Technologie- und Unternehmenskonzept

GroNaS Energiespeicher

Stabile Stromversorgung aus regenerativen Quellen. Ein wesentlicher Beitrag zur Ablösung fossiler Kraftwerke.

Johannes Werner
GroNaS GmbH & Co. KGaA
5. August 2025

GroNaS GroNaS GroNaS GroNaS

Begriffserklärungen

- ▷ **EEG**: Erneuerbare-Energien-Gesetz
- ▷ **Installierte Leistung**: Maximal verfügbare Leistung des Speicherwerks bei Energieaufnahme oder -abgabe.
- ▷ **Speicherkapazität**: Im Speicher enthaltene Energiemenge.
- ▷ **Mittelfristiger Schwankungsausgleich**: Ausgleich von Leistungsschwankungen bei der Elektroenergieproduktion über eine bis zu mehreren Wochen.
- ▷ **Spezifische Speicherkapazität**: Gibt die Dauer, in der das Speicherwerk bei Maximalleistung Energie aufnehmen oder abgeben kann, an.
  spezifische Speicherkapazität = absolute Speicherkapazität / installierte Leistung
- ▷ **Systemwirkungsgrad:** Produkt aller Wirkungsgrade vom Einspeichern bis zum Ausspeichern der Energie (inkl. Wirkungsgrade der Stromrichter).
- ▷ **Wirkungsgrad:** Im Dokument wird der Begriff „Wirkungsgrad“ verwendet, wenn ein einzelner Konversionsvorgang (Energieaufnahme *oder* Energieabgabe) gemeint ist.

Hinweis

Bei Anzeige auf dem Bildschirm enthält dieses Dokument interaktive Links.

dunkelblau	Link auf das entsprechende Ziel. (Fußnoten, Querverweise auf interne oder externe Dokumente und Einträge im Inhaltsverzeichnis). Der Link ist rot eingefärbt, wenn sich das Sprungziel auf der selben Seite befindet (z. B. bei den meisten Fußnoten).
	Zurück[1] (auch mehrere Schritte).
	Zum Inhaltsverzeichnis.

[1] Rücksprung möglich bei Verwendung von Acrobat Reader und xpdf. Nicht alle pdf-Viewer unterstützen die Funktion.

Inhaltsverzeichnis

(s. a. Fortsetzung nächste Seite)

1 Vorhabensbeschreibung 4

1.1 Zusammenfassung 5
1.1.1 Ziel 5
1.1.2 Markt, Bedarf an Elektroenergiespeichern 5
1.1.3 Anforderungen an die Speichertechnologie 6
1.1.4 GroNaS-Speicherkonzept 6
1.1.5 Technologie 7
1.1.6 Stand der Entwicklungen 7
1.1.7 Agenda 8
1.1.8 Finanzierung 8
1.1.9 Kontakt- und Firmendaten 8

1.2 Unternehmen 9
1.2.1 Motivation und Vorgehensweise 9
1.2.2 Rechtsform 9
1.2.3 Gründer und Gesellschafter der Komplementärin 9
1.2.4 Kooperationspartner 10
1.2.5 Kontaktinformationen 11

1.3 Produkt 12
1.3.1 Produktbeschreibung 12
1.3.2 Kundennutzen, Anwendungsfälle 12
1.3.2.1 Energieversorgung in Deutschland 12
1.3.2.2 Bereitstellung von Regelleistung 13
1.3.2.3 Stromversorgung weitab gelegener Regionen 13
1.3.3 Technologiebeschreibung 13
1.3.3.1 Energieträgermaterial und Speicherprinzip 14
1.3.3.2 Herkömmliche Natrium-Schwefel-Speichertechnologie 14
1.3.3.3 Neuartige Natrium-Schwefel-Speichertechnologie 17
1.3.4 Stand der Entwicklung 18
1.3.5 Fertigungsanforderungen 19

1.4 Industrie und Markt 20
1.4.1 Industrieanalyse 20
1.4.2 Marktpotenzial 20
1.4.3 Marktsegmente 21
1.4.3.1 mittelfristiger Ausgleich der regenerativen Energieproduktion 21
1.4.3.2 Autarkielösungen für weitab gelegene Gebiete 21
1.4.4 Wettbewerb 21

1.5 Marketing 23
1.5.1 Absatz 23
1.5.2 Absatzförderung 23

1.6 Management und Schlüsselpersonen 24

2 Anhang 25

2.1 Lebensläufe der Gesellschafter und Geschäftsführer 26
2.1.1 Johannes Werner 26
2.1.2 Hartmut Kiesel 27
2.1.3 Stefan Fritzsche 27

2.2 Patente, Lizenzen, Schutzrechte 28

2.3 Natrium und Schwefel 29
2.3.1 Rohstoffpreise und Verfügbarkeit 29
2.3.2 Natrium-Schwefel-Zelle 31
2.3.3 Natrium-Schwefel-Brennstoffzelle 33

2.4 Konventionelle Na-S-Speichertechnologie 34
2.4.1 Technologiebeschreibung NGK 34
2.4.2 Kritische Betrachtung der konventionellen Technologie 34
2.4.3 Anlagenpreis NGK-Technologie 37

2.5 Neuartige Na-S-Speichertechnologie 39
2.5.1 Technologiebeschreibung GroNaS 39
2.5.1.1 Energiewandlerzelle 39
2.5.1.2 Energiewandlerkaskade 41
2.5.1.3 Speicherwerk 42
2.5.2 Anlagenpreis und Speicherkosten, GroNaS-Technologie 42
2.5.2.1 Leistungsabhängige Kosten 44
2.5.2.2 Speicherkapazitätsabhängige Kosten 44
2.5.2.3 Anlagenkostenschätzung 45
2.5.2.4 Speicherkosten 45

2.6 Lebensdauer von Na-S-Speicheranlagen 47
2.6.1 konventionelle Technologie 47
2.6.2 GroNaS-Technologie 48

2.7 Sicherheitsaspekte 49

2.8 Wirkungsgrad und Wärmehaushalt 52

GroNaS GroNaS GroNaS GroNaS

1.1 Zusammenfassung

1.1.1 Ziel

Wir haben die GroNaS GmbH & Co. KGaA gegründet um eine neuartige Technologie, auf deren Basis stationäre Elektroenergie-Großspeicher gebaut werden können, bis zur Anwendungsreife zu entwickeln.
Die noch fehlende Möglichkeit, große Mengen an Elektroenergie speichern zu können, blockiert derzeitig die Ablösung fossiler Energieträger im Sektor der Elektroenergieerzeugung. Speicherkraftwerke nach dem GroNaS-Konzept sollen diese Blockade beseitigen.
Ein GroNaS-Speicherkraftwerk ist eine kompakte Anlage, die auf Standorte ehemaliger, mit fossilen Brennstoffen betriebener Wärmekraftwerke passt. Ein GroNaS-Speicherwerk ist in der Lage, bei der Elektroenergieversorgung aus regenerativen Quellen auftretende Lücken von mehr als 14 Tagen zu überbrücken. Der Stromgestehungspreis eines Verbunds von Solar- und Windkraftwerken und einem GroNaS-Speicher wird bei 0,16 €/kWh liegen und somit geringer sein, als der von Kohlekraftwerken. Bei erfolgreicher Umsetzung des GroNaS-Energiespeicherkonzepts kann also eine regenerativ betriebene Grundlastversorgung aufgebaut werden, die kostengünstiger ist, als die derzeit vorhandene.
Dem derzeitigen Erkenntniststand zu Folge kann mit dem Verkauf von GroNaS-Speicherkraftwerken in den nächsten 20 Jahren ein Umsatz in Höhe von mehreren Milliarden Euro (weltweit) erzielt werden.

1.1.2 Markt, Bedarf an Elektroenergiespeichern

Durch die sog. Energiewende entsteht derzeitig ein erheblicher Bedarf an großen Speicheranlagen für Elektroenergie. Die zur Verfügung stehende, regenerative Leistung kann bereits jetzt nicht immer vollständig genutzt werden. Mit dem weiteren Zubau an regenerativer Leistung wird dies immer öfter auftreten. Da die Möglichkeiten des Energieexports aus unregelmäßig fluktuierenden Quellen eher begrenzt sind, ergibt sich daraus die Notwendigkeit, große Elektroenergiemengen zu speichern.

- Kleinste Last in (nachts, am Wochenende): 30 - 40 GW
- Installierte regenerative Leistung: Windenergie 135 GW, Photovoltaik 63 GW[2]

Bis jetzt gibt es noch keine Technologie, die eine ökonomisch vertretbare Speicherung dieser Energie gestattet. In Deutschland existiert eine ganze Reihe von Pumpspeicherwerken. Sie haben jedoch, gemessen am neu entstehenden Bedarf, eine viel zu geringe Speicherkapazität: Bei installierter Leistung können sie nur ca. 8 - 16 h lang Energie aufnehmen oder abgeben. Benötigt werden jedoch Einrichtungen, die dies unter Volllast auch mehrere Tage lang können. Energieexperten gehen davon aus, dass im Zuge der Energiewende der Bedarf an Elektroenergiespeicherkapazität in den nächsten 20 Jahren auf das Tausendfache ansteigen wird.

- Vorhandene Speicherkapazität in Deutschland: 40 GWh
- Zukünftiger Bedarf: 20.000 - 40.000 GWh[3]

[2] Werte für Deutschland, 2024
[3] http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/DPG2011-AKE_Dresden/Vortraege/DPG2011_AKE7.3Troendle_Energiespeicher.pdf

1.1.3 Anforderungen an die Speichertechnologie

Für keines der bisher in der Fachwelt diskutierten Speicherkonzepte konnte eine gegenwärtige oder zukünftige Rentabilität im Anwendungsfall „mittelfristiger Schwankungsausgleich“ plausibel gemacht werden. Eine für diesen Anwendungsfall geeignete Speicheranlage müsste folgenden Anforderungen genügen:

- ▷ Ausreichende Verfügbarkeit notwendiger Rohstoffe oder anderer natürlicher Resourcen.
- ▷ Systemwirkungsgrad: $\geq 85\%$
- ▷ Anlagenkosten: ≤ 1300 €/kW$_i$ (ähnlich teuer, wie konventionelle Kraftwerke)
- ▷ Ausreichende spezifische Speicherkapazität[4]: ≥ 336 h (14 Tage)

Alle bislang vorliegenden Konzepte verfehlen diese Bedingungen in wenigstens einem Punkt.

1.1.4 GroNaS-Speicherkonzept

Speicherwerke nach dem GroNaS-Konzept sollen alle diese Anforderungen erfüllen.

- ▷ spezifische Speicherkapazität: ≥ 336 h (14 Tage)
- ▷ Systemwirkungsgrad: 85 - 90%
- ▷ Anlagenkosten (inkl. Energieträgermaterial für 336 h): ca. 1000 €/kW$_i$
- ▷ Anlagengröße: 20 - 1000 MW$_i$

Einer aktuellen (2024) Berechnung zu Folge würden sich beim Betrieb eines GroNaS-Speichers folgende Speicherkosten ergeben:

- ▷ Speicherkosten: 0,1 €/kWh

Die Speicherkosten ergeben sich als Quotient aus der ausgelieferten Energie und der Summe der Kosten im Abschreibungszeitraum. In der Berechnung wurden die Anschaffungskosten der GroNaS-Anlage, Finanzierungskosten (mit 6% Zinsen), Kosten für den Energieeigenverbrauch des Speichers, Netzentgelt für die wegen des Eigenverbrauchs bezogene Energie, Personal- und Instandhaltungskosten berücksichtigt. Als Abschreibungszeitraum wurden 10 Jahre angenommen.
Ein GroNaS-Speicher, der Energie aus Solar- und Windkraftanlagen bezieht, kann als Grundlast-Kraftwerk betrieben werden. Die Summe der Stromgestehungskosten für Solar- und Windenergie und der durch den GroNaS-Speicher bedingten Speicerkosten wären dann kleiner als die Stromgestehungskosten in Kohlekraftwerken:

- ▷ Stromgestehungskosten für GroNaS-Grundlastversorgung: 0,16 €/kWh
- ▷ Stromgestehungskosten von Braunkohlekraftwerken[5]: 0,21 €/kWh

[4] Die spezifische, auf die installierte Leistung bezogene Speicherkapazität drückt aus, wie lange eine Speichereinrichtung Energie aufnehmen oder abgeben kann, wenn sie bei installierter Maximalleistung betrieben wird. Die tatsächliche Speicherkapazität eines Speichers ist das Produkt aus installierter Leistung und spezifischer Speicherkapazität.

[5] Mittlerer Wert gemäß der 2024 von der Fraunhofer-Gesellschaft herausgegebenen Studie: **DE2024_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf**

1.1.5 Technologie

Abgesehen von dem neu entwickelten, patentierten Design des elektrochemischen Energiewandlers handelt es sich beim GroNaS-Konzept um eine derzeit zwar ungebräuchliche, im Kern aber konservative Technologie. So kommen z. B. keine neuartigen Materialien zum Einsatz und ist keine Grundlagenforschung erforderlich.
Als Energieträgermaterial werden Natrium und Schwefel verwendet. Beide Materialien sind in riesigen Mengen und zu akzeptablen Preisen verfügbar. Entgegen einer falschen Annahme, die leider gelegentlich sogar von Chemikern geäußert wird, gehen von Natrium und Schwefel keine besonders hohen Risiken aus. Das Risikopotenzial ist vergleichbar mit dem anderer konventioneller Einrichtungen wie z. B. Erdölraffinereien oder der Erdgasversorgung.
Die wichtigste Neuerung des GroNaS-Konzepts besteht im Paradigmenwechsel vom Konzept eines Speichers als „Batterie von Natrium-Schwefel-Akkuzellen“ hin zur „elektrochemischen Anlage mit Natrium-Schwefel-Brennstoffzellen“. Die Na-S-Brennstoffzelle hat ein ähnliches aktives Bauteil wie die Na-S-Akkuzelle und kann wie diese reversibel betrieben werden. Der ökonomische Vorteil resultiert aus der Umsetzung der folgenden drei Prinzipien:

- Trennung von Leistung und Speicherkapazität.
  Die an sich billigen Energieträgermaterialien werden nicht mehr zusammen mit den teuren, Leistung erzeugenden Bauteilen zusammen in je einer Akkumulatorzelle gekapselt, sondern getrennt davon gelagert. Die spezifische Speicherkapazität lässt sich deshalb bei sehr geringen Zusatzkosten durch Beschaffung von von weiterem Energieträgermaterial auf mehrere Wochen steigern.
- Erhöhung des Leistungsfaktors
  Die Leistung muss bei konventionellen Na-S-Akkuzellen auf einen vergleichsweise geringen Wert begrenzt werden, weil es sonst zu einem unerwünschten, die Lebensdauer der Zelle verkürzenden Kristallbildungsvorgang kommt. Dieser unerwünschte Effekt tritt in Na-S-Brennstoffzellen nicht auf. Deshalb kann die Leistung, bezogen auf die vorhandene aktive Fläche in den Energiewandlern, gesteigert werden. Für eine bestimmte projektierte Leistung müssen also weniger der teuren aktiven Bauelemente hergestellt werden.
- Verringerung des Fertigungsaufwands durch Vergrößerung der Energiewandlereinheiten
  Die Energiewandler (Akkuzellen) herkömmlicher Na-S-Speichertechnologie haben eine Leistung von ca. 0,2 kW. Zur Bereitstellung von 1 MW Leistung müssen ca. 35000 Bauteile hergestellt und montiert werden. Eine GroNaS-Energiewandlerzelle hat eine Leistung von mindestens 20 kW. Für ein Megawatt sind nur ca. 1200 Teile erforderlich.

1.1.6 Stand der Entwicklungen

Neben der umfassenden technologisch-ökonomischen Analyse wurde in mehreren Revisionsschritten ein Design für einen geeigneten Energiewandler entwickelt. Für eins der Bauteile, eine große keramische Trägerplatte, muss noch ein geeignetes Fertigungsverfahren entwickelt werden. Die anderen Bestandteile sind so gestaltet, dass sie mit etablierten Fertigungstechnologien hergestellt werden können, wie bereits mit Fachleuten aus den relevanten Zuliefererbranchen (Oxidkeramik, Metallverarbeitung) besprochen wurde.

1.1.7 Agenda

Die GroNaS GmbH & Co. KGaA wird die Technologie zur Herstellung dieser Großspeicherwerke in den nächsten Jahren bis zur Anwendungsreife entwickeln. Diese Entwicklung soll in drei Abschnitten verlaufen:

2025 – 2026 Phase I
- ▷ Bau des ersten Prototypen (ca. 1 kW)
- ▷ Qualifizierung der derzeitigen Kostenschätzungen für Speicherwerk.
- ▷ Verbesserung der Ertragsprognose
- ▷ Kapitalakquise für die nächste Phase.

2027 – 2029 Phase II
- ▷ Bau von Energiewandler-Prototypen (ca. 20 kW).
- ▷ Kapitalakquise für die nächste Phase.

ab 2029 Phase III
- ▷ Skalierung des Energiewandler-Prototyps auf $>$ 20 MW.
- ▷ Aufbau einer Produktionsstätte für die Energiewandler.
- ▷ Planung und Konstruktion von marktfähigen Großspeicheranlagen.

1.1.8 Finanzierung

Die erste Entwicklungsphase soll nun realisiert werden. Die Finanzierung erfolgt durch Ausgabe von Aktien. Weiterhin sollen Fördermittel aus dem 8. Energieforschungsprogramm des BMWK dazu beitragen

1.1.9 Kontakt- und Firmendaten

GroNaS GmbH & Co. KGaA
Paul-Langheinrich-Str. 13
04178 Leipzig
Germany

Handelsregister: AG Leipzig, HRB 42520

Telefon: +49 341 97692318
Fax: +49 341 99389450
E-mail: j.d.werner@gronas.de
Internet: www.gronas.de

1.2 Unternehmen

1.2.1 Motivation und Vorgehensweise

Ausgangspunkt unseres Unternehmens sind die derzeit auftretenden und öffentlich diskutierten Konsequenzen der Energiewende. Inbesondere fiel uns dabei auf, dass das Ziel der kompletten regenerativen Energieversorgung zwar allgemein erwünscht ist, zur Verwirklichung dieses Ziels jedoch noch ein wichtiger Baustein fehlt, nämlich eine ökonomisch vertretbare Speichertechnologie für Elektroenergie. Darin sehen wir eine riesige Chance.
Der Schwerpunkt bei der Entwicklung unseres Konzepts war von Anfang an nicht die Lösung eines technischen, sondern eines ökonomischen Problems. Also nicht die Suche nach der Antwort auf die Frage „Wie kann man Elektroenergie speichern“, sondern die Suche nach der Antwort auf „Wird sich eine Investition in die Speichertechnologie amortisieren? Kann man Geld damit verdienen?“. Diese Sicht bestimmt unser Entwicklungsziel.
Wir haben technisch sehr unterschiedliche Optionen der Elektroenergiespeicherung im Hinblick auf ihre ökonomische Sinnhaftigkeit geprüft. Dabei wurden insbesondere die Parameter Entwicklungszeit, Rohstoffverfügbarkeit, Technologieverfügbarkeit, Wirkungsgrad, Anlagenlebensdauer und Gefahrenpotenzial berücksichtigt. Unser Fokus auf Natrium und Schwefel als Energieträgermaterialien kommt nicht daher, dass wir uns aus irgendwelchen akademischen Gründen mit Natrium und Schwefel beschäftigt haben und nun ein Anwendungsgebiet suchen, sondern ist Ergebnis dieser Prüfung.
Wir wollen Kompetenzen für das Gesamtanlagendesign sowie für den Bereich der Fertigung von großen Natrium-Schwefel-Energiewandlern aufbauen. Dabei verstehen wir Anwendung von Hochtechnologie nicht darin, große Ansammlungen komplizierter Technik zu erschaffen. Ganz im Gegenteil, es geht darum, komplexe Probleme gut zu verstehen und mit möglichst einfachen Lösungen zu beherrschen. Bei der Realisierung des Konzepts sollen weiterhin bereits etablierte Technologien unter Einbindung geeigneter Partner zum Einsatz kommen, wo immer das möglich ist.

1.2.2 Rechtsform

Zur Umsetzung des Entwicklungsvorhabens wurde 2012 zunächst die GroNaS GmbH gegründet. Sie wurde im Jahr 2023 als GroNaS Verwaltungsgesellschaft neu firmiert. Um die Ausgabe von Aktien zu ermöglichen, wurde 2024 die GroNaS GmbH & Co. KGaA gegründet. Sie hat ihren Sitz in Leipzig. Persönlich haftende Gesellschafterin (Komplementärin) ist die GroNaS Verwaltungsgesellschaft mbH.
Handelsregistereinträge:

- GroNaS GmbH & Co. KGaA: HRB 42520, AG Leipzig
- GroNaS Verwaltungsgesellschaft mbH: HRB 38124, AG Leipzig; Geschäftsführer: Johannes Werner

1.2.3 Gründer und Gesellschafter der Komplementärin

- Johannes Werner[6], Chemiker, Gründer und Gesellschafter (80%)

[6] s. a. **Anhang 2.1.1, Lebenslauf „Johannes Werner“**

- Umfangreiches, fachübergreifendes, naturwissenschaftlich-technisches Wissen.
- Berufserfahrung als Chemiker, IT-Consultant und Softwareentwickler.
- Konzeption und Durchführung eines durch das BMBF geförderten Projekts der Anwendungsforschung.
- Mitarbeit an mehreren Projekten der Grundlagenforschung.

▷ Hartmut Kiesel[7], Rechtsanwalt, Gründer und Gesellschafter (10%)
- langjährige Berufserfahrung als Sozius der Kanzlei Maier, Kiesel, Drabe in Halle (Saale).
- Kompetenz im Bereich IP-Management.

▷ Stefan Fritzsche[8], Account Manager EVU, Gesellschafter (10%)
- Studium Diplom-Sportingenieur - Spezialisierung auf integrierte Produktentwicklung
- Weiterbildung zum IPMA Projektmanager Level-D
- Masterstudium Energiemanagement Oktober 2019 bis Juli 2022
- Account Manager EVU/Industrie bei e2m

1.2.4 Kooperationspartner

Mit folgenden Unternehmen und Forschungseinrichtungen besteht bereits eine Absprache zur Kooperation:

▷ Helmholtz-Forschungszentrum Dresden Rossendorf (HZDR)
Kompetenz: Verfahrenstechnik für flüssiges Natrium
Anprechpartner: Herr Dr. Gerbeth

▷ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)
Kompetenz: Herstellung von Bauteilen aus Natrium-β-Aluminat
Ansprechpartner: Herr Dr. Schulz

[7] s. a. **Anhang 2.1.2, Lebenslauf „Hartmut Kiesel“**
[8] s. a. **Anhang 2.1.3, Lebenslauf „Stefan Fritzsche“**

1.2.5 Kontaktinformationen

Ansprechpartner:	Johannes Werner, Stefan Fritzsche
Adresse:	GroNaS GmbH Paul-Langheinrich-Str. 13 04178 Leipzig
Telefon:	+49 341 97692318 +49 177 6270970
Fax:	+49 341 99389450
Internet:	www.gronas.de
e-mail:	j.d.werner@gronas.de, s.fritzsche@gronas.de

GroNaS GroNaS GroNaS

1.3 Produkt

1.3.1 Produktbeschreibung

Das Produkt der GroNaS GmbH sind mittelgroße und große Speicherwerke, die auch bei maximaler Leistung mehrere Wochen lang Elektroenergie aufnehmen oder abgeben können.

- ▷ Leistung: 20 - 1000 MW
- ▷ spezifische Speicherkapazität: $\geq$ 336 h (14 Tage)
- ▷ absolute Speicherkapazität: 6 - 336 GWh
- ▷ Systemwirkungsgrad: 75 - 90%

Ein GroNaS-Speicherwerk kann sowohl im Energieaufnahme- wie auch im Energieabgabebetrieb seine Leistung innerhalb weniger Sekunden von Null auf Volllast und umgekehrt anpassen. Es ist damit sowohl für den Grundlast- als auch für den Spitzenlastbetrieb geeignet.
Das Speicherwerk ist eine kompakte Anlage. Die für die Speicherung einer Energiemenge von 336 GWh[9] erforderlichen Energieträgermaterialien passen in zwei Tanks von je 100 m Durchmesser und 20 m Höhe.
Die Speicherwerke sind modular aufgebaut. Die Leistung einer bestehenden Anlage kann durch Anreihung weiterer Energiewandler vergrößert werden. Noch einfacher ist eine nachträgliche Speicherkapazitätserweiterung. Dazu muss nur die Tankanlage vergrößert und weiteres Energieträgermaterial beschafft werden.
Die Speicherwerke werden zweckmäßiger Weise an geeigneten Knoten des Energieversorgungsnetzes, bevorzugt auf Standorten nicht mehr benötigter konventioneller Kraftwerke errichtet.
Die GroNaS-Technologie für kleine Anlagen, z. B. in Einfamilienhäusern als Speicher für einen kleinen photovoltaischen Generator, zu nutzen, ist aus zwei Gründen heraus wenig sinnvoll. Zum Einen würde man dann nicht nur einen erhöhten Fertigungsaufwand, sondern auch einen erhöhten Aufwand für Kunden- und Gewährleistungsmanagement erzeugen. Zum Anderen wären die Anlagen auch deshalb teurer, weil der Dimensionseffekt[10] bei der Wärmeisolierung nicht ausgenutzt werden kann und eine deutlich aufwändigere Wärmeisolierung verwendet werden muss. Beide Faktoren führen dazu, dass es in jedem Falle billiger sein wird, mittelgroße und große Speicherwerke in Reichweite von Erzeugern und Verbrauchern zu errichten und die Energie der Kleinerzeuger dort zu speichern als die Speicherung völlig zu dezentralisieren.

1.3.2 Kundennutzen, Anwendungsfälle

1.3.2.1 Energieversorgung in Deutschland

Ein wichtige Anwendungsfall für die GroNaS-Speicher ist die Bereitstellung regenerativ erzeugter Elektroenergie zur Abdeckung der Grundlast. Ein wichtiges Kriterium dafür, ob eine Speichertechnologie für diese Aufgabe eingesetzt werden kann, sind die sog. Speicherkosten. Die Summe der Speicherkosten ist der Betrag, den es kostet, dem Speicher eine Kilowattstunde Strom zu entnehmen (da der Speicher einen Systemwirkungsgrad von weniger als 100% hat,

[9] Die Energiemenge, die 200 große Windturbinen von je 5 MW bei Höchstleistung in zwei Wochen erzeugen.
[10] s. a. **Anhang 2.8, „Wirkungsgrad und Wärmehaushalt“**

muss dafür also mehr als ein Kilowattstunde an Energie aufgenommen werden). Die Speicherkosten bei einem Stromspeicher sind das Äquivalent zu den sog. Stromgestehungskosten eines Kraftwerks. Wird ein Verbund aus Stromerzeugern und einem Stromspeicher betrieben, ergeben sich die Stromgestehungskosten des Verbunds als gewichtete Summe der Stromgestehungskosten der beteiligten Kraftwerke und der Speicherkosten des Speichers. Wir haben eine Abschätzung der Stromspeicherkosten für die GroNaS-Technologie vorgenommen[11] Das Ergebnis zeigt, dass die Stromgestehungskosten eines Verbunds aus Solar- und Windkraftwerken sowie einem GroNaS-Speicher geringer sein können, als die derzeitigen Stromgestehungskosten von Kohlekraftwerken:

- Stromgestehungskosten von PV-Freiflächenanlagen[12]: 0,03 - 0,05 €/kWh
- Stromgestehungskosten Wind (offshore und onshore)[12]: 0,04 - 0,10 €/kWh
- **Speicherkosten, GroNaS-Technologie: 0,1 €/kWh**[11]
- **Stromgestehungskosten, Verbund GroNaS-Solar-Wind: 0,16 €/kWh**[11]
- Stromgestehungskosten, Kohlekraftwerke[12]: 0,15 - 0,29 €/kWh

1.3.2.2 Bereitstellung von Regelleistung

Ist ein GroNaS-Speicherwerk so ausgelegt, dass es im Grundlastbetrieb mit einem Systemwirkungsgrad von 90% arbeitet, wird die technisch mögliche Maximalleistung dabei nicht erreicht. Die dann noch vorhandene Leistungsreserve eröffnet die Möglichkeit, gleichzeitig auch noch Regelleistung bereit zu stellen. Der Wirkungsgrad würde dabei zwar unter 85% sinken, die wirkungsgradbedingten Verluste wären dann jedoch kleiner als die zusätzlichen Gewinne am Regelleistungsmarkt.

1.3.2.3 Stromversorgung weitab gelegener Regionen

Elektroenergieversorgung in weitab gelegenen Regionen, wie z. B. den kanarischen Inseln, ist meist teurer als in hoch industrialisierten Gebieten. Dabei kommen oft kleine oder mittelgroße Dieselgeneratoren zum Einsatz und der Strom ist in Folge des vergleichsweise hohen Brennstoffpreises recht teuer. Eine Stromerzeugung durch Windkraftanlagen ist dort derzeitig aber ökonomisch oft nicht sinnvoll, weil die Dieselgeneratoren dann immer noch für Flautezeiten vorgehalten werden müssen. Zusammen mit GroNaS-Speicherwerken bilden Windkraftanlagen in diesem Fall eine vollwertige Ersatzlösung, die kostengünstiger sein kann, als die alte Stromversorgung auf Basis fossiler Brennstoffe.

1.3.3 Technologiebeschreibung

Die Rentabilität der GroNaS-Speicherwerke wird durch die nachfolgend beschriebene, gegenüber der bestehenden Natrium-Schwefel-Technologie veränderte Herangehensweise an dieses Speicherprinzip erreicht.

[11] s. **Anhang 2.5.2.4, „Speicherkosten“**
[12] **DE2024_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf**

1.3.3.1 Energieträgermaterial und Speicherprinzip

Wenn ein Elektroenergiespeicher mit einer Speicherkapazität von 5 – 500 GWh als kompakte Anlage ausgeführt werden soll, kommt als Speicherprinzip nur die Speicherung in energiereichen Materialien in Frage. Speicherwerke nach dem GroNaS-Konzept verwenden Natrium und Schwefel[13] als Energieträgermaterialien. Das hat folgende Vorteile:

- ▷ Natrium und Schwefel sind als Hauptbestandteile der Erdkruste in riesigen Mengen verfügbar. Auch die Beschaffung von vielen Millionen Tonnen dieser Materialien würde ihren Preis nicht übermäßig beeinflussen.
- ▷ Die spezifische Energie ist mit 0,755 kWh pro Kilogramm Energieträgermaterial ausreichend groß. Für die Speicherung der Energiemenge, die 200 große Windturbinen bei Höchstleistung in zwei Wochen erzeugen, wären zwei Tanks von je 100 m Durchmesser und 20 m Höhe ausreichend.
- ▷ Bei elektrochemischen Energiewandlern ist der Wirkungsgrad bei einer bestimmten Leistung um so größer, je mehr aktive Oberfläche im Energiewandler zur Verfügung steht. Der Wirkungsgrad wird damit abhängig vom Anlagenpreis. Bei der elektrochemischen Stoffwandlung im Natrium-Schwefel-System erreichen auch bezahlbare Anlagen einen Systemwirkungsgrad von 75 - 90%.
- ▷ Die Prozesse bei der Umwandlung des Energieträgermaterials von der energiereichen in die energiearme Form und zurück sind einfach und vollständig. Es bilden sich dabei keine Abfallprodukte. Auch sämtliche, an der Energiekonversion beteiligte Konstruktionsmaterialien unterliegen nur einer geringen Korrosion. Eine Anlagenlebensdauer von mehr als 20 Jahren ist damit realistisch.
- ▷ Die Na-S-Speichertechnologie ist umfassend erforscht, die Forschungsergebnisse öffentlich verfügbar. Grundlagenforschung zur Klärung offener Fragen ist nicht erforderlich.

Die Energiekonversion erfolgt durch die Vorgänge der elektrochemischen Natrium-Schwefel-Zelle. Im Energieentnahmebetrieb reagiert Natrium im Energiewandler mit Schwefel. Dabei bilden sich Natriumsulfide und elektrische Energie wird erzeugt. Beim Energiespeichervorgang findet der umgekehrte Prozess statt: unter Aufnahme von Energie entstehen Natrium und Schwefel aus Natriumsulfiden.
Die Natrium-Schwefel-Zelle ist ein Hochtemperatursystem. Sie arbeitet im Bereich von 270 bis 400 °C. Sowohl Natrium und Schwefel als auch das aus verschiedenen Natriumsulfiden bestehende Produktgemisch sind bei diesen Temperaturen flüssig.

1.3.3.2 Herkömmliche Natrium-Schwefel-Speichertechnologie

Natrium und Schwefel werden derzeit in mittelgroßen (1 - 2 MW) Speichermodulen der japanischen Firma NGK Insulators als Energieträgermaterialien verwendet[14].
Die Technologie von NGK Insulators folgt dem Akkumulator-Paradigma. Dabei sind die Energieträgermaterialien in kleinen Portionen zusammen mit weiteren Bauelementen, die zur Leistungsbereitstellung erforderlich sind, in abgeschlossene Zellen verkapselt. Akkumulatoren und aus ihnen zusammengesetzte Batterien haben dadurch ein konstruktiv bedingtes, fixes Verhältnis von Maximalleistung zu Speicherkapazität. Hervorzuheben ist hierbei, dass die Fertigung

[13] s. a. **Anhang 2.3, „Natrium und Schwefel“**
[14] s. a. **Anhang 2.4.1, „Technologiebeschreibung NGK“**

einer Na-S-Akkuzelle und ihre Einbindung in eine elektrische Funktionseinheit um ein vielfaches teurer sind als das in der Zelle verwendete Speichermaterial.
Der derzeit in Großserie hergestellte Zelltyp ist eine Variante einer Konstruktion aus den 80ern, die eigentlich für den Anwendungsfall „Elektromobilität“ entworfen wurde.
NGK-Insulators fertigt zylindrische Akkumulatorzellen von ca. 10 cm Durchmesser und 50 cm Höhe. Eine Zelle hat eine Nennleistung von 0,2 kW und kann eine Energiemenge von 1,2 kWh speichern. Die NGK-Akkus haben unter realistischen Betriebsbedingungen eine begrenzte Lebensdauer, die mit 4500 Vollzyklen angegeben wird (ca. 12 Jahre beim Betrieb der Speicheranlage mit einem Ladezyklus pro Tag). Ungefähr 300 Akkuzellen werden elektrisch zu einer Einheit verbunden und mehrere dieser Einheiten zusammen mit den erforderlichen elektrischen Einrichtungen zu Modulen mit einer Nennleistung von 1 MW und einer Speicherkapazität von 7,2 MWh komplettiert. Auch Großanlagen aus vielen dieser Module wurden bereits errichtet.
Für ein großes, jedoch nicht realisiertes Speicherprojekt mit der NGK-Technologie (2009; Dubai, VAE), wurde ein Auschreibungsergebnis bekannt. Dem zu Folge ergeben sich die folgenden spezifische Anlagenkosten:

- ▷ Anlagenpreis, bezogen auf die installierte Leistung: 1560 €/kW_i
- ▷ Anlagenpreis, bezogen auf die Speicherkapazität: 260 €/kWh

Der Anlagenpreis der NGK-Technologie ist insbesondere in Anwendungsfällen, die eine große spezifische Speicherkapazität erfordern, zu hoch. Diese Technologie ist deshalb zum mittelfristigen Schwankungsausgleich der regenerativen Energieproduktion nicht geeignet. Der genannte Anwendungsfall (mittelfristiger Ausgleich) erfordert eine spezifische Speicherkapazität von ein bis zwei Wochen. Bei Verwendung der NGK-Technologie ergäbe sich dann ein spezifischer Anlagenpreis von 87300 €/kW_i. Die NGK-Technologie verfehlt den für eine rentablen Betrieb erforderlichen Anlagenpreis vor allem aus den nachfolgend genannten Gründen (A - D):

A Hoher Fertigungsaufwand in Folge zu kleiner Funktionseinheiten.
Der in den NGK-Speichermodulen verwendete Energiewandler, die Akkuzelle T5, hat eine Nennleistung von ca. 0,2 kW und ist damit, gemessen am Leistungsbereich des erwünschten Speicherwerks, viel zu klein. Die geringe Baugröße dieses Akkus macht sich in zweierlei Hinsicht neagtiv bemerkbar.
Zum Einen ensteht wegen der Notwendigkeit, viele kleine Einheiten in hoher Qualität zu fertigen und präzise zusammenzusetzen, ein großer Fertigungsaufwand. Um 1000 Megawatt Leistung bereit zu stellen, müssten 5 Millionen dieser Akkuzellen gebaut und in elektrische Funktionseinheiten eingebunden werden. Zum Anderen können aus konstruktiven Gründen nicht einfach Tausende von Akkuzellen direkt miteinander zu großen Einheiten verbunden werden. Daher müssen auch die Stromrichter als kleine Einheiten ausgeführt werden. In den Modulen von NKG sind je 300 Akkuzellen zu einer Gruppe von 60 kW zusammengefasst. Für jede dieser Gruppen ist eine Stromrichtereinheit erforderlich, also 17 Stromrichterschaltungen pro MW installierter Leistung. Es wäre wesentlich günstiger, statt vieler Schaltungen a 60 kW wenige, mit kräftigeren Bauteilen bestückte Stromrichter zu bauen.
Die geringe Maximalgröße der Akkuzelle ist dadurch bedingt, das ihr wichtigstes Bauteil, die Festelektrolytmembran, nicht in größeren Dimensionen gefertigt und sicher betrieben werden kann. Dieses Bauteil ist beim T5-Akkumulator als eine dünnwandige Röhre ausgebildet. Es muss aus einer Spezialkeramik, dem Natrium-β-aluminat gefertigt werden. Eine möglichst geringe Wandstärke ist für das gleichzeitige Erreichen eines hohen Wirkungsgrades und einer hohen Leistung essenziell. Natrium-β-aluminat hat, wie alle keramischen Materialien, aber nur eine relativ geringe Bruchfestigkeit. Man kann daher ein stabiles, größeres

Festelektrolytbauteil dieser Art nur fertigen, wenn man auch die Wandstärke vergrößert. Mit der Vergrößerung der Wandstärke müsste man dann aber inakzeptable Abstriche beim Wirkungsgrad oder der Nennleistung machen. Vergrößert man die Röhre dagegen bei gleich bleibender, geringer Wandstärke, entsteht ein sehr fragiles Gebilde, das sich nicht mehr rationell fertigen und sicher betreiben lässt.

B Fixes Verhältnis von Leistung und Speicherkapazität.
Das Verhältnis von Höchstleistung zur Speicherkapazität ist beim Energiewandler nach dem Akku-Prinzip konstruktiv vorgegeben. Für die NGK-Technologie bedeutet das, dass sie nur zur Kurzzeitspeicherung geeignet ist. Nur dann kann ein Anlagenpreis von 1000 bis 1500 €/kW_i erreicht werden. Natürlich könnte man aus den NGK-Modulen natürlich auch Speicheranlagen für längere Zeiträume errichten. Dazu müsste aber ein Vielfaches der für Kurzeitspeicherung erforderlichen Module aufgestellt werden. Dabei vervielfachen sich dann aber natürlich auch die Investitionskosten. Zur Erhöhung der Speicherkapazität wäre eigentlich die Beschaffung des weitaus billigeren Energieträgermaterials ausreichend. Wegen des festen Einbaus des billigen Energiespeichermaterials in fertigungsintensive Gesamtmodule werden bei der Anschaffung von mehr Modulen zum Zwecke der Speicherkapazitätserweiterung aber immer auch weitere fertigungsintensive, teure, Leistung erzeugende Elemente und elektrische Funktionseinheiten mit beschafft. Diese werden später nie voll ausgelastet.

C Schlechtes Wärmeisolierungskonzept.
Bei der Konstruktion der NGK-Speichermodule stand, mit Blick auf den speziellen Markt für diese Module, der Anlagenpreis im Vordergrund. Sie sind daher, gemessen am technisch Möglichen, nur mäßig gut wärmeisoliert und erreichen deshalb nicht den Systemwirkungsgrad von 90%, der elektrochemisch und elektrotechnisch möglich wäre. Infolge von zu großer Wärmeabgabe muss zugeheizt werden, was den Systemwirkungsgrad im realen Betrieb auf ca. 75% limitiert.
Es sei an dieser Stelle darauf hin gewiesen, dass der Wärmeverlust von der Dimension der Anlage abhängig ist. Der Wärmeverlust ist in erster Linie von der Größe ihrer Oberfläche abhängig. Bei der Vergrößerung der Anlage nimmt das Oberflächen/Volumen-Verhältnis immer weiter ab. In ein Gebäude mit den doppelten Abmessungen von Länge, Breite und Höhe passt die achtfache Anzahl Energiewandler, die dann auch die achtfache elektrische Leistung umsetzen. Es hat aber nur die vierfache Oberfläche. Große Anlagen müssen daher nicht so aufwändig wärmeisoliert werden, wie kleine. Für eine wirkungsvolle Ausnutzung dieses Dimensionseffekts sind die NGK-Module mit 1 - 2 MW allerdings noch zu klein.

D Schlechte Ausnutzung des Leistungspotenzials der Festelektrolytmembran in Folge von Na_2S_2- und Na_2S-Kristallbildung[15].
In den NGK-Akkumulatoren ist Diffusion die einzige Möglichkeit des Materialtransports. Weil Diffusion jedoch ein langsamer Prozess ist, kommt es bei hoher Leistung und somit hoher Stromdichte auf der Oberfläche der Festelektrolytmembran zur Bildung von Na_2S_2- und Na_2S-Kristallen. Diese Kristalle sammeln sich dort an, weil sie sich zu langsam wieder auflösen. Sie verringern dabei die wirksame Oberfläche der Festelektrolytmembran und somit die elektrische Leistung. Eine Alterung der Akkuzelle ist die Folge. Dieser Alterungsprozess ist leistungsabhängig. Die Höchstleistung der NGK-Akkus wurde deshalb so gering eingestellt, dass eine Lebensdauer von ca. 12 Jahren erreicht wird. Ohne Rücksicht auf die Alterung könnte man jeder Akkuzelle ein Mehrfaches an Leistung entnehmen oder zuführen. Die Leistungsbegrenzung hat in Anwendungsfällen, die nur einen geringen Wirkungsgrad erfordern, eine negative Auswirkung auf die Investitionskosten: Für eine bestimmte

[15] s. a. **Anhang 2.6, „Lebensdauer von Na-S-Speicheranlagen“**

geplante installierte Leistung muss ein mehrfaches an Akkuzellen und Stromrichterschaltungen gebaut werden, als ohne den Kristallbildungsprozess erforderlich wäre.

1.3.3.3 Neuartige Natrium-Schwefel-Speichertechnologie

Mit dem GroNaS-Konzept ergeben sich deutlich verbesserte ökonomische Parameter. Weil Leistung und Speicherkapazität hier unabhängig voneinander eingestellt werden können, ist die Angabe eines auf die installierte Leistung oder die Speicherkapazität bezogenen spezifischen Preises nicht mehr sinnvoll. Ein spezifischer Anlagenpreis kann nun aber aus einer Leistungs- und einer Speicherkapazitätskomponente berechnet werden:

- ▷ Leistungsabhängige Preiskomponente (Zielstellung): 684 €/kW_i[16]
- ▷ Speicherkapazitätsabhängige Preiskomponente: 0,6 €/kWh[17]
- ▷ Spezifischer Anlagenpreis bei einer spezifischen Speicherkapazität von 336 h: 1000 €/kW_i

Die niedrigeren Anlagenkosten sollen dadurch möglich werden, dass sich aus dem neuartigen Konzept Verbesserungen bei allen vier o. g. Problemen ergeben:

A Verwendung von Energiewandlern mit deutlich größerer Leistung[18].
Das Design herkömmlicher Na-S-Akkuzellen entspricht nicht den Richtlinien, die bei der Gestaltung von industriellen Keramikteilen normalerweise befolgt werden (es ist nicht „keramikgerecht“), weil mit Hinblick auf eine mögliche Verwendung für den Anwendungsfall „Elektromobilität“ ein Kompromiss, der eine geringe Masse der Akkuzelle ermöglicht, eingegangen wurde. Anders beim GroNaS-Energiewandler. Da die Masse des Energiewandlers für einen stationären Speicher ohne Belang ist, konnte er konsequent keramikgerecht gestaltet werden. Dadurch können Energiewandlerzellen mit mehr als 20 kW gefertigt werden. Weil nun viel weniger elektrochemische Energiewandler und Stromrichterschaltungen hergestellt und montiert werden müssen, sinken die Kosten beträchtlich.

B Frei einstellbares Verhältnis von Leistung und Speicherkapazität.
GroNaS-Konzept sind Leistung erzeugende Elemente und Energieträgervorrat nicht gemeinsam in abgeschlossene Akkuzellen verkapselt. Die Energieträgermaterialien befinden sich vielmehr in einfachen, wärmeisolierten Tanks, von denen sie zu den Energiewandlern gepumpt werden. Leistung und Speicherkapazität sind damit unabhängig skalierbar. Das Arbeitsprinzip eines GroNaS-Speicherwerks ist die Natrium-Schwefel-Brennstoffzelle[19]. Wegen der Trennung der Leistung erzeugenden Elemente vom Energieträgervorrat muss beim Übergang zu mittel- und langfristiger Speicherung nur weiteres billiges Energieträgermaterial beschafft werden. Eine Vervielfachung der Kosten bei Langzeitspeicherung durch Installation schlecht ausgelasteter Energiewandler und überflüssiger Elektrotechnik wird so vermieden.

C Verbessertes Wärmeisolationskonzept unter Ausnutzung des Dimensionseffekts[20].
Die Tanks und alle Komponenten der Anlage, die von einer der Energieträgerkomponenten durchflossen werden, müssen ständig auf hoher Temperatur gehalten werden. Zur Bereitstellung der dafür erforderlichen Wärme reicht bei großen Anlagen (> 20 MW_i) die in den Energiewandlern unvermeidlich anfallende Verlustleistung der elektrochemischen Reaktion

[16] s. **Anhang 2.5.2.1, „Leistungsabhängige Kosten“**
[17] s. **Anhang 2.5.2.2, „Speicherkapazitätsabhängige Kosten“**
[18] s. a. **Anhang 2.5.1, „Technologiebeschreibung GroNaS“**
[19] Der Begriff „Redox-Flow-Batterie“ soll hier vermeiden werden, da diese Systeme in der Regel mit wässerigen Lösungen der Reaktionspartner arbeiten. Dies ist hier nicht der Fall.
[20] s. a. **Anhang 2.8, „Wirkungsgrad und Wärmehaushalt“**

(2 - 10 % des Energieumsatzes im Energiewandler) aus. Es muss nicht zugeheizt werden. Der Gesamtwirkungsgrad wird also durch Wärmeabgabe an die Umgebung nicht beeinflusst (s. a. **Anhang 2.8, „Wirkungsgrad und Wärmehaushalt“**).

D Unterdrückung der Kristallbildung[21].
Der Stoffaustausch im GroNaS-Energiewandler erfolgt nicht durch Diffusion, sondern durch erzwungene Strömung. Dadurch unterbleibt die Na_2S_2- und Na_2S-Kristallbildung. Es gibt so zum Einen keine Lebensdauerbegrenzung, zum Anderen kann die Festelektrolytmembran mit der vierfachen Stromdichte betrieben werden wie bei der herkömmlichen Technologie. Wenn die Anlage für einen Gesamtwirkungsgrad von 75% ausgelegt werden soll, kann die Höchstleistung des Energiewandlers bei gleicher Membranfläche auf das Vierfache gesteigert werden. Dem zu Folge müssten dann auch nur ein Viertel der Energiewandler gebaut werden. Eine weitere Kostenreduktion ergibt sich aus der Verringerung der Anzahl der zu fertigenden Stromrichterschaltungen.

Ein **GroNaS-Speicherwerk** besteht aus Tanks für die Energieträgermaterialien, den Energiewandlern, einem Maschinenhaus mit Pumpen, Steuerungseinrichtungen und Wechselrichtern sowie dem für die Netzanbindung notwendigen Hochspannungstrafo samt Hochspannungsschaltanlage.
Es hat folgende Leistungsparameter:

- ▷ Leistung: 20 – 1000 MW
- ▷ Speicherkapazität: 5 – 2000 GWh
- ▷ Systemwirkungsgrad: 75 - 90%

Eine große Anlage mit einer installierten Leistung von 1000 MW_i würde in 14 Tagen eine Energiemenge von 336 GWh aufnehmen, wenn es in dieser Zeit bei voller Leistung betrieben wird. Zur Speicherung dieser Energiemenge reichen zwei zylindrische Tanks von 100 m Durchmesser und 20 m Höhe.
Dem entsprechend reichen für eine kleine Anlage mit 20 MW_i zwei Tanks von je 20 m Durchmesser und 10 m Höhe.
Ein GroNaS-Speicherwerk arbeitet im Normalbetrieb emissionsfrei.[22]. Auch im Havariefall geht keine unverhältnismäßige Gefährdung von der Anlage aus.

1.3.4 Stand der Entwicklung

Elektroenergiespeicherung mit Natrium und Schwefel wurde in der Vergangenheit, besonders in den 70er und 80er Jahren des 20. Jh. bereits umfassend erforscht. Die Ergebnisse sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen zugänglich.
Der Umgang mit flüssigem Natrium erfordert ein spezielles Know-How, das jedoch bereits erarbeitet und veröffentlicht wurde. Darüber hinaus gibt es in der chemischen Industrie eine jahrzehntelange Betriebserfahrung mit heißem, flüssigen Natrium, denn es wird in elektrochemischen Großanlagen, wie z.B. bei MSSA Metaux Speciaux (Pombliere, Frankreich) in Mengen von zehntausenden Tonnen pro Jahr hergestellt.
Die Trennung von Leistung und Speicherkapazität, also die Aufbewahrung der Energieträgermaterialien Natrium und Schwefel in vom Energiewandler getrennten Tanks, wurde durch ein

[21] s. a. **Anhang 2.6, „Lebensdauer von Na-S-Speicheranlagen“**
[22] s. a. **Anhang 2.7, „Sicherheitsaspekte“**

BASF-Team erfolgreich demonstriert. Dieses Bauprinzip ist vergleichsweise einfach zu realisieren.
Das zum ökonomischen Erfolg der Technologie noch fehlende Element war bislang ein kostengünstiger, großer Energiewandler. Die GroNaS GmbH hat ein Design entwickelt, nach dem sich ein solches Aggregat bauen lässt. Dazu waren vor allem umfangreiche Recherchen zu Materialeigenschaften und ein mehrfaches Überdenken der verschiedenen Anforderungen (in elektrischer, thermischer, strömungstechnischer und fertigungstechnischer Dimension) nötig. Das grundlegende Konstruktionsprinzip ist im bereits erteilten Patent „Großer Energiewandler auf Basis der Natrium-Schwefel-Brennstoffzelle“ beschrieben. Eine darauf beruhender, noch weiter verbesserter Entwurf ist in der Patentanmeldung „Betriebssicherer Natrium-Schwefel-Energiewandler“ niedergelegt. Weitere Entwicklungsarbeiten führten zum Patent „Speicherwerk für Elektroenergie auf Basis der Natrium-Schwefel-Zelle“ und „Bewehrte, Natriumionen leitende Festelektrolytmembranen und ihre Herstellung“
Der Entwurf der beiden Hauptbestandteile des GroNaS-Energiewandlers (Keramik-Einheit und Bipolarplatte), wurde bereits mit den als Zulieferern avisierten Partnerfirmen diskutiert. Diese Bauteile können mit Standardverfahren der Zulieferer gefertigt werden.

1.3.5 Fertigungsanforderungen

Wenn eine einzelne Energiewandlerzelle eine Leistung von 20 kW hat, werden für eine kleine Anlage mit einer installierten Leistung von 20 MW 1000 Stück davon benötigt. Die Einrichtung einer Serienfertigung ist daher notwendig.

1.4 Industrie und Markt

1.4.1 Industrieanalyse

Die Speicherung von Elektroenergie in Mengen von der Größenordnung, wie sie ganze Regionen innerhalb mehrerer Tage verbrauchen oder erzeugen, ist eine völlig neue Aufgabe. Hundert Jahre lang wurde Elektroenergie aus extrem gut verfügbaren Quellen erzeugt. Wenn wenig Energie gebraucht wurde, konnte man einfach die Leistung der Kraftwerke reduzieren, war der Energiebedarf größer, die Leistung wieder anheben. Zur Betriebsoptimierung der alten Energieversorgung wurde eine ausgereifte Speichertechnologie verwendet, die Pumpspeichertechnologie. Sie diente vor allem dazu, Lastspitzen und -minima, die in Folge der trägen Leistungsanpassung von Kern- und Wärmekraftwerken nicht ausgeglichen werden konnten, abzudecken. Dafür war eine installierte Leistung von ca. 8 MW und eine Speicherkapazität von ca. 40 MWh (für Deutschland) ausreichend.
In Folge der derzeitigen Umstellung der Elektroenergieversorgung auf regenerative Quellen ist inzwischen eine völlig neue Situation eingetreten. Die Energieproduktion aus diesen Quellen, insbesondere die Wind- und Solarenergie, fällt wetterlagenabhängig an. Eine mit dem Verbrauch synchrone Energiebereitstellung ist dabei unmöglich. Bis vor kurzem war ein Ausgleich der Schwankungen noch dadurch möglich, dass in den Produktionsspitzen der Windenergie die Leistung der konventionellen Kraftwerke reduziert wurde. Die Grenzen dieses Ausgleichs sind jedoch jetzt schon erreicht.
Aus diesem Grund kann die regenerativ erzeugte Energie nicht mehr vollständig genutzt werden. Wird auf Grund einer Starkwindwetterlage eine hohe Leistung durch Windgeneratoren bereit gestellt, kommt es wegen des bestehenden, nicht auf den Zubau von Erzeugerkapazitäten eingerichteten Leitungsnetzes zu Netzüberlastungen. Dann müssen Windgeneratoren vom Netz genommen werden (sog. Einspeisemanagement „EinsMan“), und es wird auf einen Teil der regenerativen Energie verzichtet. Dieses nicht genutzte Energiepotenzial (sog. Ausfallarbeit) steigt immer weiter an:

- Ausfallarbeit in Deutschland[23]
  - 2009: 74 GWh
  - 2011: 421 GWh
  - 2013: 555 GWh
  - 2015: 4772 GWh
  - 2017: 5518 GWh
  - 2019: 6482 GWh
  - 2021: 5818 GWh
  - 2023: 10478 GWh

Der Bau von Elektroenergie-Großspeichern in den Gebieten mit hohem Windstromaufkommen würde die Hochspannungstrassen entlasten und diese Energie nutzbar machen.

1.4.2 Marktpotenzial

Eine Untersuchung der Universität Heidelberg[3] kommt zu dem Ergebnis, dass in Deutschland für eine regenerative Elektroenergieversorgung insgesamt Speicher mit einer Speicherkapazität

[23] Angaben der Bundesnetzagentur

von 40 TWh benötigt werden. Das ist das Tausendfache der derzeit durch Pumpspeicherwerke bereit gestellten Speicherkapazität. Speicherung in dieser Größenordnung ist mit Speicherwerken nach dem GroNaS-Konzept möglich. Es ergibt sich allein in Deutschland ein Marktpotenzial für Speicherwerke mit einem Volumen von mehreren Milliarden Euro. Ein Mehrfaches dieses Potenzials besteht weiterhin am internationalen Markt.

1.4.3 Marktsegmente

1.4.3.1 mittelfristiger Ausgleich der regenerativen Energieproduktion

Beim zukünftigen, mittelfristigen Ausgleich der wetterbedingten Energieproduktionsschwankungen über einige Tage geht es um sehr große Energiemengen. Dafür werden viele neue Speicheranlagen mit großer Speicherkapazität benötigt.
Die installierte Leistung allein von Wind- und Solarkraftwerke übersteigt mittlerweile die maximale Last. Für Wetterlagen ohne nennenswerten Wind und Sonnenschein muss aber trotzdem immer noch fast der komplette konventionelle Kraftwerkspark vorgehalten werden (sog. Backup-Leistung).
Zukünftig kommen noch weitere regenerative Erzeugerkapazitäten hinzu. Die verfügbare Energiemenge steigt damit kontinuierlich an. Mit einem Speicherwerk, das zu ähnlichen Kosten wie ein konventionelles Kraftwerk verfügbar ist und eine spezifische Speicherkapazität von ca. 2 Wochen hat, können nach und nach alle konventionellen Kraftwerke abgelöst werden. Auch unter der großzügigen Annahme, dass die Hälfte der derzeitig installierten konventionellen Leistung in Folge einer erfolgreichen Einführung von Lastmanagement-Maßnahmen entfallen kann, ist der Markt allein für Deutschland riesig.

- ▷ Installierte Leistung konventioneller Kraftwerke in Deutschland 2011: ca. 100 GW_i
- ▷ Geschätzter zukünftiger Bedarf zur Verfügung stehender Speicherleistung: ca. 50 GW_i
- ▷ Jährlicher Bedarf an Elektroenergiespeichern bei Ablösung der konventionellen Kraftwerke in 20 Jahren: 2,5 GW_i/a
- ▷ Jährlicher Umsatz bei einem Anlagenpreis von 1000 €/kW_i: 2 Mrd. €

Auch im Ausland könnte sich ein Markt in ähnlichen Größenordnungen entwickeln.

1.4.3.2 Autarkielösungen für weitab gelegene Gebiete

Stromversorgung durch eine Kombination von Windkraft- und Speicheranlagen kann in abgelegenen Gebieten, wie z. B. auf Inseln wie Mauritius oder den kanarischen Inseln kostengünstiger sein, als mit konventionellen Wärmekraftanlagen auf Ölbasis. Daraus ergibt sich auch ein Markt für GroNaS-Speicherwerke.

1.4.4 Wettbewerb

Derzeit gibt es keine weiteren Elektroenergiespeichertechnologien, die für den Anwendungsfall „mittelfristiger Ausgleich von stark schwankender regenerativ erzeugter Energieproduktion“ ökonomisch relevant wären. Alle anderen Speichertechnologien sind in in einer oder mehreren Kennziffern dem GroNaS-Konzept deutlich unterlegen.

- Pumpspeicherwerke
  Pumpspeicherwerke sind derzeit die besten Großspeicher für Elektroenergie. Die in Deutschland installierten Anlagen haben eine Gesamtleistung von 7 GW und eine Speicherkapazität von insgesamt 40 GWh. Einige zusätzliche Anlagen sind derzeit in Planung, darunter das Schluchseewerk mit 1,4 GW / 15 GWh. Gemessen am zukünftigen Bedarf, ist das Verfügbarkeitspotenzial jedoch um ein Vielfaches zu klein. Unvorteilhaft ist auch, dass die Pumpspeicherwerke derzeit weitab von den Regionen mit stark schwankender Energieproduktion (dem windreichen Küstenstreifen) stehen. Dadurch ergeben sich bei Speicherung und Rückgewinnung zusätzliche Wirkungsgradverluste, die den Speicherpreis sehr nachteilig beeinflussen. Das wäre auch bei der Nutzung von ausländischen Pumpspeicherwerken (z. B. in Norwegen, wie in der Öffentlichkeit gelegentlich diskutiert) der Fall.
  Systemwirkungsgrad: 85%, Investitionskosten: 500 - 1000 €/kW_i
- Konventionelle Natrium-Schwefel-Speichertechnologie (NGK Insulators)
  Die Speichermodule der japanischen Firma NGK Insulators sind eine Alternative zu Pumpspeicherwerken, wo diese nicht verfügbar sind. Mit dieser Technologie kann nur ein Betrieb im Kurzzeitmodus rentabel sein, weil die Investitionskosten bei Ausweitung der Speicherdauer stark anwachsen.
  Systemwirkungsgrad: 75%, Investitionskosten: ca. 1500 €/kW_i
- Weitere Projekte mit Natrium und Schwefel als Energieträger
  Eine kleine Anlage, bei der sich die Energieträgermaterialien in vom Energiewandler getrennten Tanks befanden, wurde von einem Entwicklerteam der BASF in Ludwigshafen betrieben. Der Energiewandler war hier jedoch eine Variation der Konstruktion einer Akuzelle in kleinen Dimensionen, so dass die für ökonomischen Durchbruch der Technologie ausreichende Vergrößerung nicht denkbar ist und die Fertigungskosten absehbar zu hoch würden. Eine Tochtergesellschaft der BASF verfolgt auch weiterhin die Entwicklung der Natrium-Schwefel-Speichertechnologie. Über Details des derzeitig in Arbeit befindlichen Technologiekonzepts liegen uns jedoch keine Informationen vor.
- Adiabatische Druckluftspeicher
  Adiabatische Druckluftspeicher haben einen maximalen Wirkungsgrad von ca. 70%. Die verfügbare spezifische Speicherkapazität ist jedoch zu gering.
- Methankonversion („Power to Gas“)
  Überschüssige Elektroenergie kann dazu genutzt werden, Wasserstoff zu erzeugen. Diesen kann man dann mit Kohlendioxid zu Methan (Erdgas) umsetzen. Die Anlagen für diese Konversion sind sehr kostengünstig, und es kann eine bereits bestehende Infrastruktur für die Erdgasspeicherung genutzt werden. Soll die gespeicherte Energie als Strom zurückgewonnen werden, ergibt sich jedoch nur ein Systemwirkungsgrad von ca. 37%. Dies ist für einen rentablen Betrieb viel zu wenig. Bei der Rücknutzung der gespeicherten Energie als Wärme wäre der Wirkungsgrad mit ca. 55% zwar etwas besser, die Speicherung aber wegen des sehr geringen Preises des in Konkurrenz angebotenen natürlichen Erdgases ein Verlustgeschäft.
- Redox-Flow-Batterie auf Vanadiumbasis
  Diese Technologie erreicht einen recht guten Wirkungsgrad von ca. 80%. Die weltweit verfügbaren Vanadium-Resourcen sind jedoch, gemessen am Speicherbedarf, viel zu klein.
- Lithium- und Bleibatterien
  Bei der Speicherung in konventionellen Blei-, Lithium- und anderen Akkumulatoren wird ein Wirkungsgrad von über 90% erreicht. Die Verfügbarkeit dieser Elemente wäre auch für einen Teil des Speicherbedarfs ausreichend. Die Investitionskosten und die sich daraus ergebenden Speicherkosten sind jedoch wegen aufwändiger Herstellung und begrenzter Lebensdauer der Akkus um ein Mehrfaches zu hoch.

1.5 Marketing

1.5.1 Absatz

Das Ziel der ersten Phasen unseres Vorhabens ist die Entwicklung einer Technologie, also eine umfangreiche Sammlung von Detailwissen. Wir gehen davon aus, dass dieses Wissen einen erheblichen Wert haben wird. In Kombination mit bereits am Markt erhältlichen Komponenten und Dienstleistungen wird daraus ein Produkt. Bereits mit der nächsten Kapitalerhöhung sollen Planung und Aufbau von Produktionskapazitäten erfolgen. So kann unmittelbar nach dem Abschluss der Technologieentwicklung die Produktion von den neuartigen Kernkomponenten der GroNaS-Energiespeicertechnologie erfolgen. Das Geschäft besteht dann im Verkauf von dieser Komponenten sowie im Verkauf von Planungsdienstleistungen für Speicherkraftwerke.

1.5.2 Absatzförderung

Neue Technologien wecken oft irrationale Ängste. So wurde unser Vorhaben bei der Erwähnung eines großen Tanks mit flüssigem Natrium auch schon einmal mit den Worten kommentiert: „... da steht dann ja eine gewaltige Bombe in der Landschaft!“. Die Gefährlichkeit von Natrium wird nämlich offensichtlich sogar von Fachleuten, zumindest wenn sie sich nicht weiter damit beschäftigt haben, spontan falsch eingeschätzt. Natrium ist nicht besonders gefährlich. Der Energiegehalt ist nicht größer als bei einem Tank voller Diesel und es kann auch nicht explodieren. Bei Zutritt von Feuchtigkeit besteht die Möglichkeit der Bildung von Wasserstoff, aber der Umgang mit explosiven Gasen ist auch in vielen anderen Branchen unserer Industrie erforderlich und wird sehr gut beherrscht.
Ein GroNaS-Speicherwerk zeichet sich durch sehr geringe negative Auswirkungen auf die Umwelt aus. So ist z. B. der Landschaftsverbrauch viel kleiner als beim Neubau eines Pumpspeicherwerks. Dies muss der Öffentlichkeit auch überzeugend vermittelt werden.
Der Absatz von Energiespeichertechnologie wird in Deutschland, aber auch in anderen Staaten nicht nur durch ein Marktgeschehen, sondern maßgeblich auch durch Gesetze und Verordnungen beeinflusst. In Deutschland sind dies im Besonderen das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG). Damit es nicht in Folge von neuen Regulierungen in diesem Bereich zu einer Benachteiligung unseres Unternehmens kommt, halten wir eine Kommunikation mit der Politik für notwendig.

1.6 Management und Schlüsselpersonen

- ▷ Geschäftsführung: Johannes Werner[24]
- ▷ Unterstützung der Geschäftsführung: Stefan Fritzsche[25], Hartmut Kiesel[26]

[24] s. a. **Anhang 2.1.1, Lebenslauf „Johannes Werner“**
[25] s. a. **Anhang 2.1.3, Lebenslauf „Stefan Fritzsche“**
[26] s. a. **Anhang 2.1.2, Lebenslauf „Hartmut Kiesel“**

Anhang

2.1 Lebensläufe der Gesellschafter und Geschäftsführer

2.1.1 Johannes Werner

1969	geb. 6.2.1969, Schönebeck
1985 - 1988	Berufsausbildung mit Abitur, Weißenfels
1990 - 1995	Chemiestudium (Diplomabschluss), Merseburg und Halle
1995 - 1999	wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für physikalische Chemie der Martin-Luther-Universität Halle ▷ organische Synthese ▷ dielektrische und elektrooptische Messungen ▷ Aufbau und Programmierung eines dielektrischen Meßplatzes
2000	Programmierer, bitstone-GmbH, Leipzig
2001 - 2002	IT-Consultant, santix AG, Unterschleißheim ▷ Installation, Wartung und kundenspezifische Modifizierung der Helpdesk-Software „Peregrine ServiceCenter“ bei Kunden wie z.B. Zeiss, Audi, ETH Zürich, Nürnberger Versicherungsgruppe, AOK.
2003	wissenschaftl. Mitarbeiter, Institut für Pflanzenbiochemie Halle ▷ System- und Datenbankadministration
2004 - 2006	selbständige, freiberufliche Tätigkeit ▷ Entwicklung des Patents „Einweginhalator“ ▷ Entwicklung des Patents „Halbleitende Polyaddukte mit kolumnarer Struktur“: Hochgeordnete, ultradünne Schichten organischer Halbleiter für den Einsatz in der Photovoltaik sowie als OLED
2006	wissenschaftl. Mitarbeiter, Martin-Luther-Universität Halle ▷ Synthese eines platinhaltigen Wirkstoffs für die Chemotherapie von Tumorerkrankungen
2007	wissenschaftl. Mitarbeiter, BioSolutions Halle GmbH ▷ Syntheseoptimierung
2007 - 2008	Projektleiter, Martin-Luther-Universität Halle ▷ Konzeption und Leitung des Forschungsprojekts „Nanokos - hochgeordnete, ultradünne, organische Halbleiterschichten“ (BMBF-Fördernummer: 03ESFST040)
2008 - 2009	wissenschaftl. Mitarbeiter, BioSolutions Halle GmbH ▷ Synteseoptimierung, AAS-Spurenanalyse von Schwermetallen
2010	Softwareentwickler, cleanenergies GmbH, Berlin ▷ Entwicklung eines datenbankgestützten Programms für die Planung von Photovoltaikanlagen
2011	Chemiker, rosseta Technik GmbH, Dessau-Rosslau ▷ Entwicklungsarbeiten für eine Elektrolyseanlage, Analyse von Energiespeicherkonzepten
seit 2012	Unternehmer, GroNaS Verwaltungsgesellschaft mbH ▷ Erbringung von IT-Dienstleistungen ▷ Gründung der GroNaS Verwaltungsgesellschaft mbH (vormals GroNaS GmbH) ▷ Gründung der GroNaS GmbH & Co. KGaA

2.1.2 Hartmut Kiesel

1966	geb. 8.3.1966, Hilden
1985	Abitur, Selb
1987	Studium der Rechtswissenschaften, Freiburg i. Br.
1993	1. Staatsexamen, Freiburg i. Br.
1996	2. Staatsexamen, Düsseldorf
seit 1996	Rechtsanwalt, Halle (Saale)
	▷ Sozius der Kanzlei Maier, Kiesel, Dietrich
	▷ seit 2005: Tätigkeitsschwerpunkt gewerblicher Rechtsschutz
2012	Unternehmer, GroNaS GmbH
	▷ Gründung der GroNaS GmbH

2.1.3 Stefan Fritzsche

1985	geb. 22.8.1985, Leipzig
2004	Abitur, Brandis
2005 - 2011	Studium Diplom-Sportingenieur, Otto von Guericke Universität Magdeburg
	▷ Spezialisierung auf integrierte Produktentwicklung
2011 - 2014	Projekt- und Serviceingenieur, ST Sportservice GmbH
	▷ Mitarbeit an zwei Olympischen Spielen und mehreren internationalen Entwicklungsprojekten im Sport
	▷ Leitung von Projektteams bis 15 Personen
2014 - 2015	Weiterbildung zum IPMA Projektmanager Level-D
2015 - 2020	B2B Vertrieb Ostdeutschland, Mizuno Corporation
2019 - 2022	Masterstudium Energiemanagement (berufsbegleitend)
seit 2019	Kommunikation und Akquise, GroNaS GmbH
seit 2020	Account Manager EVU/Industrie bei e2m
seit 2021	Unternehmer, GroNaS GmbH
	▷ Gesellschafter der GroNaS GmbH

2.2 Patente, Lizenzen, Schutzrechte

Die GroNaS GmbH bzw. ihre Gründer sind Inhaber von drei Patentanmeldungen und einem bereits erteilten Patent.

- Patentanmeldung „Speicherwerk für Elektroenergie auf Basis der Natrium-Schwefel-Zelle“
  DE 10 2011 110 843 A1
  Inhaber der Anmeldung: Johannes Werner
- Erteiltes Patent „Bewehrte, Natriumionen leitende Festelektrolytmembranen und ihre Herstellung“
  DE 10 2012 013 921 B4
  Inhaber der Anmeldung: GroNaS GmbH
- Erteiltes Patent „Großer Energiewandler auf Basis der Natrium-Schwefel-Br ennstoffzelle“
  DE 10 2012 021 151 B3
  Inhaber des Patents: GroNaS GmbH
- Patentanmeldung „Betriebssicherer Natrium-Schwefel-Energiewandler“
  angemeldet am 17.5.2013
  DE 10 2013 008 031 A1
  Inhaber der Anmeldung: GroNaS GmbH

2.3 Natrium und Schwefel

2.3.1 Rohstoffpreise und Verfügbarkeit

Natrium und Schwefel sind als Energieträgermaterialien für die Speicherung von Elektroenergie hervorragend geeignet. Der energetische Wirkungsgrad der Speicherung ist hoch, die spezifische Energie (Energiemenge, die man mit einem Kilogramm Material speichern kann) ausreichend, bei den Umwandlungen treten keine Materialverluste auf und die Speicheranlage ist langlebig.

- Systemwirkungsgrad technisch relevanter Konstruktionen mit Akkuzellen,umfassend Ein- und Ausspeicherung sowie Stromrichtung: bis 90%
- spezifische Energie: 0,755 kWh/kg
  1 kg Speichermaterial = 0,32 kg Natrium + 0,68 kg Schwefel.
  Um eine Kilowattstunde Elektroenergie zu speichern, braucht man 0,43 kg Natrium und 0,895 kg Schwefel.

Als spezifische Energie ist hier der für die Energiespeicherung in großen stationären Systemen relevante Nettowert (Quotient aus Energiemenge und Masse an Natrium und Schwefel) angegeben. In den 70er und 80er Jahren wurde die Verwendbarkeit des Natrium-Schwefel-Hochtemperaturakkumulators für Elektrofahrzeuge geprüft. Für diesen Anwendungsfall ist der Bruttowert (inklusive der Masse des Gehäuses und weiterer Komponenten der Batterie) interessanter. In den meisten Publikationen (z.B. Wikipedia) ist dieser Bruttowert (ca. 0,26 kWh/kg) angegeben.
Für die Speicherung der Energiemenge, die 200 große Windturbinen von je 5 MW bei voller Leistung in zwei Wochen produzieren (336 GWh), braucht man 142000 t Natrium und 303000 t Schwefel. Diese Menge passt in zwei zylindrische Tanks von je 100 m Durchmesser und 20 m Höhe.
Natrium und Schwefel gehören zu den Hauptbestandteilen der Erdkruste und sind zu relativ geringen Preisen verfügbar. Auch wenn man die gesamte Elektroenergieproduktion der Erde über Monate mit Natrium und Schwefel als Energieträgermaterialien speichern würde, wäre die Verfügbarkeit von Natrium und Schwefel nicht davon beeinträchtigt.

Schwefelhalden bei Fort McMurray

Steinsalzabbau in Bernburg

Abbildung 3.1

Schwefel kommt zum Einen in großen natürlichen Lagerstätten vor, zum Anderen fallen bei der Entschwefelung von Erdöl und Erdgas große Mengen davon an. Der Schwefel von Raffinierien

in der Nähe hoch industriealisierter Gebiete wurde in der Regel von der chemischen Industrie aufgekauft und verwertet. Insgesamt fiel jedoch in den letzten Jahrzehnten ein Mehrfaches der benötigten Menge bei der Entschwefelung an. Die Überschüsse vieler, weiter entfernt stehender Raffinerien wurden auf riesigen Halden gesammelt.

Abschätzung der Kosten für die Beschaffung von Schwefel.
typische Preise von Schwefel (Rohstoffbörse)[27]

Zeitpunkt	*Preis $/t*	*Preis €/t*	*spezifischer Preis*[28] *€/kWh*
01/2010	*30*	*21,4*	*0,019*
11/2010	*150*	*107,1*	*0,096*

Natrium ist als Bestandteil des Steinsalzes in noch größeren Mengen als Schwefel verfügbar. Für die Energiespeicherung wird metallisches Natrium benötigt. Es wird durch Elektrolyse einer Salzschmelze hergestellt. Da Steinsalz als harmloses Massengut viel einfacher zu transportieren ist als metallisches Natrium, sollte die Herstellung von Natrium am Ort des Speicherwerks erfolgen. Die Herstellung von Natrium aus Natriumchlorid ist energieaufwändig. Ein Drittel dieser Energie geht jedoch nicht verloren, sondern ist sozusagen im metallischen Natrium gespeichert und wird bei der ersten Energieentnahme aus dem Speicherwerk wieder frei.

Abschätzung der Kosten für die Beschaffung von Natrium.
Salz (NaCl):

Zeitpunkt	*Preis $/t*	*Preis €/t*	*spezifischer Preis €/kWh*
2006	*146*	*104,2*	*0,114*
2010	*170*	*121,4*	*0,132*

Elektroenergie:
Für die Herstellung von 1,0905 kg Natrium mit einem Wirkungsgrad von 70% werden 3,03 kWh Elektroenergie benötigt. Ergebnis unter Berücksichtigung der im metallischen Natrium verbleibenden Energiemenge.

Bei einem Strompreis von 0,07 €/kWh:	*0,141 €/kWh*

Kalkstein für die Chlorentsorgung:

Zeitpunkt	*Preis $/t*	*Preis €/t*	*spezifischer Preis €/kWh*
2006	*8*	*5,7*	*0,013*
2010	*10*	*7,1*	*0,017*

Wasserstoff für Chlorentsorgung (aus Erdgas):

Bei einem Gaspreis von 2,766 €/MMBTU (09/2011):	*0,0098 €/kWh*

[27] USGS-Angaben, umgerechnet zum damaligen Euro/Dollarkurs von 1/1,4:
[28] Preis, der für die Bereitstellung einer Speicherkapazität von 1 kWh nötig ist

Bei der Natrium-Elektrolyse fällt Chlor an. Im günstigsten Fall kann dieses Chlor an die chemische Industrie verkauft werden. Im weniger günstigen Fall müsste man es mit billigem, aus Erdgas gewonnenem Wasserstoff zu Salzsäure umsetzen und diese mit Kalkstein neutralisieren. Lagerung und Entsorgung von dabei entstehendem Kalziumchlorid sind unproblematisch.

Kosten der Energieträgermaterialien, gesamt mit Inflationskorrektur (2010 - 2024, 36,8%)

Material	*spez. Bedarf kg/kWh*	*Preis, €/kWh (optimistisch)*	*Preis, €/kWh (pessimistisch)*
Natrium	*0,429*	*0,285*	*0,410*
Schwefel	*0,895*	*0,026*	*0,131*
Summe:	*1,324*	*0,311*	*0,541*

Die Energieträgermaterialien werden nicht verbraucht und altern nicht (weil sie immer wieder in den Elementzustand transformiert werden). Enthält eine Energiespeicheranlage eine große Menge davon, stellt diese, sofern diese Art Speichertechnologie auch nach der Abschreibung zur Anwendung kommt, einen Vermögensgegenstand von erheblichem Wert dar.

2.3.2 Natrium-Schwefel-Zelle

Als „Elektrochemische Zelle“ wird in der Chemie eine Anordnung von zwei durch einen Elektrolyten getrennten Elektroden bezeichnet. Chemische Reaktionen sind ganz allgemein gesehen, immer auch elektrische Vorgänge, denn bei ihnen findet ein Elektronentransfer statt. Dieser erfolgt bei „normalen“ chemischen Reaktionen aber direkt zwischen den beteiligten Molekülen oder Atomen und lässt sich deswegen nicht technisch als „Strom“ nutzen. Findet man jedoch einen „Elektrolyten“, also ein Medium, das Elektronen nicht leitet, jedoch für Ionen einer der Reaktionspartner durchlässig ist, wird dies möglich. In einer elektrochemischen Zelle reagieren die Materialien, aus denen die Elektroden bestehen, miteinander, und die dabei umgesetzte Energie kann als elektrischer Strom genutzt werden.
Die Natrium-Schwefel-Zelle ist, verglichen mit vielen bekannteren elektrochemischen Systemen, wie z. B. dem Bleiakkumulator oder Zink-Kohle-Batterien, ungewöhnlich aufgebaut. Während in den meisten anderen elektrochemischen Zellen feste Elektroden (Reaktionspartner) durch einen flüssigen Elektrolyten getrennt sind, ist es hier umgekehrt. Eine der Elektroden ist flüssig und ein wichtiger Teil des Elektrolytsystems ist ein Festkörper. Um die negative Elektrode (Natrium) und die schwefelhaltige Komponente des Elektrolytsystems flüssig zu halten und eine Ionenleitung im Festelektrolyten zu ermöglichen muss die Zelle bei hoher Temperatur betrieben werden.
Die negative Elektrode der Na-S-Zelle besteht aus flüssigem Natrium. Der Elektrolyt wird duch zwei Komponenten gebildet. Direkt an die negative Elektrode grenzt der Festelektrolyt. Er besteht aus einem keramischen Material, dem Natrium-β-aluminat. Es ist bei höherer Temperatur für Natriumionen durchlässig. Auf der anderen Seite des Festelektrolyten befindet sich die durch Kohlefasern gebildete positive Elektrode und eine Emulsion aus Natriumsulfiden und flüssigem Schwefel, wenn das System „geladen“, also im energiereichen Zustand ist. Diese Emulsion ist Teil des Elektrolytsystems. Im energiearmen Zustand liegt hier keine Emulsion, sondern ein homogenes Gemisch der Natriumsulfide $\mathrm{Na_2S_2}$ und $\mathrm{Na_2S_4}$ vor.
Um die mit der Zelle erzeugte, elektrische Energie auch nutzen zu können, müssen die eigentlichen Elektroden mit festen Kontakten versehen werden. Als Kontakt für die negative Elektrode

Natrium-Schwefel-Zelle:

Temperatur:	270 – 400 °C
Zellspannung:	ca. 2V
negative Elektrode:	flüssiges Natrium
positive Elektrode:	flüssiger Schwefel/ flüssige Natrium-sulfide
Elektrolyt:	Natrium-β-aluminat (Natrium-Ionen leitendes, keramisches Material)
Kontakt der negativen Elektrode:	Stahl
Kontakt der positiven Elektrode:	Chromlegierung
Leithilfsmittel (Stromsammler)	
in der positiven Elektrode :	Kohlefaserfilz

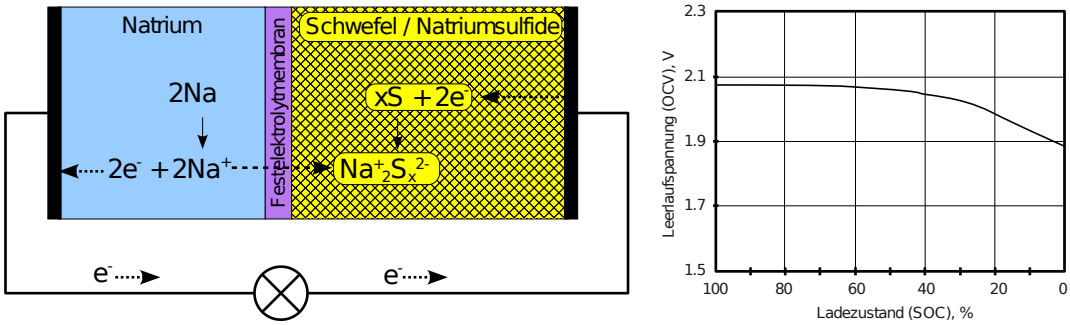


Abbildung 3.2
Vorgänge in der Na-S-Zelle und Spannungsverlauf beim Entladen

dient dabei ein Stück Stahl (weil nicht löslich in flüssigem Natrium). Die Kohlefasern werden mit einem Stück Metall, das einen Überzug aus Molybdän trägt, kontaktiert.

In der Zelle ablaufende Reaktionen:

$2Na + 5S \rightleftarrows Na_2S_5$	Energieumsatz ca. 62%
$2Na + 4Na_2S_5 \rightleftarrows 5Na_2S_4$	ca. 15%
$2Na + 3Na_2S_4 \rightleftarrows 2Na_2S_2 + 2Na_2S_4$	ca. 23%

Der Wirkungsgrad der Natrium-Schwefel-Zelle ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Membranfläche und der entnommenen bzw. eingespeisten Leistung. Mit bisher technisch realisierbaren Festelektrolytmembranen lassen sich folgende Wirkungsgrade erreichen:

Wirkungsgrad kommerziell verfügbarer Zellen (Ladezustandsbereich 60 - 100%) :

Stromdichte im Festelektrolyten, A/m^2	Zellspannung, V	Vefügbare Leistung, kW/m^2	Elektrochemischer Wirkungsgrad η_E (Einzelprozess)
650	2,04	1,33	0,98
1066	2,0	2,13	0,965
2180	1,95	4,25	0,94
3252	1,87	6,08	0,9
4203	1,8	7,57	0,87
6503	1,7	11,05	0,82

2.3.3 Natrium-Schwefel-Brennstoffzelle

Eine Natrium-Schwefel-Brennstoffzelle[29] wird gebildet, wenn man den Raum für die negative Elektrode mit einem Zugang und den für die positive Elektrode mit zwei Zugängen ausstattet.
Im Energieentnahmebetrieb kann dem Raum für die negative Elektrode nun kontinuierlich Natrium zugeführt werden. Natriumatome werden dort zu Natriumionen oxidiert und diffundieren durch die Festelektrolytmembran in den Raum für die positive Elektrode.
Der Raum für die positive Elektrode wird beim Energieentnahmebetrieb durch einen Zugang mit einer Emulsion aus Schwefel und Natriumsulfiden (z. B. 95% Schwefel und 5% Natriumsulfide[30]) oder einer homogenen Mischung von Natriumsulfiden (z. B. Mischung aus Na_2S_5 und Na_2S_4) gespeist. Diese Stoffe nehmen von der Festelektrolytmembran Natriumionen und von den Kohlefasern Elektronen auf und werden dabei reduziert.
Die Reaktionsprodukte verlassen den Raum für die positive Elektrode durch den zweiten Zugang. Eine kontinuierliche Stromerzeugung ist möglich, so lange die Zufuhr der Energie liefernden Materialien anhält und die Reaktionsprodukte abgeführt werden. Im Energieaufnahmebetrieb laufen alle Vorgänge umgekehrt ab.

[29] Der Begriff „Natrium-Schwefel-Brennstoffzelle“ wird hier verwendet, um eine Abgrenzung zur sog. „Redox-Flow-Zelle“ vorzunehmen. Redox-Flow-Zellen arbeiten in der Regel mit wässerigen Lösungen der Redoxpartner. Dies ist beim Na-S-System nicht der Fall.

[30] der Natriumsulfidanteil sorgt für eine ausreichende Leitfähigkeit

2.4 Konventionelle Na-S-Speichertechnologie

2.4.1 Technologiebeschreibung NGK

Das japanische Unternehmen NGK Insulators fertigt mittelgroße Speichermodule mit Natrium und Schwefel als Energieträgermaterialien.

60 kW 1 MW 34 MW

Abbildung 4.1 Speichertechnologie von NGK Insulators

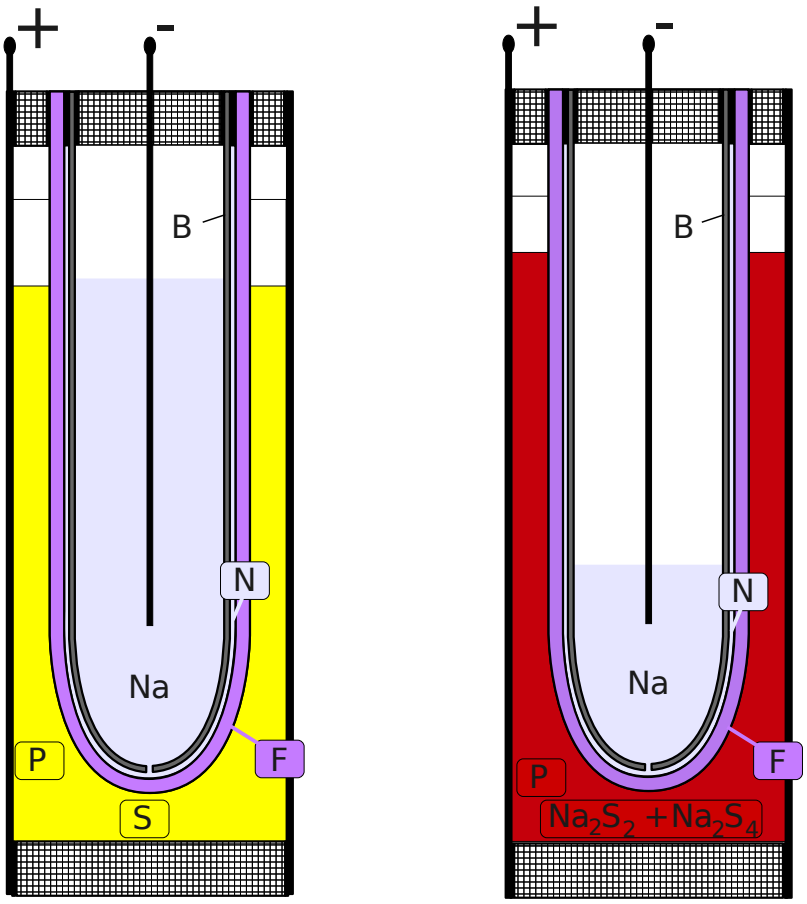
Als Energiewandler werden in ihnen Akkuzellen vom Typ T5 (gleichfalls eine NGK-Entwicklung) verwendet. Dies ist die derzeit größte, kommerziell verfügbare Natrium-Schwefel-Akkumulatorzelle. Je 300 dieser Zellen sind zu einer Batterie von 60 kW zusammengeschaltet. Mehrere dieser Batterien befinden sich dann zusammen mit den dazu gehörigen Ladereglern, Wechselrichtern, Heizelementen sowie Steuer- und Telemetrieeinrichtungen in einem Modul.

Akkumulatorzelle NGK T5	
Betriebstemperatur:	290 – 360 °C
Spannung:	1,7 – 2,04 V
Speicherkapazität:	1.22 kWh
Fläche des Festelektrolyten:	0,094m^2
Abmessungen:	91 x 550 mm

Das Konstruktionsprinzip herkömmlicher Na-S-Akkuzellen, zu denen auch der T5-Akku gehört, ist in **Abbildung 4.2** dargestellt. Die Festelektrolytmembran (F) dieses Akkus ist ein dünnwandiges Rohr aus Natrium-β-aluminat. Es hat an einem Ende einen halbkugelförmigen Abschluss und ist am anderen Ende mit dem Deckel der Zelle verbunden. Der Natriumvorrat ist in einem Sicherheitsbehälter (B) aus Stahl untergebracht. Von dort gelangt es durch ein kleines Loch in den eigentlichen Raum für die neagtive Elektrode, den Spalt zwischen der Festelektrolytröhre (F) und dem Sicherheitsbehälter (B). Diese Anordnung wurde gewählt, damit im Falle eines Bruchs der Festelektrolytmembran nicht der gesamte Natriumvorrat schnell mit dem Schwefel reagieren kann, denn das würde zu enormer Hitze- und Druckentwicklung in der Zelle führen. Der Raum für die positive Elektrode (P, gefüllt mit S oder $\mathrm{Na_2S_x}$) ist der die Festelektrolytröhre umgebende Raum.

2.4.2 Kritische Betrachtung der konventionellen Technologie

Die NGK-Speichermodule sind, bedingt durch die geringe Größe der verwendeten Akkuzellen, sehr kleinteilig aufgebaut. So wird u. a. für jede Batterieeinheit von 60 kW ein Stromwandlermodul benötigt, d. h. 16 Stromwandler pro MW. Damit geht ein vergleichsweise großer



P: Raum für die positive Elektrode, gleichzeitig Vorrat an Schwefel/Natriumsulfiden
B: Vorratsbehälter für Natrium
F: Festelektrolytmembran
N: Raum für die negative Elektrode (Spalt zwischen B und F)

Abbildung 4.2 konventionelle Akkuzelle im Längsschnitt, ge- und entladener Zustand

Fertigungsaufwand einher (bei der Entwicklung des oben beschriebenen Zellendesigns in den 70er und 80er Jahren stand der Anwendungsfall „Elektromobilität“ im Vordergrund. Für diese Anwendung ist die Auslegung des Energiespeichers als Batterie kleiner Zellen akzeptabel).
Das Konstruktionsprinzip mit der einseitig befestigten, als Festelektrolytbauteil dienenden Keramikröhre dürfte einer der Gründe sein, warum diese Art Zellen nur in kleinen Dimensionen gefertigt werden kann. Die Festelektrolytmembran muss möglichst dünn sein, damit ein guter Wirkungsgrad und eine, auf die Membranfläche bezogen, hohe Leistung erreicht werden. Vergrößert man die Zelle bei gleich bleibender Wandstärke der Festelektrolytmembran, wird diese immer fragiler.
Am Kopf der Zelle ist eine gasdichte Verbindung erforderlich. Anderenfalls würde Luft in den oberen Bereich des Raums für die negative Elektrode (den Spalt zwischen Festelektrolytmembran und Sicherheitsbehälter) eindringen. Bei fortschreitender Entladung würde das Natrium dann nicht mehr bis ganz nach oben steigen und die wirksame Membranfläche, damit auch die Leistung also immer kleiner werden.

Um die Festelektrolytröhre im Zellendeckel zu befestigen und diese Stelle gasdicht zu verschließen, kommt ein Glaslot zum Einsatz. Wegen der Schwierigkeiten, die thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Glaslots und der zu verbindendne Keramikbauteile über einen größeren Temperaturbereich (der bei der Herstellung des Akkus durchlaufen werden muss) anzugleichen, kommt es wahrscheinlich auch durch dieses Konstruktionsmerkmal zu einer Begrenzung der Maximalgröße.

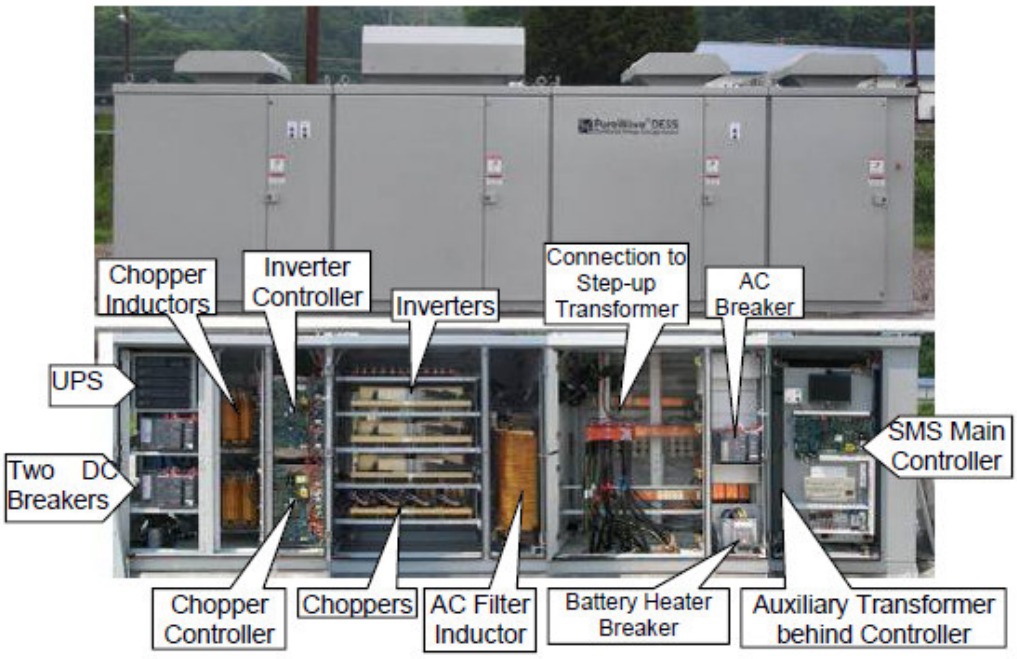


Abbildung 4.3 Ein NKG-Modul besteht aus sehr kleinen Komponenten.

Die Speichermodule von NGK Insulators erreichen weiterhin nicht den Wirkungsgrad, den das elektrochemische System und die elektrotechnische Ausstattung eigentlich gestatten würde[31]. Er ergibt sich als Produkt der elektrochemischen Wirkungsgrade des Ladens (η=0,97), des Entladens(η=0,97), dem des Wechselrichters(η=0,98) und des Ladereglers (η=0,98). Weil die NGK-Module nur mäßig gut wärmeisoliert sind, muss immer wieder zugeheizt werden, damit die Betriebstemperatur gehalten werden kann. Der dazu erforderliche Energieverbrauch hat zur Folge, dass der praktische Wirkungsgrad deutlich kleiner ist.

- ▷ Elektrotechnisch-elektrochemisch möglicher Wirkungsgrad: 85 - 90%
- ▷ Wirkungsgrad im praktischen Betrieb: 75 - 80%

Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Stromdichte in den Akkuzellen auf den recht geringen Wert von ca. 1000 A/m^2 begrenzt werden muss. Eine weitere Erhöhung der Stromdichte hätte zur Folge, dass der in geschlossenen Zellen auftretende Kristallbildungsprozess[32] verstärkt würde. Die Lebensdauer der Anlage würde sich dadurch deutlich verkürzen. Bei einer Stromdichte von 1000 A/m^2 stellen die Zellen eine Leistung von ca. 2 kW/m^2 bereit. Eine Erhöhung der Leistung ist nur durch die Installation von weiterer Festelektrolytmembranfläche (also weiteren Akkuzellen) möglich. Die geringe Maximalstromdichte in den Akkuzellen ist

[31] **http://www.xcelenergy.com/staticfiles/xe/Corporate/Renewable Energy Grants/Milestone 6 Final Report PUBLIC.pdf**

[32] s. **Anhang 2.6, „Lebensdauer von Na-S-Speicheranlagen“**

einer der Gründe, durch die der im Vergleich zu anderen Kraftwerksanlagen recht hohe Wert der spezifischen Ivestition von ca. 1500 €/kW_i zu Stande kommt.

2.4.3 Anlagenpreis NGK-Technologie

Laut einem bekannt gewordenen Ausschreibungsergebnis[33] können für ein großes NGK-Speicherwerk die in Tabelle aufgeführten Parameter veranschlagt werden:

Daten eines großen Speicherparks[35] mit NGK-Modulen

Standort; Investor:	Dubai, VAE; Rubenius (amplex)
installierte Leistung:	330 MW
Speicherkapazität:	1,98 GWh (330MW für 6h)
Energieträgermaterial:	ca. 3000 t (1000 t Na + 2000 t Schwefel) in 1,6 Mio Akkuzellen
Lebensdauer:	4500 Vollzyklen
Auslastung im realen Betrieb:	Im Angebot wurde eine Lebensdauer von 12 - 15 Jahren zugesichert. Bei 4500 Ladezyklen entspricht das einer Auslastung von ca. 50%.
Kaufpreis:	514 Mio € (720 Mio $, 2009)
Anteil für Energieträgermaterial:	ca. 0,8 Mio €
kumulierte Inflation (2009 - 2024):	37,2%
spezifische Investition, bezogen auf die installierte Leistung[34]:	2140 €/kW_i
spezifische Investition, bezogen auf die Speicherkapazität[34]:	357 €/kWh

Installierte Leistung und Speicherkapazität stehen bei der NGK-Technolgie in einem fixen Verhältnis von 1:6 (1 kW_i / 6 kWh, spezifische Speicherkapazität: 6 h). Beim kontinuierlichen Betrieb bei maximaler Leistung hat die Anklage also nach jeweils 6 Stunden die maximal mögliche Energiemenge aufgenommen oder abgegeben.
Wegen der recht hohen spezifischen Investition (bezogen auf die Speicherkapazität) ist die Technologie nur für Anwendungsfälle, bei denen eine schwankende Versorgungs- oder Abnahmeleistung im Rahmen von einigen Stunden ausglichen wird, bezahlbar.

[33] **http://energystoragenews.com/NGK Insulators Sodium Sulfur Batteries for Large Scale Grid Energy Storage.html**
[34] mit Inflationskorrektur 2009 - 2024
[35] geplant, aber nicht realisiert

Anwendungsfall	kurzfristiger Leistungsausgleich	mitelfristiger Leistungsausgleich
erforderliche Energieaufnahme und -abgabedauer	6 h	14 d (336 h)
Investition pro kW installierter Leistung	2.140 €	2.140 €
Investition, bezogen auf die beim Anwendungsfall maximal auftretende Leistung	2.140 €	119.840 €
Kaufpreis einer Referenzanlage für Anwendungsfall mit 20 MW	43 Mio €	2.397 Mio €

Tabelle 4.1 Anlagenkosten für Anwendungsfälle mit geringer und hoher Speicherkapazität bei Verwendung der Module von NGK Insulators

2.5 Neuartige Na-S-Speichertechnologie

2.5.1 Technologiebeschreibung GroNaS

2.5.1.1 Energiewandlerzelle

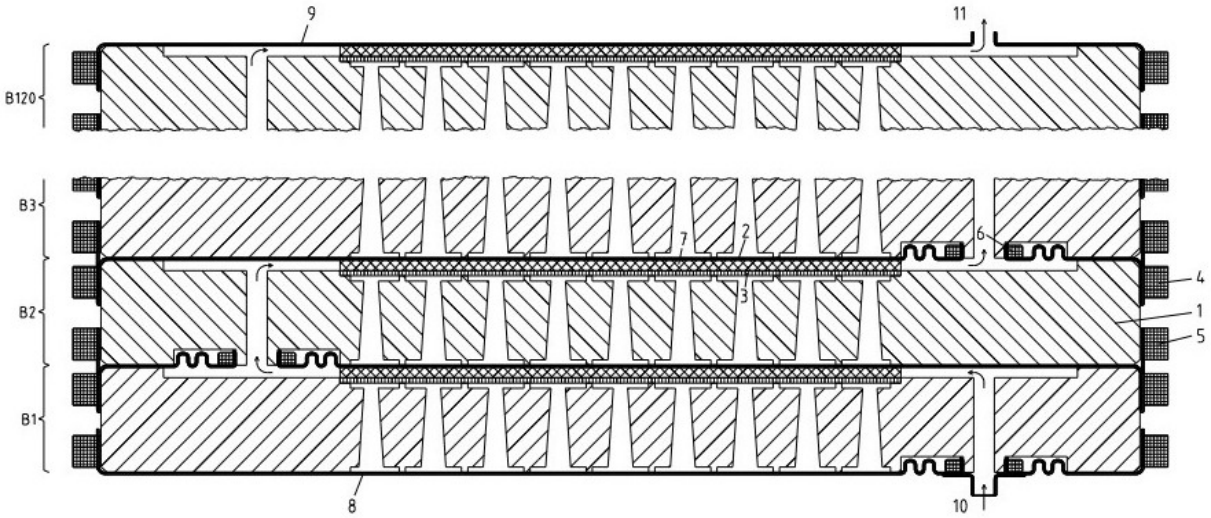


Abbildung 5.1 Schnitt durch einen Verbund von GroNaS-Energiewandlerzellen, älterer

Eines der Schlüsselelemente des GroNaS-Konzepts besteht in dem zum Patent angemeldeten Energiewandler.
Eine Energiewandlerzelle des GroNaS-Designs hat die Form einer flachen runden Scheibe. Diese Auslegung der Zelle erlaubt es, den gesamten Energiewandler als Zellenstapel zu gestalten und die Kontaktierungen beider Elektroden als gemeinsame Bipolarplatte auszuführen.
Die Räume für die positive Elektrode sind miteinander vekettet. Im Energieabgabebetrieb wird Schwefel in die unterste Zelle des Stapel eingespeist und das Reaktionsprodukt (Natriumsulfide) verlässt die oberste Zelle. Im Energieaufnahmebetrieb ist die Strömungsrichtung umgekehrt.
Der flüssiges Natrium enthaltende Raum für die negative Elektrode einer jeden Energiewandlerzelle hat einen Anschluss für die Zu- oder Ableitung von Natrium. Jede Verbindungsleitung zum gemeinsamen Natrium-Tank führt zunächst in eine einfache, gleichfalls zu Patent angemeldete Einrichtung, die flüssiges Natrium durchlässt, ohne das dadurch eine elektrische Verbindung entsteht. Sie dient der Getrennthaltung der elektrischen Potenziale, ohne die eine Reihenschaltung und somit die Erzeugung einer ausreichenden Spannung nicht möglich wäre.
Im älteren Entwurf der Energiewandlerzelle wurde noch eine plane Festelektrolytmembran verwendet.
Im weiter entwickelten, neueren Entwurf ist die Festelektrolytmembran jedoch nicht mehr als ebenes Bauteil ausgeführt. Dadurch konnte die Membranfläche noch weiter gesteigert werden konnte. Eine GroNaS-Energiewandlerzelle nach dem aktuellen Design ermöglicht den Bau einer Energiewandlerzelle mit dem hundertfachen der Leistung von konventionellen Natrium-Schwefel-Akkuzellen.

- ▷ Durchmesser: 0,8 -1,2 m
- ▷ Höhe: 6 - 12 cm
- ▷ Spannung: 2 V
- ▷ Leistung: 10 - 20 kW

Eine GroNaS-Energiewandlerzelle besteht, inklusive der Einrichtung zur Potenzialtrennung, nur aus ca. 12 unbewegten, einfachen Metall- und Keramikteilen sowie einem keramischen Verbund aus Membranträgerplatte und ca. 300 Membranhülsen. Die Metallteile können konventionell gefertigt werden. Auch für die Membranhülsen gibt es eine etablierte Fertigungstechnologie, jedoch müssen bestehende Produktionsanlagen für ähnliche Hülsen aus gewöhnlichen keramischen Materialien an den Spezialwerkstoff Natrium-β-aluminat angepasst werden. Alle Membranhülsen werden gemeinsam in einem Arbeitsschritt mit der Trägerplatte verbunden.
Die Leistungssteigerung gegenüber herkömmlichen Na-S-Akkuzellen ergibt sich aus der Kombination zweier Effekte:

- ▷ Vergrößerung der Festelektrolytmembranfläche
  (Leistungssteigerung: ca. Faktor 20).
- ▷ Ausnutzen einer höheren Stromdichte. Möglich wird dies, weil die Na_2S_2-Kristallbildung[36] in Folge der erzwungenen Strömung durch den Raum für die positive Elektrode unterbleibt. (Leistungssteigerung: Faktor 2).

Wegen der gesteigerten Leistung einer Energiewandlerzelle und ihrer unkomplizierten Bauweise müssen für für die Energiewandlerfunktion im Speicherwerk weit weniger Bauteile produziert und montiert werden, als bei einem Design des Speicherwerks als Batterie von herkömmlichen, kleinen Akkuzellen.

- ▷ herkömmliche Na-S-Speichertechnologie: ca. 35000 Bauteile/MW_i
- ▷ GroNaS-Technologie: ca. 1200 Bauteile/MW_i

[36] s. a. **Anhang 2.6, „Lebensdauer von Na-S-Speicheranlagen“**

2.5.1.2 Energiewandlerkaskade

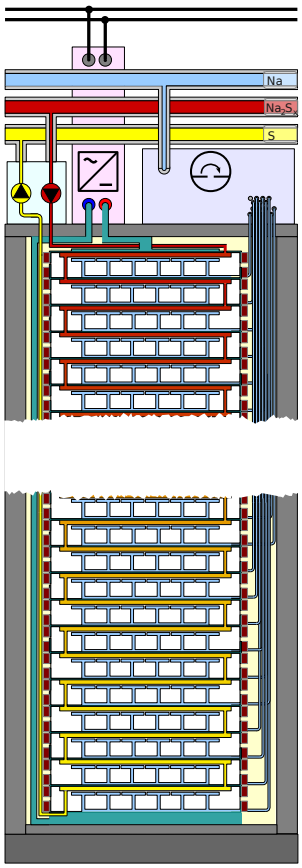


Abbildung 5.2 Energiewandlerkaskade (Stack)

Eine einzelne Energiewandlerzelle stellt nur eine Spannung von 2 V bereit. Um einen Wechselrichter betreiben zu können, braucht man aber ein Vielfaches davon. Deshalb wird eine stapelförmige Kaskade aus ca. 100 Zellen gebildet. Die Energiewandlerzellen sind dabei elektrisch und strömungstechnisch in Reihe geschaltet. Die stapelförmige Anordnung von Energiewandlern mit Bipolarplatten hat den Vorteil, dass der elektrische Widerstand zwischen den Energiewandlern wegen der kurzen Abstände minimal wird. Des weiteren entsteht so kein Fertigungsaufwand für die Herstellung widerstandsarmer elektrischer Verbindungen (durch die Kaskade fließt ein Strom von bis zu 10000 A - dafür wären sonst relativ aufwändige elektrische Kontakte notwendig).

- ▷ Höhe: 10 - 20 m
- ▷ Durchmesser: 2 - 3 m
- ▷ Spannung: ca. 200 V
- ▷ Leistung: ca. 2 MW
- ▷ Einspeisedruck Schwefel/Natriumsulfide: $<$ 5 bar
- ▷ Natrium-Druck: $<$ 6 bar

Im Energieentnahmebetrieb wird die Kaskade mit Schwefel gespeist. Die Flüssigkeit durchströmt nachfolgend alle Energiewandler und nimmt dabei Natrium auf. Der Durchfluss durch die Kaskade wird so gesteuert, dass am Ende der vollständige Umsatz des Energieträgermaterials erfolgt ist und ein 1:1-Gemisch von $\mathrm{Na_2S_4}$ und $\mathrm{Na_2S_2}$ die Kaskade verlässt.
Weil flüssiges Natrium selbst ein sehr guter elektrischer Leiter ist, können die Energiewandler nicht aus einer gemeinsamen Leitung mit Natrium versorgt werden. Im Maschinenhaus, am Kopf der Kaskade befindet sich deshalb eine Einrichtung zur Potenzialtrennung. Von ihr führt zu jeder der scheibenförmigen Energiewandlerzellen eine Leitung für flüssiges Natrium. Es werden nur dünnwandige Röhren von geringem Durchmesser benötigt, denn es herrscht dabei nur ein Druck von höchstens 10 bar, und die Fördergeschwindigkeit von Natrium liegt nur bei ca. einem Kubikzentimeter pro Sekunde.
Im Energieaufnahmebetrieb erfolgt, unter Umkehr der Strömungsrichtung, der Rückumwandlung von Natriumsulfiden in Schwefel.
Die Energiewandlerkaskaden werden in Betonröhren, welche in die Erde gesenkt sind, gestellt. Zur Erhöhung der Brandsicherheit (im Falle eines Lecks in einer der Natrium-Versorgungsleitungen) kann der verbleibende Raum zwischen der Wand der Betonröhre und der Kaskade mit Sand gefüllt werden.

2.5.1.3 Speicherwerk

Ein GroNaS-Speicherwerk besteht im Wesentlichen aus zwei wärmeisolierten Tanks und einem Maschinenhaus (M). Im Maschinenhaus befinden sich die Energiewandlerkaskaden (W) und elektrische und chemisch-verfahrenstechnische Funktionseinheiten. Des weiteren gehören noch eine Schutzgasanlage (G), eine Kühleinrichtung (K), ein Hochspannungsfeld mit Transformator (T) und Schalteinrichtungen sowie den Steuerungs- und Kommunikationseinrichtungen zum Speicherwerk.
In **Abbildung 5.3** ist eine ältere Vorstellung des Speicherwerks, die durch in die Erde gesenkte Vorratstanks für Natrium und Schwefel gekennzeichnet ist, dargestellt. Das Einsenken in die Erde war zum Erreichen eines besonders geringen Gefahrenpotenzial im Harvariefall vorgesehen. Neueren Erkenntnissen zu Folge kann ein gleichwertiges, geringes Gefahrenpotenzial auch mit oberirdischen Tanks erreicht werden. Die Baukosten wären in diesem Fall deutlich geringer.
Ein Tank ist für flüssiges Natrium vorgesehen. Er ist voll, wenn das Speicherwerk mit der maximalen Energie geladen ist und leer, wenn das Speicherwerk die gesamte Energie abgegeben hat. Im Energieabgabebetrieb wird Natrium zu den Energiewandlerkaskaden gepumpt. Beim Energieaufnahmebetrieb bildet sich Natrium in den Energiewandlern und wird zurück in den Tank gefördert.
Der zweite Tank enthält Schwefel, wenn Energie im Speicherwerk gespeichert ist und Natriumsulfide, wenn die Energie abgegeben wurde. Zur Energieerzeugung wird Schwefel im oberen Bereich des Tanks entnommen und durch die Energiewandlerkaskaden gepumpt. Dabei wandelt er sich unter Aufnahme von Natrium, in Natriumsulfide um. Nach Verlassen der Kaskade werden die Natriumsulfide unten in den selben Tank eingespeist, aus dem der Schwefel entnommen wurde. Dieser Tank ist also gleichzeitig der Vorratsbehälter für die energiereiche und die energiearme Form der positiven Elektrode. Das ist möglich, weil Schwefel und Natriumsulfide nicht mischbar sind, so wie Öl und Wasser. Unten im Tank befindet sich das Natriumsulfidgemisch mit der größeren und darüber der Schwefel mit der kleineren Dichte.
Eine Kühleinrichtung für die Energieträgermaterialien ist erforderlich, weil in den Energiewandlern mehr Abfallwärme entsteht, als zur Aufrechterhaltung der Betriebstemperatur benötigt wird[37].

2.5.2 Anlagenpreis und Speicherkosten, GroNaS-Technologie

Das Hauptkriterium für die Sinnhaftigkeit einer Investition in die Entwicklung der GroNaS-Technologie ist der zukünftig erreichbare Anlagenpreis, denn er hat den größten Einfluss auf die Speicherkosten (den Betrag, der erforderlich ist, um dem Speicher eine Energiemenge von einer Kilowattstunde zu entnehmen).
Ein GroNaS-Speicherwerk besteht zum einen aus am Markt verfügbaren, zum anderen aus neuartigen Komponenten. Zu den ersteren gehören z. B. elektrotechnischen Anlagen und Gebäude zu den letzteren vor allem der elektrochenmische Energiewandler. Für die bereits am Markt verfügbaren Komponenten lässt sich ein Preis angeben. Für die neuartigen Komponenten ist dies leider nur bedingt möglich. Immerhin wurde jedoch der Preis des im Energiewandler vorgesehenen Festelektrolytbauteils bereits vor Jahren ermittelt. Dieses Festelektrolytbauteil, eine Art Hülse aus Natrium-β-aluminat, einem keramischen Spezialwerkstoff, ist mutmaßlich die teuerste Komponente des Energiewandlers.

[37] s. a. **Anhang 2.8, „Wirkungsgrad und Wärmehaushalt“**

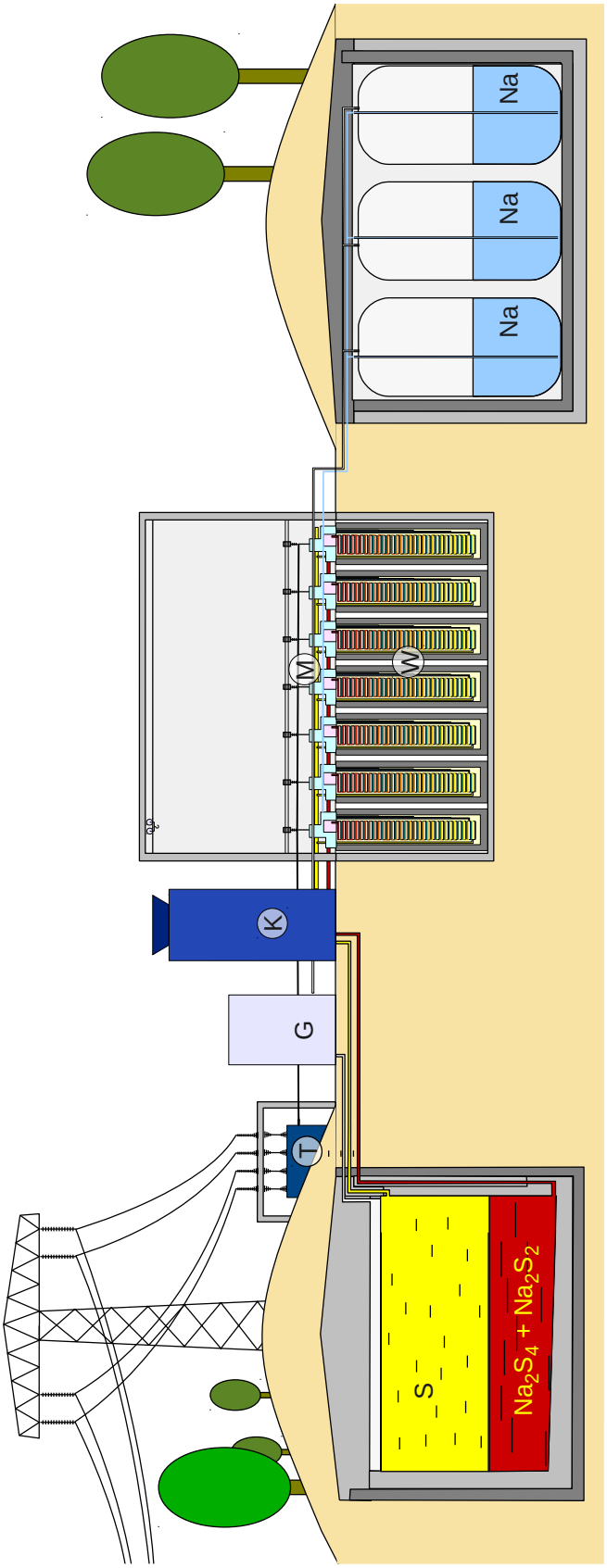


Abbildung 5.3 GroNaS-Speicherwerk

Bei einem GroNaS-Speicherwerk sind Leistung und Speicherkapazität unabhängig voneinander skalierbar. Daraus ergibt sich je ein leistungs- und ein kapazitätsabhängiger Kostenbestandteil.

2.5.2.1 Leistungsabhängige Kosten

- **elektrochemische Energiewandler:** Eine Energiewandlerzelle besteht aus mehreren Metallbauteilen sowie einer keramischen Trägerplatte und den in sie eingesetzten Membranhülsen aus Natrium-β-aluminat. Diese Membranhülsen sind, vom Material her, die anspruchsvollsten Bauteile des Energiewandlers. Sie sind derzeit nicht als Standardteile erhältlich, können jedoch in einer Pilotanlage des Fraunhofer IKTS in Hermsdorf hergestellt werden.
  Der Herstellungspreis der Hülsen wurde in einer industrienahen Studie, durchgeführt bei der Friedrichsfeld GmbH[38] in Mannheim, bereits 1980 ermittelt. Die Studie kam damals zu dem Ergebnis, dass die Hülsen zum Preis von 9 DM, das sind bei Berücksichtigung der Inflation zum derzeitigen Zeitpunkt (2024) ca. 11 €, hergestellt werden können.
  Soll ein Gesamtwirkungsgrad von 75% erzielt werden, sind pro kW installierter Leistung 13 Membranhülsen erforderlich. Dies entspricht einem Preisanteil von 143 €/kW_i. Soll ein höherer Wirkungsgrad erzielt werden, sind (pro kW) mehr Membranhülsen erforderlich. Für einen Wirkungsgrad von 90% stiegt der Preisanteil für die Membranhülsen auf 539 €/kW_i.
  Durch Produktivitätssteigerungen in den Jahren seit 1980 konnte der spezifische Preis für Bauteile aus Natrium-β-aluminat deutlich gesenkt werden. Wir gehen deshalb davon aus, dass der spezifische Preis von 539 €/kW_i ausreichend ist, um auch die weiteren, weitaus kostengünstigeren Bauteile des Energiewandlers anzufertigen und ihn zusammenzusetzen.
- **Elektrotechnik (Hochspannungsanlage und Stromrichter):** Als Basis für die Kostenschätzung dienen hier zum Einen das bekannt gewordene Ergebnis einer Ausschreibung für eine Gleichspannungs-Kurzkopplung[39,40], zum Anderen der Kaufpreis für eine große (4800 kVA) Stromrichtereinheit für eine Batterie einer USV-Anlage.
  Die genannte Gleichspannungs-Kurzkopplung besteht aus zwei fast identischen Einheiten aus Hochspannungstrafo, Stromrichtern und einem Steuermodul sowie den diese Komponenten umschließenden Gebäuden. Jede dieser Einheiten ist ein Äquivalent zu der im GroNaS-Speicherwerk benötigten Hoch- und Mittelspannungstechnologie, so dass sich aus dem Ausschreibungsergebnis von 60 Mio. US-Dollar für eine Anlage mit 220 MW installierter Leistung ein auf derzeitige (2024) Preise umgerechneter Kostenbeitrag von 145 €/kW_i ergibt[41].

2.5.2.2 Speicherkapazitätsabhängige Kosten

Die kapazitätsabhängige Kosten werden derzeit auf insgesamt 0,94 €/kWh geschätzt. Darin enthalten sind folgende Bestandteile:

- **Energieträgermaterial:** Als Rohstoffpreise werden in den Schätzungen die oberen, pessimistischen Werte des Schwankungsbereichs der Preise an den Rohstoffbörsen verwendet. Diese ergeben einen Preis von ca. 0,54 €/kWh.

---

[38] Dieses Unternehmen heißt heute FRIATEC.
[39] **http://news.thomasnet.com/companystory/ABB-Awarded-60-Million-HVDC-Order-to-Support-Grid-Reliability-in-Texas-853518**
[40] **http://www.abb.com/industries/ap/db0003db004333/3AB2736FA99B8203C1257A6100474870.aspx?**
[41] Dollarkurs 8/2012: 1 € = 1,25 $, kumulierte Inflation 2012 - 2024: 32%

▷ **Tankanlage:** Eine vorläufige Recherche nach Kaufpreisen von am Markt verfügbaren Tankanlagen hat einen Preis von ca. 0,4 €/kWh ergeben.

2.5.2.3 Anlagenkostenschätzung

Für die Investition in ein GroNaS-Speicherwerk ergeben sich damit sich damit folgende Kosten:

Auslegung					
Systemwirkungsgrad bei Maximalleistung(%)	75	75	80	85	90
spezifische Speicherkapazität (h)	168	336	336	336	336
Stromdichte im Festelektrolyten (A/m^2)	4800	4800	3600	2400	1300
Anzahl Festelektrolybauteile pro kW_i	13	13	17	26	49
Leistungsabhängige Kosten					
Festelektrolybauteile (€/kW_i)	143	143	187	286	539
Elektrotechnik und Bauten (€/kW_i)	145	145	145	145	145
Speicherkapazitätsabhängige Kosten					
Energieträgermaterial (€/kW_i)	91	181	181	181	181
Tankanlage (€/kW_i)	67	134	134	134	134
Summe der geschätzten spezifischen Kosten (€/kW_i)	446	603	647	746	999

Tabelle 5.1 Geschätzte Anlagenkosten für GroNaS-Speicherwerke in Abhängigkeit von geforderten Gesamtwirkungsgrad

2.5.2.4 Speicherkosten

Die Summe der Speicherkosten sind sind der Betrag, den es kostet, dem Speicher eine Kilowattstunde Strom zu entnehmen. Da kein Speicher einen Systemwirkungsgrad von 100% hat, gehen in die Berechnung somit auch die Kosten für die Energiemenge ein, die vom Speicher durch Wärmeabgabe verloren wird (Eigenenergiebedarf). Die Speicherkosten bei einem Stromspeicher sind das Äquivalent zu den sog. Stromgestehungskosten eines Kraftwerks. Wird ein Verbund aus Stromerzeugern und Stromspeichern betrieben, ergeben sich die Stromgestehungskosten des Verbunds als Summe der Stromgestehungskosten der beteiligten Stromerzteuger und der Speicherkosten des Speichers. Kommen verschiedene Arten der Stromerzeugung zum Einsatz, müssen die jeweiligen Stromgestehungskosten dabei nach ihren Anteilen im Mix gewichtet werden.
Für folgende Prämissen wurde eine Abschätzung der Speicherkosten für die GroNaS-Technologie und der Stromgesethungskosten eines Verbunds aus einem GroNaS-Speicher mit Solar- und Windkraftwerken vorgenommen: .

- Der GroNaS-Speicher hat eine spezifische Speicherkapazität von 336 h und einen Systemwirkungsgrad von 90%.
- Der Speicher ist direkt an das Höchstspannungsübertragungsnetz angebunden.

- Der Speicher bezieht 1248 Stunden pro Jahr Solarstrom. Als Basis für die Schätzung der Aufnahmezeit dienten die Wetterdaten vom Münchener Flughafen. Dort gab es in den letzten zehn Jahren durchschnittlich 1983 Sonnenstunden. Aus folgenden Gründen wird angenommen, dass der Speicher in 70% dieser Stunden Solarenergie, vor allem aus Freiflächen-PV-Anlagen, über das Netz bezieht: 1) Die gesamte installierte Leistung von PV-Anlagen in Deutschland ist jetzt schon größer als die maximale Lest (2024: 99 GWi). 2) Der Korrekturfaktor von 70% berücksichtigt mehrere negative Einflussfaktoren, so z. B., dass die erste Stunde nach Sonnenaufgang und die letzte Stunde vor Sonnenuntergang nur sehr wenig zur Energieerzeugung beitragen. Der in der Abschätzung verwendete Wert für die Stromgestehungskosten der Freiflächen-PV-Anlagen ist der mittlere Wert für solche Anlagen einer aktuellen Fraunhofer-Studie[42].
- Der Speicher bezieht zusätzlich zum Solarstrom dass nochmals die selbe Menge an Windstrom. Die kumulierte installierte Leistung der Windanlagen lag 2026 bei 63,5 GW und ist somit deutlich kleiner als die der PV-Anlagen, jedoch war die erzeugte Energiemenge ungefähr doppelt so hoch (Wind: 135 TWh, Solar 63 TWh). Der hier angenommene Wert für die Stromgestehungskosten der Windkraftanlagen wurde aus den beiden Mittelwerten für Onshore- und Offshore-Anlagen, gewichtet mit der jeweils produzierten Energiemenge, gebildet.
- Die Kosten für den Energieeigenverbrauch in 10 Jahren das damit verbundene Netzentgelt liegen bei 173 €/kW_i bzw. 165 €/kW_i.
- Der Speicher wird über 10 Jahre abgeschrieben.
- Für die Anlagenkosten wurde ein Wert von 1000 €/kW_i angesetzt. Für die Finanzierung entstehen Kosten in Höhe von 359 €/kW_i durch einen mit 6% verzinsten Annuitätenkredit mit 10-jähriger Laufzeit.
- Im Abschreibezeitraum entstehen Betriebskosten in Höhe von ca. 700 €/kW_i.

Dauer der Energieaufnahme im Abschreibezeitraum	27762 h
Dauer der Energieabgabe im Abschreibezeitraum	24986 h

Kosten für Eigenenergiebedarf	173 €/kW_i
Netzentgeltkosten für Eigenenergiebedarf	165 €/kW_i
Baukosten GroNaS-Speicher mit 336 h spezifischer Kapazität	1000 €/kW_i
Finanzierungskosten	359 €/kW_i
Betriebskosten im Abschreibezeitraum	700 €/kW_i
Gesamte Kosten über den Abschreibezeitraum	2.396 €/kW_i

Speicherkosten	0.096 €/kWh
Gewichtete Stromgestehungskosten Solar- und Windenergie	0.062 €/kWh
Stromgestehungskosten eines Verbunds aus GroNaS-Speichers und Wind- und Solarkraftwerken	0.158 €/kWh

Tabelle 5.2 Speicherkosten eiens GroNaS-Speicherwerks bzw. Stromgestehungskosten eines GroNaS-Solar-Wind-Verbunds

[42] **DE2024_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf**

2.6 Lebensdauer von Na-S-Speicheranlagen

2.6.1 konventionelle Technologie

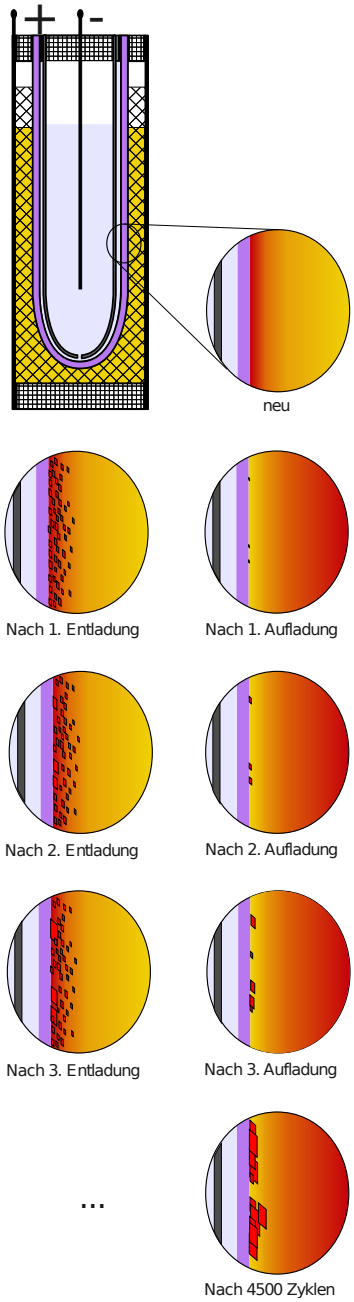


Abbildung 6.1 Kristallbildung in herkömmlichen Na-S-Akkus

Konventionelle Natrium-Schwefel-Akkumulatoren haben bei praxisrelevanten Betriebsbedingungen eine begrenzte Lebensdauer. Die Alterung kommt u. a. dadurch zu Stande, dass sich auf der Seite der Festelektrolytmembran, die mit der positiven Elektrode aus Schwefel und Natriumsulfiden in Kontakt steht, Na_2S_2-Kristalle bilden. Na_2S_2 leitet nur in flüssiger Form den elektrischen Strom, in Kristallform ist es ein Isolator. Durch die Ablagerung der Kristalle auf der Festelektrolytmembran wird die wirksame Oberfläche verkleinert und die elektrischen Parameter (Maximalleistung und Wirkungsgrad) verschlechtern sich.

Der Grund für die Alterung erscheint auf den ersten Blick paradox, denn Na_2S_2 ist kein unbrauchbarer Abfall, sondern eine reguläre Komponente bei den Umwandlungsprozessen im Zuge der Vorgänge der Energiekonversion in der Zelle[43]. Es ist sogar so, dass Na_2S_2 in dem bei Ladungszuständen von 0 - 25% vorliegendem Na_2S_4 löslich ist, wie im Phasendiagramm ausgewiesen wird. Thermodynamisch betrachtet, sollte es diese Kristalle also gar nicht geben.

Den Vorgang der Kristallbildung kann man erst verstehen, wenn man in Betracht zieht, dass Transportvorgänge in der Kammer für die positive Elektrode ausschließlich durch Diffusion zu Stande kommen. Die Flüssigkeit in der Kammer steht und sogar kleine Konvektionsbewegungen werden durch die Anwesenheit des Kohlefaserfilzes unterdrückt. Diffusion ist jedoch ein langsamer Vorgang.

Beim Entladen mit hoher Stromdichte bildet sich nun an der Festelektrolytmembran eine übersättigte Zone, in der Na_2S_2-Kristalle ausfallen. Wegen des eingeschränkten Stofftransports werden die Größten davon beim Laden nicht wieder ganz aufgelöst. Die noch vorhandenen Kristallreste wirken als Kristallisationskeime. Das heißt, dort wo so ein Keim ist, lagert sich beim nächsten Ausbilden der Übersättigungszone bevorzugt weiteres Material in Kristallform ab und wird beim nachfolgenden Laden nun erst recht nicht mehr aufgelöst. Ein sich selbst verstärkender Prozess hat begonnen.

Die kinetisch bedingte Kristallbildung erfolgt vor allem dann, wenn die Zelle schnell, also bei hoher Leistung entladen wird und wenn dabei ein sehr tiefer Ladezustand erreicht wird. Beides ist jedoch wünschenswert: bei höherer Leistung braucht man nicht

[43] s. a. **Anhang 2.3.2 „Natrium-Schwefel-Zelle“**

so viele Energiewandler und bei Ausnutzung besonders tiefer Ladezustände ist die spezifische Energie[44] höher.

Eine durch Kristallbildung beeinträchtigte Akkuzelle ließe sich durch extrem langsames Laden wahrscheinlich wieder regenerieren. „Extrem langsam“ bedeutet im Fachgebiet der Chemie jedoch, dass es sich um einen Unterschied über mindestens eine, meist aber sogar gleich mehrere Größenordnungen handelt. Für einen Ladeprozess zur Regenerierung wäre also ein Vielfaches an Zeit notwendig. Die Anlage ist dann nicht produktiv, die Auslastung sinkt, die Kosten steigen.

2.6.2 GroNaS-Technologie

In den Energiewandlern der GroNaS-Technologie erfolgt der Stoffaustausch durch erzwungene Strömung und ist damit um ein Vielfaches intensiver. Aus diesem Grund findet keine Kristallbildung statt. Die Energiewandler können sogar mit höherer Leistung betrieben und das Speicherpotenzial des Energieträgermaterials vollständig ausgenutzt werden. Eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren wird erreicht.

[44] Energiemenge, die man mit einem Kilogramm Energieträgermaterial speichern kann.

2.7 Sicherheitsaspekte

Ein Elektroenergiespeicherwerk nach dem GroNaS-Konzept arbeitet im Normalbetrieb emissionsfrei. Die Risiken verschiedener Harvariefälle lassen sich durch ein darauf abgestimmtes Design der Gesamtanlage und geeignete konstruktive Maßnahmen auf ein vertretbares Maß begrenzen. Das Gefährdungspotenzial eines GroNaS-Speicherwerks ist vergleichbar mit dem von „normalen“ Chemieanlagen. Nachfolgend einige schwere Störfälle in näherer Betrachtung:

- Natrium-Großbrand
  Die Risiken eines Natrium-Großbrands werden auch von Fachleuten oft überschätzt. Ein Natrium-Brand ist zwar nur mit speziellen Löschmitteln (z. B. Graphitflocken) löschbar, verläuft aber mit weitaus geringerer Verbrennungsgeschwindigkeit als z. B. Kerosinbrände. Grund dafür ist die hohe Verdampfungsenthalpie von Natrium. Sie hat zur Folge, dass unter der Flamme nur eine vergleichsweise geringe Rate an Natrium verdampft und in die Verbrennungszone getragen wird. Natriumbrände haben auf die Umwelt nur geringe Auswirkungen. Als Rauch bildet sich zwar direkt über der Flamme stark ätzendes, aggressives Natriumoxid, dieses reagiert jedoch innerhalb weniger Minuten mit dem in der Luft vorhandenem Kohlendioxid vollständig zu Natriumcarbonat (Soda). Wegen der geringen Gefahr würde man bei einem tatsächlichen Großbrand auf Löschversuche verzichten und einfach abwarten, bis das Feuer ausgebrannt ist.
- Gasexplosion in Folge von Luft- und Wassereintritt in den Natriumtank
  Im Natrium-Tank wird ein Überdruck der Schutzgasatmosphäre ständig aufrecht erhalten. Im Normalbetrieb ist der Zutritt von Luft und Wasser deshalb ausgeschlossen. Bei einem Fehler in der Schutzgasanlage besteht jedoch die Möglichkeit, dass Luft, und wegen der immer vorhandenen Luftfeuchtigkeit damit zugleich also auch Wasser in den Tank eindringt. In diesem Falle fände eine sofortige Bildung von Knallgas und anschließende Zündung dieses explosiven Gemischs statt.
  Gasexplosionen dieser Art laufen als sog. Radikalkettenreaktionen ab. Dabei breitet sich die Detonation durch schnell bewegte, aktivierte Teilchen aus. Diese Detonationsausbreitung kann man durch die Anwesenheit von Kollisionsflächen verhindern. So findet in einem Tank keine Explosion statt, wenn er mit einem offenporigen Material gefüllt ist und sich das Gasgemisch in den Poren befindet. Auch in einer Wabenstruktur mit offenen, miteinander verbundenen Waben findet keine Explosion statt. Das Gasgemisch brennt schlimmstenfalls mit relativ geringer Geschwindigkeit ab. Die dabei frei werdende Energie kann von dem Material, aus dem die Kollisionsflächen bestehen, zum größten Teil aufgenommen werden. Als Material für eine Wabenstruktur im Natriumtank wäre Stahlfolie geeignet.
  Alternativ kann ein Tank allerdings auch so ausgelegt werden, dass er sich im Falle einer Explosion nach oben öffnet und die Druckwelle sich also in eine Richtung ausbreitet, in der sie nur wenig Schaden anrichten kann.
- Schwefel-Großbrand und Gasexplosionen im Tank für Schwefel und Natriumsulfide
  Schwefel wird zu Hunderttausenden Tonnen pro Jahr von der chemischen Industrie verarbeitet. Es existieren aus diesem Grund umfangreiche Erfahrungen, mit Hilfe derer eine risikoarme Manipulation von flüssigem Schwefel möglich ist.
  Der Tank für Schwefel und Natriumsulfide kann mit einem schwimmenden Deckel ausgerüstet werden. Die Bildung einer Gasblase mit einem explosiven Schwefeldampf-Luft-Gemische kann so weitestgehend ausgeschlossen werden. Trotzdem ist es immer noch möglich, dass der Tank komplett zerstört wird, beispielsweise durch einen Flugzeugabsturz. Ein nachfolgender Großbrand, welcher riesige Mengen von giftigem Schwefeldioxid freisetzen würde

kann aber durch eine passende Gestaltung der Tanktasse[45] unterdrückt werden. Man würde sie mit einer Vielzahl von kurzen Schächten versehen. Der flüssige Schwefel würde dann in diese Schächte laufen, dabei abkühlen und erlöschen. Einmal erkaltet, geht keine Gefahr mehr von ihm aus.

- ▷ Natrium- oder Schwefel-Großbrände im Maschinenhaus
  Natrium und Schwefel gelangen aktiv durch Pumpen oder passiv in Folge eines Überdrucks im Schutzgasvolumen in das Maschinenhaus und zu den Energiewandlern. Sollte es also in Folge einer beschädigten Leitung zum Brand kommen, reicht es aus, die Stromzufuhr zu den Förderpumpen zu unterbrechen oder einen Teil des Schutzgases durch Notventile abzulassen. Der Brand kommt dann in Folge fehlender Brennstoffzufuhr zum Erliegen. Weil die Förderpumpen nur geringe Förderraten haben (mehr ist zum regulären Betrieb nicht erforderlich) käme es aber auch beim Versagen der Notabschaltung nicht zu einem unkontrollierbaren, die Umwelt gefährdenden Großbrand.
- ▷ Grundwassergefährdung
  Natrium und Schwefel sind Hauptbestandteile der Erdkruste und gehören zum chemischen Inventar der Biosphäre. Aus diesem Grund existieren natürliche Abbauwege für alle in der Energiespeicheranlage vorkommenden Verbindungen dieser Elemente. Problematisch wäre nur die schlagartige Emission großer Mengen dieser Materialien. Dies lässt sich jedoch durch bauliche Maßnahmen, z.B. eine Stahlspundwand um die Anlage, auf einfache Weise verhindern.

Weitere Fragen zum Umgang mit flüssigem Natrium

- ▷ *Bei Demonstrationen in Chemievorlesungen wird manchmal gezeigt, wie Natrium, Kalium oder Magnesium rasant abbrennen. Wie passt das zu der Aussage, dass Natrium-Großbrände langsam ablaufen?*
  Bei diesen Demonstrationen wird eigentlich nur vorgeführt, dass brennbare Materialien besonders gut brennen, wenn sie in kleine Stücke geteilt sind. Durch Anwendung des Prinzips der Teilung lässt sich jedoch sogar Stahl mit einem Feuerzeug anzünden (man gehe in einen Baumarkt, kaufe etwas Stahlwolle und halte ein Feuerzeug daran). Es lässt sich aus derartigen Experimenten keine Aussage über das Verhalten eines Großbrandes ableiten.
- ▷ *Bei einem Großbrand eines Natrium-Tanks mit 100 m Durchmesser und 20 m Höhe wird durch Oxidation des Natriums eine Energiemenge von rd. 1500 TJ frei wird - bei der Explosion der Atombombe in Hiroshima waren es nur 56 TJ.*
  Eine solche Energiemenge (1500 TJ = 417 GWh) ist etwas ganz alltägliches in der Energiewirtschaft. Es ist ungefähr die Menge, die ein 1000-MW-Kraftwerk bei Vollast in 14 Tagen erzeugt. Natürlich enthält das Material im Tank solch große Energiemengen, das ist schließlich der Sinn der Speicherung. Auf dem Gelände der meisten Erdöl-Raffinerien befinden sich Tankanlagen mit noch größerem Volumen und bei der Verbrennung der darin enthaltenen Substanzen (Erdöl, Diesel, Benzin) würde sogar noch viel mehr Energie frei werden.
  Der Vergleich mit einer Atombombenexplosion ist unsinng, denn dabei wird die ganze Energie in Bruchteilen einer Sekunde umgesetzt. Natrium kann aber gar nicht explodieren, es brennt allenfalls ab. Dabei ist die Verbrennungsgeschwindigkeit sogar deutlich kleiner als bei Kerosin-Bränden.

[45] Eine Tanktasse ist eine Art riesengroßer Untertasse (gewöhnlich aus Beton), auf der der Tank steht.

▷ *Bei einem Brand entstehen trotzdem große Mengen an Na_2O_2, also einem ätzenden Material. Geht davon nicht eine enorme Gefährdung aus?*
Das ist nicht ganz richtig. Direkt über der Flamme bildet sich $\mathrm{Na_2O_2}$. Bei einem Großbrand wird dieses Oxid von den heißen Verbrennungsgasen in die Höhe getragen. Dabei reagiert es mit dem in der Luft vorhandenen $\mathrm{CO_2}$ in Anwesenheit der Luftfeuchtigkeit zu Natriumcarbonat. Diese Reaktion verläuft mit einem 100%igen Umsatz innerhalb weniger Minuten. Über dem Brand bilden sich also keine Wolken aus ätzendem $\mathrm{Na_2O_2}$, sondern aus relativ harmlosem Natriumcarbonat (Soda, $\mathrm{Na_2CO_3}$).

▷ *Waren technische Probleme beim Pumpen von flüssigem Natrium nicht einer der entscheidenden Gründe für das Aus des Natrium-gekühlten Schnellen Brüters?*
In schnellen Brütern muss flüssiges Natrium mit Raten bis zu 500 t/min als Kühlmittel durch den Reaktor gefördert werden. Dies ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Das Hauptrisiko geht dabei aber gar nicht vom Natrium, sondern vom Ausfall der Kühlwirkung, der eine Kernschmelze zur Folge hätte, aus. Daraus ergibt sich ein spezielles Problem von Brutreaktoren: Tritt Natrium durch ein Leck aus dem Kühlkreislauf aus, fängt es außerhalb der Rohrleitung sofort an zu brennen. Um die Kühlwirkung auf den Reaktorkern aufrecht zu erhalten, ist man aber gezwungen, weiterhin Natrium durch den Reaktor zu pumpen, d. h. es wird immer weiterer Brennstoff nachgeliefert.
Ganz anders im GroNaS-Speicherwerk : Für den Volllastbetrieb einer 500-MW-Anlage müssen nur 3,5 t/min gefördert werden. Der Energiewandlerkomplex ist modular aufgebaut. Kommt es zum Natrium-Austritt in einem der Module, lässt sich die Natrium-Zufuhr zu diesem Modul ohne Probleme stoppen.

▷ *Gibt es technologische Erfahrung für den Umgang mit großen Mengen flüssigen Natriums?*
Großanlagen mit flüssigem Natrium sind seit Jahrzehnten im Betrieb. Es sind die Fabriken zur Herstellung von Natrium. In ihnen wird Natrium im Maßstab von zehntausenden Tonnen pro Anlage und Jahr in flüssiger Form bei über 600°C hergestellt und innerhalb der Anlage von den Elektrolysezellen zu den Konfektionierungsvorrichtungen gefördert.
Ein GroNaS-Speicherwerk ist letztendlich eine ähnliche Chemieanlage mit einem ähnlich kleinen Risiko.

2.8 Wirkungsgrad und Wärmehaushalt

Speicherwerke nach dem GroNaS-Konzept können, je nach Auslegung, einen Gesamtwirkungsgrad von bis zu 90% erreichen.
In einem Natrium-Schwefel-Elektroenergiespeicher gibt es prinzipiell drei Prozesse, bei denen Energie an die Umwelt verloren geht.

- Stromrichtung und Spannungsanpassung
  Stromrichter (Gleich- und Wechselrichter) nach dem aktuellen Stand der Technik arbeiten mit Wirkungsgraden von 98% ($\eta = 0,98$). Im Gesamtprozess (Energieaufnahme + Energieabgabe) wird hier folglich ein Wirkungsgrad von 96% ($\eta = 0,98^2 = 0,96$) erreicht. Die entstehende Abfallwärme fällt bei niedrigen Temperaturen (<100 °C) an und ist daher nur schwer zu nutzen.
- Elektrochemische Umwandlungsprozesse
  Der Wirkungsgrad der elektrochemischen Umwandlung hängt vor allem vom elektrischen Widerstand der Festeelktrolytmembran ab. Je geringer der Widerstand, desto höher ist der Wirkungsgrad. Der Widerstand der Festelktrolytmembran wird im wesentlichen durch drei Parameter bestimmt.
  1) Spezifischer Widerstand des Materials: Dieser ist abhängig von der Materialzusammensetzung und der Temperatur. Im Gegensatz zu Elektronenleitern (Metallen) sinkt der spezifische elektrische Widerstand von Ionen leitenden Festkörpern bei Erhöhung der Temperatur. Dies ist auch bei Natrium-β-aluminat, dem Material, aus dem die Festelektrolytmembran besteht, der Fall.
  2) Fläche der Festelektrolytmembran: Je größer die Fläche ist, desto kleiner ist der Widerstand. Bei gleicher Stromstärke lässt sich deshalb durch die Vergrößerung der Membranfläche ein höherer Wirkungsgrad erreichen.
  3) Dicke der Festelektrolytmembran: Je dünner die Festelektrolytmembran ist, desto geringer ist auch ihr Widerstand. Zellen mit einer dünnen Festelektrolytmembran haben einen höheren Wirkungsgrad als solche mit dicker Membran.
  Unter realen Bedingungen betriebene Speichermodule mit herkömmlichen Natrium-Schwefel-Akkus erreichen bei der elektrochemischen Umwandlung einen elektrochemischen Wirkungsgrad von 95% ($\eta = 0,95$ bei einer Umwandlung, $\eta = 0,95^2 = 0,9$ im Gesamtprozess; gleichbedeutend mit dem sog. DC-Wirkungsgrad von 90% wie auf S. 101 des Abschlussberichts[46] über den Testbetrieb einer Anlage mit konventionellen Na-S-Akkus dokumentiert).
  Die Abfallwärme der elektrochemischen Umwandlungsprozesse fällt bei der Betriebstemperatur des Energiewandlers, also auf einem hohen Temperaturniveau an.
- Energieverluste durch Wärmeabgabe an die Umgebung
  Natrium-Schwefel-Energiewandler müssen bei hoher Temperatur (> 270 °C) betrieben werden. Abhängig von der verwendeten Wärmeisolierung wird dabei ständig eine gewisse Menge Energie in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben.
  Am Markt verfügbare Speichermodule erreichen bei der Stromwandlung einen Wirkungsgrad von 97% und bei den elektrochemischen Prozessen 95%. Ohne Wärmeverluste hätten sie damit einen Gesamtwirkungsgrad von 85% ($0,97^2 \cdot 0,95^2 = 0,85$). Diese Module sind jedoch recht klein. Sie haben somit ein geringes Volumen/Oberflächenverhältnis und verlieren so viel Wärme, dass in Zeitabschnitten, in denen das Modul bei geringer Leistung

[46] **http://www.xcelenergy.com/staticfiles/xe/Corporate/Renewable Energy Grants/Milestone 6 Final Report PUBLIC.pdf**

betrieben wird, zugeheizt werden muss. Dadurch ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von nur 75 - 80%.
Ein GroNaS-Speicherwerk hat wegen seiner Größe (Minimalgröße nach dem GroNaS-Konzept: ca. 20 MW_i) ein viel günstigeres Volumen/Oberflächenverhältnis. Auch wenn nur 2 bis 3% der Leistung des Energiespeicherwerks als Wärme bei 400 °C anfallen, reicht die dem Speicherwerk zugeführte Wärmemenge aus, um die Anlage dauerhaft auf ihrer Betriebstemperatur zu halten. Es wird keine weitere Energie zum Heizen benötigt. Der elektrotechnisch-elektrochemisch mögliche Gesamtwirkungsgrad von 90% kann somit auch im praktischen Dauerbetrieb erreicht werden. Die in Tabelle **8.1** aufgeführten Berechnungsergebnisse belegen, dass bei größeren Anlagen sogar ein nicht unerheblicher Wärmeüberschuss entsteht. Um die Betriebstemperatur konstant zu halten, muss dann sogar gekühlt werden.

Berechnungen zum Wärmehaushalt: Die Werte in Tabelle **8.1** wurden unter folgenden Annahmen berechnet: Beide Tanks und der Energiewandlerkomplex sind als getrennte Einheiten ausgeführt und mit einem Mantel aus (kostengünstigen) Porenbeton mit einer Stärke von 1 m umgeben. Länge, Breite und Höhe der Speicherwerksbestandteile sind deutlich größer als die Stärke der Wärmeisolierung, so dass die u. g. Formel zur Berechnung des Wärmeflusses näherungsweise gilt. Als Wirkungsgrad für die elektrochemischen Vorgänge wird ein Wert von 98% angenommen (Eine Anlage, die bei einem elektrochemischen Wirkungsgrad von 97% betrieben wird, würde noch mehr Wärme auf hohem Temperaturniveau erzeugen).

mittlere Leistung (MW)	spezifische Speicherkapazität (d)	Oberfläche (m^2)	Wärmeverlust (MW)	Wärmeerzeugung (MW)[47]
0,5 MW	6; 0,5	343[48]	0,01	0,01
	168; 14	208 + 272	0,017	0,01
5 MW	60; 0,5	104 + 430	0,018	0,1
	1680; 14	966 + 430	0,048	0,1
50 MW	600; 0,5	486 + 2000	0,085	1
	16800; 14	4484 + 2000	0,224	1
500 MW	6000; 0,5	2257 + 10800	0,449	10
	168000; 14	20815 + 10800	1,088	10

Tabelle 8.1 Vergleich von Wärmeverlust und Wärmeerzeugung in GroNaS-Speicherwerken unterschiedlicher Dimension

Wärmeleitfähigkeit von Porenbeton: $= 0{,}08\ Wm^{-1}K^{-1}$
Stärke der Isolierschicht: d = 1 m
ΔT: Temperaturdifferenz zwischen dem Inneren der Anlage und der Umgebung: 430 K
Abgegebene Wärmeleistung: $P = \lambda \cdot A \cdot \Delta T / d$

[47] beim elektrochemischen Umwandlungsprozess, Temperaturniveau: 400°C
[48] Als Grundlage der Abschätzung wurde wurde hier abweichend angenommen, dass sich Tanks und Energiewandler gemeinsam in einem Würfel von 7 m Kantenlänge befinden