

Volatile Balanced ePower Center

*Ein Zukunfts-Szenario für Strom-Tankstellen wird vorgestellt.
Spitzenstrom aus Windkraft und Photovoltaik versorgt bundesweit eine
speichergestützte Hochleistungs-Ladeinfrastruktur für eMobile*

*Martin Doster
DEKRA SE, Stuttgart*

Mit Strom aus erneuerbaren Energien können E-Mobile aufgeladen werden, auch wenn keine Sonne scheint und kein Wind weht. Die von den Netzbetreibern gedrosselten Strommengen - auch der gesamte bisher gebremste Windstrom - kann bundesweit über viele Tage gepuffert werden. Wird zu wenig Strom aus erneuerbarer Quelle angeboten, erfolgt die Versorgung der Hochleistungs-Ladestation vorzugsweise aus den thermischen Energiespeichern, zeitweise gestützt durch Gaskessel oder Gasmotoren.

In thermischen Hochleistungs-Energiespeichern werden sehr große Energiemengen in der Größenordnung von mehreren 100 MWh zwischengespeichert. Die Hochschule Zittau hat einen thermischen Energiespeicher mit einem Gleichdruck-Verdrängungsverfahren (Druckwasserspeicher) entwickelt, welcher in den thermodynamischen Anlagenteil integriert werden kann.

Die Rück-Wandlung von gespeicherter thermischer Energie in elektrische Energie geschieht über die Dampfmaschinen-/Turbinen-Generatorgruppe, wie in klassischen Dampfkraftwerken.

Die Abwärme wird für Erlebnis-Gastronomie und für Agrar-Anwendungen genutzt. Gemüse und Obst, welches im mediterranen Klima angebaut wird, kann auch in einer gemäßigten Klimazone produziert werden. Der vermiedene Transportweg und die nicht mehr notwendige Logistik- und Kühlkette tragen zur Minimierung des CO₂-Ausstoßes bei.

Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Ladezentrums ist gesichert, sofern der Anteil an eMobilen mittelfristig wenigstens 5% beträgt. Der Einkauf von Strom geschieht in der Regel zu Mindestpreisen im Tages oder Wochenzyklus. Je nach Tageszeit und Vordisposition eines Ladeports kann der Verkaufspreis pro kWh Ladeleistung bis zu 1 € betragen.

Die fortschreitende eMobilisierung trägt zur Entschleunigung der Lebensführung bei. Auf dem Hintergrund von Warte- und Ladezeiten zwischen 30 min und 2 h müssen die Ladezentren der Zukunft dem veränderten Bedarf des Automobilisten begegnen mit Einkaufs-, Gastronomie und Erlebnis-Infrastruktur.

Inhaltsverzeichnis

1	Das Hochleistungs-Ladezentrum für eMobile im Überblick.....	5
1.1	Aus gesellschaftlicher Sicht.....	5
1.2	Aus technisch-wissenschaftlicher Sicht.....	6
1.3	Aus Sicht der automotiven Dienstleister, Energieversorger und der öffentlichen Hand.....	7
2	Flächendeckende Ladeinfrastruktur für E-Mobile und die schwer beherrschbare Volatilität.....	10
3	Skizzierung des funktionalen Aufbaus eines e-Ladezentrums....	10
3.1	Der bautechnische Teil.....	11
3.2	Die elektrische Anlagenstruktur.....	12
3.3	Die thermodynamische Anlagenstruktur.....	12
3.3.1	Nutzung von standardisierter Anlagentechnik bei KWKs und in der Schiffstechnik.....	12
3.3.2	Die Nutzung erneuerbarer Energien wird mit der Integration von Dampfspeichern möglich.....	13
3.3.3	Power to Heat Verfahren mit einem thermischen Druckwasser- Energiespeicher.....	13
3.3.4	Dampfmaschinen zur Krafterzeugung im Gleitdruck-Betrieb mit einem guten Teillastverhalten.....	14
3.3.5	Power to Heat Verfahren mit einem thermischen Festkörperspeicher auf hohem Temperaturniveau.....	14
3.3.6	Überkritischer Druckwasserspeicher auf hohem Temperaturnivea bis zu 700 °C als Alternative.....	14
4	Technische Risiken, Betriebs-Sicherheit, Brand- und Explosionsschutz.....	15
4.1	Die Anlagen und Betriebssicherheit.....	16

4.2	Physikalische Aspekte zur Illustration von Explosions-, Zerstörungs- oder Verletzungs-potenzialen	16
4.2.1	Das kinetisches Zerstörungspotenzial (kinetische Energie und die Aufschlag-Impuls-Energie)	17
4.2.2	Das thermische Zerstörungspotenzial	17
4.2.3	Das thermo-chemische, thermo-dynamische und elektrische Explosionspotenzial	17
5	Zusammenfassung	18
	<i>Autor:</i>	19

1 Das Hochleistungs-Ladezentrum für eMobile im Überblick

1.1 Aus gesellschaftlicher Sicht

Das Ladezentrum für Elektromobile findet der eAutomobilist vorzugsweise an Hauptverkehrsstraßen und Autobahnen. Zunächst fällt eine Gebäudestruktur auf, ähnlich einer mehrstöckigen Parkgarage. Die Zellen mit den Hochleistungs-Ladeports sind nach außen geöffnet und durch eine brand-sichere Wand voneinander getrennt: Die „Bee-Hive“ Architektur der eLade-Zentren der Zukunft.

Es folgt ein großzügig angelegter Bereich mit Gastronomie, Einkaufszonen- und verschiedenen Servicezentren. Der Automobilist ahnt, dass es ihm während der Akku-Ladezeit nicht langweilig wird. Unter den Servicezentren ist für den Geschäftsreisenden das Mobilitätszentrum von besonderem Interesse. Hier kann er auch bei starker Belegung der Ports einen Vorzugspass erwerben für einem frei gehaltenen Port mit höchster Ladeleistung. Dies geschieht in der Regel auf elektronischem Weg über die Mobility-Grids. Oder er kann sein gemietetes Fahrzeug mit einem bereit stehenden eMobil mit vollgeladenen Akkus tauschen, ähnlich dem Pferdewechsel im Postkutschen-Zeitalter.

- Mit Strom aus erneuerbaren Energien können E-Mobile geladen werden, auch wenn keine Sonne scheint und kein Wind weht.
- Volatil erzeugter Wind- oder Solar-Strom versorgt zeit- und bedarfsgerecht die eLadeports. Thermische Energiespeicher puffern zwischen dem Erzeugerangebot und dem Lade-Bedarf.
- Die Einlagerung von Strommengen geschieht wenn der Strombörsen-Preis deutlich unter dem Erzeugerniveau von ca. 5 €-Cent/KWh liegt.
- Größere Zentren haben mehr als 100 Ladeports mit je bis zu 63 KW Ladeleistung. Etwa $\frac{1}{4}$ der Ports unterstützen optional Schnell-Lade-Funktionen mit bis zu 320 KW.
- Im eLadezentrum integrierte Einkaufs-, Service-, Gastronomie- und Erlebnis-Infrastruktur überbrückt die längeren Wartezeiten des eAutomobilisten.

- Im Gegensatz zu den Energieverlusten in Pumpspeicherwerken kann die Abwärme des Speicher-Zyklus z. B. zur Produktion von wärmeliebenden Obst- und Gemüsearten genutzt werden.
- Das Einkaufszentrum bietet vorzugsweise CO₂-neutral erzeugte Waren an. Das Obst- und Gemüseangebot stammt von den beheizten und klima-konditionierten landwirtschaftlichen Flächen im direkten Umfeld des Zentrums.
- Optional können auch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor CO₂-neutral und synthetisch erzeugten „Designer-Kraftstoff“ tanken.
- Der CO₂-Foot-Print eines so aufgebauten Ladezentrums gestaltet sich vorbildlich.

1.2 Aus technisch-wissenschaftlicher Sicht

Dem technisch-wissenschaftlich interessierten Betrachter stellen sich nun einige Fragen: Wie ist es möglich, dass in Spitzenzeiten mehr als 100 Ladeports mit je 20 – 320 KW in Summe mit 1.000 bis 30.000 KVA versorgt werden können und der Strom weitgehend aus erneuerbarer Quelle kommt? Welche Energiespeicher-Technologie kann bis zu 30 MW über mehrere Stunden ausspeichern, wenn die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht? Wie kann der extremen Volatilität auf Verbraucherseite durch schnell wechselnde Lade-Portbelegung begegnet werden? Wie steht es um die Anlagen- und Betriebssicherheit?

- Sehr große Energiemengen in der Größenordnung von mehreren 100 MWh werden in Hochleistungs-Energiespeichern mit integrierter Elektrodenheizung gepuffert.
- Im Umfeld des Ladezentrums erzeugte Energie aus Erneuerbaren wird vorzugsweise bezogen oder eingelagert.
- Die enorme Energiespeicherfähigkeit von Druckwasser auf hohem Temperaturniveau mit mehr als 0,4 KWh/kg wird genutzt.
- Die Hochschule Zittau hat einen elektroden-beheizbaren, thermischen Energiespeicher entwickelt. Er kann im Gleichdruck-Verdrängungsverfahren als Druckwasserspeicher be- und entladen werden. Die Integration in den thermodynamischen Anlagenteil eines eLade-Zentrums ist mit überschaubarem Aufwand möglich.
- Beherrschbare Technologien aus dem Kraftwerksbau werden eingesetzt. Technologie kommt zum Einsatz, wie man sie in Kraftwerken mit Schnellstart-Fähigkeit zur Spitzenlast-Abdeckung

oder in der Antriebs- und Versorgungstechnik für sehr große Schiffe anwendet.

- Die Rück-Wandlung von thermischer Energie in elektrische Energie geschieht wie in konventionellen Kraftwerken über die Dampf-motoren/ Turbinen-Generatorgruppe
- Im elektrischen Anlagenteil stützt ein großvolumiger Stromspeicher auf Li-Ionenbasis mit ca. 1-2 MWh el. Die schnelle Pufferung von kleineren Last- oder Erzeugerspitzen +/-500 KW erfolgt ohne bewegte Massen.
- Für den Fall, dass längere Zeit kein Wind weht oder keine Sonne scheint, unterstützen Gasmotoren bei der Energieerzeugung.
- Bei sehr großem Bedarf an Ladeleistung geschieht die Versorgung mit thermischer Energie aus der Abwärme der Gas-Motoren und durch einen Gas-gefeuerten Kessel.
- Optional geschieht die stützende Erzeugung auch mit Biomasse (Hackschnitzel, Stroh, Grünschnitt oder durch Biogas)
- Ladeports in den Parkgaragen von Industrie- oder Bürogebäuden im Umfeld des Ladezentrums können remote versorgt werden. Häufig ist die Nachrüstung von Parkgaragen mit ausreichend leistungs-fähigen Ladeports selbst für größere Unternehmen mit einem hohen finanziellen, logistischen und technischen Risiko verbunden.
- Die Machbarkeit ist weitgehend sichergestellt - Realisierbarkeit innerhalb von 3 Jahren möglich.
- Es werden sehr große Energiemengen gespeichert und übertragen. Mit modernen, simultanen Anlagenüberwachungs-Verfahren wird der Bauteil-, Explosions- und Brandschutz aktiv sichergestellt.

1.3 Aus Sicht der automotiven Dienstleister, Energieversorger und der öffentlichen Hand

Die automotiven Dienstleister wie z.B. Car-Pools werden sich an solchen Zentren platzieren. Die Energieversorger und die Netzbetreiber finden in diesen Zentren einen flächendeckenden Absatzmarkt für große Erzeugungs-Überhänge. Grob betrachtet können die heute zu Spot-Preisen ins Ausland exportierten oder ab-geregelten EE-Strommengen für die eMobilisierung nutzbar gemacht werden. Die Betreiber von Verteil-, Industrie- und Ortsnetzen haben zusätzlich die Möglichkeit, Überhänge von volatil eingespeistem Strom aus erneuerbarer Quelle dem Ladezentrum zuzuführen.

Für den Kapital-Markt bieten solche Zentren attraktive Anlage- und Investitionsmöglichkeiten. Auch die öffentliche Hand dürfte bereit sein, mit Fördermitteln von mehreren Mio. € pro Ladezentrum zu unterstützen.

- Die Wirtschaftlichkeit ist gesichert, sofern der Anteil an eMobilen wenigstens 5% beträgt. Der Einkauf von Strom geschieht in der Regel zu Mindestpreisen im Tages- oder Wochenzyklus.
- In der Regel liegt der Einkaufs-Preis pro KWh 2-3 €-Cent unter dem Tages- oder Wochenmaximum. Zeitweise ist Stromeinkauf zu negativen Preisen möglich. Je nach Tageszeit und Vordisposition eines Ladeports kann der Verkaufspreis pro KWh Schnell-Ladeleistung bis zu 1€ betragen.
- Mit Hochleistungs-Energiespeichern können die volatil erzeugten Strommengen der Erneuerbaren im „24h/7day-Zyklus“ eingelagert werden.
- Die zwingenden und anspruchsvollen Kriterien der öffentlichen Hand z. B in der Förderrichtlinie „Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland“ des Bundes-Ministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur sind abgedeckt. Ins besondere das Kriterium „*der für den Ladevorgang erforderliche Strom stammt aus erneuerbaren Energien oder aus vor Ort eigenerzeugtem regenerativem Strom (z.B. Strom aus Photovoltaik-Anlagen)*“ wird erfüllt und rechtfertigt den hohen technischen Aufwand zur Energie-Pufferung.
- Diesen zwingenden Anforderungen der Förderrichtlinien zu entsprechen ist Kern der vorgestellten Funktions- und Verfahrens-Struktur.
- Auditierbare Herkunftsnachweise für erneuerbare Energien nach den Richtlinien des Bundes-Umweltamtes, zertifizierbar nach RECS/EE-GoO „European Energy Certificate -Guarantee of Origin“ sind ein wesentliches Kriterium für das Prozess-Design.

Sofern die Rahmenbedingungen auf Abnehmerseite eintreten und den ingenieur-technischen Herausforderungen entsprochen wird, ist ein EBIT von >20% pro ePowerCenter zu erwarten.

Die Finanzierung einer Typ-Entwicklung für eine Serie solcher Zentren sollte durch Fördermaßnahmen gestützt werden. Sofern nur die Baukosten für ein Zentrum investiert werden müssen, wird der Break-Even schon nach 2 Jahren eintreten, vorausgesetzt dass der eMobil-Fahzeug-Anteil mindestens 2% erreicht hat.

2 Flächendeckende Ladeinfrastruktur für E-Mobile und die schwer beherrschbare Volatilität

Für die öffentlichen Schnell-Ladestationen mit mehreren Ladeports werden je nach Größe elektrische Spitzenleistungen zwischen 500 und 20.000 KW erwartet. Es handelt sich dabei um Anschlusswerte in der Größenordnung wie bei größeren Industriebetrieben. Um für einen eMobil Anteil von 2% die Versorgung sicherzustellen, müssen in einem Ballungszentrum ca. 50 solcher Ladestationen aufgebaut werden. Im Gegensatz zu dem Verbrauchsverhalten der Industrie kann die Last einer Ladestation innerhalb eines Tages mehrfach von null auf 20.000 KW wechseln.

Die Elektromobilisierung verschärft die Volatilität auch auf der Verbraucherseite. Die Wahrscheinlichkeit ist gering, dass Einspeisung- und Lastspitzen sich zum gleichen Zeitpunkt treffen. Dem Lastverhalten durch die stark wechselnde Ladeleistung muss zusätzlich begegnet werden.

- Hohe Verfügbarkeit und maximale Ladeleistung wird vom Fahrer eines E-Mobils erwartet.
- Schnell-Ladefunktionen bewirken auch wegen der unterschiedlichen Belegung der Ladeports extreme Lastsprünge. Das Verbraucherverhalten im Tages- Wochen- Monats- und Jahreszyklus ist schwer vorhersagbar.
- Extreme Volatilität im Lastverhalten eines Zentrums wird erwartet. +/- 2.000 KW im 1-h-Intervall, +/- n*1.000 KW im 4-h-Intervall
- Für Ladezentren mit über 100 Ports wird ein 10 KV bis 110 KV-Direktanschluss mit einem Anschlusswert von 20-50 MVA zwingend notwendig.
- Diese extrem wechselnde Last mehrerer Ladestationen können die heutigen Orts- und Verteilnetze nicht oder nur schwer ausgleichen.

3 Skizzierung des funktionalen Aufbaus eines e-Ladezentrums

Das Ladezentrum bezieht die elektrische Energie für die Ladeports über den gesamten 24h*7-Tage-Zyklus direkt aus den 10/20/110 KV Verteilnetzen.

Hohe elektrische Leistungsströme von mehreren MW können zu Spot-Preisen von der Strombörse im Day-ahead oder Intraday-Handel bezogen werden.

Das "Volatile Balanced ePower Center" hat die Fähigkeit, mehrere 100 MWh Exergie (Kraft) in einem Wochen- und Tageszyklus zwischen zu speichern. Damit kann die Volatilität der Erneuerbaren auf Erzeugerseite und die zeitlich veränderliche Belastung an den Schnell-Ladeports gepuffert werden.

Die maximale Leistung an den Ladeports darf über mehrere Stunden deutlich höher liegen als die Netz-Anschlussleistung.

Das Ladezentrum ist ein hochdynamisches Gesamtsystem mit einem ausgewogenen energetischen Bilanzkreis. Es besteht aus Komponenten mit folgenden funktionalen Eigenschaften:

3.1 Der bautechnische Teil

Die Gebäudestruktur ähnelt einer größeren Parkgarage. Die Ladeports sind auf mehrere Stockwerke verteilt und nach außen geöffnet. Die einzelnen Lade-Zellen sind mit Brand- und Explosionsschutz ausgestattet. Im Erdgeschoss befinden sich Sonder-Ladeports für leichte eNutzfahrzeuge und für den mobilen Not-Ladedienst (Streckendienst des ADAC für liegengebliebene eMobile). Der Logistik- und Servicebereich kann von den Fahrzeug-Insassen zu Fuß erreicht werden.

Der kraftwerks-technische Teil mit den thermischen und elektrischen Speicherstrukturen befindet sich in einem abgesetzten Gebäudeteil. Die thermischen Speicher-Einheiten mit einem Durchmesser von 10 m und einer Höhe von 7 m pro 100 MWh Kapazität sind in die Erde eingelassen. Zusammen mit dem stationären Li-Ionen Speicher (in Containergröße) befindet sich dieser Teil abgesetzt vom Besucherbereich.

Der Bereich für die Logistik und Services sowie für Gastronomie und Einkauf ist nach dem Vorbild von Flughafen-Terminals oder Großstadt-Bahnhöfen gestaltet.

Die landwirtschaftlichen Betriebe im Umkreis werden mit Wärme für den Erwerbs-Gemüse- und -Obstanbau versorgt. Vorbild ist z. B. die Beheizung von Spargelfeldern mit Kraftwerks-Abwärme. Auffallend sind gewächshaus-ähnliche Strukturen zum Wind- und Frostschutz und aktive Komponenten zur Sicherstellung eines milden lokalen Klimas. Auch die Ackerboden-konditionierung nutzt das Zentrum als Kraft- und Versorgungsquelle für Düngung und Bewässerung. Die Antriebsenergie zur Temperierung von Luft

und Boden, die mechanische Humus-Bearbeitung und der Betrieb der Wind- und Frostschutz-Einrichtungen kommt CO₂-neutral von der kraftwerks-technischen Anlagen des Zentrums.

3.2 Die elektrische Anlagenstruktur

Größere Ladezentren werden direkt an die Verteilnetzstruktur angebunden. In der Regel 10 bis 110 kV. Größere Windkraft- oder Solar-Parks, welche in dieses Verteilnetz einspeisen, haben den Vorteil, dass die Erzeugerleistung nur sehr selten abgeregelt werden muss.

Im elektrischen Anlagenteil stützt ein großvolumiger Stromspeicher auf Li-Ionenbasis mit ca. 1-2 MWh el. Speicherfähigkeit bei den kurzzeitigen und sprunghaften Lade-Lastwechseln. Dieser elektrische Puffer stabilisiert auch die DC-Stromversorgung für den Gleichspannungs-Ladebedarf.

Über 100 Ladeports werden mit 3-Phasen-Wechselstrom (Drehstrom 400V) und einer Leistung bis 63 KW versorgt. Etwa ¼ der Ports haben Schnellladefunktionen mit optionaler Gleichspannungsversorgung. Wie schon bei modernen Industriebetrieben muss dort neben AC- auch eine DC-Stromversorgungs-Netz aufgebaut werden. Die Dimensionierung der elektrischen Anlage und die funktionalen Komponenten haben eine Größenordnung wie große Produktionswerke.

3.3 Die thermodynamische Anlagenstruktur

Gute Vorbilder für eine hoch verfügbare Krafterzeugung im Insel-Betrieb im Leistungsbereich von 1 MW bis zu 50 MW finden sich in der historischen und aktuellen Schiffs-Antriebstechnik.

3.3.1 Nutzung von standardisierter Anlagentechnik bei KWKs und in der Schiffstechnik

Dieser Teil der Anlagenstruktur erinnert an die Krafterzeugung mit Gas- oder Dieselmotoren auf großen Marine,- Passagier- oder Handelsschiffen für den Antrieb und für die Bordversorgung mit elektrischem Strom. Der dampftechnische Teil findet seine Vorbilder bei kleineren Marine-Schiffen mit Dampferzeugern und einer Kombination aus Dampfmotoren und –Turbinen Ende des 20. Jahrhunderts.

Die aktuell geplanten Kraftwerke zur Abdeckung des Spitzenstrombedarfes nutzen Gasmotoren-Farmen mit Leistungseinheiten bis zu 10 MW. Sie dienen

dazu, Lastspitzen im regionalen Verbraucherverhalten schnell auszugleichen. Die Planung solcher kommunalen Zentren in Stuttgart oder Kiel sind schon weit fortgeschritten. Mit dieser Funktions-Struktur können auch enorme Lastspitzen von eLade-Ports ausgeglichen werden – allerdings im Widerspruch zum politischen Anspruch, eMobile mit Strom aus erneuerbarer Quelle zu laden. Die mit Erdgas betriebenen Motoren haben einen hohen Wirkungsgrad von ca. 50%, verbunden mit hohen NO_x-Werten. In den Wintermonaten wird die Abwärme in die Fernheiznetze eingespeist. In den 8 Monaten Sommer und Übergangszeit wird nur ein geringer Teil der Abwärme genutzt.

Die Nutzung der thermischen Energie im Abgas-Strom von Gas- oder Dieselmotoren wird in größeren KWK-Anlagen schon eingesetzt: Der nachgeschaltete Abhitze-Dampfkessel versorgt kleinere Dampfturbinen oder Dampfmaschinen zur Stromerzeugung. Das Temperatur-Niveau von 400 – 500° ist für eine kleinere Dampfkraft-Anlage optimal, da die Belastung der Bauteile- und Werkstoffe bei diesen Dampf-Zuständen gut beherrscht werden kann.

3.3.2 Die Nutzung erneuerbarer Energien wird mit der Integration von Dampfspeichern möglich.

Der Anforderung an die Lade-Infrastruktur zur weitgehenden Nutzung von erneuerbarer Energie kann damit nicht entsprochen werden.

Es muss ein Verfahren gefunden werden, überschüssigen Wind- oder Solarstrom zu jeder Zeit einzulagern und ihn bedarfsgerecht den Ladeparks zuzuführen. Der im Dampfkraft-Kreisprozess integrierte Gleichdruck-Verdrängungs-Speicher kann durch die Abwärme der Motoren aufgeheizt oder mit einer Elektrodenheizung elektrisch auf hohem Temperatur-Niveau geladen werden.

3.3.3 Power to Heat Verfahren mit einem thermischen Druckwasser- Energiespeicher

Mit einem solchen Power-to-Heat Prozess wäre die Energiespeicherung mit elektrischer Energie im Druckwasser-/Dampfmedium bis zu einem Druck von 300 bar und einer Temperatur von 700 °C möglich. Jedoch erfordert die direkte Rückwandlung in Antriebs-Energie eine UHD-Turbinenstufe für überkritischen Hochtemperatur-Dampf (Ultra-High-Temperature-Turbine) - wie in den modernsten Giga-Watt-Großkraftwerksblöcken. – Für den dezentralen

Betrieb in dem vorgeschlagenen Ladezentrum mit weniger als 50 MW el Leistung ist dieser Ansatz zu kompliziert und auch nicht lieferbar.

Der thermische Druckwasserspeicher nach dem Gleichdruck-Verdrängungsverfahren, wie er von der Hochschule Zittau/Görlitz mit integrierter Elektrodenheizung entwickelt wurde, ist für einen Druckwasser-/Dampf-Zustand von max. 320 °C und 160 bar ausgelegt. Siehe auch Folgevortrag von Hrn. Klette: „Dynamische Simulation und experimentelle Validierung eines thermischen Energiespeichers für die Flexibilisierung thermischer Kraftwerke“

3.3.4 Dampfmotoren zur Krafterzeugung im Gleitdruck-Betrieb mit einem guten Teillastverhalten

Um wartungsfreundliche Dampfmotoren im Gleitdruckbetrieb einsetzen zu können, würde ein Dampfmedium-Zustand im Speicher von 280° und 60 bar ausreichen. Bei höheren Dampfzuständen über 80 bar wäre der Einsatz einer HD-Dampfturbine notwendig. Der Wirkungsgrad ließe sich dann zwar von 35% auf über 40% steigern, der Einsatz einer Strömungsmaschine in einer Anlage mit max. 50 MW Leistung ist jedoch unwirtschaftlich.

Es wird vorgeschlagen, die Dampfmotoren-Technik der Firma Spilling in Hamburg einzusetzen.

3.3.5 Power to Heat Verfahren mit einem thermischen Festkörperspeicher auf hohem Temperaturniveau

Zur Speicherung auf höherem Temperaturniveau bietet sich der von DLR Stuttgart entwickelte Feststoffspeicher an. Er wurde auf Spezial-Beton-Basis für einen Temperaturbereich von 100 - 600 °C mit einer Kapazität von 0,4 MWh entwickelt. – Der vom Druckwasser-Speicher erzeugte Sattdampf kann mit Hilfe des höheren Temperatur-Niveaus des Festkörperspeichers getrocknet und überhitzt werden. Dies trägt zur Erhöhung des Wirkungsgrades bei. Auch bei sinkendem Dampfdruck und sinkender Sattdampf Temperatur kann in diesem Überhitzungs-Abschnitt die max. Eintritts-Dampf-Temperatur für den Dampfmotor gehalten werden. Im Falle einer mehrstufigen Expansion in den Dampfmotoren sind auch Zwischenüberhitzungs-Stufen denkbar.

3.3.6 Überkritischer Druckwasserspeicher auf hohem Temperaturniveau bis zu 700 °C als Alternative

Alternativ zum thermischen Festkörperspeicher kann der Hochtemperatur-Speicher-Bereich auch durch einen sekundären Druckwasserspeicher

unterstützt werden. Mit einer sehr großen elektrischen Leistung kann das Druckwasser-/Dampfmedium bei einem überkritischen Druck von 300 bar bis zu 700 °C aufgeheizt werden. Auch wenn keine UHD-Turbinenstufe zur Krafterzeugung eingesetzt wird, kann dieser Hochtemperaturspeicher die Rolle des thermischen Festkörper-Speichers zur Heiß-Dampfkonditionierung übernehmen. Auch das Einmischen überkritischer Dampfstrom-Anteile in den Dampfstrom aus dem primären „Mitteldruck-Dampfspeicher“ ist denkbar.

Während des Entladevorgang sinken Druck und Temperatur des Sattampfes ab. Durch die Einmischung von überkritischem Dampf aus diesem Sekundärspeicher auf einem höheren Temperatur- und Druckniveau kann die Heißdampfversorgung für die Dampfmaschinen über einen großen Teil des Entladezeit-Intervalls auf einem maximalen Druck- und Temperatur-Niveau gehalten werden.

4 Technische Risiken, Betriebs-Sicherheit, Brand- und Explosionsschutz

Alle technischen Risiken dieser Anlagen-Struktur müssen identifiziert und in Hinblick auf das Gefährdungspotenzial analysiert werden. Es muss dargelegt werden, mit welchen Vorkehrungen oder Maßnahmen diesen Risiken begegnet wird. Auch in der Betriebsphase muss durch regelmäßige Inspektionen jederzeit die Betriebssicherheit, die körperliche Unversehrtheit von Personen, der Brand- und Explosionsschutz gewährleistet sein. Was ist bei Planung, Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme zu berücksichtigen?

Der kraftwerkstechnische Anlagenteil, mit mehreren 100 MWh thermisch gespeicherter Energie mit ihren Hochdruck-Bauteilen sowie die elektrische Anlagenstruktur zur Pufferung von mehreren MWh elektrischer Energie in Li-Ionenspeichern birgt technische Risiken, welche u. a. nach den Kriterien der EU Maschinenrichtlinie oder des Produkt-Sicherheitsgesetzes analysiert und beurteilt werden müssen. Für den schlimmsten anzunehmenden Störfall muss das maximale Zerstörungs- oder Verletzungspotenzial bekannt sein. Vorkehrungen müssen getroffen werden, dass dieser Fall (GAU) mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. Des Weiteren müssen Katastrophen-Szenarien in ihrer Auswirkung bekannt sein und eine Maßnahmenplanung vorliegen.

4.1 Die Anlagen und Betriebssicherheit

Was die Anlagen- und Betriebssicherheit im kraftwerkstechnischen Teil betrifft, werden Verfahren angewandt zur Überwachung von Kraftwerks- und verfahrenstechnischen Anlagen mit hoher Druck und Temperaturbelastung.

Die zeitliche veränderlichen Temperaturen und Drücke im Medium sowie die Spannungs- und Temperaturverteilung in der Speicherbauteilwand werden simultan erhoben oder berechnet. Zentrale Prozessoren ermitteln den Lebensdauerverzehr und die Versagensrisiken der hoch beanspruchten Bauteile. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den Stellorganen, geometrischen Durchbrüchen und Schweißstellen. Überschreitet das Betriebsrisiko eine kritische Grenze, wird eine zerstörungsfreie Bauteilprüfung oder eine Revision mit Sichtprüfung und Probenentnahme notwendig. Die Konzentration, Übertragung und Auswertung dieser Daten muss simultan und remote über die Netze geschehen.

4.2 Physikalische Aspekte zur Illustration von Explosions-, Zerstörungs- oder Verletzungspotenzialen

Moderne eMobile mit mäßiger Reichweite haben eine Akku-Kapazität von deutlich mehr als 10 KWh. Fahrzeuge der gehobenen Leistungsklasse liegen schon über 50 KWh, perspektivisch werden es über 100 KWh sein.

Die EU Maschinenrichtlinie und das Produkthaftungsgesetz fordert die Analyse von Risiken und die Beurteilung von Eintritts-Wahrscheinlichkeit und Wirkung. Für die Konstruktion der eMobile und bei der Gestaltung der eLadezentren muss dieses technische Regelwerk zwingend angewandt werden.

Mit einer vereinfachten Betrachtung auf naturwissenschaftlicher Ebene wird nachfolgend veranschaulicht, welche Auswirkung die technischen Risiken haben können. Das Ausmaß einer Gefährdung kann mit diesen vergleichenden skalaren Größen und Effekten klassifiziert werden. Die geforderte „Risiko-Beurteilung“ kann so in einer allgemein verständlichen Weise beschrieben werden:

4.2.1 Das kinetisches Zerstörungspotenzial (kinetische Energie und die Aufschlag-Impuls-Energie)

Die kinetische Energiemenge von 1 KWh entspricht einer Aufschlag-Impuls-Energie einer Masse von 1.000 kg, welche mit 305 km/h aufschlägt, oder einer Masse von 1.000 kg, welche aus einer Fallhöhe von 375 m aufschlägt.

4.2.2 Das thermische Zerstörungspotenzial

- Schnell-Ladeports arbeiten mit einer Stromstärke von mehreren 100 Ampere. – Dies entspricht der Stromstärke von Elektro-Schweiß-Geräten, welche jedoch nur mit 1/10 der Spannung arbeiten.

Mit 1 KWh elektrischer oder thermischer Energie können z. B.

- 3,8 kg Stahl auf 1.540 °C oder
- 5,8 kg Kupfer auf 1050 °C

aufgeheizt und geschmolzen werden.

- Mit der el.-Speicherkapazität von 0,22 KWh in 1 Kilogramm Li-Ionen-Akku kann 1 Kilogramm Kupfer auf weit über 1000 °C aufgeheizt und geschmolzen werden.
- Bei einem Anschlusswert oder einer Kurzschlussleistung von 43 KW wird 1 Kilogramm Kupfer in ca. 15 sec. aufgeheizt und geschmolzen.
- Nur ein minimaler Teil des Energie-Stromes kann im Versagensfall zum Aufschmelzen der Membran- oder Kabelisolation mit Brandfolge führen. Wegen der hohen Explosions-Leistung (hohe Energiefreisetzung in sehr kurzer Zeit) z. B. bei einer Li-Ionen-Batteriekapazität von 35 KWh, sind Notabschaltung-Funktionen in einem solchen extremen Fall nur bedingt wirksam.

4.2.3 Das thermo-chemische, thermo-dynamische und elektrische Explosionspotenzial

Das thermische, chemische, elektrische und thermo-dynamische Brand- und Explosionspotenzial zeigt sich z. B. im Brandfall nach der Beschädigung eines Hochleistungs-Li-Ionen-Akkus bei einem schweren Verkehrsunfall.

Die Explosions-Leistung (Energiefreisetzung in sehr kurzer Zeit) in der Phase, in welcher noch gelöscht werden kann, ist um ein Vielfaches höher als bei einem in Brand geratenen Kraftstoff-Tank. Darüber hinaus gestaltet sich die Brandbekämpfung wegen der elektrischen Potenziale und Gasentwicklung schwierig.

5 Zusammenfassung

Die Strom-Tankstelle der Zukunft an den Hauptverkehrsstraßen mit mehr als 100 Ladeports hat einen großzügigen Service-, Einkaufs- und Erlebnis-Gastronomie-Bereich - vergleichbar mit Flughäfen.

Vorgesehen sind spezielle Bereiche für den technischen Service für eMobile, Fahrzeug-Vermietung, Akku-Tausch und Entsorgung und für den mobilen Auflade-Dienst.

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren können CO₂-neutral erzeugte Designer-Kraftstoffe tanken.

Mit Strom aus erneuerbaren Energien können E-Mobile aufgeladen werden, auch wenn keine Sonne scheint und kein Wind weht. Die Pufferung der Energie geschieht mit stationären Li-Ionen-Akkus und mit großvolumigen, thermischen Speichern.

Ein großer Teil der elektrischen Energie wird direkt von der Strombörse in Zeiten der Überversorgung zu Spot-Preisen bezogen.

Beherrschbare Technologien aus dem Dampf-Kraftwerks- und Apparatebau werden eingesetzt. Die Machbarkeit ist weit gehend sichergestellt - Realisierbarkeit innerhalb von 3 Jahren möglich.

Hohe Energie-Speicherdichte, hohe Ladespannungen und -Ströme bringen technische Risiken mit sich, welche beherrscht werden können.

Zum Brand- und Explosions-Schutz sowie zur Sicherstellung der körperlichen Unversehrtheit dürfen keine Kompromisse gemacht werden.

Die Antriebsleistung und die Abwärme wird auch für landwirtschaftliche Zwecke genutzt.

Der CO₂-Foot-Print eines so aufgebauten Ladezentrums gestaltet sich vorbildlich.

Der Nachweis zur Verwendung von erneuerbarer Energie ist zertifiziert.

Autor:

Martin Doster, Dipl.-Ing. Energie-Technik
DEKRA SE, Information Technology (IT),
Functional Head International Office

Tätigkeitsfeld: Analytik und Design von Informations-Prozessen auf
Engineering- und Business-Ebene

Kontaktdaten: Handwerkstr. 15, 70565 Stuttgart

Tel: +49.711.7861.2314

Mobil: +49.152.54638315

Mail: martin.doster@dekra.com