

Probleme der Energiespeicherung bei der Müllverbrennung

Autor(en): **Hämmerli, Herbert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 25

PDF erstellt am: **12.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74826>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Probleme der Energiespeicherung bei der Müllverbrennung

Von Herbert Hämmerli, Zürich

Bei der Modifizierung und Erneuerung von Müllverbrennungen mit Wärmeverwertung sollte in vermehrtem Masse auch auf die Konzipierung eines regionalen Entsorgungs- und Wärme-kollektives geachtet werden. Dadurch könnte vor allem bei kommunalen Wärmeversorgungs-systemen Heizöl durch Müllenergie substituiert werden. Wärmespeicher werden dabei eine unumgängliche Notwendigkeit. Die Funktionsweisen der verschiedenen Speichersysteme werden im nachfolgenden Artikel behandelt, und auf die praktischen Einsatzmöglichkeiten wird hingewiesen. Für den praktischen Einsatz von Wärmespeichern bestehen jedoch zum Teil noch grosse Wissens- und Erfahrungslücken.

In der Schweiz gibt es mehrere Müllwerke, welche in absehbarer Zeit modernisiert oder erneuert werden müssen. Ausserdem werden seit der Ölkrise die Müllwerke mit Wärmeverwertung anders beurteilt, als dies vor zwanzig Jahren noch der Fall war. Allerdings sind die technischen Probleme für eine sinnvolle Nutzung von Müllenergie immer noch dieselben. Das Hauptproblem ist nach wie vor der Ausgleich zwischen der anfallenden Müllmenge im Sommer und dem Energiekonsum im Winter. Zur Überwindung und Optimierung dieser Diskrepanz bedarf es zweifellos einer *Änderung der bisherigen Entsorgungs- und Versorgungsstrategie*, indem man die Teilaufgaben wie Müll-, Abwasser- und Klärschlamm Entsorgung sowie die der Wärmeversorgung von öffentlichen Einrichtungen besser aufeinander ab-

zustimmen versucht. Diese Zielsetzungen können jedoch nur mit Hilfe von leistungsfähigen Wärmespeichern und namentlich durch die Errichtung von Lagern für Brennstoff aus Müll (BRAM) realisiert werden.

Probleme der Energiebewirtschaftung mit Müllfeuerungen

Eine geruchsfreie und platzsparende Einlagerung von Müll ist ohne aufwendige Behandlung nicht möglich, weshalb man bisher auf den Bau und Betrieb solcher BRAM-Lager verzichtet hat. Statt dessen wird nach der bisherigen Praxis der täglich anfallende Müll ohne Rücksicht auf den tatsächlichen Energiebedarf *umgehend verbrannt*. Auf diese Weise entstehen vor allem im

Sommer mehr oder weniger grosse Energieüberschüsse, welche entweder durch besondere Einrichtungen vernichtet oder durch kostspielige Turbo-gruppen mit entsprechend hohen Verlusten in elektrische Energie umgewandelt werden (Bild 1). Umgekehrt können zur Winterszeit während mehreren Wochen witterungsbedingte Spitzen auftreten, welche durch das Müllwerk nicht mehr abgedeckt werden können (z.B. wegen zu geringem Müllanfall). Dieses spezielle Problem wird heute gewöhnlich durch die Installation einer zusätzlichen Ölkesselanlage behoben.

Ein weiteres Problem ist die Abdeckung von *kurzzeitigen Tagesspitzen*, weil die Müllfeuerung relativ träge ist und daher eine sofortige Anpassung der Ofenleistung an die veränderten Betriebsbedingungen nicht möglich ist. In solchen Fällen hat sich der Einsatz von Heiss- und Warmwasserspeichern gut bewährt. Sie können jedoch, infolge von Dispositionsfehlern, eine beachtliche Quelle für Energieverluste sein.

Auch das Kamin ist eine beachtliche Verlustquelle in der Grössenordnung von 20 bis 30% (siehe Bild 1 und 2), welche nach Möglichkeit eliminiert werden sollte. Eine günstige Gelegenheit zur Abwärmenutzung bieten die künftigen Nasswaschanlagen, welche bekanntlich wegen den verschärften Abgasvorschriften in absehbarer Zeit bei sämtlichen Müllverbrennungen nachgerüstet werden müssen. Zur Einschränkung des Wasserverbrauchs wird nebst einer Waschwasserbehandlung auch eine Rückkühlung erforderlich

Bild 1. Exergiediagramm einer typischen Müllverbrennung mit reiner Stromerzeugung (KVA Cottendart)

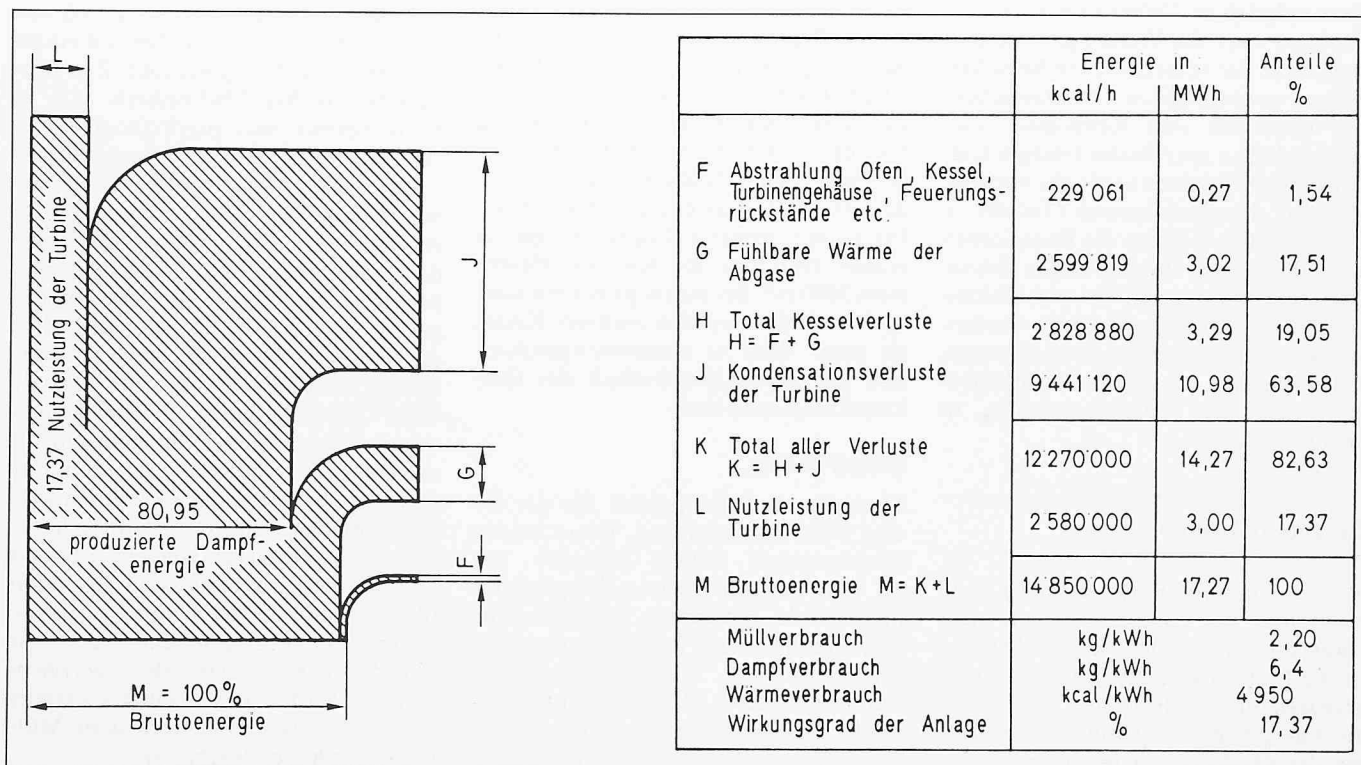


Tabelle 1. Kenndaten verschiedener Energiespeicher in geladenem Zustand

Art des Speichers	Speicher- bzw. Lagertyp	Energiedichte		spezifische Dichte		Entladungs-Koeffizient (theoret. Max.)	Verluste während der Speicherung	Quelle
		Wh/cm ³	J/cm ³	Wh/g	J/g			
Brennstofflager	Kohlenbunker (Steinkohle)	8,0	28 100	10	35 200	1	0	3
	Öl-/Benzintank	10	36 800	12	41 900	1	0	2
	Gaskessel (16 bis 0,1 bar)	0,175	630	0,245	880	0,9	0	8
	Müllbunker/Müllbrikett	0,85/2,00	3000/7150	2,75/3,0	10 000/11 000	1	0	1
	Brennholz (Buche)	2,0	7 950	4,0	15 210	1	0	9
Wärmespeicher	Warmwasser (90–40 °C)	0,1	345	0,1	360	0,55	3–10%/h	1
	Heisswasser (130–40 °C)	0,135	480	0,15	520	0,70	3–10%/h	1
	Erdspeicher (H ₂ O-Medium)	0,001–0,002	3,5–8,0	0,001–0,002	3,5–8,0	keine Angabe	keine Angabe	6
	Latentspeicher	0,035–0,070	130–250	0,05 –0,08	185–280	1	0,02 %/h	5
	Chemische Speicher	0,09 –0,3	330–975	0,065–0,40	230–1520	1	0	4
Elektro-speicher	Akkumulatoren	0,045	160	0,02	685	0,8	0,04 %/h	7
	Wasserstoffzelle	–	–	–	–	–	–	10

Quelle:

1. Vom Verfasser berechnet
2. Gumz W.: Handbuch der Feuerungstechnik, Springer-Verlag 1962, S. 269
3. Recknagel: Taschenbuch für Heizung und Lüftung, Oldenburg 1955, S. 83/84

4. VDI-Tagung 1977: Rationelle Energienutzung durch Wärme-Speicherung, VDI-Bericht Nr. 288, 1977, S. 117
5. siehe 4., S. 91
6. siehe 4., S. 52
7. Akkumulatorenfabrik Oerlikon, pers. Mit-

teilung vom 16.11.81

8. Gaswerk Zürich, pers. Mitteilung vom 16.11.81
9. Forstwirtschaftl. Zentralstelle d. Schweiz, Brennholz-Konzept 1976, Anhang Darst. 8
10. keine Literaturangaben

sein, deren Abwärme im Niedertemperaturbereich unbedingt genutzt werden sollte. Eine solche Abwärmenutzung muss natürlich ebenfalls durch ein Speichersystem einem nicht adäquat verlaufenden Bedarf angepasst werden.

Wie diese wenigen Beispiele zeigen, wird der projektierende Ingenieur bei der Modifizierung von Müllverbrennungsanlagen zwangsläufig auch auf eine Optimierung der Energiebewirtschaftung achten müssen, was nur mit Hilfe von zweckmässigen Energiespeichern möglich ist. Daher ist eine genaue Kenntnis über die Wirkungsweise und Merkmale der verschiedenen Speichersysteme unumgänglich. Die massgebenden Merkmale sind Kenndaten, wie: Energiedichte, spezifische Energie, Entladungskoeffizienten sowie die Verluste während der Speicherung (Tabelle 1). Grundsätzlich können die Energiespeicher in die drei Hauptgruppen *Brennstofflager*, *Wärmespeicher* und *Elektro-speicher* (Batterien) eingeteilt werden. Letztere sind für unsere Betrachtungen bedeutungslos, da sie nur für Elektrofahrzeuge oder Telefonzentralen in Frage kommen.

Brennstofflager

Die wichtigsten Energiespeicher sind zweifellos die Brennstofflager. Das Hauptmerkmal aller Brennstofflager ist die Möglichkeit der praktisch unbegrenzten und verlustlosen Haltbarkeit der Energie. Zudem kann, mit Ausnahme der Gaskessel, jedes Brennstoffla-

ger «entladen» werden, d. h. der Entladungskoeffizient ist 1. Einzig beim Gaskessel liegt er etwa bei 0,9. Auch die Energiedichte des Gaskessels ist mit 0,175 Wh/cm³ im Vergleich zu den übrigen Brennstofflagern bemerkenswert tief.

Gas

Gaskessel werden vor allem zur Abdeckung der Konsumspitzen bei der Ferngasversorgung und den damit verbundenen Druckschwankungen im regionalen Gasnetz eingesetzt [1] (Fernnetz 70 bar, Regionalnetz 5 bar, Ortsnetz 0,1 bar). In geladenem Zustand haben sie einen Druck von 16 bar und können bis zu ihrer höchstmöglichen Entladung bis auf 0,1 bar entspannt werden. Wegen der hohen Druckverhältnisse werden sie heute stets kugelförmig gebaut. Ihr geometrisches Volumen beträgt bei einem Durchmesser von 18 Metern etwa 3000 m³. Bei einem grösseren Gasspeicherbedarf werden mehrere Kessel zu einer Batterie zusammengeschlossen. Die Einsatzbereitschaft der Gaskessel ist extrem hoch.

Öl und Benzin

Dies gilt im Prinzip auch für die Öl- und Benzintankanlagen. Diese beiden Speicherarten haben übrigens mit 10 Wh/cm³ die grösste Energiedichte aller heute bekannten Speichersysteme, gefolgt vom Kohlenbunker mit 8 Wh/cm³. Der Müllbunker kommt bloss noch auf 0,85 Wh/cm³ und fällt damit als Speicheranlage zur Lösung von saisonbedingten Speicherproble-

men ausser Betracht. Hingegen kann er gut zur Ausregulierung der täglich anfallenden Müllschübe eingesetzt werden. Bei Kleinanlagen ist sogar die Auslegung der Speicherkapazität für einen Müllanfall von ein bis zwei Wochen ohne weiteres vertretbar, so dass im Revisionsfall auch eine Einofenanlage ohne weiteres stillgelegt werden kann.

Müllbrikett

Für die Errichtung von *saisonbedingten Müllspeichern* käme die Brikettierung in Frage. Die Energiedichte beträgt hier etwa 2 Wh/cm³ und ist daher mit einem Brennholzlager vergleichbar. Zur Herstellung solcher Müllbriketts gibt es heute bereits zwei marktgängige Verfahren. Bei beiden Verfahren können auch grössere Mengen an Klärschlamm beigefügt werden. Der Vorteil dieser Systeme besteht darin, dass im Sommer der überschüssige Müll nicht mehr verbrannt werden muss, sondern eingelagert werden kann. Dadurch entfallen die teuren Energievernichtungsanlagen für die Sommerzeit sowie die zusätzlichen Ölkesselanlagen für die Winterspitzen. Ausserdem kann man auf die teuren Turbogruppen verzichten und damit auch, wegen der wesentlich kleineren Betriebsdrücke, mit einfacheren und damit billigeren Kesseln arbeiten. Solche Betriebssysteme sind besonders für die kombinierten Kompostierungs-/Verbrennungsanlagen geeignet, da ein Teil des Mietenplatzes als Lagerfläche benutzt werden kann. Zudem verleiht ein solches Betriebssystem dem Müllwerk eine hohe Flexibilität.

Ein solches System zur Müll/Schlamm-Brikettierung steht seit dem Jahre 1975 in der *Müra Biel* in Betrieb. Dort wird ein bis zu 80% entwässertes Faulschlamm der DANO-Trommel beigemischt. Danach wird das Müll/Schlamm-Gemisch bei einem Wassergehalt von etwa 50–55% brikettiert (siehe Tabelle 2). Diese Müllbriketts werden heute vorwiegend zur Bodenverbesserung in den Rebbergen verwendet. Da sie jedoch ohne Geruchsbelästigungen innert dreissig Tagen bis auf einen Wassergehalt von 20% austrocknen, können sie auch verbrannt werden. Nach den bisherigen Erfahrungen scheint dies aus der Sicht der Feuerungstechnik ohne weiteres möglich zu sein. Hingegen zerfallen die Müllbriketts im Ofen nicht immer rasch genug, so dass die Briketts möglicherweise vor der Ofenbeschickung noch speziell aufgebrochen werden müssen. Zudem fehlen zurzeit noch praktische Erfahrungen für den Fall, dass man ausschliesslich Müllbriketts verfeuern würde.

Tabelle 2. Eigenschaften der Müll-Klärschlamm-Briketts, gemäss Werkangabe der Müra Biel

Heizwert H_u mit Klärschlamm, lufttrocken	kJ/kg	10 800 bis 11 700
Spezifisches Gewicht, nass	kg/m ³	1 080
Spezifisches Gewicht, lufttrocken (ca. 20% WG)	kg/m ³	650
Grösse eines einzelnen Briketts	cm	60×20×15
Grösse eines Brikett-Palettes	m	1,2×1,2×0,8
Gewicht eines Brikett-Palettes, nass	kg	ca. 1 250
Gewicht eines Brikett-Palettes, lufttrocken (ca. 20% WG)	kg	ca. 750

Wärmespeicher

Grundsätzliche Möglichkeiten

An Stelle der Brennstofflagerung kann man auch die *bereits freigesetzte Energie speichern*. Das ist aber mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln nur sehr eingeschränkt möglich, da das Temperaturniveau der Energie in der Regel sehr niedrig ist. Dies gilt insbesondere auch für die Umweltwärme. Erforderlich wäre ein Speicher, der bei konstanter Temperatur oder bei nur kleinen Temperaturdifferenzen eine möglichst grosse Wärmemenge speichern kann.

Bild 2 zeigt die prinzipiellen *physikalischen Möglichkeiten* zur Speicherung der Wärme, wobei eine Unterteilung nach *chemischen* und *thermischen Arten* möglich ist. In letzterem Falle kann die sogenannte fühlbare Wärme in einem festen oder flüssigen Speichermedium abgespeichert werden, während bei der Speicherung der latenten Wärme die Änderung des Aggregatzustandes des Speichermediums genutzt wird. Ähnlich verhält es sich beim chemischen Verfahren. Hier wird die zu speichernde Energie in Form von Reaktionswärme zur Spaltung oder Synthese des Speichermediums eingesetzt. Der Vorteil beim chemischen Verfahren liegt im wesentlichen in der verlustlosen Energiespeicherung, während als Nachteil die technisch komplizierte und daher nicht billige Speicheranlage zu nennen wäre.

In *konstruktiver Hinsicht* lassen sich die einzelnen Speichertypen nicht ohne

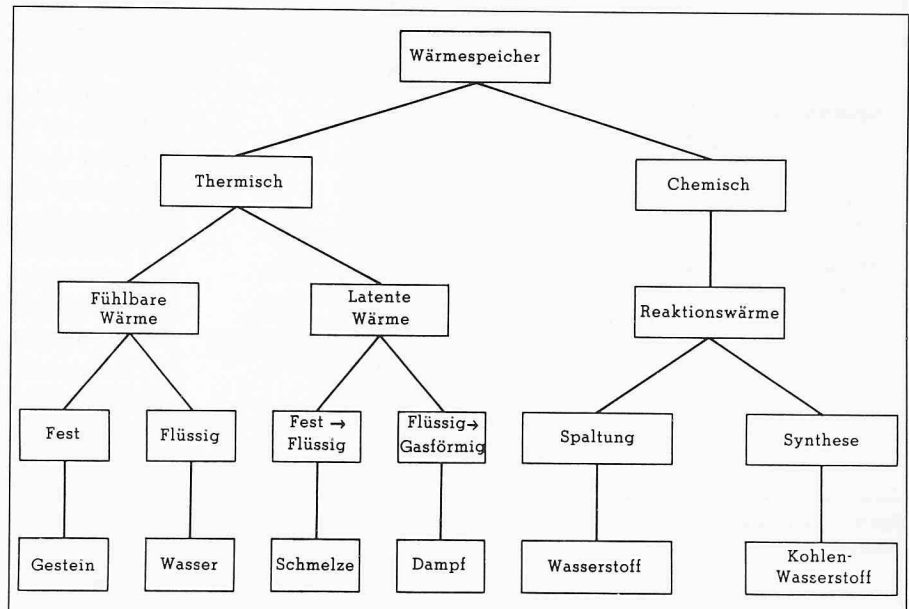


Bild 2. Übersicht über die prinzipiellen Möglichkeiten der Wärmespeicherung, nach Lindner und Scheuermann [10]

weiteres einem bestimmten physikalischen oder chemischen Verfahren zuordnen. Oftmals kommen verschiedene, sich überschneidende physikalische und chemische Vorgänge vor, so dass eine streng hierarchische Gliederung nicht möglich ist. Aus diesem Grunde werden bei der nachfolgenden Beschreibung der einzelnen Speichertypen auch konstruktive und anwendungsorientierte Bezeichnungen verwendet.

Warm- und Heisswasserspeicher

Warm- und Heisswasserspeicher müssen praktisch bei allen grösseren Wärmeerzeugungsanlagen zur *Überbrückung von kurzzeitigen Tagesspitzen* eingesetzt werden. Ihre Energiedichten liegen zwischen 0,1 und 0,135 Wh/cm³, während bei Kernkraftwerken solche von etwa 0,035 Wh/cm³ erwartet werden können [20]. Im Prinzip sind es vertikalgestellte zylindrische Behälter, welche recht beachtliche Ausmasse annehmen können (2 bis 3 m im Durchmesser und eine Höhe bis zu 20 m). Selbstverständlich müssen sie *isoliert* werden. Die Oberflächentemperatur beträgt etwa 55 bis 60 °C. Da die Oberfläche relativ gross ist und dadurch die Umgebung durch unerwünschte Wär-

meeinwirkung belastigt werden kann, werden solche Speicher normalerweise «eingehaust». Zur Vermeidung eines Wärmestaus und wegen der unvermeidlichen Kontrollgänge des Betriebspersonals wird das Speicherhaus mittels einer Schwerkraft- oder Zwangsventilation auf einigermassen erträgliche Raumtemperaturen *gekühlt*. Über die dadurch entstehenden *Energieverluste* gibt es keine Studien. Gesamtschweizerisch gesehen dürften sie jedoch ein beachtliches Ausmass haben. Der dadurch entstandene Mehrverbrauch an Energie dürfte jedoch immer noch billiger sein als verstärkte Isolierungen oder gar Energierekuperierungen.

Eine *besonders ungünstige Lösung* hat man in der KVA-Buchs SG gefunden. Hier hat man den Wärmespeicher direkt ins Ofenhaus gestellt. Da sich insbesondere im Sommer eine unerträgliche Hitze einstellte, hat man auf dem Dach zur Abfuhr des Wärmestaus eine Dachventilation eingebaut, wobei der elektrische Strom von der hauseigenen Dampfturbine geliefert wird. Da man aber gerade im Sommer mit der überschüssigen Energie ohnehin nicht viel anzufangen weiss, wird diese Lösung als besonders originell empfunden. Der so entstandene Abstrahlungsverlust der

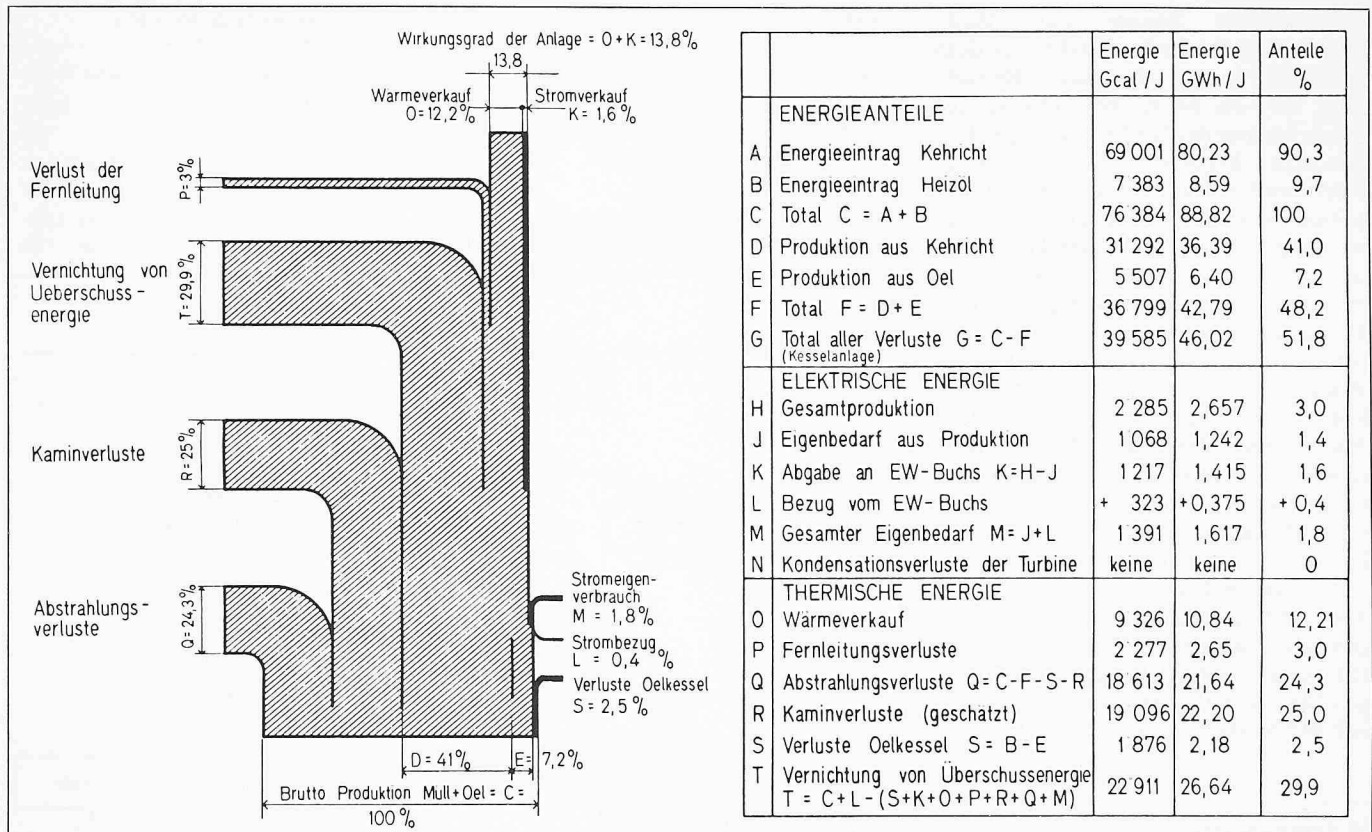


Bild 3. Exergiediagramm einer Müllverbrennung mit Fernheizung und Stromerzeugung (KVA Buchs, SG). Die Abstrahlungsverluste sind infolge eines falsch platzierten Wärmespeichers ungewöhnlich hoch

Gesamtanlage beträgt in vorliegendem Falle etwa 24% (Bild 3).

Erdspeicher (Aquiferspeicher)

Im Zusammenhang mit der Verwendung von Sonnenenergie wurde von verschiedenen Autoren die Möglichkeit der Wärmespeicherung in sogenannten Erd- oder Aquiferspeichern untersucht. Das Prinzip der Abspeicherung besteht im wesentlichen in der Einleitung von Wärme ins Grundwasser. Dabei muss der Boden der Grundwasserzone dicht und das gewünschte Speichergebiet durch eine Umfassungsmauer abge-

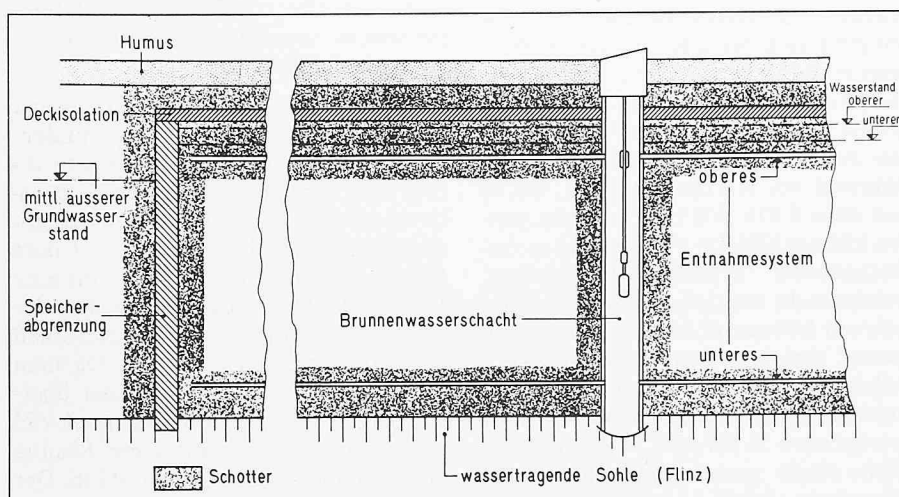
grenzt werden (Bild 4). Des weiteren soll der gesamte Speicher abgedeckt werden (z.B. mit einem Schwarzbelaag), welcher mit einer Humusschicht zugedeckt und begrünt werden kann. Bis jetzt sind nach Weissenbach [11] noch keine derartigen Speicher in Betrieb. Die bisherigen Erkenntnisse stützen sich auf verschiedene Versuche ab. Die Möglichkeit einer praktischen bautechnischen Realisierung wird in einer Arbeit von Zwisler [12] behandelt, während Delisle [13] eine Modellrechnung entwickelt hat. Winkler [14] untersuchte den Aquiferspeicher aus ökologischer und hydrobiologischer Sicht. Die Ein-

satzmöglichkeiten des Aquiferspeichers werden von den Autoren als realistisch beurteilt. Es bestehen jedoch noch grosse Wissenslücken.

Über den Entladungskoeffizienten sowie die Verluste während der Speicherung sind keine Literaturangaben vorhanden. Hingegen sind nach Weissenbach [11] Ladetemperaturen bis zu 80 °C möglich. Nach demselben Autor beträgt die spezifische Kapazität etwa 2300–2600 kJ/m³ °C. Berücksichtigt man die zu erwartende sehr unterschiedliche Temperaturschichtung sowie die möglichen Verluste, so dürfte die mittlere Energiedichte etwa zwischen 0,001–0,002 Wh/cm³ liegen.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von Klärbecken als Aquiferspeicher (Bild 5). Von dieser Möglichkeit hat die Gemeinde Zumikon Gebrauch gemacht und beheizt damit das Hallenbad, Schulhaus und das Verwaltungszentrum [15]. Allem Anschein nach scheint die Sache gut zu funktionieren, obwohl im gegenwärtigen Zeitpunkt, wegen der erst kürzlich erfolgten Inbetriebnahme, noch keine konkreten Betriebsergebnisse vorliegen. Auch über den Wärmehaushalt von Klärbecken gibt es zurzeit noch keine konkreten Untersuchungen. Einzig Güttinger [16] hat in seiner Arbeit den Temperaturverlauf des ungereinigten Abwassers der ARA Werdhölzli publiziert.

Bild 4. Aufbau eines Aquiferspeichers, nach Weissenbach [11]



Latentspeicher

Eine weitere Speicherart ist der Latentspeicher. Er eignet sich vor allem zur *Energiespeicherung im Niedertemperaturbereich*. Im Prinzip führt man einem *chemisch einheitlichen Stoff* Wärme zu (Bild 6). Dadurch erhöht sich zunächst die Temperatur bis zum Schmelzpunkt des Stoffes. Danach beginnt er bei gleichbleibender Temperatur zu schmelzen, d. h. die Energie kann bei einer konstanten, dem Verwendungszweck optimal angepassten Temperatur aufgenommen und wieder abgegeben werden. Je länger man die Energie speichern will, desto mehr sollte man ein Speichermaterial mit möglichst tiefem Schmelzpunkt wählen. Auf diese Weise kann man nämlich die Speicherverluste spürbar reduzieren oder sogar ohne Isolation gänzlich vermeiden. Allerdings wird man beim Bezug der Speicherenergie nur bei höherer Schmelztemperatur ohne Wärmepumpe auskommen.

Nebst dem Schmelzpunkt gibt es noch weitere Eigenschaften, die ein gutes Speichermaterial haben sollte, wie zum Beispiel:

- niedriger Dampfdruck,
- chemisch stabil und wenig korrosiv,
- nicht feuergefährlich oder giftig,
- reproduzierbares Kristallisationsverhalten,
- keine Degradation,
- geringe Unterkühlung und grosse Kristallisationsgeschwindigkeit,
- wenig Volumenänderung beim Phasenübergang,
- hohe thermische Leitfähigkeit,
- häufig und billig,
- hohe Energiedichte.

Die letztere Eigenschaft ist sogar die wichtigste, da von der Energiedichte die Grösse des Speichervolumens unmittelbar beeinflusst wird und damit auch die Kosten. Als Speichermedien kommen, wie eingehende Untersuchungen gezeigt haben (siehe Tabelle 3), unter anderem *verschiedene Salzhydrate* in Betracht.

An Stelle von Salzhydraten kann auch *Woodsches Metall* oder *Paraffin* als Speichermedium eingesetzt werden. Im Gegensatz zum Salz kann *Paraffin* nicht streng auskristallisiert werden, d. h. die erstarrte Masse ist im Prinzip eine wenigstens teilweise unterkühlte Flüssigkeit. Aus diesem Grunde hat dieses Speichermaterial keinen eigentlichen Schmelzpunkt, sondern lediglich einen Schmelzbereich, welcher sich oft über $\frac{1}{10}$ bis mehrere °C erstreckt. Daneben gibt es auch noch andere organische Substanzen, die als Speichermedien eingesetzt werden können (Tabelle 4). In der Praxis gibt es erst wenige Beispiele über den Einsatz von Latentwärmespeichern.

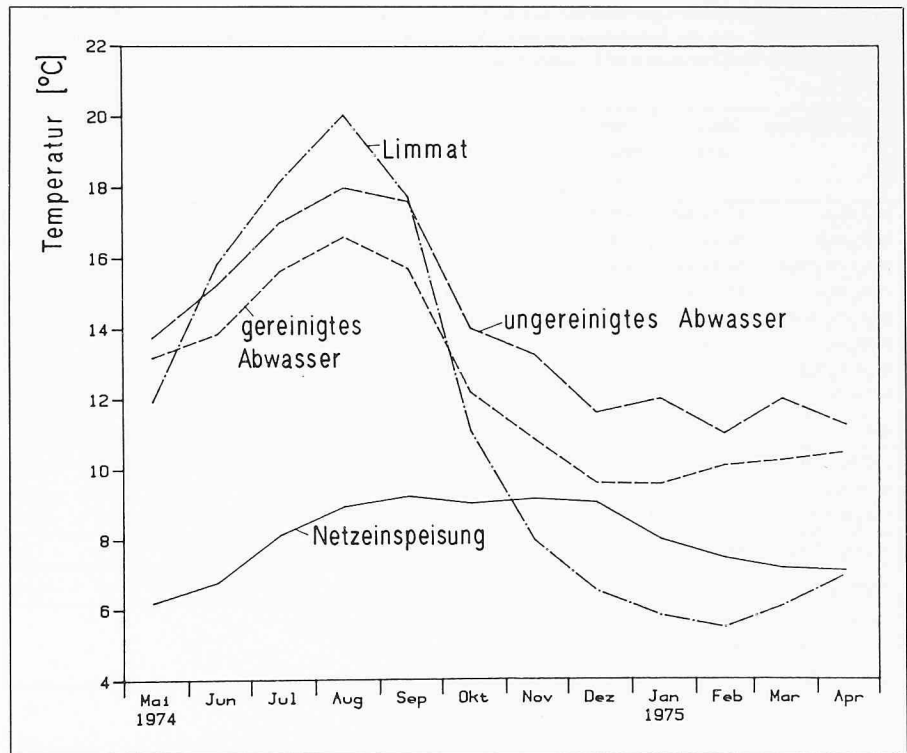


Bild 5. Temperaturverlauf des Trinkwassers bei der Netzaufgabe der Wasserversorgung Zürich, des ungereinigten und gereinigten Abwassers sowie des Trinkwassers. EAWAG [16]

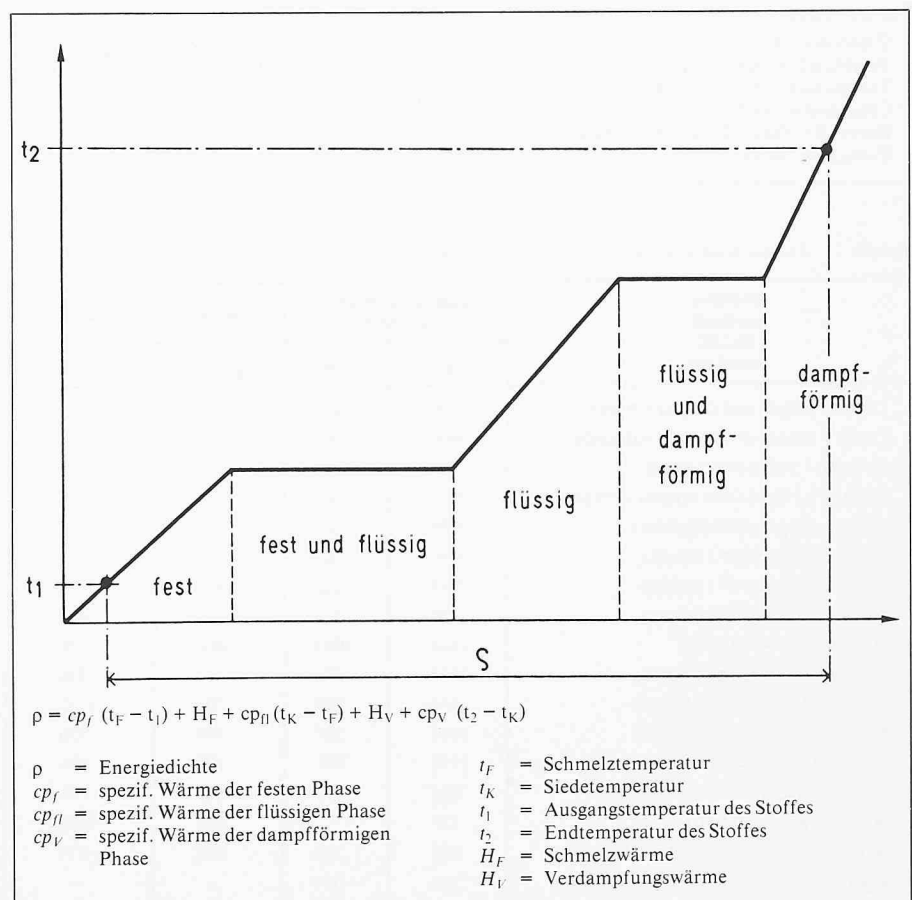


Bild 6. Schematischer Verlauf der Temperatur bei der Erwärmung eines chemisch einheitlichen Stoffes

Einen solchen Latentspeicher mit Paraffin als Speichermedium hat Burkhardt [8] in sein *Einfamilienhaus* eingebaut. Er dient vor allem zur Erzeugung

von Warmwasser. Die Speichertemperaturen im Sommer erreichten 90 °C und die möglichen Spitzentemperaturen für einen gefahrlosen Betrieb bewe-

Tabelle 3. Eigenschaften verschiedener Salzhydrate, nach Gawron und Schroeder [2]. Schmelzpunkte, Dichten bei 20 °C oder bei Schmelztemperatur, spezifische Wärmen bei Schmelztemperatur, Schmelzwärmen pro Gewicht und Volumen und Volumenänderung beim Phasenübergang einiger ausgewählter Speichermedien

Zusammensetzung	Gew.-% Salz	Schmelzpunkt °C	Dichte		spez. Wärme		Schmelzwärme		Volumenänderung $\Delta V_{f \rightarrow f}$
			D_f g/cm ³	D_{f1} g/cm ³	C_{p_f} kJ/kg·°C	$C_{p_{f1}}$ kJ/kg·°C	ΔH_f kJ/kg	ΔH_{f1} kJ/dm ³	
NaCl/H ₂ O	22.4% eut.	-21.2		1.165			207.4	241.4	
NaNO ₃ /H ₂ O	36.9% eut.	-18.5		1.29			211.8	273.2	
(NH ₄) ₂ SO ₄ /H ₂ O	39.7% eut.	-18.5		1.22			159.1	194.1	
ZnSO ₄ /H ₂ O	27.2% eut.	-6.5		1.34			150.3	201.4	
NH ₄ H ₂ PO ₄ /H ₂ O	16.5% eut.	-4.0	1.044*	1.092		3.64	164.5	171.7	+4.8%
MgSO ₄ /H ₂ O	19.0% eut.	-3.9	1.152*	1.208		3.31	217.2	250.2	+5.3%
NH ₄ HCO ₃ /H ₂ O	9.5% eut.	-3.8	0.992*	1.036		3.81	286.1	283.8	+4.7%
NaF/H ₂ O	3.9% eut.	-3.5	0.958*	1.040		3.85	322.7	309.2	+8.3%
H ₂ O	100.0%	0	0.917*	0.998	2.09 ^[5]	4.18 ^[5]	335.5 ^[5]	333.0 ^[5]	+8.1%
LiClO ₃ ·3 H ₂ O	62.6% kon.	+8.1	1.72*	1.530			253.0 ^[9]	392.9	-10.0%
KF·4 H ₂ O	44.7% kon.	+18.5	1.447*	1.455	1.84 ^[3]	2.39 ^[3]	231.0 ^[3]	336.2	-0.2%
CaCl ₂ ·6 H ₂ O	50.1% ink.	+29.2	1.62*	1.496*	1.47 ^[4]	1.47 ^[4]	172.5 ^[4]	258.1	-7.3%
Na ₂ SO ₄ ·10 H ₂ O	44.1% ink.	+32.4	1.46*	1.41*	1.76 ^[7]	3.31 ^[7]	251.2 ^[7]	354.2	-4.3%
Na ₂ HPO ₄ ·12 H ₂ O	39.7% ink.	+35.2	1.52 ^[5]	1.442*	1.55 ^[7]	3.18 ^[7]	279.6 ^[7]	403.2	-5.4%

eut. = eutektisches Gemisch, kon. = kongruent schmelzende Verbindung,
ink. = inkongruent schmelzende Verbindung
f = fest, fl = flüssig

Tabelle 4. Schmelzwärme einiger organischer Substanzen nach Kesselring [6], mit Ergänzungen des Autors

Substanz	Latente Energiedichte J/cm ³	Schmelztemperatur °C	Dichte g/cm ³	spezif. Wärme J/g K	Molgewicht g/mol
Glycerin C ₃ H ₅ (OH) ₃	250	18	1,3	0,68	92
Paraffine CH ₃ (CH ₂) _n CH ₃ ; n ca. 14–53	130	30–90	0,9	2,8	194–662
Tristearin (C ₁₇ H ₃₅ CO ₂) ₃ C ₃ H ₅	164	56	0,86	0,56	892
Cyanamid H ₂ NCN	225	43	1,08	0,66	42
Phenyl Acrylsäure C ₆ H ₅ C ₂ H ₂ COOH	143	58	1,25	0,35	148
Carbazol C ₁₂ H ₉ N	175	245	?	0,34	167

Tabelle 5. Energieinhalt von reversiblen chemischen Reaktionen (ohne Feststoffe), nach Schmidt [17]

Reaktion exotherm ⇌ endotherm	Reaktionsenthalpie bei 298°K		Temperature (°K) bei der	
	J/g	J/cm ³	10% Dissoziation	90% Dissoziation
CO(G) + 3H ₂ (G) ⇌ CH ₄ (G) + H ₂ O(L)	7345	371	–	–
CO(G) + 3H ₂ (G) ⇌ CH ₄ (G) + H ₂ O(G)	6053	306	754	1466
C ₂ H ₄ (G) + H ₂ (G) ⇌ C ₂ H ₆ (G)	4561	559	841	1205
2 CO(G) + 2 H ₂ (G) ⇌ CH ₄ (G) + CO ₂ (G)	4118	362	778	1152
CO(G) + 2 H ₂ (G) ⇌ CH ₃ OH(L)	3996	248	345	434
N ₂ (G) + 3 H ₂ (G) ⇌ 2 NH ₃ (L)	3861	189	–	–
N ₂ (G) + 3 H ₂ (G) ⇌ 2 NH ₃ (G)	2695	132	346	528
2 NO(G) + O ₂ (G) ⇌ N ₂ O ₄ (L)	1750	362	549	930
SO ₂ (G) + Air ⇌ SO ₃ (G)*	1544	1692	806	1270
SO ₂ (L) + 1/2 O ₂ (G) ⇌ SO ₃ (L)	1517	976	792	1235
SO ₂ (G) + 1/2 O ₂ (G) ⇌ SO ₃ (G)	1235	794	792	1235
NO(G) + 1/2 O ₂ (G) ⇌ NO ₂ (G)	1243	257	549	930
CO(G) + Cl ₂ (L) ⇌ CO Cl ₂ (L)	1172	541	628	881
SO ₃ (L) + H ₂ O(L) ⇌ H ₂ SO ₄ (L)	885	1442	535	723
SO ₂ (G) + Air ⇌ SO ₃ (G)	727	–	806	1270
NO(G) + 1/2 Cl ₂ (L) ⇌ NO Cl(L)	695	268	425	819
H ₂ O(L) + H ₂ SO ₄ (L) ⇌ H ₂ SO ₄ · H ₂ O(L)	230	327	–	–

gen sich um 130 °C (Begrenzung wasserseitig). Die gesamte Speichermasse beträgt etwa 1000 kg. Im Zentrum des Speicherinnern befindet sich ein Warmwasserboiler von etwa 140 Liter

Fassungsvermögen. Als Wärmequelle dient ein Sonnenkollektor. Dadurch konnten 1978 etwa 680 kg Heizöl substituiert werden oder 0,68 g Heizöl/g Paraffinmasse und Jahr. (Zufolge Än-

derungen liegen die Werte heute höher.) Umgerechnet ergibt dies eine mittlere jährliche Energiedichte von 7,1 Wh/cm³a. Die spezifischen Investitionskosten der Gesamtanlage (Prototyp mit Kostenbasis 1978) werden von Burkhardt mit 20,5 Fr./kg substituierter Heizöl angegeben.

Das konstruktive Hauptproblem fast aller Latentspeicher besteht in der Wärmeübertragung von der Kontaktfläche ans Speichermedium sowie der schlechten Wärmeleitung innerhalb des Speichermediums. Nebst den technisch-physikalischen Eigenschaften spielt jedoch der Preis des Mediums eine grosse Rolle, da dieses in relativ grossen Mengen benötigt wird. Die Energiedichte der Speichermedien liegt nämlich in der Grössenordnung von 0,035 bis 0,07 Wh/cm³. Zudem muss während der Speicherung mit Verlusten von etwa 0,02%/h gerechnet werden. Dies ist auch der Grund, weshalb der Latentspeicher im Prinzip nur zur Überbrückung von witterungsbedingten Energielücken eingesetzt werden kann.

Chemische Speicher

Die chemischen Speicher arbeiten nach dem Prinzip des Stoffaustausches, d. h. durch reversible chemische Reaktionen mittels Wärmezufuhr bzw. Wärmeabfuhr. Die zahlreichen reversiblen chemischen Reaktionen können nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt werden: nach dem Temperaturbereich, nach dem Phasenzustand der Reagenzien (z.B. fest, flüssig oder gasförmig) oder nach der Volumenänderung bei der Reaktion. Die Einteilung in Nieder-, Mittel- und Hochtemperatursysteme ist recht willkürlich und wird am besten mit der Anwendung gekoppelt.

Der Phasenzustand der Reagenzien ist von ungeheurer Bedeutung, wenn es um den Entscheid geht, ob ein chemischer Wärmespeicher praktisch durchführbar ist oder nicht. Zahlreiche chemische Reaktionen haben vielversprechende Wärmetönungen, wenn man die Reaktionsenthalpien ausrechnet und in einer Tabelle zusammenfasst [17], vgl. Tabelle 5 und 6. In der praktischen Ausführung ist es jedoch sehr schwierig, guten Wärmeübergang von reagierenden Feststoffen (z.B. gebranntem Kalk mit Wasser) an das Arbeitsmedium der Kraftanlage (Wasser, Dampf) zu erreichen. Andererseits erlauben Gase zwar einen guten Wärmeübergang, aber es ist sehr schwierig, grosse Gasvolumina zu speichern, es sei denn, man hat ein ausgedientes Erdgasfeld oder Salzbergwerk verfügbar.

Am praktischsten sind jedoch die Flüssigkeiten, weil sie leicht gespeichert und gefördert werden können und im Wär-

mespeicher oder Reaktor verdampfen. Feststoffe können gelagert werden, ohne dass man sich Sorgen um Undichtheiten machen muss. Sie korrodieren nicht, solange sie trocken sind. Sie können jedoch zusammenbacken, was es sehr schwierig macht, sie aus einem Vorratssilo in einen Reaktor zu fördern.

Die wichtigste Bedingung, die an chemische Reaktionen zur Wärmespeicherung gestellt werden muss, ist die der *Reversibilität*. Die Reaktion muss in beiden Richtungen reversibel ablaufen, ohne Nebenprodukte zu bilden, die sich im Laufe der wiederholten Reaktion und Abtrennung anreichern würden. Des weiteren muss sie schnell genug ablaufen. Der Chemiker auf der Suche nach reversiblen Reaktionen kann schnell einem Irrtum zum Opfer fallen, wenn die *chemische Kinetik* ausser Acht gelassen wird. Viele Reaktionen, die thermodynamisch möglich sein sollten, werden durch kinetische Hinderung vereitelt.

Im allgemeinen kann man jedoch annehmen, dass ein chemischer Wärmespeicher als *geschlossener Kreislauf* arbeiten wird. Das System wäre hermetisch abgeschlossen, und nachdem es anfänglich mit Chemikalien gefüllt ist, sollten keine weiteren Chemikalien erforderlich sein. Falls man jedoch Reaktionen mit Wasser, Sauerstoff oder Stickstoff vorsieht, wäre es im Prinzip möglich, einen offenen Kreislauf zu benutzen und Wasser, Sauerstoff oder Stickstoff von der Umwelt zu entnehmen oder an die Umwelt abzugeben.

Zieht man all die vorstehend beschriebenen Randbedingungen in Betracht, so sieht man sofort, dass bei vielen vielversprechenden Reagenzien ein grosses Fragezeichen gesetzt werden muss. Eine weitere Einschränkung ist das Trennverfahren. Dieses sollte nämlich möglichst einfach und sicher sein. Die bisher bekannten Verfahren [9] sind sehr kompliziert und aufwendig. Zudem sind für viele interessanten und vielversprechenden Reagenzien noch keine oder nur unbefriedigende Verfahren bekannt.

Tabelle 6. Energieinhalt von reversiblen chemischen Reaktionen (mit Feststoffen), nach Schmidt [17]

Reaktion exotherm ⇌ endotherm	Reaktionsenthalpie bei 298°K		Temperatur (°K) bei der P _{Diss.} =		
	J/g	J/cm ³	0.1 bar	1 bar	P _{Kond.}
Li(S) + 1/2 H ₂ (G) ⇌ Li H(S)	11,403	897	1181	1223	—
Li ₂ O(S) + CO ₂ (G) ⇌ Li ₂ CO ₃ (S)	3029	2899	—	—	—
Na ₂ O(S) + CO ₂ (G) ⇌ Na ₂ CO ₃ (S)	3014	3548	—	2445	—
Mg(S) + H ₂ (G) ⇌ Mg H ₂ (S)	2893	204	~500	560	—
CaO(S) + SO ₃ (L) ⇌ CaSO ₄ (S)	2539	5821	—	—	—
CaO(S) + CO ₂ (G) ⇌ CaCO ₃ (S)	1776	2239	1028	1171	> 1500
MgO(S) + CO ₂ (G) ⇌ MgCO ₃ (S)	1387	1576	610	670	850
BaO(S) + CO ₂ (G) ⇌ BaCO ₃ (S)	1353	2976	—	1473	—
NiCl ₂ (S) + 6NH ₃ (L) ⇌ [Ni(NH ₃) ₆] Cl ₂ (S)	1347	1515	—	—	—
NH ₃ (L) + H ₂ SO ₄ (L) ⇌ NH ₄ HSO ₄ (S)	1256	1774	—	—	—
[Ni(NH ₃) ₆] Cl ₂ (S) + 4NH ₃ (L) ⇌ [Ni(NH ₃) ₆] Cl ₂ (S)	1048	—	—	—	—
KF(S) + (HF) _n (L) ⇌ KHF ₂ (S)	1031	1813	600	725	730
CaO(S) + H ₂ O(L) ⇌ Ca(OH) ₂ (S)	880	1861	722	820	676
NaF(S) + (HF) _n (L) ⇌ NaHF ₂ (S)	832	1431	—	—	—
MgO(S) + H ₂ O(L) ⇌ Mg(OH) ₂ (S)	644	1280	495	555	465
BaO(S) + H ₂ O(L) ⇌ Ba(OH) ₂ (S)	598	2283	1052	1271	961
FeCl ₂ (S) + 6NH ₃ (L) ⇌ [Fe(NH ₃) ₆] Cl ₂ (S)	302	326	—	390	—
CaCl ₂ (S) + 6NH ₃ (L) ⇌ [Ca(NH ₃) ₆] Cl ₂ (S)	210	202	—	310	—

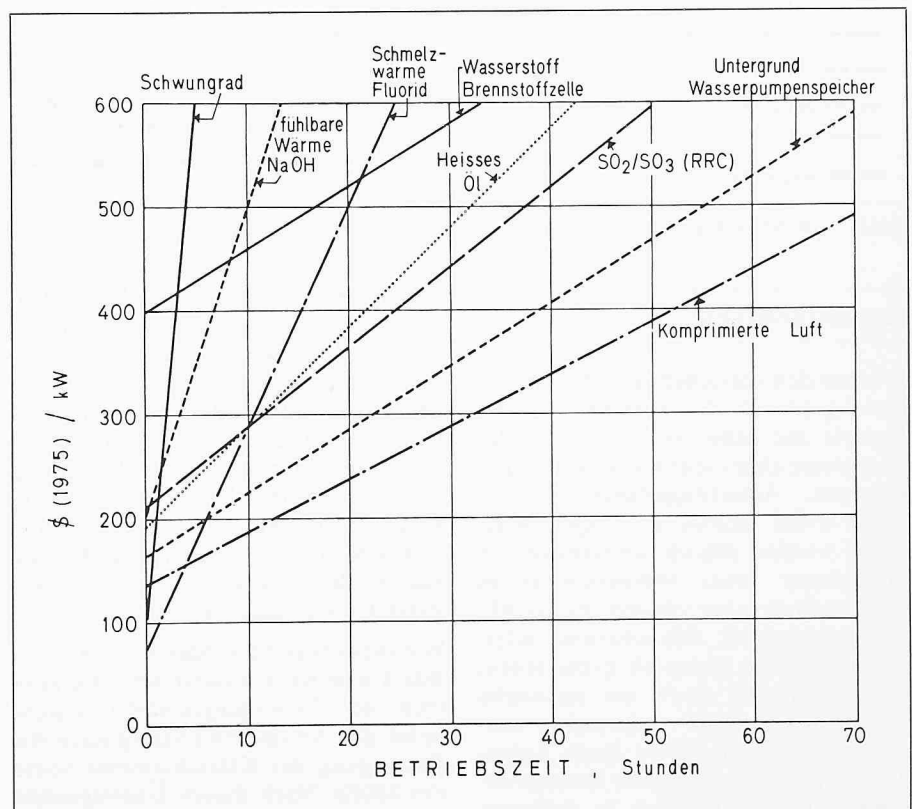


Bild 7. Vorläufiger Vergleich der Anlagen und Speicherkosten von Energiespeichern [18]

Speicherkosten

Über die Kosten der verschiedenen Speichertypen gibt es zurzeit noch *keine zuverlässigen Angaben*, die einen objektiven Vergleich verschiedener Speichersysteme erlauben. Die Kosten hängen naturgemäss von der Art der Konstruktion, dem verwendeten Speichermedium sowie den notwendigen peripheren Geräten ab. Immerhin kann schon heute festgestellt werden,

das der *Öltank mit Abstand der billigste und einfachste Energiespeicher* ist und bleibt. Alle anderen Systeme werden erheblich teurer sein. Für schweizerische Verhältnisse betragen die spezifischen Kosten eines Öltanks etwa 3000 Fr./m³ oder 25,8 Rp./kWh.

Wie aus Bild 7 hervorgeht, wurde von der Public Service Electric and Gas

Company of New Jersey eine Kostenanalyse über verschiedene Systeme durchgeführt. Die Angaben dürfen selbstverständlich nur mit grössten Vorbehalten verwendet werden. Zudem können sie nicht ohne weiteres auf schweizerische Verhältnisse übertragen werden. Hingegen erlauben sie einen groben Kostenvergleich zwischen den einzelnen Systemen.

ist technisch gesehen ohne weiteres realisierbar. Einzig die unterschiedlich anfallende Energie bringt einige Speicherprobleme mit sich. Da aber die Kapazitäten der Speichereinrichtungen grössere Investitionen erfordern, sollte bei den Wärmekollektiven nach Energiesparmassnahmen gesucht werden, wie zum Beispiel bessere Isolationen.

Für die Beurteilung der Isolation eines Gebäudes ist die *Energiekennzahl* eine wichtige Grösse [19]. Diese bemisst nämlich den jährlichen Endenergieverbrauch pro m² beheizter Bruttogeschossfläche. Leider sind bisher nur wenige solcher Energiekennzahlen veröffentlicht worden, und es ist zu hoffen, dass sehr bald *weitere Zahlenergebnisse*, zum Beispiel über Spitäler, Hotels, Banken, Bundesbauten, PTT usw., publiziert werden. Ohne Kenntnisse über die tatsächlichen und möglichen Energiekennzahlen ist der Aufbau eines optimalen Wärme- und Entsorgungskollektives sehr schwierig. Zudem kann es im Bereiche der Energiebewirtschaftung zu unerwünschten Mehrinvestitionen führen, was dann zu einer erheblichen Verteuerung des gesamten Energie- und Entsorgungskonzeptes führen kann.

Adresse des Verfassers: H. Hämmerli, Ing. SIA, Mutschellenstr. 14, 8002 Zürich.

Literatur

- [1] Wolf H.: Persönliche Mitteilungen. Gasverbund Ostschweiz (November 1981)
- [2] Gawron K. / Schröder J.: «Eigenschaften einiger Salzhydrate zur latenten Speicherung thermischer Energie.» VDI-Berichte Nr. 288 (1977), p. 80
- [3] Schröder J.: «Proceedings on the Symposium on Energy Storage.» The Electrochemical Society Inc. (1976), p. 206
- [4] Lorsch H. / Kauffman K. / Denton J.: «Thermal Energy Storage for Solar Heating and Off-peak Air Conditioning.» Energy Conversion, Vol. 15, 1-8 (1975)
- [5] Landolt-Börnstein: «Zahlenwerte und Funktionen.» Springer Verlag (1964)
- [6] Kesselring P.: «Zur Energiedichte im Latentwärmespeicher – einige grundsätzliche physikalische Überlegungen.» VDI-Berichte Nr. 288 (1977), p. 91
- [7] Telkes M.: «Storage of Solar Heating/Cooling.» Solar Energy Applications Symposium ASHRAE-Meeting Montreal (1974)
- [8] Burkhardt R.: «Juhui Sunnewasser.» EMPA-Kontakt Nr. 44 (April 1979)
- [9] Bundy F.P. / Herrick C.S. / Kosky P.G.: «The Status of Thermal Energy Storage.» General Electric Report Nr. 76 CRD 041 (April 1976)
- [10] Lindner F. / Scheunemann K.: «Die Entwicklung eines dynamischen Glaubersalz-Latentwärmespeichers.» Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt DFVLR-FB 81-32 (1981); Seite 77
- [11] Weissenbach B.: «Speicherung fühlbarer Wärme in Schotterböden.» VDI-Berichte Nr. 288 (1977), p. 47-55
- [12] Zwisler H.: «Bautechnik und wasserwirtschaftliche Massnahmen bei der Errichtung von Gross-Wärme-Speichern.» VDI-Berichte Nr. 288 (1977), p. 65-73
- [13] Delisle G.: «Modellrechnungen zur Speicherung von Abwärme in flachem Untergrund.» VDI-Berichte Nr. 288 (1977), p. 55-66
- [14] Winkler M.: «Aquiferspeicher aus ökologischer und hydrobiologischer Sicht.» VDI-Berichte Nr. 288 (1977), p. 181-183
- [15] Wick B.: «Das Wärmekollektiv Zumikon: Wärmenutzung aus Kläranlagen.» Schweizer Ingenieur und Architekt 40/81 (1981), p. 854-860
- [16] EAWAG (Imboden D. / Güttinger H.): «Wärmepumpen an Oberflächengewässern; ökologische Probleme und Einsatzmöglichkeiten in der Schweiz.» Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Studie Nr. 19 (1981), p. 23
- [17] Schmidt E.W.: «Reversible chemische Reaktionen zur Wärmespeicherung.» VDI-Berichte Nr. 288 (1977), p. 117
- [18] Public Service Electric and Gas Company, Newark, New Jersey. An Assessment of Energy Storage Systems Suitable for Use by Electric Utilities. EPRI Report EM-264, EPRI Project 225, ERDA Contract E(11-1)-2501 (July 1976)
- [19] Wick B.: «Energie im Mehrfamilienhaus: Verbrauchswerte und Sparpotential.» Schweizer Ingenieur und Architekt 5/82 (1982), p. 50-56
- [20] Oplatka G. / Saurer G.: «Thermische Energiespeicherung in grossen Behältern aus Spannbeton.» Schweizer Ingenieur und Architekt 21/81 (1981), p. 485-490.

Hannover-Messe 1982 im Zeichen des gestiegenen Energiebewusstseins

Neuheiten à la carte

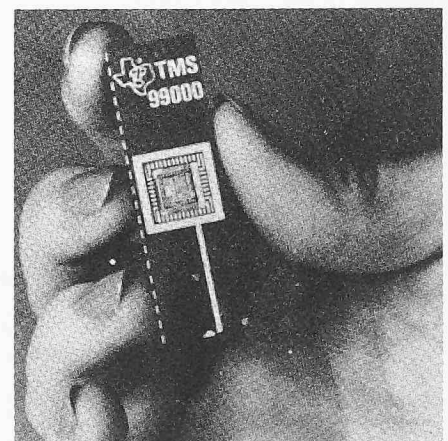
Zehn Fachmessen zur selben Zeit am gleichen Ort: Hannover-Messe 1982 vom 21.-28. April. Mehr als 6100 Firmen aus über 40 Nationen bürgten für ein internationales Angebot. Durch die mehr als eine halbe Million Besucher erhält diese Messe eine «Seismographenrolle» im Bereich der weltweiten technischen Wirtschaftstätigkeit. Verschiedene Sonderschauen ergänzen die Messe. Dem Thema «Energie – Technologien zur sinnvollen Energienutzung» ist die nachfolgende Reportage gewidmet.

Der Bereich Energie als Bestandteil der diesjährigen Hannover-Messe spiegelte das weltweit gestiegene Energiebewusstsein: Mehr als 700 Aussteller hatten sich für diesen Teilbereich angemeldet. Der Besuch dieses Ausstellungsbereichs wurde dem Gast unter dem Titel «Technologien zur sinnvollen Energienutzung» durch folgende, jeweils zusammengefasste Interessensbereiche erleichtert:

- Bereitstellung von Primärenergie,
- Energieumwandlung,
- Wärmeverteilung,
- Stromverteilung,

- Gasspeicherung und -verteilung,
- Luftbehandlung.

Nachfolgend wird eine Auswahl der Neuigkeiten dieses Ausstellungsbereichs geschildert. Dabei wurde die Anzahl der ausgewählten Produkte durch folgende Überlegung eingeschränkt: Nicht jeder der oben aufgezählten Interessensbereiche verdient, gemessen am Energieversorgungssystem in unserem Lande, die gleiche Gewichtung. Die Selektion wurde aus spezifisch schweizerischer Sicht vorgenommen, und es darf deshalb erwartet werden, dass die meisten der



Mikroprozessor für Haushaltmaschine (50 000 eingebaute Transistorfunktionen)

beschriebenen Neuheiten das Interesse des technisch orientierten Lesers verdienen.

Mikroprozessorgesteuerte Haushaltmaschinen

Durch den Einsatz von Elektronik in Haushaltmaschinen lässt sich ein grosses Sparpotential erschliessen: Mikroprozessoren optimieren Systemabläufe, die früher als starre Standardprogramme vorgegeben worden