

Thermische Energiespeicherung in grossen Behältern aus Spannbeton

Autor(en): **Oplatka, Georg / Saurer, Gaudenz**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 21

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74500>

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.

Thermische Energiespeicherung in grossen Behältern aus Spannbeton

Von Georg Oplatka, Zürich, und Gaudenz Saurer, Bern

Die Wirtschaftlichkeit der elektrischen Energieversorgung lässt sich durch die thermische Speicherung wesentlich steigern, indem kostspielige Kraftwerkskomponenten trotz dem unregelmässigen Energiebedarf gleichmässig und voll ausgelastet werden können. Dieser Aufsatz behandelt einen Lösungsvorschlag, der aus entsprechenden Untersuchungen als eine aussichtsreiche Variante hervorgegangen ist. Dabei wird einerseits die thermische Auslegung des Systems, andererseits ein Konzept des für die Energiespeicherung notwendigen Behälters (er besteht in diesem Fall aus Spannbeton) vorgestellt.

Die Speicherung bezweckt, den wirtschaftlichen Nachteilen des zeitlich ungleichmässig anfallenden Bedarfes an elektrischer Energie entgegenzuwirken, indem kostspielige Komponenten der Energieversorgungseinrichtungen ständig und in hohem Grade ausgelastet werden. Bei schwacher Nachfrage wird Energie gespeichert, so dass bei grosser Belastung über zusätzliche Energiequellen verfügt werden kann (Bild 1).

In einem dampfbetriebenen Kraftwerk kann man bei Schwachlastbetrieb Energie in Form von heissem Wasser speichern und sie bei Spitzenlastbedarf als zusätzliche elektrische Arbeit wieder freisetzen. Durch diese Massnahmen wird der Dampferzeuger (vornehmlich Reaktor) gleichmässig und voll belastet; folglich sinken die spezifischen Gesteungskosten der erzeugten elektrischen Arbeit.

Die Zukunftschancen der thermischen Speicherung werden positiv beurteilt, wie die Fülle der einschlägigen Literatur bestätigt; besonders auffallend sind hier die umfangreichen Berichte, die in

den USA im Auftrag des Department of Energy erarbeitet werden. Ist einmal die gegenwärtige, vorwiegend politisch bedingte Krise im Kernkraftwerkbau überwunden und steigt der von diesen Kraftwerken erzeugte Anteil auf 40 bis 50% des gesamten elektrischen Leistungsbedarfes an, so kommt den Speichern eine dominierende Rolle zu, da sich mit der thermischen Speicherung das Spitzenlastproblem innerhalb eines Kraftwerkes in grossem Masse und mit relativ bescheidenen Mitteln bewältigen lässt. Die Technik der einzelnen Komponenten ist bekannt, nur der für die Speicherung von Heisswasser notwendige Behälter, insbesondere dessen Wärmeisolation, ist neu zu entwickeln. Zu diesem Zweck sind zahlreiche Studien im Gange, wobei der Spannbetonbehälter als eine aussichtsreiche Variante gilt.

Der vorliegende Aufsatz behandelt zunächst das Speichersystem im allgemeinen, danach das Konzept eines Speicherbehälters im engeren Sinne. Abschliessend werden anhand von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen Konsequenzen gezogen.

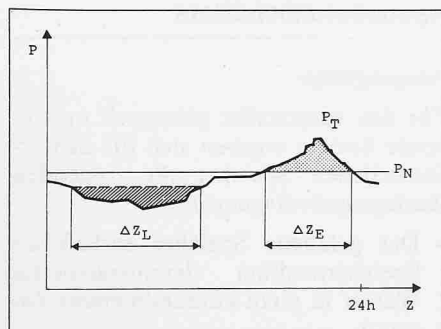


Bild 1. Tageslastdiagramm

P	Leistung
Z	Zeit
P_N	Nennleistung des Kraftwerkes
P_T	Spitzenbelastung
ΔZ_L	Ladeperiode des Speichers
ΔZ_E	Entladeperiode des Speichers

- Grosse Zusatzleistung (bis 25% der Nennleistung)
- Grosse Zusatzarbeit (einige 100 MWh)
- Mittelfristige Speicherdauer (1 Tag, evtl. 2 Tage)
- Bekannte, betriebssichere Systemkomponenten
- Wirtschaftlich sinnvolle Lösungen

Das gekoppelt operierende Speichersystem

Nach vergleichenden Untersuchungen verschiedener Lösungsvorschläge ist das gekoppelt operierende Speichersystem (GOS) als die aussichtsreichste Lösung erkannt worden.

Die Prinzipschaltung ist in Bild 2 dargestellt. Man erkennt zwei *getrennte Kraftwerk-Kreisläufe*, die *im wesentlichen nur durch einige Leitungen miteinander verbunden* sind. Der obere Bildteil zeigt die übliche *Kraftwerksschaltung* (im folgenden als *Hauptkreislauf* bezeichnet), der untere Bildteil das *Speichersystem* mit *Speicher*, *Turbogruppe* sowie den ergänzenden Apparaten (*Hilfskreislauf*).

Der Hauptkreislauf bedarf keiner weiteren Erläuterung. Im Hilfskreislauf wird Energie in heissem Wasser gespeichert und daraus im Bedarfsfall Arbeit in Form von elektrischem Strom erzeugt. Die wichtigsten Komponenten des Hilfskreislaufes sind der Speicher 12, die Turbogruppe 17, 18 mit dem Kondensator 19 und das Expansionsgefäss 16 mit dem Drosselorgan 15. Ergänzende Einrichtungen stellen die Pumpen 13, 20, 21 und der Ausgleichsbehälter 14 dar.

Lade- und Entladeprozesse lassen sich auch in Bild 2 verfolgen. Die doppelt ausgezogenen Linien deuten auf den Ladeprozess, die punktierten Linien auf den Entladeprozess hin.

Im *entladenen Zustand* enthält der Speicher 12 kein Wasser, sondern nur Dampf, während der Ausgleichsbehälter bei Atmosphärendruck mit kaltem Wasser (Kondensat) gefüllt ist. Beim *Laden* wird über die Leitung 23 Kondensat aus dem Zwischenüberhitzer in den Speicher geführt, und der Behälter 14 entleert sich allmählich. Es ist beachtenswert, dass der Ladeprozess in zwei Etappen erfolgt. In der ersten steigt der Speicherdruck bis zu seinem Höchstwert, in der zweiten wird bei konstantem Druck der Dampfüberschuss durch die Leitung 24 in den Hauptkreislauf abgeführt. In *geladenem Zustand* ist der

Das Speichersystem

Randbedingungen

Um aus den zahlreichen Speichermöglichkeiten eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung herausarbeiten zu können, werden folgende Randbedingungen gesetzt:

- Zielsetzung: Erzeugung von elektrischem Strom
- Speicherungsanlage innerhalb des Elektrizitätswerkes
- Arbeitsmedium: Einstoff (Wasser)

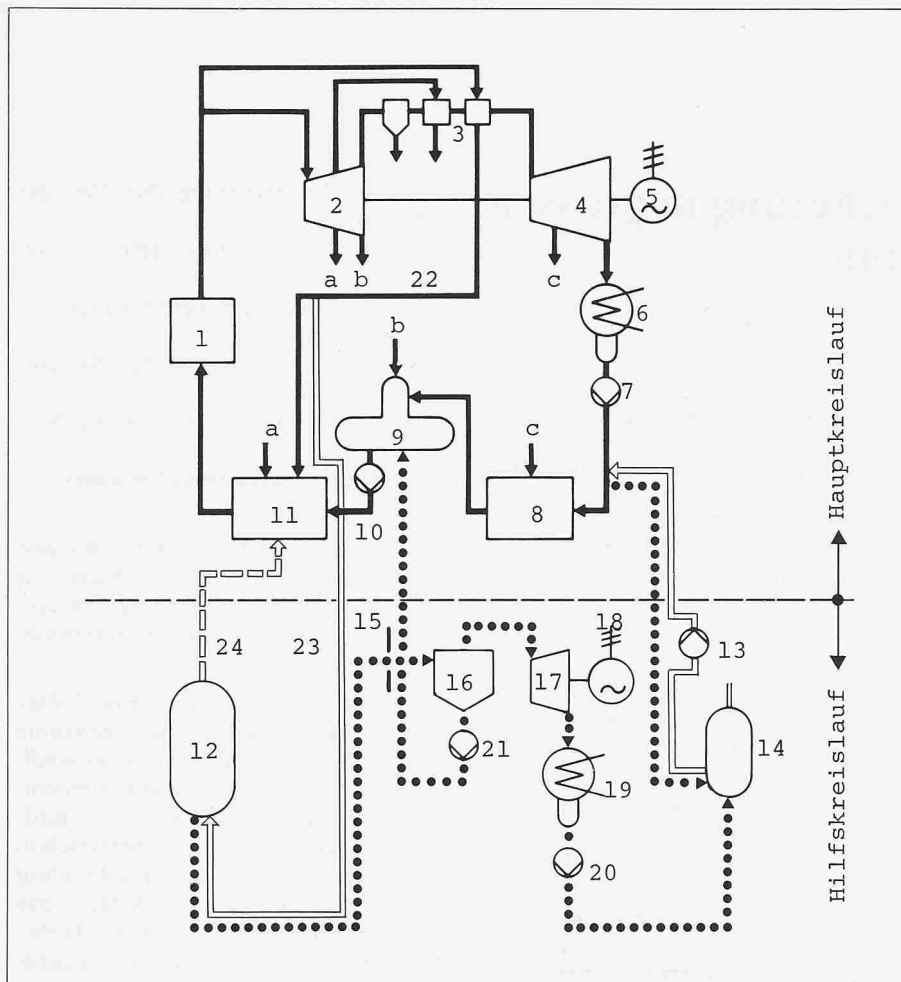


Bild 2. Schaltungsschema für Speisewasserspeicherung bei Niederdruck

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1 Dampferzeuger (Reaktor) | 14 Ausgleichsbehälter |
| 2 Hochdruck-Turbine | 15 Drosselorgan |
| 3 Wasserabscheider-Zwischenüberhitzer | 16 Expansionsgefäß |
| 4 Niederdruck-Turbine | 17 Turbine |
| 5 Generator | 18 Generator |
| 6 Kondensator | 19 Kondensator |
| 7 Kondensatpumpe | 20 Kondensatpumpe |
| 8 Niederdruckvorwärmer | 21 Pumpe für Entladebetrieb |
| 9 Speisewasserbehälter | 22 Kondensatleitung vom Zwischenüberhitzer |
| 10 Speisewasserpumpe | 23 Kondensatleitung zum Speicher |
| 11 Hochdruckvorwärmer | 24 Abblaseleitung |
| 12 Speicher | a-c Anzapfdampf von den Teilturbinen zu den Vorwärmern |
| 13 Pumpe für Ladebetrieb | |

Die doppelt ausgezogenen Linien deuten den Ladeprozess, die gepunkteten den Entladeprozess an

Speicher mit heissem Wasser gefüllt und der Behälter 14 leer. Beim *Entladen* entspannt sich das gespeicherte heisse Wasser im Drosselorgan 15 und zerfällt im Expansionsgefäß 16 in Dampf und Wasser. Der Dampf treibt die Turbine 17 an, kondensiert im Kondensator 19 und wird in den Behälter 14 gefördert. Das Wasser gelangt aus dem Expansionsgefäß 16 über die Pumpe 21 zum Speisewasserbehälter des Hauptkreislaufes 9 und dient als Speisewasser. Es ersetzt somit das Kondensat des Hauptkreislaufes, das nun nicht zu den Niederdruckvorwärmern 8, sondern zum Ausgleichsbehälter 14 geführt wird. Als Folge dieser Massnahmen lassen sich die Niederdruckanzapfungen c

abstellen, und die Leistung der Hauptturbine steigt, womit die Hauptturbine also auch zur Erzeugung der Mehrleistung beiträgt.

Jeder Apparat dieser Schaltung ist gut bekannt. Die einzige konstruktiv noch nicht ausgeführte Komponente ist der Speicher selbst, der ein Speichervolumen von 5000 bis 20 000 m³ haben kann. Für einen solchen Behälter gibt es verschiedene Vorschläge:

- Vorgespannte Behälter, entweder in
 - Beton oder
 - Stahlguss
- Stahlbehälter
- Kavernen in geeigneten geologischen Formationen

Ein durchgerechneter Fall

Um die *Wirtschaftlichkeit* des GOS-Vorschlages beurteilen zu können, wurde ein Kraftwerk bis zur Offertreife durchgerechnet. Als Basis diente ein Kernkraftwerk von 1400 MW, mit zweistufiger Zwischenüberhitzung und sechs Vorwärmerstufen, wovon zwei Hochdruckstufen.

Die Bedingungen für die Speicherung sind absichtlich streng und ungünstig gestellt, insbesondere erhält beim Ladebetrieb der Speicher nur vom Hochdruckteil des zweistufigen Zwischenüberhitzers Heisswasser, so dass die Ladezeit etwa 16 h dauert, während sich die Entladezeit bei Voll-Lastbetrieb mit etwa 0,75 h berechnet.

Die Berechnung ergab die folgenden wichtigsten *Resulate*:

- Netto-Leistungsausfall beim Ladebetrieb		18,8 MW
- Ladedauer: 1. Etappe	5,2 h	
2. Etappe	10,7 h	
Total	15,9 h	
- Arbeitsausfall beim Ladebetrieb		299 MWh
- Netto-Mehrleistung beim Entladebetrieb, total		296 MW
- Hauptturbogruppe	115 MW	
- Hilfsturbogruppe	181 MW	
- Entladedauer		0,75 h
- Mehrarbeit beim Entladebetrieb		222 MWh
- Netto-Mehrleistung beider Turbogruppen, bezogen auf Normal-Klemmenleistung		21 %
- Mehrarbeit/Minderarbeit (Speicherungswirkungsgrad)		74 %
- Speichervolumen (60 bar)		6300 m ³
- Spezifische Ausnutzung des Speichers		35 kWh/m ³

Man kann natürlich sowohl die Mehrleistung als auch die Mehrarbeit erhöhen. Für die Mehrleistung ist eine entsprechende Auslegung der Hilfsturbogruppe und des Speisewasserbehälters 9 nötig, während man für die zusätzliche Mehrarbeit den Speicher vergrössern muss.

Konzept eines Spannbetonbehälters

Ausgangslage

Für das vorgestellte gekoppelt operierende System ergeben sich für den erforderlichen Speicher die folgenden *Auslegungsbedingungen*:

- Der geladene Speicher enthält als Speichermedium demineralisiertes Wasser in nicht kontaminiertem Zustand.
- Die Werte für Innendruck und Temperatur des Speichermediums betragen in geladenem Zustand 60 bar bzw. 275 °C und reduzieren sich im entladenen Zustand auf etwa 40 bar bzw. 240 °C.

- Das erforderliche Speichervolumen beträgt im Fallbeispiel 6300 m^3 .
- Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit wird der tägliche Wärmeverlust auf 1% des $1,7 \times 10^6 \text{ kWh}$ betragenden Gesamtenergieinhaltes beschränkt.
- Pro Jahr werden rund 250 Lade/Entladezyklen erwartet, die bei einer Auslegungsliebensdauer von 50 Jahren 12 500 betriebsbedingte Lastwechsel ergeben.

Speicherbehälter sind grundsätzlich aus verschiedenen *Materialien* in ein- oder mehrzelliger Ausführung denkbar. Prüft man die für den Bau eines Behälters möglichen Materialien, so stehen neben den vom herkömmlichen Behälterbau bekannten *Stählen* ebenfalls vorgespannte *Strukturen in Beton oder Gusseisen* im Vordergrund. Diese eignen sich speziell für die Aufnahme hoher Innendrucke bei grossem Speichervolumen. Wirtschaftlich interessant scheinen dabei Behälter aus *Spannbeton* zu sein, deren Bau von den in den letzten 25 Jahren im Kernkraftwerkbau gewonnenen Erfahrungen profitieren kann.

Gleichwohl gibt es für Spannbetonbehälter unter den oben vorgegebenen extremen Druck- und Temperaturbeanspruchungen *gegenwärtig keine verbindlichen Bauvorschriften oder Normen*. Der auch ausserhalb der USA oft angewendete «ASME Boiler and Pressure Vessel Code» ist für die vorliegenden hohen Innendrucke nicht anwendbar. In dieser Norm wird zudem eine völlig rissefreie Spannbetonstruktur vorgeschrieben, um in Reaktorbehältern den Austritt von aktivierten Stoffen zu verhindern und eine möglichst hohe Abschirmung der Strahlung zu gewährleisten.

Da im vorliegenden Fall diese Abdicht- und Abschirmaufgaben entfallen, kann auf das einschneidende und zu unwirtschaftlichen Wandsdicken führende Kriterium der *Risselfreiheit* verzichtet werden. Ausgehend von der Forderung nach genügender Tragwerksicherheit und Gebrauchsfähigkeit ergibt sich somit die Möglichkeit einer *relativ dünnwandigen Auslegung des Spannbetonbehälters mit entsprechender Rissebildung*.

Prinzipielle Komponenten

Speicherbehälter aus Spannbeton können prinzipiell aus den folgenden Komponenten aufgebaut sein (Bild 3):

- Innerer Behälter
- Isolationssystem
- Dichthaut
- Druckbehälter

Der bei gewissen Isolationssystemen erforderliche *Innere Behälter* ist eine Stahlkonstruktion, die das Speicherme-

dium umschliesst und die folgenden Aufgaben erfüllt:

- Abdichten der Isolation gegenüber Wasser- oder Dampfeinflüssen,
- Separieren des allfällig im Isolationsraum vorhandenen druckübertragenden Mediums vom Speichermedium und
- Aufnahme von Differenzdrücken zwischen Speicher- und Druckübertragungsmedium.

Bei Isolationen, die über eine ausreichende Druckfestigkeit verfügen, entfallen die letzten beiden Aufgaben, womit der Innere Behälter auf eine *Dichthaut* reduziert werden kann.

Das *Isolationssystem* soll:

- die auftretenden Wärmeverluste des gespeicherten Mediums möglichst klein halten,
- den Beton und die Vorspannkabel vor unzulässig hohen Temperaturen abschirmen sowie
- die Temperaturdifferenzen und die daraus resultierenden thermischen Spannungen im Beton auf kleine Werte beschränken.

Die stählerne *Dichthaut* schützt das bei druckübertragenden Isolationssystemen erforderliche Medium vor Verunreinigungen und bildet die für die Druckerhaltung notwendige Abdichtung gegenüber dem Beton. Im weiteren kann die Dichthaut ebenfalls als Befestigungsunterlage für Isolationen und als «verlorene» Schalung für den Spannbetonbehälter verwendet werden.

Der aus Spannbeton gefertigte *Druckbehälter* dient schliesslich der sicheren Aufnahme der vom Speichermedium ausgehenden Drücke.

Ansätze zur Bemessung

Die ersten überschlägigen Bemessungen für den Spannbetonbehälter berücksichtigen vorwiegend *zwei Betriebszustände*:

Für den *geladenen Behälter* wird vereinfachend angenommen, dass infolge der zugelassenen Rissebildung die Vorspannkabel allein den vorhandenen Innendruck aufnehmen. Dieser Grenzzustand wird herangezogen, damit für den zylindrischen Teil des Behälters sowie für dessen kalottenförmige Endabschlüsse die erforderlichen Kabelquerschnitte abgeschätzt werden können. Es zeigt sich dabei, dass sowohl für die Ringzug- und Längsvorspannung des zylindrischen Teils als auch für die in drei Bahnen angeordnete Vorspannung der Endabschlüsse jeweils Kabel zweckmässig sind, deren Bruchlast in der Grössenordnung von 15 000 kN liegt. Die dabei angenommene rechnerische Sicherheit setzt sich aus dem Pro-

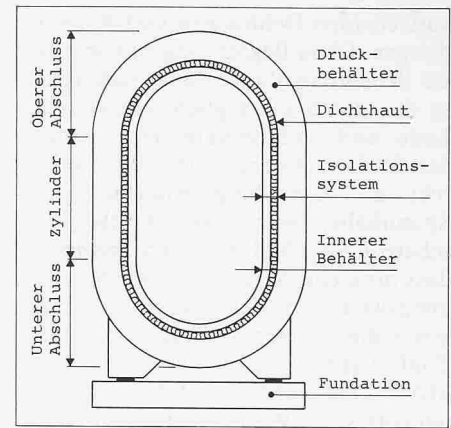


Bild 3. Prinzipielle Komponenten des Behälters

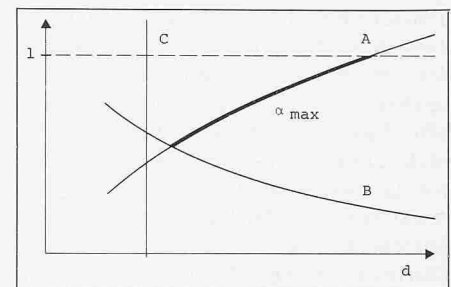


Bild 4. Maximaler Vorspanngrad α in Abhängigkeit der Wandstärke d

A Beschränkung der Betondruckspannung
B Beschränkung der Risseausweitung
C Minimale konstruktive Wandstärke

dukt eines Lastfaktors $S_L = 1,1$ und eines Materialfaktors $S_M = 1,45$ zusammen und beträgt somit 1,60. Der Wert für den Lastfaktor kann relativ klein gewählt werden, weil aus verfahrenstechnischen Gründen kaum grössere Drücke möglich sind und Regelungssysteme deren Auftreten mit grösster Wahrscheinlichkeit verhindern würden.

Der drucklose, *völlig entladene Zustand* des Behälters wird herangezogen, um unter Beachtung zulässiger Werte für den zweiachsigen Druckspannungszustand die Interaktionen zwischen der Wandstärke des Spannbetonbehälters einerseits und der grösstmöglichen, durch das Vorspannen einzuleitenden Kraft andererseits zu untersuchen. In diesem selten eintretenden Zustand sind neben den aufgetragenen Vorspannkraften die noch vorhandenen thermischen Spannungen sowie die von der Temperatur abhängigen Langzeiteinflüsse des Betons zu beachten. Die daraus resultierende Interaktion zwischen der Betonwandstärke d und dem hier als Vorspanngrad α bezeichneten Quotienten aus der effektiv aufgetragenen Vorspannkraft zu der mit dem Sicherheitsfaktor reduzierten Bruchlast ist schematisch durch Kurve A in Bild 4 dargestellt.

Eine untere Beschränkung (Bild 4, Kurve B) für den zulässigen Bereich des Vorspanngrades ergibt sich durch die Begrenzung der im Gebrauchszustand

auf tretenden Dehnungen und Rissebildungen. Diese Begrenzung ist von grosser Bedeutung, da die Amplitudengrösse der durch die täglich auftretenden Lade- und Entladezyklen zu erwartenden Deformationen unter anderem direkt die Ermüdungsgefährdung der Spannkabel beeinflusst. Grobe Abschätzungen (Bild 5) lassen vermuten, dass für kleine Werte von α die Schwingungsweite $\Delta\sigma_s$ der Ringzugspannungen in die Grössenordnung von 20% der Zugfestigkeit β_z fallen. Die in der Norm SIA 162 mit $0,05 \beta_z$ bzw. $0,1 \beta_z$ festgelegten zulässigen Werte für die bei teilweiser Vorspannung auftretenden Zusatzspannungen werden somit deutlich überschritten. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Normvorschrift, die besonders im modernen Spannbeton-Brückenbau eine Rolle spielt, von sehr hohen Lastwechselzahlen ausgeht. Berücksichtigt man die eher kleine Anzahl von Lastwechseln, die während einer zu erwartenden Auslegungsdauer des Speichers von 50 Jahren auftreten, dürfte im vorliegenden Fall, trotz hoher Spannungsamplituden, die Ermüdungsgefährdung der Kabel nicht von grosser Bedeutung sein.

Eine weitere Einschränkung in der Interaktion zwischen Wandstärke und grösstmöglicher Vorspannkraft ergibt sich durch den zum Verlegen der Kabel notwendigen Platzbedarf (Bild 4, Linie C). Es zeigt sich, dass bei Wanddicken unter 2,00 m das Verlegen der für Ringzug- und Längsvorspannung vorgesehenen Kabel zunehmend erschwert wird.

Sicherheitsaspekte

Die Betriebssicherheit eines Druckbehälters wird im allgemeinen durch seine Tragreserve gegenüber Bersten angegeben und ist bei einer Spannbetonausführung weitgehend durch die Auslegung der Vorspannung bestimmt.

Neben den rechnerischen Sicherheitsfaktoren sind im wesentlichen die folgenden Gesichtspunkte für die Betriebssicherheit von Bedeutung:

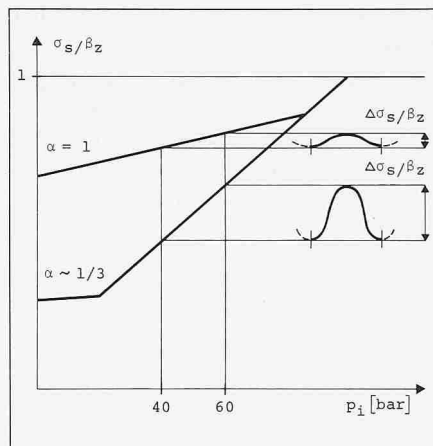


Bild 5. Einfluss des Vorspanngrades α auf die vom Lade-Entlade-Zyklus abhängige Spannungsamplitude $\Delta\sigma_s$

- **Art und Grösse der Beanspruchungen**
Spannkabel im Spannbeton weisen gegenüber Stahlbehälterwänden einen günstigen, vorwiegend einachsigen Spannungszustand auf. Zudem ergeben sich in Störungsbereichen dickwandiger Stahlbehälter, bedingt durch den mehrdimensionalen Spannungszustand, Verformungsbehinderungen, die im allgemeinen schwierig zu beherrschen sind. Demgegenüber weist der einachsige Spannungszustand der Kabelvorspannung neben dem günstigeren Ermüdungs- und Bruchverhalten ebenfalls Vorteile in der Überprüfung der Werkstoffeigenschaften auf (Zugversuch), was sich positiv auf die Qualitätssicherung bei der Herstellung auswirken kann.
- **Verhalten des Spannbetons unter hohen Belastungen**
Für die Spannstähle ist eine hohe Elastizitäts- und Kriechgrenze gegeben, womit nach einer allfälligen Überbelastung des Behälters die Vorspannkraft weitgehend erhalten bleiben und das Risseverhalten wenig beeinflusst wird.
- **Grenzverhalten des Behälters**
Durch die Wahl einer grossen Anzahl untereinander unabhängiger Einzelkabel wird das lasttragende Vor-

spannsystem vielfach redundant und verleiht daher dem Druckbehälter ein besonders sicheres Tragverhalten. Bei Versagen eines Kabels kann die ausgefallene Vorspannkraft von umliegenden Kabeln übernommen werden. Dies macht den Behälter unempfindlich gegenüber lokalen Störungen. Ferner ist wegen der Duktilität der Tragstruktur ein explosionsartiges Bersten des Behälters undenkbar.

Mögliche Formgebungen

Für Spannbetonbehälter sind grundsätzlich die folgenden Formen denkbar: die Kugel, der Würfel und der Zylinder mit verschiedenartigen Endabschlüssen. Trotz günstiger statischer Tragwirkung und minimaler Oberfläche wird auf eine kugelförmige Ausbildung verzichtet, da der zu erwartende Herstellungsaufwand als zu hoch eingeschätzt wird. Im weiteren bestätigen einfache Vergleichsrechnungen, dass unter den hohen Innendrücken der Materialaufwand für den vorwiegend durch Membranspannungen beanspruchten Kreiszylinder deutlich kleiner ausfällt als bei vergleichbaren Behältern mit rechteckförmigen Querschnitten. Dies führt bei der Festlegung der Form dazu, dass der Kreiszylinder dem Kubus vorgezogen wird, obschon der letzte herstellungstechnische Vorteile aufweist.

Bezüglich **Materialaufwand** kann für den zylindrischen Teil gezeigt werden, dass der Kabelaufwand sowohl für die Ringzugvorspannung als auch für die Längsvorspannung nur vom Behältervolumen abhängt und bei vorgegebenem Innenvolumen von der Wahl der Höhe oder des Durchmessers unabhängig ist.

Die Wahl des **Zylinderdurchmessers** hat jedoch einen grossen Einfluss auf die Ausbildung der beiden Behälterabschlüsse. Unter der Annahme halbkugelförmiger Abschlüsse nehmen die auftretenden Membranspannungen linear und die für den Materialaufwand massgebende Oberfläche quadratisch mit dem Zylinderradius zu. Dem Bestreben, durch die Wahl möglichst kleiner Zylinderradien eine optimale Lösung zu finden, wird jedoch durch die mit zunehmender Schlankheit sich vergrössernde Gefährdung der Bauwerksicherheit durch Erdbeben- und Windeinflüssen eine Grenze gestellt.

Unter den möglichen in Bild 6 wiedergegebenen Endabschlüssen für zylinderförmige Behälter weist die auf Zug beanspruchte Kalotte neben der vorteilhaften Raumaussnutzung auch die Möglichkeit auf, durch die Wahl des Vorspanngrades die Deformationszu-

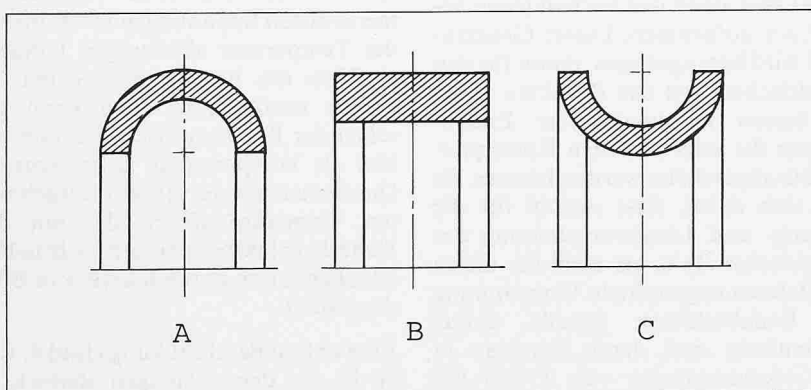


Bild 6. Prinzipielle Abschlussformen für zylindrische Behälter
A Zuggewölbe B Kreisplatte C Druckgewölbe

stände zu beeinflussen. Dies erlaubt es, die im Übergangsbereich Zylinder-Endabschluss vom Membranspannungszustand abweichenden Störungen zu beschränken.

Entwurf

Aufbau und Konzept des Speicherbehälters sind stark von der Wahl des Isolationssystems, insbesondere von der Art der Druckübertragung, abhängig. Ein Behälterentwurf, dessen Isolationssystem ein gasförmiges Medium zur Druckübertragung erfordert, ist in Bild 7 wiedergegeben.

Ein als geschweisstes Stahlgefäß ausgebildeter Innenbehälter trennt die für Speicherung und Druckübertragung erforderlichen Medien. Dabei wird er durch deren möglichen Differenzdruck, hervorgerufen durch die Inertie und Ungenauigkeit des Steuerungssystems, belastet. Um horizontale, von Erdbeben verursachte Relativverschiebungen des Innenbehälters zu beschränken, wird dieser an beiden Endabschlüssen durch zentrische Fixierung an den massiven Druckbehälter stabilisiert.

Ferner erkennt man eine typische Anordnung der im Druckbehälter verlegten Kabel sowie die für die Verankerungen erforderlichen Lisenen.

Isolationsprobleme

Berechnungen zeigen, dass die Wärmeverluste bei Betonbehältern mit den hier erforderlichen Wandstärken, unabhängig von der gewählten Isolation, deutlich unter die gewünschte 1%-Limite fallen. Für die Isolation ergibt sich somit als einziges Bemessungskriterium die *Begrenzung der an der Innenfläche auftretenden Betontemperatur* auf einen zulässigen, im Entwurfsbeispiel mit 70°C festgelegten Wert.

Die an das Isolationssystem gestellten Bedingungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- gute Wärmedämmung bei kleiner Isolierschichtdicke,
- Fähigkeit, die Kräfte vom Innenbehälter auf den Druckbehälter zu übertragen,
- Wärmebeständigkeit bis etwa 300°C und
- Wirtschaftlichkeit bezüglich Anschaffung und Montage.

Keine der im Ingenieurhochbau bekannten und verwendeten Isolationsstoffe erfüllen gleichzeitig alle obigen Bedingungen. Man ist also gezwungen, *neuartige Isolationssysteme* zu verwenden, die man folgendermassen einteilen kann:

- Systeme aus festen Stoffen,
- Systeme aus Kombination von festen

Stoffen mit Fluiden, wobei die Fluide entweder gasförmig sind, z.B. Luft, oder tropfbar sind, z.B. Wasser.

Für die Systeme aus *festen Stoffen* stehen zwei Vorschläge zur Diskussion: Das eine System ist für die Reaktortechnik entwickelt worden, jedoch für weniger extreme Betriebsbedingungen als bei der Speicherung. Es besteht im Prinzip aus *dünnen, mit einer speziellen Oberflächenbehandlung versehenen Stahlfolien*, die (einem Sandwich ähnlich) zwischen mehrere Millimeter dicke Abdeckplatten eingelegt sind. Ein anderes, ebenfalls druckfestes System verwendet *metallische Strukturen*, die (nach der Modellvorstellung von geschichtetem Wellblech) *durch künstlich verlängerte Wärmeleitwege und durch minimale Berührungsflächen* der Einzuelelemente eine ausgeprägte Wärmedämmwirkung haben. Der Vorteil der aus nur festen Stoffen gebauten Isolation besteht darin, dass sie beständig ist und keine wartungsintensiven Hilfseinrichtungen benötigt.

Bei den Systemen aus Kombination von festen Stoffen mit Fluiden sorgt das Fluid für die Kraftübertragung zwischen Innen- und Druckbehälter. Für die Anpassung des Fluiddruckes an den Druck des Speichermediums sind spezielle Steuerungssysteme mit Kompressor und Abblaseventil erforderlich. Repräsentativ für ein Isolationssystem, das mit einem gasförmigen Fluid arbeitet, ist der Vorschlag, bei dem der feste Teil der Isolation aus einer fibrösen, auf keramischer Basis hergestellten Isolationsmatte und das Fluid aus Luft besteht (Bild 8). Der Vorschlag, als Fluid Wasser zu verwenden, ist so konzipiert, dass das Wasser die durch die Wärmeleitung nach aussen strebende Wärme hydraulisch, durch erzwungene Strömung, nach innen zurücktransportiert. Diese thermodynamisch an und für sich korrekte Lösung erfordert aber einen relativ grossen apparativen Aufwand.

Generell muss darauf verwiesen werden, dass die verschiedenen Isolationssysteme noch eingehender Studien und Versuche bedürfen, bevor eine Wahl getroffen werden kann.

Wirtschaftlichkeit und Schlussfolgerungen

Ob die vorgeschlagenen Speichersysteme in der Praxis sinnvoll anwendbar sind, hängt entscheidend von deren Wirtschaftlichkeit ab, auch wenn noch andere Kriterien, wie Betriebssicherheit, betriebstechnische Probleme, Auswirkungen auf die Umwelt, Einsatzbe-

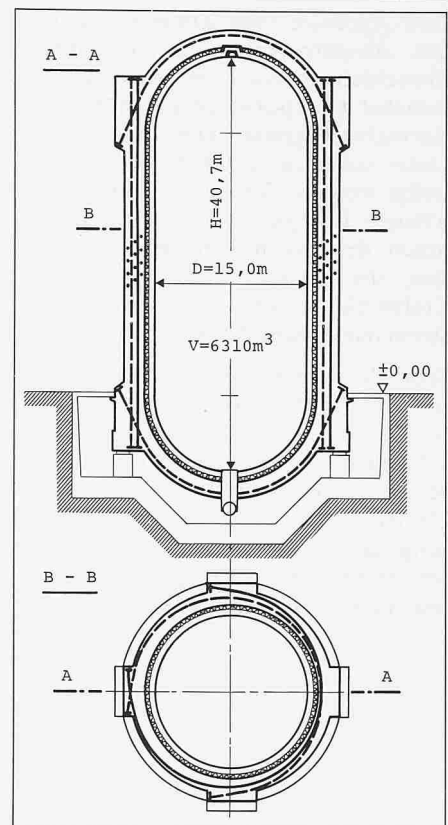


Bild 7. Behälterentwurf

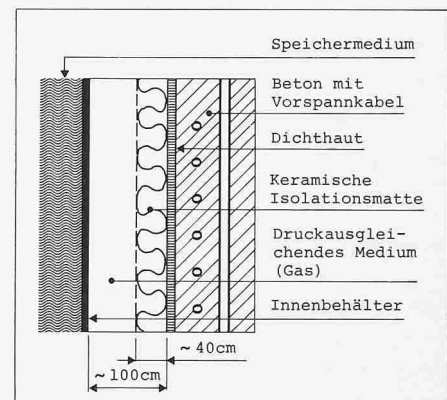


Bild 8. Isolation mit druckübertragendem Gas (Druckluft)

reitschaft, Standort usw., beachtet werden müssen.

Die Wirtschaftlichkeit sei hier ausschliesslich durch die *Selbstkosten der bei Spitzenbelastung erzeugten Arbeit* erfasst. Die Erlöse werden nicht in Betracht gezogen, denn sie sind unabhängig von der Art der Stromerzeugung. Die Selbstkosten werden sich auf die Investitions- und Brennstoffkosten beschränkt, denn alle übrigen Kosten sind im Vergleich zu den beiden genannten klein, und beim Vergleich verschiedener Systeme heben sich die Differenzen praktisch auf. Für das oben angegebene Beispiel sind nur die Investitionskosten für das Speichersystem, die gegenüber einem normalen (speicherlosen) Kraftwerk zusätzlich aufgewendet werden müssen, in Betracht gezogen worden. Diese Kosten umfassen alle zusätzli-

chen Apparate samt Zubehör, Leitungen, Absperrorganen, Bauten, Regleinrichtungen sowie die Vergrößerung mancher Komponenten gegenüber der Normalausführung. Die Investitionskosten sollen in 20 Jahren bei 8% Zins getilgt werden. Die durch Speicherung erzeugte Energie ist weiter mit jenem Anteil der Brennstoffkosten zu belasten, der gespart würde, wenn das Kraftwerk in der Ladeperiode nur Strom (elektrische Arbeit) erzeugt hätte.

Beim durchgerechneten Beispiel ergeben sich auf Preisbasis 1980 die Kosten der für den Spitzenlastbetrieb zusätzlich geleisteten Arbeit mit etwa 17 Rappen je Kilowattstunde. Diese Kosten können durch Optimierung der Auslegung und/oder durch Vergrößerung der gespeicherten Energie bedeutend gesenkt werden. Auf alle Fälle sind die

errechneten spezifischen Kosten realistisch und liegen tiefer als bei vielen andern für die Gewinnung von Spitzenlaststrom bekannten Lösungsvorschlägen.

Da die zusätzlichen Investitionskosten der Speicherung nur etwa 4% der Kosten des gesamten Kraftwerkes ausmachen, dafür aber die Leistung sich um 20%, vorübergehend auch höher, steigern lässt, so kann offenbar bedeutendes Kapital gespart werden, wenn man für die Spitzendeckung Speicher statt Gesamtkraftwerke baut.

Die vorgeschlagene Art der Energiespeicherung weist zusätzlich die folgenden vorteilhaften Eigenschaften auf:

- bekannte Technik,
- relativ bescheidener apparativer Aufwand,

- hoher Ausnützungsgrad des Speicherbehälters,
- kein zusätzlicher Brennstoffbedarf,
- problemlose Bedienung,
- kein zusätzliches Personal,
- Verfügbarkeit ohne Zeitverlust,
- keine Umweltbelastungsprobleme.

Dank dieser guten technischen Eigenschaften und der vorteilhaften Wirtschaftlichkeit dürfte ein erfolgreicher Einsatz der thermischen Energiespeicherung in naher Zukunft möglich sein.

Adressen der Verfasser: Dr. G. Oplatka, dipl. Ing. ETH, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden; Bearbeitung der thermischen Aspekte. G. Saurer, dipl. Ing. ETH, Emch + Berger Bern AG, Gartenstr. 1, 3001 Bern; Bearbeitung der baulichen Aspekte (I. Jain, T. Krüger, G. Saurer).