

## Wärmespeicher

# Was steckt in der Lauge?

Vor 140 Jahren verkehrte die Honigmannsche Natronlok in Aachen. Ihre Fahrten blieben eine Episode der Eisenbahngeschichte – ihr Wirkprinzip dagegen macht man sich aktuell bei einem thermischen Energiespeicher zunutze.

**W**er schon einmal festes Ätznatron (Natriumhydroxid) in Form von Perlen, Schuppen oder Plättchen in Wasser gelöst hat, weiß, dass sich die flüssige Phase stark erwärmt. Das gleiche Phänomen tritt auf, wenn Wasser auf festes NaOH gegeben wird. Auf die Idee, die Wärmetönung (Hydratationsenthalpie) dieser Reaktion zu nutzen, um damit ein Triebfahrzeug zu bewegen, kam in den 1880er Jahren der Erfinder, Chemiker und Sodafabrikant Moritz Honigmann.<sup>1)</sup>

### Die Natronlok

Im Jahr 1883 meldete Honigmann seine „rauchlose“ Lokomotive, die „Natronlok“, zum Patent an.<sup>2)</sup> Deswegen Titel „Über das Verfahren zur Entwicklung gespannten Dampfes durch Absorption des abgehenden Maschinendampfes in Ätznatron oder Ätzkali von Moritz Honigmann in Grevenberg bei Aachen“ macht deutlich, dass zum Wissen um die Chemie noch eine große Portion Ingenieurskunst nötig war. „Rauchlos“ hätte ein Wettbewerbsvorteil sein können, denn vor der Elektrifizierung belastigten dampfbetriebene Straßenbahnen die Fußgänger durch Rauch, Funken und Lärm; die Zugtiere der Pferdestraßenbahnen machten Mist, konnten auf steilen Stücken ins Straucheln kommen und mit ihren Hufen das Pflaster beschädigen.

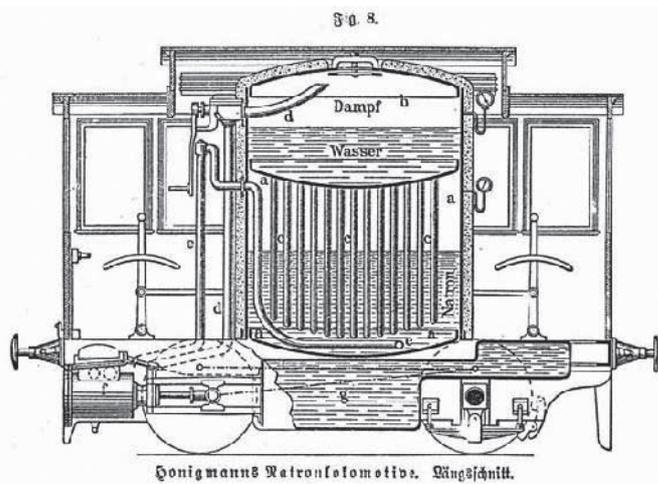
Die Natronlok ist smarter. Ist der untere ihrer Kessel (Abbildung)

erst einmal mit 180 °C heißer, hochkonzentrierter Natronlauge befüllt, läuft die Antriebsmaschinerie an: Die Siederöhre transportieren Wärme in den oberen Wasserbehälter. Es bildet sich Dampf, der über ein Rohr mit 130 °C und 2,7 bar zu den Antriebszylindern geleitet wird. Dort wird der Dampfdruck in Bewegung umgesetzt, Druck und Temperatur sinken. Der Dampf drückt von der einen oder anderen Seite auf den Kolben, der über ein Gestänge die Räder antreibt. Aus dem Auslasskanal des Antriebszylinders strömt Wasserdampf (Abdampf; 100 °C, 1 bar), der in der NaOH-Lösung sofort und vollständig zu Wasser kondensiert.

Die Reaktion ist auch dann exotherm, wenn Wasserdampf in heiße, konzentrierte Natronlauge gelangt. Zur Hydratationsenthalpie kommt dabei die zurückgewonnene Verdampfungswärme.

Die gesamte freigesetzte Energie erwärmt die Lauge wieder. Der Pro-

zess beginnt von Neuem. Ein Perpetuum mobile war die Natronlok jedoch nicht, denn beim Einleiten des Abdampfes in die Natronlauge wird diese verdünnt, sodass mit der Zeit immer weniger Wärme freigesetzt wird. Vier bis fünf Stunden fährt eine Lok auf diese Art. Dann musste die verdünnte Natronlauge abgelassen und durch neue Lauge ersetzt sowie die ver-



Honigmannsche Natronlok: Längsschnitt  
Illustration aus Meyers Konversationslexikon, 1890

Den Artikel verfassten Benjamin Fumey, Mirko Kleingries, Gerhard Karger und Heribert Offermanns. Der promovierte Elektroingenieur Fumey forscht seit über zehn Jahren über Sorptionswärmespeicher am Schweizer Forschungsinstitut Empa und neu an der Hochschule Luzern. Kleingries ist Professor an der Hochschule Luzern und leitet das Kompetenzzentrum für Thermische Energiesysteme und Verfahrenstechnik. Karger leitet die GDCh-Abteilung Mitgliedermarketing/Fach- und Regionalstrukturen. Offermanns, Chemiker und Mitglied des Vorstands der Degussa bis zum Jahr 2000, hat für die *Nachrichten aus der Chemie* bereits mehrere Beiträge zur Industriegeschichte seiner Heimatregion Aachen verfasst.  
benjamin.fumey@hslu.ch



Die Honigmannsche Natronlok im Einsatz, Aufnahme aus dem Jahr 1884.

Foto: Stadtarchiv Aachen, Signatur C492cc

dünnte extern durch Eindampfen wieder konzentriert werden.

Von Juni 1884 bis März 1885 diente eine solche Natronlokomotive in Aachen dem Personentransport auf einer ein Kilometer langen Strecke (Foto oben). Auch im Kohlebergbau in der Nähe von Aachen wurden zwei derartige Lokomotiven getestet, zudem eine Straßenbahn in Berlin-Charlottenburg. Die Leipziger Pferdeisenbahn-Gesellschaft führte ab Ende Februar des Jahres 1886 Probefahrten zwischen der Innenstadt und dem Depot in Plagwitz mit einer von der Halleischen Maschinenfabrik gelieferten Natronlokomotive „System Honigmann“ durch.

Die Bilanz der Probefahrten fiel positiv aus. So hieß es: „Die Bewegung der Maschine war eine so ruhige und gleichmäßige, daß die Passagiere gerne mit derselben fahren.“ Trotz ihrer Vorteile, zu denen auch geringe Betriebskosten zählten, setzte sich diese Bauweise nicht durch. Hauptgrund für das Scheitern waren wohl die Probleme beim Wiedereindampfen der hochkorrosiven Natronlauge. Ergebnisse von Modellversuchen mit gusseisernen Kesseln legten nahe, dass sich das Behältermaterial mit der Zeit auflöste. Aus dem Gewichtsverlust und der Verringerung der Wanddicke der Kessel wurde deren Lebensdauer zu maxi-

mal zwei Jahren berechnet. Honigmann dampfte zwar unter Unterdruckbedingungen ein und entschärfte dadurch die Bedingungen, doch scheute man offensichtlich die Kosten für einen Austausch der Kessel gegen solche aus deutlich korrosionsbeständigerem Kupfer. Dazu kam eine weitere negative Expertenprognose: Es hieß, dass die Gleisanlagen dem Gewicht der Lokomotive auf Dauer nicht standhalten könnten.

Warum die Natronlok letztlich auf dem Abstellgleis landete, bleibt offen: Es könnte auch der Einfluss der Lobbyisten für konventionelle Transportsysteme ausschlaggebend gewesen sein. Die Natronlok fand danach nur noch in der Technikgeschichte Erwähnung; mit der Zeit nicht einmal mehr dort. Nun erlebt das Wirkprinzip bei einem thermischen Energiespeicher eine Renaissance.

### Sommerwärme und Wind für die Wintersaison

Auf der Suche nach thermischen Energiespeichern mit hoher Energiedichte und geringem Wärmeverlust werden unter anderem Sorptionsprozesse erforscht.<sup>3-5)</sup> Anders als bei sensiblen Wärmespeichern, etwa einem Warmwassertank, bei dem spürbare (sensi-

ble) Wärme gespeichert wird und kontinuierlich entweicht, funktioniert ein Sorptionswärmespeicher als chemisch angetriebene Wärmepumpe.<sup>6)</sup> Dabei wird anstelle sensibler Wärme das Arbeitspotenzial zur Bereitstellung von Wärme bei erhöhter Temperatur aus der Umgebung gespeichert.<sup>7)</sup> Streng genommen ist er somit kein Wärmespeicher, sondern ein Sorptionspotenzialspeicher, eingesetzt zur Wärmearbeitung.

Der Sorptionswärmespeicher wird bei hoher Bereitstellung thermischer oder elektrischer Energie geladen, etwa aus Solarthermie oder Photovoltaik im Sommer, aber auch bei hohen Windenergiebeiträgen, leidet keinen Verlust während der Speicherdauer und liefert Wärme bei Bedarf fast ohne zusätzlichen Strom aus einer Niedertemperatur-Wärmequelle, etwa von einem Erdwärme- oder Luftwärmübertrager.<sup>6)</sup> Feste und flüssige Sorptionsmaterialien werden für diese Technik erforscht.<sup>7)</sup> Als feste Sorbenzien dienen beispielsweise Zeolithe,<sup>8)</sup> meistens im Fixed-Bed-Verfahren.<sup>9)</sup> Hierzu wird ein Behälter mit integriertem Wärmeübertrager mit Zeolith-Granulat gefüllt.<sup>10)</sup> Flüssige Sorbenzien hingegen werden transportiert (gepumpt).<sup>11)</sup> Dabei kann die Wandlereinheit (die Sorptionswärmepumpe) von der Speichereinheit (den Tankbehältern) getrennt werden.<sup>12)</sup> Dies macht die Anordnung flexibel und reduziert den Materialbedarf. Es wird zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden, je nachdem, ob das Sorbens Kontakt zur Umgebungsluft hat oder nicht.

An der Hochschule Luzern wird ein Sorptionswärmespeicher mit wässriger Natronlauge im Transportverfahren und geschlossenem System entwickelt. Dieser besteht hauptsächlich aus zwei Teilen, dem Wandler und dem Speicher, einem konventionellen Kunststoffbehälter.<sup>12)</sup> Der Wandler besteht aus einem unterdruckkompatiblen Behälter mit zwei eingebauten Mas-

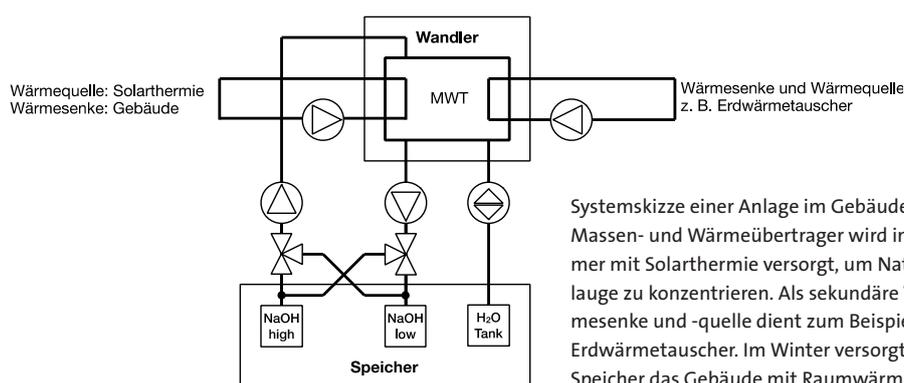
sen- und Wärmeübertragern (MWÜ). Dabei dient das eine Element als Desorber und Absorber und das andere als Kondensator und Verdampfer.

Die Herausforderung ist die Entwicklung von MWÜ.<sup>12–14)</sup> Der Sorptionsprozess im Wärmespeicher bedingt einen einzelnen Sorptionsdurchgang auf dem MWÜ mit Heizungswasser-Gegenstrom, da Sorptions-Temperatur und -Konzentration voneinander abhängen.<sup>13–15)</sup> Dazu wurde ein neuartiger MWÜ auf Basis eines vertikal installierten Spiralrippen-Wärmeübertragerrohrs erforscht.<sup>12)</sup> Dabei fließt das Sorbens auf den außen liegenden Spiralrippen in Gegenrichtung zum innen geführten Heizungswasser. So werden die maximale Vorlauftemperatur und die maximale Energiedichte erreicht.<sup>15)</sup>

Lade- und Entladeprozesse verändern lediglich die Konzentration der Natronlauge, brauchen sie aber nicht auf. Da Natronlauge nahezu unbegrenzt haltbar ist,<sup>16)</sup> kann eine solche Anlage dauerhaft sowohl als Kurz- wie auch als Langzeitspeicher dienen.

Es gibt mehrere Lademöglichkeiten. Der Speicher lässt sich etwa mit Wärme aus konventionellen solarthermischen Kollektoren laden.<sup>17)</sup> Dabei erhitzt Sonnenwärme die entladene wässrige Natronlauge auf dem Desorber, und ein Teil des Wassers aus der Lauge verdampft. Dieser Wasserdampf verflüssigt sich auf dem Kondensator, und die Kondensationsenthalpie wird an das Erdreich oder an die Umgebung abgegeben.<sup>17)</sup> Die konzentrierte Natronlauge und das Wasser lagern in separaten Behältern bei Raumtemperatur, bereit für die Wärmearbeitung.

Wird der Speicher hingegen mit Strom aus dem Elektrizitätsnetz oder aus einer eigenen Photovoltaik-Anlage geladen, lässt sich eine Wärmepumpe einsetzen, wobei gleichzeitig der Desorber erwärmt und der Kondensator gekühlt wird.<sup>18)</sup> Unabhängig davon, ob thermisch oder elektrisch geladen,



Systemskizze einer Anlage im Gebäude. Der Massen- und Wärmeübertrager wird im Sommer mit Solarthermie versorgt, um Natronlauge zu konzentrieren. Als sekundäre Wärmesenke und -quelle dient zum Beispiel ein Erdwärmetauscher. Im Winter versorgt der Speicher das Gebäude mit Raumwärme.

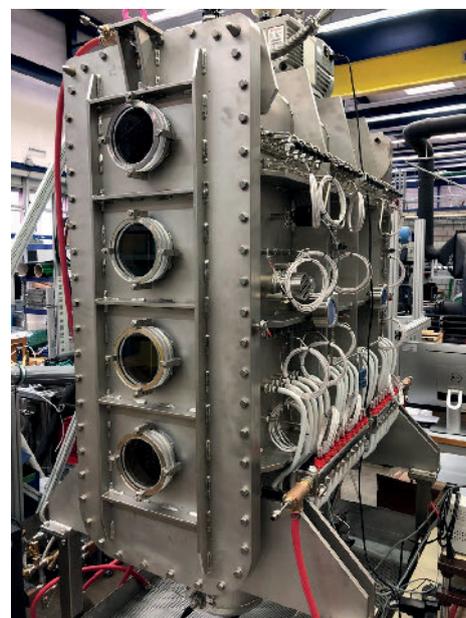
dient der Speicher als virtuelle elektrische Batterie,<sup>18)</sup> denn beim Entladen benötigt der Sorptionswärmespeicher erheblich weniger elektrische Energie zur Wärmebereitstellung als eine konventionelle Wärmepumpe.

Wie bei verdichterbasierten Wärmepumpen ist die erreichte Arbeit betriebstemperaturabhängig. Somit gilt im Entladeprozess: Je geringer der benötigte Temperaturanstieg von der Wärmequelle (etwa Erdwärmeübertrager) zur Wärmesenke (zum Beispiel Gebäudeflächenheizung), umso höher ist die Speicherkapazität (die Energiedichte des Sorbens) und die Sorptionswärmepumpenleistung.<sup>15)</sup> Im Speicherbau kann die Leistung und Speicherkapazität flexibel und unabhängig dimensioniert werden, basierend auf den Betriebstemperaturen. Als Gebäudeheizung (Schema oben und Foto) bei 25°C Rücklauftemperatur und 10°C Erdwärmetemperatur lässt sich eine theoretische Energiedichte bezogen auf das Volumen des entladenen Sorbens von 300 kWh·m<sup>-3</sup> erzielen. In der Praxis werden zurzeit 220 kWh·m<sup>-3</sup> bis 280 kWh·m<sup>-3</sup> erreicht, etwa die fünf- bis sechsfache Wärmekapazität im Vergleich zum isolierten Warmwassertank.

### Der Vergleich

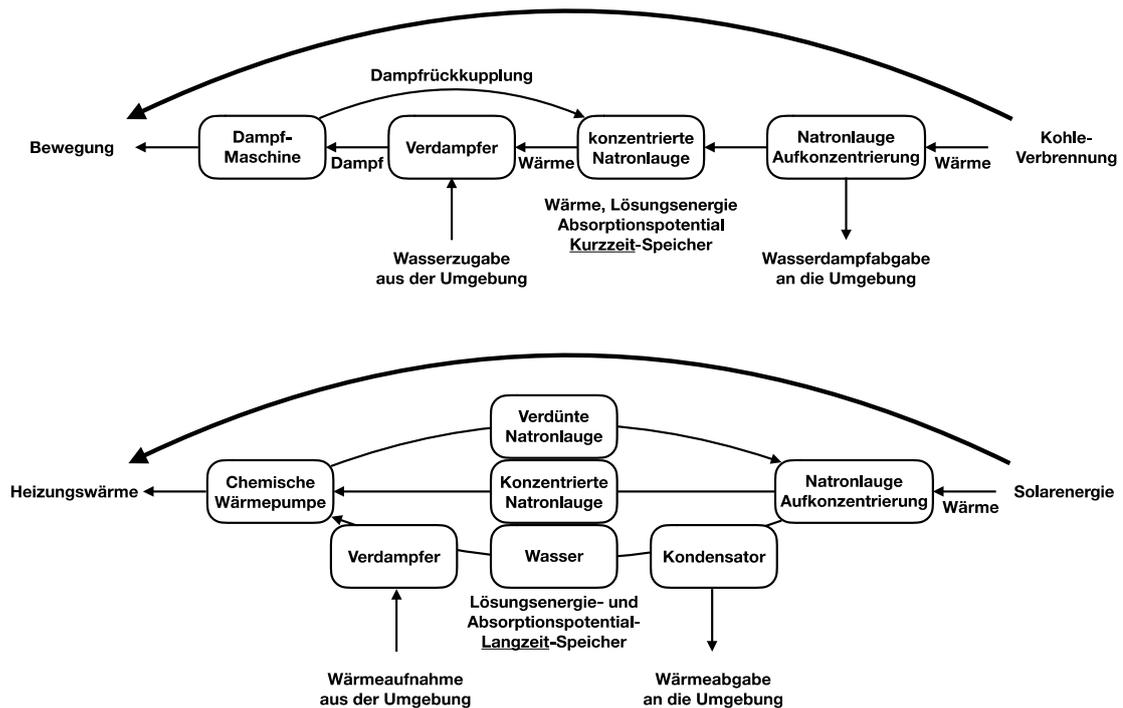
Die Ladeprozesse bei Lok und Wärmespeicher sind ähnlich: Natronlauge wird durch Zugabe sensibler

Wärme konzentriert. In der Anwendung hingegen gibt es einen markanten Unterschied (Abbildung S. 44): Die Lok wird mit gespeicherter sensibler Wärme und Lösungswärme aus Kohle angetrieben und durch Dampfabsorption prozessoptimiert. Der Wärmespeicher hingegen speichert nur Lösungswärme, geladen durch überschüssige erneuerbare Energie. Er verwendet das Absorptionspoten-



6kW-Laborversuchsanlage an der Hochschule Luzern. Zu sehen ist die Unterdruckkammer des Masse- und Wärmeübertragers. Unten rechts befinden sich die Heizungswasser-Eingänge und oben links die -Ausgänge. Oben rechts sind die Eingänge für die Natronlauge und das verdampfende Wasser, und unter der Kammer befinden sich die Sammelbehälter. Die Versuchsanlage verfügt über eine Vielfalt von Sensoren zur Betriebserprobung und -überwachung.

Foto: Benjamin Fumey



Vergleich der beiden Wirkprinzipien. Mit Wärmezugabe aus der Kohleverbrennung wird Natronlauge konzentriert, das heißt mit Wärme und Lösungsenergie als Kurzzeitspeicher geladen. In der Lok wird durch Abgabe sensibler Wärme Wasser zum Antrieb verdampft. Um die Verdampfungsenergie zurückzugewinnen und Lösungsenergie freizusetzen, absorbiert Natronlauge den entspannten Dampf. Beim Wärmespeicher dient solare Wärme zum Laden. Der Wasserdampf wird kondensiert und die konzentrierte Lauge sowie das Wasser gespeichert. Um Heizungswärme zu gewinnen, wird das Wasser wiederum mit Tieftemperatur-Umgebungswärme verdampft und auf der Natronlauge absorbiert, dabei werden Kondensationswärme und Lösungswärme bei erhöhter Temperatur freigesetzt.

zial als Wärmepumpenantrieb, um Heizungswärme praktisch ohne Bedarf an elektrischem Strom im Winter bereitzustellen.

Die Natronlok ist ebenso Geschichte wie der Kohle- und Dampf-antrieb. Aber für die Energiewende könnte das Wirkprinzip eine Rolle übernehmen: Nämlich als verlustloser Speicher mit hoher Energiedichte Sommerüberschüsse für das Heizen im Winter bereitzustellen. ■

- 1) H. Offermanns, Die „Honigmänner“: Pioniere der Wirtschaft in der Region Aachen – Zechen und Natronlok, unveröffentlicht
- 2) C. Mähr, in „Die Natronlok“ in seinem Werk „Vergessene Erfindungen“, Verlagsgruppe Weltbild, Augsburg, 2005 (Lizenz Ausgabe des im DuMont Buchverlag, Köln 2002 erschienen Buchs), S. 26 – 46

- 3) International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programm, Task 42: <https://task42.iea-shc.org>
- 4) International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programm, Task 58: <https://task58.iea-shc.org>
- 5) International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programm, Task 67: <https://task67.iea-shc.org>
- 6) H. A. Zondag, in Sorption Heat Storage [Hrsg.: Bent Sørensen], Kap. 6, Solar Energy Storage, Academic Press, New York, 2015, S. 135–154
- 7) B. Fumey, R. Weber, L. Baldini, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019, 111, 57
- 8) R. van Alebeek, L. Scapina, M. A. J. M. Beving, M. Gaeini, C.C.M. Rindt, H. A. Zondag, Applied Thermal Engineering 2018, 139, 325
- 9) K. Johannes, F. Kuznik, J.L. Hubert, F. Durier, C. Obrecht, Applied Energy 2015, 159, 80
- 10) R. Köll, W. van Helden, G. Engel, W. Wagner, B. Dang, J. Jänchen, H. Kerskes, T. Badenhop, T. Herzog, Solar Energy 2017, 55, 388

- 11) K. E. N'Tsoukpoe, N. Le Pierrès, L. Luo, Energy Proced. 2012, 30, 331
- 12) B. Fumey, R. Weber, L. Baldini, Applied Energy 2017, 200, 215
- 13) B. Fumey, A. Borgschulte et al., International Journal of Heat and Mass Transfer 2022, 182, 121967
- 14) B. Fumey, L. Baldini, A. Borgschulte, Energy Technol. 2020, 8, 2000187
- 15) B. Fumey, PhD Thesis: „Heat and Mass Exchanger Design for Inter-seasonal Liquid Absorption Heat Storage, Ulster University, Belfast School of Architecture and the Built Environment, UK, 2020
- 16) Solvay Chemicals International SA, Technical Documentation, Liquid Caustic Soda – Shelf Life, DOC-1110–0004-W-EN (WW) Issue 2, October 2005
- 17) B. Fumey, L. Baldini, Energies 2021, 14, 3754
- 18) L. Baldini, B. Fumey, Energies 2020, 13, 2944