

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	70 (1979)
<b>Heft:</b>	16
<b>Artikel:</b>	Spitzenstrom aus Druckluftspeichern
<b>Autor:</b>	Weber, R.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-905422">https://doi.org/10.5169/seals-905422</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Spitzenstrom aus Druckluftspeichern

Von R. Weber

1978 erhielt die Familie der Speicherwerkstechnik Zuwachs: das 290-MW-Luftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerk Huntorf bei Bremen, das erste seiner Art der Welt. Mit preiswertem Nachtstrom wird Luft in unterirdische Salzkavernen gepresst – zu Zeiten des Strom-Spitzenbedarfs verhilft die Druckluft aus den Kavernen der Gasturbine zu dreifacher Leistung. Ein weiteres Mitglied der Familie existiert vorerst nur auf dem Papier: das rein pneumatische Speicherwerk mit Felskaverne, das Strom aus jeder Quelle speichert und keinerlei zusätzlichen Brennstoff benötigt. Hat es Zukunft?

La famille des centrales à accumulation s'est agrandie en 1978; le «nouveau-né» est la centrale à accumulation d'air comprimé et turbine à gaz de Huntorf près de Brême (RFA), de 290 MW. Moyennant de l'énergie de nuit à bon marché, de l'air est pressé dans des cavernes de sel souterraines, et aux pointes de consommation l'air comprimé contribue à tripler la puissance de la turbine à gaz. Le prochain enfant de la famille est déjà «conçu sur papier»; il s'agit d'une pure centrale à accumulation à air comprimé, capable de valoriser de l'électricité de toute origine et ne nécessitant aucun combustible. A-t-elle de l'avenir?

## 1. Neue Spitzenstrom-Quellen gesucht

Der Stromverbrauch steigt weiter. Er ist nicht gleichmäßig über die 24 Stunden des Tages verteilt, sondern weist am Morgen, Mittag und am Abend kurzzeitig hohe Spitzen auf. Deshalb müssen neben Grundlast-Kraftwerken auch neue Spitzenlastwerke gebaut werden. Da sie nur einige Stunden pro Tag in Betrieb sind und bei Bedarf sehr rasch einsatzbereit sein müssen, sollen

- die Anlagekosten niedrig sein,
- sie einfach und nach Möglichkeit automatisch zu «fahren» sein,
- An- und Abfahrten innerhalb von Minuten vor sich gehen,
- sie nahe an Verbrauchscentren erstellt werden können, das heißt nicht an bestimmte geographische Bedingungen gebunden sein.

Alle diese Bedingungen lassen sich schwerlich unter einen einzigen Kraftwerkshut bringen. Dampfkraftwerke sind infolge ihrer Anfahrzeit, die in der Größenordnung von Stunden liegt, nicht zu Spitzenlast-Kraftwerken prädestiniert. Hydraulische Pumpspeicherwerke sind meist teuer und dazu auf bergige Landschaft angewiesen. Gasturbinen-Kraftwerke sind zwar standortunabhängig, verbrauchen jedoch Öl oder Erdgas. Aus all diesen Gründen suchen Kraftwerkstechniker und Elektrizitätsgesellschaften seit Jahren nach neuen Lösungen.

## 2. Druckluft dank neuen Speicherbaumethoden

Die Idee, Druckluft als Speichermedium für Strom zu verwenden, geht mindestens bis ins Jahr 1949 zurück. Da es sich jedoch um Volumina von 100000 m<sup>3</sup> und Drücke um die 50 bar handelt, wären stählerne Kugeltanks sicherlich zu teuer. Als Alternative sind seit jeher unterirdische Speicherräume in Betracht gezogen worden. Ihr Bau ist aber erst mit modernen Technologien wirtschaftlich:

- Durch «Aussolen» werden mit Hilfe von Süßwasser grosse zylindrische Hohlräume in Salzstöcken geschaffen, wie sie beispielsweise unter der norddeutschen Tiefebene vorkommen (Fig. 1). Solche Kavernen dienen seit Jahren als Speicher für Öl und Erdgas.
- Tunnelbohrmaschinen treiben Stollen und Schächte in früher kaum denkbare Art durch den Fels.
- Kunststofffolien dichten poröse Felswände zuverlässig ab.

Dennoch bleiben pneumatische Speicher an bestimmte geologische Voraussetzungen gebunden, wenn auch weniger streng – siehe norddeutsche Tiefebene – als ihr hydraulisches Gegenstück.

Der erste Schritt ins Neuland der Luftspeicher-Kraftwerke wurde dann auch in Norddeutschland getan. Es war ein vorsichtiger Schritt.

## 3. Das Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerk Huntorf

Die Nordwestdeutsche Kraftwerke AG (NWK), Hamburg, entschloss sich 1973 zum Bau eines mit Erdgas befeuerten Spitzenlast-Kraftwerks, bei dem ein Druckluftspeicher der Gasturbine die Kompressionsarbeit abnimmt (Fig. 2).

Bei Gasturbinen saugt ja ein Verdichter Luft an und komprimiert sie. Mit Öl oder Gas in einer Brennkammer erhitzt, treibt sie sowohl den Verdichter wie auch die Generatorturbine an. Der Verdichter benötigt dabei rund zwei Drittel der erzeugten Leistung. Die Idee hinter dem Werk Huntorf ist nun, die Takte Verdichten und Verbrennen bzw. Arbeiten zeitlich voneinander zu trennen (Fig. 3): Verdichtet wird mit Hilfe von Fremdstrom, wobei der Generator als Antriebsmotor dient. Die verdichtete Luft wird in einer unterirdischen Salzkaverne gespeichert. Wenn Strom produziert werden soll, übernimmt die Kaverne die Aufgabe des Kompressors der Gasturbine, deren Leistung nun ausschließlich dem Generator zugute kommt. Und diese Leistung ist das Dreifache jener, die mit gleichzeitigem Verdichterbetrieb zur Verfügung stünde. Dieses einfache Rezept hat natürlich einige Tücken, wenn es in die Tat umgesetzt werden soll.

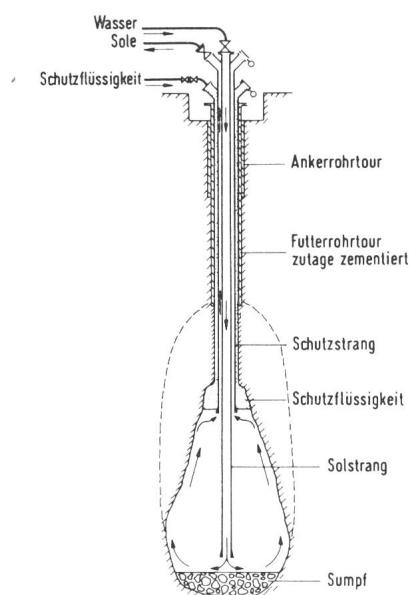
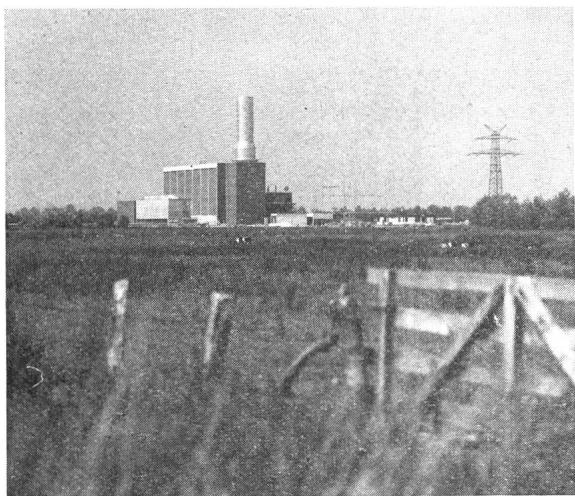


Fig. 1  
So wird eine Kaverne  
in einem unterirdischen  
Salzstock ausgesolt



**Fig. 2** Das Maschinenhaus des 290-MW-Luftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerks Huntorf braucht dank den unterirdischen Luftspeichern nur so gross zu sein wie eines, das eine «normale» 100-MW-Gasturbine beherbergt.

## *Technische Daten des Maschinensatzes des Luftspeicher-Gasturbinenkraftwerks Huntorf*

Tabelle I

#### **4. Modifizierte Gasturbine, grösster Verdichter (Tabelle I)**

Planung und Lieferung der Maschinen lagen dabei in Händen der Brown Boveri & Cie., Mannheim. Handelsübliche Gasturbinen arbeiten mit einem Verdichterdruck zwischen 10 und 15 bar. Bei solchen Werten wäre – die verlangte Leistung in Huntorf ist 290 MW – der Speicher sehr gross und damit zu teuer geraten. Daher wählte man als Maximaldruck im Speicher 70 bar. Das reduziert einerseits das Speicher-volumen auf zweimal 150000 m<sup>3</sup> (die beiden Speicher liegen zwischen 650 und 800 m Tiefe und haben je 55 m Durch-messer).

Andrerseits kann wegen des hohen Drucks keine normale Gasturbine verwendet werden. BBC setzte daher aus ihrem Sortiment an Gas- und Dampfturbinen eine Kombination zusammen, die nicht nur für die Bedingungen in Huntorf ausgelegt ist, sondern ganz allgemein in künftigen Luftspeicher-Kraftwerken einsetzbar sein soll (Fig. 3 + 4): Vor dem Hochdruckteil (das ist eine modifizierte Mitteldruck-Dampfturbine) wird der Speicherdruck auf konstante 40 bar reduziert, die Arbeitstemperatur beträgt 550 °C. Diese Luft gelangt anschliessend in den Niederdruckteil, eine normale Gasturbine mit den Auslegungsdaten 10 bar und 825 °C. Diese kombinierte Maschine ist derzeit die weitaus leistungsstärkste Gasturbine der Welt.

Das genannte Speichervolumen reicht für einen zweistündigen Leistungsbetrieb. Dabei nimmt der Speicherdruck von 70 auf 50 bar ab – es handelt sich um einen sogenannten Gleit-

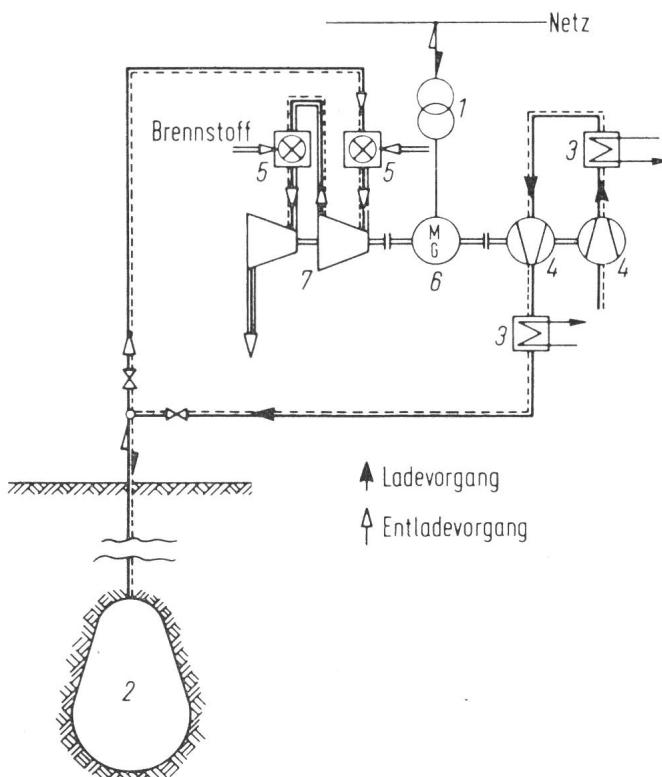


Fig. 3 Schema der Luftspeicher-Gasturbinen-Anlage Huntorf

- Schematische Darstellung der Gasturbine (Anlage 1)

  - 1 Transformator
  - 2 unterirdischer Gleichraum-Luftspeicher
  - 3 Kühler zur Abfuhr der Kompressionswärme
  - 4 Verdichter
  - 5 Brennkammer
  - 6 Motor/Generator
  - 7 Hochdruckteil der Gasturbine

druck- oder Gleichraumspeicher. Zum Wiederaufpumpen auf 70 bar werden 8 Stunden benötigt. Besorgt wird es von einem Zweistufenverdichter (Fig. 4); seine zweite, eine eingehäusige Radialstufe (von Sulzer/Escher Wyss, Ravensburg) ist ebenfalls die grösste ihrer Art der Welt. Zum Antrieb des Verdichters ist der Generator als Synchronmotor mit einer Leistungsaufnahme von 60 MW geschaltet. Die Kompressionswärme wird über Kühler an einen geschlossenen Wasserkreislauf und von diesem über Trockenkühltürme an die Atmosphäre abgegeben. Die Luft in den Speichern darf nämlich nicht über 50 °C warm sein, damit das Salz nicht aufweicht.

## 5. Investitionen, Stromgestehungskosten

Das Werk Huntorf wurde nach mehrmonatigem Probebetrieb im Dezember 1978 offiziell in Dienst gestellt. Die kurze seitdem vergangene Zeit lässt noch keine gültigen Aussagen über Betriebserfahrungen zu. Die Gesamtinvestition betrug 120 Millionen DM und damit 10 bis 15 % mehr als bei einem Gasturbinenwerk gleicher Leistung, aber ohne Luftspeicher. Die Mehrkosten gehen zu Lasten der Speicher und der modifizierten Gasturbine. Dank der Speicherung liegen die Stromgestehungskosten jedoch um rund 40 % unter jenen eines reinen Gasturbinenwerks. Huntorf wird vollautomatisch betrieben und von der 100 km entfernten Netzzentrale bei Hamburg aus per Knopfdruck gesteuert. Die volle Leistung erreicht das Werk innerhalb von 11 Minuten, bei Schnellstart in 6 (Tabelle II). Lärm- und Abgasemission liegen unterhalb der vorgeschriebenen Grenzen.

## 6. Das «reine» Luftspeicherwerk ist realisierbar

Huntorf ist also sozusagen ein Zwischenschritt auf dem Weg zum eigentlichen «luftigen» Gegenstück des hydraulischen Speicherkraftwerks, eben zum pneumatischen. Es existieren zwar keine konkreten Baupläne, doch haben Ingenieure von BBC Mannheim grundlegende Überlegungen angestellt und eine Anlage auch durchgerechnet. Von vornherein ist klar, dass eine reine Luftpumpe mehr Druckluft benötigt als eine druckluftunterstützte Gasturbine gleicher Leistung. Zudem ist die Arbeitstemperatur der Luftpumpe viel niedriger (es gibt ja keine Verbrennung), das Arbeitsmedium Luft daher dichter,

Anfahr-, Belastungs- und Auslaufverhalten einer 290-MW-Luftspeicher-Gasturbinenanlage

Tabelle II

Betriebsphase	Ungewöhnliche Zeiten in Minuten	
	Normalstart	Schnellstart
<i>Turbinenbetrieb</i>		
Vorbereitung	0,5	0,5
Hochfahren zum		
Synchronisieren	3,0	3,0
Beladen bis Vollast	7,5	2,5
Vollast nach	11,0	6,0
<i>Verdichterbetrieb</i>		
Vorbereitung	0,5	
Hochfahren zum		
Synchronisieren	4,5	
Aufnahme Förderbetrieb	1,0	
Volle Förderung nach	6,0	

Auslauf	Turndrehzahl 1/min	Auslaufzeit bis: Turnen	Stillstand
Turbine	120	12	25
Generator	120	28	35
Verdichtersatz	150	10	15

was die benötigte Luftmenge nochmals erhöht. Das reine Luftspeicherwerk braucht also auf den ersten Blick wesentlich grössere Speicher. Damit könnte seine Wirtschaftlichkeit in Frage gestellt sein. Es gibt jedoch zwei gleichzeitig begehbar Wege, das Speichervolumen klein zu halten:

Der eine besteht darin, die Kompressionswärme der Luft in einem speziellen Wärmespeicher (Wasser, synthetische Öle, evtl. Kies) aufzubewahren (Fig. 5 und 6) und sie beim Arbeitstakt der Druckluft vor deren Eintritt in die Turbine wieder zurückzugeben. Auch wenn der Wirkungsgrad dieser Wärmespeicherung nicht 100 % sein kann, so verbessert sie doch die Energieausbeute des Gesamtprozesses wesentlich.

Der zweite Weg heisst Gleich- oder Festdruckspeicher (Fig. 7): Der eigentliche Druckluftspeicher steht über einen Schacht mit einem Wasseroberbecken in Verbindung. Dieses Wasser übt auf die Luft konstanten Druck aus. Da der Wasserspiegel im Speicher bei der Entleerung «nachrückt», ist ein Gleichdruckspeicher bei gleichem Speichervolumen nur rund ein Viertel so gross wie ein Gleitdruckspeicher. Um auf einen Druck von beispielsweise 60 bar zu kommen, muss aber der Höhenunterschied zwischen Speicher und Oberbecken 600 m betragen. Mit Hilfe von Druckpumpen lässt sich ein Teil dieser Höhendifferenz ersetzen.

Wegen der Verwendung von Wasser lassen sich Gleichdruckspeicher nicht im Salz anlegen. In felsigem Untergrund wiederum gibt es, aus Volumen- und folglich Kostengründen, gar keine andere Wahl als sie. Ein Felsspeicher mit einem Volumen von 30000 m<sup>3</sup> könnte zum Beispiel aus einem 1,25 km langen Stollen mit 5,5 m Durchmesser bestehen, der einerseits über einen 6 m weiten Schacht mit dem Oberbecken und andererseits über die Druckluftleitung mit Verdichter bzw. Turbine verbunden ist.

Als Turbine kommt eine Maschine ähnlich jener von Huntorf in Betracht, die jedoch wegen der viel niedrigeren Eintrittstemperatur der Druckluft (200 bis 300 °C nach Wieder-

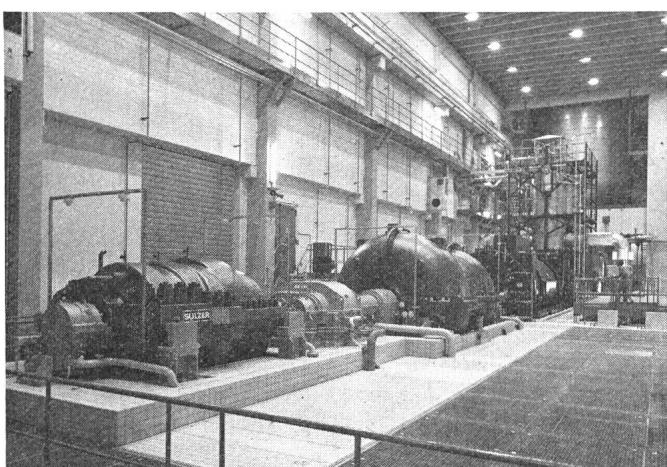


Fig. 4 Die Maschinenanlage des Luftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerks Huntorf  
von links Hochdruckverdichter, Getriebe, Niederdruckverdichter, Motor/Generator, Gasturbine mit Brennkammern

zufuhr der Kompressionswärme) weniger aufwendig gebaut sein kann. Dank der niedrigen Betriebstemperatur ist die Anfahrzeit noch kürzer als in Huntorf. Die Durchrechnung (Fig. 8) für eine 160-MW-Turbine ergibt einen Luftdurchsatz von 400 kg/s. Würde ein Gleitdruckspeicher mit Druckentlastung von 65 auf 45 bar verwendet, so müsste er 190000 m<sup>3</sup> fassen, um für zwei Stunden Betrieb bei voller Leistung auszureichen.

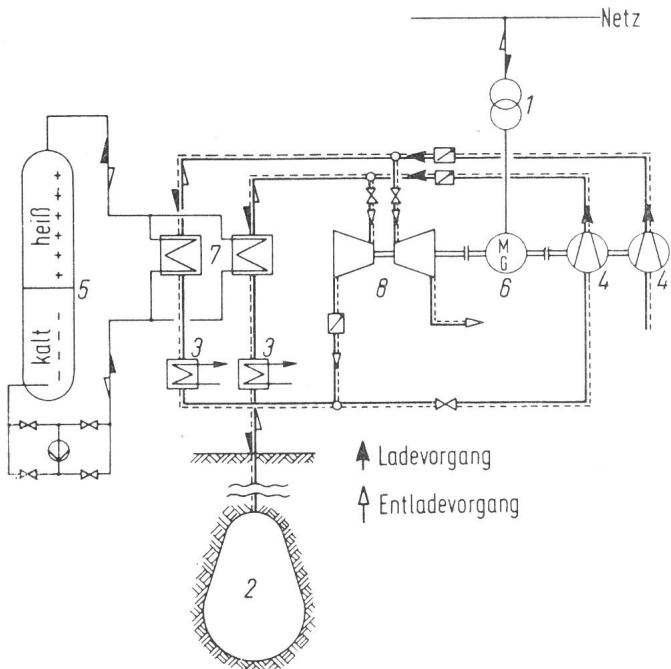


Fig. 5 Schema eines pneumatischen Speicherkraftwerks

- 1 Transformator
- 2 unterirdischer Gleichraum-Luftspeicher
- 3 Kühler
- 4 Niederdruck- und Hochdruckverdichter
- 5 Heisswasser-Verdrängungsspeicher für die Kompressionswärme
- 6 Motor/Generator
- 7 Wärmetauscher
- 8 Hochdruck- und Niederdruck-Luftturbine

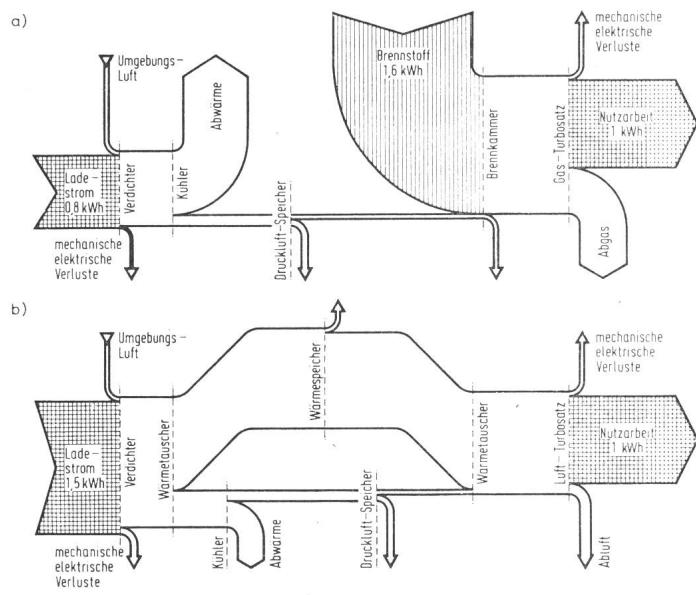


Fig. 6 Wärmeflussdiagramm

- a) Gasturbinen-Speicherkraftwerk
- b) pneumatisches Speicherkraftwerk

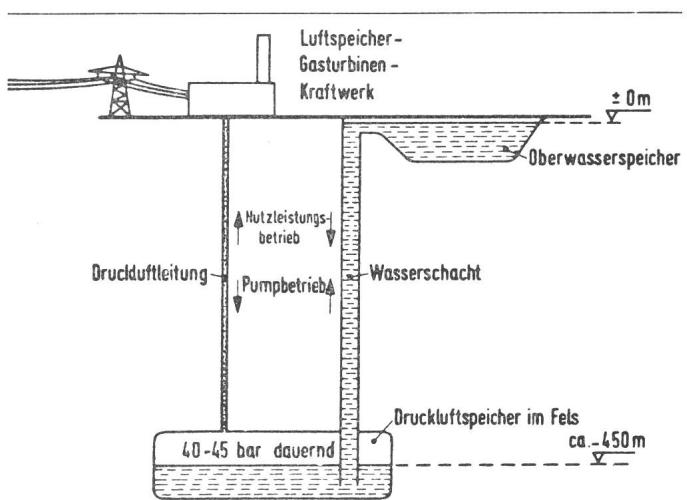


Fig. 7 Kraftwerk mit Gleichdruckspeicher im Fels

## 7. Spitzenstromwerke im Vergleich

Die Gestehungskosten des Stroms aus diesem reinen Luftspeicherwerk sind rein rechnerisch auf der Grundlage der Preise von Leichtöl und Erdgas des Jahres 1977 gleich jenen beim Luftspeicher-Gasturbinen-Werk. Mit steigenden Brennstoffpreisen wird daher der «pneumatische Strom» noch günstiger. Die Investitionskosten dagegen hängen stark von den Baukosten des Speichers ab.

Beim Vergleich mit anderen Typen von Spitzenstromwerken (Fig. 9) wird es immer mehr auch darauf ankommen, ob die Brennstoffe überhaupt zu haben sind. Anlagen mit Gasturbinen und Luftspeicher-Gasturbinen brauchen Öl oder Erdgas, hydraulische und pneumatische Speicherwerke dagegen Strom, gleich aus welcher Quelle (z.B. auch Kohle und Kernenergie). Sollen weder Öl noch Erdgas verwendet werden, wird die

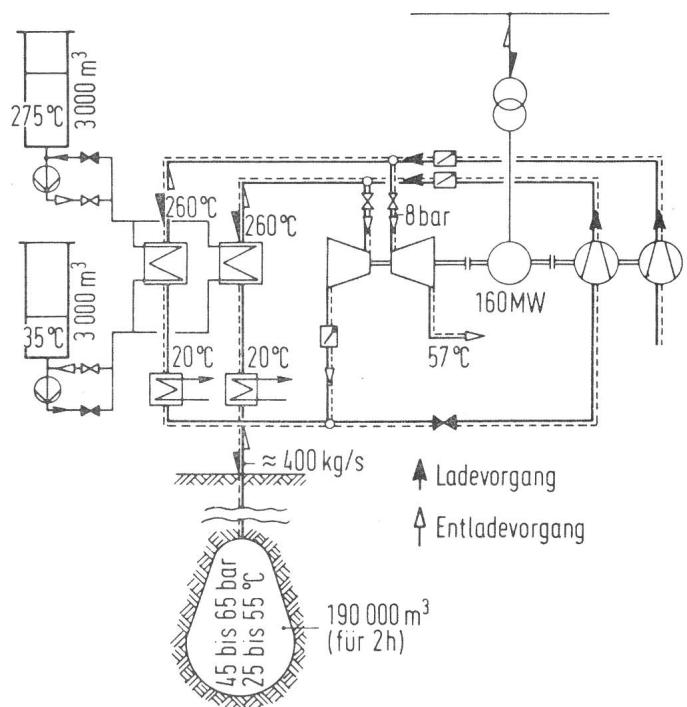
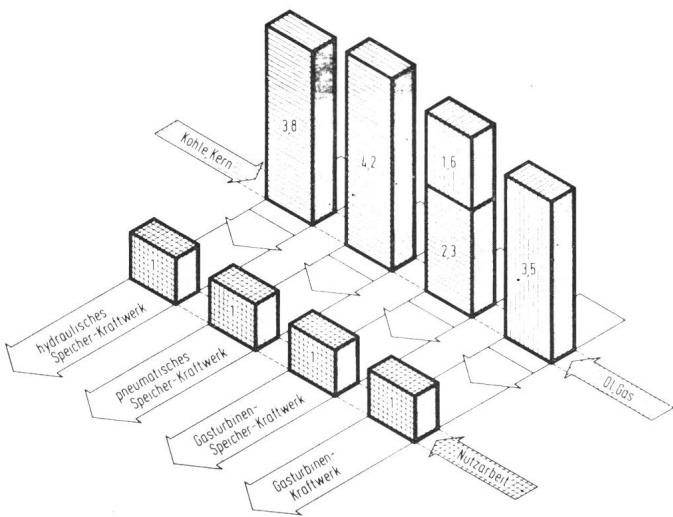


Fig. 8 Entladebetrieb eines durchgerechneten pneumatischen Speicherkraftwerks

Als Speichermedium für die Kompressionswärme wird hier Öl verwendet



**Fig. 9** Spezifischer Brennstoffbedarf verschiedener Typen von Spitzenlastkraftwerken

Der Brennstoffbedarf der drei Speichertypen ergibt sich unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Stromaufnahme, wobei für Stromerzeugung und -transport ein mittlerer Wirkungsgrad von 35 % eingesetzt ist

Entscheidung zwischen «hydraulisch» und «pneumatisch» liegen und da wiederum von den geographischen Möglichkeiten am Standort und natürlich auch von den Kosten bestimmt.

Man darf gespannt sein, wann und wo weitere Kraftwerke mit Luftspeichern entstehen. Die NWK wollen erst ausreichende Betriebserfahrungen mit Huntorf sammeln, ehe sie eventuell neue Luftspeicherprojekte in Angriff nehmen. Die RWE haben angeblich Pläne für ein Luftspeicher-Gasturbinen-Werk mit Felskaverne an der luxemburgischen Grenze in der Schublade. Auch in Schweden beschäftigt man sich mit Luftspeicher-Kraftwerken im Fels. In den USA schliesslich gibt es eine Reihe von Vorschlägen, die auf grössere Dimensionen abzielen, beispielsweise auf Felsspeicher mit einer Kapazität für 40 Stunden Lastbetrieb.

#### Adresse des Autors

R. Weber, Dr. techn., Alte Brugger Strasse 8, 5605 Dottikon.

## Unmittelbare Rechnungsstellung mit tragbarem Abrechnungscomputer

Von U. Hartmann

*Unter Benützung der heute verfügbaren fortschrittlichen Mikro-computer- und Speichertechnologie wurde ein tragbarer Computer entwickelt, der zur unmittelbaren Erstellung von Stromrechnungen beim Energieabnehmer eingesetzt werden kann. Funktion und Einsatz dieses Gerätes, das heute in der praktischen Erprobung steht, werden beschrieben.*

### 1. Entwicklung

Die Fortschritte in der Miniaturisierung von Computerkomponenten, ihrer Funktionssicherheit und Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen brachte die Firma Plessey Micro Systems Ltd. 1976 auf die Idee, aus solchen Komponenten eine kompakte tragbare Einheit für die unmittelbare Rechnungsstellung beim Energieabnehmer zu entwickeln. Damals existierten noch keine praktischen Möglichkeiten, dies auch auszuprobieren. Die Firma Plessey nahm deshalb mit der schottischen Elektrizitätsgesellschaft South of Scotland Electricity Board (SSEB) Kontakt auf, um für die Auslegung des Systems auf der Erfahrung der Zählerablesung und Rechnungsstellung einer Elektrizitätsgesellschaft aufzubauen zu können.

Dank sehr guter Zusammenarbeit zwischen Angestellten und Gewerkschaften stand im Juli letzten Jahres der Prototyp eines Gerätes zur Verfügung, das seither bezüglich Gestaltung und Leistung ständig verbessert wurde. Einige Vorproduktionsmodelle mit allen Verbesserungen sind im März 1979 fertiggestellt worden und werden nun in einer dreimonatigen Versuchsperiode vom SSEB für die Zählerablesung und Rechnungsstellung in der Ortschaft Greenock eingesetzt.

*A partir de la technique des micro-ordinateurs et des mémoires, on a mis au point un ordinateur portable capable d'établir les factures d'électricité directement auprès de l'abonné. Cet ordinateur est actuellement expérimenté en pratique. Son fonctionnement et son utilisation sont expliqués dans le présent article.*

### 2. Funktionsweise

Die tragbare Rechenmaschine ist im Prinzip ein Daten erfassungsterminal mit der zusätzlichen Möglichkeit, Energieabrechnungen zu erstellen, zu drucken und auszugeben.

Das Gerät misst  $28 \times 23 \times 10$  cm, ist batteriebetrieben, und seine Leistung ist zum Beispiel vergleichbar mit Rechenanlagen, wie sie vor etwa 15 Jahren für die Energieabrechnung der Elektrizitätswerke installiert wurden, wobei sie damals einen grossen Raum belegten und eine Klimaanlage benötigten. Grösse und Gewicht der Maschine werden primär durch Batterie, Papier und Drucker bestimmt. Trotzdem wiegt das ganze System nur wenige Pfund.

Die Tastatur ist vor allem für die Eingabe der abgelesenen Zählerstände vorgesehen, gestattet aber, eine Anzahl zusätzlicher Funktionen auszulösen. So besteht die Möglichkeit, wichtige Informationen, die während der Ablesung gesammelt wurden, zu speichern. Diese Informationen werden in Form einer beschränkten Anzahl von Codes eingegeben. Die Maschine quittiert jeweils die Bedeutung der Codes auf dem Bildschirm im Klartext, damit die Bedienungsperson ihre Eingabe prüfen kann. Der Dialog zwischen Bediener und Maschine wird über zwei weitere Tasten abgewickelt. Damit können