal erfolgt, das den Brennstoff nachtanken bzw. Gebinde tauschen darf. Dadurch werden unnötige Fahrten zu Standorten vermieden.

Die Anlieferung an die einzelnen Standorte erfolgt je nach Erreichbarkeit des zu beliefernden Standortes und wird im Anhang A.3.5 veranschaulicht.

Speziell bei der Lagerung von flüssigem Brennstoff ist eine eventuelle Alterung oder Degradation des Brennstoffs zu berücksichtigen. Dies kann – wie im Fall von Diesel – zu einem erhöhten Aufwand bei der Brennstofflogistik führen.

→ Weitere Informationen in Anhang A.3.3. und A.3.4.

8 Zusammenfassung technische Beschreibung

Eine BZ-ESV unterscheidet sich an vielen Stellen nicht von konventionellen ESV. Letztlich liefert eine BZ-ESV ebenfalls „nur“ elektrische Energie. Die hohe Anlagenverfügbarkeit und die TCO-Vorteile der BZ stellen jedoch eine attraktive und wirtschaftliche ESV-Alternative dar. Zusätzlich kann die BZ bei Umweltaspekten punkten. Die Technologie ermöglicht z.B. den Einsatz in Wasserschutzgebieten ohne aufwändige zusätzliche Schutzmaßnahmen.

Um die TCO Vorteile zu heben, sind eine genaue Analyse der elektrischen Verbraucher und der Standortbedingungen unerlässlich. Eine Auslegung auf die Zeitmittelleistung und nicht wie konventionell auf die Spitzenleistung, kann hierbei zu wesentlichen Kosteneinsparungen führen.

Besonderheiten betreffen häufig den Brennstoff und damit einhergehende technische Regelwerke. Praxiserfahrungen zur Umsetzung von BZ-ESV liegen bundesweit bereits hundertfach vor und die Anlagen sind erfolgreich im Betrieb.

A Anhang

A.1 Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (Alternating Current)
BoP	Balance of Plant – Nebenaggregate eines Brennstoffzellensystems, wie z.B. Lüfter, Pumpen, etc.
BZ	Brennstoffzelle
BZ-ESV	Brennstoffzellen Ersatzstromversorgung
cos φ	Wirkleistungsfaktor (auch Wirkfaktor)
CPN	Clean Power Net
DC	Gleichstrom (Direct Current)
DMFC	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle
ESV	Ersatzstromversorgung
H ₂	Wasserstoff
NEA	Netzersatzanlage
NIP	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
PEM, PEM-BZ,	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
PV	Photovoltaik
SOFC	Solid-Oxid-Brennstoffzelle / Festoxid-Brennstoffzelle
TCO	Total-Cost-of-Ownership / Gesamtkostenbetrachtung
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

A.2 Glossar

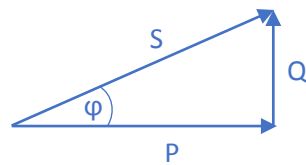
Anschlussleistung	Maximal zur Verfügung stehende Leistung an der Anschlussstelle
Brennstoff	Energieträger für Ersatz-Stromversorgungsanlagen
Brennstoffzellenstapel	In Serie verschaltete Einzelzellen in einem Brennstoffzellensystem, zur Erhöhung der Betriebsspannung
Energiedichte - gravimetrisch	Energie pro Masseneinheit
Energiedichte - volumetrisch	Energie pro Volumeneinheit
Ersatz-Stromversorgung	Anlage zur Versorgung von Installationen mit Strombedarf
Gebinde	Brennstoffbehältnis
Gebindebündel	Zusammenschluss mehrerer Brennstoffbehältnisse gleicher Art
Hybrid Modus	Verschaltung mit einer weiteren Energiequelle. Häufig in Kombination mit einer Photovoltaik Anlage und einer Batteriebank
Netzersatzanlage (NEA)	Anlage zur vorrübergehenden Überbrückung eines Stromausfalls
Notfall	Betrieb der ESV im Strombedarfsfall (Ausfall der regulären Stromversorgung)
Phasenwächter	Sensor zur Überwachung der Netzverfügbarkeit
Pufferbatterie	Batterie zum Ausgleich von Versorgungsschwankungen der primären Stromversorgung
Speichertank	Energiespeicher für Ersatz-Stromversorgungsanlagen (unabhängig von der Brennstoffart. Also sowohl für flüssige als auch gasförmige Brennstoffe)
Spitzenlast	Maximale abgeforderte Leistung durch die zu versorgenden Verbraucher
Stützbatterie	Batterie zur Überbrückung von kurzzeitigen Stromausfällen bzw. kurzzeitigen Lastspitzen
Zeitmittelleistung	Durchschnittlicher Leistungsbedarf über einen längeren Zeitraum

A.3 Auslegung

A.3.1 Blindleistung (kVA vs. kW)

Induktive oder kapazitive Verbraucher (z.B. Elektromotoren, Transformatoren, Kondensatoren) in Dreh- und Wechselstromnetzen erfordern grundsätzlich Blindleistungsanteile. Werden mit der ESV solche Verbraucher versorgt, muss als Auslegungsgröße die Scheinleistung S (in kVA) verwendet werden, welche sich aus Wirkleistung P und Blindleistung Q zusammensetzt:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$



Die resultierende Wirkleistung P (in kW), die am Verbraucher letztendlich umgesetzt wird, ergibt sich aus der Scheinleistung über den Wirkleistungsfaktor $\cos \varphi$:

$$P = S \cdot \cos \varphi$$

Der Phasenwinkel φ beschreibt dabei die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom.

Der Wirkleistungsfaktor, und somit der Blindstromanteil, ergibt sich aus den tatsächlichen Induktivitäten der zu versorgenden elektrischen Verbraucher. Vereinfacht kann ein typischer Richtwert von $\cos \varphi = 80\%$ angenommen werden – d.h. die Auslegung einer ESV muss mit einem Zuschlag für die Blindleistungskomponente von typischerweise 25 % erfolgen.

A.3.2 Anlaufströme

Müssen elektrische Maschinen wie z.B. Elektromotoren versorgt werden, so sind außerdem hohe Anlaufströme zu berücksichtigen. Die Anlaufströme erreichen kurzfristig das 6 bis 8-fache des Nennstromes. Dabei sinkt der $\cos \varphi$ allerdings gleichzeitig auf etwa $0,5 \cdot \cos \varphi_{\text{Nenn}}$. Für die Leistung beim Anlauf ergibt sich also:

$$P_{\text{Anlauf}} = U \cdot I_{\text{Anlauf}} \cdot \cos \varphi_{\text{Anlauf}} = U \cdot 6 \cdot I_{\text{Nenn}} \cdot 0,5 \cdot \cos \varphi_{\text{Nenn}} = 3 \cdot P_{\text{Nenn}}$$

Somit muss der Stromerzeuger beim Anlauf eines Elektromotors kurzzeitig etwa die 3-fache Nennleistung aufbringen können.

Im Folgenden wird beispielhaft die Auslegung einer Diesel- und einer BZ-ESV für einen 2,4 kW Elektromotor als Drehstromverbraucher in Sternschaltung (Y) dargestellt und verglichen. Der Anlaufstrom beträgt in diesem Beispiel das 7-fache des Nennstroms.

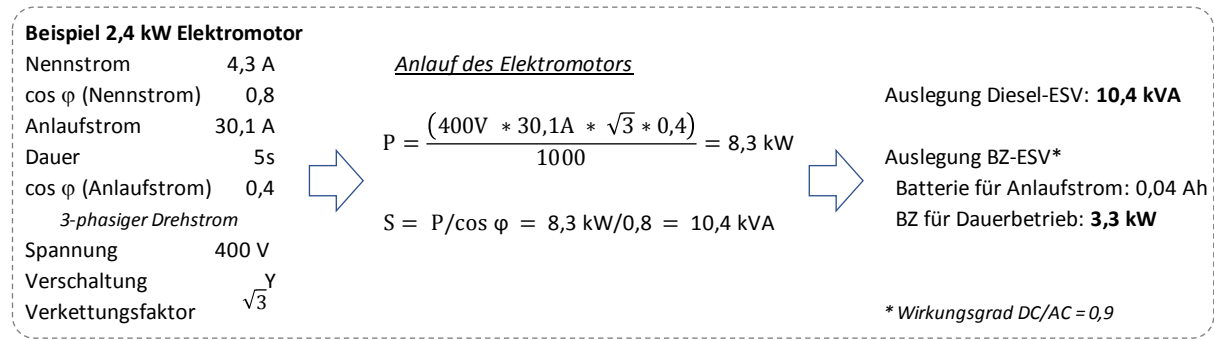


Abbildung A-1: Unterschiedliche Auslegung einer BZ- und Diesel-ESV für die Versorgung einer induktiven Last mit hohem Einschaltstrom

A.3.3 Beispielrechnung der vorzuhaltenden Menge Brennstoff für Wasserstoff

Im Folgenden wird am Beispiel Wasserstoff eine detaillierte Berechnung der vorzuhaltenden Menge Brennstoff für eine Mindestüberbrückungsdauer T dargelegt.

Die Speicherung von Wasserstoff erfolgt in diesem Beispiel in Form von Druckgasflaschen. Hier wurde mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit und eine sichere Infrastruktur auf gängige 50 L Druckgasstahlflaschen mit einem Fülldruck von 250 bar und entsprechende Flaschenbündel gesetzt.

Der nutzbare Brennstoffinhalt $m_{H_2/Flasche}$ ist die Masse an Wasserstoff, die aus der Druckgasflasche entnommen werden kann. Hierzu wird die Wasserstoffmasse m_{H_2} in der Flasche mit Volumen V_0 bei Nenndruck ($p=250 \text{ bar}$) sowie bei Restdruck ($p=10 \text{ bar}$) bestimmt. Zur Abbildung des Realgasverhaltens von Wasserstoff wird der Kompressionsfaktor Z mit tabellierten Parametern verwendet.

$$m_{H_2}(p,V) = \frac{p \cdot V_0}{Z(p)}$$

$$Z(250 \text{ bar}) = 1,201 \quad Z(10 \text{ bar}) = 1,007$$

$$m_{H_2/Flasche} = m_{H_2}(250 \text{ bar}) - m_{H_2}(10 \text{ bar}) = 1,0 \text{ kg}$$

Die zu speichernde Wasserstoffmenge bzw. die Anzahl der vorzuhaltenden Flaschen $n_{Flaschen}$ ergibt sich aus der mittleren Leistung des Standortes \bar{P} , der geforderten Betriebsdauer T, dem Wirkungsgrad des Gesamtsystems η , dem Wasserstoffinhalt einer Flasche $m_{H_2/Flasche}$ und dem Heizwert von Wasserstoff ΔH_u :

$$n_{Flaschen} \geq \frac{\bar{P} \cdot T}{\eta \cdot m_{H_2/Flasche} \cdot \Delta H_u}$$

Mit den Parametern:

$$\bar{P} = \frac{\text{Tagesenergiebedarf in kWh}}{24 \text{ h}}$$

$$T = T_{\text{Laufzeit}} + T_{\text{Testbetrieb}}$$

η_{Sys} = Systemwirkungsgrad

$m_{\text{H}_2/\text{Flasche}}$ = Masse Wasserstoff pro Flasche

ΔH_u = 33,33 kWh/kg

A.3.4 Brennstoffversorgung

Die Brennstoffversorgung bestimmt die mögliche Überbrückungsdauer und erlaubt durch geschickte Auslegung eine Maximierung des wirtschaftlichen Potentials.

Für die Speichergebinde gibt es oftmals die Optionen, sie zu mieten oder zu kaufen. Je nach Anwendungsfall kann die kostengünstigere Alternative gewählt werden. Beim Kauf der Speicher ist der Betreiber für die Wartung verantwortlich.

Bei gasförmigen Brennstoffen gilt es zudem, die Anzahl lösbarer Verbindungen zu minimieren. Nach einem Flaschentausch sind diese jedes Mal auf Dichtigkeit zu prüfen. Konkret heißt dies beispielsweise bei Wasserstoff, dass die Versorgung mit vorkonfektionierten Flaschenbündeln zu bevorzugen ist. Ein Flaschenbündel besteht z.B. aus 12 Einzelflaschen, die fest in einem Rahmen installiert sind. Zur Anlage gibt es dann nur noch eine Verbindung anstelle von 12. Das Logistikkonzept und die Möglichkeiten der Anlieferung (Gewichtsbeschränkungen) können einer solchen Lösung widersprechen.

Hinweis:

Angeschlossene Wechselflaschen dürfen benutzt werden auch wenn die Prüffrist bereits überschritten wurde (kein Tausch voller Flaschen).

Die Maximalfrist bei Stahlflaschen beträgt das Doppelte der Zulässigen Maximalfrist (also max. 20 Jahre), bei Compound-Behältern, das 1,5fache (also max. 15 Jahre).

A.3.5 Versorgungskonzept für eingeschränkt erreichbare Ziele

Über gut befahrbare Wege erreichbare Standorte können direkt per LKW angefahren werden. Für eingeschränkt erreichbare Standorte wird auf noch normal befahrbaren Wegen ein Übergabepunkt vereinbart, an dem ein Umladen der benötigten Flaschen vom Standard-LKW in ein geländegängiges Lieferfahrzeug erfolgt. Dies kann ein geländegängiger Transporter sein, der mit entsprechenden Belüftungen, Verankerungsmöglichkeiten sowie einer gasdichten Trennwand ertüchtigt wurde, um genehmigungsfreie Mengen von Gasflaschen bis direkt zum Standort oder zum nächsten Übergabepunkt zu transportieren. Der ggf. notwendige Transport für stark eingeschränkt erreichbare Standorte kann innerhalb der „letzten Meile“ mit entsprechender Ausrüstung (robuste Sackkarre bzw. Gasflaschentransportwagen) erfolgen.

Abbildung A-2 visualisiert verschiedene Transportkonzepte in Abhängigkeit von der Erreichbarkeit beispielhaft.

Bei der Auswahl der Gaslieferanten sollte somit neben den Kosten und der Reinheit der Gase auch auf die Möglichkeiten der Anlieferung geachtet werden.

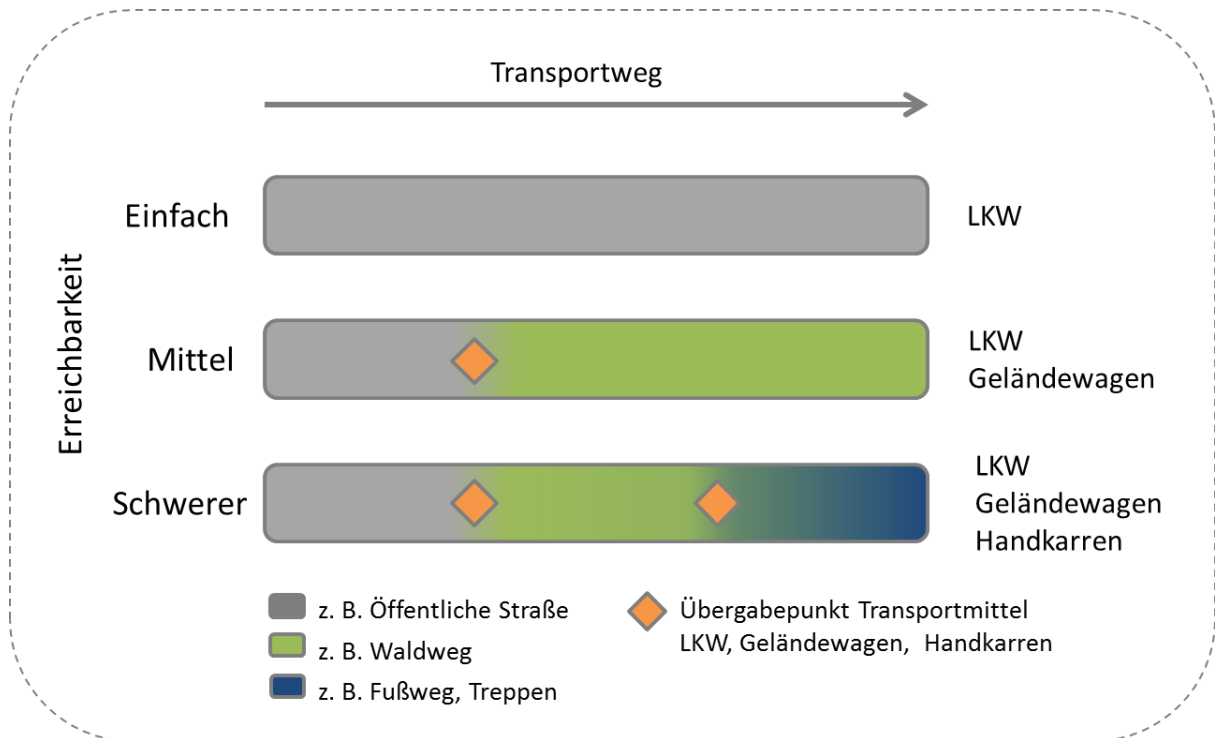


Abbildung A-2: Beispiel für ein Versorgungskonzept je nach Erreichbarkeit des Standorts

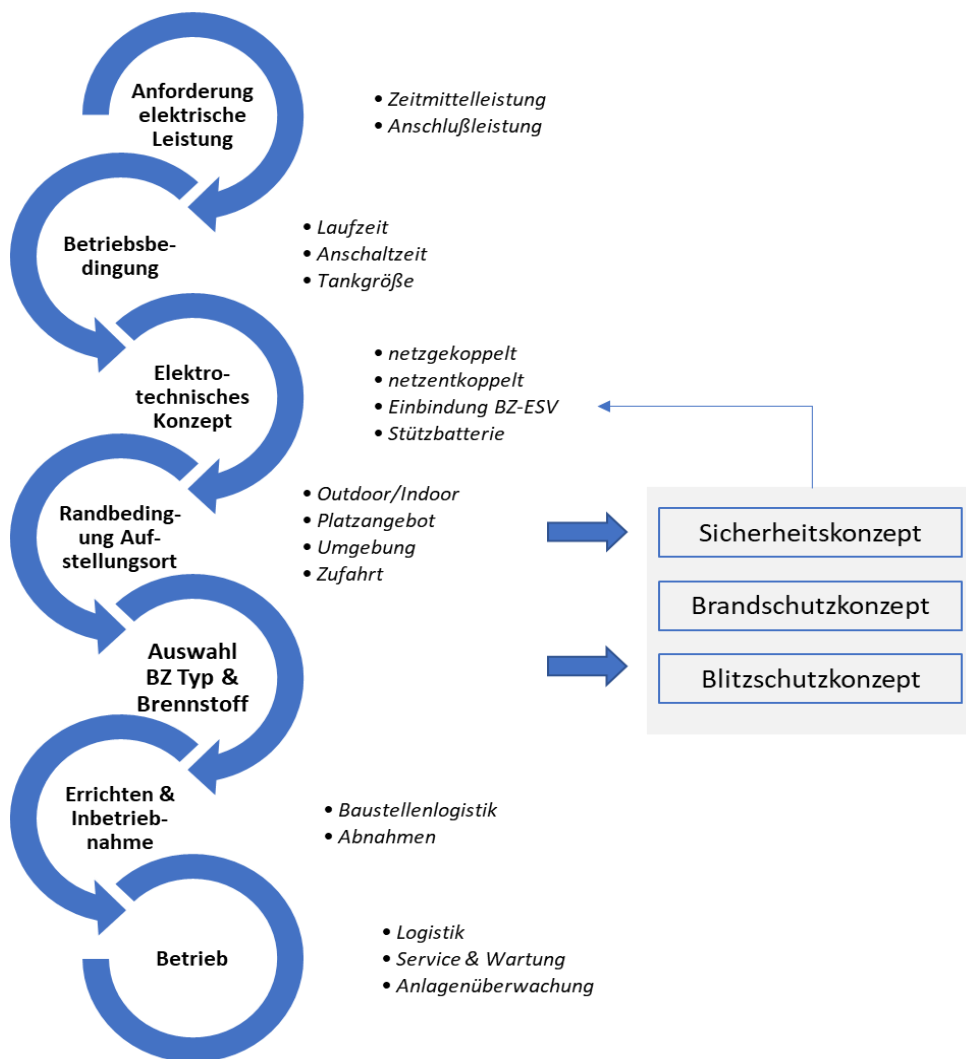
A.4 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 2-1: Unterscheidung der ESV-Anlagen in netzge- und netzentkoppelte Anlagen
- Abbildung 2-2: Übersicht zum Planungsleitfaden
- Abbildung 3-1: Prinzipschaltbild Brennstoffzellensystem
- Abbildung 3-2: Prinzipschaltbild einer BZ-ESV
- Abbildung 3-3: Typische Kennwerte von kommerziell verfügbaren Brennstoffzellensystemen
- Abbildung 3-4: Brennstoffzellen sind besonders geeignet für lange Überbrückungszeiten
- Abbildung 3-5: Gravimetrische Energiedichten verschiedener Brennstoffe
- Abbildung 3-6: Beispiel für eine wasserstoffbetriebene BZ-USV
- Abbildung 3-7: Beispiel einer methanolbetriebenen BZ-ESV
- Abbildung 4-1: Auswahl Brennstoffzelle und zugehörigen Brennstoff
- Abbildung 4-2: Schematische Darstellung eines Lastverlaufs und die resultierende Auslegung von BZ- und Diesel-ESV.
- Abbildung 4-3: Unterschiedliche modulare Konzepte
- Abbildung 4-4: Beispiel einer Verschaltung zur Versorgung von AC und DC-Verbrauchern
- Abbildung 4-5: Beispiel einer Verschaltung zur Versorgung von reinen DC-Verbrauchern
- Abbildung A-1: Unterschiedliche Auslegung einer BZ- und Diesel-ESV für die Versorgung einer induktiven Last mit hohem Einschaltstrom
- Abbildung A-2: Beispiel für ein Versorgungskonzept je nach Erreichbarkeit des Standorts

A.5 Checkliste

Die vorliegende Checkliste soll den Planungsvorgang unterstützen. Alle Referenzen beziehen sich auf den CPN Planungs- und Genehmigungsleitfaden.

Übersicht:



Bei den nachfolgenden beiden Seiten handelt es sich um die beispielhafte Darstellung eines Excel-Tools (unausgefüllt) zur Berechnung der Basisinformationen eines BZ-Systems. Das aktive Tool wird Ihnen auf Anfrage an tobias.koenig@now-gmbh.de kostenlos per Mail zur Verfügung gestellt.

Basisinformationen

Betriebsart	<input type="text"/>	Auswahlfelder
Art der Anwendung	<input type="text"/>	Eingabefeld
		Berechnung

Elektrische Verbraucher

Art der Verbraucher	<input type="text"/>	
Spannungsebene	<input type="checkbox"/> 48 V DC <input type="checkbox"/> 230 V AC sonstige, bitte angeben	<input type="text"/>
Anschlußleistung/Spitzenlast	<input type="text"/>	W
Zeitdauer der Spitzenlast	<input type="text"/>	s
Zeitmittelleistung	<input type="text"/>	W
erforderliche Betriebsdauer	<input type="text"/>	h
==> Energiebedarf der Verbraucher	<input type="text"/>	0 kWh

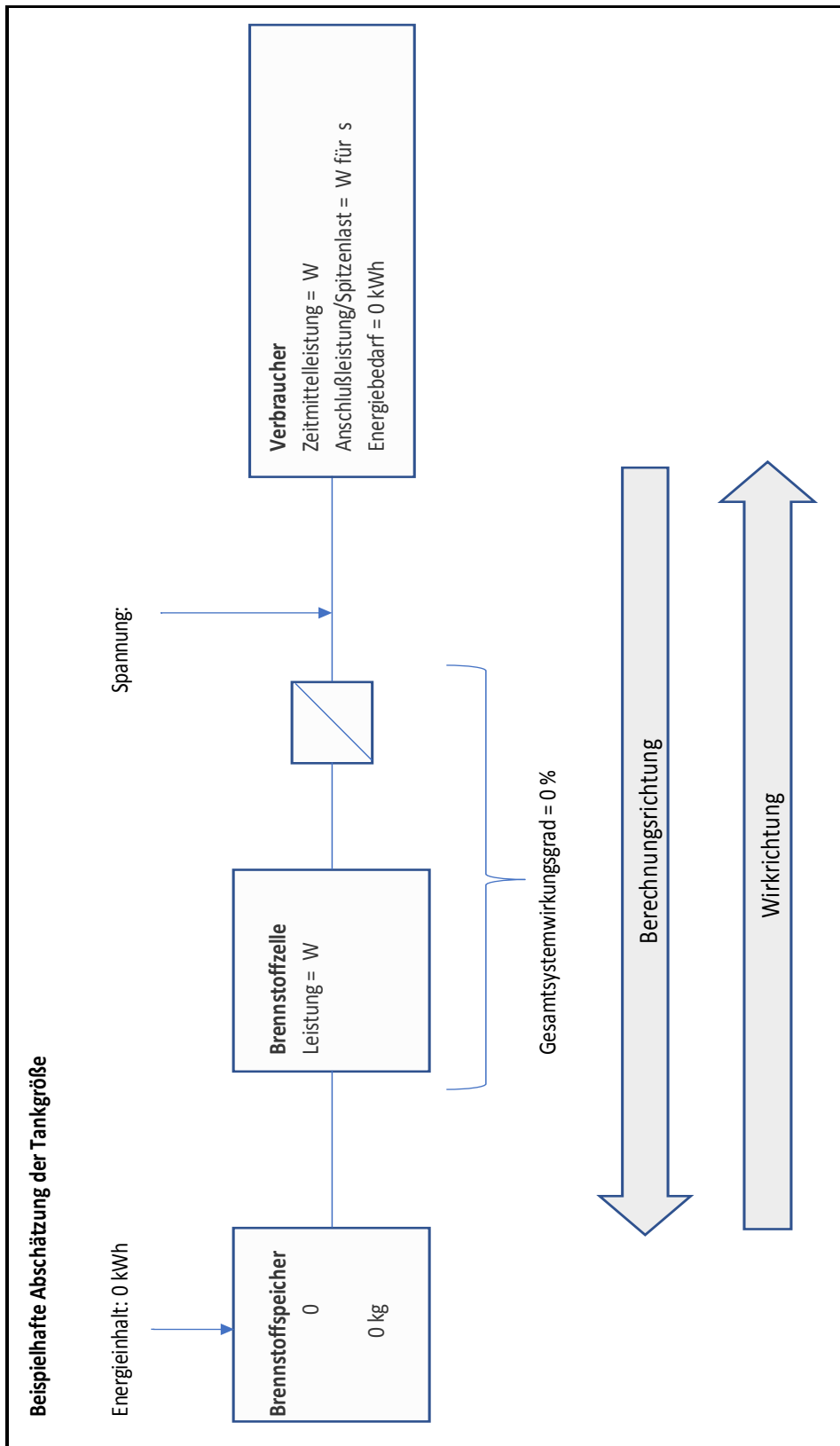
Aus Herstellerangaben

Wirkungsgrad Gesamtsystem inkl. Wandler	<input type="text"/>	%
==> Energieinhalt Brennstofftank	<input type="text"/>	0 kWh

Auswahl Brennstoff	<input type="text"/>	
Mindestmenge Brennstoff	<input type="text"/>	0 kg

Abschätzung Speicher

	Tankgröße	Gebinde
Wasserstoff @ 200 bar	<input type="text"/>	0 Druckgasbehälter mit 50l
Wasserstoff @ 300 bar	<input type="text"/>	0 Druckgasbehälter mit 50l
Flüssiggas @ 5kg/Flasche	<input type="text"/>	0 Druckgasbehälter
Flüssiggas @ 11kg/Flasche	<input type="text"/>	0 Druckgasbehälter
Flüssiggas @ 33kg/Flasche	<input type="text"/>	0 Druckgasbehälter
Methanol (rein)	<input type="text"/>	0 Liter



Checkliste Planung

Nr	Kapitel im Leitfaden Teil 1	Bezeichnung	Status ankreuzen! X	
			gestartet	freigegeben
		Planung		
1	4.1.	Auslegung der Leistung: Anschluss- und Zeittittleistung, Art der Verbraucher		
2	4.2.	Festlegung Betriebsdauer		
3	4.2.	Abschätzung des Brennstoffbedarfes		
4	4.3.2.	Bewertung von Redundanzenanforderungen		
5	4.3.; 4.3.3.; 4.3.5.; 4.3.6.	Konzept zur elektrotechnischen Einbindung		
6	4.4.	Auswahl Brennstoffzellentyp		
7	4.4.	Auswahl Brennstoff		
8	4.4.	Tankgröße / Gebindeart für den Brennstoff festlegen		
9	4.5.	Sicherheitskonzept		
10	4.5.	Einbinden in das Brandschutzkonzept		
11	4.5.	Einbinden in das Blitzschutzkonzept		
12	4.6.	Allgemeine Anlagenbeschreibung mit Definition der Schnittstellen		
		Errichten		
13	4.6.; 5.1.	Festlegung Aufstellungskonzept		
14	5.2.	Klärung der Baustellenlogistik		
		Inbetriebnahme		
15	6	Inbetriebnahme		
		Betrieb		
16	7.2	Festlegung der Intervalle der Selbsttests		
17	7.3	Wartungsplan		
18	7.4	Konzept für die Brennstofflogistik		

A.6 Autoren

Benedikt Eska (Firma Technology Management SK):

- 2009 Gründung von Technology Management SK als Beratungsunternehmen mit Fokus auf Brennstoffzellentechnologie
- erstes Projekt im Bereich Brennstoffzelle 1999
- 2014 – 2017 Interim Geschäftsführer Startup im Bereich „Strom aus Wärme“
- 2011 - 2014 Lehrauftrag für Energietechnik an der Hochschule München
- 9 Jahre in leitender Funktion eines deutschen Brennstoffzellenunternehmens und Vorstand der englischen Holding.
- mehr als 10 Jahre Erfahrung als Unternehmensberater
- Abschluss als Diplom-Physiker, TU München
- mehrere Projekte im Bereich USV Systeme für kritische Infrastrukturen inkl. Vermessung von Standorten und Erstellung der technischen Spezifikation für Ausschreibeunterlagen

Marcel Corneille (Firma EMCEL GmbH):

- Gründung EMCEL GmbH in 2012, Geschäftsführer
- Gründung Ingenieurbüro EMCEL in 2009
- 10-jährige Berufstätigkeit bei
 - DaimlerChrysler AG,
 - Ballard Power Systems AG und
 - XCELLSIS GmbH
- Dipl.-Ing. (FH) Maschinenbau
- mehrere Projekte im Bereich Planung von BZ-USV Systemen und Wasserstofftankstellen, sowie normgerechter Entwicklung

Clean Power Net (CPN) wird durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert und von der Nationalen Organisation für Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW GmbH) koordiniert.



Nationales Innovationsprogramm
Wasserstoff- und
Brennstoffzellentechnologie



www.cleanpowernet.de