

### Aufgabe A1.1:

#### Auslegung von Stromspeichern bei ausschließlicher Stromerzeugung aus PV- und Windkraftanlagen

Der Stromverbrauch der Bundesrepublik Deutschland beträgt ca. 500 TWh pro Jahr. Mit dem Begriff Dunkelflaute werden Zeiten bezeichnet, bei denen es so gut wie keine Stromproduktion aus Windkraft- und PV-Anlagen gibt. Die maximale Dauer einer Dunkelflaute wird üblicherweise mit 21 Tagen angegeben.

Nehmen Sie an, dass die tägliche Erzeugungsleistung auch während einer Dunkelflaute 10 GW beträgt (Wasserkraft, Kraft-Wärmekopplungsanlagen, die wegen Wärmebedarfs betrieben werden müssen, Sondermüllverbrennungsanlagen u.ä.).

- Welche Energiemengen müssen in Stromspeichern vorgehalten werden?
- Können Sie davon ausgehen, dass die Stromspeicher zu Beginn der Dunkelflaute vollgeladen sind? Welche Energiemengen sollten am Ende der Dunkelflaute noch in den Stromspeichern vorhanden sein, damit bei einer unmittelbar folgenden Unterdeckung des Strombedarfs durch die Erzeugungseinheiten die Versorgung gesichert bleibt?
- Welche Sicherheitsmargen für die Dauer der Dunkelflaute nehmen Sie an (maximal zu erwartende Dauer in den kommenden Jahrzehnten)? Welcher Prozentsatz der installierten Stromspeicher wird über den betrachteten Zeitraum gar nicht oder nur einmal benutzt?
- Welche Industrien oder Haushaltsgruppen werden als erste abgeschaltet, wenn die Speicher nicht ausreichend groß ausgelegt wurden?

### Lösung

Für die folgenden Überlegungen werden Werte häufig auf- oder abgerundet, damit die Überlegungen unmittelbar nachvollzogen werden können, Die generelle Aussage verändert sich dadurch nicht.

- Auslegung der Speichergröße  
Bei einem jährlichen Strombedarf von 500 TWh beträgt der Strombedarf pro Stunde 57 GWh, entsprechend einer durchschnittlichen Erzeugungsleistung von 57 GW. Da Dunkelflauten im Winter und nicht im Sommer zu erwarten sind, wird im Folgenden von einem Stromverbrauch von 60 GWh pro Stunde ausgegangen. Abzüglich der angenommenen Stromproduktion von 10 GW durch Wasserkraftanlagen, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen<sup>1</sup> etc. müssen also 50 GWh pro Stunde, entsprechend 1,2 TWh pro Tag und 25,2 TWh über die Dauer der Dunkelflaute vorgehalten werden.
- Sicherheitsmargen  
Es ist nicht vorhersehbar, wann eine derartig lange Dunkelflaute auftreten

<sup>1</sup> Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Sondermüllverbrennungsanlagen und einige weitere Kraftwerkstypen werden manchmal als „Must-Run“-Kraftwerke bezeichnet, weil sie unabhängig vom Strombedarf betrieben werden müssen, auch wenn z.B. durch Nutzung von erneuerbaren Energiequellen genügend Strom im Netz vorhanden ist. Eine andere Verwendung des Worts „Must-Run“-Kraftwerk ist die Bezeichnung von Kraftwerken, die zur Sicherstellung der Netzstabilität ständig betrieben werden müssen, wobei sich die Frage stellt, ob langfristig die Stabilität des Stromversorgungssystems auf die Energie, die in den rotierenden Massen von Turbinen und Generatoren thermischer Kraftwerke gespeichert ist, angewiesen bleiben wird.

wird. Es ist deshalb zu erwarten, dass die Stromspeicher durch mehr oder weniger lange Phasen der Unterdeckung im Herbst und Winter nicht vollständig geladen sind. Ferner darf nicht angenommen werden, dass nach Ende der Dunkelflaute nicht einige Tage später erneut Strom aus den Speichern entnommen werden muss.

Es ist denkbar, dass mit meteorologischen Daten Erwartungswerte und Wahrscheinlichkeitswerte für den Füllgrad der Speicher am Anfang und den notwendigen Füllgrad am Ende berechnet werden können. Als grober Schätzwert scheint uns ein Füllgrad von 75% am Anfang und ein notwendiger Füllgrad von 10% am Ende eine realistische Vermutung.

Das Speichervolumen muss deshalb statt auf 25,2 TWh auf 34 TWh (135%) ausgelegt werden, allerdings ohne irgendwelche Sicherheitsmargen, die beim Auftreten unwahrscheinlicher Situationen vorhanden sein sollten.

- Batteriespeicher werden üblicherweise zur Berücksichtigung von alterungsbedingter Abnahme der Kapazität mit einer, um 20% höheren Kapazität gebaut.

- Die Auslegung muss berücksichtigen, dass sich die maximal zu erwartende Dauer einer Dunkelflaute durch den Klimawandel um einige Tage verlängern könnte.

- Durch einen Vulkanausbruch 1812 gab es in Europa ein „Jahr ohne Sommer“. Welche Sicherheiten gegen derartige Vorkommnisse eingebaut werden sollten, ist eine Frage der gesellschaftlichen Risikoabschätzung. Eine Verdoppelung des eigentlichen erforderlichen Energieinhalts auf 50 TWh erscheint somit eher ein unterer Auslegungswert.

- Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10 Jahren für einen Batteriespeicher und der Tatsache, dass eine sehr lange Dunkelflaute ein sehr seltenes, vielleicht nur alle 20 oder 50 Jahre auftretendes Ereignis ist, wird es somit einen erheblichen Anteil an Stromspeichern geben, deren Energieinhalt nie genutzt werden müssen bzw. können.
- Aus den obigen Überlegungen wird klar, dass der Gehalt der Stromspeicher von sehr vielen Annahmen abhängt, die zwar durch genaue Analysen beziffert werden können, nicht aber als absolute Sicherheit betrachtet werden können. Die Diskussion, wer als erster vom Netz genommen wird, ist somit keine dringende Debatte. Aber sind wir sicher, dass wir sie nicht irgendwann führen müssen, wenn wir ausschließlich auf Stromspeicher für die Überbrückung einer Dunkelflaute setzen?  
Im Vergleich, die bestehende Speicherkapazität für Erdgas in Deutschland beträgt 23 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas entsprechend ca. 230 TWh bei einem angenommenen Durchschnittswert von 10 kWh pro m<sup>3</sup>.

## Aufgabe A1.2:

Systemvergleich von Antriebssträngen

Der Antriebsstrang eines elektrisch betriebenen Fahrzeugs besteht aus einer Fahrzeugbatterie inkl. aller erforderlichen Komponenten wie Batteriemanagementsystem (BMS), Sicherungen etc., einem Elektromotor, ggf. mit einfachem 2-stufigem Getriebe und Differential, Kabel und Umrichter. Der Antriebsstrang eines verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugs besteht aus einem Tank, Treibstoffleitungen und Förderpumpe, Anlasser, Lichtmaschine, Verbrennungsmotor, Kühler mit Gebläse und Wasserpumpe, mehrstufigem Getriebe, Kupplung, Differential, Abgassystem mit Abgasreinigung.

- a) Schätzen Sie für vergleichbare Fahrzeuge (z.B. Tesla Model S und BMW 5er-Reihe) für die gleiche Reichweite und Motorleistung das Gesamtgewicht der beiden Antriebsstränge ab. Verwenden Sie dafür 75% der angegebenen Reichweite des angegebenen Fahrzeugs von Tesla und Gewichtsangaben aus dem Internet.
- b) Ist dieser Vergleich zulässig? Bzw.: welche Schlüsse können daraus gezogen werden und welche nicht?

Lösung:

Die im folgenden verwendeten Daten sind teilweise Schätzungen, weil der Aufwand zur genauen Feststellung der Gewichte aus öffentlich zugänglichen Quellen teilweise sehr hoch ist und es manchmal unmöglich erscheint, die Daten zu bekommen.

## Vergleich der Fahrzeuge

Die Daten eines Elektrofahrzeuges und eines verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugs sind sehr unterschiedlich. Beim Vergleich der hier relevanten Daten Reichweite und Fahrleistung ist ein E-Fahrzeug bzgl. Fahrleistung immer überlegen, bei Vergleich der Reichweite immer unterlegen. Der ausgewählte BMW ist das Modell 540i xDrive mit 6 Zylindern und 3l Hubraum (Limousine), was bzgl. Fahrleistung einem Tesla am nächsten kommt.

## Gewicht des Antriebsstrangs

Die Reichweite eines Tesla S wird nach Herstellerangaben auf 637 km geschätzt. Wie hoch die Reichweite unter Verwendung von standardisierten Fahrzyklen ist, wird von Tesla nicht angegeben. Bekannt ist, dass die Verwendung von Zusatzverbrauchern (Licht, Heizung, etc.) und der Fahrstil die Reichweite verkürzen, so dass die tatsächliche Reichweite, auch weil das „Leerfahren“ des Tanks viel größere Schwierigkeiten als bei einem Verbrennungsmotor mit sich bringt, auf 75%, also 480 km, geschätzt wird. Der Treibstoffverbrauch eines Benzin betriebenen BMW wird dagegen vom Hersteller angegeben und beträgt für einen BMW 540i xDrive für einen kombinierten Stadt/Land-Betrieb mit 6,9 l/100 km. Das äquivalente Gewicht der Tankfüllung beträgt somit (0,75 kg/l) bei 50 km Restreichweite ca. 27,4 kg. Der Vergleich mit dem Batteriegewicht des Tesla, ca. 400 kg ist zwar möglich, aber aus unserer Sicht völlig irreführend.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Komponenten und Gewichte, sowie sich daraus ergebende Kennzahlen, die für einen Vergleich geeignet sein

könnten. Interessant ist, dass der Tesla trotz seiner schweren Batterie ein geringeres Leergewicht als der BMW hat. Die spezifische Energie des Systems Fahrzeug bzw. des Antriebstrangs, kWh/kg, ist beim Tesla deutlich geringer. Berechnet man aber den Energieverbrauch pro km, so verringert sich der Abstand zwischen dem BMW und dem Tesla. Daraus wird offensichtlich, dass sich eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen (reine kWh-Betrachtung) nur dann ergeben, wenn für den Tesla Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird. Lediglich moderne Gas bzw. GuD-Kraftwerke haben einen so hohen Wirkungsgrad, dass durch den Einsatz von Erdgas ausreichend viel Strom erzeugt werden kann. Bei Strom aus konventionellen Kohlekraftwerken erscheint es somit ökologisch sinnvoller, ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zu fahren. Für kleinere Elektrofahrzeuge mit deutlich geringerem Energieverbrauch pro Kilometer gilt diese Beschränkung aber nicht.

Komponente	Tesla S	BMW 540i xDrive, 3,0 6Zylinder	
			l/100 km
Batterie für 637 km Reichweite (84,8 kWh)	400	6,9	kg
Bordnetzbatterie		20	kg
Treibstofftank mit Stutzen inkl. Pumpe		15	kg
Tankfüllung für 480 km (0,75kg pro l)		27,4	kg
Kabel zum Umrichter und Motor		Keine Schätzung	
Benzinleitung, Benzinpumpe, Einspritzsystemn,Zündkerzen		1	kg
Umrichter, Motorelektronik	150	1	kg
Anlasser		10	kg
Motor inkl. Nebenaggregate	200	350	kg
Automatikgetriebe	50	80	kg
Lichtmaschine		5	kg
Kühlsystem, inkl. Kühlflüssigkeit	20	30	kg
Abgassystem mit Katalysator		45	kg
Gewicht des Antriebsstrangs	820	584	kg
Gesamtgewicht des Fahrzeugs (Leergewicht)	2184	2340	kg
Energieinhalt von Benzin		8,5	kWh/l
Energieinhalt von Tank bzw. Batterie für 100 km	84,8	233,1	kWh
Spezifische Energie (Antriebsstrang)	0,103	0,399	kWh/kg
Spezifische Energie (Gesamtfahrzeug)	0,039	0,100	kWh/kg
Energieverbrauch (Ladung bzw. Tankfüllung) pro 100 000 km			
Energieverbrauch pro 480 km	84,8	281,5	
Energieverbrauch pro 100 km	17,667	58,65	
Antriebsenergie für 1	17667	58650	kWh
Bei Ladewirkungsgrad von 85%	20784		kWh
Stillstandsverluste (6 Jahre)	4000		kWh
Summe	24784	58650	kWh
Energieverbrauch pro km	0,25	0,59	kWh/km

Ziel dieser Überlegungen ist nicht, eine genaue Ökobilanz der beiden Antriebsstränge bzw. der Fahrzeuge aufzustellen, sondern die Frage zu diskutieren, was eigentlich sinnvoll verglichen werden soll. Ob die spezifische Energie des Antriebsstrangs oder des Fahrzeugs bzw. der Energieverbrauch pro Kilometer sinnvolle Kennzahlen sind, sei dahin gestellt. Der Vergleich der spezifischen Energie von Benzin mit dem einer Batterie ist aber ganz bestimmt nicht sinnvoll.