

Saisonale Energiespeicherung im Überblick

Zusammenhänge, Bedeutung und Perspektiven
im Schweizer Kontext

Kurzfassung



IMPRESSUM

HERAUSGEBERIN UND KONTAKT

Akademien der Wissenschaften Schweiz (a+)
Erweiterte Energiekommission der Akademien der Wissenschaften Schweiz
Haus der Akademien • Laupenstrasse 7 • Postfach • 3001 Bern • Schweiz
+41 31 306 93 59 • johan.noethiger@scnat.ch • energie.akademien-schweiz.ch •  Akademien Schweiz

ZITIERVORSCHLAG

Nöthiger J, Neu U (2025) Saisonale Energiespeicherung im Überblick.
Zusammenhänge, Bedeutung und Perspektiven im Schweizer Kontext. Kurzfassung.
Swiss Academies Reports 20 (9)

AUTOREN

Johan Nöthiger (a+/SCNAT), Urs Neu (a+/SCNAT)

PROJEKTLEITUNG

Johan Nöthiger (a+/SCNAT)

WISSENSCHFTLICHER BEIRAT

Energiekommission der Akademien der Wissenschaften Schweiz

REDAKTION

Johan Nöthiger (a+/SCNAT)

TITELBILD UND GRAFIK

Sandra Schwab

LAYOUT

Olivia Zwyygart

1. Auflage, 2025

Dieser Bericht basiert auf einem ausführlicheren Grundlagenbericht, der im Austausch mit weiteren Forschenden und im Thema tätigen Organisationen und Fachpersonen entstanden ist und auch ausführliche Quellenangaben enthält.

Hinweis: Die Erarbeitung der Berichte wurde durch das Bundesamt für Energie (BFE) finanziell unterstützt. Für den Inhalt sind allein die Akademien der Wissenschaften Schweiz verantwortlich.

Der Grundlagenbericht und die Kurzfassung sind in elektronischer Form verfügbar unter go.akademien-schweiz.ch/energiekommission

ISSN (print) 2297-1564
ISSN (online) 2297-1572

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.17301053



Mit dieser Publikation leisten die Akademien der Wissenschaften einen Beitrag zum SDG 7.

> sdgs.un.org

> agenda-2030.eda.admin.ch/de

Saisonale Energiespeicherung im Überblick

Zusammenhänge, Bedeutung und Perspektiven
im Schweizer Kontext

Kurzfassung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Die Kernbotschaften	3
3	Grundlagen	4
3.1	Energie im saisonalen Zyklus	4
4	Speicherung von Energie über längere Zeiträume	5
4.1	Eigenschaften saisonaler Energiespeicher	5
4.2	Verfügbare Technologien für die Schweiz	5
4.3	Die Krux mit dem Speicherbedarf	7
5	Einbettung saisonaler Speicher in das Energiesystem	9
5.1	Wechselwirkungen saisonaler Speicher mit der Energieinfrastruktur	9
5.2	Mögliche Verwendungen des Sommerstroms	10
5.3	Die Rolle der Biomasse	11
5.4	Aspekte einer inländischen Produktion chemischer Energieträger	12
6	Energieimporte	13
6.1	Zukünftiger Energieimportbedarf	13
6.2	Der Einfluss saisonaler Speicherung auf die Resilienz und Auslandabhängigkeit	13
7	Wirtschaftliche, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte	14
7.1	Wirtschaftliche Aspekte und Unsicherheiten	14
7.2	Regulatorische Rahmenbedingungen	14
7.3	Soziale Akzeptanz von saisonaler Energiespeicherung	15
8	Optionen für die Förderung saisonaler Energiespeicherung	16

1 Einleitung

Was ist eigentlich saisonale Energiespeicherung? Wie funktioniert sie – und braucht es sie überhaupt in der Schweiz?

Diese Fragen rücken zunehmend in den Fokus, je weiter die Transformation des Schweizer Energiesystems hin zu einer CO₂-neutralen und nachhaltigen Zukunft voranschreitet. Besonders relevant werden sie, weil fossile Energieträger durch erneuerbare Quellen ersetzt werden sollen, deren Verfügbarkeit stark mit den Jahreszeiten schwankt – etwa die Photovoltaik. Gleichzeitig führt die zunehmende Elektrifizierung von Mobilität und Wärmeerzeugung zu neuen Herausforderungen, aber auch zu neuen Chancen, mit Auswirkungen auf den saisonalen Energiebedarf. Vor diesem Hintergrund erscheint die saisonale Energiespeicherung als vielversprechende Möglichkeit, zentrale Herausforderungen abzufedern oder sogar zu lösen. Doch wie realistisch ist das? Und welche konkreten Optionen stehen uns zur Verfügung?

Diese Kurzfassung beleuchtet das Thema aus verschiedenen Blickwinkeln. Sie bietet Entscheidungsträger:innen in Politik, Wirtschaft und Verwaltung sowie einer interessierten Öffentlichkeit eine klare und kompakte Übersicht. Ziel ist es, die technologischen und institutionellen Zusammenhänge verständlich darzustellen, die Rolle saisonaler Speicher im Schweizer Energiesystem einzuordnen und die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Speicherbedarf aufzuzeigen. Darüber hinaus werden Handlungsoptionen und strategische Stossrichtungen skizziert, die den Weg zu einem langfristig resilienten und saisonal ausgewogenen Energiesystem weisen.

Quellenangaben zu den Aussagen in dieser Kurzfassung sind im dazugehörigen Grundlagenbericht zu finden. Dieser diskutiert die in dieser Kurzfassung angeschnittenen Themen mit einem höheren Detaillierungsgrad. Am Ende der Kapitel wird jeweils in eckigen Klammern auf die entsprechenden Kapitel im Grundlagenbericht (GB) hingewiesen (z. B. [GB 4.2]), wo detailliertere Informationen zu finden sind.

2 Die Kernbotschaften

Es geht nicht nur um Strom – alle Energieformen müssen berücksichtigt werden

Trotz der Elektrifizierung des Energiesystems besteht der Endenergiebedarf häufig nicht aus Strom, sondern beispielsweise aus Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus, die auf unterschiedliche Weise erzeugt werden kann. Eine Betrachtung der saisonalen Speicherung sollte daher alle Energieformen gleichberechtigt berücksichtigen, um die effizientesten Angebot-Nachfrage-Pfade mit Speicherintegration zu ermitteln (Kap. 5.1).

Saisonale Speicher müssen mit dem Energiesystem zusammengedacht werden

Saisonale Speicher sind eng verbunden mit anderen Elementen des Energiesystems. Sie können die kurze und langfristige Flexibilität erhöhen und so Energienetze entlasten, die Integration von erneuerbaren Energien erhöhen und eine höhere Systemeffizienz ermöglichen (Kap. 5.1).

Saisonale Speicher sind technisch weit fortgeschritten, aber in der Schweiz bis jetzt nur begrenzt verfügbar

Es gibt verschiedene technisch ausgereifte Technologien für die saisonale Speicherung. Grosse Speicherseen und Brennstofftanks sind bereits im Einsatz. Saisonale Wärmespeicher und grosse Gasspeicher sind technisch weitgehend ausgereift, werden in der Schweiz jedoch noch nicht grossflächig eingesetzt. Strom kann nicht direkt über Monate hinweg wirtschaftlich gespeichert werden, sondern muss für eine Speicherung umgewandelt werden (Kap. 4.2).

Optimierung der Energieerzeugung reduziert Speicherbedarf

Ein gezielter Ausbau der Energieerzeugung kann den Bedarf an saisonalen Speichern verringern. Dazu zählen insbesondere Windkraftanlagen, alpine Solaranlagen aber auch ein starker Ausbau der Photovoltaik auf Dächern – kombiniert mit verstärkter Abregelung von Überschüssen im Sommer (Kap. 4.3).

Saisonale Wärmespeicher haben ein grosses Potenzial und viele Zusatznutzen

Die Speicherung von Wärme ist mit einer Vielzahl von Speichertechnologien möglich, welche oft vergleichsweise kostengünstig und effizient sind. Sie bringen Zusatznutzen: Die Flexibilität im Stromnetz kann erhöht werden, im Sommer kann besser gekühlt werden, es braucht weniger wertvolle chemische Energieträger um Wärmenetze zu stabilisieren und der Strombedarf kann im Winter signifikant gesenkt werden (Kap. 5).

Saisonale Speicher stärken Resilienz und Unabhängigkeit

Saisonale Speicher erhöhen die Resilienz des Energiesystems – auch durch die Zwischenspeicherung importierter Energieträger. Gleichzeitig ermöglichen sie eine bessere Nutzung inländisch erzeugter Energie und fördern so die Energieunabhängigkeit (Kap. 6.2).

Begrenzte Rolle von Biomasse für saisonale Speicherung

Biomasse lässt sich entweder direkt speichern – etwa in Form von Holz – oder zu speicherbaren Energieträgern wie Biomethan umwandeln. Die verfügbaren Mengen sind jedoch deutlich zu gering, um die saisonalen Unterschiede zwischen Energiebedarf und -erzeugung massgeblich auszugleichen (Kap. 5.3).

Begrenzte Wirtschaftlichkeit speicherbarer, chemischer Energieträger aus inländischer Produktion

Die Herstellung speicherbarer chemischer Energieträger wie Wasserstoff, Biomethan oder E-Fuels ist in der Schweiz technisch möglich, jedoch für grosse Mengen gegenüber Importen wirtschaftlich kaum konkurrenzfähig. Wichtige Gründe dafür sind das begrenzte Biomassepotenzial und das saisonal stark schwankende Stromangebot (Kap. 5.4).

Wirtschaftliche Unsicherheiten bei saisonalen Speichern

Saisonale Speicher profitieren von starken saisonalen Preisunterschieden. Da die künftige Preisentwicklung jedoch ungewiss ist, bestehen Investitionsrisiken. Um die Wettbewerbsfähigkeit alternativer Speicherlösungen zu stärken, müssen fossile, leicht speicherbare Energieträger angemessen bepreist werden (z.B. CO₂-Preis) (Kap. 7.2).

Regulatorische Hürden bei Wärmespeichern und Wasserstoff

Offene Fragen bezüglich Raumplanung erschweren derzeit den Ausbau von Wärmespeichern. Auch beim Einsatz von Wasserstoff müssen regulatorische Unsicherheiten geklärt werden, um Investitionen zu fördern und die Planungssicherheit zu erhöhen (Kap. 7.2).

Soziale Akzeptanz von Speichern unterschiedlich ausgeprägt

Bestehende Speicherseen geniessen eine hohe soziale Akzeptanz, während neue Bauprojekte teils auf Widerstand stossen. Zur sozialen Akzeptanz von Wärme- und Gasspeichern liegen bisher kaum belastbare Daten vor (Kap. 7.3).

3 Grundlagen

3.1 Energie im saisonalen Zyklus

Der Energiebedarf folgt wiederkehrenden Mustern: einem Tages-, Wochen- und Jahreszyklus. Besonders der Jahresverlauf wird stark durch die Umgebungstemperatur beeinflusst – mit höherem Wärmebedarf im Winter und zunehmendem Kühlbedarf im Sommer. Auch die Produktion erneuerbarer Energien zeigt Regelmässigkeiten: Photovoltaik unterliegt einem Tages- und Jahreszyklus. Wie die Wasserkraft liefert sie vor allem im Sommer Strom. Windkraft hingegen produziert mehrheitlich im Winter.

Im heutigen Energiesystem gleichen vor allem die fossilen Energieträger Erdgas und Mineralölprodukte saisonale Schwankungen im Wärme- und Mobilitätssektor aus. Im Stromsektor ist es vor allem die Speicherwasserkraft sowie in manchen Jahren Importe aus dem Ausland, die Schwankungen ausgleichen.

Durch die Elektrifizierung vieler Anwendungen werden der Wärme- und der Mobilitätssektor zunehmend mit dem Stromsektor verknüpft. Durch den Ausstieg aus der Kernenergie entfällt zudem ein wichtiger Stromlieferant im Winter. Der dadurch entstehende zusätzliche Stromerzeugungsbedarf wird voraussichtlich vor allem durch den Ausbau der Photovoltaik kompensiert.

Die daraus resultierende saisonale Diskrepanz zwischen Erzeugung und Bedarf von Energieträgern erfordert Lösungsansätze, damit die Energiewende gelingen kann. Das vorliegende Dokument betrachtet dieses Thema aus verschiedenen Blickwinkeln. Auf Kurz- und Mittelfristspeicher wird in diesem Bericht nicht näher eingegangen. [GB 2]

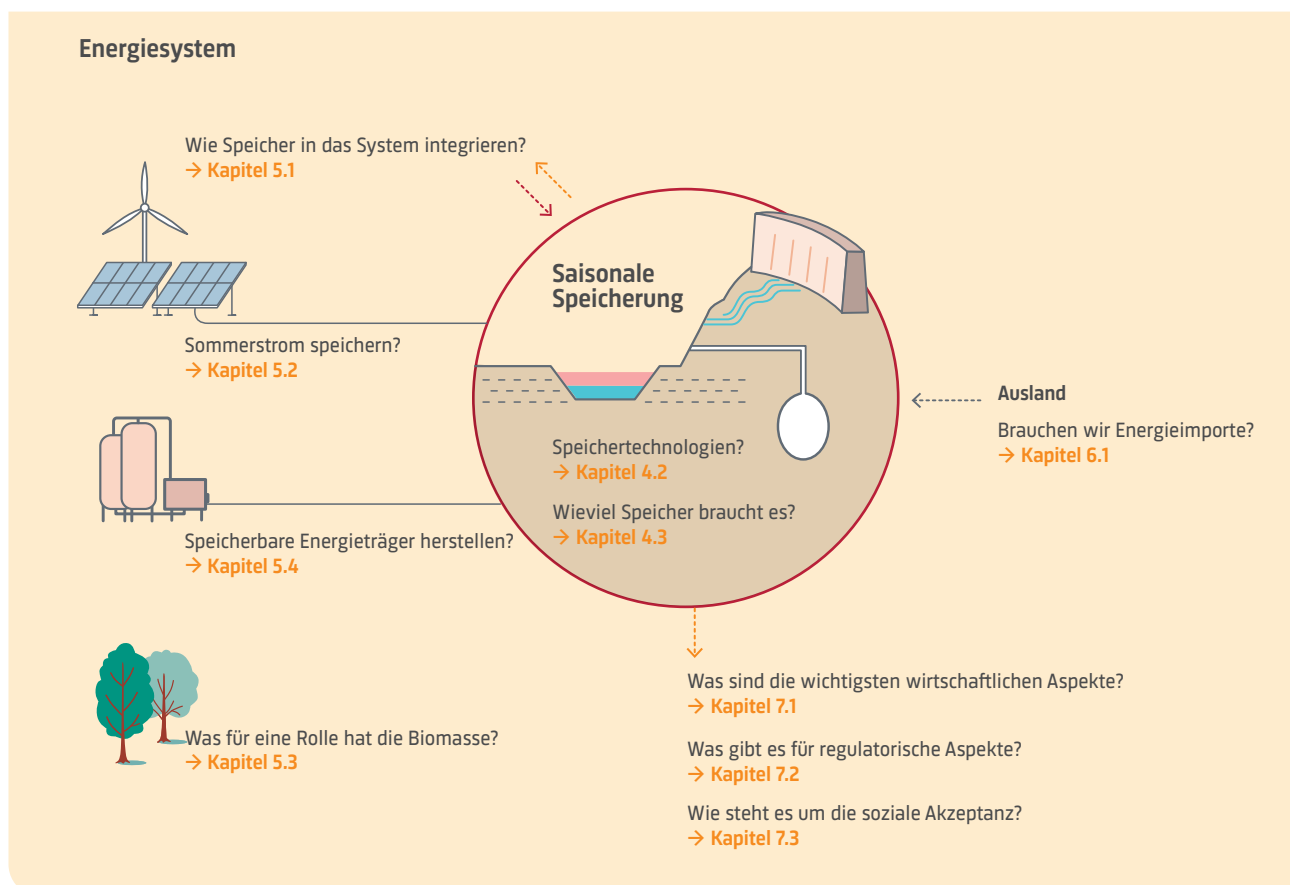


Abbildung 1: Aufbau dieses Berichts: Zuerst werden saisonale Speichertechnologien diskutiert, dann die Interaktion mit dem Energiesystem und anschliessend weitere, relevante Aspekte.

4 Speicherung von Energie über längere Zeiträume

4.1 Eigenschaften saisonaler Energiespeicher

Energiespeicher sind in der Lage, Energie aufzunehmen, über einen bestimmten Zeitraum zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben. Dabei kann unterschieden werden zwischen «aufladbaren» Speichern, die durch aktive Zufuhr von Energie aufgeladen werden, und Zuflussspeichern, die natürliche «Energieflüsse» zurückhalten. Beispielsweise werden Batterien und Wärmespeicher durch aktive Zufuhr von elektrischer bzw. thermischer Energie geladen, während ein Stausee eines Speicherkraftwerks durch Niederschläge im Einzugsgebiet gefüllt wird. Auch gelagertes Holz ist ein solcher Zuflussspeicher mit begrenztem, jährlich nachwachsendem Potenzial. Nur «aufladbare» Speicher können mit «überschüssiger» Energie geladen werden.

Betreiber von Energiespeichern erzielen ihren Gewinn in der Regel beim Entladen, also wenn sie gespeicherte Energie abgeben. Die Kosten hingegen entstehen überwiegend beim Aufladen durch den Einkauf der Energie,¹ sowie durch die anfänglichen Investitionen in die Speichertechnologie. Je häufiger ein Speicher während seiner gesamten Lebensdauer entladen wird, desto besser lassen sich die Investitionskosten auf viele Entladevorgänge verteilen. Daher wird ein Speicher besonders rentabel, wenn einerseits ein deutlicher Preisunterschied zwischen dem günstigen Aufladen und dem teureren (gewinnbringenden) Entladen besteht und andererseits viele Lade-Entlade-Zyklen erzielt werden können.

Aufgrund ihrer vergleichsweise hohen Investitionskosten pro Speicherkapazität müssen Speicher, wie beispielsweise Batterien oder Pumpspeicherkraftwerke, möglichst oft genutzt, also geladen und entladen werden, um rentabel betrieben werden zu können. Aufgrund der realistisch erzielbaren Preisunterschiede zwischen Laden und Entladen ist ein saisonaler Betrieb dieser Speicher mit etwa einem Zyklus pro Jahr nicht wirtschaftlich. Sie sind daher für die saisonale Speicherung ungeeignet, auch wenn sie technisch teilweise dazu in der Lage wären.² Sie werden als Kurz- und Mittelfristspeicher bezeichnet.³

Technologien, die sich zur saisonalen Speicherung eignen, zeichnen sich umgekehrt durch technische Eigenschaften und eine Kostenstruktur aus, die einen gewinnbringenden Betrieb mit wenigen Ladezyklen pro Jahr ermöglicht. Wichtige Gründe hierfür können niedrige Abschreibungskosten aufgrund einer langen Lebensdauer und/oder niedrige Investitionskosten sowie eine geringe Selbstentladung und ein grosser Unterschied zwischen Lade- und Entladekosten sein. [GB 3.1]

4.2 Verfügbare Technologien für die Schweiz

Die nachfolgenden Ausführungen stellen saisonale Energiespeicheroptionen vor, die im Schweizer Energiesystem eine Rolle spielen könnten. Eine Abschätzung der zukünftigen Speicherkapazität wird am Ende des Kapitels 4.3 diskutiert.

Speicherseen: Die Speicherwasserkraftwerke sind seit Jahrzehnten einer der grössten Energiespeicher der Schweiz und unverzichtbar für eine ganzjährig stabile Stromversorgung – auch in der Zukunft. Eine Steigerung der Kapazität ist in begrenztem Masse möglich, Auswirkungen des Klimawandels und des sich wandelnden Marktumfeldes stellt die Speicherwasserkraft jedoch vor Herausforderungen. Pumpspeicherkraftwerke sind aufgrund ihrer Kostenstruktur nicht für die saisonale Energiespeicherung geeignet. [GB 3.2.1]

Wärmespeicher: In diesen wird die im Sommer erzeugte Wärme gespeichert und im Winter zum Heizen genutzt. Die Wärme kann im Erdreich bei Umgebungstemperatur gespeichert und mithilfe einer Wärmepumpe wieder zurückgewonnen werden. Im Vergleich zu einer Luft-Wasser-Wärmepumpe kann ein höherer Wirkungsgrad erreicht und somit Strom im Winter eingespart werden. Da die Speichertemperatur der Umgebungstemperatur im Boden nahekommt, sind Wärmeverluste gering. Erdreichspeicher gibt es in der Schweiz bereits vereinzelt, beispielsweise an der ETH Höggerberg. Eine weitere Möglichkeit ist die Speicherung von Wärme bei Nutztemperatur, die direkt zum Heizen verwendet werden kann. Hierfür können beispielsweise sehr grosse, mit Wasser gefüllte Erdbecken, grosse isolierte Tanks (Tankspeicher) oder tiefe Aquifere im Erdreich verwendet werden. Diese Speicher können im Sommer beispielsweise durch Wärmepumpen, industrielle Abwärme oder thermische Solaranlagen aufgeladen werden und im Winter die Wärmeversorgung, insbesondere von Wärmenetzen, unterstützen oder übernehmen. Je nach Technologie und Grösse können trotz höherer Temperaturen relativ hohe Speichereffizienzen

¹ Betreiber von Zuflussspeichern wie Stauseen zahlen zwar keinen direkten Energiepreis für das Laden, es fallen jedoch meist trotzdem Kosten an, beispielsweise in Form von Wasserzinsen für die Nutzung des Wassers.

² Einige Kurzzeitspeicher wie Batterien haben ausserdem eine höhere Selbstentladung bzw. schnellere Alterung bei hohen Ladeständen, was sie zusätzlich ungeeignet für die saisonale Speicherung macht.

³ Zu Kurz- und Mittelfristspeichern gehören auch Technologien wie adiabate Druckluftspeicherung (A-CAES), Flussbatterien (Redox-Flow-Batterien), Kondensatoren, Schwungmassenspeicher, kleine Warmwassertanks, Hochtemperaturwärmespeicher etc.

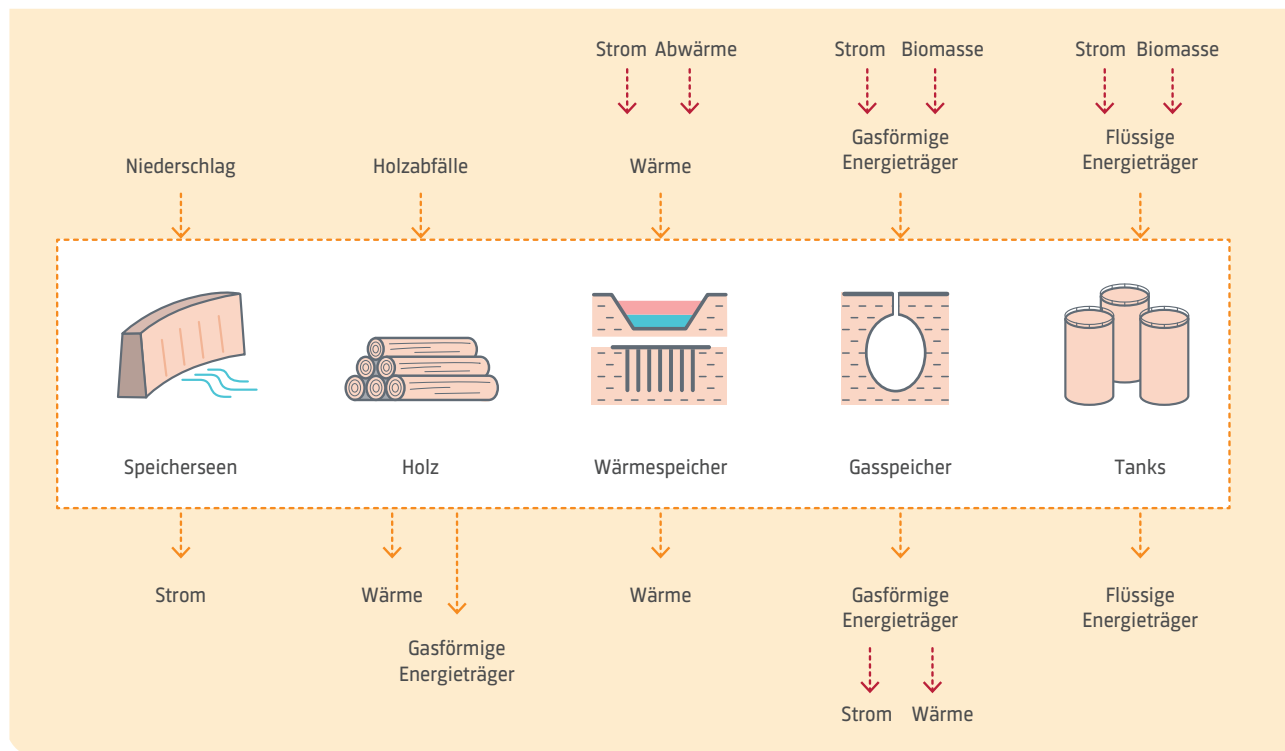


Abbildung 2: Beispiele saisonale Speichertechnologien mit entsprechenden Lade- und Entladeenergieträgern.

erreicht werden (z.B. bis 90 Prozent für grosse Erdbeckenspeicher). Erdbecken- und Aquiferspeicher sind in nördlichen Ländern wie den Niederlanden und Dänemark weit verbreitet, in der Schweiz haben sie sich noch nicht etabliert. Saisonale Tankspeicher sind hingegen bereits kommerziell verfügbar und werden eingesetzt. Neben den genannten Wärmespeichern, die sensible oder «fühlbare» Wärme⁴ speichern, gibt es auch Phasenwechselspeicher oder Sorptionsspeicher.⁵ Einige dieser Technologien haben bereits Marktreife erlangt (z.B. Eisspeicher), die meisten befinden sich jedoch noch im Forschungsstadium. [GB 3.3]

Gasspeicher: Gase wie Methan oder Wasserstoff können in künstlich geschaffenen und abgedichteten Felskavernen gespeichert werden. In der Schweiz wurden solche Kavernen noch nicht gebaut, ein entsprechendes Projekt ist jedoch in Planung. Weitere Möglichkeiten sind die Speicherung in Salzkavernen oder in porösem Gestein. Das Potenzial dieser Varianten ist in der Schweiz weitgehend unklar. Ausserdem kann Flüssiggas in isolierten Tanks oder Gas in Röhrenspeichern gespeichert werden.

⁴ Hierbei handelt es sich um Wärmeenergie, die bei einer Temperaturänderung eines Körpers aufgenommen oder abgegeben wird, ohne dass sich dessen Aggregatzustand ändert. Sie ist direkt mit einem Thermometer messbar.

⁵ Phasenwechselspeicher sind Wärmespeicher, die latente Wärme durch einen Aggregatzustandswechsel (z.B. fest ↔ flüssig) speichern oder abgeben, z.B. durch das Gefrieren und Auftauen von Wasser (Eisspeicher). Die Temperatur bleibt dabei nahezu konstant. Sorptionsspeicher sind thermochemische Wärmespeicher, die Energie durch Bindung von Wasserdampf (Sorption) speichern.

Aufgrund der hohen Kosten werden letztere voraussichtlich nicht für die Speicherung grosser Gasmengen infrage kommen. Grundsätzlich kann inländisch produziertes und importiertes sowie fossiles und erneuerbares Gas gespeichert werden. Weiterhin können wie bisher Kapazitäten in ausländischen Gasspeichern eingekauft werden. [GB 3.4]

Speicherung flüssiger Energieträger: Flüssige Energieträger können nach wie vor sehr kostengünstig in grossen Tanks gelagert werden. Treib- und Brennstofftanks (Notfallreserve, aber auch Heizöltanks) bilden heute den mit Abstand grössten saisonalen Energiespeicher der Schweiz. In Zukunft können CO₂-neutrale, flüssige Energieträger weiterhin einen wichtigen Beitrag zum saisonalen Ausgleich beitragen – ob importiert oder lokal hergestellt. [GB 3.4]

Speicherung fester Energieträger: Feste Energieträger wie Holz oder in Zukunft auch Metalle können sehr einfach und kostengünstig in Silos gelagert werden. Metalle, die als Energieträger verwendet werden, setzen bei der Entladung Wärme (und, je nach Technologie auch Wasserstoff) frei und können durch Zufuhr von Strom oder erneuerbarem Wasserstoff wieder geladen werden. Diese Technologie befindet sich noch in Entwicklung. [GB 5.3, 5.1.4]

Bei vielen saisonalen Speichertechnologien ist nicht die Speicherung an sich die grösste Herausforderung, sondern die Herstellung des Speichermediums (z.B. Wasser-

stoff, flüssige, metallische Energieträger). Daher wird im Folgenden auch auf diese Aspekte eingegangen.

Kasten 1: Muss Strom überhaupt saisonal gespeichert werden?

Strom ist der zentrale Energieträger des zukünftigen Energiesystems. In vielen Bereichen wird jedoch nicht direkt Strom, sondern etwa Wärme benötigt. Diese kann im Winter mit Wärmepumpen aus Strom erzeugt werden – derselbe Prozess ist aber auch im Sommer möglich, wobei die gewonnene Wärme für den Winter gespeichert werden kann. Für die Heizung ist es unerheblich, woher die Wärme stammt. Entscheidend ist daher nicht, Strom für den Winter zu speichern, um ihn dann nutzen zu können (z. B. für Wärmepumpen), sondern sicherzustellen, dass alle Energiebedürfnisse im Winter zuverlässig und kostengünstig gedeckt werden können (z. B. der Wärmebedarf).

Dabei sind Möglichkeiten zu bevorzugen, die gar keine saisonale Speicherung benötigen (wie Windkraft, die vor allem im Winter produziert), da eine Speicherung die Kosten erhöht und die Effizienz senkt. Es geht auch nicht darum, überschüssige Energie aus dem Sommer zwingend in den Winter zu übertragen. Solange der Bedarf im Winter gedeckt werden kann, kann überschüssige Energie im Sommer einfach abgeregelt werden.

4.3 Die Krux mit dem Speicherbedarf

Idealerweise entspricht die Stromerzeugung zu jedem Zeitpunkt dem Strombedarf. Da sich Stromerzeugung und -bedarf im modernen Energiesystem⁶ aus technischen, wirtschaftlichen oder anderen Gründen jedoch nicht oder nur eingeschränkt steuern lassen, ist die Energiespeicherung auf verschiedenen Zeitskalen notwendig. Diese ist jedoch immer mit zusätzlichen Kosten und Effizienzverlusten verbunden. Andere Energieträger haben andere Einschränkungen. Ein Beispiel ist Wärme, bei der die räumliche Diskrepanz zwischen Erzeugung und Bedarf entscheidend ist, da sie nur begrenzt transportiert werden kann. Der Speicherbedarf im Energiesystem hängt deshalb massgeblich von der zeitlichen und räumlichen Diskrepanz zwischen Erzeugung und Bedarf von Energieträgern bzw. der Verfügbarkeit von alternativen Lösungsmöglichkeiten zur Reduktion dieser Diskrepanz ab. [GB 2.3, 2.4, 9]

Im Folgenden werden wichtige Randbedingungen aufgeführt, die den Speicherbedarf entscheidend prägen.

Art der Stromerzeugung: Der Speicherbedarf wird massgeblich von der Art und Saisonalität der Stromproduktion beeinflusst. Wasserkraft und Dachphotovoltaik erzeugen den Grossteil ihres Stroms im Sommer und tragen somit zur saisonalen Diskrepanz bei. Demgegenüber kann Windenergie durch ihre höhere Winterproduktion einen Ausgleich schaffen. Ihre Entwicklung wird jedoch hauptsächlich durch mangelnde Akzeptanz begrenzt. Gleiches gilt für alpine Photovoltaik, deren Umsetzung oft an hohen Infrastrukturkosten sowie Konflikten mit Biodiversitäts- und Landschaftsschutz scheitert. Der Ausbau von Dachphotovoltaik mit verstärkter Abregelung im Sommer kann ebenfalls die Winterstromproduktion erhöhen⁷ – für die systematische Abregelung fehlen bislang jedoch sowohl Akzeptanz als auch wirtschaftliche Anreize. Grosse Gaskraftwerke bieten zwar eine flexible Erzeugung, können aber voraussichtlich nicht vollständig mit einheimischem Gas betrieben werden. Das würde eine Abhängigkeit von Importen und den Bedarf an grossen saisonalen Gasspeichern zur Sicherstellung der Resilienz und Versorgungssicherheit mit sich bringen. Neue Kernkraftwerke wären frühestens ab 2050 realisierbar und tendenziell teuer bzw. schlecht geeignet um vorübergehende Versorgungslücken im Winter zu füllen aufgrund ihres Investitions-Betriebskostenverhältnisses (siehe Kasten 4). Je besser die Hemmnisse der genannten Technologien überwunden werden, desto höher ist die Winterstromproduktion und desto geringer ist der Speicherbedarf. Aus technoökonomischer Sicht gelten eine Kombination aus Windenergie und Gaskraftwerke (als Backup oder «Lückenfüller») als besonders attraktive Optionen. [GB 2.4, 4.1]

Importe: Importe können saisonale Speicher teilweise überflüssig machen und so den Speicherbedarf verringern. Gleichzeitig erhöhen sie jedoch die Auslandsabhängigkeit und können Resilienz wie auch Versorgungssicherheit schwächen. Um Unterbrüche abzufedern, lassen sich Importe in grossen Speichern zwischenslagern, was den Bedarf an Speichern je nach angestrebtem Resilienz- und Sicherheitsniveau jedoch wieder erhöht. (siehe Kapitel 6.2). [GB 7]

Saisonale Systemeffizienz: Auch die Energieeffizienz bzw. der Energiebedarf hat Einfluss auf den Speicherbedarf: Effiziente Gebäudehüllen, Heizsysteme, Elektrofahrzeuge sowie Suffizienz können den Gesamtbedarf senken. Darüber hinaus spielt die Exergieeffizienz eine zunehmend wichtige Rolle (siehe Kasten 2). Sie beschreibt, wie sinn-

⁶ Im traditionellen Energiesystem war der Bedarf nicht kontrollierbar, die Erzeugung jedoch schon. Dadurch war eine zuverlässige Versorgung zu jeder Zeit möglich. Im zukünftigen Energiesystem ist der Bedarf teilweise kontrollierbar, die Erzeugung jedoch nicht mehr immer. Daher ist eine neue Herangehensweise erforderlich, um eine zuverlässige Versorgung zu garantieren.

⁷ Auch Dachphotovoltaikanlagen produzieren im Winter Strom, allerdings deutlich weniger als im Sommer. Bei weiter sinkenden Photovoltaik-Kosten kann es wirtschaftlich attraktiv werden, Dachphotovoltaik zur Winterstromerzeugung zu installieren, da Strom im Winter deutlich wertvoller sein wird als im Sommer trotz geringerer Winterproduktion. Im Sommer würden sie dann teilweise abgeregelt (abgestellt).

voll die enthaltene Energie eines Trägers genutzt wird. Systeme mit hoher Exergieeffizienz priorisieren und kombinieren Prozesse und Energieträger so, dass ein möglichst hoher Gesamtwirkungsgrad erreicht wird. Zusätzlich kann ein saisonal optimierter Einsatz von Energieträgern die Systemeffizienz steigern: Gut speicherbare Energieträger wie Holz oder Flüssigbrennstoffe sollten gezielt für Zeiten mit wenigen Alternativen – etwa im Winter oder bei Notfällen – vorgehalten und eingesetzt werden. Eine Optimierung der saisonalen Systemeffizienz kann also den Speicherbedarf senken, insbesondere den von teuren chemischen Energieträgern. [GB 4.3, 4.4]

Eine quantitative Abschätzung des saisonalen Speicherbedarfs ist unter den obgenannten Randbedingungen sehr schwierig und nur durch deren Vorgabe möglich (z. B. in verschiedenen «Szenarien»). Ein Blick auf Energiesystemmodelle kann gewisse Hinweise auf die Grössenordnung geben, diese ist jedoch aufgrund verschiedener Faktoren mit Vorsicht zu geniessen.⁸ Das Potenzial der Speicherseen wird in allen Modellen maximal genutzt, mit einer Speicherkapazität von ca. 10 TWh (elektrische Energie) im Jahr 2050.⁹ Saisonale Wärmespeicher werden hingegen in vielen Modellen überhaupt nicht modelliert. Wenn sie modelliert werden, ergeben sich 1,5–6 TWh thermische Speicherkapazität im Jahr 2050. Die Modellierung ist jedoch meist rudimentär und kann reale Restriktionen wie Platzbedarf, geologische Gegebenheiten etc. nicht berücksichtigen und deckt nur einen Teil der verfügbaren Speichertechnologien ab. Gasspeicher werden in den meisten Modellszenarien aus Kostengründen nicht gebaut, in einzelnen Szenarien werden jedoch unter der Annahme sehr hoher Importpreise im Jahr 2050 bis zu 2,3 TWh Methan oder Wasserstoff gespeichert. Die Menge des gespeicherten Holzes und der flüssigen Energieträger wird in der Regel nicht angegeben, da aufgrund der einfachen und kostengünstigen Speichermöglichkeiten nicht die Speicherung der limitierende Faktor ist, sondern die Verfügbarkeit beim Holz und der Herstellungspreis bei flüssigen Energieträgern. Neben der Speicherwasserkraft und der saisonalen Nutzung von Holz und flüssigen Energieträgern scheinen somit vor allem Wärmespeicher eine interessante Option zu sein und nur in gewissen Fällen auch Gasspeicher. Die Unsicherheit ist jedoch immer noch hoch und hängt stark von der Entwicklung externer Faktoren ab. [GB 3.1]

Kasten 2: Wie kann man etwas verschwenden, was nicht weniger werden kann?

«Energieverschwendung» ist ein häufig diskutiertes Thema. Energie ist jedoch eine Erhaltungsgrösse und kann im Prinzip weder erzeugt noch zerstört werden. Wie also verschwendet man etwas, was nicht weniger werden kann? Thermische Energie bzw. Wärmeenergie besteht immer aus einem Teil, der nützlich ist und mit dem Arbeit verrichtet werden kann (z. B. eine Turbine antreiben), genannt «Exergie», und einem Teil, der nicht für Arbeit genutzt werden kann, genannt «Anergie». Die Menge der Exergie in thermischer Energie hängt von der Temperaturdifferenz zur Umgebungstemperatur ab. Die thermische Energie eines Objekts mit hoher Temperatur besteht hauptsächlich aus Exergie während z. B. die in der Raumtemperatur enthaltene Energie fast nur aus Anergie besteht. Alle anderen Energieformen (chemische Energie, Strom etc.) entsprechen purer Exergie. Wird chemische Energie (z. B. Holz) direkt zum Heizen von Räumen verwendet, wird zunächst eine sehr hohe Temperatur erzeugt mit grossem Exergiegehalt, diese aber nur dazu verwendet, die Umgebungstemperatur leicht zu erhöhen. Wenn zunächst eine Turbine angetrieben würde, um Strom zu erzeugen, und die Abwärme zum Heizen genutzt würde, wäre die Energie sinnvoller eingesetzt. Sonst wird viel Arbeitspotenzial (Exergie) ungenutzt verschenkt, was einer «Verschwendung» gleichkommt und zu einer niedrigen Exergieeffizienz führt. Es wird jedoch praktisch alle im Holz enthaltene Energie in Raumwärme umgewandelt, was einer hohen Energieeffizienz entspricht. Die Menge Energie an sich spielt daher eine unwichtige Rolle, sondern die Nützlichkeit der Energie. Ein Energiesystem mit hoher Exergieeffizienz nützt das Arbeitspotenzial der Energie besser aus.

⁸ Energiesystemmodelle finden die wirtschaftlich optimale Lösung, um den Bedarf jederzeit zu decken, mit den im Modell verfügbaren Technologien unter den im Modell gesetzten Randbedingungen. Dabei werden politische-gesellschaftliche Aspekte nur als gegebene Randbedingungen einbezogen und viele saisonale Speichertechnologien wie Wärmespeicher sind oft gar nicht Teil des Modells, womit sie auch nicht Teil der Modelllösungen sind und dadurch kein «Bedarf» für diese Art der Speicherung ausgewiesen wird.

⁹ Aufgrund grösserer Sedimentmengen bei niedrigem Wasserstand, was zu einem höheren Verschleiss des Kraftwerks führt, sowie aus Reserveüberlegungen werden Speicherseen in der Regel nicht vollständig entladen. Historisch wurde die Kapazität nur zu 73 Prozent genutzt.

5 Einbettung saisonaler Speicher in das Energiesystem

5.1 Wechselwirkungen saisonaler Speicher mit der Energieinfrastruktur

Saisonale Energiespeicher sind eng mit anderen Energieinfrastrukturen verbunden, die entweder Energie transportieren, wie Strom-, Wärme- und Gasnetze, oder Energie umwandeln, wie Wärmepumpen, Gasturbinen, Elektrolyseure und anderen Sektorkopplungstechnologien. Eine Betrachtung saisonaler Energiespeicher bedingt daher auch die Betrachtung der Schnittstellen bzw. der Interaktion mit der übrigen Energieinfrastruktur, um ihre Rolle, Möglichkeiten und Einschränkungen zu verstehen.

Kasten 3 illustriert ein mögliches saisonales Zusammenspiel. [GB 4]

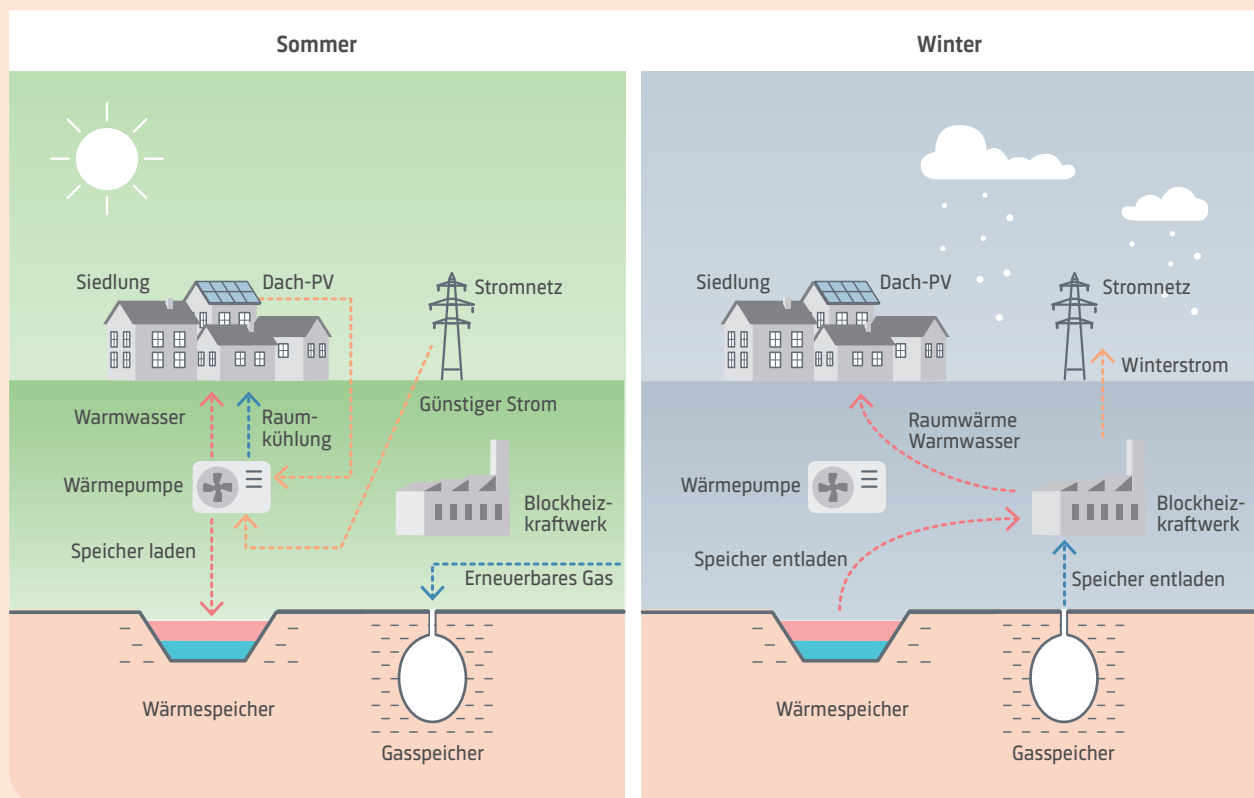
Neben der engen physischen Verzahnung von saisonalen Energiespeichern mit der Energieinfrastruktur, wie in Kasten 3 illustriert, ist auch die zeitliche, dynamische Interaktion mit dieser relevant:

- Wärmespeicher mit intelligenten Strom-zu-Wärme-Wandlern (wie Wärmepumpen) können beispielsweise Stromspitzen aufnehmen und so Netze entlasten bzw. die Abregelung von Photovoltaikanlagen reduzieren.

Kasten 3: Wärmeversorgung saisonal optimieren?

Wird beispielsweise ein gasbetriebenes Blockheizkraftwerk (BHKW, produziert Strom und Wärme), das in ein Wärmenetz einspeist, mit einem Wärmespeicher und einer Wärmepumpe kombiniert, kann es wie folgt saisonal betrieben werden: Im Sommer ist der Wärmebedarf gering und Strom gut verfügbar, die Wärmepumpe läuft, liefert die benötigte Wärme für das Netz (für Warmwasser) und lädt den Rest in einen saisonalen Wärmespeicher. Zusätzlich können Gebäude gekühlt

und die entzogene Wärme gespeichert werden. Im Winter läuft das Kraftwerk mit (gespeichertem, erneuerbarem) Gas, erzeugt Wärme (für Warmwasser und Heizung) sowie Strom und der geladene Wärmespeicher wird zur Unterstützung genutzt, um beispielsweise Wärmebedarfsspitzen zu decken. In diesem Beispiel ist das System an das Strom-, das Gas- und ein Wärmenetz angeschlossen und nutzt sowohl den Wärme- als auch den Gasspeicher zur saisonalen Optimierung des Betriebs.



- In Wärmenetzen können Wärmespeicher zur Deckung des Spitzenbedarfs beitragen, was sonst oft durch die Verbrennung von Gas oder Holz geschieht. Dadurch stehen diese wertvollen Energieträger für andere Anwendungen mit weniger Alternativen zur Verfügung, beispielsweise für die Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme.
- Grosse Gasspeicher wie Felskavernen können zur dynamischen Gasnetzstabilisierung eingesetzt werden. Insbesondere das Hochfahren grosser Verbraucher, wie Backup-Kraftwerke, sorgt für einen Druckabfall im Gasnetz in der Umgebung, der durch nahegelegene Speicher ausgeglichen werden kann.
- Die Speicherwasserkraft ist bereits heute eine der wichtigsten steuerbaren Stromquellen, die auf kurzfristige Bedarfsschwankungen reagieren kann. Das wird voraussichtlich auch zukünftig der Fall sein.
- Kurzfristige Dynamiken wie ein stark schwankendes Stromangebot mit daraus resultierenden Preisschwankungen sorgen jedoch auch für Herausforderungen. Die Produktion von strombasierten chemischen Energieträgern profitiert von einer konstanten Verfügbarkeit günstigen Stroms, da sie aufgrund der hohen Investitionskosten auf eine hohe Auslastung angewiesen ist.¹⁰

Die Optimierung der Interaktion mit der Energieinfrastruktur auf allen Zeitskalen ist entscheidend um den grösstmöglichen Mehrwert zu generieren, aber auch, um möglichen Herausforderungen zu begegnen. [GB 4]

5.2 Mögliche Verwendungen des Sommerstroms

Ein wichtiges Thema ist die saisonale Speicherung von Strom, vor allem, weil durch den hohen Anteil an Photovoltaik und Wasserkraft im Sommer ein «Stromüberschuss» zu erwarten ist. Dabei ist zu beachten, dass durch den zukünftig hohen Anteil an kurzfristiger Flexibilität im Stromnetz durch intelligente Verbraucher und Kurzzeitspeicher ein grosser Teil der täglichen und wöchentlichen Überschüsse verwendet werden kann, der Bedarf also «geglättet» wird. Darüber hinaus wird es unumgänglich sein, einen Teil der Produktion zu Spitzenzeiten abzuregeln (z.B. die Einspeisung von Photovoltaik in den Mittagsstunden abzuschalten), da sehr hohe Investitionen in die Netze notwendig wären, um jede Kilowattstun-

de Strom zu nutzen, was in keinem Verhältnis zur verlorenen Wertschöpfung der abgeworfenen Energie steht. Es kann daher irreführend wirken, von «Überschussstrom» zu sprechen, da er entweder verwendet oder abgeregelt wird.

Dennoch wird in den Sommermonaten viel Strom zu sehr günstigen, möglicherweise sogar negativen Preisen zur Verfügung stehen, der zur Entlastung der Energieversorgung im Winter genutzt werden kann. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten:

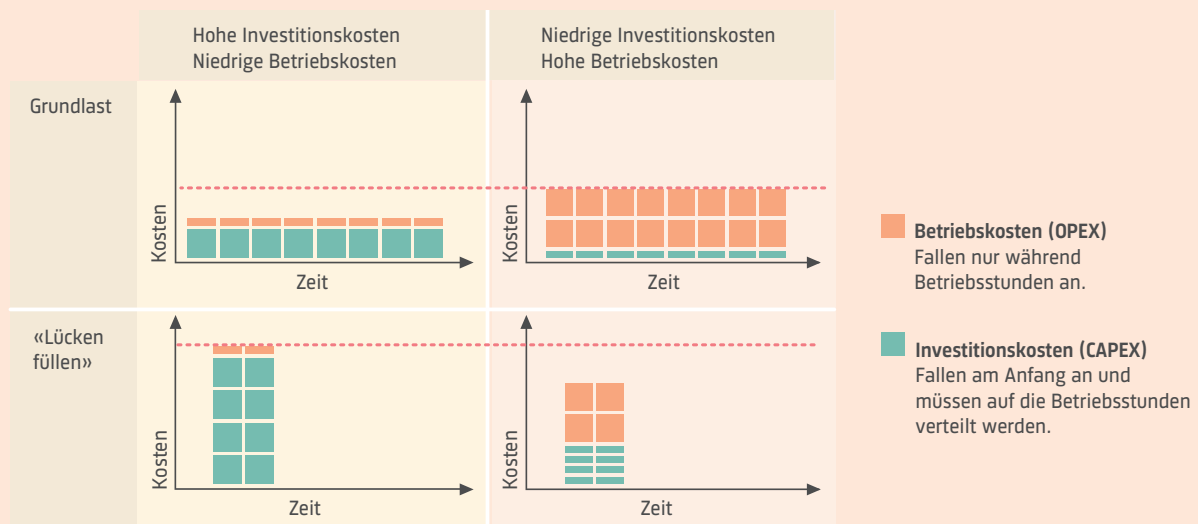
- Strom kann eingesetzt werden, um die Verwendung besser speicherbarer Energieträger im Sommer zu ersetzen, die dann im Winter vermehrt zur Verfügung stehen. Dies betrifft insbesondere Holz, aber auch Gas und flüssige Brenn- und Treibstoffe, die für Prozesse eingesetzt werden, für die es eine elektrisch betriebene Alternative gibt. Dies umfasst die Raumheizung und Warmwasserbereitung, aber auch einige industrielle Prozesse mit meist niedrigeren Temperaturen. [GB 4.3]
- Strom kann zum Aufladen von Wärmespeichern verwendet werden, die den Stromverbrauch für die Raumheizung im Winter reduzieren oder sogar eliminieren. Schliesslich wird im Winter vor allem Wärme und nicht unbedingt Strom benötigt, so dass dies eine attraktive Möglichkeit ist, Strom dann kostengünstig, sehr effizient und sinnvoll zu nutzen, wenn er zur Verfügung steht. Intelligenterweise geschieht dies gleichzeitig mit der immer relevanter werdenden Raumkühlung, so dass die dadurch anfallende Wärme durch Wärmepumpen direkt in die Wärmespeicher geleitet wird. [GB 4.2]
- Elektrizität kann genutzt werden, um die Produktion chemischer Energieträger zu ermöglichen oder zu verbessern. Die chemischen Energieträger können dann gespeichert und später z.B. zur Kraft-Wärme-Kopplung, für industrielle Prozesse oder zur Abdeckung von Winter-Spitzenlasten genutzt werden. Aufgrund der hohen Investitionskosten, der hohen Umwandlungsverluste und der Konkurrenz zu voraussichtlich günstigeren Importen sind diese Verfahren sehr kostenintensiv und werden im zukünftigen Energiesystem voraussichtlich nur in geringem Umfang zum Einsatz kommen. [GB 5.2]

¹⁰ Wenn ein Elektrolyseur nur laufen würde, wenn die Sonne scheint, könnte er nur ein Achtel der Zeit im Jahr laufen. Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist aber eine deutlich höhere Auslastung notwendig (ein Drittel bis die Hälfte der Zeit). Es müssen dafür teurere Stromquellen genutzt werden bzw. Kurzzeitspeicher, die den Prozess ebenfalls verteuern.

Kasten 4: Investitions- und Betriebskostenverhältnis und Betriebsstunden

Technologien mit hohen Investitionskosten (CAPEX) und niedrigen Betriebskosten (OPEX) profitieren von einer hohen Auslastung, da die Investitionskosten auf mehr Betriebsstunden verteilt werden können und einen geringeren Anteil am Produktpreis ausmachen. Teure Kernkraftwerke, grosse Gas-und-Dampf (GuD) Kombikraftwerke und teure Kehrlichtverbrennungsanlagen profitieren daher von einer hohen Auslastung und liefern bevorzugt Bandenergie bzw. einen konstanten Output. Umgekehrt sind Technologien mit niedrigen Investitionskosten und hohen Betriebskosten tendenziell besser für eine geringe Anzahl von Be-

triebsstunden geeignet, während denen die produzierte Energie sehr teuer verkauft werden kann. Kostengünstige Notstromaggregate, die mit flüssigen Energieträgern betrieben werden, sind trotz ihrer niedrigen Energieeffizienz und ihres teuren Brennstoffverbrauchs aufgrund der geringen Betriebshäufigkeit wirtschaftlich besser geeignet, um sporadisch «Lücken» zu füllen als die oben zuvor genannten Technologien, auch wenn diese technisch dazu auch in der Lage wären. In einem von erneuerbaren Energiequellen dominierten Energiesystem werden vor allem Lückenfüller benötigt, und nicht wie bisher teure Grundlast-Kraftwerke.



5.3 Die Rolle der Biomasse

Biomasse ist ein vielseitig einsetzbarer Rohstoff, der auch im zukünftigen Energiesystem eine wichtige Rolle spielen wird. Insbesondere Holz, aber auch Biomasseprodukte wie Biomethan können zur saisonalen Speicherung genutzt werden. Der Energiegehalt der jährlich nachhaltig nutzbaren Biomasse in der Schweiz wird 2050 auf rund 30 TWh geschätzt. Dieser Wert ist nicht gleichbedeutend mit beispielsweise 30 TWh Strom, da ein beträchtlicher Teil des Potenzials bei der Umwandlung in eine nutzbare Energieform verloren geht. Tatsächlich liessen sich nur wenige TWh Strom produzieren, wenn die Biomasse für die Stromproduktion priorisiert würde. Sie ist jedoch auch interessant für die Erzeugung von beispielsweise Hochtemperaturwärme, die oftmals nicht direkt mit Strom erzeugt werden kann, oder die Erzeugung von biobasierten chemischen Energieträgern wie Biomethan oder Biodiesel. Bereits heute wird ein erheblicher Teil des nachhaltigen Potenzials genutzt, nur bei Gülle und Waldholz gibt es noch nennenswerte ungenutzte Potenziale. Die

Herausforderung bei der Erschliessung der ungenutzten Potenziale liegt hierbei vor allem in der grossräumigen Verteilung der Biomasse und der oft schlechten Transportierbarkeit, was die Anlagengrösse limitiert und auch den Anschluss an Energienetze (z. B. das Gasnetz) erschwert. Die bereits genutzte Biomasse wird heute mehrheitlich zur Erzeugung von Raumwärme verwendet. Aufgrund der in Kasten 2 angesprochenen Exergieeffizienz ist dies jedoch nicht optimal. Eine optimierte Biomassenutzung erfordert somit auch eine Änderung der Nutzung bereits erschlossener Biomasse. Da es neben der energetischen Nutzung noch andere Nachfragebereiche, beispielsweise für Holz als Baumaterial, gibt, sollte eine Kaskadennutzung angestrebt werden. Dabei wird beispielsweise zunächst Bauholz verwendet und anschliessend erfolgt die energetische Verwertung. So kann der grösstmögliche Nutzen aus der limitierten Ressource erzielt werden. Dies wird jedoch noch unzureichend praktiziert.

Zusätzlich wird Biomasse auch ein wichtiger Faktor bei der Erzeugung negativer CO₂-Emissionen sein. Es ist noch

nicht klar, wie die energetische Nutzung von Biomasse sinnvoll mit negativen CO₂-Emissionen kombiniert werden kann und welche Anwendung Vorrang haben soll.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Biomasse vielfältig einsetzbar ist, jedoch nicht alleine ausreicht, um die saisonale Diskrepanz auszugleichen. [GB 5.3]

5.4 Aspekte einer inländischen Produktion chemischer Energieträger

Trotz der Elektrifizierung des Energiesystems spielen chemische Energieträger weiterhin eine wichtige Rolle. Aufgrund ihrer Speicherfähigkeit sind sie insbesondere für die saisonale Energiespeicherung von Bedeutung. Die Speicherung ist besonders bei flüssigen und festen chemischen Energieträgern sehr einfach und günstig, aber auch bei gasförmigen Energieträgern möglich. Limitierend ist jedoch vor allem die CO₂-neutrale Herstellung dieser speicherbaren Energieträger. Zwar gibt es zahlreiche technisch ausgereifte und viele sich in der Entwicklung befindliche Produktionsmöglichkeiten, diese weisen jedoch einige grundlegende Herausforderungen auf, welche die potenzielle Nutzung und somit die Speicherung in der Schweiz massgeblich beeinflussen können. [GB 5.1]

- Alle strombasierten chemischen Energieträger (z.B. Wasserstoff, E-Methan, E-Fuels, Metalle) benötigen einerseits teure Anlagen mit idealerweise hoher Auslastung und andererseits sehr günstigen Strom, der nur zu wenigen Zeiten zur Verfügung steht, um wirtschaftlich attraktiv zu sein. Beides ist in der Schweiz nicht gleichzeitig möglich, so dass ein Trade-off besteht, der zu einer schwierigen Wirtschaftlichkeit führt, insbesondere im Vergleich zu Importen aus Regionen mit besseren Voraussetzungen.¹¹ Kleine Mengen Wasserstoff können in der Schweiz hauptsächlich mit sehr günstigem «Überschussstrom» hergestellt werden, während grössere Mengen den Bau zusätzlicher Stromerzeuger (z.B. PV-Anlagen) erfordern, so dass eine grössere Produktion zu höheren Kosten pro Kilo Wasserstoff führt (umgekehrter Skaleneffekt). [GB 5.2]
- Chemische Energieträger aus Biomasse (z.B. Biometan, Biodiesel) sind tendenziell günstiger als strombasierte Energieträger, da die Biomasse bereits nutzbare Energie enthält. Aufgrund des sehr begrenzten Potenzials in der Schweiz ist natürlich auch das Produktionspotenzial von Energieträgern aus Biomasse begrenzt

und reicht bei weitem nicht aus, um den zukünftigen Bedarf an gasförmigen und flüssigen Energieträgern in der Schweiz zu decken. [GB 5.1]

- Insbesondere flüssige Energieträger (z.B. Biodiesel) erfordern in der Regel deutlich komplexere und teurere Produktionsanlagen als gasförmige Energieträger, was besondere Herausforderungen mit sich bringt. Bei der strombasierten Herstellung verschärft sich der Trade-off zwischen Auslastung und Verfügbarkeit von günstigem Strom. Bei der Nutzung von Biomasse sind aufgrund von Skaleneffekten besonders grosse Anlagen mit hohem Biomassedurchsatz attraktiv, die jedoch aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von gut transportierbarer Biomasse schwierig zu realisieren sind. [GB 5.1.3, 5.1.4]

Obwohl es technisch viele Möglichkeiten gibt, chemische Energieträger CO₂-neutral in der Schweiz zu produzieren, ist die Produktion grosser Mengen aufgrund lokaler Gegebenheiten sehr teuer und voraussichtlich nicht rentabel im Vergleich zu importierten CO₂-neutralen Energieträgern. Unter speziellen lokalen Gegebenheiten, wie einer guten Verfügbarkeit von Rohstoffen oder der Nichtvorhandensein anderer Verwendungsmöglichkeiten, könnten sich jedoch kleine Produktionsstätten rentieren, welche kleine, einfache Moleküle wie Wasserstoff, Methan oder Methanol produzieren. [GB 5.1.3]

¹¹ Die Transportkosten spielen insb. bei Wasserstoff eine gewisse Rolle, die aber aufgrund deutlich besser Produktionsvoraussetzungen und Skaleneffekten wahrscheinlich nicht entscheidend sind.

6 Energieimporte

6.1 Zukünftiger Energieimportbedarf

Heute importiert die Schweiz einen grossen Teil der benötigten Energie, vor allem in Form von flüssigen und gasförmigen fossilen Energieträgern sowie Uran, die zusammen einer Energiemenge von rund 210 TWh pro Jahr ausmachen. Durch die Elektrifizierung und die damit verbundenen Effizienzsteigerungen wird der Gesamtenergiebedarf in Zukunft stark sinken und damit verringern sich auch die Importe. Gemessen am Energiegehalt wird einer der grössten Energieimportbedarfe im Jahr 2050 bei Flugtreibstoffen bestehen, da diese in der Schweiz nicht in der benötigten Menge wirtschaftlich produziert werden können (Grössenordnung 20 TWh). Zudem werden gemäss Prognosen grössere Mengen an gasförmigen Energieträgern (Wasserstoff oder Biomethan) vor allem für industrielle Prozesse und die Stromerzeugung importiert, da die inländische Produktion dafür voraussichtlich ebenfalls nicht ausreichen wird (Grössenordnung 15–30 TWh). Auch werden Stromimporte im Winter in der Grössenordnung von mehreren TWh anfallen in 2050. [GB 7.2]

Die zukünftige Importmenge erneuerbarer, gasförmiger Energieträger hängt stark vom – derzeit noch unsicheren – Preisniveau ab. Grössere Mengen dürften tendenziell günstiger sein als inländisch erzeugte chemische Energieträger. Auch Stromimporte werden voraussichtlich preislich attraktiv bleiben, da sie vor allem im Winter bei hoher Verfügbarkeit erfolgen. Die umfangreichen Windkapazitäten in Europas Küstenregionen begünstigen dies, da dort im Winter besonders viel Windstrom anfällt. Bei Stromknappheit in Europa (z. B. Dunkelflaute) und entsprechend hohen Preisen kann die Schweiz dank ihrer Wasserkraftkapazitäten auch als Stromexporteurin auftreten. Ergänzend werden Reservekraftwerke zur Überbrückung möglicher Engpässe aufgebaut. Voraussetzung für einen verlässlichen Stromaustausch bleibt jedoch ein Stromabkommen mit der EU. Eine Reduktion der Stromimporte ohne gleichzeitigen starken Ausbau von vor allem Windenergie würde den Import nur auf ein anderes Medium wie Gas verschieben. [GB 7.1]

Zwar wäre es technisch möglich, die Importe aller Energieträger auf ein Minimum zu reduzieren und praktisch nur die im Inland erzeugte Energie zu nutzen, doch würde dies sehr hohe Mehrkosten¹² verursachen und vor-

aussichtlich die Versorgungssicherheit und Resilienz verringern.

6.2 Der Einfluss saisonaler Speicherung auf die Resilienz und Auslandsabhängigkeit

Ein zuverlässiges und robustes Energiesystem benötigt vor allem Versorgungssicherheit und Resilienz.¹³ Diese hängt jedoch nicht direkt mit dem Grad der Auslandsabhängigkeit zusammen. Werden Importe von chemischen Energieträgern kontinuierlich in grossen Speichern zwischengelagert, können auch längere Importunterbrechungen problemlos überbrückt werden. Eine Integration in den europäischen Strommarkt erhöht die Resilienz zusätzlich, da der Ausfall kritischer Produktions- oder Netzinfrastrukturen in der Schweiz leichter überbrückt werden kann. Mithilfe der Schweizer Wasserkraft, Kurzzeitspeichern und Backup-Kraftwerken, die mit inländischen oder importierten chemischen Energieträgern betrieben werden, können Stromimportunterbrüche im Winter theoretisch auch in Zukunft über mehrere Wochen überbrückt werden. Tatsächlich sinkt die Resilienz bei einem sehr hohen Grad an Unabhängigkeit – unter anderem, weil die Energieversorgung weniger diversifiziert und damit weniger robust ist.

Kurz- und Langzeitspeicher können die Resilienz des Energiesystems daher deutlich erhöhen – unabhängig vom Grad der Auslandsabhängigkeit. Zusätzlich erlauben Speicher eine höhere Integration erneuerbarer Energieerzeugung und können deren Abregelung reduzieren, wodurch sich wiederum die Auslandsabhängigkeit verringert. [GB 7]

¹² Es müssten u. a. grosse Photovoltaik-Überkapazitäten sowie Windenergie aufgebaut, die Produktion chemischer Energieträger – auf wenige Betriebsstunden im Sommer verteilt – gesteigert und mehr teure Kurzzeitspeicher verwendet werden, was alles zu erheblichen Mehrkosten führt.

¹³ Versorgungssicherheit bezeichnet die Gewährleistung, dass jederzeit ausreichend Energie in der benötigten Menge verfügbar ist. Resilienz ergänzt diesen Begriff um die Fähigkeit des Energiesystems, auf Störungen wie Naturereignisse, technische Ausfälle oder geopolitische Krisen zu reagieren, ohne die Energieversorgung dauerhaft zu gefährden.

7 Wirtschaftliche, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte

7.1 Wirtschaftliche Aspekte und Unsicherheiten

Die Unsicherheiten bei der saisonalen Energiespeicherung liegen vor allem in der Markt- bzw. Preisentwicklung sowie in gesellschaftlichen und politischen Fragen.

Das Ausmass der saisonalen Preisunterschiede eines Energieträgers ist einer der Hauptfaktoren für die Wirtschaftlichkeit saisonaler Speicher.¹⁴ Es ist absehbar, dass sowohl Gas als auch Strom gewissen saisonale Preisunterschiede aufweisen werden. Ob dies ausreicht, um saisonale Speicher wirtschaftlich attraktiv zu machen, ist derzeit unklar. Bei der Speicherung von Strom weisen Wärmespeicher klare Vorteile gegenüber der Speicherung in chemischen Energieträgern auf und werden bereits bei einer niedrigeren saisonalen Preisdifferenz attraktiv.

Der Grad an Resilienz und Versorgungssicherheit wird im Wesentlichen durch die Politik bzw. Gesellschaft bestimmt und hat einen Einfluss auf die saisonale Speicherung. Ein hohes Mass an Resilienz erfordert mehr Speicher und verursacht Kosten, die letztlich von der Allgemeinheit getragen werden müssen. Gleichzeitig müssen dieselben Akteure auch über andere Aspekte des Energiesystems entscheiden, wie z. B. die Menge der Windenergie oder den Ausbau der Netze, die wiederum Auswirkungen auf die saisonale Speicherung haben (siehe Kapitel 4.3). Wie sich diese Aspekte entwickeln werden, ist noch relativ unklar, auch weil viele dieser Entscheidungen noch kein klares Preisschild haben.

Auch die zukünftige Verfügbarkeit und die Kosten importierter, erneuerbarer chemischer Energieträger sind eine grosse Unbekannte. Günstige Preise und eine zuverlässige Verfügbarkeit von ausländischem Wasserstoff und Biomethan könnten den Speicherbedarf reduzieren. Insbesondere sehr günstige Preise und eine gute Verfügbarkeit CO₂-neutraler, flüssiger Energieträger könnten die Herausforderung der saisonalen Energieversorgung dank kostengünstiger Speicherung entscheidend entschärfen. Bei den flüssigen Energieträgern ist die Unsicherheit über die Kosten, die Produktionsstandorte, die Transportwege, die verfügbaren Mengen usw. jedoch auch am grössten. Da das angrenzende Ausland ähnliche Herausforderungen in diesem Bereich hat wie die Schweiz, könnten hier einerseits Synergien durch eine Zusammenarbeit genutzt

werden, andererseits könnten die Preise durch Konkurrenz auch steigen. [GB 8.1]

7.2 Regulatorische Rahmenbedingungen

Es gibt verschiedene kleinere und grössere regulatorische Aspekte, welche die Art und Menge der saisonalen Speicher in der Schweiz beeinflussen können [GB 8.2]:

Internationale Abkommen: Das Stromabkommen mit der EU hat grosse Auswirkungen auf die Art und Menge der benötigten saisonalen Speicher. Ohne Stromabkommen werden voraussichtlich vermehrt teurere Speichertechnologien und dafür nötige Energieinfrastruktur gebaut und verwendet werden müssen. Ausserdem wird der Entscheid über das Stromabkommen voraussichtlich auch den Erfolg beispielsweise von Wasserstoff- und Biometanabkommen zwischen der EU und der Schweiz beeinflussen.

Verbindlicher Dekarbonisierungspfad: Der CO₂-Preis hat einen wesentlichen Einfluss auf das Tempo der Energiewende. Saisonale Speicherlösungen stehen dabei oft in direkter oder indirekter Konkurrenz zu kostengünstigen und einfach speicherbaren fossilen Energieträgern. Ohne eine angemessene CO₂-Bepreisung bleiben ihre Marktchancen begrenzt. Ein verbindlicher Dekarbonisierungspfad schafft die nötige Investitionssicherheit, damit der CO₂-Preis seine steuernde Wirkung entfalten und klimafreundliche Technologien gegenüber fossilen Energieträgern wettbewerbsfähig machen kann. In der Schweiz fehlt bislang ein solcher, ausreichend klar definierter Pfad – trotz bestehender Ansätze wie dem Emissionshandelsystem –, was die Unsicherheit für Investitionen in nachhaltige Energiespeicher zusätzlich erhöht.

Rahmenbedingungen für Wärmespeicher: Für die saisonale Wärmespeicherung fehlen klare rechtliche Rahmenbedingungen. Um Rechts- und damit Investitionssicherheit zu verbessern, sollten beispielsweise diese Speichertechnologien auf allen politischen Ebenen explizit in die Raum- und Energieplanung integriert werden.

Dynamische Tarife: Kleine saisonale Wärmespeicher bei Stromendverbrauchern dürften bei dynamischen Strompreisen attraktiver werden. Entsprechende Tarife würden durch die freie Anbieterwahl wahrscheinlich schneller zur Verfügung stehen.

¹⁴ Saisonale Speicher lohnen sich, wenn die (durch Speicher) eingesparte teure Winterenergie mehr wert ist als die zusätzlichen Speicherkosten. Da auch die im Sommer eingekaufte Energie zu den Speicherkosten zählt, sind grosse Preisunterschiede zwischen Sommer und Winter besonders vorteilhaft.

Reservesystem: Die Regelungen zu den (Pflicht-)Energie-reserven sollten alle Arten von saisonalen Speichern mit ihrem jeweiligen Beitrag zur Resilienz und Versorgungssicherheit berücksichtigen und angemessen vergüten. Dies kann eine Erweiterung der derzeitigen (teilweise noch in Ausarbeitung befindlichen) Regelungen erforderlich machen. Die Schaffung eines gut regulierten (saisonalen) Reservemarktes könnte hier ebenfalls eine interessante Option sein.

Rahmenbedingungen für Wasserstoff: Für den Aufbau einer schweizerischen Wasserstoffinfrastruktur sind klare Regeln für die Erzeugung und insbesondere den Transport von Wasserstoff notwendig. Dies bedingt insbesondere eine Angleichung an die europäischen Regeln, die voraussichtlich für ein Importabkommen bzw. für den Anschluss an den «European Hydrogen Backbone» (EHB) notwendig sein werden. Ohne Wasserstoffimport ist der Aufbau einer grösseren schweizerischen Transportinfrastruktur und somit von Wasserstoffspeichern unwahrscheinlich.

Förderung von Exergieeffizienz: Um die Exergieeffizienz und die saisonale Systemeffizienz zu fördern, könnten Regeln den Übergang zu einem effizienteren System beschleunigen. Während die Energiepreise diese Entwicklung letztlich vorantreiben dürften, könnten klare Regeln sie erheblich beschleunigen.

7.3 Soziale Akzeptanz von saisonalen Energiespeichern

Die soziale Akzeptanz spielt bei der Umsetzung von Energieinfrastrukturen und damit auch bei Speichertechnologien eine entscheidende Rolle (siehe Kasten 5).

Die Wasserkraft geniesst in der Bevölkerung eine sehr hohe Akzeptanz, bei Neubauprojekten gibt es aber oft Widerstand. Für andere Speichertechnologien wie saisonale Wärmespeicher und Gasspeicher gibt es noch keine verlässlichen Aussagen zur Akzeptanz, auch weil diese Technologien in der Schweiz noch nicht verbreitet sind. Bei den für die Speicherung relevanten Energieinfrastrukturen wie Energienetze hängt die Akzeptanz stark von der Beeinträchtigung des Landschaftsbildes und dem Einbezug der lokalen Bevölkerung in die Projekte etc. ab (siehe Kasten 5). Insbesondere bei Wärmenetzen ist die Akzeptanz in Gebieten mit bestehenden Wärmenetzen deutlich höher als in Gebieten ohne Wärmenetze. [8.3]

Kasten 5: Soziale Akzeptanz

Die soziale Akzeptanz von Energieinfrastrukturen ist ein komplexes Thema, das von vielen verschiedenen Faktoren abhängt und sehr projekt-, kontext- und standortabhängig ist. Generell gilt, dass die Kosten für die betroffene Bevölkerung geringer sein sollten als der Nutzen. Die Kosten sind dabei nicht nur monetärer Art (z. B. Wertminderung von Grundstücken), sondern beschreiben auch eine gefühlte Minderung der Lebensqualität (z. B. durch Lärmbelästigung), erhöhte Unsicherheit (unklare Entwicklung), Verlust an Mitspracherecht, Beeinträchtigung wichtiger Leistungen der Natur (Biodiversität) etc. Der Nutzen ist natürlich auch hier nicht ausschliesslich monetär, sondern kann auch andere Aspekte umfassen, wie z. B. verbesserte Infrastruktur (neue Strassen), grössere Energieunabhängigkeit, lokale Wertschöpfung, Steigerung der Attraktivität der Region etc. Neben dem Kosten-Nutzen-Verhältnis spielen auch Ideologien, Mundpropaganda bzw. lokale Meinungsführende, politische Parteien und das vorhandene Wissen über die Eigenschaften einer Technologie eine grosse Rolle.

Tendenziell erfolgreicher sind daher Projekte, welche die lokale Bevölkerung in die Planung einbeziehen (v. a. Schlüsselpersonen wie Gemeindepräsidentinnen und -präsidenten und grosse lokale Arbeitgeber/Investoren), die Bevölkerung gut und transparent informieren, lokale Investoren gewinnen, das Landschaftsbild berücksichtigen (keine unbelastete Landschaft beanspruchen) und die Leistungen der Natur berücksichtigen (Biodiversität).

8 Optionen für die Förderung saisonaler Energiespeicherung

Um die langfristige Versorgungssicherheit und Systemeffizienz des Energiesystems zu stärken, braucht es gezielte politische und regulatorische Massnahmen. Die folgenden Empfehlungen zielen darauf ab, Investitionen anzureizen, Ressourcen effizient zu nutzen und strategische Infrastruktur zu sichern.

1. Klare Rahmenbedingungen für Wärmespeicher schaffen

Der Ausbau saisonaler Wärmespeicher wird derzeit durch regulatorische Unsicherheiten und komplexe raumplanerische Verfahren gehemmt. Um Investitionen zu ermöglichen und Prozesse zu beschleunigen, braucht es eindeutige gesetzliche Rahmenbedingungen für Planung und Betrieb, vereinfachte Bewilligungsverfahren sowie klare Zuständigkeiten und Planungsinstrumente. So können Wärmespeicher als zentrale Technologie für die saisonale Energiespeicherung wirksam zur Systemstabilität und -effizienz beitragen.

2. Exergieeffizienz systematisch fördern

Energiepolitische Rahmenbedingungen sollten darauf ausgerichtet sein, Ressourcen möglichst exergieeffizient zu nutzen. Niedrigexergiequellen wie Umwelt- oder Abwärme sollten prioritär für den Raumwärmebedarf eingesetzt werden, während hochwertige Energieformen wie synthetische oder biobasierte Energieträger gezielt dort Anwendung finden, wo keine Alternativen bestehen. Dies steigert die Gesamteffizienz des Energiesystems und kann den Bedarf an saisonalen Speichern reduzieren.

3. Kaskadennutzung von Holz fördern

Als begrenzter Rohstoff sollte Holz im Sinne einer Kaskadennutzung zuerst stofflich genutzt werden – etwa als Bau- oder Werkstoff – und erst danach energetisch verwertet werden. Idealerweise erfolgt die energetische Nutzung in Kombination mit Negativemissionstechnologien, um den Klimanutzen der Biomasse zu maximieren.

4. Aufbau grosser Gasspeicher fördern

Zur nachhaltigen Sicherung der Gasversorgung in der Schweiz sollte der Bau grosser, inländischer Gasspeicher – etwa in Felskavernen – zusätzlich zu bestehenden Import- und Speicherabkommen mit dem Ausland geprüft werden. Solche Speicher tragen zur Versorgungssicherheit und Gasnetzstabilität v. a. in kalten Winterperioden bei.

5. Ausbau der Winterstromproduktion vorantreiben

Zur Überwindung saisonaler Stromengpässe im Winter ist vor allem der gezielte Ausbau von Windenergie zentral. Parallel dazu sollten Anreize geschaffen werden, um überschüssige Sommerstromproduktion – etwa durch PV-Anlagen – bei Bedarf kontrolliert abzuregeln. Somit kann auch mit «überdimensionierten» Dach-PV-Anlagen der Winterstromanteil erhöht werden ohne Netze im Sommer zu überlasten. Sinnvollerweise werden diese Anlagen mit Wärmespeichern beim gleichen Gebäude gekoppelt, um mehr des sonst abgeregelten Stroms zu nutzen.

6. Reservesystem erweitern oder als Markt etablieren

Das bestehende saisonale Reservesystem – bestehend aus Wasserkraftreserven und thermischen Kraftwerken – sollte überdacht und weiterentwickelt werden. Ein markt-basiertes Reservesystem könnte zusätzliche Anreize für Investitionen in Systemresilienz schaffen. Wichtig ist dabei, alle relevanten Speicherformen einzubeziehen – insbesondere auch Wärmespeicher. So kann Resilienz als handelbarer und wirtschaftlich bewertbarer Faktor im Energiemarkt etabliert werden.

7. Zusammenarbeit stärken und sektorübergreifende Planung fördern

Saisonale Speicherlösungen und damit verbundene Energieinfrastruktur erfordern eine koordinierte Planung über Sektoren und Verwaltungsebenen hinweg. Dafür sind gezielte Formate zur Zusammenarbeit zwischen Energieversorgern, Planungsbehörden, Forschung und Industrie zu fördern. Transdisziplinäre Planungsprozesse, geteilte Datenräume und integrierte Szenarienanalysen können helfen, Synergien zu identifizieren, Doppelinvestitionen zu vermeiden, die Systemeffizienz zu steigern und Akzeptanz zu fördern. Dies schafft die Grundlage für eine ganzheitlich optimierte und real umsetzbare Speicherstrategie.

Wer sind wir?

Die **Akademien der Wissenschaften Schweiz** sind ein Verbund der vier wissenschaftlichen Akademien der Schweiz: der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT), der Schweizerischen Akademie der Geistes- und Sozialwissenschaften (SAGW), der Schweizerischen Akademie der Medizinischen Wissenschaften (SAMW) und der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW). Sie umfassen nebst den vier Akademien die Kompetenzzentren TA-SWISS und Science et Cité sowie weitere wissenschaftliche Netzwerke. Der wissenschaftliche Nachwuchs organisiert sich in der Jungen Akademie Schweiz. Die Akademien der Wissenschaften Schweiz vernetzen die Wissenschaften regional, national und international. Sie vertreten die Wissenschaftsgemeinschaften disziplinär, interdisziplinär und unabhängig von Institutionen und Fächern. Ihr Netzwerk ist langfristig orientiert und der wissenschaftlichen Exzellenz verpflichtet. Sie beraten Politik und Gesellschaft in wissensbasierten und gesellschaftsrelevanten Fragen.

Die **Erweiterte Energiekommission der Akademien der Wissenschaften Schweiz** fördert und koordiniert die Diskussion und den Wissensaustausch zu den Themen Energie und nachhaltige Nutzung von Ressourcen innerhalb der Forschungsgemeinschaft und pflegt den Dialog mit Politik und Gesellschaft. Sie sucht die Zusammenarbeit mit Schweizer Hochschulen und Fachhochschulen und unterhält ein Netzwerk der Schweizer Forschungsgemeinschaft zum Thema Energie.

