

Dampfspeicheranlagen

Elemente, Prinzip, Aufbau und Berechnung der Gefälle-
und Gleichdruckspeicher sowie Anwendung
und Wirtschaftlichkeit

Von

Dipl.-Ing. Walter Goldstern

Mit 115 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1933

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

Copyright 1933 by Julius Springer in Berlin.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1993

ISBN-13: 978-3-642-47177-3

e-ISBN-13: 978-3-642-47496-5

DOI: 10.1007/978-3-642-47496-5

Vorwort.

In den letzten Jahren hat die Dampfspeicherung erhöhtes Interesse gefunden, da sie in mannigfaltigster Weise die Wärme- und Betriebswirtschaft verbessern kann. Der Dampfspeicher ist ein Betriebsmittel geworden, das in zahlreichen Fällen technisch notwendig, in anderen aber immer noch wirtschaftlich gerechtfertigt ist. Jeder Ingenieur der Wärmetechnik muß daher diese Möglichkeiten kennen, um sie am zweckmäßigsten für die von ihm projektierte oder betriebene Anlage auszunutzen.

Im Laufe der Zeit ist umfangreiches Material über die verschiedensten Einzelfragen veröffentlicht worden, das sowohl wissenschaftliche und wirtschaftliche Untersuchungen als auch Betriebserfahrungen enthält. Doch sind die Angaben sehr verstreut, oft auch einander widersprechend, so daß es schwer ist, sich über die technischen Gegebenheiten objektiv zu informieren. Das vorliegende Buch will diese Lücke ausfüllen, indem es geschlossen und systematisch das Gebiet der Dampfspeicherung darstellt.

Da sich die grundsätzlich möglichen Arten der Dampfspeicherung — nach dem Gefälle- oder Gleichdruckprinzip ebenso wie die unmittelbare Speicherung — auch ohne besondere Betriebsmittel bei der Anwendung am Kessel wiederfinden, ist dieser Teil vorweggenommen. Auf die Darstellung der im wesentlichen gleichbleibenden Elemente (Speicherbehälter, Lade- und Entladevorrichtung, Hilfsmittel des Speicherbetriebes sowie Regeleinrichtung) baut sich die Behandlung der einzelnen Systeme und Ausführungsarten auf, indem gezeigt wird, wie die besondere Wirkung durch die Zusammenschaltung dieser Elemente erreicht wird. Aus den physikalischen Zusammenhängen beim Speichervorgang werden die Grundlagen für die Berechnung der Speichervirkung abgeleitet. Schließlich wird die Anwendung in den verschiedenen Industriezweigen, soweit sich besondere Bedingungen ergeben, beschrieben, und die Grundlinien für die Bestimmung der Wirtschaftlichkeit aufgezeigt, so daß der Ingenieur die Wahl des Speichersystems, die wirtschaftlichste Bemessung und günstigste Anordnung selbst treffen kann.

In der Bearbeitung des Buches wurde ich von den herstellenden Firmen durch Bereitstellung von Bildmaterial dankenswert unterstützt.

Berlin-Zehlendorf, März 1933.

W. Goldstern.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Einführung	1
1. Bedeutung der Speicherung in der Dampftechnik	1
2. Entwicklung zu den neuzeitlichen Ausführungsarten	3
II. Dampfspeicherung im Kessel	6
III. Elemente der Speicheranlage	16
1. Speicherbehälter	16
2. Lade- und Entladevorrichtung	26
3. Hilfsmittel des Speicherbetriebes	31
4. Regeleinrichtung	38
IV. Unmittelbare Dampfspeicher	43
V. Gefällespeicher	46
1. Prinzip der Gefälle-Dampfspeicherung	46
2. Aufbau der Speicheranlage	48
3. Einordnung in die Dampfanlage	56
4. Berechnung der Speicherwirkung	62
5. Speicherturbinen	67
VI. Gleichdruckspeicher	78
1. Prinzip der Gleichdruck-Dampfspeicherung	78
2. Vorwärmung im Kessel	82
3. Vorwärmung mit Frischdampf	86
4. Vorwärmung mit Gegendruckdampf	91
5. Vereinigter Gefälle-Gleichdruckspeicher	94
6. Berechnung der Speicherwirkung	97
VII. Anwendung der Dampfspeicherung	107
1. Schwankungen im Dampfbedarf	107
2. Speichermöglichkeit und Ausgleichswirkung	111
3. Dampfspeicher in Industriebetrieben	114
4. Dampfspeicher in Kraftwerken	125
VIII. Wirtschaftlichkeit der Dampfspeicherung	133
1. Auswirkungen des Betriebes mit Dampfspeichern	133
2. Kosten der Speicheranlage	138
3. Wirtschaftlichkeitsgrenzen	142
Literaturverzeichnis	149

I. Einführung.

1. Bedeutung der Speicherung in der Dampftechnik.

Hochdruckdampf und Gegendruckbetrieb sind die Kennzeichen neuerzeitlicher Dampfanlagen, die erfolgreichsten Wege zu einer rationellen Wärmewirtschaft. Mit ihrem Eindringen in einen immer größeren Bereich der wärmeverbrauchenden Industrie trat jedoch eine Eigenschaft des Energiebedarfs in Erscheinung, die durch die Anpassungsfähigkeit der früher verwendeten Großwasserraumkessel verdeckt worden war. Sowohl die zur Krafterzeugung als auch die für Heizzwecke benötigten Dampfmengen verliefen in ihrer Leistung nicht gleichmäßig. Vielmehr zeigten sie zum Teil außerordentlich starke Schwankungen der Belastung, die sich auf den Betrieb mit Hochdruckkesseln von geringem Wasserraum ungünstig auswirkten. Man war daher gezwungen, alle Mittel zu versuchen, die die fehlende Anpassungsfähigkeit der Kesselanlage ersetzen konnten, und fand als eines der wirksamsten und einfachsten die Speicherung des Dampfes.

Die Dampfspeicheranlage hat die Aufgabe, den Dampfstrom zu verkleinern, wenn er größer ist als der angeforderte Bedarf und umgekehrt durch Entladung zusätzlichen Dampf zu liefern, wenn nicht ausreichende Mengen verfügbar sind. Zunächst wirkt sich also der Dampfspeicher nur dadurch aus, daß er in jedem Augenblick die gelieferten Dampfmengen den benötigten anpaßt. Die Verbindung zwischen zwei Dampfnetzen oder Betriebsmitteln wird gewissermaßen elastisch, da nicht mehr der Zwang besteht, daß stets die anfallenden Dampfmengen aus dem einen Netz vom anschließenden aufgenommen werden müssen. Dabei ist noch nichts über den zeitlichen Verlauf gesagt, der sowohl im Anfall wie im Bedarf gleichmäßig oder schwankend sein kann. Wesentlich ist nur, daß innerhalb der Grenzen der Speicherefähigkeit die fehlende Übereinstimmung zwischen zwei Netzen hergestellt werden kann.

Grundsätzlich lassen sich zweierlei Arten der Anwendung unterscheiden, die praktische Bedeutung erlangt haben: Anpassung der Kesselleistung an den Dampfbedarf und Anpassung des anfallenden Dampfes von Gegendruckmaschinen an den Heizdampfbedarf. In erster Linie wird die Dampfspeicherung dazu angewandt, den schwankenden Belastungsverlauf des Verbrauches so auszugleichen, daß die Kesselanlage gleichmäßig den Mittelwert der Leistung abgeben

kann. Zwar ist es in den letzten Jahren gelungen, auch die Anpassungsfähigkeit der Kesselanlagen, insbesondere der Feuerungen, stark zu steigern. Trotzdem wird immer das Bestreben bleiben müssen, die Belastung der Kesselanlage soweit als möglich über längere Zeiträume gleichmäßig zu halten, und die Feuerführung nur allmählich zu verändern, da unzweifelhaft nur dann die höchste Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit zu erreichen ist. Der wichtigste Vorteil ist, daß die Kessel nur für eine mittlere Leistungsfähigkeit bemessen werden müssen, während ohne den Ausgleich durch Dampfspeicher noch weitere Kesselleistung zur Deckung der Spitzen nötig wird. Daneben kann aber auch bei einer dauernd gleichmäßigen Belastung ein besserer Wirkungsgrad erreicht werden, als wenn in jedem Augenblick die Dampferzeugung dem Bedarf folgen muß. Das fortgesetzte Verändern der Feuerung, das oft sehr rasch erfolgen muß, wirkt sich auf die Dauer auf alle Kesselteile ungünstig aus und führt zu vermehrten Reparaturen und verkürzter Lebensdauer. Vor allem ist zu berücksichtigen, daß der größte Teil der in Betrieb befindlichen Kesselanlagen mit schwerfälligeren Feuerungen ausgestattet ist und daß daher in jedem Fall besonders zu untersuchen ist, ob der Ausgleich der Bedarfsschwankungen oder der Einbau elastischerer Feuerungen wirtschaftlicher ist.

Bei der Ausnutzung von Abhitze oder Hochofengasen zur Dampferzeugung muß mit sehr schwankendem Energieanfall gerechnet werden. Der zeitliche Verlauf der festgelegten Kesselleistung wird mit dem Belastungsverlauf der Dampfverbraucher nur in Übereinstimmung gebracht werden können, wenn die Verbindung über einen Dampfspeicher erfolgt. Dieser hat nicht mehr die Aufgabe, die Schwankungen des Dampfbedarfs auszugleichen, so daß als Belastung der Mittelwert unverändert von den Kesseln zu decken ist. Es liegen hier vielmehr zwei verschieden schwankende, bestimmte Leistungskurven vor, die aneinander anzugleichen sind.

In gleicher Weise handelt es sich um Angleichung, wenn der anfallende Gegendruckdampf zur Deckung des Heizdampfbedarfes verwendet werden soll. Der Kraftverbrauch unterscheidet sich in den meisten Fällen im zeitlichen Verlauf grundsätzlich vom Wärmeverbrauch. Hier wirkt sich die Anpassung nur zum Teil darin aus, daß die Kesselanlage kleiner gehalten werden kann. Vor allem wird es möglich, die im Gegendruckbetrieb erzeugte Leistung bedeutend zu vergrößern. Unter Umständen ist die Einführung des Gegendruckbetriebes, z. B. in Heizkraftwerken, erst möglich, wenn durch Speicherung die Belastungsdiagramme in Übereinstimmung gebracht werden.

Da Dampfspeicher weiterhin im geladenen Zustand einen verhältnismäßig großen Vorrat an Energie enthalten, kann bei plötzlich auftretendem Bedarf fast augenblicklich aus dem Speicher die volle

Dampfleistung abgegeben werden. Diese Fähigkeit eröffnete der Dampfspeicherung ein weiteres Anwendungsgebiet als Momentanreserve überall dort, wo die Sicherstellung der Dampf- oder Kraftverbraucher gegen Störungen und Ausfallen der Energielieferung besonders wichtig ist.

Damit sind nur die kennzeichnendsten Anwendungsarten der Dampfspeicherung dargestellt. In jedem einzelnen Fall wirkt sich die erzielte Anpassung anders aus, wobei meist für den gesamten Betrieb merkliche Erleichterungen und Verbesserungen zu erreichen sind. Fast in allen wärmeverbrauchenden Industrien, vor allem in Zellstoff-, Textil-, Zucker- und chemischen Fabriken, Brauereien, Bergwerken und Eisenhütten sind Dampfspeicheranlagen erfolgreich in Betrieb. Von besonderer Bedeutung wurden sie auch in Elektrizitätswerken zur Deckung der ausgeprägten Spitzen und als Momentanreserve.

Die vielseitigen Vorteile, die durch den Einbau einer Dampfspeicheranlage erzielt werden können und die manchmal außerordentlich günstige Wirtschaftlichkeit haben aber auch dazu geführt, daß von vielen Seiten der Dampfspeicher in seinem Wert stark überschätzt wurde. Ohne genauere Kenntnis der technischen Voraussetzungen und Grenzen hat man aus dem Prinzip der Speicherung allein die phantastischsten Vorteile abgeleitet und den Dampfspeicher als Lösung aller wärmewirtschaftlichen Fragen ansehen wollen. Oder es wurden den wirklich vorhandenen Ersparnissen nicht auch die meist beträchtlichen Kosten für die Errichtung der Anlage gegenübergestellt. Diese übertriebenen Vorstellungen konnten natürlich im praktischen Einzelfall dann nicht verwirklicht werden. Daher kommt es, daß nun in umgekehrter Richtung vielfach versucht wird, den Wert der Dampfspeicherung vollständig abzustreiten und andere Mittel für die Anpassung an die Bedarfsschwankungen stärker hervorzuheben. Eine gerechte Beurteilung wird jedoch nur möglich sein, wenn man alle Einrichtungen, die bei schwankendem Dampfbedarf zu einem wirtschaftlichen und sicheren Dampfbetrieb führen, mit ihren technischen Eigenschaften und Kosten kennt und im Einzelfall miteinander vergleichen kann. Dann zeigt es sich, daß Dampfspeicheranlagen für einen umgrenzten Anwendungsbereich, durch die nur ihnen eigene ausgleichende Wirkung, zweckmäßiger sein können als andere Betriebsmittel.

2. Entwicklung zu den neuzeitlichen Ausführungsarten.

Die Uranfänge der Dampfspeicherung, also die eigentlichen Erfindungen und Entdeckungen der neuen technischen Ideen, fallen schon in das Ende des vorigen Jahrhunderts. Wie auf den meisten anderen Gebieten der Technik finden sich die ersten Angaben über eine neue Maschine lange Zeit vor den Versuchen einer praktischen Durch-

führung, die sich wiederum noch derartig von den tatsächlich betriebsfähigen, ausnutzbaren Anlagen unterscheidet, daß diese erst nach langjähriger Entwicklungsarbeit an allen Einzelheiten erreichbar sind. Die einfachste Art der Dampfspeicherung, die Aufbewahrung des Dampfes in Sammelbehältern, kann hier außer acht gelassen werden, da sie sich einfach als betriebliche Maßnahme ergab.

Das erste Patent auf einen Dampfspeicher (49)¹ wurde im Jahre 1873 in Amerika an MacMahon erteilt (135996). Es zeigt bereits grundsätzlich die Möglichkeiten der mittelbaren Speicherung von Dampf als Heißwasser (Abb. 1). Der gesamte vom Kessel *A* erzeugte



Abb. 1. Erster Dampfspeicher von MacMahon.

Dampf wird durch die Leitung *I* in den Speicher *D* geleitet, niedergeschlagen und, abhängig vom jeweiligen Bedarf, wieder ausgedampft. Mit dem im Speicher erwärmten Wasser wird der Kessel mittels Pumpe *O* gespeist, wodurch dessen Leistung erhöht werden kann. Da die Druckänderungen bei wechselnder Belastung im Speicher in gleicher Weise wie im Kessel vor sich gehen, wirkt der Speicher gleichzeitig wie eine Erweiterung des Kesselwasserraums nach dem Gefälleprinzip. Ein deutsches Patent (D.R.P. 11385) von 1880 (Dr. Jurisch, Lewis, Dr. Prohl, Scharowsky) zeigt

auch bereits das Prinzip der Dampfspeicherung, ohne jedoch der praktischen Ausnutzung näherzukommen.

Erst um die Jahrhundertwende erscheinen die ersten ausführbaren Vorschläge für Dampfspeicher und zwar sowohl nach dem Gefälle- als auch nach dem Gleichdruckprinzip. 1900 erhält Prof. Rateau ein deutsches Patent (D.R.P. 125117) auf den nach ihm benannten Gefällespeicher (11). Allerdings wird hier das Speicherprinzip nur für den beschränkten Anwendungsbereich der Abdampfspeicherung ausgenutzt für Drücke bis höchstens 2 at. Auch fehlt ein Hauptbestandteil, die automatische Regelung, durch die erst die Speicherwirkung voll zur Geltung kommt. Aber mit den bis ins kleinste ausgearbeiteten Hilfsmitteln und Armaturen bildet der Rateau-Gefällespeicher bereits ein einwandfrei arbeitendes Betriebsmittel. — Um 1893 fällt auch schon die Erfindung des Gleichdruckspeichers durch Druitt-Halpin. Jedoch

¹ Die in Klammern angegebenen Kursiv-Zahlen bedeuten die Nummer einer im Literaturverzeichnis aufgeführten Veröffentlichung.

findet er erst 10 Jahre später zum erstenmal praktische Anwendung (50). Eine Darstellung der Anordnung ist in Abb. 2 gegeben. Der überschüssige Dampf strömt durch die Leitung *b* in den über dem Kessel *a* gelegenen Speicher *c*, wo er das Speisewasser vorwärmt, das durch eigenes Gefälle über die Leitung *d* bei erhöhtem Dampfbedarf dem Kessel zufließt. In der Folgezeit wird besonders der Gleichdruckspeicher verschiedentlich verbessert, ohne daß er jedoch zunächst weitere Verbreitung findet. Vor allem wird eine selbsttätige Regelung und Umwälzung versucht. So erhält 1896 Kouznezoff Patente (D.R.P. 99807 und 103997) auf eine Anordnung, die im wesentlichen nur dadurch von derjenigen von Druitt-Halpin unterschieden ist, daß die Dampfzuleitung zum Speicher so lange im Kessel unter dem Wasserspiegel liegt, bis durch erhöhte Verdampfung der Wasserstand gesunken ist. Hierdurch werden erst die Dampf Räume verbunden und das heiße Speisewasser sinkt vom Speicher in den Kessel.

Gleichzeitig wird der unmittelbare Dampfspeicher als einfacher Raumspeicher vielfach angewandt. Auch bei dieser Speicherart werden verschiedenste Verbesserungen gefunden, besonders seit in Anlehnung an die Gasometer-Speicherung durch Harlé der Glockenspeicher ausgebildet wurde. Gewaltige Raumspeicher von einigen 1000 m³ wurden jedoch erst errichtet, als diese Bauart 1921 durch Estner-Ladewig zu einer günstigeren Betriebsweise gebracht werden konnte.

Die Ausbildung der heute gebräuchlichen Ausführungsarten fällt in die Kriegszeit und die folgenden Jahre. Es ist das Verdienst von Dr. Ruths, für den Gefällespeicher dadurch die Arbeitsmöglichkeit im Hochdruckgebiet mit großem Druckgefälle erschlossen zu haben, daß er eine Vorrichtung (Überstromregler) einschaltet, die Speicherdruck und Kesseldruck voneinander unabhängig macht. Damit wurde der Weg zur Anwendung in den verschiedensten Industrien geöffnet. Zahlreiche Patente schützen die Anordnungsmöglichkeiten und Einzelheiten der Ausrüstung. Besonders wichtig wird die Ausnutzung des Dampfspeichers in der Stromerzeugung zur Deckung der hohen Leistungsspitzen. Bereits das erste von Ruths angemeldete Patent vom Jahre 1913 (D.R.P. 301833) bezieht sich hierauf. Die Zusammenarbeit mit besonderen Speicherturbinen wird nach der ersten Anlage im Kraftwerk Malmö (1920) stark entwickelt, so daß die Errichtung der größten Speicheranlage für über 600 Tonnen Dampf im Kraftwerk Berlin-Charlottenburg (1929) möglich wird.

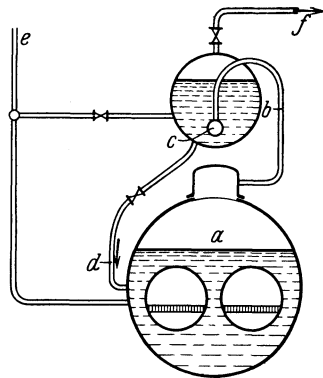


Abb. 2. Gleichdruckspeicher von Druitt-Halpin.

Aber auch der Gleichdruckspeicher wird den Ansprüchen der neuzeitlichen Dampftechnik angepaßt, nachdem 1913 von Christians ein Patent (D.R.P. 295423) erworben wird, das die praktische Durchführung bei Vorwärmung des Speisewassers im Kessel angibt. Diese Art der Gleichdruckspeicherung wird besonders von Dr. Kießelbach entwickelt, der durch dauernde Umwälzung des Speicherinhalts und selbsttätigen Überlauf des überschüssigen Kesselwassers einen einfach zu regelnden und wirksamen Ausgleich schaffen kann. Gerade auf dem Gebiet der Gleichdruckspeicherung wurden, angespornt durch die Erfolge des Gefällespeichers, eine Unmenge Patente erworben, von denen nur wenige zur praktischen Verwertung kamen. Die vollkommene Ausführungsart wird durch den Verdrängungsspeicher der Kraftanlagen-A.-G. Heidelberg erreicht, die besonders auf den Erfindungen von H. P. Müller begründet ist. In Verbindung mit dem Regenerativverfahren, wie z. B. im Großkraftwerk Mannheim ausgeführt, ist dieser Dampfspeicher zur Deckung nicht zu hoher Leistungsspitzen in Kraftwerken besonders geeignet. Gegenüber dem Gefällespeicher hat er zunächst den oft entscheidenden Vorteil, daß der bei der Entladung zusätzlich verfügbare Dampf vom gleichen Zustand wie der von den Kesseln erzeugte sein kann. Da weiterhin in den meisten Fällen das für dieselbe Speicherfähigkeit notwendige Volumen beim Gleichdruckspeicher kleiner sein kann, ist neuerdings der Gedanke an die Vereinigung beider Speicherarten in einer Anlage von verschiedenen Seiten aufgenommen worden. Innerhalb der Grenzen, die der Ausgleichsfähigkeit der Gleichdruckspeicherung durch ihr Wirkungsprinzip gezogen sind, wird diese eingesetzt und die darüber hinausgehenden Schwankungen durch Gefällespeicherung übernommen. Der verbundene Dampfspeicher ist also jeder der beiden Speicherarten überlegen, da er ihre Vorzüge vereinigen kann.

II. Dampfspeicherung im Kessel.

Die Benutzung der Dampfspeicherung zum Ausgleich der Schwankungen im Dampfbetrieb ist nicht unbedingt an das Vorhandensein besonderer Betriebsmittel gebunden. Vielmehr enthalten sowohl die Anlagen der Erzeugung und Fortleitung des Dampfes, als auch die meisten Formen des Dampfverbrauches Wärmemengen gespeichert, die sich unmittelbar oder mittelbar in Dampf umsetzen lassen. Wieweit diese Eigenspeicherung praktisch verwertet werden kann, hängt von der Zustandsänderung (also Temperatur- und Druckänderung) ab, die für das betreffende Betriebsmittel zulässig ist. Grundsätzlich finden sich dieselben physikalischen Vorgänge wieder wie bei den besonderen Dampfspeicheranlagen; da jedoch für einen geregelten Betrieb die Ein-

haltung gleichbleibender Arbeitsbedingungen und in erster Linie konstanter Dampfdrücke von größter Bedeutung ist, sind der Ausnutzung enge Grenzen gezogen.

Dampfkessel enthalten, je nach ihrer Bauart, einen bestimmten Rauminhalt, der sich auf Heißwasser und Dampf verteilt. Bei den meistens ausgeführten Betriebsdrücken (bis etwa 40 at) spielt die unmittelbare Speicherung im Dampfraum keine Rolle, so daß ausschließlich die Speicherfähigkeit des Wasserraumes in Betracht gezogen werden muß. Diese kann sich nach den zweierlei Richtungen der mittelbaren Dampfspeicherung äußern: Wirkung als Gefälle- oder Gleichdruckspeicher. Die Speicherung nach dem Gefälleprinzip tritt immer auf, sobald bei gleichbleibender Menge des im Kessel enthaltenen Wassers der Zustand, also Druck und Temperatur, verändert wird. Sinkt etwa der Kesseldruck infolge erhöhten Dampfbedarfes, so wird gleichzeitig die Sättigungstemperatur herabgesetzt, wodurch ein Teil der im Wasserinhalt gespeicherten Wärme entladen wird. Die Wirkung als Gleichdruckspeicher (Speiseraumspeicherung) kann grundsätzlich dadurch erzielt werden, daß bei unverändertem Zustand die Menge des Kesselwassers verkleinert oder vergrößert wird. Soll durch Verringerung des Wasserinhaltes (bei erhöhtem Dampfbedarf) eine zusätzliche Dampfmenge aus dem Speichervermögen des Kessels entwickelt werden, so muß die Speisewasserzufuhr kleiner werden als zum Ersatz der verdampften Wassermenge nötig wäre.

Für beide Arten der Speicherwirkung im Kessel ist also die Größe des vorhandenen Wasserraumes von entscheidender Bedeutung. Daher besitzen die Großwasserraumkessel (Walzen- und Flammrohrkessel) unter den verschiedenen Kesselbauarten die größte Speicherfähigkeit. Wie weiter unten gezeigt, kann durch zweckmäßige Ausnutzung, besonders beim früher fast überall verbreiteten Flammrohrkessel, der Ausgleich von Schwankungen in so hohem Maß erreicht werden, daß auf die Anordnung von besonderen Speicheranlagen verzichtet werden konnte. Erst seit der Einführung der Wasserrohrkessel mit viel geringeren Wasserräumen (Schrägrohr- und Steilrohrkessel) und besonders auch durch den Einfluß höherer Betriebsdrücke ist das Dampfspeichervermögen der Kessel so stark beschränkt worden, daß nur noch in den seltensten Fällen darauf zurückgegriffen werden kann. In Abb. 3 ist dargestellt, in welchen Größen die Wasserräume der verschiedenen Kesseltypen, bezogen auf 1 m² Heizfläche, innerhalb der gebräuchlichen Betriebsdrücke, ausgeführt werden. Die technische Entwicklung geht ständig weiter in der Richtung des Höchstdruckdampfes, um die günstigsten Werte der Kraftherzeugung zu erzielen. Der Kesselbau wird immer stärker auf die Wärmeübertragung durch Strahlung eingestellt; bestimmenden Einfluß übt die Forderung nach gesicherten

Wasserumlauf aus. Die Zahl der Trommeln wurde von ursprünglich 4 auf 3 und auch 2 herabgesetzt. Verschiedene Sonderbauarten haben überhaupt keine ausgebildeten Trommeln mehr, so daß von einem Wasser-raum fast gar nicht mehr gesprochen werden kann. Der Hauptgrund für den Verzicht auf Wasserinhalt ist die Erhöhung der Betriebsdrücke, wodurch die benötigten Blechstärken gleichermaßen immer mehr zunahmen, und die Unterbringung großer Räume, wenn nicht unmöglich, so doch mindestens unwirtschaftlich teuer wurde.

Zeitweise wurde versucht, die Dampfspeicherung doch wieder in den Kessel zu legen, indem man durch Vereinigung zweierlei Bau-

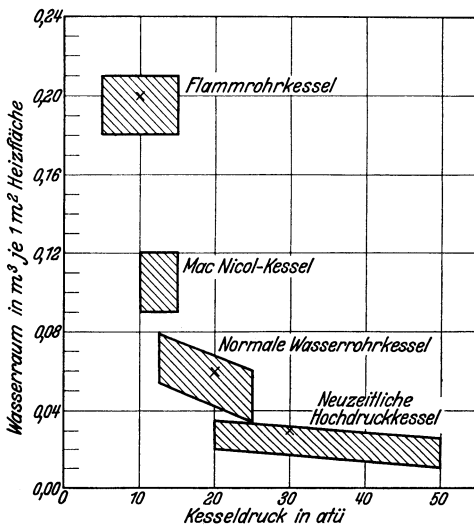


Abb. 3. Spezifischer Wasserraum verschiedener Kesseltypen.

arten gleichzeitig die Vorteile der Großwasserraumkessel und der Wasserrohrkessel erzielen wollte (Mac Nicol-Kessel u. ä.) oder indem man Hochdruckkessel mit vergrößertem Wasser-raum anstrebte. Doch können solche Ausführungen die Schwierigkeiten, die in der Herstellung großer Behälter mit hohem Druck liegen, nicht beseitigen.

Die Ausnutzung der Dampfspeicherung im Kessel nach dem Gefälleprinzip erfolgt selbsttätig in Anlagen, die keine Vorrichtung zur Regelung des Kessel-

druckes besitzen. Jede Zunahme der Belastung hat zuerst immer einen Abfall in der nächstliegenden Rohrleitung zur Folge, da dieser mehr Dampf entzogen als zugeführt wird. Der Druckabfall setzt sich fort, solange das Speichervermögen der betroffenen Leitungen und Betriebsmittel nicht zum Ausgleich der Mehrbelastung genügt oder ein zwischengeschalteter Regler eine entsprechende Erhöhung der Dampferzeugung einleitet. Die Erniedrigung des Betriebsdruckes, die sich so von außen auf den Kessel überträgt, hat zur Folge, daß die Temperatur des Wasserinhaltes bis auf die veränderte, geringere Sattdampf-temperatur fällt. Durch Abkühlung des Heißwassers wird dabei eine bestimmte Wärmemenge frei, die zur Verdampfung einer zusätzlichen Dampfmenge dient. Zur Berechnung des auf diese Weise entladenen Dampfes dienen dieselben thermischen Zusammenhänge wie für den Gefällespeicher; die spezifische Speicherfähigkeit kann

daher dem hierfür aufgestellten Kurvenblatt (s. Abb. 41) entnommen werden.

Bevor die Berechnung der Speicherung gezeigt wird, soll die Größe des zulässigen Druckabfalls untersucht werden, der nach obigem für die Speicherwirkung entscheidend ist. Eine allgemeingültige Größe läßt sich dafür nicht angeben, da die Folgen für den Dampfbetrieb je nach den Dampfverbrauchern und dem Betriebsdruck verschieden sind; insbesondere wird die Leistungserzeugung durch den Abfall des Druckes um denselben Betrag (etwa 1 at) in unterschiedlichem Maße betroffen, sobald andere Frischdampf- und Gegendrücke angewandt werden. Zu beachten ist, daß auch auf die Qualität der erzeugten Produkte schwankende Betriebsdrücke von Einfluß sind, da gleichzeitig auch die Arbeitstemperatur und die zugeführten Dampfmengen verändert werden. Bei unempfindlichen Verbrauchern kann der Dampfdruck um einige at absinken, ohne daß nachteilige Folgen auftreten; natürlich kann besonders in Anlagen, wo der erzeugte Dampf auf den Arbeitsdruck reduziert wird, ein beträchtlicher Abfall zugelassen werden. Sind Kraftmaschinen angeschlossen, so wird auf die Einhaltung eines unveränderten Dampfdruckes größeres Gewicht gelegt werden müssen. Die wirtschaftlichen Auswirkungen der Druckschwankungen sind im einzelnen Fall nachzuprüfen. Im allgemeinen wird etwa ein Absinken des Druckes um 10% des Normalwertes noch ohne größere Nachteile bleiben; doch ist zu beachten, daß gerade bei niedrigen Dampfdrücken (10 bis 15 atü) damit ein viel größerer Anteil des verfügbaren Wärmegefälles verlorengeht als bei den höchsten Drücken (etwa 80 bis 100 atü).

Für folgende Durchschnittswerte der spezifischen Wasserräume — Flammrohrkessel von 10 atü Betriebsdruck mit $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$, Wasserrohrkessel von 20 atü mit $0,06 \text{ m}^3/\text{m}^2$ und Hochdruckkessel von 30 atü mit $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^2$ — ist die Speicherfähigkeit bezogen auf 1 m^2 Heizfläche aus dem Diagramm für Gefällespeicher (Abb. 41) berechnet und abhängig vom Druckabfall in Abb. 4 aufgetragen. Entsprechend dem fast geradlinigen Ansteigen der spezifischen Speicherfähigkeit in dem Bereich eines Druckabfalles bis 5 at verlaufen auch die errechneten Kurven fast als gerade Linien, d. h. die Speicherfähigkeit im Kessel nimmt proportional mit dem Druckabfall zu, solange dieser bis etwa 5 at beträgt. Das wichtigste Ergebnis der Gegenüberstellung ist die große Überlegenheit des Flammrohrkessels, die einerseits durch den mehrfach größeren Wasserraum, andererseits durch die größere spezifische Speicherfähigkeit bei niedrigeren Drücken verursacht ist. Wasserrohrkessel und noch mehr moderne Hochdruckkessel kommen zur Dampfspeicherung viel weniger in Betracht, auch wenn man bei gleichmäßig 10% Druckabfall mit dem doppelten und dreifachen Wert rechnet. Berücksichtigt man noch die verschieden hohe Belastung der Heiz-

fläche, die bei Flammrohrkessel durchschnittlich nur $20 \text{ kg/m}^2\text{h}$ beträgt, gegen etwa 30 für Wasserrohrkessel und etwa 60 für Hochdruckkessel, so kann man als kennzeichnend für die Bedeutung der Speicherfähigkeit den Anteil der Leistung bestimmen, der eine gewisse Zeit zusätzlich aus der Dampfspeicherung des Kessels geliefert werden kann. Während für die Dauer einer Minute bei einem Druckabfall von 10% die Leistung des Flammrohrkessels um 500%, die des Wasserrohrkessels um 120% und des Hochdruckkessels immer noch um 36% gesteigert werden kann,

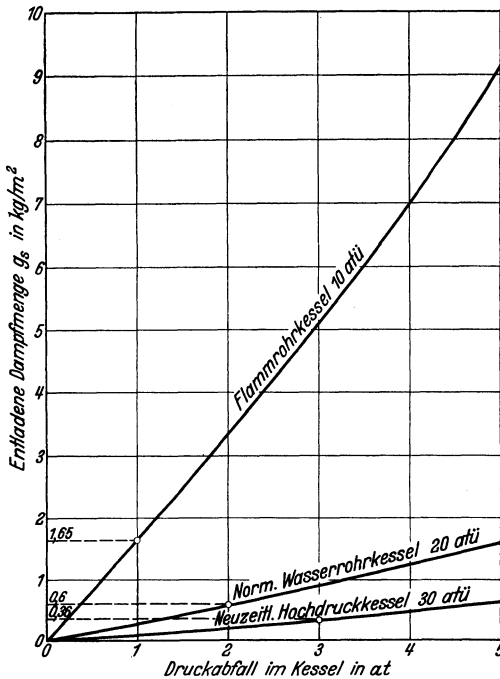


Abb. 4. Speicherfähigkeit verschiedener Kesseltypen abhängig vom Druckabfall.

ergeben sich für die Zeit von einer Stunde nur noch 8,2%, bzw. 2%, bzw. 0,6% Leistungssteigerung. Es zeigt sich ganz deutlich, daß für Schwankungen von nur einigen Minuten Dauer alle Kesselarten ausgleichend wirken können, dagegen für länger dauernde Schwankungen nur Flammrohrkessel in Betracht kommen.

Die Anwendung dieser Erkenntnis wirkt sich besonders in solchen Betrieben aus, die sowohl Niederdruckkessel älterer Bauart mit großen Wasserräumen als auch neuzeitliche Hochdruckkessel aufweisen. Druck-

schwankungen werden dann möglichst auf die Niederdruckkessel allein beschränkt, deren Speichervermögen einen merkbaren Ausgleich ermöglicht. Die Schaltung nach Abb. 5a¹ zeigt die Verbindung der Kesselleitungen durch ein Überströmventil, das den Druck in den Hochdruckkesseln konstant hält, indem es überschüssigen Dampf bei geringerer Belastung in das Niederdrucknetz ableitet. Die Geschwindigkeitsregler der angeschlossenen Kraftmaschinen werden so eingestellt, daß sich alle Belastungsschwankungen zunächst auf die Niederdruckmaschinen aus-

¹ Schaltzeichen nach Stender: Schaltbilder im Wärmekraftbetrieb. Berlin: VDI-Verlag 1928.

wirken. Dadurch wird der Ausgleich durch Druckabfall nur in den Niederdruckkesseln zugelassen, während die Hochdruckanlage zur Deckung der gleichmäßigeren Grundlast dient und wirtschaftlicher ausgenutzt wird. Der Druckabfall in den Niederdruckkesseln wird auch nur so weit zugelassen, daß die Krafterzeugung nicht zu stark beeinflußt wird; zu diesem Zweck wird der Überströmregler mit Grenzimpulsen versehen.

Sind dagegen Heißdampfverbraucher angeschlossen, die mit einem geringeren Druck arbeiten können, so wird eine Schaltung nach Abb. 5b zweckmäßig sein. Beträgt beispielsweise der benötigte Dampfdruck nur 3 atü, wogegen die Kessel mit 10 atü betrieben werden können, so erhält man einen Druckbereich, der eine sehr wirksame Dampfspeicherung ergibt. Nach Abb. 41 können je m^3 Wasserraum zwischen 11 und 4 ata

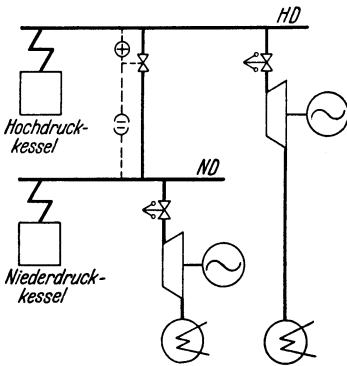


Abb. 5 a. Begrenzter Druckabfall der Niederdruckkessel.

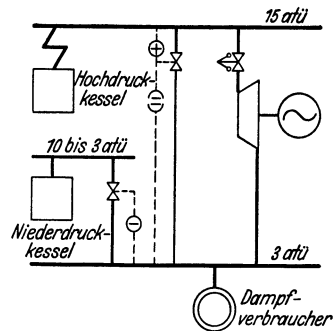


Abb. 5 b. Erweiterter Druckbereich der Niederdruckkessel.

Abb. 5 a und b. Schaltungen zur Ausnutzung der Speicherfähigkeit von Niederdruckkesseln.

71 kg Dampf entladen werden, was bei einem spezifischen Wasserraum der Flammrohrkessel von $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ eine Dampfmenge von $14,2 \text{ kg je m}^2$ Heizfläche bedeutet oder eine Leistungssteigerung um 75% während einer Stunde. Gerade diese Schaltung, die auch wie im vorigen Beispiel eine Verbindung mit dem Hochdrucknetz durch einen Überströmregler vorsieht, kann in zahlreichen Betrieben erfolgreich angewandt werden. Veraltete Kessel, die keinen dauernden Betrieb mehr aushalten können, werden als Reserve bereitgehalten und wirken ohne irgendwelchen Umbau in ähnlicher Weise wie besondere Speicheranlagen. Der kennzeichnende Unterschied bleibt in der fehlenden Lademöglichkeit durch überschüssigen Dampf.

Die Anwendung der Speicherung nach dem Gleichdruckprinzip ist an die entsprechende Einstellung der Kesselspeisung gebunden. Soll mehr Dampf erzeugt werden, als durch die Wärmezufuhr der Feuerung entwickelt werden kann, so steht durch Verkleinerung der zugeführten Speisewassermenge eine bestimmte Wärmemenge zusätzlich zur Ver-

fügung, die bei normaler Speisung zur Erwärmung des ganzen Wassers auf Sättigungstemperatur nötig ist. Im Grenzfall wird die Speisung vollständig abgestellt und die gesamte im Kessel zugeführte Flüssigkeitswärme kann zur Erhöhung der Verdampfleistung herangezogen werden. Diese Art der Dampfspeicherung ist seit langem bekannt und wird im Kesselbetrieb oftmals ausgenutzt. Bei Regelung der Kessel Speisung von Hand läßt sich ein solcher Betrieb verhältnismäßig einfach durchführen. Sinkt die Belastung der Kesselanlage wieder ab, so wird durch erhöhte Speisung ein größerer Anteil der an den Kessel übertragenen Wärme zur Wassererwärmung beansprucht. Dadurch kann die abgegebene Dampfmenge verkleinert und gleichzeitig der Wasserspiegel wieder bis auf höchsten Wasserstand gehoben werden. Bei Anordnung selbsttätiger Speisewasserregler kann dieselbe Arbeitsweise angestrebt werden; auf die hierzu nötigen Einrichtungen, ebenso auf weitere Vorrichtungen zur verstärkten Ausnutzung der Gleichdruckspeicherwirkung wird weiter unten näher eingegangen.

Für die Berechnung der Speicherwirkung ist die Größe der zulässigen Wasserstandsänderung maßgebend. Der durch die Grenzen des höchsten und niedrigsten Wasserstands bestimmte Speiseraum nimmt je nach der Kesselart verschiedene Werte an. Die oben dargelegte Entwicklung zu immer höheren Drücken brachte mit den viel kleineren Wasserräumen auch eine entsprechende Verkleinerung der Verdampfungsoberfläche (bezogen auf die Größe der Heizfläche). Da die zulässige Absenkung fast gleichgroß für die verschiedenen Bauarten ist — man kann durchschnittlich mit 200 bis 250 mm rechnen —, so ergeben sich bei neuzeitlichen Kesseln auch stark verminderte Speiserräume. Man kann bei Flammrohrkesseln mit einem Speiseraum von $3,0 \text{ m}^3$ je 100 m^2 Heizfläche rechnen, wogegen er bei Wasserrohrkessel nur $1,2 \text{ m}^3$ und bei Hochdruckkessel nur noch etwa $0,2$ bis $0,3 \text{ m}^3$ beträgt.

Dieser Speiseraum entspricht in seiner Wirkung genau dem Wasser- raum von Gleichdruckspeichern. Man erhält daher seine Speicherfähigkeit in kg Dampf, ebenso wie die Leistungsfähigkeit in kg/h aus den Diagrammen für die spezifischen Werte (s. Abb. 82 und Abb. 78); erstere durch Multiplikation mit der Größe des Speiseraumes in m^3 . Dabei ist als obere Temperatur die zum Kesseldruck gehörende Sättigungstemperatur einzusetzen; die zur Verdampfung nötige zusätzliche Wärmemenge muß ausschließlich etwaiger Überhitzung gerechnet werden. Die bei der Behandlung des Gleichdruckspeichers aufgestellten Beziehungen gelten ebenso für die Speiseraumspeicherung im Kessel; nur ist die Speicherfähigkeit des Kesselspeiseraums verschwindend im Vergleich zu den bei besonderen Speicheranlagen erreichbaren Dampf- mengen. Man ersieht dies unmittelbar aus den oben angegebenen Durch-

schnittswerten der Speiseraumgröße, die selbst bei den größten Kessel-einheiten nicht mehr als einige m^3 ergeben. Hervorzuheben ist jedoch, daß die Leistungsfähigkeit, also der durch Speiseraumspeicherung gedeckte Anteil an der Leistung des Kessels, nur durch die Temperaturgrenzen beschränkt wird. Da sowohl die Sattdampf-temperatur als auch die Temperatur des in den Kessel eingeführten Speisewassers eben so hoch wie bei besonderen Gleichdruckspeichern liegen können, so ergeben sich hierfür in beiden Fällen die gleichen Werte der Leistungsfähigkeit.

Die einfachsten Ausführungsarten des Gleichdruckspeichers stellen grundsätzlich nichts anderes als eine Vergrößerung des Speiseraums dar. Als ein gewisser Übergang zu diesen sind die Vorrichtungen anzusehen, die innerhalb des Kessels angeordnet werden sollen, um den vorhandenen Speiseraum zu vergrößern. Der von Hähnle (D.R.P. 421989) ausgehende Vorschlag bezweckt eine Erweiterung der Grenze, die der Absenkung des Wasserspiegels gesetzt ist, indem die Abdeckung der Trommeln von Wasserrohrkesseln weiter heruntergezogen wird. Dadurch kann die Höhe des Speiseraums auf das Drei- bis Vierfache vergrößert werden. Zur Beobachtung der Wasserspiegeländerungen über einen so großen Bereich müssen entweder mehrere Wasserstandsgläser angeordnet oder die Ablesehöhe durch Zwischenschaltung eines größeren Zwischenrohres verlängert werden. — Ein Vorschlag von Langen (D.R.P. 401469) sieht die Anordnung mehrerer horizontaler Rohre von 300 bis 400 mm Durchmesser in gleicher Höhe mit den Kesseltrommeln vor, so daß sie an den Schwankungen des Wasserspiegels teilnehmen können. Die Rohre sind in den Wasserkreislauf durch unbeheizte Fallrohre eingeschlossen. Grundsätzlich kann für jede Bauart eine Lösung gefunden werden, die den Speiseraum über das normale Maß beträchtlich erweitert; so z. B. auch durch Tieferlegen der Flammrohre u. ä. Der Vergrößerung ist jedoch stets durch die Trommelgröße dort eine Grenze gesetzt, wo durch die weitere Absenkung die Verdampfungsoberfläche wieder kleiner wird, so daß sie für eine erhöhte Kesselleistung nicht mehr ausreicht.

Die Speisewasserreglung kann nach verschiedenen Konstruktionen(43) so eingerichtet werden, daß sie selbsttätig die Speicherwirkung ausnutzt. Angestrebt wird also ein Betrieb, bei dem die Speisung bei erhöhtem Dampfbedarf aussetzt, dagegen bei geringerer Belastung wieder über den normalen Wert hinaus gesteigert wird; also gerade im umgekehrten Sinne von der Dampfleistung beeinflußt, wie bei der gewöhnlichen Speiseregung. Die meisten Ausführungen regeln in Abhängigkeit vom Kesseldruck entweder so, daß bei abfallendem Druck die Speisung zum Kessel gedrosselt wird und bei steigendem Kesseldruck, infolge geringerer Belastung, das Speiseventil wieder geöffnet wird. Oder die

Speisung erfolgt nur bei vollem Kesseldruck und ist stets unterbrochen, wenn der Normalwert unterschritten wird (Hannemann). Nach der ersteren Art wirkt der von der MAN gebaute Speiseregler (Abb. 6), der zur Einhaltung des höchsten und niedrigsten Wasserstandes mit einem Schwimmerregler vereinigt ist. Innerhalb dieses Bereiches übernimmt allein der Kesseldruck die Regelung, indem der Druckimpuls durch Veränderung des Öldrucks das Speiseventil betätigt. Die dargestellte

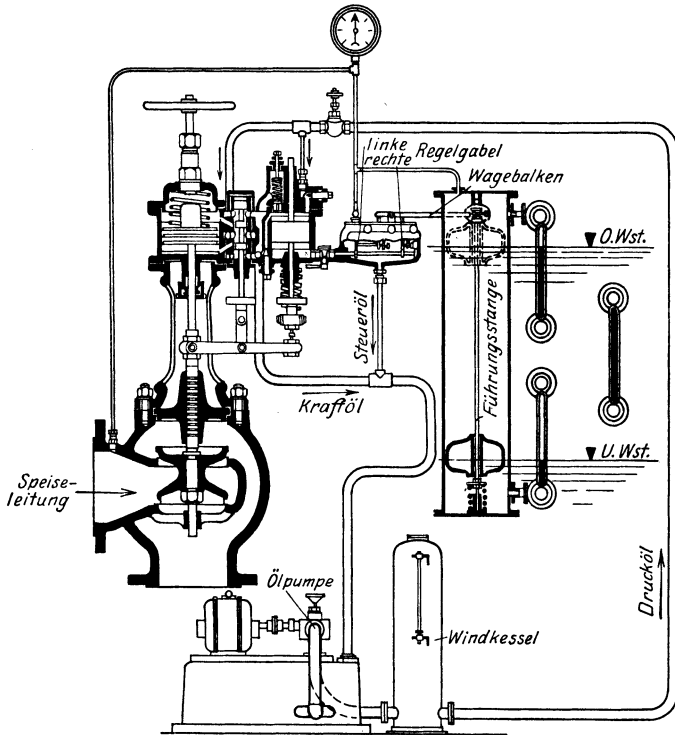


Abb. 6. Speiseregler der MAN in Abhängigkeit vom Kesseldruck mit Grenzausschaltung durch Schwimmer.

Regelart benutzt dabei die von der AVA (s. Abb. 21) eingeführte Regelgabel als Druckrelais. Der Schwimmer wirkt in den Grenzlagen auf eine zweite Regelgabel, die die Wirkung des Kesseldrucks aufhebt und ein Überschreiten des zulässigen Bereichs verhindert. Eine andere Ausführung der MAN regelt abhängig von der Differenz des Betriebsdruckes gegenüber dem normalen Kesseldruck. Auch Christians benutzt bei seinem Speiseregler den Kesseldruck als regelnde Größe. Der Grenzregler ist als Wasserstandsanzeiger ausgebildet und in den Grenzlagen stark erweitert, so daß das Wassergewicht die Regelung beeinflusst. — Ein von Roučka ausgebildeter Regler nutzt ebenfalls die Speicher-

wirkung aus; obwohl der Wasserstand direkt die Speisung regelt, hat bei plötzlich erhöhter Dampfentnahme das Aufschäumen des Wasserspiegels eine Verringerung der Speisewasserzufuhr zur Folge. Die Speisung schwankt dabei in weiten Grenzen, und zwar immer entgegengesetzt den Schwankungen der Dampferzeugung.

Die Veränderungen in der Kesselspeisung zum Ausgleich von Belastungsschwankungen wirken immer auf die vorangeschalteten Anlagenteile zurück, die von einer viel stärker schwankenden Speisewassermenge durchflossen werden. Erst im Speisewasserbehälter findet wieder ein Ausgleich statt, wenn nicht (ähnlich wie beim Gleichdruckspeicher) besondere Ausgleichsbehälter eingeschaltet werden. Insbesondere muß bei Vorhandensein von Rauchgasvorwärmern auf diese Rücksicht genommen werden, da bei stark verringerter Speisung und unveränderter Feuerung die Wassertemperatur über den normalen Wert ansteigen und auch zu Dampfbildung führen kann. Vollständig abgestellte Speisung kann sogar das Durchbrennen des Vorwärmers verursachen; man muß daher hinter diesen einen Ausgleichsbehälter anordnen oder ein Mindestmaß an Speisewasser dauernd durch den Rauchgasvorwärmer leiten.

Die mit Hilfe der Dampfspeicherung im Kessel veränderliche Dampferzeugung wirkt sich auch auf den nachgeschalteten Überhitzer aus. Die übertragene Wärmemenge wird von den Schwankungen der durchfließenden Dampfmenge nur wenig beeinflusst. Die Folge ist, daß die normale Temperatur nicht eingehalten werden kann, indem bei erhöhter Dampfleistung die Überhitzung nur bis auf einen niedrigeren Wert möglich ist und umgekehrt bei sehr geringer Belastung die Temperaturen so stark ansteigen können, daß auch hier gefährliche Betriebsschäden auftreten können. Durch Rückwirkung der Überhitzungstemperatur auf die Speisewasserregelung muß daher die kleinste zulässige Dampfmenge gesichert werden. Für den Dampfbetrieb hat die Speiseraumspeicherung grundsätzlich dieselben Folgen, wie sie auch beim Gleichdruckspeicher auftreten.

Man wird also jeweils erst die erzielbare Speicherwirkung im Kessel und die erforderlichen Vorrichtungen zur Regelung und Sicherung mit den Eigenschaften einer besonderen Speicheranlage zu vergleichen haben, bevor auf die Dampfspeicherung im Kessel in verstärktem Maße zurückgegriffen wird. Obwohl dieselben Grundgesetze wie bei selbständigen Speicheranlagen gelten, hat die Dampfspeicherung im Kessel doch gänzlich andere praktische Bedeutung; insbesondere ist sie für die meisten neuzeitlichen Kesselarten durch die stark verkleinerten Wasserräume auf ganz unbedeutende Werte herabgesetzt worden. Allein die Großwasserraumkessel können für einen wirksamen Ausgleich in Betracht gezogen werden; ihre Speicherfähigkeit darf jedenfalls nicht

übersehen werden. Umgekehrt muß man sich bei Ersatz von Flammrohrkessel durch Hochdruckkessel im klaren sein, daß sich bei Belastungsschwankungen das Fehlen der Dampfspeicherung sehr nachteilig für den Betrieb auswirken kann und u. U. überhaupt scharfe Spitzenleistungen im Bedarf nicht gedeckt werden können.

III. Elemente der Speicheranlage.

Die Hauptteile einer Speicheranlage sind der Speicherbehälter zur Aufbewahrung des speichernden Energieträgers, die Vorrichtungen zur Ladung und Entladung der Dampfmengen, die weiteren Einrichtungen für die Sicherung und Messung des Speicherbetriebes, für den Wärmeschutz u. ä. und schließlich die Regelung zur selbsttätigen Einwirkung der Speicheranlage. Da diese Elemente sich sehr ähnlich bei den verschiedenen Systemen und Ausführungsarten wiederfinden, deren Unterschiede mehr in der Zusammenschaltung der Teile und Verbindung mit dem Kessel bestehen, können ihre konstruktiven und rechnerischen Einzelheiten vor der Behandlung der einzelnen Systeme dargelegt werden. Die im Einzelfall gewählten Vorrichtungen sind nicht immer durch die besonderen Bedingungen des Speicherprinzips verursacht. Sie sind vielmehr oft durch die allmähliche Entwicklung einer bestimmten Ausführungsart entstanden; so gibt es z. B. für die Durchführung der Kondensation (bei der Ladung) verschiedenere Möglichkeiten, die in gleicher Weise bei den einzelnen Systemen angewandt werden könnten. Ähnliches gilt für die Speicherbehälter, deren Ausführung für fast alle Speicherarten unverändert bleiben kann.

1. Speicherbehälter.

Die Ausbildung des Speicherbehälters ist entscheidend für die Wirkung und Bewertung der ganzen Anlage. Trotz der einfachen Formgebung müssen zahlreiche Gesichtspunkte berücksichtigt werden, um die zweckmäßigste Konstruktion und damit die geringsten Herstellungskosten zu erreichen. Dies ist um so wichtiger als der Behälter den weitaus größten Anteil der Gesamtkosten ausmacht.

Der Behälter hat die Aufgabe, eine bestimmte Menge des Speicherstoffes, also praktisch entweder Heißwasser oder Wasserdampf, unter günstigsten Bedingungen aufzubewahren. Die Speicherkapazität der Anlage ist in allen Fällen dem Speichervolumen proportional, so daß die Unterbringung des größten Volumens bei geringsten Aufwendungen angestrebt wird. Als wichtigste Voraussetzung tritt dabei die Höhe des Speicherdrucks auf. Da zunächst geringe Anlagekosten der Dampfspeicher für ihre Anwendung ausschlaggebend sind, muß

für geringstes Gewicht, einfachste Herstellung und kleinsten Platzbedarf bei gegebenem Volumen und Druck gesorgt werden. Erst in zweiter Linie sind die Abkühlungsverluste, die den Wirkungsgrad und damit die laufenden Kosten der Speicherung bestimmen, wichtig und deren Größe mit der Außenoberfläche des Behälters direkt zusammenhängt. Das Bestreben, die kleinste Behälteroberfläche je Volumeneinheit zu erzielen, ist daher weniger durch die verringerten Abkühlungsverluste als durch den Einfluß auf das Behältergewicht von Bedeutung. Wo hier die Grenze zu suchen ist, zeigen die geometrischen Zusammenhänge an der vereinfachten Form.

Aus Festigkeitsgründen erhalten die Speicherbehälter den günstigsten kreisförmigen Querschnitt, also die Grundform des Zylinders. Es ergeben sich daher ganz ähnliche konstruktive Aufgaben, wie sie im Bau von Kesseln und Behältern von großem Ausmaß vorkommen. Die Herstellung der Speicherbehälter ist daher vom Kesselbau ausgegangen, von dem auch die meisten Einzelheiten der Auflagerung, Ausrüstung u. ä. übernommen wurden. Verschiedene Kesselarten, besonders Großwasserraumkessel lassen ohne große Schwierigkeiten einen Umbau als Speicherbehälter zu. Es muß aber hervorgehoben werden, daß vor allem durch die erschwerten Bedingungen des Speicherbetriebes und die häufig

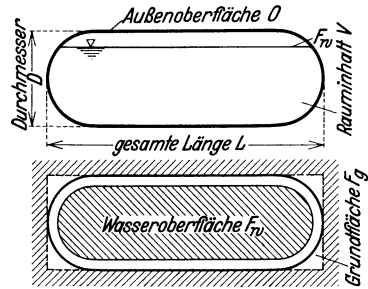


Abb. 7. Zur Dimensionierung von Speicherbehältern.

vielfach größeren Ausmaße ganz neue und andersartige Aufgaben beim Bau von Speicherbehältern aufgetreten sind. So kann bei größeren Durchmessern über etwa 3 m die gewölbte Form der abschließenden Böden nicht beibehalten werden, insbesondere bei höherem Betriebsdruck. Nur kleinere Speicherbehälter werden mit den gewöhnlichen Böden von elliptischer oder Korbbogen-Form versehen; bei größeren müssen sie durch halbkugelförmige ersetzt werden, obwohl diese nicht aus einem Stück gepreßt werden können und daher Mehrkosten verursachen. Die Behälter können entweder liegend (horizontal) oder stehend (vertikal) angeordnet werden. Allgemein wird die billigere liegende Bauart bevorzugt, wenn nicht besondere Gründe für die stehende vorliegen (z. B. Platzmangel).

Zur Berechnung der grundlegenden Größen am Speicherbehälter kann man in erster Annäherung von der einfachen geometrischen Form des Zylinders ausgehen, der durch halbkugelförmige Böden abgeschlossen ist. Die gewölbte Form weicht nur unwesentlich von dieser ab und kann wegen der verschiedenerlei Querschnitte nicht eindeutig

festgelegt werden. Als theoretischer Grenzfall ist die Abschließung durch ebene Flächen anzusehen; zwischen diesem und der Halbkugel liegen alle möglichen Formen der gewölbten Böden. Die hauptsächlichen Zusammenhänge sind daher auch für ebene Böden angegeben. An der Skizze (Abb. 7) sind die wichtigsten Kenngrößen und ihre Bezeichnungen dargestellt.

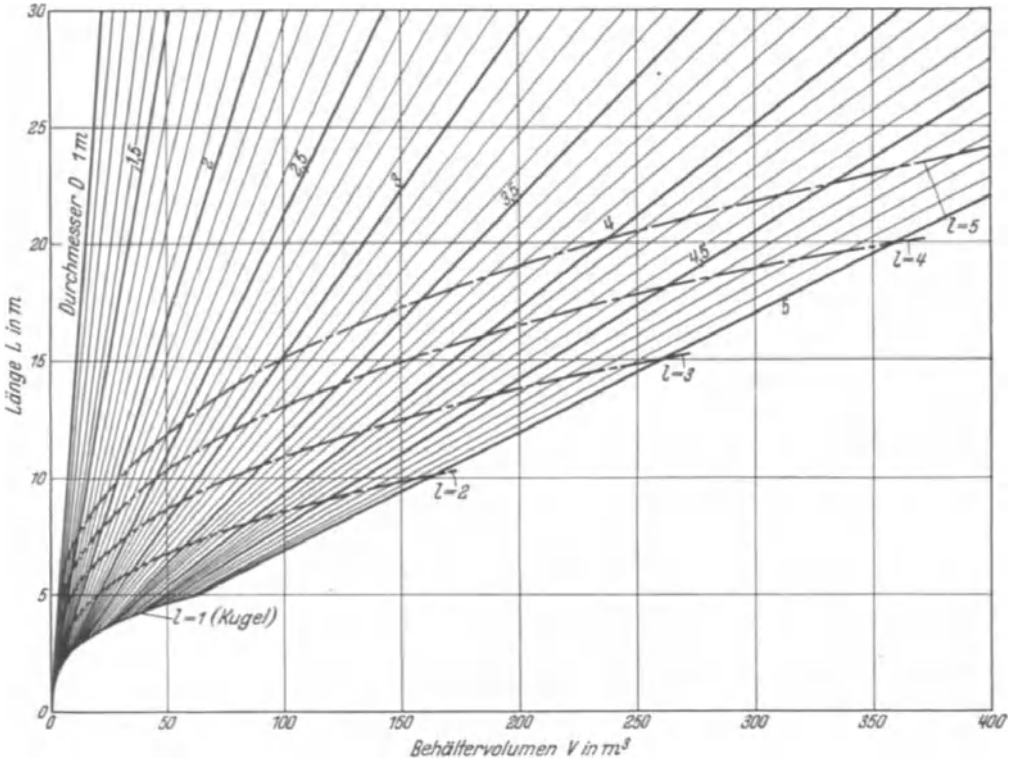


Abb. 8. Volumen des Speicherbehälters abhängig von Länge und Durchmesser (bei Kugelböden).

Für den Rauminhalt erhält man dann bei Kugelböden

$$V = \frac{D^2 \pi}{4} (L - D) + \frac{D^3 \pi}{6} = \frac{D^2 \pi}{4} \left(L - \frac{D}{3} \right).$$

In Abb. 8 ist dieser Zusammenhang zur einfacheren Bestimmung der Speicherdimensionen aufgezeichnet. Die Formgebung ist durch das Verhältnis von Länge und Durchmesser $l = L : D$ gekennzeichnet, dessen Werte ebenfalls in die Abb. 8 eingetragen wurden. Für $l = 1$, also $L = D$ geht der Zylinder in eine Kugel über.

Für die Abschließung durch ebene Böden, also für den einfachen Zylinder, ist

$$V' = \frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot L.$$

Die Außenoberfläche berechnet sich aus

$$O = \pi \cdot L \cdot D \quad (\text{Kugelböden})$$

und

$$O' = \pi \cdot D \left[L + \frac{D}{2} \right] \quad (\text{ebene Böden}).$$

In einfachster Weise erkennt man den Einfluß der gewählten Form auf die Größe der Außenoberfläche, sobald man in die Gleichungen die Verhältniszahl l einsetzt und abhängig vom Behältervolumen die Oberfläche bestimmt. Bei Kugelböden wird

$$O = \pi \cdot l \left[\frac{12}{\pi(3l-1)} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot V^{\frac{2}{3}}.$$

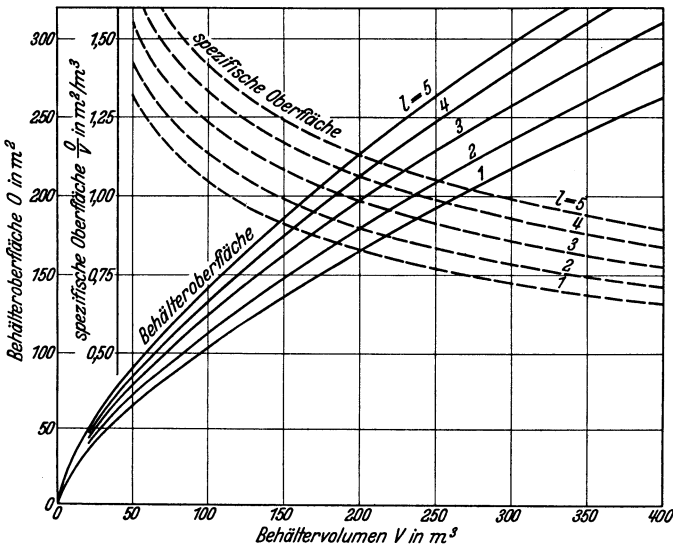


Abb. 9. Behälteroberfläche und spezifische Oberfläche für 1 m³ Speichervolumen.

Abb. 9 gibt diese Beziehung und die spezifischen Werte O/V wieder und zeigt ganz eindeutig die mit kleinerem Verhältnis l abnehmende Behälteroberfläche. Als günstigster Wert ergibt sich immer $l = 1$, also die Kugelform, was auch einfach aus der Gleichung abgeleitet werden kann. Bei flachen Böden wird

$$O' = \frac{\pi}{2} \left(\frac{4}{\pi l} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot (1 + 2l) \cdot V^{\frac{2}{3}};$$

man erhält hierbei ebenfalls für die Kugel die kleinste Oberfläche je Volumeneinheit.

Schließlich ist zum Vergleich des Platzbedarfes bei liegender und stehender Bauart die Grundfläche F_g für einen (durchschnittlichen)

Wert $l = 4$ abhängig vom Behältervolumen in Abb. 10 gegenübergestellt. Zur Feststellung des tatsächlichen Platzbedarfes müssen jedoch noch Zuschläge für Isolierung und Auflagerung gemacht werden, die je nach der Ausführung verschieden sind.

Bevor Folgerungen auf die günstigste Dimensionierung des Behälters gezogen werden dürfen, ist der Einfluß auf den zweiten Faktor des Behältergewichtes, auf die Blechstärke, festzustellen. Nach den Bestimmungen für die Aufstellung von Dampfkesseln, die grundsätzlich auch für Speicheranlagen Geltung haben, ist die Blechstärke nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$s = \frac{p \cdot D \cdot x}{200 \cdot k_z \cdot \varphi} + 1 \text{ [mm]}.$$

Darin bedeutet p den Betriebsdruck in atü, x den Sicherheitsfaktor, φ die Nietschwächung und k_z die Blechfestigkeit in kg/mm^2 . Für einen Durchschnittswert von $\varphi = 0,85$ und der normalen Sicherheit $x = 4$ sind die erforderlichen Blechstärken in Abb. 11 abhängig vom Betriebsdruck, Durchmesser und von der Blechfestigkeit dargestellt. Bei der Blechstärke von Kugelböden kann nach derselben Gleichung gerechnet werden, wenn statt des Durchmessers der Kugelradius eingesetzt wird.

Aus dem Produkt von Oberfläche und Blechstärke erhält man

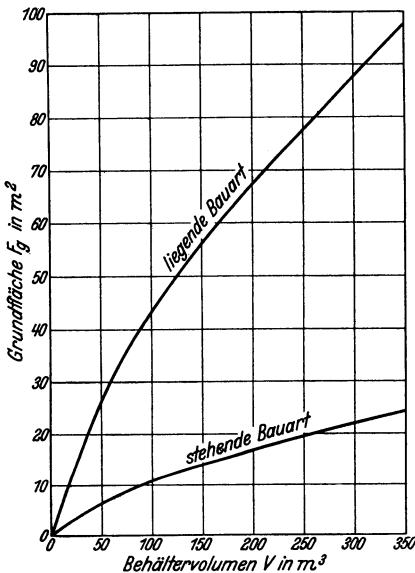


Abb. 10. Vergleich des Platzbedarfes von Speicherbehältern liegender und stehender Bauart.

mit dem spezifischen Gewicht das Behältergewicht

$$G_B = \gamma \cdot O \cdot s \cdot 1000 \text{ [t]}.$$

Setzt man die oben abgeleiteten Beziehungen ein, so zeigt sich, daß mit größerem Durchmesser zwar die Außenoberfläche je Volumeneinheit abnimmt; da jedoch gleichzeitig die Blechstärke ansteigt, gleicht sich der erzielte Vorteil im Gewicht wieder vollständig aus. In guter Annäherung läßt sich das Behältergewicht dem Produkt aus Volumen mal Druck („Druckvolumen“) proportional setzen, so daß der Einfluß des Durchmessers nicht mehr in Erscheinung tritt.

Praktisch hat sich ein mittleres Verhältnis von Länge zu Durchmesser $l = 4$ als günstigste Form ausgebildet. Im besonderen bringt die reine Kugelform durch die komplizierte Verarbeitung von nur gekümpelten Teilen einen größeren Lohnanteil mit sich, der durch Ge-

wichtersparnis nicht ausgeglichen werden kann. Die Unterbringung kugelförmiger Behälter macht weiterhin meist Schwierigkeiten, ebenso die Auflagerung; daher finden solche bis heute noch keine praktische Verwendung. — Mit Rücksicht auf den Transport als fertiger Behälter wird meist (innerhalb eines Volumenbereichs von etwa 50 bis 150 m³) ein Durchmesser von 3 m gewählt, damit die Grenze des Eisenbahnprofils [3,10 m] nicht überschritten wird.

Für größere Anlagen wird eine Unterteilung des Speichervolumens notwendig. Zwar bringt die Verteilung auf mehrere Einheiten eine verhältnismäßige Vergrößerung der Behälteroberfläche mit sich, die sich einfach aus dem kleineren Durchmesser ableiten läßt; auf der anderen Seite ergeben sich bei Durchmesser über etwa 5 m größere Blechstärken und dadurch schwierigere Verarbeitung. Der Höchstwert der sicher bearbeitbaren Blechstärke liegt bei etwa 35 mm; hieraus bestimmt sich auch eine Grenze des Durchmessers, für jeden Wert des Betriebsdruckes, mittels der oben angegebenen Gleichung der Blechstärke. Die größten heute gebauten Speicherbehälter besitzen bei etwa 15 ata

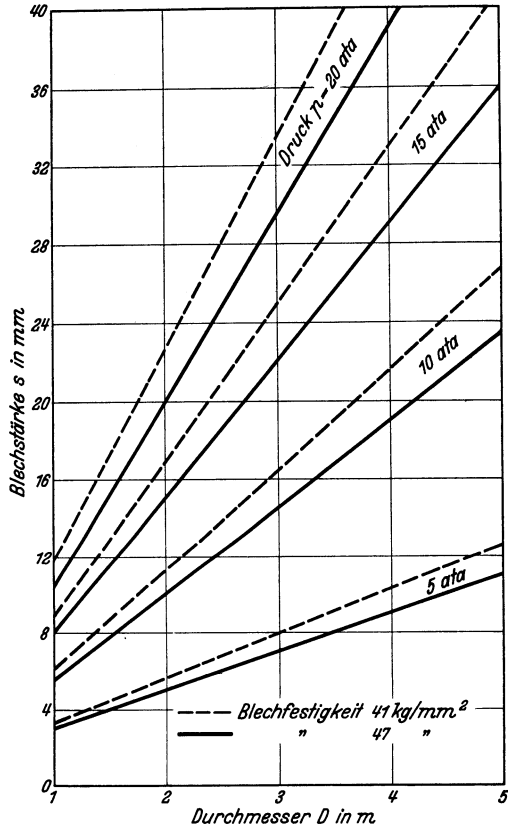


Abb. 11. Bestimmung der Blechstärke von Speicherbehältern.

Speicherdruck ein Volumen von 400 m³; dieser Wert kann als obere Grenze der wirtschaftlichsten Einheitsgröße gelten. — Allerdings können Speicher von geringem Überdruck oder drucklose Behälter noch weitaus größere Abmessungen bekommen, wie z. B. Raumspeicher oder Warmwasserbehälter von 2 bis 3000 m³ ausgeführt wurden.

Die konstruktive Durchbildung auf Grund der ermittelten Hauptabmessungen wird von der Größenordnung des Speichervolumens und vom Druck in erster Linie beeinflusst. Der eigentliche Speicher-

körper besteht aus einzelnen Schüssen von etwa 2,5 bis 4 m Breite, die bei größeren Durchmessern aus Transportrücksichten aus 2 Halbschüssen zusammengesetzt werden müssen. Die bei hohem Druck (etwa 15 ata) erforderlichen Blechstärken von über 30 mm bedingen eine sorgfältige Vernietung der Einzelteile (Schüsse und Böden). Ein Speicherbehälter von beispielsweise etwas mehr als 300 m³ Volumen besteht bei 4,8 m Durchmesser aus 5mal 2 Halbschüssen und 2 Halbkugeln als Böden, die sich aus je 5 Teilen (Kalotte und 4 Segmente) zusammensetzen. Die Schüsse müssen also je 2 Längsnähte erhalten, die durch zick-zackförmig ausgeschnittene Laschen verstärkt werden. — Geschweißte Behälter werden neuerdings auch für mittlere Speichergrößen bis etwa 150 m³ ausgeführt und haben sich im Speicherbetrieb gut bewährt. Der vereinfachte Aufbau und Herstellungsvorgang führt zu billigeren Behältern, solange nicht zu dicke Bleche verwendet werden müssen.

Für die stehende Bauart ergeben sich schon aus der Drehung der Achse geänderte Beanspruchungen der Bleche. Zunächst kommt zum Dampfdruck das Gewicht der Wassersäule hinzu, das z. B. bei 20 m Höhe schon 2 at zusätzlichen Druck ausmacht. Wählt man durchgehend denselben Wert für die Blechstärke aller Schüsse, so kann der Durchmesser im oberen Teil des Speichers entsprechend dem geringeren Druck größer gehalten werden. Bei den beachtlichen Höhen der Speicher ist u. U. auch der Winddruck zu berücksichtigen, sobald die Anlage ungeschützt im Freien aufgestellt wird.

Einen interessanten Grenzfall der Behälterausführung stellt der Vielrohrspeicher dar. Bei hohen Innendrücker von über 30 at kann durch Verwendung zahlreicher nahtloser gezogener Rohre von etwa 500 mm l. W. ein beträchtliches Speichervolumen untergebracht werden.

An den zylinderförmigen Speicherkörper müssen alle Vorrichtungen zur Auflagerung, Reinigung u. ä. angebracht werden. An Öffnungen weist der Behälter ein Mannloch, zum Befahren des Speicherinnern, und ein Handloch auf. Dazu kommt noch für die Montage größerer Einbauten (z. B. Ladevorrichtungen) ein Deckelverschluß, der die Einführung umfangreicherer Teile nach Fertigstellung des Behälters zulassen soll. Weiterhin trägt der Speicherkörper die Stützen für die Anbringung der Leitungen für Dampf und Wasser.

Der vom Kesselbau übernommene Dampfdom sollte zunächst für die Entladung wasserfreien Dampfes (Gefällespeicher) dienen. Im Dom geht die Dampfgeschwindigkeit entsprechend dem größeren Durchlaßquerschnitt herunter und gibt so Gelegenheit zur Abscheidung etwa mitgerissener Wassertröpfchen. Die Ausführung des Doms macht jedoch ziemliche Schwierigkeiten, so daß man mit Erfolg versucht hat, ohne besonderen Dom eine einwandfreie Entladung zu erhalten. Man ver-

richtet daher zur Vereinfachung auf die Anordnung eines Dampfdoms, der durch einen gemeinsamen Anschluß für Lade- und Entladeleitungen ersetzt wird.

Speicher von größeren Abmessungen dehnen sich bei Erwärmung bis auf die höchste Betriebstemperatur so stark aus, daß die Auflagerung nicht mehr fest mit dem Fundament verbunden werden darf. Die Ausführungsmöglichkeiten der beweglichen Auflagerung mit ihren Bewegungsrichtungen zeigt die Abb. 12. Für die liegende Bauart kommen 4 oder 6 Pratzten zu beiden Seiten des Behälters oder Sattelauf- lagerung (ähnlich den Kesselstühlen) in Betracht. Bei der stehenden

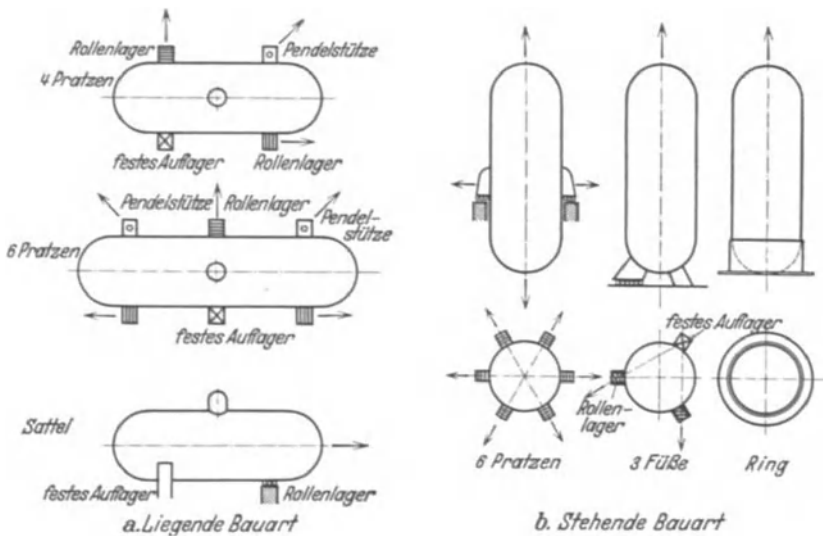


Abb. 12 a und b. Möglichkeiten der Auflagerung von Speicherbehältern (Aufnahme von Wärmedehnungen).

Bauart können entweder 6 radial angeordnete Pratzten oder die Auflagerung auf 3 Füße oder auf ein ringförmiges Lager, das durch Verlängerung des untersten Schusses gebildet wird, angewandt werden. Die einfacheren Lagerformen (Sattel- und Ringlager) benutzt man vor allem für kleinere Behälter, während die Verwendung von Pratzten (gewöhnlich 4) zur normalen Ausführung gehören.

Die Größe der Wärmedehnungen ergibt sich aus der höchsten Dampf- temperatur im Betrieb und den Abmessungen der Lagerabstände in den Haupt- richtungen. Hat z. B. ein Behälter mit 15 atü Höchst- druck zu arbeiten, also mit einer Satt- dampf- temperatur von etwa 200° C, so ist die spezifische Ausdehnung von 0° C bis 200° C gleich 2,5 mm je m Länge einzusetzen. Sind bei 4 Pratzten die Abstände in der Längs- richtung 17 m und in der Querrichtung etwa 6 m, so wird die gesamte Deh-

nung durch Erwärmung 42,5 bzw. 15 mm, also ein Betrag, auf den Rücksicht genommen werden muß.

Die zugehörige Fundamentierung der pfeilerartigen Stützen, auf denen die Pratten aufliegen, richtet sich nach dem Gesamtgewicht des Speichers (einschließlich Wassergewicht) und nach der Tragfähigkeit des Baugrundes. Die einzelnen Stützen stehen auf durchgehenden Fundamentbalken oder einer gemeinsamen Platte. Bei schlechtem Unter-

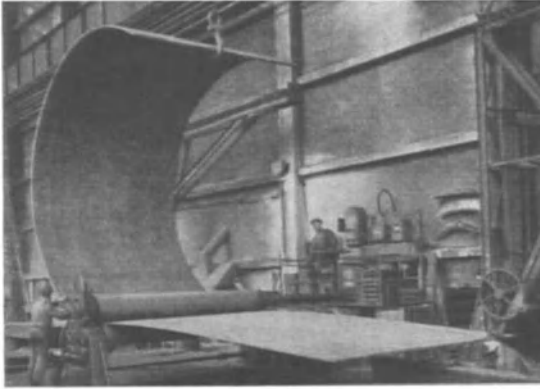


Abb. 13a. Biegen der einzelnen Schüsse.



Abb. 13b. Anrichten der Teile für die Kugelböden.

Abb. 13a bis d. Herstellung der Speicherbehälter (Ruths-Gefälle-speicher von 312,5 m³ für Kraftwerk Charlottenburg).

grund muß durch Pfähle die Tragfähigkeit verbessert werden.

Von besonderem Interesse ist schließlich noch die Herstellung der Speicherbehälter, vor allem sobald die Abmessungen des Behälters und der Blechstärken das sonst übliche Maß überschreiten. Allgemein erfordert der Bau von Speicherbehältern eine erhöhte Sorgfalt in der Wahl und Bearbeitung der Werkstoffe, sowie in der Genauigkeit der Formgebung und des Zusammenbaues. Das dauernde Wechseln der Temperaturen des Wasserinhaltes, ebenso wie die bei der Aufstellung im Freien möglichen Witterungseinflüsse, bedeuten eine

besondere Erschwerung der Arbeitsbedingungen. Ungenauigkeiten in der Zusammenpassung oder fehlerhafte Nieten können zu Undichtigkeiten führen, die u. U. erst nach langen Anstrengungen wieder zu beseitigen sind. In verschiedenen Fällen konnte erst die vollständige Schweißung des ganzen Behälters einen einwandfreien Betrieb herbeiführen. Aus diesen Gründen muß sowohl die Werkstattarbeit als auch die Montage am Aufstellungsort dauernd überwacht und durch Werkstoffproben, laufende Messungen des Nietdruckes und der Niet-

zeit u. ä. eine bis ins Einzelne gehende Sicherheit der Herstellung erzielt werden.

In Abb. 13 sind Lichtbilder von einzelnen Phasen der Bearbeitung von großen Speicherbehältern dargestellt. Die Bleche von der Breite der Schüsse werden auf der Biegemaschine zum kreisförmigen Querschnitt gebogen. Nach dem Bohren der Nietlöcher werden die einzelnen Schüsse zusammengepaßt und zunächst mit Schrauben verbunden. Soweit die Vernietung in der Nietgrube durchgeführt werden kann, werden Rund- und Längsnähte dort vernietet. Die übrigen Nieten der transportierbaren Behälterteile werden mit hängender Nietmaschine ausgeführt. Am Aufstellungsort sind schließlich nur 2 Rundnähte zu vollenden.

Die werkstattmäßige Anfertigung derartiger Behälter ist natürlich ein großer Vorteil, der nur möglich ist, wenn kein Eisenbahntransport durchgeführt werden muß; andernfalls muß das Höchstprofil von 3,10 m

eingehalten werden und der Zusammenbau der einzelnen Halbschüsse muß am Aufstellungsort erfolgen. Bei den benötigten Nietdurchmessern bis zu 35 mm bereitet die Handnietung große Schwierigkeiten, so daß ein besonderes Nietgerät bestehend aus einer hydraulischen Nietmaschine, die an einem Bockkran aufgehängt ist, verwandt wird. Bilder von der Montage mit einem solchen Gerät zeigt Abb. 14. Um größere Behälterteile transportieren zu können, wurden die verschiedensten Wege versucht. Bei günstiger Wasserverbindung ist die Verladung auf Kähnen,

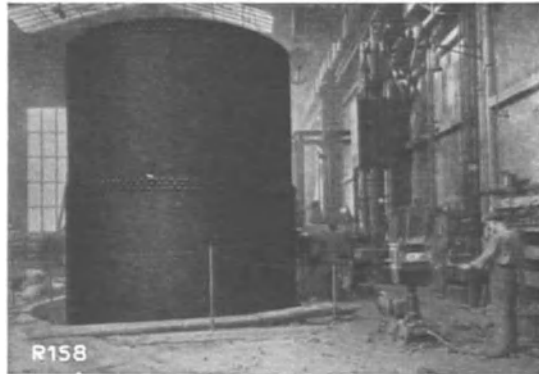


Abb. 13c. Nieten in der Nietgrube.

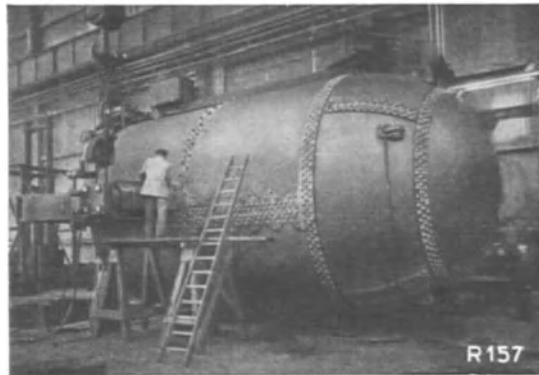


Abb. 13d. Nieten mit hängender hydraulischer Nietmaschine.

Abb. 13a bis d. Herstellung der Speicherbehälter (Ruths-Gefälle-speicher von 312,5 m³ für Kraftwerk Charlottenburg).

andernfalls auch der Transport mittels Traktoren möglich. Um den Zusammenbau am Aufstellungsort nicht zu erschweren, muß vermieden werden, daß die genau zusammengepaßten Teile während des Transportes irgendwelche Veränderungen erfahren. Dasselbe gilt für kleinere Behälter, die fertig bearbeitet transportiert werden können.

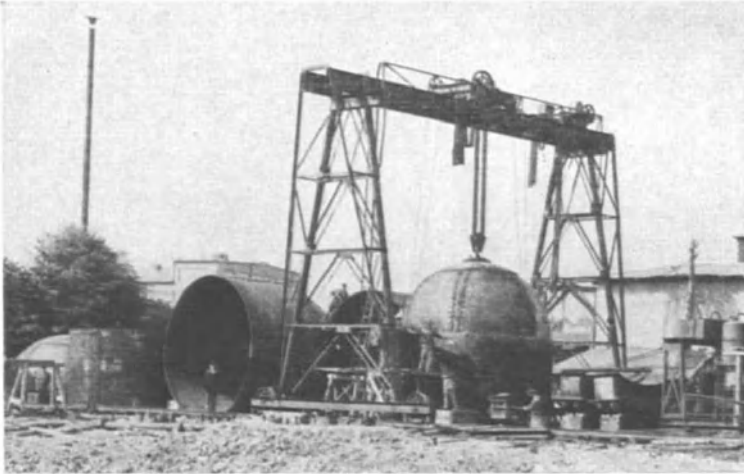


Abb. 14. Zusammenbau der Speicherbehälter am Aufstellungsort (Ruths-Gefällespeicher von 300 m³).

2. Lade- und Entladevorrichtung.

Die bei der Ladung und Entladung des Dampfspeichers auftretenden Vorgänge müssen so durchgeführt werden, daß möglichst die ganze Speicherfähigkeit der Anlage ausgenutzt werden kann und ein einwandfreier Betrieb gesichert ist. Zu diesem Zweck wurden für die einzelnen Systeme Vorrichtungen ausgebildet, die, obwohl sie in ihrem Aufbau

sehr verschiedenartig sind, grundsätzlich ihrer Aufgabe nach in wenige Gruppen einzuteilen sind. Für die unmittelbare Dampfspeicherung sind keine besonderen Einrichtungen nötig, da der Dampf keine Veränderungen durchzumachen hat. Mittelbare Dampfspeicher benutzen fast ausschließlich Wasser als Speicherstoff, so daß beim Ladevorgang der zu speichernde Dampf kondensiert werden muß; beim Entladevorgang wird die gespeicherte Wärme wieder zur Dampferzeugung verwendet. Damit die Kondensation des überschüssigen Dampfes unter Teilnahme entweder des ganzen Speicherinhaltes (Gefälleprinzip) oder eines der Lademenge entsprechenden Anteils (Gleichdruckprinzip) vor sich geht, erfordert der Lade- oder Entladevorgang noch die Umwälzung des Speicherinhaltes.

Die Kondensation des Dampfes kann entweder durch Einleiten in den Wasserinhalt des Speichers oder in besonderen Kondensatoren erfolgen. Doch ist nicht grundsätzlich eine Trennung der Möglichkeiten für Gefälle- oder Gleichdruckprinzip vorhanden; wenn im folgenden die Verwendung für eine bestimmte Speicherart gekennzeichnet wird, so nur, weil sich die betreffende Vorrichtung hierfür als die zweckmäßigste erwiesen hat. Ebenso ist umgekehrt die Durchführung der Vorgänge beim Gefällespeicher mit besonderen Kondensatoren denkbar oder die Kondensation des Dampfes durch Einleiten in den Wasserinhalt des Gleichdruckspeichers. Dies muß betont werden um die Einzelteile der Ausführungsarten der Speicheranlagen als eine bestimmte (zweckmäßigste) Auswahl unter einer Anzahl von Möglichkeiten zu kennzeichnen.

Wird der Dampf in Wasser eingeleitet, was meist beim Gefällespeicher angewandt wird, so kann dies im einfachsten Fall ohne weitere Vorrichtungen erfolgen. Der Kondensationsvorgang gleicht demjenigen bei der direkten Heizung, wie er bei Kochapparaten und anderen Dampfverbrauchern häufig angewandt wird. Die eintretenden Dampfblasen nehmen beim Aufsteigen den gerade im Behälter herrschenden Druck an. Zunächst kann nur eine etwa vorhandene Überhitzungswärme an das umgebende Wasser abgegeben werden, da nach Abkühlung bis auf Sättigungstemperatur kein Temperaturunterschied zum umgebenden Wasser mehr vorhanden ist. Daher kann bei Beginn der Ladung noch kein Dampf kondensieren; die Dampfblasen werden vielmehr zunächst das Wasser durchschlagen und in den Dampfraum gelangen. Erst durch das Zuströmen des Ladedampfes erhöht sich der Druck im Dampfraum und im Speicher, so daß sich der nun eintretende Dampf auf einen etwas höheren Druck ausdehnt, von einer Sättigungstemperatur, die über der Wassertemperatur liegt. Durch diesen Temperaturunterschied ist das Kondensieren der Dampfblasen und die Erwärmung des Wasserinhaltes möglich. Es stellt sich also selbsttätig ein Beharrungszustand her,

bei dem stets ein kleiner Teil der Dampfmenge in den Dampfraum gelangt und zur Drucksteigerung dient. Der größte Teil des Dampfes kondensiert während des Aufsteigens im Wasser. Jedoch wird dabei wegen der geringen Leitfähigkeit des Wassers nur der oberhalb der Einströmung gelegene Wasserinhalt erwärmt. Findet kein Wasserumlauf statt, so muß also die Einströmung an die unterste Stelle im Speicher gelegt werden und der Dampf so verteilt werden, daß er möglichst durch den ganzen Wasserinhalt hindurchströmen muß.

Von dieser Art der Durchführung kann man bei der Dampfspeicherung also nur dort Gebrauch machen, wo ein genügend großer Druckbereich zur Verfügung steht, da durch die Höhe des Wasserspiegels über der Einströmöffnung ein Teil des Druckes für die Speicherung verloren geht.

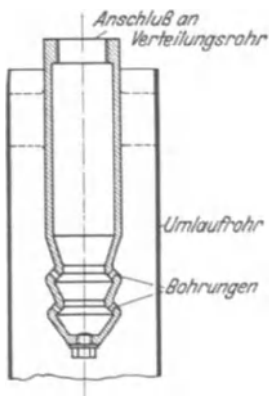


Abb. 15. Ladedüse mit Umlaufrohr (Ruths-Gefällespeicher).

Um die einfache Form der Kondensation durch Dampfeinströmung in den Wasserinhalt beibehalten zu können und einen möglichst geringen Druckverlust zu erzielen, muß für eine dauernde Umwälzung des Wassers gesorgt werden. Diese kann entweder selbsttätig infolge der beim Ladevorgang auftretenden Kräfte oder künstlich durch besondere Antriebskräfte durchgeführt werden. Für die letztere wurden Rührwerke und Pumpen vorgeschlagen, die jedoch praktisch nicht ausgeführt werden, da die selbsttätige Umwälzung sich mit einfachen Vorrichtungen erzielen läßt. Die von Ruths angewandte Form (s. Abb. 15 und auch 29) besteht aus Düsenkörpern, die den von oben zugeleiteten Dampfstrom umlenken und durch zahlreiche Bohrungen ins Wasser ausströmen lassen. Durch ein einfaches Rohr, das eine bestimmte Wassersäule umschließt, wird der Umlauf derart bewerkstelligt, daß das innerhalb befindliche Wasser aufwärts bewegt wird. Als Antriebskräfte werden die Bewegungsenergie des einströmenden Dampfes, die durch den Auftrieb und die Eintrittsgeschwindigkeit des Dampfes entsteht, und das Übergewicht der außen liegenden Wassersäule benutzt. Da der Dampf im Rohr einen gewissen Teil des Wassers verdrängt, wird in diesem das spezifische Gewicht gegenüber dem bloßen Wasser außerhalb herabgesetzt.

Die Düsenkörper und umschließenden Steigrohre werden bei horizontalen Behältern über die ganze Länge verteilt; bei vertikalen müssen sie in der Achse zusammengefaßt und von einem einzigen Steigrohr umgeben werden (s. Abb. 29 u. 30). Da wie gezeigt, der Frage des Druckes der Wassersäule bei stehenden Körpern eine erhöhte Bedeutung zu-

kommt, sind hier eingehende Untersuchungen angestellt worden. Föhl (7) hat allgemein die Bedingungen für den geringsten Temperatur-Verlust aufgestellt. Dieser setzt sich zusammen aus dem Unterschied zwischen der Temperatur des Dampfraumes und der obersten Wasserschicht Δt_r , der zur Kondensation nötig ist, und aus dem Unterschied der Sättigungstemperaturen Δt_{ws} , der durch den zusätzlichen Druck der Wassersäule in größeren Tiefen entsteht. Es zeigt sich, daß die verschiedensten Größen auf diese Temperaturdifferenzen, die durchschnittlich je 2 bis 4° C betragen, von Einfluß sind. Es läßt sich ableiten, daß

$$\Delta t_r = \frac{Q}{\nu \cdot \alpha \cdot F_0 \cdot z_0},$$

ist, wobei Q den Wärmehalt einer Dampfblase, α die Wärmeübergangszahl, F_0 die Blasenoberfläche und z_0 die Zeit des Aufsteigens bedeutet, während ν ein Faktor von der Größe $\frac{1}{2}$ ist. Um einen Mindestwert für Δt_r zu bekommen, ist also vor allem die Ausbildung kleiner Dampfblasen (durch enge Bohrungen) anzustreben, ferner eine kleine Aufstiegs- geschwindigkeit des Dampfes. Da der Anteil der Geschwindig-

keit des umlaufenden Wassers (neben Eintritts- und Auftriebsgeschwindigkeit des Dampfes) überwiegt, ist also eine kleine Umlaufgeschwindigkeit (durch ein weites Steigrohr) anzustreben. Die Tiefe der Bohrungen unter dem Wasserspiegel spielt eine entscheidende Rolle, da durch sie einerseits die Aufsteigzeit der Blasen und damit Δt_r , andererseits der Druck der darüberliegenden Wassersäule und damit Δt_{ws} verändert wird. Es ergibt sich je nach dem Speicherdruck und der Ladedampfmenge eine bestimmte Tiefe h , die den geringsten Gesamtwert ergibt. In Abb. 16 ist der kennzeichnende Verlauf des gesamten Temperaturverlustes für verschiedene Voraussetzungen wiedergegeben.

Auch bei der Bemessung der Zuleitung und des Verteilungsrohrs ist ein möglichst geringer Wert des Druckabfalls zu erstreben, da dieser beim Gefällespeicher gleichbedeutend mit Verlust an spezifischer Speicherfähigkeit ist. Da jedoch der Strömungsdruckabfall in der Zuleitung und Einströmung sich nach der Dampfleistung richtet, wird der Verlauf der Ladeleistung auch für die Bemessung von Einfluß sein. Muß etwa in sehr kurzer Zeit (z. B. während der Mittagspause) der

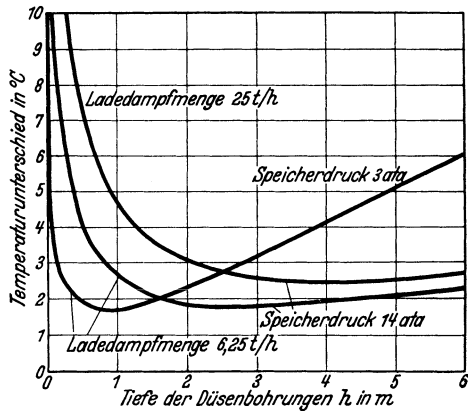


Abb. 16. Temperaturunterschied zwischen Dampfraum und Wasser, abhängig von der Tiefe der Düsen für verschiedene Werte von Speicherdruck und Ladedampfmenge (nach Föhl).

Speicher aufgeladen werden, so ist wegen der bis zum Schluß der Ladung anhaltenden hohen Dampfleistung der Speicherdruck um den gesamten Druckabfall niedriger und die Kapazität entsprechend kleiner. Verteilt sich die Ladeperiode auf eine längere Zeit und kann sie allmählich beendet werden, so wirkt sich der Druckabfall bei der Ladung nicht aus, da mit abnehmender Dampffzufuhr der Speicherdruck bis zum vollen Druck der Ladeleitung erhöht werden kann. — Das Verteilungsrohr muß so weit bemessen sein, daß möglichst gleichmäßig alle Düsenkörper an der Ladung teilnehmen und nicht nur die unmittelbar an der Zuleitung gelegenen versorgt werden.

Die Düsenkörper selbst werden gewöhnlich mit Bohrungen von 10 mm versehen, womit die kleinste praktisch ausführbare lichte Weite (wegen Verunreinigungen) erreicht ist. Ein Düsenkörper mit 40 Bohrungen erhält also insgesamt 16 cm^2 wirksamer Öffnung (bei Kontraktionsfaktor = 0,5). Bei einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 m/sek würde bei einem Dampf von 14 ata eine Dampfmenge von etwa 1,8 t/h je Düse zu laden sein.

Bei der Entladung größerer Dampfmengen auf verhältnismäßig kleiner Oberfläche werden beim Gefällespeicher ebenfalls Umlaufrohre verwendet, um die Beteiligung des ganzen Wasserinhaltes auch bei stehenden Behältern zu ermöglichen. Durch einen konisch verlaufenden Ansatz (s. Abb. 30) werden die entstehenden Dampfblasen im oberen Teil des Rohres zusammengedrängt, so daß innerhalb des Rohres das Dampf-Wassergemisch leichter wird als die Wassersäule außerhalb. Die sonst bei hoher Entladeleistung explosionsartig verlaufende Verdampfung wird durch Umwälzung des Speicherinhaltes auf immer neue Wasserschichten verlegt, so daß — wie auch Messungen (28) gezeigt haben — durch den Einbau ein stetiger Temperaturverlauf über die ganze Höhe erzielt werden kann.

Schon die ursprüngliche Verwendung des Gefällespeichers zur Abdampfspeicherung mit sehr kleinen Druckgefällen führte zur Ausbildung besonderer Einrichtungen, die eine möglichst große Berührungsfläche von Dampf und Wasser erzielen sollten. Rateau verteilte den Wasserinhalt auf zahlreiche eiserne Tassen, die vom umströmenden Dampf erwärmt werden. Die starke Unterteilung zusammen mit der besseren Leitfähigkeit des Eisens ergeben eine gute Wärmeübertragung, so daß der gesamte Wasserinhalt ohne merkbaren Druckverlust an der Speicherung teilnehmen kann. Die Ausführung stellt sich jedoch durch die beträchtlichen Eisenmengen sehr teuer. Bedeutend einfacher läßt sich eine große Berührungsfläche durch gegenläufige Bewegung von Wasser und Dampf erzielen, wenn der Speicherraum durch horizontale Bleche unterteilt wird. Der durch Bohrungen und Überlaufrohre der Bleche abwärts fließende Wasserstrom wird auf großer Fläche vom

aufsteigenden Dampf erwärmt. Diese Art der Ladevorrichtung wurde z. B. beim Regelspeicher in Verbindung mit Gleichdruckspeicherung (s. S. 95) angewandt und bildet einen Übergang zu den getrennten Kondensationsvorrichtungen.

Der Wärmeübergang in besonderen Vorwärmern kann entweder durch unmittelbares Zusammenbringen des Dampfes mit der zugehörigen Wassermenge (Mischvorwärmer) oder durch eine übertragende Wand hindurch (Oberflächenvorwärmer) erfolgen. Die hauptsächlich angewandten Mischvorwärmer haben den Vorteil, daß das Wasser bis auf die Sättigungstemperatur des niedergeschlagenen Dampfes vorgewärmt werden kann. Konstruktiv ist hier die Aufgabe ähnlich wie bei der Vorwärmung im Speicher selbst: die größtmögliche Berührungsoberfläche zwischen Dampf und Wasser zu erzielen. Angewandt wird das Gegeneinanderströmen infolge der Schwerkraft sobald Wasser von oben und Dampf von unten eingeführt wird. Um aber nicht eine zu große Bauhöhe der Apparate ausführen zu müssen, werden Hindernisse dem geradlinigen Abfluß des Wassers entgegengesetzt, die es zwingen große Umwege zu machen; dies wird z. B. durch Einbau von Raschig-Ringen oder Überlauftassen mit zickzackförmig ausgeschnittenen Rändern erzielt (s. auch Abb. 67). Durch Anordnung einer Wassertasse an der Einströmung des Wassers kann das Eindringen von Dampf sicher verhindert werden.

Ist die Vermengung von Dampf und Wasser nicht zulässig oder wird der Dampf nur um einen bestimmten Betrag abgekühlt, so muß die Vorwärmung durch Oberflächenapparate durchgeführt werden. Nachteilig ist der Temperaturunterschied, der sich infolge der Zwischenwand einstellt, so daß ein Teil des Temperaturgefälles nicht ausgenutzt werden kann.

3. Hilfsmittel des Speicherbetriebes.

Der Ausbildung zweckmäßigster Hilfsmittel bis zu den letzten Einzelheiten muß um so mehr Gewicht beigemessen werden, als das Versagen scheinbar nebensächlicherer Elemente schon — bei den oft gewaltigen gespeicherten Energiemengen — zu schweren Störungen, mindestens aber zu fühlbaren wirtschaftlichen Beeinträchtigungen des ganzen Betriebes führen kann. Andererseits ist die Dampfspeicherung selbst ein verhältnismäßig einfacher, gut übersehbarer Vorgang, der in jedem Fall die Auswahl geeigneter Ausrüstungseinzelheiten der Speicheranlage möglich macht, ohne die allerdings die praktische Anwendung der Dampfspeicherung in Frage gestellt wäre.

Ein klares Beispiel bietet der an fast allen Speicheranlagen angebrachte Wärmeschutz, der es gestattet, die Abkühlungsverluste in fast beliebigen Maße herabzusetzen. Ohne diesen müßte ein Vielfaches

an Energieverlusten in Kauf genommen werden, was nur in seltenen Fällen wirtschaftlich zu rechtfertigen wäre. So muß auf einen Teil der Anlage, dem bei anderen Betriebsmitteln nur eine untergeordnete Rolle zukommt, hier die größte Aufmerksamkeit gerichtet werden.

Der Speicherbetrieb stellt besondere Anforderungen, auf die bei der Wahl des Isoliermaterials Rücksicht genommen werden muß. Zunächst sind es die stark und rasch schwankenden Temperaturen, zu denen noch mechanische Erschütterungen bei der Ladung oder Entladung hinzukommen können. Stoffe also, die dabei in ihrem Raum oder in ihrer Zusammensetzung verändert werden, sind nicht brauchbar. Auch bei der Art der Aufbringung muß das Arbeiten des Speichers beachtet werden. — An sich stellen schon die oft sehr großen Flächen von mehreren Hundert m² keine einfache Aufgabe; doch haben sich die meisten ausgeführten Stoffe, sowohl die in die Umhüllung gestampften als auch die naß aufgetragenen in langjährigem Betrieb bewähren können. — Die Umhüllung der Nietnähte wird meist von der übrigen Fläche getrennt, damit bei etwa auftretenden Undichtigkeiten die Feststellung und Beseitigung des Schadens schneller erfolgen kann und weiterhin, um beim Ausströmen von Dampf oder Wasser nicht den gesamten Wärmeschutz zu gefährden. Hierbei finden leicht abnehmbare Stoffe (Asbest- oder Glaswolle-matten und plattenförmige Stoffe), die zur Isolierung des ganzen Speichers zu teuer wären, Verwendung. — Zur Befestigung der Isolierung werden auf den Behälter (je nach dem Material und seiner Aufbringungsart) in bestimmten Abständen Ringeisen befestigt, an die entweder ein Drahtgeflecht oder die Verkleidung selbst angebracht wird. — Die äußere Verkleidung dient zum Schutz gegen Witterungseinflüsse, da die Speicheranlagen fast restlos im Freien aufgestellt werden. Benutzt wird hierzu entweder starke Teerpappe oder Blech. Damit erhalten die Speicherbehälter ihr abgerundetes endgültiges Aussehen.

Für die Bestimmung der wirtschaftlichsten Dicke des aufgetragenen Wärmeschutzstoffes lassen sich ähnliche Bedingungen aufstellen, wie bei Rohrleitungen, durch die für vorausgesetzte spezifische Kosten des Stoffes und des Dampfes ein bestimmter Wert zu ermitteln ist. Doch liegt ein grundsätzlicher Unterschied im unterbrochenen Betrieb der Speicherung, der einerseits zu geringeren Benutzungsdauern führt, also den Anlagekosten des Wärmeschutzes größeres Gewicht zukommen läßt; auf der anderen Seite beeinträchtigen aber die Wärmeverluste nicht nur die Dampf- bzw. Brennstoffkosten, sondern auch die Leistungsfähigkeit der Speicheranlage. — Praktisch haben sich gewisse Normalwerte des zugelassenen Wärmeverlustes herausgebildet, die die Dicke des Wärmeschutzes festlegen. Dabei wird in erster Linie auf die Verminderung der Speicherfähigkeit Rücksicht genommen, durch

die vor allem die Kosten der Speicherung bestimmt werden, und der gegenüber die Energieverluste vernachlässigt werden können. Daher wird bei Anlagen, die mehrmals am Tage voll geladen werden und entladen werden (kurze Speicherperiode), ein größerer Wärmeverlust zugelassen (rund 1,0 kcal je Stunde, m² Oberfläche und °C Temperaturdifferenz). Bei nur 1 bis 2 Speicherperioden im Tag — z. B. bei Kraftwerken — verringern die Verluste die zu entladenen Dampfmenngen merkbarer, so daß nur ein kleinerer Abkühlungsverlust (etwa 0,6 kcal/h m² °C) bei stärker aufgetragenem Wärmeschutz eingehalten wird.

Die für Speichieranlagen gebräuchlichen Schutzstoffe besitzen Wärmeleitahlen, die meist zwischen 0,05 und 0,1 kcal/h m °C liegen. Die gewöhnlich aufgetragene Dicke der Isolierung wird daher durchschnittlich 100 mm.

Ist der spezifische Wärmeverlust der Isolierung k (in kcal/h m² °C) festgelegt, so lassen sich die Wärmeverluste Q_v , etwa während eines Tages, einfach bestimmen

$$Q_v = k_m \cdot O_g \cdot [t_i - t_a] \cdot 24 \text{ [kcal/Tag].}$$

Dabei ist k_m auf die gesamte Außenoberfläche O_g (in m²), also einschließlich etwa unisolierter Teile, zu beziehen. Da sowohl die Außentemperatur t_a als auch die Temperatur im Speicherinneren t_i nur sehr schwer genauer zu erfassen ist, wird man mit Mittelwerten rechnen, die entsprechend den besonderen Betriebsbedingungen zu wählen sind. — Der Temperaturabfall t_v eines voll geladenen Speichers kann gleich dem Wärmeverlust q_v bezogen auf 1 kg Wasserinhalt gesetzt werden

$$t_v = q_v = \frac{Q_v}{V \cdot f \cdot \gamma_0} = k_m \cdot \left[\frac{O_g}{V} \right] \cdot \frac{1}{f} \cdot \left[\frac{t_i - t_a}{\gamma_0} \right] \cdot 24 \text{ [}^\circ\text{C]},$$

wobei V das Volumen (in m³), f die prozentuale Wasserfüllung und γ_0 das spezifische Gewicht des Heißwassers (in kg/m³) bei der Temperatur t_0 bezeichnet. Aus Rechentafel Abb. 17 kann mit der spezifischen Oberfläche (nach Abb. 9) unmittelbar t_v entnommen werden.

Die am Speicherbehälter selbst anzubringenden Armaturen bestehen aus: Sicherheitsventil, Belüftungsventil und Abschlammentil. Die Größe des Sicherheitsventils muß nach den polizeilichen Vorschriften so bemessen sein, daß die größten zufließenden Dampfmenngen abgeführt werden können. Die Berechnung geht von der Heizfläche H der Kesselanlage aus, wobei für Vollhubventile der Ventilquerschnitt

$$F = 5 H \sqrt{\frac{1000}{p \cdot \gamma}} \text{ [mm}^2\text{]}$$

gesetzt wird, wenn p den Überdruck und γ das spezifische Gewicht des Dampfes bedeutet. Für die Ladung mit Sattdampf kann ausgehend

von der Schluckfähigkeit der Ventile für eine maximale Ladedampfmenge G (in kg/h) angenähert

$$F = 5 \cdot \frac{G}{(p+1)} [\text{mm}^2]$$

gesetzt werden, wobei der Vergleich beider Gleichungen die angenommene Heizflächenbelastung zu rund $45 \text{ kg/m}^2\text{h}$ ergibt.

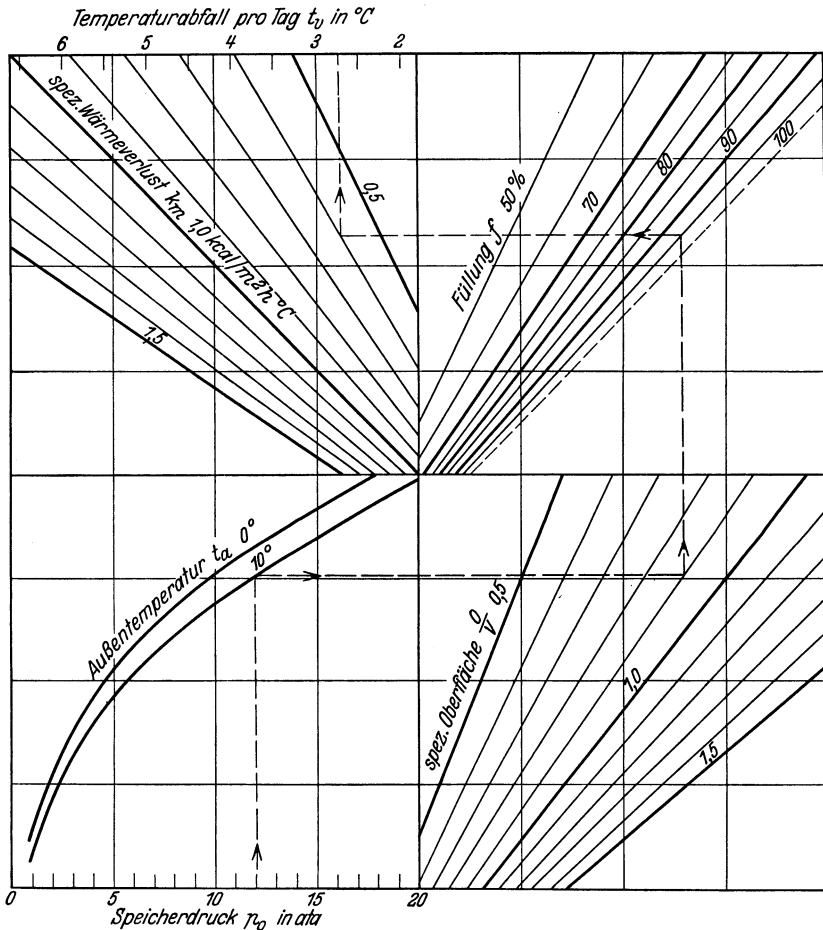


Abb. 17. Temperaturabfall im Speicher durch äußere Abkühlung.

Beispiel: $p_0 = 12 \text{ ata}$; $t_a = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $O/V = 0,9$; $f = 95\%$; $k_m = 0,6 \text{ kcal/h m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ergibt $t_v = 2,75 \text{ }^{\circ}\text{C/Tag}$.

Da in den seltensten Fällen die gesamte Dampfleistung der Kesselanlage zur Ladung des Speichers benutzt werden soll, würden sich unnötig große Sicherheitsventile ergeben. Man sieht daher meist eine Begrenzung der zufließenden Dampfmengen durch Einschaltung einer

La valdüse vor, welche entsprechend ihrem engsten Querschnitt F_D [m²] den Höchstwert der Ladeleistung M_{\max} begrenzt. Das Druckverhältnis des Dampfes im engsten Querschnitt zum Dampfdruck vor der Düse kann bekanntlich einen „kritischen“ Wert nicht unterschreiten (für Sattdampf 0,545), aus dem sich, entsprechend dem adiabatischen Wärmegefälle, die höchste Dampfgeschwindigkeit c_{\max} [m/sek] und damit die größte Dampfmenge $M_{\max} = F_D \cdot c_{\max} \cdot \gamma$ [kg/h] ergibt. Dieser Wert kann dann der Berechnung des Sicherheitsventils zugrunde gelegt werden, wodurch nur ein viel kleinerer Querschnitt nötig wird.

Das Sicherheitsventil wird bei liegenden Behältern am Dom angebracht, wo auch ein Belüftungsventil Platz findet, das zur Luftzufuhr bei Unterdruck im Speicher dient. In den am Speicher angeschlossenen Dampfleitungen müssen unmittelbar am Behälter Absperrorgane angeordnet werden, damit bei Beschädigungen der Rohrleitung ein Ausströmen von Dampf verhindert werden kann. Da bei Gefällespeicheranlagen der Druckabfall auf ein Mindestmaß beschränkt werden muß, ergeben sich Leitungen und Armaturen von sonst selten angewandten Durchmessern. Abb. 18a zeigt beispielsweise Absperrschieber von 700 mm l. Weite, die in der Ruths-Gefällespeicheranlage im Kraftwerk Charlottenburg Anwendung fanden (10). Aus dem-

selben Grund werden besonders Schieber oder Spezialventile mit vermindertem Strömungswiderstand eingeschaltet; während normale Tellerventile vor allem dort verwendet werden, wo ein größeres Druckgefälle abgedrosselt werden kann. — Ist die Strömungsrichtung des Dampfes nicht eindeutig festgelegt, sondern vom Dampfdruck beeinflussbar, so werden Rückschlagventile angeordnet. Außer den normalen Ventilen finden ebenfalls besonders solche mit verringertem Durchflußwiderstand Verwendung. Zum ausgeglicheneren Betrieb sind Ausführungen mit Dämpfungen ausgebildet worden, wobei ein mit dem Ventilteller gleichzeitig bewegter Kolben in einem luft- oder ölgefüllten Zylinder gebremst wird. Besonders bei Gefällespeichern sind Rück-

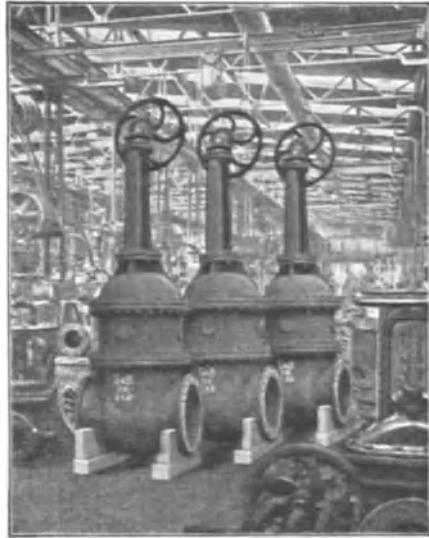


Abb. 18 a. Absperrschieber, System Fischbach (Schäffer und Budenberg).

Abb. 18 a und b. Armaturen einer Speicherentladung von 700 mm l. W. (Ruths-Gefällespeicheranlage im Kraftwerk Charlottenburg).

schlagventile von größter Wichtigkeit, da bei dem wechselnden Druck im Speicher Sicherheit gegen Umkehrung der Strömungsrichtung gewährleistet sein muß.

Der Ausgleich der Wärmedehnungen kann bei kleineren Rohrleitungen durch glatte oder gewölbte Rohrbögen erzielt werden. Da, wie bereits gezeigt, die Dehnungen am Behälter selbst bereits beträchtliche Werte annehmen können und nach allen Seiten hin erfolgen, muß auch für einen gleichzeitigen Ausgleich in den angeschlossenen Leitungen gesorgt werden. Für größere Anlagen sind, vor allem bei beschränktem Raum, die Metallschlauch-Ausgleicher gut verwendbar, da sie auch geringeren Druckabfall als Rohrbögen bedingen. Die für Dampfspeicher verwandten Durchmesser ergaben Apparate von

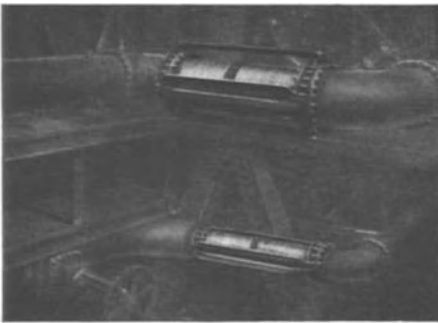


Abb. 18 b. Metallschlauch-Ausgleicher
(Metallschlauchfabrik Pforzheim).

Abb. 18 a und b. Armaturen einer Speicherentladung
von 700 mm I. W. (Ruths-Gefällespeicher-
anlage im Kraftwerk Charlottenburg).

den größten überhaupt gebauten Abmessungen (s. Abb. 18 b). Halle (10) berichtet über die Erfahrungen im Kraftwerk Charlottenburg, wo durch vergrößerte Strömungsgeschwindigkeit bei absinkendem Speicherdruck in den Ausgleichern starkes Pfeifen auftrat, das erst nach Anbringung von Blechspiralen, die im Innern des Metallschlauches einen glatten Dampfdurchfluß erzielten, beseitigt werden konnte.

Unter den am Speicher befindlichen Meßinstrumenten

sind in erster Linie diejenigen zur Anzeige des Ladezustandes von besonderer Bedeutung. Die Kesselfeuerung wird beim Betrieb mit Speichern nicht mehr nach dem Kesseldruck eingestellt, sondern ist dann zu verändern, wenn der gespeicherte Dampfvorrat bei erhöhter Belastung zu Ende geht oder bei geringerem Bedarf der Speicher schon fast bis zum vollen Fassungsvermögen aufgeladen ist. Je nach dem Speichersystem ist der Ladezustand durch den Speicherdruck (Gefällespeicher) oder den Wasserstand des Heißwassers (Gleichdruckspeicher) gekennzeichnet. Wird, wie beim Verdrängungsspeicher, heißes und kaltes Wasser im selben Behälter gespeichert, so ist die Lage des Temperatursprunges maßgebend, also statt der Wasserstandanzeige die Temperaturmessung nötig. Die Instrumente zur Anzeige des Ladezustandes werden im Kesselhaus aufgestellt und möglichst gut sichtbar gemacht, damit die Änderung der Feuerführung rechtzeitig und allmählich erfolgen kann.

Zur Anzeige des Speicherdruckes werden vergrößerte Feder-
manometer mit Kennzeichnung der Grenzlagen des Ladezustandes
angebracht. Daneben sind normale Meßinstrumente direkt am Speicher
vorhanden, die außer dem Druck im Speicher selbst noch den Dampf-
druck in den anschließenden Leitungen angeben. — Die Messung des

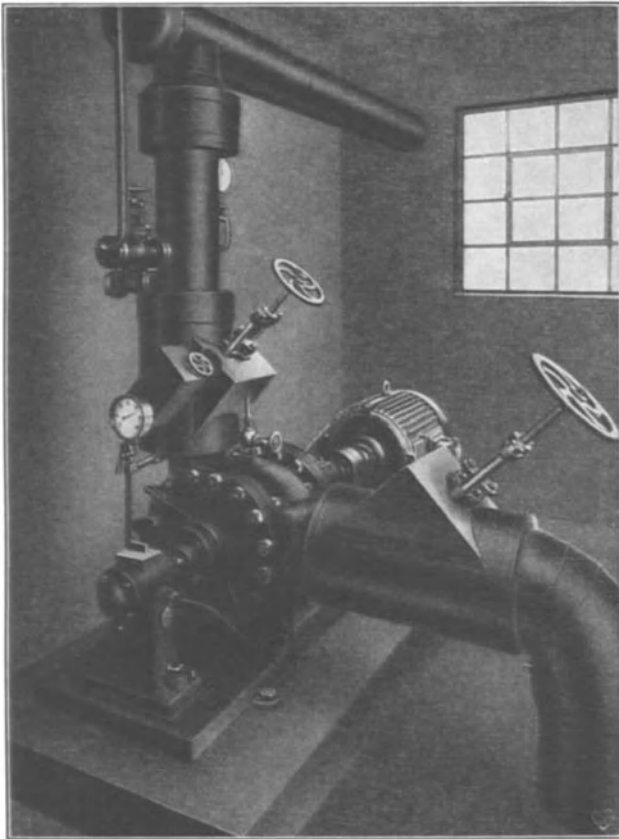


Abb. 19. Umwälzpumpe für Kieselbach-Gleichdruckspeicher (Kiwa, Essen).

Wasserstandes kann meist durch einfache Wasserstandgläser er-
folgen. Da beim Gefällespeicher die Höhe des Wasserspiegels mit dem
Druck in festem Zusammenhang stehen muß, wird nach Ruths gleich-
zeitig eine zweite Skala angebracht, die den jeweiligen Soll-Speicher-
druck angibt. Stimmt dieser mit der Manometeranzeige nicht überein,
so ist der Wasserinhalt durch Nachspeisen oder Ablassen zu regulieren.
Dadurch wird erreicht, daß der volle Raum ausgenutzt werden kann,
ohne daß ein zu hoher Wasserstand bei vollständiger Füllung zu befürch-

ten ist. Zur Fernanzeige bei größeren Anlagen werden Meßvorrichtungen auf hydrostatischer Grundlage (9) verwendet (Igamma), die das Gewicht der veränderlichen Wassersäule mit einer konstanten von gleichem Druck vergleichen, indem die Wassersäulen auf die beiden Schenkel eines Quecksilber-Differentialmanometer einwirken. Bei der Anordnung (besonders für stehende Behälter) ist zu beachten, daß die Rohrleitung im Innern gelegt werden muß, um eine stets richtige Anzeige zu erhalten.

Von ähnlicher Bedeutung ist auch die laufende Beobachtung der Temperatur, die gewöhnlich durch einfache Glasthermometer durchgeführt wird. Bei Verdrängungs-Gleichdruckspeichern müssen die Meßstellen über die ganze Höhe reichen, um die Verteilung des fast unveränderten Wasserinhaltes auf heißes und kaltes Wasser jederzeit zu kennen. Um gleichzeitig die Fernanzeige im Kesselhaus möglich zu machen, wird die elektrische Temperaturmessung benutzt und zwar mit Widerstandsthermometern oder Thermoelementen, die in Abständen von etwa 1 m über die ganze Speicherhöhe angebracht werden. Der Temperaturunterschied zwischen heiß und kalt beträgt etwa 60 bis 100° C und kann deutlich erkennbar gemacht werden, indem z. B. den einzelnen Meßstellen zugeordnete Glühlampen bei der Temperatur des Heißwassers aufleuchten.

Die Umwälzung der Wassermengen zwischen getrennten Teilen der Speicheranlage wird durch Pumpen durchgeführt, soweit nicht durch Schwerkraft oder Überdruck eine selbsttätige Antriebskraft verfügbar ist. Die Beförderung des Heißwassers macht besondere Ausbildung der Stopfbüchsen nötig, um ein dauerndes Dichthalten zu sichern. Abb. 19 gibt die für den Kieselbach-Gleichdruckspeicher ausgeführte Umwälzpumpe wieder (52), die den gesamten Speicherbetrieb aufrecht erhält, indem sie den Austausch von Heißwasser zwischen Kessel und Speicher versorgt.

4. Regeleinrichtung.

Die Regelung bildet in Dampfspeicheranlagen einen getrennten Aufgabenkreis, der zur eigentlichen Speicherung noch den selbsttätigen zweckentsprechenden Einsatz in den Dampftrieb hinzuzügt. In den meisten Fällen würde der Handbetrieb die Wirksamkeit der Anlage auf einen Bruchteil herabsetzen, da die dauernde Einhaltung der günstigsten Betriebsbedingungen, wie z. B. des unveränderten Kesseldruckes ohne Regeleinrichtungen nicht möglich ist. Andererseits hat die selbsttätige Regelung, zum Teil von der Dampfspeicherung ausgehend, sich immer stärker im Dampftrieb durchgesetzt, so daß heute für die verschiedensten Aufgaben der Erzeugung und Verteilung der benötigten Dampfmenge Regler vorgesehen werden, deren einwandfreies Zusammenarbeiten nicht ohne weiteres zu erreichen ist.

Bei den hier betrachteten Anwendungsfällen handelt es sich immer darum, die fortgeleiteten Mengen an Dampf oder Wasser durch Betätigung von Ventilen so einzustellen, daß ein bestimmter Zustand im Speicher oder in den Leitungsnetzen eingehalten wird. Abweichungen vom festgelegten Normalwert (Druck, Temperatur, Wasserstand) entstehen, sobald das Gleichgewicht zwischen benötigten und angelieferten

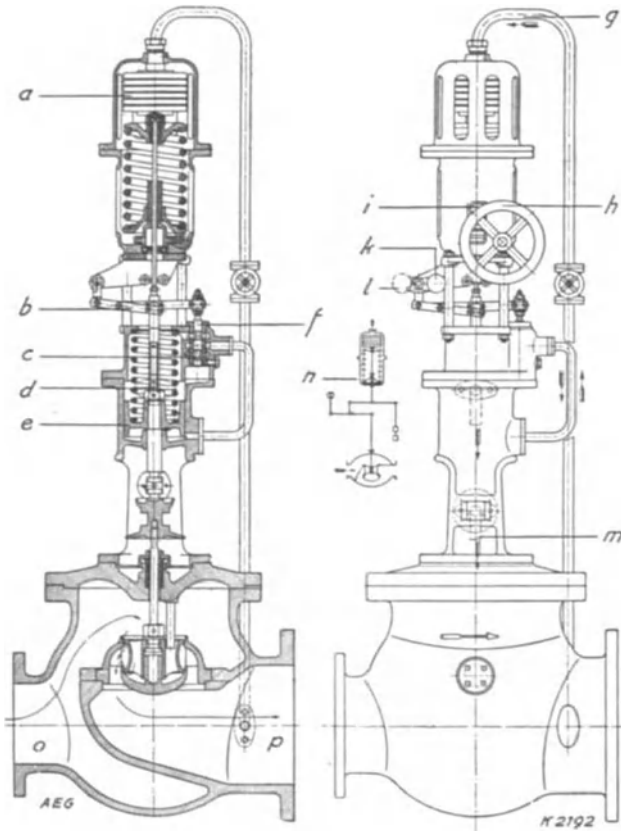


Abb. 20. Aufbau des AEG-Druckreglers.

Mengen gestört wird und können daher zur Rückwirkung auf die Einstellung des Zu- oder Abflusses benutzt werden (Regelimpuls). Da die verfügbare Arbeitsfähigkeit zur Bewegung größerer Ventile nicht mehr ausreichend ist, wird meist eine Übersetzung des Regelimpuls durch Einschaltung eines Kraftgetriebes (Servomotor) erforderlich. Der Regelimpuls wirkt dabei zunächst auf den Druck des Steueröls, indem der Öldurchfluß durch verschiedenerlei Vorrichtungen mehr oder weniger abgedrosselt wird. Das Steueröl betätigt dann je nach dem eingestellten

Druck das regelnde Ventil. Mit dieser mittelbaren Regelung wird eine verstärkte Wirkung erzielt, andererseits aber keine eindeutige Ventiltbewegung erreicht. Erst durch Anordnung einer Rückführung wird durch die Stellung des Ventils die Wirkung des Kraftgetriebes wieder aufgehoben, sobald die durchfließende Menge den erforderlichen Wert erreicht hat.

Den Aufbau eines Dampfdruckreglers kann man am Beispiel der von der AEG ausgeführten Bauart (43) erkennen (Abb. 20). Der von der geregelten Dampfleitung p abgenommene Druckimpuls g wirkt auf eine Membran a , die über ein Gestänge zunächst den Regel-

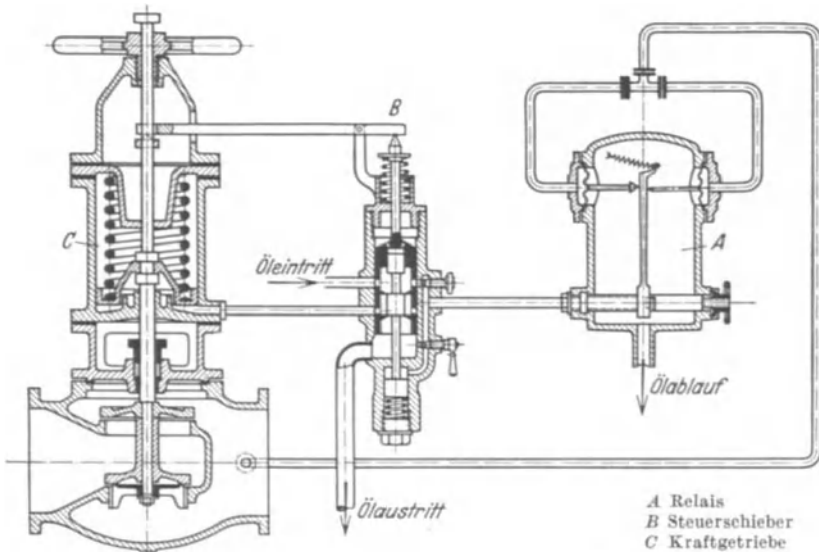


Abb. 21. Aufbau des AVA-Druckreglers (Schumann, Leipzig).

schieber f so bewegt, daß die zum Steuerkolben e fließende Ölmenge sich verändert. Dadurch drückt das Steueröl mit einer etwas anderen Kraft gegen den Druck einer Feder auf den Kolben und bewegt den Ventilteller. Durch die Stellung der Spindel und ein Übersetzungsgestänge b wirkt die Bewegung auf den Regelschieber im umgekehrten Sinn zurück, so daß der Regelvorgang beendet ist, wenn nicht von neuem eine Impulsänderung auftritt. — Die Ausführung des AVA-Druckreglers zeigt Abb. 21.

Für die Anwendung der Druckregelung kommen zwei grundsätzliche Fälle in Betracht, die in Abb. 22 schematisch dargestellt sind:

1. Als Reduzierventil öffnet der Regler mit fallendem Druck (Zeichen \ominus).

2. Als Überströmventil öffnet der Regler mit steigendem Druck (Zeichen \oplus).

Im gewöhnlichen Fall wird der Überströmimpuls (Abb. 22b) vom Netz entnommen, dessen Abfluß durch den Regler beherrscht wird, so daß das Öffnen bei steigendem Druck durch vermehrten Abfluß den Druck wieder herabzusetzen strebt und umgekehrt der sinkende Druck durch das schließende Ventil wirkt. Das Reduzierventil (Abb. 22a) regelt ähnlich den Zufluß zum angeschlossenen Netz. Durch mittelbare Schaltung der Regler kann aber auch jeder andere Impuls benutzt werden, sobald genügend Regelorgane vorhanden sind. — Sollen zweierlei Impulse auf ein Ventil wirken, um in den beiden verbundenen Netzen den Druck konstant zu halten, so kann das nur in der Weise geschehen, daß innerhalb eines bestimmten Druckbereiches des zweiten Netzes, das Ventil vom Druck des ersten Netzes geregelt wird. Sobald jedoch die Grenzen des Bereichs überschritten werden, wird die Regelung ausschließlich vom Druck des zweiten Netzes übernommen (Grenzbereichregelung, Abb. 22c). Dabei kann der Grenzimpuls sowohl Überström- als auch Reduzierwirkung haben und entweder die obere oder untere Grenze allein, als auch beide Grenzen festlegen. Im einzelnen werden die Schaltungen der Regler an Dampfspeicheranlagen bei den einzelnen Systemen behandelt.

Durch die Zusammenarbeit von Dampfspeichern und Kraftmaschinen ergibt sich die Notwendigkeit, die verbindenden Leitungen sowohl vom Dampfdruck als auch von der Maschinendrehzahl zu regeln, um das Gleichgewicht der Dampfmen gen und Leistungen einzuhalten. Insbesondere für Gegendruck- und Anzapfturbinen, ebenso wie für Zweidru ckturbinen, sind Steuerungen ausgebildet worden, durch die die Wirkung von Druck- und Drehzahlregler auf die Dampfzuführung verbunden wird. Dabei kann diese Verbindung sowohl durch Gestänge als durch Steueröl hergestellt werden. Auch die Steuerung

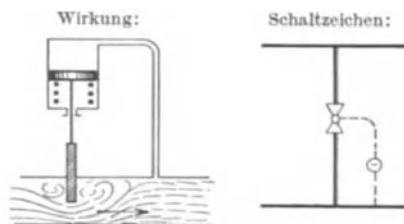


Abb. 22a. Reduzierventil.

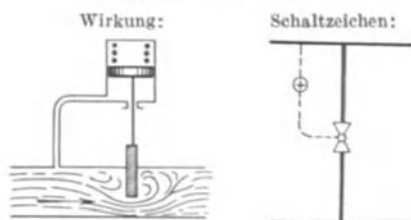


Abb. 22b. Überströmventil.

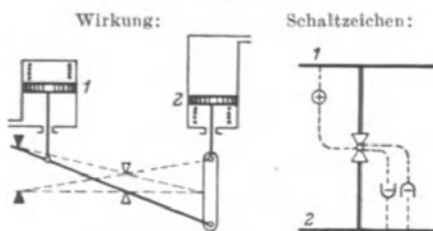


Abb. 22c. Überströmventil mit Grenzbereichregelung.

Abb. 22a bis c. Wirkungsarten der Druckregler (nach Stein).

der Speicherturbinen (s. S. 61), die den Dampf von Gefällespeichern verarbeiten, kann von der Drehzahl und durch einen Reduzierimpuls vom Kesseldruck beeinflusst werden, wodurch das Absinken des Druckes in der Kesselleitung durch Entladung des Speichers in die Speicherturbine verhindert werden kann.

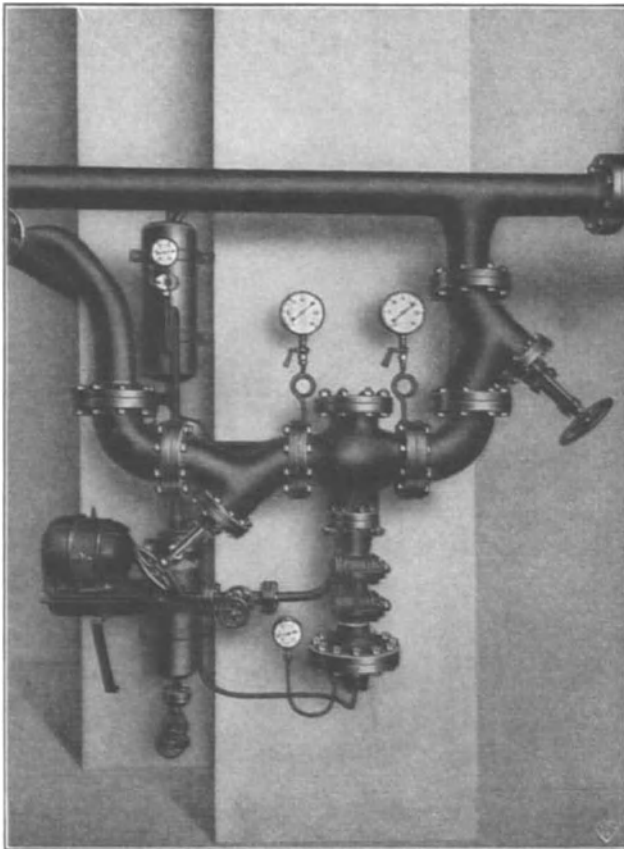


Abb. 23. Speisewasserregler für Kieselbach-Gleichdruckspeicher (Kiwa, Essen).

Neben der Regelung der Dampfverteilung ist vor allem noch die selbsttätige Beeinflussung der Speisewassermengen für den Einsatz der Speicheranlagen von Bedeutung. Dabei kann entweder die Leistung von dampfangetriebenen Speisepumpen durch ein Ventil in der Dampfführung verändert oder die Wassermenge durch ein Ventil in der Speiselleitung beeinflusst werden. Für den Betrieb des Kieselbach-Gleichdruckspeichers wurde ein einfacher Regler ausgebildet, der durch den Kesseldruck beeinflusst wird (Abb. 23). Für kleinere Anlagen kann die

Betätigung ohne Zwischenschaltung eines Kraftgetriebes erfolgen. — Schließlich ist noch die Einhaltung eines bestimmten Wasserstandes im Kessel oder Speicher wichtig; wobei die Regelung des Speisewassers durch Schwimmer bewirkt wird, indem bei absinkendem Wasserspiegel die zugeführten Wassermengen vergrößert werden.

Die Schaltung der Regler ist von der Wirkungsweise des Dampfspeichers abhängig und soll mit der Einordnung in die gesamte Dampf-anlage behandelt werden.

IV. Unmittelbare Dampfspeicher.

Für die Durchführung der unmittelbaren Dampfspeicherung ergeben sich zwei grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten:

1. Der Rauminhalt des Speicherbehälters bleibt unverändert (Raumspeicher).

2. Der Dampfdruck im Speicher bleibt unverändert (Glockenspeicher).

Der Raumspeicher stellt die primitivste Form der Dampfspeicherung dar, bei der überschüssige Dampfmen gen von einem unveränderlichen Speicher-raum aufgenommen werden können. Die Vermehrung des im Speicher enthaltenen Dampfge-wichts hat eine Drucksteigerung zur Folge, die sich entsprechend dem verkleinerten spezifischen Volumen einstellt. Es handelt sich also um die gleiche Speicher-wirkung, die in jedem Dampf-raum auftritt, sobald die zu- und abgeführten Mengen nicht übereinstimmen; z. B. in Kesseln und in Rohrleitungen, die in ihrer gesamten Ausdehnung ein beträchtliches Speichervolumen bilden können. Dampfsammler und Pufferbehälter dienen zur Erweiterung des vorhandenen Rohrleitungs-volumen. Die Druckveränderungen gehen in gleicher Weise auf sie über, so daß als speicherndes Volumen der Inhalt von Rohrleitung und Sammelbehälter gemeinsam zu betrachten ist.

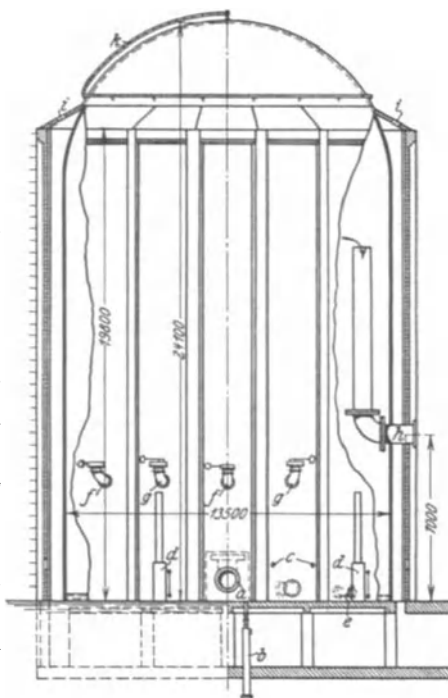


Abb. 24. Aufbau des Raumspeichers,
Bauart Estner-Ladewig.

Raumspeicher von größeren Ausmaßen wurden zur Speicherung von ungleichmäßig anfallendem Abdampf ausgeführt. Durch die zweckmäßige Ausrüstung, besonders nach der Bauart Estner-Ladewig (51), konnten sie vor Auftreten des Gefällespeichers weitgehende Anwendung finden. Den Aufbau solcher Raumspeicher, die bis zu 3000 m³ Volumen erhielten, zeigt Abb. 24. Bei einer Höhe bis 22 m wurden

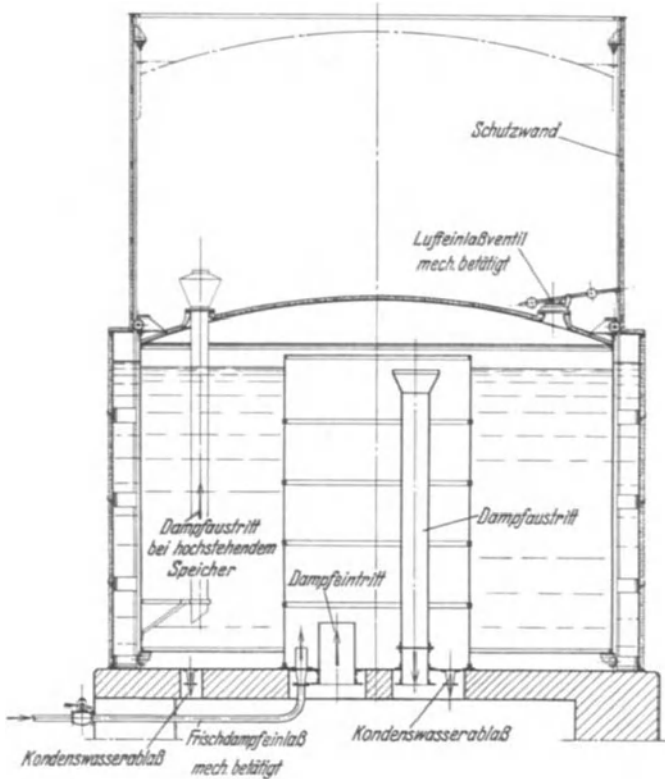


Abb. 25. Aufbau des Glockenspeichers, Bauart Harlé-Balcke.

Durchmesser von 8 bis 14 m gebaut. Da der Speicherdruck meist nur höchstens 0,2 atü beträgt, konnten Blechstärken von 7 bis 9 mm angewandt werden. Zur Sicherheit des Betriebes sind Ventile *g* vorhanden, die bei Überschreiten der Druckgrenzen zur Wirkung kommen.

Um zu verhindern, daß durch die Kondensation der Abdampfturbine im Speicher ein Unterdruck hervorgerufen wird, ist eine Sicherheitsvorrichtung *e* am Speicher, die die Entladeleitung *h* unmittelbar mit der Außenluft verbindet, sobald in dieser ein Unterdruck auftritt. — Die Luftschicht zwischen Blechmantel und Mauerwerk wirkt als Wärmeschutz. Durch diesen Zwischenraum können die Abgase der Kessel-

anlage geleitet werden, wodurch der Speicherdampf eine gewisse Überhitzung erhält. Man erreichte auf diese Weise Temperaturen bis fast 150° bei nur 2 bis 3 mm W. S. Zugverlust.

Um den beim Betrieb mit Raumspeicher auftretenden Druckabfall zu vermeiden, wurde (im Anschluß an die Gasspeicherung) der Glockenspeicher ausgebildet (8). Die auf Wasser schwimmende Glocke wird bei Zufuhr von Dampf gehoben und kann bis zur obersten Grenzlage ein bestimmtes Dampfvolumen aufnehmen. Es handelt sich also hierbei um einfaches Hinzufügen und Ableiten des gespeicherten Dampfes ohne irgendwelche Änderungen.

Abb. 25 zeigt den Aufbau eines Glockenspeichers nach Harlé-Balcke. Die Höhe des

Dampfdruckes wird durch Sicherheits- bzw. Luftzufuhrventile eingehalten. Die Abkühlungsverluste sind größer als beim Raumspeicher, da kein Wärmeschutz vorhanden ist.

Die Anwendung der unmittelbaren Dampfspeicher ist infolge des niedrigen Speicherdrucks auf die Abdampfspeicherung beschränkt. Die

z. B. hinter Förder- oder Walzenzugmaschinen auftretenden kurzzeitigen Schwankungen können durch sie ausgeglichen werden, so daß der Abdampf gleichmäßig in Abdampfturbinen oder zu Heizzwecken ausgenutzt werden kann. Jedoch ist infolge der im Vergleich zu Heißwasser nur sehr geringen spezifischen Speicherfähigkeit ein vielfach größeres Volumen als bei der mittelbaren Speicherung nötig; seit deren Auftreten hat daher die unmittelbare Dampfspeicherung immer mehr an Bedeutung verloren.

Die Berechnung der Speicherfähigkeit kann sowohl für Raumspeicher als auch für Glockenspeicher direkt vom spezifischen Gewicht der im Speicher enthaltenen Dampfmenge ausgehen. Dabei sind für den Raumspeicher die im zugelassenen Druckbereich eintretenden Änderungen im spezifischen Gewicht maßgebend, für den Glockenspeicher der absolute Betrag des spezifischen Gewichts. — Die bei der Ladung des Raumspeichers auftretende Verdichtung erfolgt

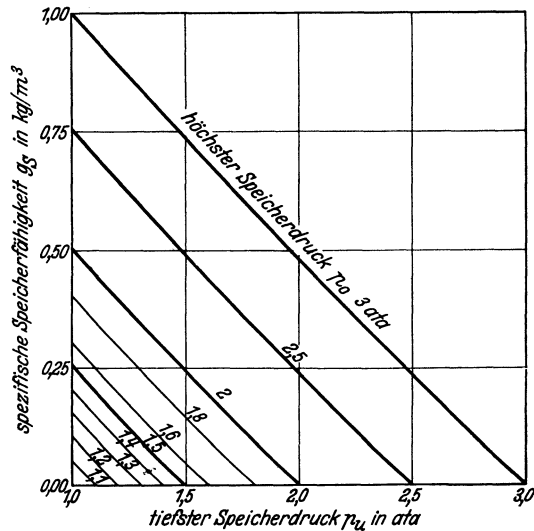


Abb. 26. Spezifische Speicherfähigkeit von Raumspeichern.

ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, so daß also mit der adiabatischen Zustandsänderung auch der Druckverlauf im Speicher gegeben ist. Am einfachsten läßt sich daher die spezifische Speicherfähigkeit mit Hilfe des *is*-Diagramms bestimmen, indem man die Zunahme des spezifischen Volumens bei der Druckabsenkung bis zum niedrigsten Wert feststellt. In Abb. 26 ist die Speicherfähigkeit für verschiedene Dampfdrücke (Satttdampf) beim voll geladenen Speicher abhängig vom niedrigsten Speicherdruck aufgetragen. Die je Raumeinheit gespeicherten Dampfmen gen sind sehr klein, so daß dadurch größte Speicher-

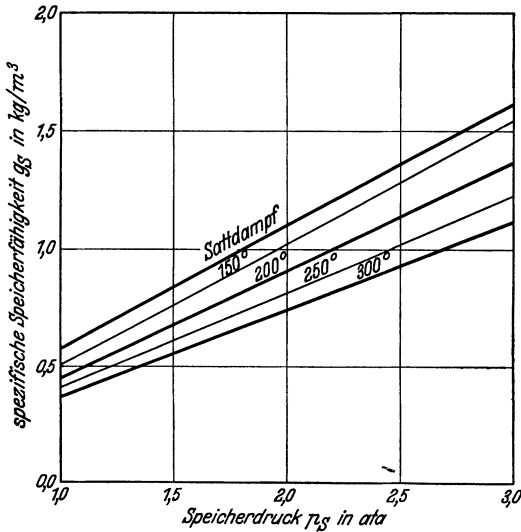


Abb. 27. Spezifische Speicherfähigkeit von Glockenspeichern.

behälter notwendig werden, um auch nur kurzzeitig einen Ausgleich zu erzielen.

Die Speicherfähigkeit des Glockenspeichers ist gleich dem spezifischen Gewicht des gespeicherten Dampfes. In Abb. 27 ist sie für den in Betracht kommenden Druckbereich bei verschiedenen Temperaturen aufgezichnet. Man erhält bei Drücken bis 3 ata bedeutend höhere Werte als beim Raumspeicher, besonders wenn bei diesem nur ein sehr kleiner Druck-

abfall zulässig ist. Dennoch sind auch beim Glockenspeicher unvergleichlich größere Behälter nötig, als bei der mittelbaren Speicherung.

V. Gefällespeicher.

1. Prinzip der Gefälle-Dampfspeicherung.

Die Überlegenheit, die andere Stoffe als Träger der Wärmespeicherung gegenüber dem Wasserdampf besitzen, führt zur mittelbaren Dampfspeicherung. Als Speicherstoff wird infolge der großen spezifischen Wärme und des vereinfachten Speichervorgangs fast ausschließlich Wasser gewählt. Wird der Speichervorgang getrennt von der Dampferzeugung des Kessels durchgeführt, so muß er nach dem Gefälleprinzip vor sich gehen. Die im Wasser gespeicherte Wärme kann (bei der Entladung) nur dadurch zur Dampfbildung ausgenutzt werden, daß die gesamte Verdampfungswärme dem Wasserinhalt des

Speichers entzogen wird. Mit der hierbei eintretenden Abkühlung ist eine Druckabsenkung im Speicher verbunden, so daß mit fortschreitender Entladung also der entwickelte Dampf mit immer niedrigerem Druck abgegeben wird.

Damit stellt sich die Wirkungsweise des Gefällespeichers folgendermaßen dar: Die bei der Ladung dem Speicher zugeführten Dampfmenngen werden mit dem Wasserinhalt in möglichst innige Berührung gebracht, um die beim Kondensieren des Dampfes freiwerdende Wärme gleichmäßig auf das gesamte Wasser zu verteilen. Mit der Erwärmung des Wassers steigt der Speicherdruck an, der sich bei richtig durchgeführter Ladung immer auf den Sättigungsdruck einstellt. Es können also Wärme und Wasser gemeinsam gespeichert werden, solange man Wasser als Speicherstoff beibehält. Zur speichernden Wassermenge kommt das Dampfkondensat hinzu und wirkt bei der weiteren Ladung als Speicherstoff. — Die Entladung wird durch Abströmen von Dampf aus dem Dampfraum eingeleitet, wodurch der Druck im Speicher etwas absinkt. Da die Wassertemperatur damit über dem Sättigungswert liegt, beginnt der Wasserinhalt aufzukochen, so daß immer die abströmende Dampfmenge nachverdampft wird.

Der Zusammenhang zwischen den gespeicherten Dampfmenngen und den Veränderungen des Speicherzustandes ergibt sich aus der Wärmebilanz des Speichervorgangs, also aus der Gleichsetzung der aufgenommenen oder abgegebenen Dampfwärme mit der Veränderung des Wärmeinhalts des Wassers. Bei der Entladung nimmt das Gewicht des Wasserinhalts von G_1 auf G_2 (kg) ab, der Wärmeinhalt geht von q_1 auf q_2 (kcal/kg) herunter, während der entwickelte Dampf die Verdampfungswärme r (kcal/kg) aufnimmt. Es muß also die Grundgleichung

$$G_1 \cdot q_1 - G_2 \cdot q_2 = (G_1 - G_2) r$$

gelten. Da sich mit der Temperatur die spezifische Wärme des Wassers c_w und die Verdampfungswärme r verändern, kann der Zusammenhang nur für unendlich kleine Vorgänge beibehalten werden, sobald die Abhängigkeit von der Speichertemperatur gesucht wird. Man erhält dann

$$G \cdot dq = r \cdot dG$$

und kann hieraus die Größe der entwickelten Dampfmenge bestimmen.

$$dG = G \cdot \frac{dq}{r},$$

die sich mit bekannten thermodynamischen Beziehungen umformen läßt

$$\frac{dG}{G} = \frac{ds'}{r/T}.$$

Diese Gleichung kann nicht integriert werden, da der Zusammenhang der Größen nicht durch eine Gleichung ausdrückbar ist. Zur Bestim-

mung der spezifischen Speicherfähigkeit je Raumeinheit des Wasserinhalts g_s wurde die Integration (von Knopf) graphisch durchgeführt (13). Das Ergebnis ist in Abb. 41 wiedergegeben. Dabei ist mit dem spezifischen Gewicht des Wassers γ'_1 am Beginn der Entladung

$$g_s = \gamma'_1 \cdot \frac{G_1 - G_2}{G_1} = G_1 \left[1 - e^{\int_1^2 \frac{ds'}{\gamma/T}} \right].$$

Aus dem Gleichgewicht der Wärme- und Wassermengen lassen sich damit sämtliche Vorgänge im Speicher berechnen.

2. Aufbau der Speicheranlage.

Die physikalischen Grundlagen der Gefällespeicherung lassen der technischen Durchführung einen weiten Bereich von Möglichkeiten. Als kennzeichnendes Prinzip konnte die Umwandlung der gespeicherten Wärme in Dampf unter Erniedrigung des Druckes und der Temperatur des gesamten Speicherinhaltes aufgestellt werden. Die Verdampfungswärme wird vom Speicher selbst abgegeben, so daß die Entladung unabhängig vom Kessel an jeder Stelle der Dampfanlage erfolgen kann. Abgesehen von dem Gewicht des niedergeschlagenen Dampfes bleibt die Menge des speichernden Wassers gleich, während sich mit der Temperatur der Wärmeinhalt verändert. Das dazu nötige Wärmegefälle beansprucht einen Teil des gesamten Gefälles vom Kessel- auf Kondensatordruck. Für die Art der Ladung, also der Wiedererwärmung des abgekühlten Speicherinhaltes, wird durch das Gefälleprinzip zunächst keine Begrenzung gezogen. Ebenso wie die Kondensation des Dampfes durch Einleiten in das Speicherwasser (Ruths), kann die Vorwärmung des Wassers durch Berührung mit dem zu kondensierenden Dampf (Rateau) angewandt werden. Als weitere Fälle sind die Umwälzung des Speicherinhaltes durch besondere Vorwärmer oder die Überleitung von heißem Kesselwasser in den Speicher in ähnlicher Weise wie beim Gleichdruckspeicher denkbar.

Unter den praktisch ausgeführten Arten des Gefällespeichers spielt die von Ruths ausgebildete Form die weitaus größte Rolle¹. Auf dem bereits bekannten Speicherprinzip aufbauend, hat er die Weiterentwicklung zum zuverlässigen Betriebsmittel durch Einführung zahlreicher Einzelheiten und Ausarbeitung der verschiedenartigsten Schaltungen (für besondere Industrien, Speicherturbinen usw.), erreicht. Daher ist als Ruths-Gefällespeicher im folgenden die sich insgesamt

¹ Dampfspeicher nach den Patenten von Ruths werden ausgeführt von: Ruths G. m. b. H., Berlin — AEG, Berlin — MAN, Nürnberg — SSW, Berlin. Von diesen Firmen wurden mehrere der folgenden Abbildungen zur Verfügung gestellt.

entwickelte Bauart zu verstehen. — Daneben ist die Bedeutung des ursprünglichen Rateau-Gefällespeichers begrenzt auf die Speicherung von kurzzeitigen Schwankungen im Abdampf, also auf ein Druckgebiet bis etwa 2 ata; während der Ruths-Gefällespeicher Kesseldampf bis zu 20 ata in größten Mengen aufspeichern kann. Die Grenze ist zwischen diesen beiden Ausführungsarten deutlich und eindeutig gezogen.

Im normalen Anwendungsfall wird der Ruths-Gefällespeicher in die Verbindung zweier geregelter Dampfnetze von verschiedenem Druck eingeschaltet. Das Hochdrucknetz wird durch ein Überströmventil in der Weise geregelt, daß bei Überschuß an Dampf (also steigendem Druck) der Abfluß in die Verbindungsleitung geöffnet wird. Im Niederdrucknetz wird der Druck konstant gehalten, indem ein Reduzierventil die zufließende Menge bei Dampf mangel (fallendem Druck) vergrößert. Besteht zwischen den eingestellten Mengen der beiden Ventile kein Gleichgewicht, so muß der Speicher den Ausgleich herbeiführen. Dies kann, wie die Schaltbilder in Abb. 28 zeigen, auf zweierlei Arten geschehen, die für die Speicherung grundsätzlich verschiedene Bedingungen schaffen:

1. Wird nur der Unterschied zwischen den Dampf m engen, die von den beiden Reglern eingestellt werden, durch den Speicher geführt, so handelt es sich um Parallelschaltung des Speichers zur direkten Verbindung der Netze. Fließt durch beide Regler dieselbe Dampfmenge, so greift der Speicher selbst nicht ein. Erst wenn der Überschuß im Hochdrucknetz den Bedarf im Niederdrucknetz übersteigt, wird der restliche Dampf in den Speicher geleitet (Ladung) oder bei ungenügendem Anfall an Dampf eine zusätzliche Menge aus dem Speicher entnommen (Entladung).

2. Dagegen wird bei der Reihenschaltung der gesamte Dampfzufluß vom Hochdruck- zum Niederdrucknetz durch den Speicher hindurchgeleitet, unabhängig von dem Verhältnis von Dampf anfall und -bedarf. Die vom Überströmventil abgeleitete Dampfmenge wird vollständig in den Speicher geladen, dem gleichzeitig stets so viel entladen wird, als zur Deckung des Bedarfes erforderlich ist. Die Leitungen müssen also für eine viel größere Leistung bemessen werden, ebenso

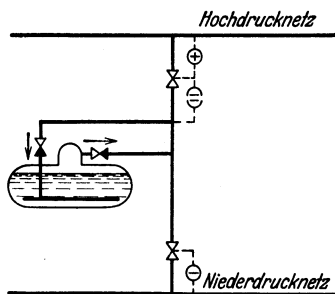


Abb. 28a. Parallelschaltung.

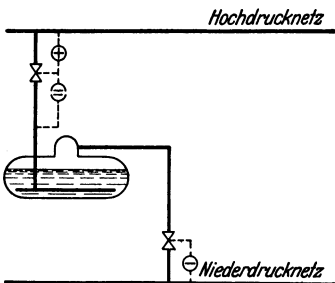


Abb. 28b. Reihenschaltung.

Abb. 28a und b. Schaltungen des Ruths-Gefällespeichers.

der Verdampfungsraum im Speicher. Benutzt wird daher diese Art von Schaltung nur, wenn der Speicher auch noch zur Heißdampfkühlung dienen soll, da der entladene Dampf immer in trocken gesättigtem Zustand entladen wird.

In beiden Fällen erhält das Überströmventil noch Grenzbereichimpulse, damit die Druckgrenzen des Speichers eingehalten werden können. Unabhängig vom Einfluß des Kesseldruckes wird das Ventil geschlossen, sobald der höchste Betriebsdruck im Speicher erreicht wird. Umgekehrt öffnet der untere Grenzimpuls das Überströmventil, wenn (bei vollständig entladem Speicher) der Druck im Niederdrucknetz abzusinken droht.

Der Speicher wird in liegender oder stehender Bauart ausgeführt. Den Aufbau der ersteren zeigt Abb. 29. Der zylinderförmige Behälter erhält gewöhnlich einen Dampfdom und halbkugelförmige Böden. Der Raum wird fast vollständig vom Wasserinhalt ausgefüllt, und zwar wird nur ein so großer Dampfraum übriggelassen, daß im geladenen Zustand eine einwandfreie Verdampfung gesichert ist (90 bis 95% Wasserfüllung). Die Ladeeinrichtung besteht aus dem Verteilungsrohr und den angeschlossenen Düsenkörpern, die den einströmenden Dampf über die ganze Speicherlänge verteilen. Durch Umlaufrohre wird ein ständiges Umwälzen der ganzen Wassermenge bewirkt (s. S. 28). Der Behälter wird samt Dom und Auflagerung mit Wärmeschutz umgeben.

An Armaturen werden am Speicher selbst Sicherheits-, Belüftungs- und Abschlammentile angebracht. Um die Sicherheitsventile nicht für die höchste Kesselleistung bemessen zu müssen, kann durch Einfügen einer Begrenzungsdüse in die Ladeleitung die abzuführende Dampfmenge auf den Höchstwert der Ladung begrenzt werden. Allerdings ergeben sich bei der oben beschriebenen Parallelschaltung dennoch oft Querschnitte, die 3 und mehr Sicherheitsventile erfordern. — Um die entladene Dampfmenge auf einen Wert zu beschränken, der ohne Überkochen von der verdampfenden Wasseroberfläche abgegeben werden kann, wird vor die Entladeleitung (meist im Dom) eine gleiche Lavalldüse (Begrenzungsdüse) angeordnet. Diese sichert auch bei Rohrleitungsschäden u. ä. den Speicher vor explosionsartiger Entladung. Außer den Absperrorganen, die besonders beim Gefällespeicher einen möglichst geringen Druckabfall haben sollen, sind noch Rückschlagventile in die Zu- und Ableitung einzuschalten, sobald die Strömungsrichtung des Dampfes sich gegebenenfalls umkehren kann. So werden z. B. bei Anlagen mit mehreren Einheiten, die an je einer gemeinsamen Lade- und Entladeleitung angeschlossen sind, in jedem Abzweig Rückschlagventile angebracht, damit bei Druckunterschieden zwischen den einzelnen Speichern keine ausgleichenden Dampf- bzw. Wasserströmungen auftreten können. Häufig wird auch eine gemeinsame Leitung

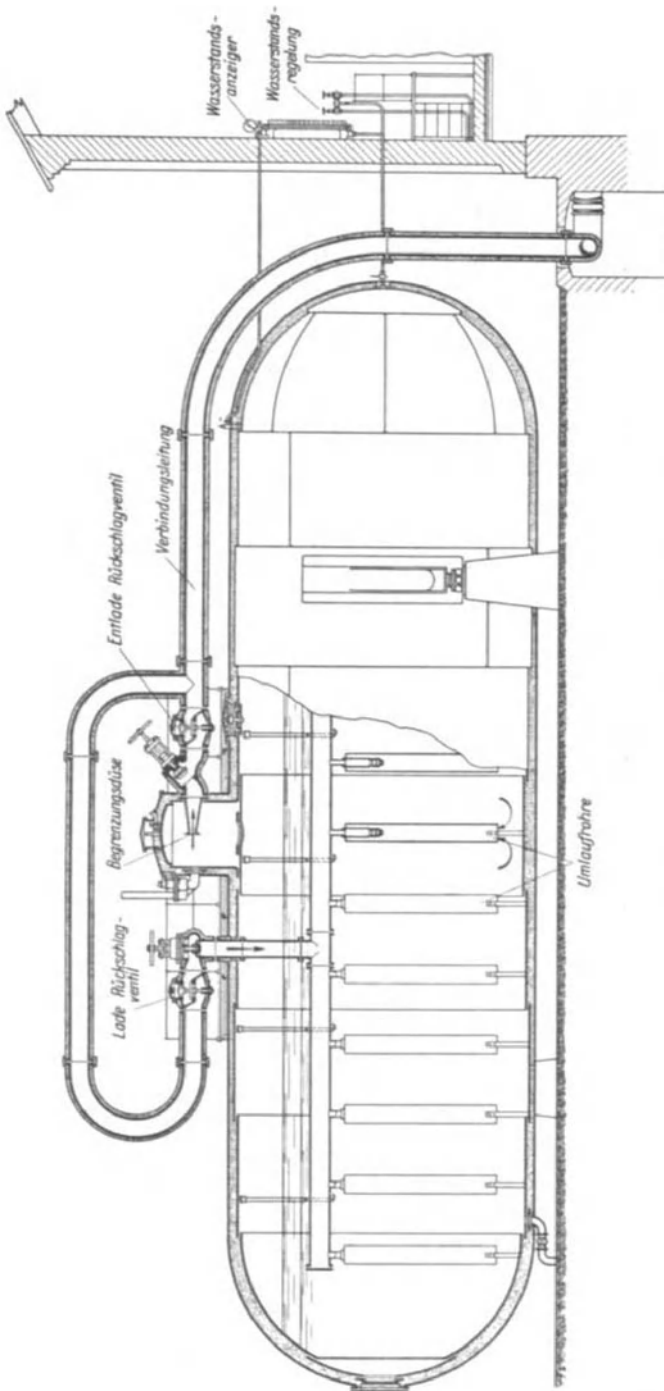


Abb. 29. Aufbau des Ruths-Gefällespeichers. Liegende Bauart.

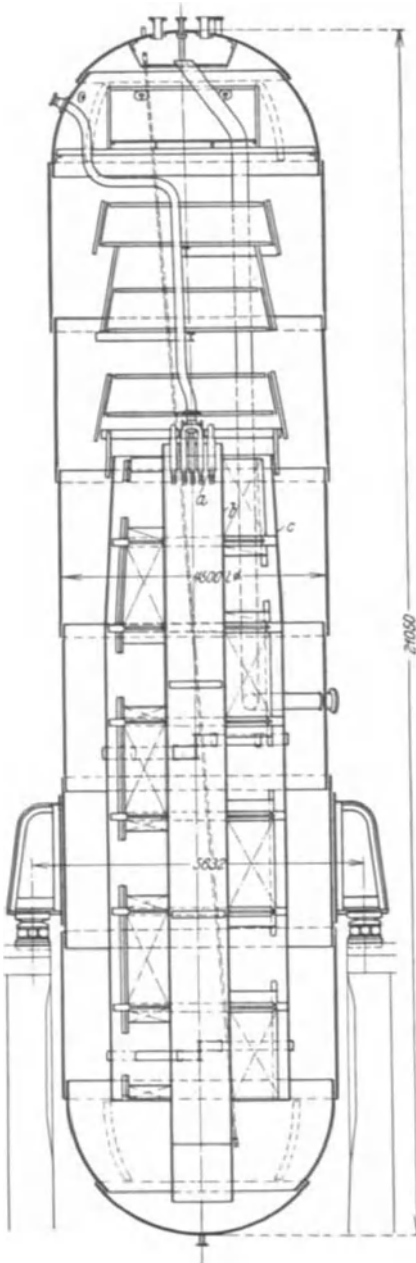


Abb. 30. Aufbau des Ruths-Gefällespeichers.
Stehende Bauart.

zur Ladung und Entladung benutzt, was nur durch Rückschlagventile ermöglicht wird. — Meßinstrumente für Druck, Temperatur und Wasserstand werden zur Überwachung des Betriebes vorgesehen; wobei besonders das Speichermanometer im Kesselhaus wichtig ist, da die Feuerung der Kessel nach dem Speicherzustand eingestellt werden muß.

Die stehende Bauart wurde erst in den letzten Jahren für Ruths-Gefällespeicher angewandt, um vor allem bei den beschränkten Platzverhältnissen in Kraftwerken größere Anlagen unterbringen zu können. Sowohl auf die Lade- und Entladevorgänge als auch auf die Anordnung der Vorrichtungen, Armaturen u. ä. ist die Änderung der Lage von Einfluß (s. Abb. 30). Der Wasserinhalt hat bei vielfacher Höhe nur eine geringere Verdampfungsoberfläche; so daß einerseits ein zusätzlicher Druckverlust ($0,1 \text{ at/m}$) durch die Wassersäule entsteht, andererseits nur eine kleinere Entladeleistung erreicht werden kann. Um die Beanspruchung der Verdampfungsoberfläche erhöhen zu können, sind Einbauten mit Erfolg verwendet worden, die aus einem weiten Rohr *c* mit aufgesetztem konischen Teil und mehreren darüber befindlichen konischen Rohrstücken bestehen. Die bei der Entladung gebildeten Dampfblasen werden im konischen Teil zusammengedrängt, so daß mehr Wasser verdrängt wird als außerhalb des Rohres. Durch das dadurch herabgesetzte spezifische Gewicht des Wassers im Entladerohr

entsteht eine dauernde Umwälzung, die eine gleichmäßige Teilnahme aller Wasserschichten bewirkt. — Für die Ladung sind die Düsen-

körper *a* vereinigt in der Mitte angeordnet und von einem gemeinsamen Umlaufrohr *b* umgeben.

Die Speicher werden möglichst nahe am Kesselhaus meist im Freien aufgestellt, wie die Ansicht ausgeführter Anlagen in Abb. 31 zeigt. Die Abb. 31 b gibt die bisher größte Dampfspeicheranlage im Elektrizitätswerk Charlottenburg wieder, die aus 16 Einheiten je $312,5 \text{ m}^3$ besteht und für eine Speicherfähigkeit von etwa 600 t Dampf bemessen ist.

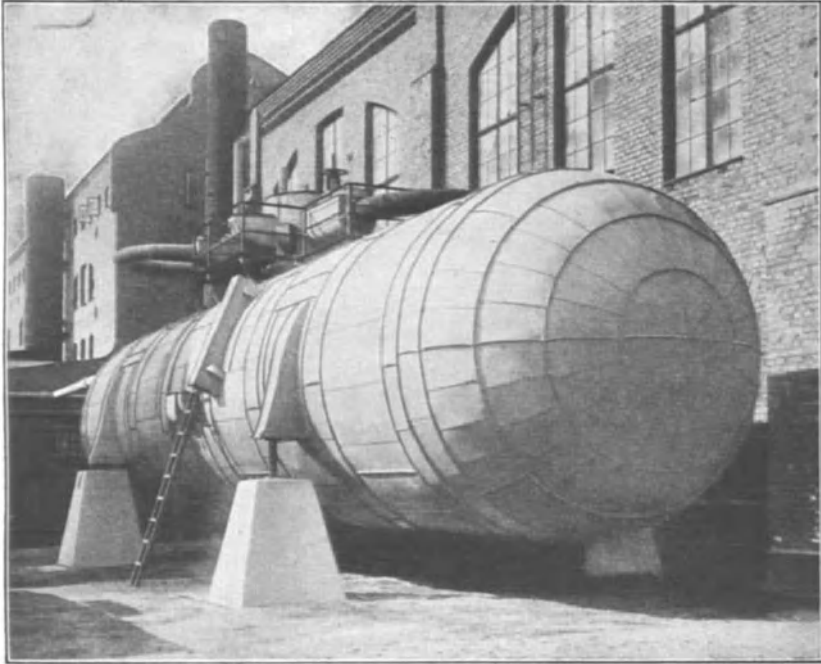


Abb. 31a. Liegende Bauart.

Abb. 31a und b. Ansicht des Ruths-Gefällespeichers.

Der Gefällespeicher von Rateau, der die erste praktische Verwertung des Gefälleprinzips darstellt, hat einen begrenzten Anwendungsbereich, da er von vornherein zur Speicherung von Abdampf bei niedrigen Drücken gedacht war. Seine Schaltung zeigt Abb. 32. Die schwankend anfallenden Abdampfmengen von dampfangetriebenen Fördermaschinen, Dampfhämmern u. ä. werden unter geringer Druckerhöhung (auf 1,1 bis 1,2 ata) im Speicher aufgenommen und können gleichmäßig an Abdampfturbinen oder Heizedampfverbraucher abgegeben werden. Regelorgane werden nicht angeordnet, da das kleine verfügbare Druckgefälle (0,1 bis 0,2 at) sonst noch mehr beschränkt würde. Das Speichervolumen wird daher, bezogen auf die gespeicherte Dampfmenge, sehr

groß, doch muß für die kurzen Speicherperioden von nur wenigen Minuten Dauer auch die Speicherfähigkeit nur auf einen geringen Betrag festgesetzt werden.

Der Rateau-Gefällespeicher wird in zwei verschiedenen Ausführungen gebaut; bei der ursprünglichen Form als Schalenspeicher ist der Wasserinhalt auf zahlreiche eiserne Wassertassen verteilt, die in einem stehenden Behälter untergebracht sind. Jedoch wird der Vorteil eines

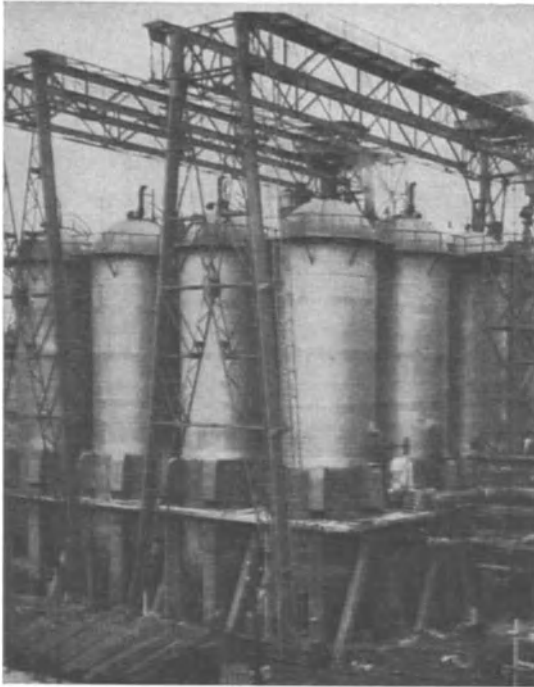


Abb. 31b. Stehende Bauart.

Abb. 31 a und b. Ansicht des Ruths-Gefällespeichers.

guten Wärmeaustausches zwischen Dampf und Wasser durch hohe Herstellungskosten erkauft, so daß heute nur noch der in Abb. 33 dargestellte Großwasserraumspeicher gebaut wird. Der liegende Speicherbehälter ist horizontal unterteilt, so daß zwei getrennte Wasserräume entstehen, in die durch mehrere Laderohre der Dampf eingeleitet wird. Hierdurch wird der Druckverlust infolge der über den Öffnungen liegenden Wassersäule verkleinert. Die Laderohre sind an je einer gegenüberliegenden Seite mit Bohrungen versehen, so daß nur immer in einem Zwischenraum Dampf

hochströmt, wodurch ein Wasserumlauf erzielt werden kann. Die Dampfräume sind miteinander verbunden; der entladene Dampf strömt durch einen gemeinsamen Dom ab. — Im übrigen wird der Rateau-Gefällespeicher, ähnlich wie bei der oben beschriebenen Ausführung von Ruths mit den nötigen Armaturen versehen; der Abdampf der Kolbenmaschinen muß durch einen mechanischen Entöler geführt werden, bevor er in den Speicher geladen werden kann.

Da der Gefällespeicher stets Sattdampf abgibt, sind verschiedene Vorschläge zur nachträglichen Überhitzung gemacht worden, um besonders bei Verwendung von Speicherdampf zur Krafterzeugung das

ein Teil seiner Überhitzungswärme entzogen, indem das Speicherwasser (um insgesamt etwa 10°C) erwärmt wird. Der vom Gefällespeicher abgegebene Satttdampf, dessen Druck zwischen 10 und 7 at schwankt, kann im Mittel von 175 auf 215°C überhitzt werden. Der Überhitzungsspeicher wirkt dabei selbst nach dem Gefälleprinzip in einem höheren Druckgebiet, das infolge der stärkeren Blechstärken und der geringeren spezifischen Wärmespeicherung ungünstig ist. Daher ist der praktische Wert selbst bei angeschlossenen Kraftmaschinen nicht ausreichend, um die Kosten des Überhitzungsspeichers zu rechtfertigen.

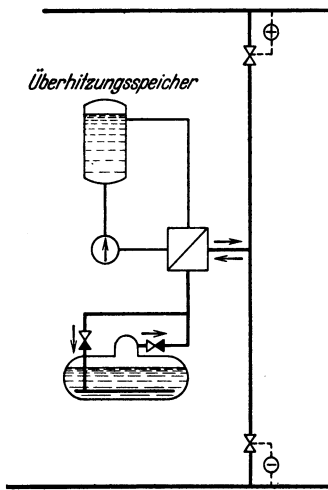


Abb. 34. Anordnung eines Überhitzungsspeichers.

3. Einordnung in die Dampfanlage.

Durch das Prinzip der Gefällespeicherung ist die Veränderung des Speicherdrucks innerhalb der gewählten Druckgrenzen bedingt. Für die Einordnung des Speichers in die gesamte Dampfanlage ist daher ausschlaggebend, ob die angeschlossenen Netze und Verbraucher an den Druckschwankungen teilnehmen sollen oder ob ihr Druck unverändert gehalten werden muß. Gewöhnlich wird gerade die ausgleichende Wirkung der Speicheranlage benutzt, um bei den Dampfverbrauchern konstante Drücke einhalten zu können. Zwischen dem Speicher und den angeschlossenen Dampfnetzen müssen also Regelventile eingeschaltet werden, die einerseits den Druck des in den Speicher geladenen Dampfes vom konstanten Druck des Ladenetzes auf den jeweiligen Speicherdruck abdrosseln und andererseits bei der Entladung vom Speicherdruck weiter auf den unveränderlichen Wert des Entladenetzes.

Da mithin das gesamte Druckgefälle zwischen den Netzen, in deren Bereich der Speicher wirkt, bei den durch den Speicher geleiteten Dampfmenen verlorenggeht, das verfügbare Druckgefälle aber auch die notwendige Speichergröße bestimmt, wird die Frage der Einschaltung beim Gefällespeicher entscheidend.

Die zweite Möglichkeit der Verbindung mit Netzen, die an den Druckschwankungen teilnehmen, ergibt sich zunächst beim Rateau-Gefällespeicher, bei dem der geringe Druckabfall, der für die Speicherung des Abdampfes verfügbar ist, die Zwischenschaltung von Regelorganen unmöglich macht. Aber auch beim Zusammenarbeiten des Ruths-Gefällespeichers mit Speicherturbinen wird der entladene Dampf mit dem gerade im Speicher herrschenden Druck den Turbinen

zugeführt. Da die Speicherturbinen für die Verarbeitung des Dampfes von wechselndem Druck eingerichtet sind (s. S. 70), ist die Drosselung auf einen unveränderlichen Druck nicht erforderlich. Wird der Gefällespeicher mit Gegendruckdampf einer Vorschaltturbine geladen, so braucht auch bei der Ladung kein Druckregler zwischengeschaltet zu werden, wenn der Gegendruck dauernd gleich dem Speicherdruck sein kann. In diesem besonderen Fall kann die Gefällespeicherung also ohne Verlust an Druck- und Wärmegefälle durchgeführt werden.

Je nach der Art des Dampfverbrauches lassen sich 3 getrennte Gruppen von Dampfanlagen unterscheiden, in denen für die Einschaltung des Gefällespeichers grundsätzlich verschiedene Bedingungen vorliegen:

1. reiner Heizdampfbedarf,
2. gleichzeitig Heizdampf- und Kraftbedarf,
3. reiner Kraftbedarf.

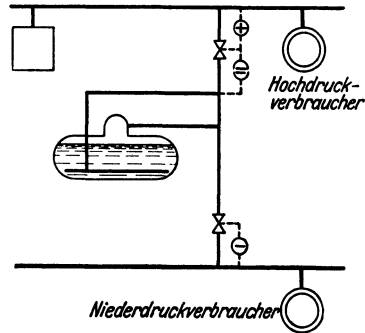


Abb. 35. Einschaltung des Gefällespeichers bei reinem Heizdampfverbrauch.

1. Sind nur Heizdampfverbraucher angeschlossen, so ergibt sich der einfachste Fall der Gefällespeicherschaltungen, sobald Dampf von mindestens zwei verschiedenen Druckstufen benötigt wird (s. Abb. 35).

Für die Versorgung der Niederdruckverbraucher muß der vom Kessel gelieferte Dampf in jedem Fall reduziert werden, daher kann der Gefällespeicher ohne weiteres in die Verbindung beider Netze geschaltet werden. Dadurch können nicht nur die Bedarfsschwankungen der Niederdruckverbraucher ausgeglichen werden, sondern der Ausgleich kann sich auch indirekt auf das Hochdrucknetz erstrecken. Ist beispielsweise der Bedarf an Niederdruckdampf dauernd gleichmäßig, an Hochdruckdampf dagegen schwankend, wie in Abb. 36 dargestellt, dann fließt bei niedriger Belastung der Überschuß an Dampf durch das Überströmventil vom Hochdrucknetz ab und

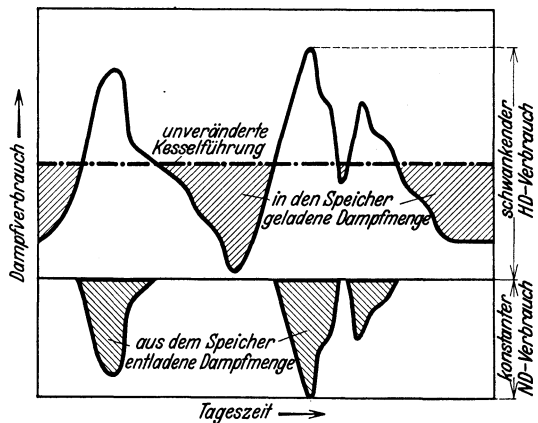


Abb. 36. Indirekte Ausgleichswirkung des Gefällespeichers.

werden, sondern der Ausgleich kann sich auch indirekt auf das Hochdrucknetz erstrecken. Ist beispielsweise der Bedarf an Niederdruckdampf dauernd gleichmäßig, an Hochdruckdampf dagegen schwankend, wie in Abb. 36 dargestellt, dann fließt bei niedriger Belastung der Überschuß an Dampf durch das Überströmventil vom Hochdrucknetz ab und

wird vom Speicher aufgenommen. Sobald der Bedarf der Hochdruckverbraucher den Mittelwert überschreitet, wird der Speicher entladen und versorgt die Niederdruckverbraucher. Daher muß weniger Dampf reduziert werden und es steht ein größerer Anteil der Kesselleistung im Hochdrucknetz zur Verfügung. Im Grenzfall kann zeitweise der gesamte Bedarf an Niederdruckdampf vom Speicher gedeckt werden, so daß für die Leistungsspitzen der Hochdruckverbraucher die volle Kesselleistung eingesetzt werden kann.

Ist der Druckbereich für einen wirksamen Ausgleich nicht ausreichend oder arbeiten alle Verbraucher mit demselben Dampfdruck, so kann es zweckmäßig sein, die Druckgrenzen zu erweitern. In vielen Fällen kann der Druck bei den Verbrauchern erheblich gesenkt werden, ohne

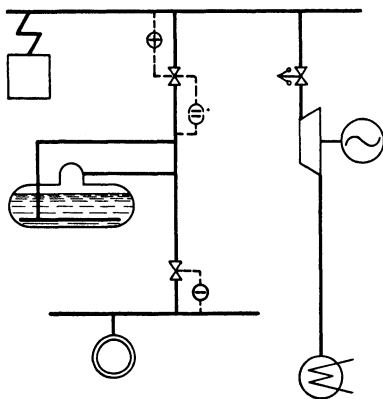


Abb. 37. Gefällespeicher in Anlagen mit Heizdampfverbrauchern und Kondensationsmaschine.

daß Nachteile für den Arbeitsvorgang auftreten. Da durch Ausgleich der Bedarfsschwankungen die Veränderungen des Kesseldrucks beseitigt werden, kann damit der niedrigere Verbraucherdruck dauernd eingehalten werden.

2. In Dampfanlagen, die gleichzeitig Dampf zu Heizzwecken und zur Krafterzeugung liefern, sind gewöhnlich mindestens zwei Netze vorhanden, zwischen die der Gefällespeicher geschaltet werden kann. Wird die Kraft in Kondensationsmaschinen erzeugt (Abb. 37), so treten noch keine Unterschiede

gegenüber den oben dargelegten Verhältnissen bei Verbrauchern mit zweierlei Druckstufen auf. Die Schwankungen im Kraftbedarf können in derselben Weise (indirekt) ausgeglichen werden wie dort bei den Hochdruckverbrauchern. Die Drosselung des Druckes bei der Speicherung hat keinen Einfluß auf die Krafterzeugung.

Mit der Einschaltung des Gefällespeichers in Anlagen mit Gegendruckbetrieb wird dagegen die Frage wichtig, wie das zur Speicherung gewählte Druckgefälle gewählt werden muß, um die Leistungsausbeute möglichst wenig zu beeinträchtigen. Soll ein gegebenes Druckgefälle zwischen Kessel und Heizdampfverbraucher für Krafterzeugung und Speicherung gemeinsam ausgenutzt werden, so sind zweierlei Anordnungen möglich, die in Abb. 38 gegenübergestellt sind:

1. Der Speicher arbeitet parallel zur Gegendruckmaschine (Abb. 38a), deren Gegendruck gleich dem Druck der Heizdampfverbraucher sein kann. Man kann also das ganze Wärmegefälle ausnutzen,

aber nicht für die ganze Dampfmenge, da der gespeicherte Dampf ohne Leistungserzeugung im Speicher reduziert wird.

2. Der Speicher wird hinter die Gegendruckmaschine geschaltet (Abb. 38b), so daß ihr Gegendruck um die Druckspanne des Speichers heraufgesetzt und das Wärmegefälle dementsprechend verkleinert wird. Dagegen kann die gesamte Dampfmenge durch die Gegendruckmaschine geführt werden. Um nicht einen zu großen Anteil der Leistung zu verlieren, wird das Druckgefälle zur Speicherung so klein als möglich gehalten, wodurch andererseits ein größeres Speichervolumen nötig wird.

Auf diese beiden prinzipiellen Arten des Zusammenarbeitens von Gefällespeicher und Gegendruckmaschine lassen sich die praktisch vorliegenden Fälle zurückführen, die je nach der Industrie und Größenordnung des Werkes eine große Mannigfaltigkeit im Aufbau aufweisen. Gewöhnlich liegen die Verhältnisse dadurch für die Speicherung günstiger, daß die einzelnen Netze mit festgelegten Drücken vorliegen und nicht immer die vollständige Ausnutzung in vorgeschalteten Gegendruckteilen günstig ist. Besonders bei kleineren Druckspannen wird auf die Ausbildung von mehreren Anzapfnetzen verzichtet und durch reduzierten Dampf vom nächsthöheren Druck der Bedarf der übrigen Verbraucher gedeckt. Außerdem muß der schwankende Verlauf der Dampfmen gen berücksichtigt werden, die auf keinen Fall bis zur Höchstleistung wirtschaftlich im Gegendruckbetrieb auszunutzen sind. Die Anlagekosten der Kraftmaschinen gestatten meist nur die Bemessung für den Mittelwert der Leistung. Die darüber hinaus benötigten Dampfmen gen werden an der Gegendruckmaschine vorbeigeführt, so daß auch hierbei die Einschaltung des Gefällespeichers ohne Leistungsverlust erfolgen kann.

Sind mehrere ausgebildete Dampfnetze vorhanden, so z. B. durch eine Zweifach-Anzapfturbine wie in Abb. 39 dargestellt, so ist

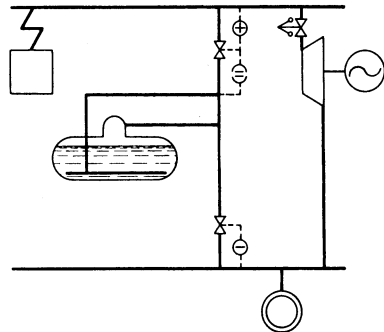


Abb. 38a. Speicher parallel zur Gegendruckmaschine.

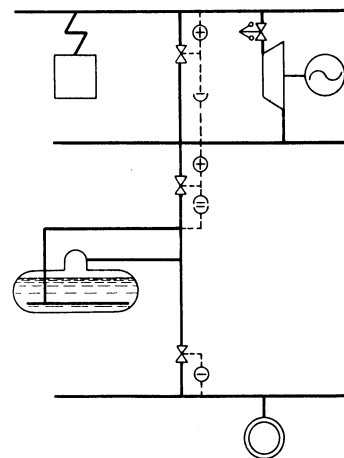


Abb. 38b. Speicher in Reihe mit Gegendruckmaschine.

Abb. 38a und b. Gefällespeicher in Anlagen mit Gegendruckbetrieb.

die günstigste Druckspanne für die Speicherung zu wählen. Möglich ist entweder die Einschaltung a) zwischen Hoch- und Mitteldruck (Abb. 39a) oder b) zwischen Mittel- und Niederdruck (Abb. 39b) oder c) über den ganzen Bereich zwischen Hoch- und Niederdruck (Abb. 39c). Die größte Speicherkapazität, also das kleinste Volumen, ergibt sich natürlich bei Schaltung über den ganzen Druckbereich. Andererseits wird durch Beschränkung auf das Gefälle zwischen Mittel- und Niederdrucknetz der Speicherdruck niedriger. Die Kosten der Speicheranlage sind meist bei dieser Schaltung am kleinsten, die ferner den Vorzug hat, daß

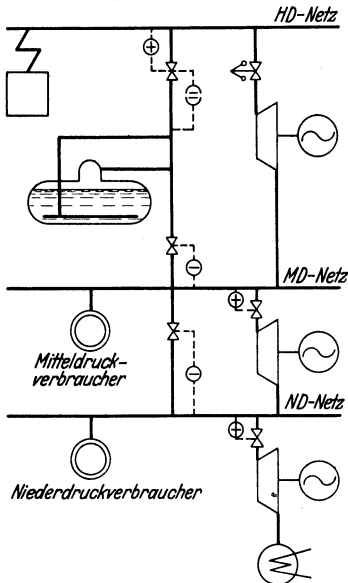


Abb. 39a. Speicher zwischen Hoch- und Mitteldrucknetz.

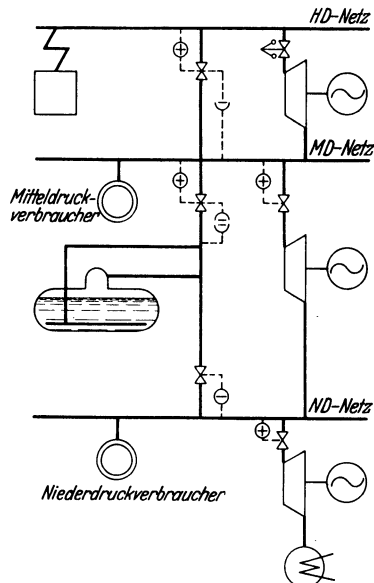


Abb. 39b. Speicher zwischen Mittel- und Niederdrucknetz.

Abb. 39a bis c. Gefällespeicher in Anlagen mit Doppel-Anzapfturbine.

im Hochdruckteil der Maschine der gesamte Dampf ausgenutzt werden kann. Die Schaltung parallel zum Hochdruckteil wird nur dann benutzt, wenn durch direkte Entladung des Speichers die Bedarfsschwankungen des Mitteldrucknetzes ausgeglichen werden sollen. Dafür wird ein bedeutend größerer Speicher als bei der erstgenannten Schaltung mit demselben Betriebsdruck nötig. Sind beispielsweise 3 ausgebildete Ver-

Schaltung	Speicherdruck atü	Speichervolumen m ³ je 1000 kg	Verlust an adiabat. Wärmegefälle kcal/kg
a	10	17,3	39,5
b	4	17,7	39
c	10	9,1	78,5

brauchernetze vorhanden, mit Drücken von 10, 4 und 1 atü, so ergeben sich die nebenstehenden Werte.

Die Schaltung der Regelventile und der

Kraftmaschinensteuerung läßt sich den besonderen Bedingungen, unter welchen die Anlage zu arbeiten hat, anpassen. Grundsätzlich läßt sich jeder Regler von jedem beliebigen Netz aus steuern, doch wird praktisch möglichst die direkte Beeinflussung der Regler durch das von ihnen beherrschte Netz durchgeführt. Die Kraftmaschinenregler sind so einzustellen, daß für die benötigte Leistung zunächst der gesamte Heizdampf ausgenutzt wird und der Kondensationsteil nur für den darüberliegenden Leistungsbedarf einzugreifen braucht. Wirkt der Druck eines Netzes im gleichen Sinn auf zwei Regler gleichzeitig ein, z. B. durch Überströmimpuls auf die Durchflußmenge durch einen Gegendruckteil und ein Regelventil, so werden die Drücke so gewählt, daß die Regler nacheinander eingreifen. (Beispiele für ausgeführte Schaltungen siehe S. 116 ff.)

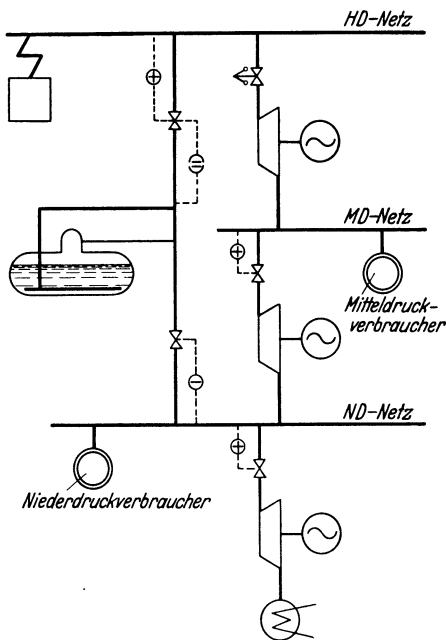


Abb. 39c. Speicher zwischen Hoch- und Niederdrucknetz.

3. Bei der Einschaltung in Anlagen, die ausschließlich zur Krafterzeugung dienen, kann der Speicherdampf in derselben Weise wie bei Heizdampfverbrauchern durch ein Reduzierventil auf einen konstanten Druck gehalten werden. Jedoch wird meist die Drosselung im Regelventil vermieden, indem der Entladedampf in besonders dafür bemessenen Speicherturbinen verarbeitet wird.

Die prinzipielle Schaltung zeigt Abb. 40. Ein Überströmventil läßt den von den Kesseln überschüssig erzeugten Dampf bei niedriger Belastung zum Speicher strömen. Steigt die Belastung an, so öffnet man zuerst die Steuerung der Frischdampfturbinen, bis diese voll belastet sind. Nur bei weiter ansteigendem Bedarf wird durch den Geschwindigkeitsregler der Speicherturbine die Zufuhr von Speicherdampf zugelassen. Die

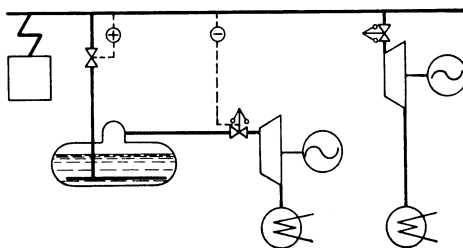


Abb. 40. Gefällespeicher in Kraftanlagen.

Nur bei weiter ansteigendem Bedarf wird durch den Geschwindigkeitsregler der Speicherturbine die Zufuhr von Speicherdampf zugelassen. Die

Entladung des Speichers kann weiterhin durch einen Druckimpuls an der Steuerung der Speicherturbine eingesetzt werden, sobald der Kessel-
druck unter den Normalwert absinkt. Dadurch wird erreicht, daß bei
raschem Anstieg der Belastung immer zunächst die Mehrleistung aus
Speicherampf gedeckt wird und die Kesselleistung erst allmählich
gesteigert werden muß.

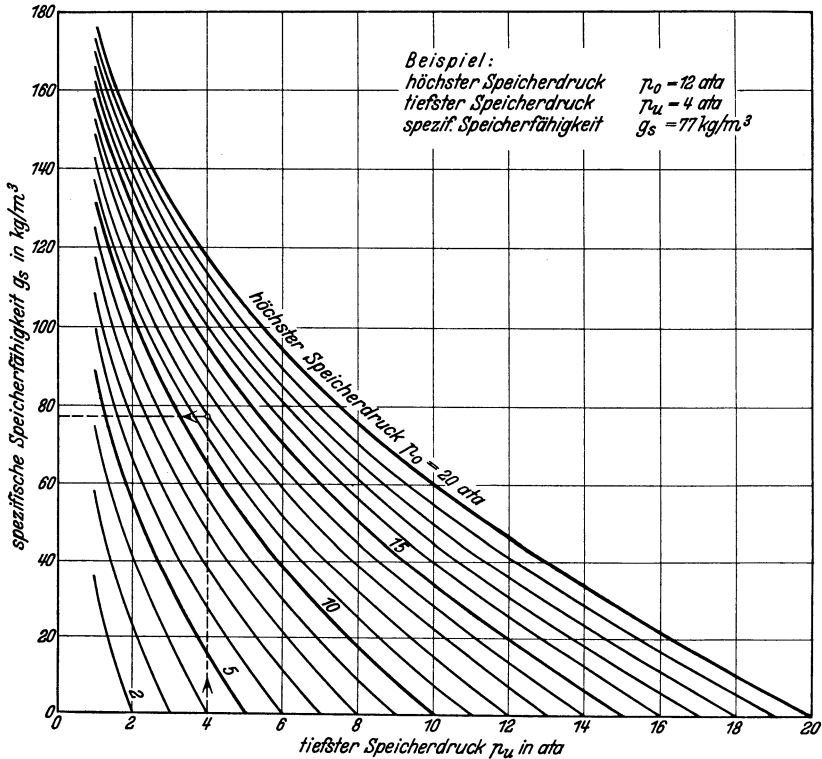


Abb. 41. Spezifische Speicherfähigkeit von Gefällespeichern, abhängig vom tiefsten Speicherdruck.

4. Berechnung der Speicherwirkung.

Die grundlegenden Zusammenhänge zwischen den bestimmenden Größen am Speicher wurden bereits abgeleitet. Sie können in etwas geänderter Form zur Berechnung aller Eigenschaften und Vorgänge benutzt werden. So wurde für die Bestimmung der spezifischen Speicherfähigkeit ein Diagramm (Abb. 41) aufgezeichnet, das diese abhängig von den Druckgrenzen angibt.

Die spezifische Speicherfähigkeit g_s gibt diejenige Dampfmenge in kg an, die von 1 m^3 wirksamen Speichervolumen (also Speicherwasserinhalt) bei Druckabsenkung vom höchsten Speicherdruck p_o

auf den niedrigsten p_u entladen werden kann. Ist durch die Schaltung in eine bestehende Anlage der höchste Speicherdruck durch den Druck des Ladenetzes z. B. mit 12 ata gegeben, während der niedrigste Druck durch Entladung in verschiedene Verbrauchernetze gewählt werden kann, so zeigt unmittelbar die Kurve für 12 ata die erzielbaren Dampfmen- gen an. Man bekommt etwa für die Entladung bis

6	4	2 ata niedrigsten Speicherdruck,
52	77	114 kg/m ³ Speicherfähigkeit.

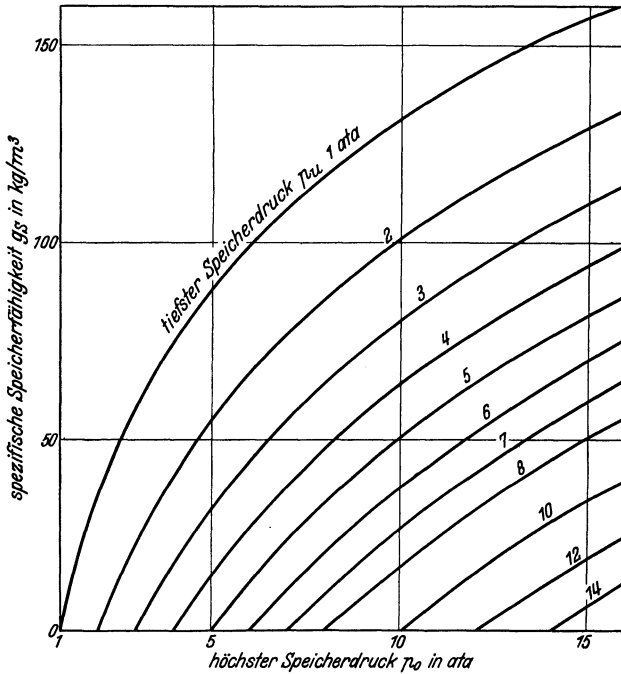


Abb. 42. Spezifische Speicherfähigkeit von Gefällespeichern, abhängig vom höchsten Speicherdruck.

Für die Berechnung der Speicherturbinen interessiert nicht nur die insgesamt entladene Dampfmenge, vielmehr hängt die erzielbare Leistung noch von dem zugehörigen Dampfdruck ab. Die Entladekurve für den höchsten Speicherdruck gibt dann unmittelbar an, welchen Druck der Speicherdampf jeweils besitzt.

Wählt man den niedrigsten Speicherdruck p_u als Parameter der Kurvenschar, so zeigen die einzelnen Kurven (Abb. 42) die Speicherfähigkeit bei veränderlicher oberer Druckgrenze p_o . Muß der entladene Speicherdampf einen bestimmten Druck von z. B. 3 ata aufweisen, während der Speicher in einem gewissen Bereich beliebig hoch

geladen werden kann, so ergibt sich die Zunahme der Speicherfähigkeit unmittelbar aus dem Verlauf der Kurve.

$$\begin{array}{cccc} p_0 = & 6 & 10 & 15 & 20 \text{ ata,} \\ g_s = & 45 & 81 & 110 & 131 \text{ kg/m}^3. \end{array}$$

Während im Gebiet niedrigerer Drücke die Erweiterung des Druckbereiches eine starke Vergrößerung der Speicherfähigkeit herbeiführt, kann durch die Erhöhung über etwa 12 bis 15 ata nur noch wenig mehr Dampf gespeichert werden. Der Gewinn an Speicherfähigkeit wird also beim Gefällespeicher (für bestimmten Druck des

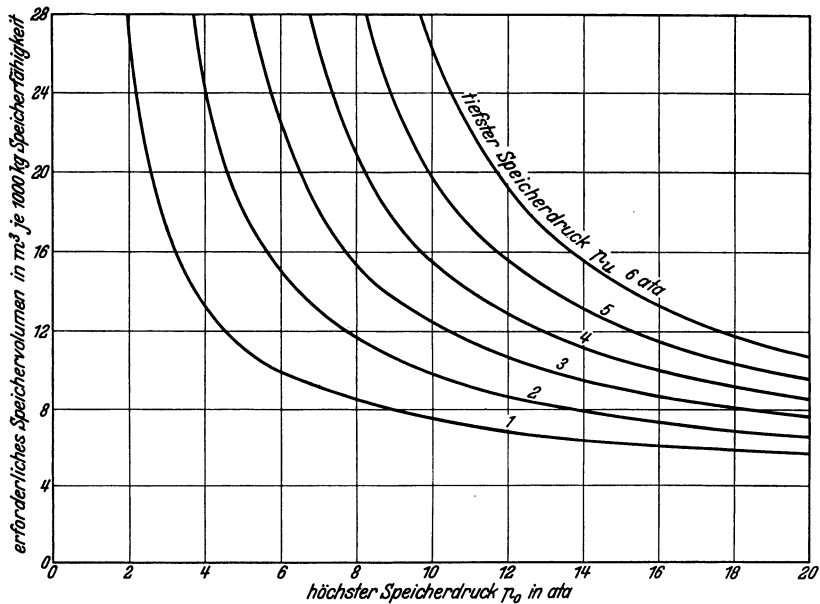


Abb. 43a. Erforderliches Speichervolumen für 1000 kg Speicherfähigkeit.

entladenen Dampfes) durch höheren Speicherdruck erzielt, so daß dem verkleinerten Speichervolumen die größeren Blechstärken gegenübergestellt werden müssen. Für eine gegebene Dampfmenge von beispielsweise 1000 kg sind die Rauminhalte bei veränderlichem Speicherdruck in Abb. 43a berechnet, wodurch man ein anschauliches Bild vom Einfluß des Speicherdruckes erhält. Ein Maß für die Kosten des Speichers ergibt sich jedoch erst durch Berücksichtigung des Speicherdruckes, am besten angenähert aus dem Produkt von Druck mal Volumen. Diese Kurven („Druckvolumen“) wurden in Abb. 43b eingezeichnet und lassen ein deutliches Minimum erkennen, das als wirtschaftlichster Speicherdruck bezeichnet werden kann. Jedoch gibt der flache Verlauf, also das geringe Ansteigen der Kosten, die

Möglichkeit, den Speicherdruck den vorhandenen Dampfnetzen anzupassen.

Die Leistungsfähigkeit des Gefällespeichers, also die je Zeiteinheit entladene Dampfmenge, ist durch seine Wirkungsweise nicht begrenzt. Sie kann unabhängig von der Kesselleistung nach dem augenblicklichen Dampfbedarf eingestellt werden. Eine praktisch auftretende Grenze stellt die zulässige Verdampfung im Speicher dar, über die hinaus der Dampf nicht mehr trocken bleibt. In gewissen Anwendungsfällen muß der Speicher in kurzer Zeit entladen werden oder

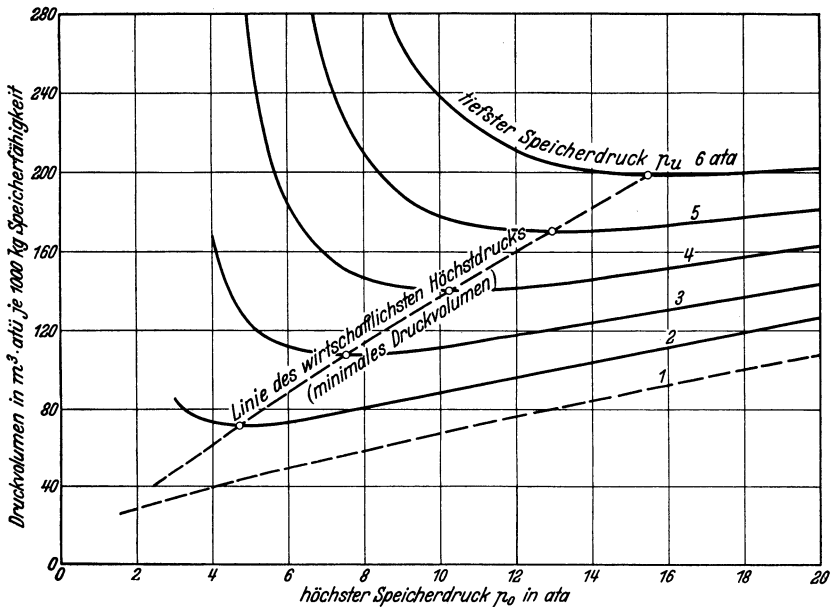


Abb. 43b. „Druckvolumen“-Kurven für 1000 kg Speicherkapazität.

es tritt eine vergrößerte Verdampfung durch Reihenschaltung (gleichzeitige Ladung und Entladung) auf (s. S. 49). Die Versuche von Eberle¹ haben jedoch erwiesen, daß nicht die Verdampfungsoberfläche, sondern der Dampfraum maßgebend für die zulässige Verdampfung ist. Bei der Entladung tritt stets ein Aufschäumen ein, das sich jedoch erst bei Überschreiten einer bestimmten Höhe durch mitgerissene Wassertropfen gefährlich äußert. Der zulässige Grenzwert β_v beträgt für reines Wasser 4000 m³/h, für laugenhaltiges Wasser dagegen nur 400 m³/h für 1 m³ Dampfraum. Die erzielbare Höchstleistung wird

$$[M_s]_{\max} = V \cdot (1 - f) \cdot \beta_v \cdot \gamma \text{ [kg/h]},$$

¹ Eberle: Arch. Wärmewirtsch. 1929 S. 329.

Goldstern, Dampfspeicheranlagen.

wenn f die Wasserfüllung des Speichers (in %) und γ das spezifische Gewicht des Dampfes (in kg/m^3) bedeutet. Der Einfluß der Verdampfungsoberfläche und damit der Bauart verschwindet hierin vollständig, so daß nur noch die Füllung auf die Höchstleistung und die kürzeste Entladungsdauer zurückwirkt. Da je nach dem Ladezustand sowohl die Füllung, als auch das spezifische Gewicht verschiedene Werte annehmen, muß zur Bestimmung der kürzesten Dauer die entladbare Menge über den ganzen Verlauf untersucht werden, wobei die Belastungskurve zu be-

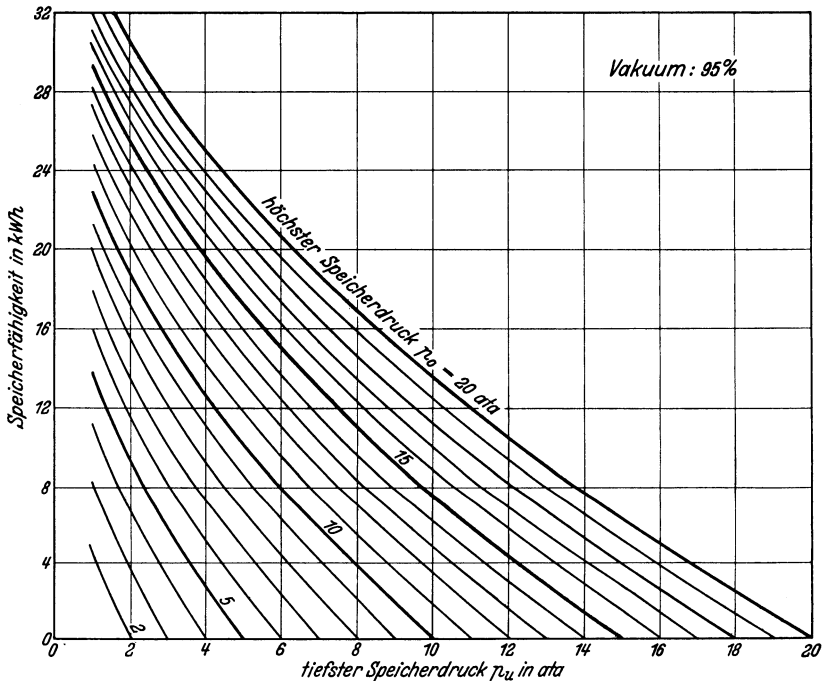


Abb. 44. Spezifische Speicherfähigkeit in kWh bei Leistungserzeugung in verlustloser Maschine.

rücksichtigen ist. Es ergibt sich (meist im Gebiet niedriger Drücke) ein kritischer Punkt, bei dem die größte Verdampfung für 1 m^3 Dampfraum erreicht wird. Mit steigendem Druck nimmt der Dampfraum ab, dagegen das spezifische Gewicht zu, so daß beide Einflüsse sich entgegenwirken.

Bei Verarbeitung des Speicherdampfes in Turbinen wird die höchste Leistung durch deren Schluckfähigkeit begrenzt, die — wie weiter unten gezeigt — genau bestimmt werden kann. Die spezifische Speicherfähigkeit kann man bei einem bestimmten Vakuum für die verlustlose Maschine unmittelbar in kWh elektrischer Leistung angeben, wobei das geringere Wärmegefälle des Speicherdampfes von niedrigerem Druck

berücksichtigt wird (Abb. 44). Diese Werte erlauben einen Vergleich mit der Speicherfähigkeit des Gleichdruckspeichers bei Verwendung in Kraftanlagen.

5. Speicherturbinen.

Bevor der Gefällespeicher in das Gebiet der Stromversorgung eindringen konnte, das für die Dampfspeicherung durch den stark schwankenden Belastungsverlauf besonders günstige Voraussetzungen bietet, mußten die Schwierigkeiten überwunden werden, die sich mit dem veränderlichen Druck des Entladedampfes für die Leistungserzeugung ergaben. Mit den heute ausgebildeten Turbinen für Speicherdampf ist eine vollständige Lösung der Frage erreicht worden, da sie sowohl in konstruktiver, als auch betrieblicher und wirtschaftlicher Hinsicht den Frischdampfturbinen nicht mehr nachstehen. Sie wurden bereits in allen Größenordnungen für die verschiedensten Betriebsverhältnisse ausgeführt und haben sich bisher in jedem Fall bewährt. Nachdem im folgenden zunächst die abweichenden Bedingungen aufgezeigt sind, die der Zustand des Speicherdampfes gegenüber dem Frischdampf mit sich bringt, sollen die hierdurch bedingten baulichen Maßnahmen und schließlich die Berechnungsmethoden der wichtigsten Größen dargestellt werden.

Unabhängig von der Aufgabe, mit Gefällespeichern zusammenzuarbeiten, hat noch die besondere Verwendung zur Erzeugung der Spitzenlast auf die Ausbildung der Speicherturbinen zurückgewirkt. Die hierbei aus wirtschaftlichen und betrieblichen Grundsätzen verursachten Maßnahmen, wie z. B. der Versuch, auch auf Kosten eines etwas höheren Dampfverbrauches zu billigeren Turbinen zu gelangen oder erhöhte Betriebsbereitschaft durch einen einfacheren, kürzeren Aufbau zu erzielen, können in gleicher Weise auch für Frischdampfturbinen angewandt werden, sofern diese für die Spitzendeckung eingesetzt werden.

Die Einschaltung des Gefällespeichers in Kraftanlagen kann — wie bereits weiter oben gezeigt — auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten durchgeführt werden:

1. Der Druck des Entladedampfes wird durch ein Reduzierventil unverändert (auf dem niedrigsten Wert) gehalten. Die Turbine erhält, bei gleicher Schaltung wie sie normal bei Heizdampfverbrauchern benutzt wird, dauernd Niederdruckdampf und unterscheidet sich in keiner Beziehung von den gewöhnlichen Niederdruck- oder Abdampfturbinen.

2. Der Entladedampf strömt mit dem jeweils im Speicher herrschenden Druck zur Turbine. Man gewinnt dadurch, gegenüber der erstgenannten Schaltung, an Druck- und Wärmegefälle, erzielt also

eine größere Leistungsfähigkeit der Speicheranlage. Daher wird mit wenigen Ausnahmen diese Schaltung gewählt, für die die besonderen, hier näher dargestellten Speicherturbinen ausgebildet wurden.

Die unterschiedlichen Bedingungen für die Verarbeitung des Entladedampfes von Gefällespeichern sind durch Vergleich mit dem in den Speicher geladenen Frischdampf durchzuführen. Nur die durch Speicherung eintretenden Veränderungen gegenüber dem Ladedampf bedingen auch die Unterschiede an den Speicherturbinen. Der

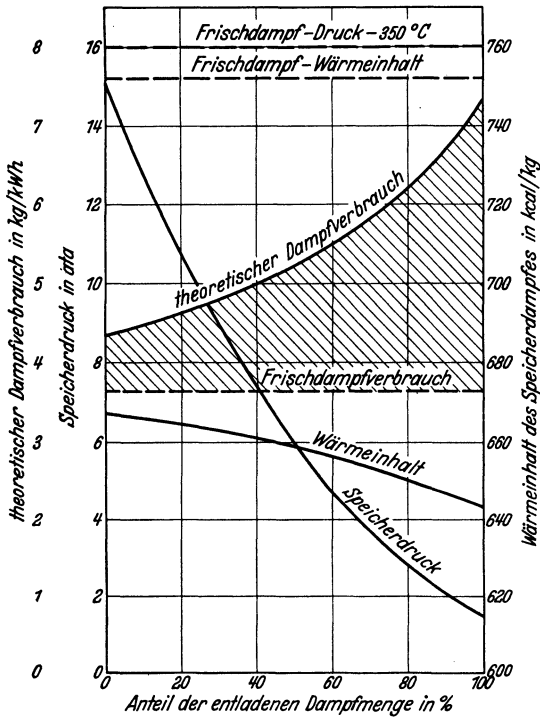


Abb. 45a. Verlauf des Speicherdruckes und des theoretischen Dampfverbrauches während der Entladung.

Wärmeinhalt und des theoretischen Dampfverbrauches mit fortschreitender Entladung in Abb. 45a dargestellt. Angenommen wurde dabei, daß der Speicher zwischen 15 und 1,5 ata betrieben wird. Für das Vakuum wurde mit unverändert 95% gerechnet. Zum Vergleich wurden noch die Werte eingezeichnet, die für einen Ladedampf von 16 ata und 350° C gelten. Man erkennt deutlich, wie durch den Verlust der Überhitzung und den absinkenden Speicherdruck der theoretische Dampfverbrauch vergrößert wird. Gegenüber dem Ladedampf tritt eine Erhöhung um 19% bei Beginn und um 102% am Ende der Entladung ein.

Entladedampf ist immer Satttdampf, sämtliche Überhitzung geht durch die Speicherung verloren. Der Speicherdruck nimmt während der Entladung vom höchsten bis auf den niedrigsten Wert ab. Damit wird also das ausnutzbare Wärmegefälle in zweifacher Weise verringert, der theoretische Dampfverbrauch gegenüber dem Ladedampf um so mehr erhöht, bis zu je tieferen Speicherdrücken die Entladung getrieben wird.

Für Betriebsverhältnisse, wie sie gewöhnlich in Kraftwerken vorliegen, ist beispielsweise der Verlauf des Speicherdruckes, des

Da mit dem abnehmenden Dampfdruck das spezifische Volumen stark zunimmt, muß man zur Erzielung derselben Leistung wie mit Frischdampf, nicht nur mit den vergrößerten Dampfmen gen rechnen, sondern die Turbine für das größte auftretende Dampf volumen auslegen. Für das oben gewählte Beispiel zeigt Abb. 45b noch den Verlauf des spezifischen Gewichtes und den theoretischen Dampfverbrauch in m^3/kWh . Verglichen mit dem bei Ladedampf je kWh theoretisch notwendigen Dampfvolu men beträgt der Wert bei Speicherdampf nur 90% am Anfang, während er am Ende der Entladung auf das 13,3-fache gestiegen ist. Diese all gemeineren Betrachtungen sollen nur die thermodynami schen Ursachen der Fragen aufzeigen, die bei Verarbeitung von Speicherdampf auftreten. Die besondere Verwendung der Dampfspeicheranlage zur Spitzendeckung bringt es mit sich, daß gegen Ende der Ent ladung auch mit abnehmender Leistung gerechnet werden kann.

Geht man umgekehrt vom Aufbau einer Frischdampf turbine aus, so läßt sich die größte Leistung feststellen, die bei Betrieb mit Speicher dampf bei sinkendem Druck noch zu erzielen ist. Durch die vorhandenen Querschnitte der Turbine wird die Schluck fähigkeit bestimmt, d. h., die größte Dampfmenge, die beim betreffen den Druck durch die Turbine strömen kann. In Abb. 46 (6) ist die Ab hängigkeit der Schluckfähigkeit S vom Druck, die geradlinig verläuft, dargestellt und gleichzeitig das verfügbare Wärmegefälle h sowie der thermodynamische Wirkungsgrad η eingezeichnet. Die erzielbare Lei stung ergibt sich durch Multiplikation der drei Größen. Von einem be stimmten Druck, im Beispiel 6 ata, sinkt die Leistung stark ab, so daß bei etwa 1,2 ata keine Leistung mehr erzeugt werden kann. Die Be wältigung des vergrößerten Dampf volumens beim niedrigsten Speicher-

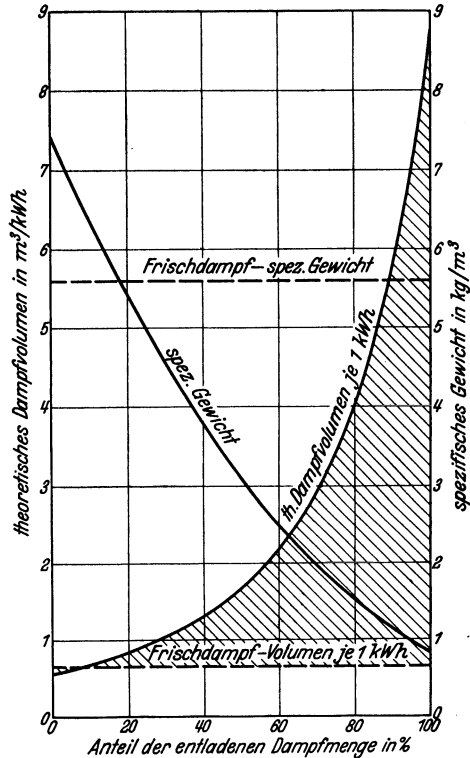
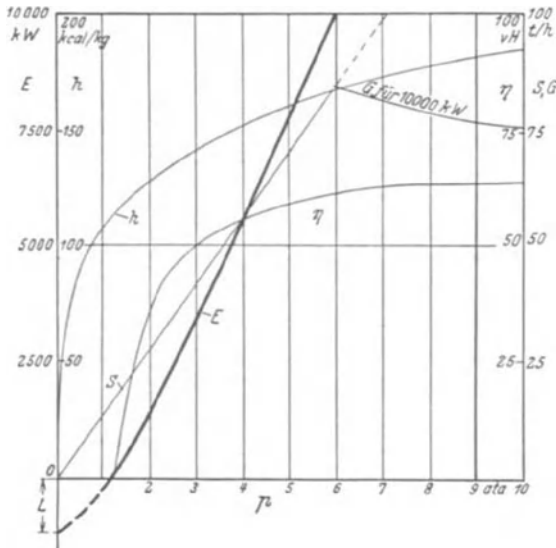


Abb. 45b. Verlauf des spezifischen Gewichtes und des für 1 kWh theoretisch erforderlichen Volumens während der Entladung.

druck ist die Kernfrage, die für die Ausbildung der Speicherturbinen



entscheidend ist. Es handelt sich also in erster Linie stets um Maßnahmen, die eine Vergrößerung der Strömungsquerschnitte herbeiführen können.

Um zu Speicherturbinen mit ausreichenden Querschnitten zu gelangen, kann einerseits versucht werden, die Einströmung durch weitere Düsendruppen zu erweitern, andererseits, unter Umgehung der ersten Turbinenstufen, bei sinkendem Speicherdruck den Speicherdruck den Speicherdampf unmittelbar zu späteren Stufen zu leiten.

Abb. 46. Veränderung des Wärmegefälles, des thermodynamischen Wirkungsgrades, der Schluckfähigkeit und der erzielbaren Leistung mit dem Druck vor der Turbine.

Bei der ersten ausgeführten Speicherturbine (17) im Kraftwerk Malmö, die gleichzeitig für Verarbeitung von Frischdampf und

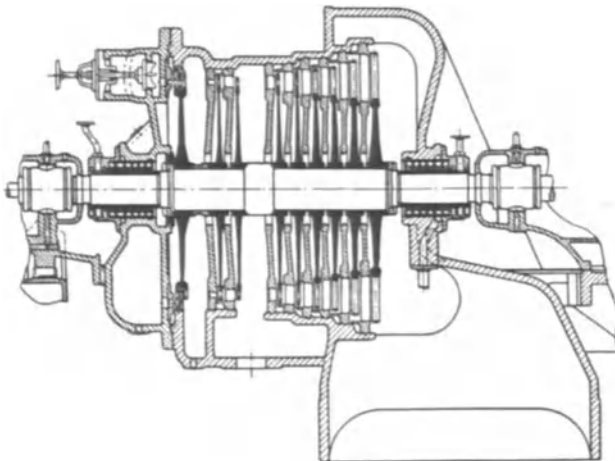


Abb. 47. Frischdampf-Speicherdampfmaschine, Bauart de Laval im Kraftwerk Malmö.

Speicherdampf dient, werden beide Möglichkeiten ausgenutzt (Abb. 47). Das erste zweikränzige Curtisrad ist derartig ausgebildet, daß es sowohl

von Frischdampf als auch im äußeren Teil durch Speicherdampf beaufschlagt wird. Sobald der Speicherdruck unter 3 atü absinkt, wird die Zuleitung hinter das dritte Rad geöffnet. Bei Entladung vom höchsten Druck von 7 atü auf 1,5 atü, kann die Vollast von 3750 kW während

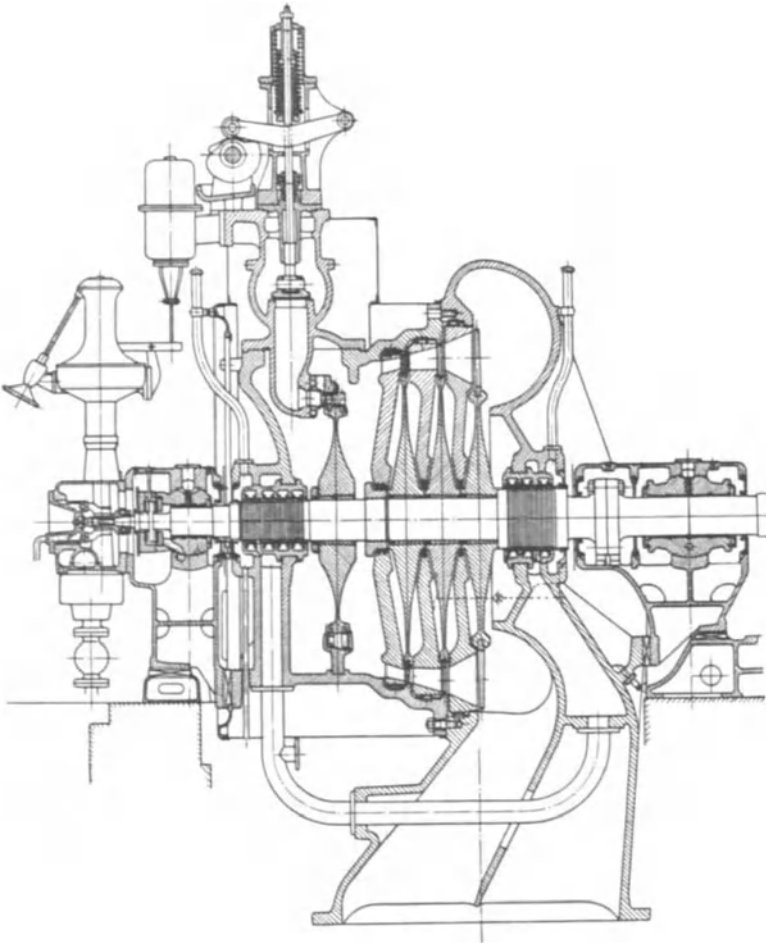


Abb. 48. Frischdampf-Speicherdampfturbine, Bauart AEG im Kraftwerk Oberlungwitz.

35 Minuten abgegeben werden (mit 2 Speichern je 225 m³). Der besondere Zweck der Speicheranlage als Momentanreserve führte dazu, aus Speicherdampf bis zum niedrigsten Druck noch volle Leistung zu erzielen und auch das erste Rad mit Speicherdampf zu beaufschlagen.

Eine Ausführung der Frischdampf-Speicherdampfturbine der AEG, bei der nur die Zuführung des Speicherdampfes zum ersten Rad vor-

gesehen ist (4), gibt Abb. 48 wieder (Kraftwerk Oberlungwitz). Um trotzdem ausreichende Querschnitte zu erreichen, wurde der Einströmkasten so vergrößert, daß auch der untere Radbogen beaufschlagt werden kann. Die Ansicht des für eine AEG-Turbine im Kraftwerk der Hamburger Hochbahn gebauten Einströmkastens (21) ist in Abb. 49 wiedergegeben. Der Frischdampf wird ebenso wie der Speicherdampf in je einer Hälfte des oberen und des unteren Teils zugeführt. Dadurch wird die Entladung des Speichers bis auf einen tieferen Druck möglich, ohne daß eine Zuleitung zu einer späteren Stufe nötig wird. Da jedoch der Druck hinter dem ersten Rad nicht herabgesetzt werden kann, ohne

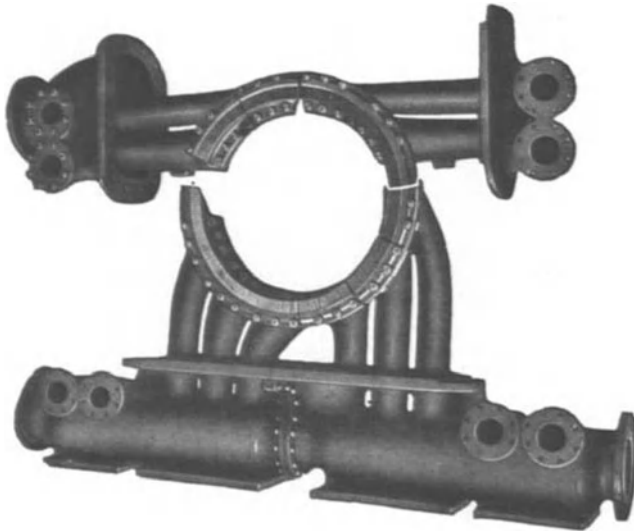


Abb. 49. Einströmkasten einer Frischdampf-Speicherdampfturbine, Bauart AEG.

den Wirkungsgrad bei reinem Frischdampfbetrieb zu verschlechtern, darf der Speicherdruck nicht unter einen bestimmten Wert sinken. Die Steuerung solcher kombinierter Turbinen (s. Abb. 50) enthält daher außer dem Geschwindigkeitsregler h und dem vom Speicherdruck beeinflussten Druckregler g noch einen Regler f , der vom Differenzdruck zwischen Frisch- und Speicherdampf abhängig ist.

Für die ausschließliche Verwendung von Speicherdampf sind zwei Turbinen je 20000 kW im Kraftwerk Charlottenburg ausgeführt (48), die mit der größten Speicheranlage von 16 Einheiten je 312,5 m³ zusammenarbeiten. Der Speicherdruck verändert sich zwischen 14 und 1,5 ata. Längs- und Querschnitt sind in Abb. 51 dargestellt. Die Turbine ist eingehäusig und doppelflutig nach dem SSW-Röder-System ausgeführt und enthält auf einer Trommel mit drei bohrungslosen Rädern

auf jeder Seite insgesamt 2 mal 16 Stufen. Für den Speicherdampf sind drei Zuleitungen vorgesehen, die von je zwei Ventilen geregelt werden. Bei hohem Speicherdruck wird der gesamte Dampf der ersten Stufe zugeführt. Überschreitet die notwendige Dampfmenge bei absinkendem Druck die Schluckfähigkeit, so läßt die zweite Ventilgruppe Speicherdampf unmittelbar vor die fünfte Stufe treten. Sind die Durchgangs-
querschnitte gegen Ende der Entladung auch damit nicht mehr ausreichend, so öffnet schließlich die dritte Gruppe, die vor die elfte Stufe führt. Mit der so erhöhten Schluckfähigkeit ist die Turbine imstande, die zugrundegelegte, angenähert dreieckförmige Spitzenbelastung von drei Stunden Gesamtdauer, deren Höchstwert im ersten Drittel auftritt, zu decken, wobei ein mittlerer Dampfverbrauch von 8,37 kg/kWh bei Abnahmeversuchen gemessen wurde.

Wichtig für die Verarbeitung des Speicherdampfes in Turbinen ist noch die Frage, ob durch die Expansion des Satt-dampfes bei niedrigen Drücken ein unzulässig hoher Feuchtigkeitsgehalt im Abdampf auftreten kann, der zu verstärkten Korrosionen der letzten Turbinen-

stufen führen könnte. Trägt man die Expansionslinien in ein IS-Diagramm ein, wobei beispielsweise durch die Speicherentladung eine gewöhnlich ausgeprägte Kraftwerksspitze zu decken ist (21), so erhält man die in Abb. 52 dargestellten Kurven. Berücksichtigt wurde dabei der Einfluß der Belastung auf den thermischen Wirkungsgrad und das erzielbare Vakuum. Mit zunehmender Belastung werden die Expansionslinien steiler, so daß der höchste Feuchtigkeitsgehalt mit 13,8% während der höchsten Spitze bei 8,8 ata auftritt. Mit sinkendem Druck verringert sich die Feuchtigkeit, so daß sich als Mittelwert für die gesamte Entladung nur 9,3% ergibt. Zum Vergleich ist die Expansionslinie einer vollbelasteten Hochdruckturbinen von 35 atü und 400° C bei 96% Vakuum eingezeichnet, deren Feuchtigkeitsgehalt 12,2% be-

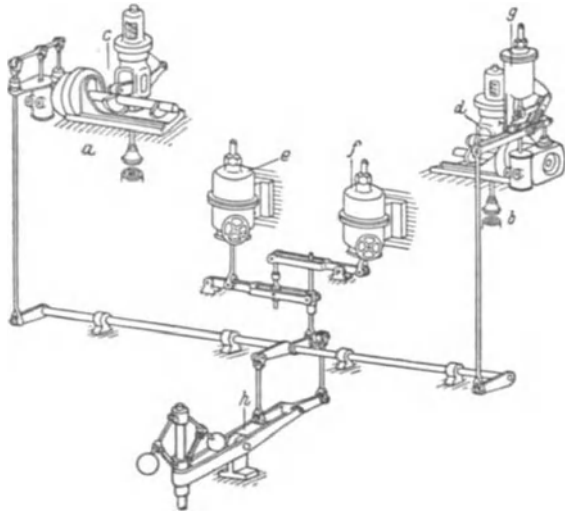


Abb. 50. Steuerung einer Frischdampf-Speicherdampfturbine (AEG).

a Frischdampfseite, *b* Speicherdampfseite, *c* Frischdampfdüsenventile, *d* Speicherdampfdüsenventile, *e* Frischdampfdruckregler, *f* Grenzdrukregler, *g* Speicherdampfdruckregler, *h* Drehzahlregler.

trägt. Wenn man noch berücksichtigt, daß Speicherturbinen nur einige hundert Stunden jährlich betrieben werden, erkennt man, daß die

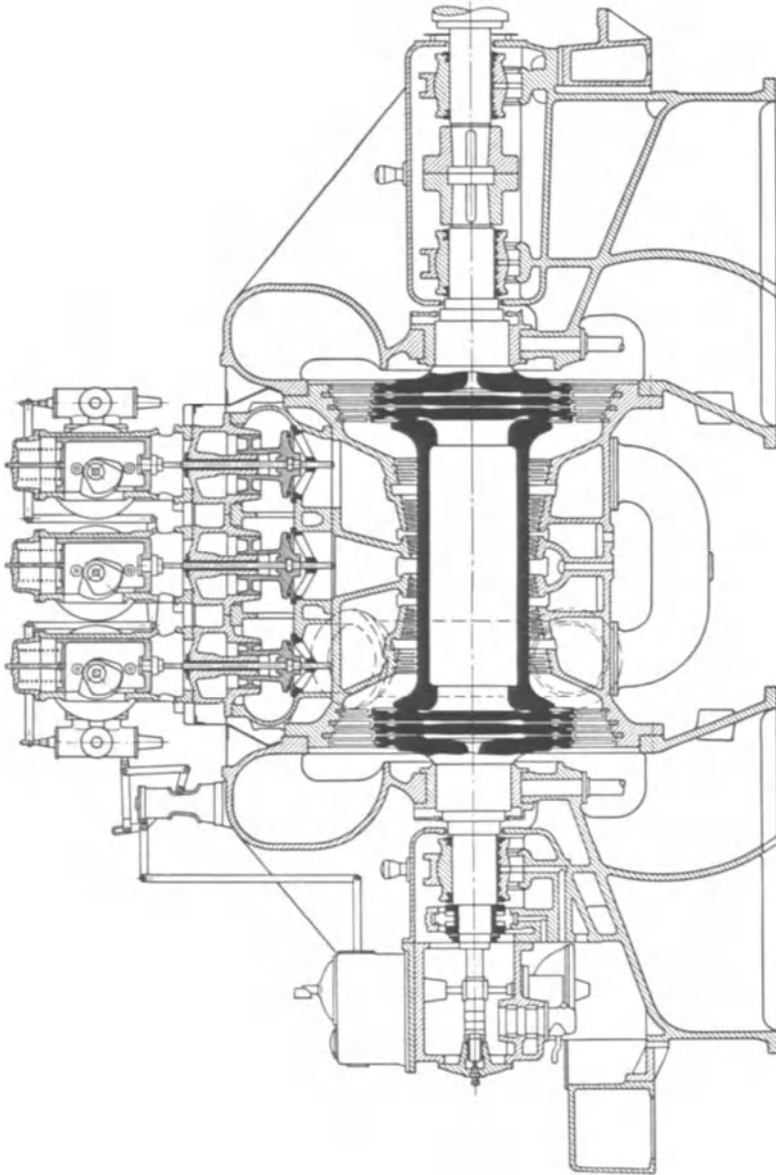


Abb. 51 a.

Schaufelzerstörung bei diesen weniger stark auftreten kann, als bei Frischdampfturbinen für Grundlast.

Bei der Berechnung von Speicherturbinen handelt es sich vor allem darum, die notwendige Schluckfähigkeit festzustellen, die zur Deckung der vorgeschriebenen Belastung vorgesehen werden muß. Dabei ist eine Spitzenform zugrunde zu legen, die den zu erwartenden Belastungsverhältnissen entspricht. Unter Umständen können Veränderungen der Form, besonders gegen Ende der Spitze, verhältnismäßig großen Einfluß auf die Dimensionierung der Speicherturbine ausüben. Andererseits muß stets versucht werden, bei reinen Speicherdampf-

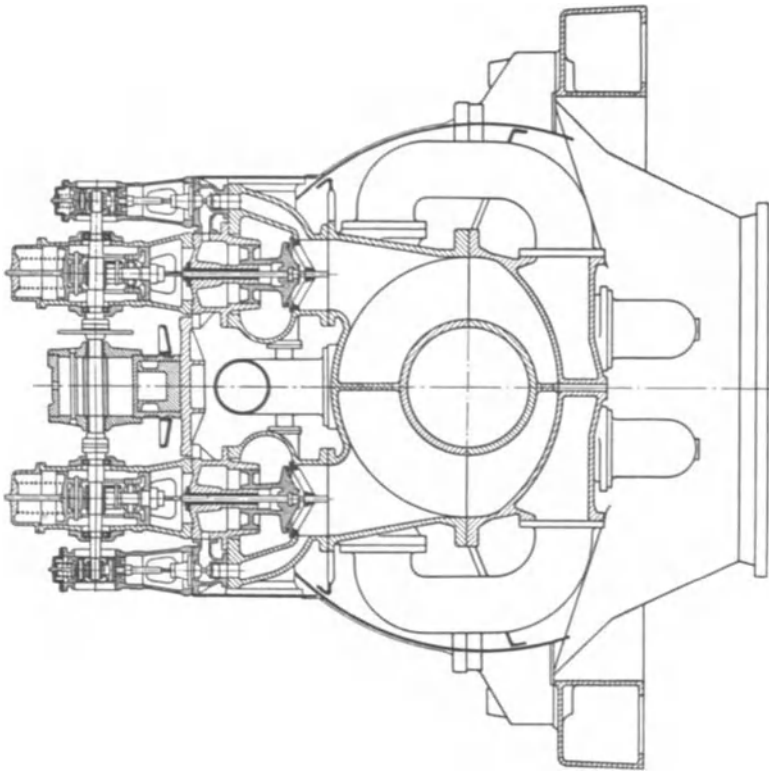


Abb. 51 a und b. Speicherturbine. Bauart SSW-Röder im Kraftwerk Charlottenburg.

turbinen auch beim Betrieb mit Frischdampf keine zu große Wirkungsgradverschlechterung in Kauf nehmen zu müssen. Die Grundlage der Berechnung bildet das Dampfverbrauchsdiagramm in Abhängigkeit von Druck und Leistung, das entsprechend dem geringeren adiabatischen Wärmegefälle unter Berücksichtigung des thermodynamischen Wirkungsgrades (der wegen der fehlenden Überhitzung abnimmt) gezeichnet werden kann. Der theoretische Dampfverbrauch ist abhängig vom Speicherdruck in Abb. 53 aufgetragen. Die Drosselung bei nicht voll geöffneten Einlässen kann durch geradlinigen Verlauf für Zwischen-

werte angenähert berücksichtigt werden. Schließlich ist noch die Entladekurve des (zunächst überschlägig ermittelten) Speichervolumens vorauszusetzen, das dem Diagramm der Speicherfähigkeit (Abb. 40) entnommen werden kann.

Am Beispiel einer Speicherdampfturbine für 15000 kW soll das Verfahren (21) kurz dargestellt werden. Die angeforderte Belastung ist durch Abb. 54a gegeben; der Dampfverbrauch wurde für verschiedene

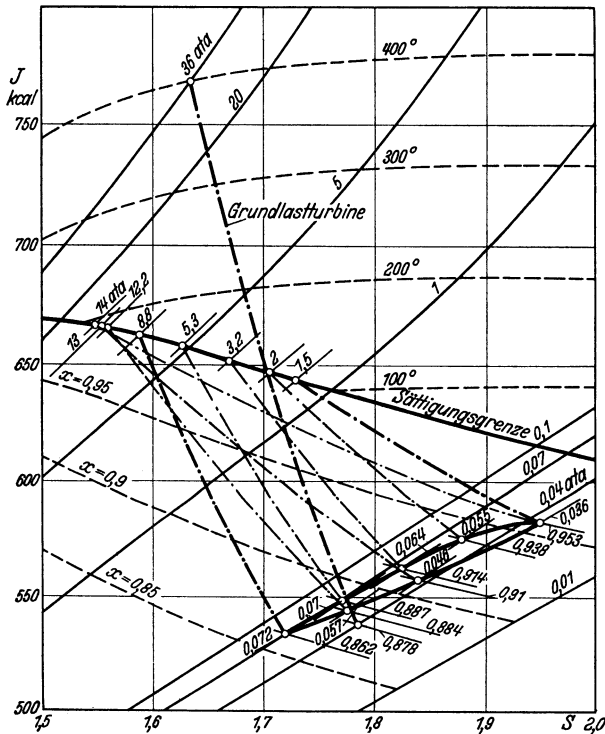


Abb. 52. Feuchtigkeitsgehalt des Abdampfes einer Speicherturbine bei Spitzendeckung und einer Grundlast-Frischdampfturbine (nach Landau).

Belastungen abhängig vom Speicherdruck nach Abb. 54b ermittelt und die entladenen Dampfmenen einer Speichereinrichtung von 2200 m³ bei einem höchsten Speicherdruck von 15,5 ata in Abb. 54c dargestellt. Während der zunächst steigenden Belastung wird der Dampfverbrauch vom fallenden Druck noch wenig beeinflusst. Für geradlinigen Verlauf der Belastung während kleiner Zeitabschnitte wird punktwise der mittlere Dampfverbrauch mit zuerst geschätztem Speicherdruck bestimmt und hieraus die insgesamt benötigte Dampfmenge festgestellt. Aus der Entladekurve erhält man mit dieser den tatsächlich entstehenden Druck-

abfall im Speicher. Die Kurven des Speicherdrucks p , des stündlichen Dampfverbrauches G_h , ebenso wie der insgesamt verbrauchten Dampfmenge G_s können so, wie in Abb. 54a dargestellt, aufgezeichnet werden. Der Endwert von 271,3 t muß vom Speicher bis zum niedrigsten Betriebsdruck von 1,6 ata im Speicher abgegeben werden können. Um fest-

zustellen, ob die Schluckfähigkeit der Einlässe, die in Abb. 54b durch die Geraden G_I für die Hauptventile und G_{II} für die Zusatzventile gegeben ist, bei der untersuchten Belastung ausreicht, wird der Verlauf des Dampfverbrauches G_h eingetragen. Mit dem Haupteinlaß allein kann die Vollast nur bis etwa 8 ata geleistet werden, so daß der Einlaß hinter das erste Rad von diesem Druck an öffnen muß. Die hierdurch erreichte zusätzliche Schluckfähigkeit muß besonders im Gebiet niedriger Drücke ausreichend sein, was sich durch den Verlauf der Geraden G_{II} oberhalb der bei der Spitzendeckung eingestellten Kurve G_h kennzeichnet. — Um die längste Entladedauer bei einer bestimmten Leistung festzustellen, kann in ähnlicher Weise die umgekehrt durch die Schluckfähigkeit begrenzte Belastungsform berechnet werden. Man braucht nur die betreffende Dampfverbrauchslinie in Abb. 54b bis zum Schnitt mit G_{II} verfolgen, wodurch sich wieder mit der Entladekurve Abb. 54c die Dampfmenge und Dauer ergibt. In Abb. 54d ist der Belastungsverlauf bei 15000 kW Anfangsbelastung mit dem zugehörigen Druckverlauf dargestellt. Die Kurve a gibt die Dauer an, die bei anderen unveränderten Anfangsbelastungen eingehalten werden kann.

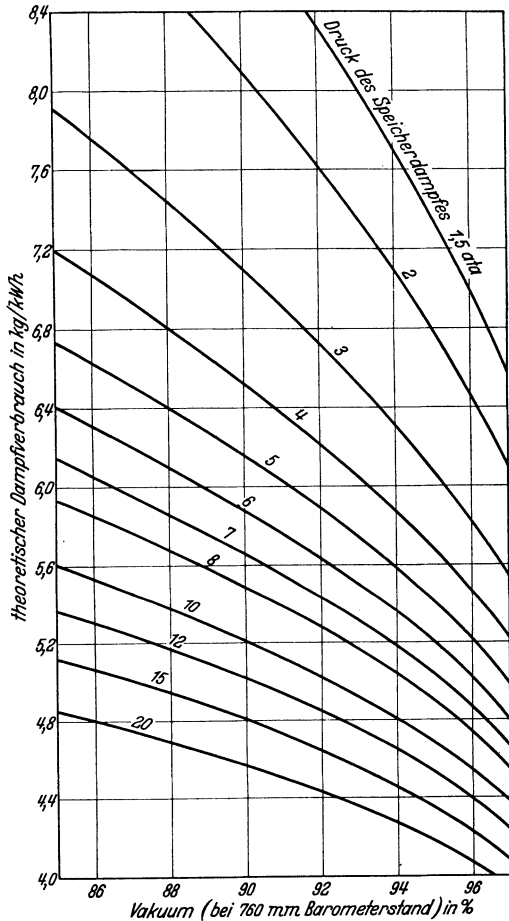


Abb. 53. Theoretischer Dampfverbrauch für Speicherdampf, abhängig vom Vakuum.

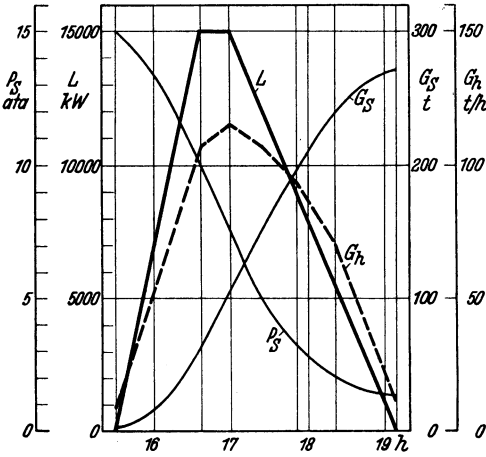


Abb. 54a. Spitzendeckung. Verlauf der Leistung, des Dampfverbrauches und des Dampfdruckes vor der Turbine.

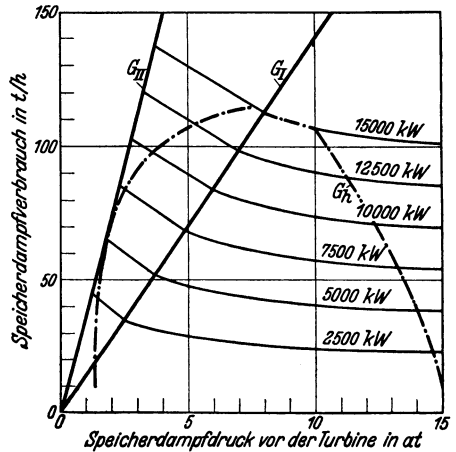


Abb. 54b. Dampfverbrauch, abhängig vom Speicherdampfdruck vor der Turbine.

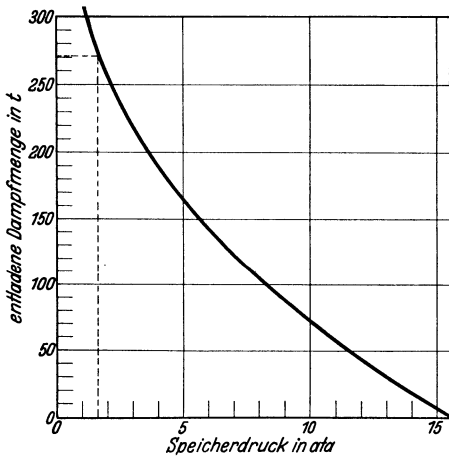


Abb. 54c. Entladedampfmenge.

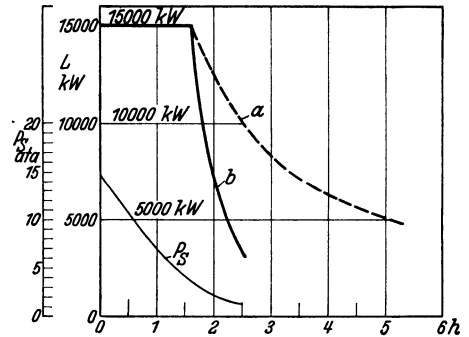


Abb. 54d. Momentanreserve. *a* Längste Dauer bei konstanter Leistung, *b* Absinkende Leistung nach 15000 kW Anfangsleistung.

Abb. 54a bis d. Berechnung einer Speicherturbine für 15000 kW (nach Landau).

VI. Gleichdruckspeicher.

1. Prinzip der Gleichdruck-Dampfpeicherung.

Im Gegensatz zum Gefällespeicher, bei dem die Verdampfung ohne Wärmezufuhr von außen, also durch Absenkung der Temperatur des Speicherstoffes erfolgt, wird beim Gleichdruckspeicher die gespeicherte Wärme durch Zufuhr der Verdampfungswärme in Dampf umgewandelt. Daher kann die Entladung ohne Änderung der Temperatur des Speicherstoffes vor sich gehen und der Druck im Speicher dauernd auf gleicher Höhe gehalten werden. Für die Ladung ergibt sich hieraus die Forderung, daß die Kondensation des geladenen Dampfes stets

mit einem solchen Anteil des Speicherstoffes zu bewirken ist, daß durch dessen Erwärmung gerade die Speichertemperatur erreicht werden kann.

Praktisch kommt für die Wärmezufuhr von außen nur die Kesselheizung in Betracht. Somit muß als Speicherstoff das Kesselspeisewasser gewählt werden. Der Gleichdruckspeicher ist also in den Teil des Speisewasserkreislaufes einzuschalten, der vor dem Kessel liegt. Für die Ausnutzung der Gleichdruckspeicherung ergeben sich aus dem Zusammenwirken mit dem Kessel die grundlegenden Beziehungen, die zunächst für den allgemeinen Fall abgeleitet werden sollen.

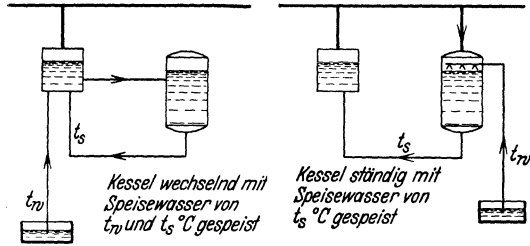


Abb. 55 a. Vorwärmung im Kessel.

Abb. 55 b. Vorwärmung durch Dampf.

Abb. 55 a und b. Zusammenarbeiten von Gleichdruckspeicher und Kessel.

Der Speicher wird, wie in Abb. 55 a gezeichnet, so mit dem Kessel verbunden, daß das Kesselwasser in beiden Richtungen wahlweise fließen kann. Im geladenen Zustand ist der Speicher mit heißem Kesselwasser von Sättigungstemperatur t_s angefüllt. Bei Entladung des Speichers wird das heiße Wasser dem Kessel zugeführt, wodurch die bei gleichbleibender Feuerung übertragene Wärme zur Verdampfung einer größeren Wassermenge ausreicht, also eine zusätzliche Dampfleistung erzielt wird. Die stündlich vom Kessel aufgenommene Wärmemenge Q (kcal/h) verteilt sich auf die Wärmemenge zur Vorwärmung des Wassers Q_w und zur Verdampfung Q_d .

$$Q = Q_w + Q_d \text{ [kcal/h].}$$

Dabei ergeben sich die Wärmemengen jeweils als Produkt des stündlich erwärmten oder verdampften Wassergewichtes M (kg/h) mal der Zunahme des Wärmeinhaltes Δi (kcal/kg). In Abb. 56 ist die Leistung M als Abszisse, der Wärmeinhalt i als Ordinate gewählt, so daß durch die Flächen die übertragenen Wärmemengen dargestellt werden. Ohne Speicherung wird das stündliche Wassergewicht M_w , das von der Speisewassertemperatur t_w ($^{\circ}\text{C}$) mit dem Wärmeinhalt i_w (kcal/kg) auf die Sättigungstemperatur t_s ($^{\circ}\text{C}$) mit i' (kcal/kg) vorgewärmt wird, gleich der

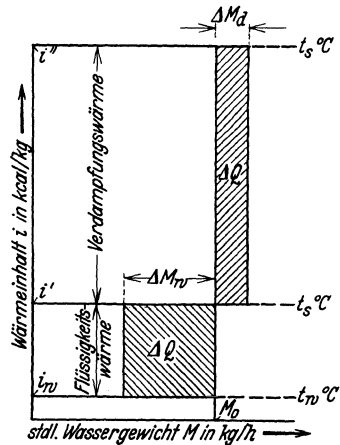


Abb. 56. Verteilung der im Kessel übertragenen Wärmemengen.

durch weitere Erhöhung des Wärmehaltes auf i'' (kcal/kg) verdampften Dampfmenge M_d sein, also

$$M_w = M_d = M_0 \text{ (kg/h).}$$

Wird eine bestimmte Menge vorgewärmten Speisewassers ΔM_w (kg/h) mit der Temperatur t_s aus dem Speicher in den Kessel entladen, so steht eine entsprechende Wärmemenge ΔQ (kcal/h) zur Erhöhung der Dampferzeugung um ΔM_d (kg/h) zur Verfügung. Die in der Abbildung schraffierten Flächen müssen gleich ΔQ sein, also

$$\Delta Q = \Delta M_w (i' - i_w) = \Delta M_d (i'' - i') \text{ (kcal/kg).}$$

Bezieht man die Veränderung der stündlich erwärmten Wassergewichte auf den ohne Speicherung erreichten Wert M_0 , so erhält man unmittelbar den für die Gleichdruckspeicherung grundlegenden Zusammenhang:

$$\frac{\Delta M_d}{M_0} : \frac{\Delta M_w}{M_0} = (i' - i_w) : (i'' - i')$$

oder wenn die relative Veränderung mit

$$m_d = \frac{\Delta M_d}{M_0} \quad \text{und} \quad m_w = \frac{\Delta M_w}{M_0}$$

bezeichnet wird,

$$\frac{m_d}{m_w} = \frac{i' - i_w}{i'' - i'}.$$

Zwischen der veränderlich zugeführten, vorgewärmten Speisewassermenge und der hierdurch erzielten wechselnden Kesselleistung besteht das gleiche Verhältnis wie zwischen der Verdampfungswärme und der Flüssigkeitswärme. Da letztere viel kleiner ist und meist nur etwa $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{5}$ beträgt, müssen die Schwankungen in der Speisewasserezufuhr 5 bis 10fach größer sein als die erforderlichen Veränderungen in der Dampferzeugung. Zur Herabsetzung der Kesselleistung bei unveränderter Feuerung muß eine vielfach größere Wassermenge im Kessel vorgewärmt werden, die zur Wiederaufladung des Speichers benutzt wird.

Damit ergeben sich auch die Grenzen der Veränderbarkeit der Kesselleistung und zwar einerseits für den Fall, daß kein Wasser gespeist und vorgewärmt wird, also $M_w = 0$, andererseits für den Fall, daß kein Dampf erzeugt wird, also $M_d = 0$.

In Abb. 57a ist zunächst an einem prinzipiellen Belastungsdiagramm die Wirkungsweise dargestellt. Solange die Dampferzeugung unter dem Normalwert bleibt, wird mehr Wasser im Kessel vorgewärmt als verdampft. Das überschüssige Heißwasser wird in den Speicher geleitet, von wo es in den Kessel zurückgeführt wird, sobald die Kesselleistung über den Normalwert ansteigt. Den größten Betrag der Lei-

stungssteigerung erhält man aus obiger Gleichung für $\Delta M_w = M_0$, also $m_w = 1$

$$[m_d]_{\max} = \frac{i' - i_w}{i'' - i'}$$

Umgekehrt läßt sich die für den Fall der vollständigen Einstellung der Dampferzeugung nötige Speisewassermenge aus derselben Gleichung bestimmen. Für $\Delta M_d = M_0$, also $m_d = 1$ wird

$$[m_w]_{\max} = \frac{i'' - i'}{i' - i_w}$$

Aus den Diagrammen der Wärmemengen in Abb. 57 b läßt sich die verschiedenartige Verteilung auf Wasservorwärmung und Verdampfung für die drei kennzeichnenden Fälle deutlich erkennen.

Im Anschluß an den Grenzfall der größten Leistungssteigerung ergibt sich die Möglichkeit, den Gleichdruckspeicher mit Dampf zu laden, bzw. durch überschüssigen Dampf das Speisewasser vorzuwärmen. Die grundsätzliche Schaltung zeigt Abb. 55 b, bei welcher die Zuleitung vom Speicher zum Kessel bestehen bleibt. Hingegen ist zur Ladung eine Verbindung mit der Kesselsammelleitung und der Speiseleitung hergestellt. Das Prinzip der Dampfspeicherung bleibt dasselbe, so daß auch die Beziehung zwischen den Veränderungen der vorgewärmten Wassermenge und der Verdampfleistung bestehen bleibt. Jedoch stellt sich, wie Abb. 58 kennzeichnet, nur der obere Grenzfall ein, der zu einer dauernden Abgabe der größten Dampfleistung führt. Der Kessel wird daher ständig gleichmäßig mit heißem Speisewasser aus dem Speicher versorgt. Bei sinkender Belastung wird immer mehr Dampf zur Vorwärmung des Speisewassers (außerhalb des Kessels) benutzt. Im Grenzfall der Belastung $M_d = 0$ dient die gesamte Dampferzeugung zur Vorwärmung. Die hierbei erforderliche Speisewasser-

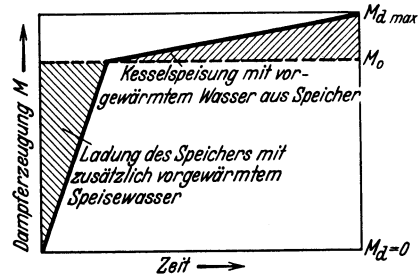


Abb. 57a. Prinzipielles Belastungsdiagramm.

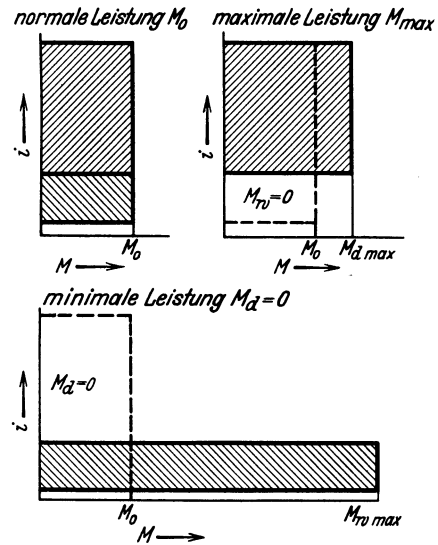


Abb. 57b. Verteilung der Wärmemengen bei den kennzeichnenden Belastungsfällen.

Abb. 57a und b. Wirkungsweise des Gleichdruckspeichers mit Vorwärmung im Kessel.

menge ermittelt sich in gleicher Weise wie für den Fall der Vorwärmung im Kessel.

Wird der Gleichdruckspeicher mit Dampf geladen, so kann der Betriebsdruck niedriger als der Kesseldruck gewählt werden. Die Leistungssteigerung geht dann entsprechend dem geringeren Wärmeinhalt des gespeisten Heißwassers zurück.

2. Vorwärmung im Kessel.

Die unzureichende Größe des Kesselspeiseraumes führt zum Versuch, die Gleichdruckspeicherung durch besondere Speicherbehälter

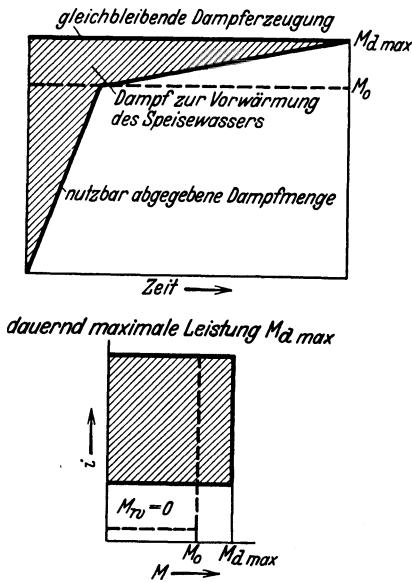


Abb. 58. Wirkungsweise des Gleichdruckspeichers mit Vorwärmung durch Dampf.

wirksamer durchzuführen. Es besteht also die Aufgabe, die Verbindung zwischen Kessel und Speicher so einzurichten, daß der Speicher wie eine Erweiterung des Speiseraumes wirkt. Bei erhöhter Belastung muß vorgewärmtes Wasser aus dem Speicher den Wasservorrat des Kessels ergänzen, wogegen die direkte Speisung mit nicht vorgewärmtem Wasser vermindert und im Grenzfall ganz eingestellt wird. Sinkt der Dampfbedarf, so wird ohne Änderung der Kesselfeuerung die überschüssige Wärme zur Vorwärmung einer zusätzlichen Speisewassermenge benutzt, die in den Speicher geleitet wird. Die Umwälzung des bis auf die Verdampfungstemperatur vorgewärmten Speisewassers zwischen Kessel und Speicher und die Regelung

dieser Wassermengen können nach verschiedenen Vorschlägen durchgeführt werden. Die verbreitetste Bauart wurde von Dr. Kießelbach entwickelt.

Das Schaltbild des Kießelbach-Gleichdruckspeichers ist in Abb. 59 grundsätzlich aufgezeichnet. Zwischen Kessel und Speicher bestehen zwei Verbindungen: Überlaufleitung und Wälzleitung. Durch die Überlaufleitung fließt vom Wasserinhalt des Kessels immer soviel in den tieferliegenden Speicher ab, daß der Wasserstand im Kessel unveränderlich bleibt. In der Wälzleitung ist eine Umwälzpumpe P_1 eingeschaltet, die ununterbrochen eine konstante vorgewärmte Speisewassermenge vom Speicher wieder in den Kessel pumpt. Daneben wird der Kessel mit kaltem Speisewasser durch eine normale

Pumpe P_2 versorgt, deren Leistung jedoch abhängig vom Kesseldruck geregelt wird.

Die Wirkung der Speichereinrichtung geht folgendermaßen vor sich: Entspricht die Feuerführung dem Dampfbedarf, so greift der Regler nicht in die Kesselspeisung ein, die so eingestellt ist, daß gerade die verdampfte Wassermenge ersetzt wird. Das von der Umwälzpumpe geförderte vorgewärmte Speisewasser fließt durch den Überlauf in gleichem Maße wieder ab, so daß der Speicherzustand unverändert bleibt. Erst wenn die Belastung sich verändert, wird das Gleichgewicht dadurch gestört, daß die Speisepumpe durch den Regler beeinflusst wird. Wird der Dampfbedarf höher als der Kessel bei unveränderter Feuerung leisten kann, so sinkt der Kesseldruck und der Regler verringert die Speisewasserzufuhr. Die fehlende Menge wird durch das Heißwasser ersetzt, das die Umwälzpumpe aus dem Speicher in den Kessel fördert, so daß eine erhöhte Verdampfung möglich wird. Bei vollständig abgestellter Kaltspeisung wird vom Kessel das gesamte vorgewärmte Speisewasser verbraucht, so daß durch den Überlauf kein Wasser mehr zurückfließt und der Speicher (mit der größten Leistungsfähigkeit) entladen wird. — Bei niedriger Belastung und steigendem Kesseldruck wirkt der Regler umgekehrt. Dem Kessel wird mehr Speisewasser zugeführt als er verdampft und der Überschuß fließt vorgewärmt (mit dem von der Umwälzpumpe zugeführten Wasser) zum Speicher zurück.

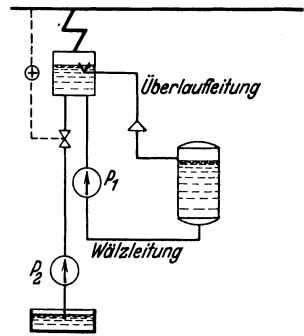


Abb. 59. Schaltbild des Kießelbach-Gleichdruckspeichers.

Der Kießelbach-Gleichdruckspeicher benötigt keinerlei Einbauten. Der einfache zylindrische Behälter wird meist in liegender Bauart möglichst so angeordnet, daß das vom Kessel überlaufende vorgewärmte Wasser durch eigenes Gefälle in den Speicher fließen kann. Beispielsweise kann die Anordnung des Speichers beim Zusammenarbeiten mit Steilrohrkesseln nach Abb. 60 durchgeführt werden (3). Die hochgelegenen Overtrommeln ermöglichen das Gefälle zum Speicher, der unter Kesselflur untergebracht ist. Wo das infolge der Platzverhältnisse unmöglich ist, wird eine weitere Pumpe (Zwischenpumpe) notwendig, die das zulaufende Kesselwasser in den höherliegenden Speicher pumpen muß.

Die weiteren Einzelheiten des Kießelbach-Gleichdruckspeichers sind seiner Wirkungsweise entsprechend einfach gehalten. Da zwischen Kessel und Speicher kein Druckunterschied auftreten darf, sind stets die Dampfdräume beider durch eine Leitung von kleinem Durchmesser (Druckausgleichleitung) verbunden. Druckabsenkungen im Kessel bei zu hohem Dampfbedarf übertragen sich also auch auf den Speicher,

der in gleicher Weise wie der Wasserinhalt des Kessels nach dem Gefälle-speicherprinzip wirkt (s. S. 8). — Solange die Speicherbehälter unter etwa 100 m^3 bleiben, können sie auf normalen Kesselstühlen mit einem

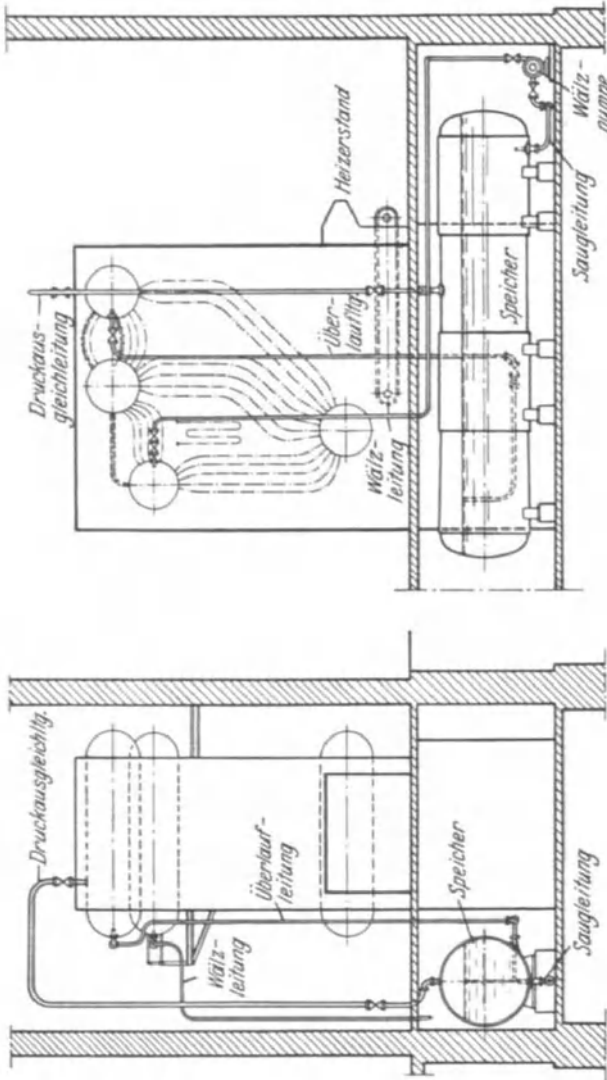


Abb. 60. Anordnung des Kiebelbach-Gleichdruckspeichers beim Zusammenarbeiten mit Steilrohrkesseln (Kiwa, Essen).

festen und einem Rollenlager aufgebaut werden. Die Ausrüstung besteht aus Sicherheits- und Schlammablaßventil am Speicher und Absperrvorrichtungen (meist Schieber) in den Zuleitungen. — Da der Ladezustand durch den Wasserstand im Speicher gekennzeichnet ist, wird außer einer gewöhnlichen Anzeigevorrichtung noch ein Fern-

instrument für das Kesselhaus vorgesehen. Dadurch ist man imstande, die Feuerführung der Kessel nach der verfügbaren Heißwassermenge im Speicher einzustellen, da der unveränderlich gehaltene Kesseldruck kein Maß mehr für die Änderungen

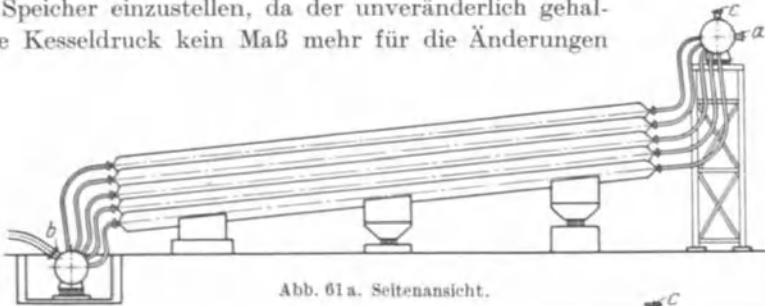


Abb. 61 a. Seitenansicht.

Abb. 61 a und b. Kießelbach-Gleichdruckspeicher, als Vielrohrspeicher ausgeführt (Kiwa, Essen).

der Belastung ist. Weiterhin sind Manometer und Thermometer am Speicher vorhanden.

Bei höchsten Kesseldrücken macht die Ausführung der Behälter Schwierigkeiten, da ein großes Speichervolumen zu übermäßigen Wandstärken führen würde. Ein gangbarer Weg wurde durch Unterteilung des Speicherinhaltes auf zahlreiche nahtlose Röhren von ca. 500 mm Durchmesser und bis zu 20 m Länge gefunden. Den Aufbau dieses Vielrohrspeichers, der im übrigen in gleicher Weise geschaltet wird, zeigt Abb. 61.

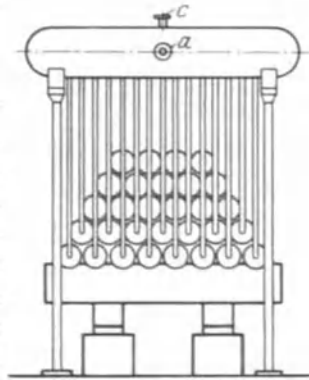


Abb. 61 b. Vorderansicht.

Von den weiteren Ausführungsarten ist die Schaltung von Christians hervorzuheben, der die Verbindung zwischen Kessel und Speicher durch 2 wechselnd betriebene Pumpen herstellt (Abb. 62). Der Kesseldruck wirkt hier direkt auf die Heißwasserbewegung ein, indem bei steigender Belastung die Pumpe P_1 den Kessel mit vorgewärmtem Speisewasser versorgt. Bei niedrigem Dampfbedarf führt die Pumpe P_2 das überschüssig vorgewärmte Wasser in den Speicher ab. Die Zuleitung von nicht vorgewärmtem Speisewasser wird durch den unverändert gehaltenen Wasserstand im Kessel geregelt. Der Speicher-

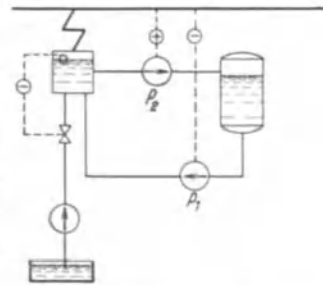


Abb. 62. Schaltbild des Christians-Gleichdruckspeichers.

vorgang selbst unterscheidet sich in keiner Weise vom Kießelbach-System, das gegenüber der Ausführung nach Christians durch die dauernde Umwälzung des Heißwassers den Vorteil bietet, daß die Speisung mit wechselnden Temperaturen sich weniger stark auf den Kessel auswirkt.

Frischdampf vorgewärmt. Die Regelung der zum Speicher fließenden Dampfmenge wird durch ein Überströmventil V_1 abhängig vom Kessel-
druck durchgeführt (ähnlich wie beim Ruths-Gefällespeicher). Auch die
Speisewasserzufuhr wird durch ein Ventil V_2 mit Überströrimpuls, ab-
hängig vom Druck oder der Temperatur im Vorwärmer, geregelt, um
dauernd die zum Mischvorwärmer fließenden Dampf- und Speisewasser-
mengen im selben Verhältnis zu halten und Heißwasser von unver-
änderter Temperatur zu bilden. Ist die vom Kessel aufgenommene
Wärme zur Deckung des Dampfbedarfes ausreichend, so läßt der Regler

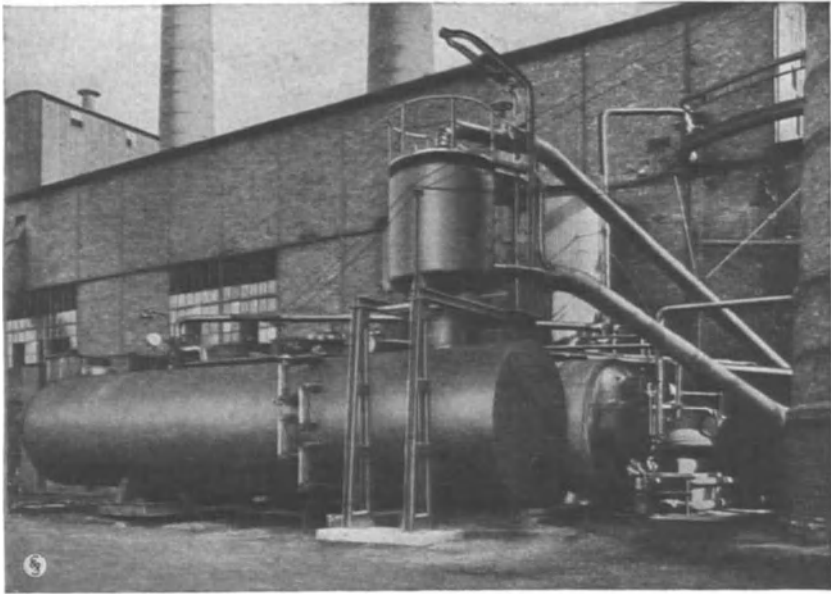


Abb. 64. Ansicht einer Ruths-Gleichdruckspeicheranlage.

gerade diejenige Dampfmenge zur Speicheranlage fließen, die zur Vor-
wärmung der unverändert in den Kessel gespeisten Wassermenge aus-
reicht. Bei erhöhtem Dampfbedarf wird infolge des steigenden Kessel-
druckes die Dampfzufuhr zur Speicheranlage gedrosselt und, im Grenz-
fall der größten Leistungsfähigkeit, ganz abgestellt. Die Versorgung des
Kessels mit Heißwasser verursacht die Entladung des Speichers. Die
Kesselspeisung wird in normaler Weise von einem Wasserstands-
regler V_3 geregelt.

Die Speicheranlage besteht aus dem zylindrischen Behälter in liegen-
der Bauart und dem Mischvorwärmer, der unmittelbar auf dem Speicher
(42) angebracht werden kann (Abb. 64). Der Ladezustand wird durch
Wasserstandsanzeiger über die ganze Höhe angegeben.

Auch bei der Vorwärmung durch Dampf wird das Speisewasser, den Bedarfsschwankungen entsprechend, unregelmäßig zum Vorwärmer geführt. Sind die Kessel mit Ekonomiser ausgerüstet, so werden diese daher von wechselnden Wassermengen durchflossen, wodurch

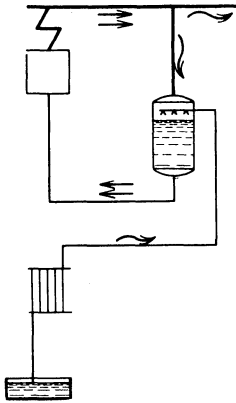


Abb. 65a. Ekonomiser vor dem Speicher.

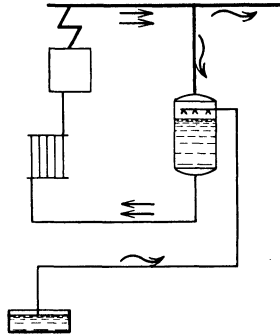
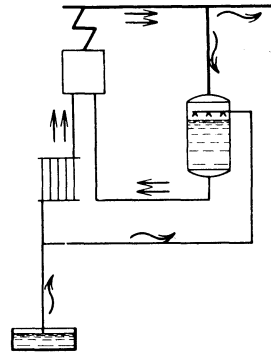


Abb. 65b. Ekonomiser nach dem Speicher.



≡≡≡ gleichmäßiger Durchfluß
 ~~~~~ schwankender

Abb. 65c. Ekonomiser parallel zum Speicher.

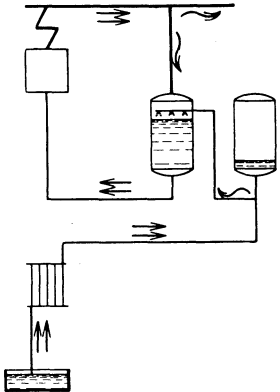


Abb. 65d. Ausgleich durch zweiten Speicherbehälter.

Abb. 65a bis d. Schaltungen des Gleichdruckspeichers in Anlagen mit Ekonomiser.

unter Umständen stark schwankende Temperaturen des Speisewassers entstehen. Insbesondere wird bei stark herabgesetzter oder abgestellter Speisung Dampf- und Durchbrennen des Ekonomiser eintreten können. Man kann jedoch Maßnahmen treffen, die ein gleichmäßiges

Durchfließen des Ekonomisers erzielen. Grundsätzlich können die in Abb. 65 aufgezeichneten Schaltungen durchgeführt werden. Ist es möglich, den Ekonomiser nach dem

Gleichdruckspeicher oder parallel zu diesem zu schalten, so treten die Schwankungen im Ekonomiser nicht auf, da die Heißwasserzufuhr zum Kessel dauernd in gleicher Höhe bleibt. Meist wird in einfacher Weise der

besonderen Speicherbehälter für das vom Ekonomiser kommende Speisewasser erreicht.

Das Zusammenarbeiten der beiden Speicherbehälter erfolgt dabei immer so, daß sich die Wasserinhalte dem Gewicht nach in gleichem Maße entgegengesetzt verändern. Der Ausgleichsbehälter muß zur Aufnahme desselben Wassergewichtes ausreichen, wie der Speicherbehälter selbst. Sein Volumen erhält man daher einfach

unter Berücksichtigung des größeren spezifischen Gewichtes bei der niedrigeren Temperatur nach dem Austritt aus dem Ekonomiser. Beim Ladevorgang wird mehr Speisewasser zum Vorwärmer geleitet, als gleichmäßig vom Ekonomiser zuströmt. Die zusätzliche Menge wird dem Ausgleichsbehälter entnommen und zusammen mit dem niedergeschlagenen Dampf in den Speicher geladen. Umgekehrt vergrößert sich bei der Entladung der Inhalt des Ausgleichsbehälters und verkleinert sich derjenige des Speichers. Hierauf begründet sich die Möglichkeit, beide Behälter in einem zu vereinigen, wovon beim Verdrängungs-Gleichdruckspeicher Gebrauch gemacht wird.

Die Einordnung eines Verdrängungs-speichers zeigt Abb. 66. Es sind 3 Pumpen nötig, von denen zwei durch den Speichervorgang nicht beeinflusst werden.  $P_1$  fördert gleichmäßig Speisewasser aus dem Sammelbehälter durch den Ekonomiser und  $P_3$  aus dem Speicher Heißwasser in den Kessel. Sie können daher auch auf einer Welle gemeinsam von einer Maschine angetrieben werden. Die Leistung der Umwälzpumpe  $P_2$  wird durch das Ventil  $V_2$  geregelt und zwar abhängig vom Kessel-druck. Solange dieser unverändert ist, leitet  $P_2$  dieselbe Menge, die durch  $P_1$  geliefert wird, weiter zum Speicher, in dessen oberem Teil der Mischvorwärmer eingebaut ist. Das beim Niederschlagen des Dampfes entstehende Heißwasser wird von  $P_3$  wieder dem Speicher entnommen. Verändert der Regler die umgewälzte Wassermenge, so wird durch Zu- oder Abfließen im unteren Teil des Speichers die von  $P_1$  angelieferte Speisewassermenge an die Leistung von  $P_2$  angepaßt. Dabei fließt bei niedriger Belastung immer so viel kälteres Wasser aus dem Speicher hinzu, als im Mischwärmer durch Niederschlagen der größeren Dampfmenge an Heißwasser mehrerzeugt wird. Die Grenzschicht zwischen dem oben befindlichen heißeren Wasser und dem kälteren unten wandert abwärts. Der Speicher wird geladen. Erhöht sich der Dampfbedarf, so schließt  $V_2$  und der Überschuß an Speisewasser aus dem Ekonomiser wird von unten in den Speicher gedrückt, während zur Ergänzung der vom Mischwärmer erzeugten Heißwassermenge oben in gleichem Maße aus dem Speichervorrat heißes Wasser entnommen wird.

Dabei bleibt der Wasserstand im Speicher dauernd auf gleicher Höhe, da ja die Pumpe  $P_3$  stets die mittlere Wassermenge zur Kessel-speisung dem Speicher entzieht, die durch  $P_1$  zugeführt wird. Die Um-

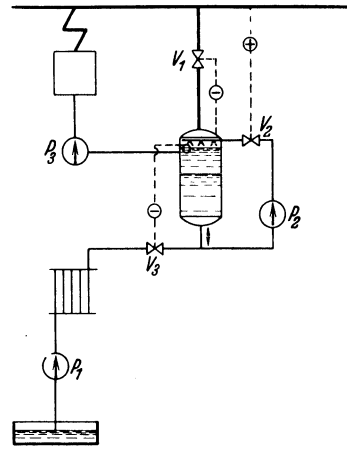


Abb. 66. Schaltbild des Verdrängungs-Gleichdruckspeichers.

wälzpumpe  $P_2$  lagert gewissermaßen darüber einen geschlossenen Kreislauf, indem sie je nach der mehr oder weniger anfallenden Dampfmenge zusätzlich kälteres Wasser aus dem Speicher unten ent-

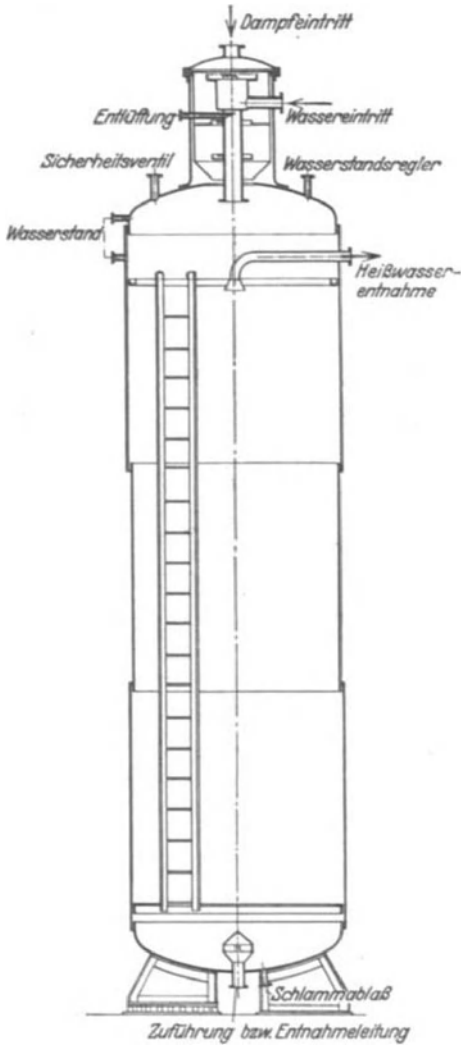


Abb. 67. Aufbau des Verdrängungs-Gleichdruckspeichers (Kraftanlagen A.-G., Heidelberg).

nimmt und vorgewärmt oben zuführt oder durch geringere Leistung als die anderen Pumpen bewirkt, daß der Vorrat an heißerem Wasser ab- und an kälterem zunimmt. Das Ventil  $V_3$  regelt den Wasserstand im Speicher.

Die Grenzschicht zwischen kälterem und heißerem Wasser, zwischen welchen ein Temperaturunterschied von etwa 50 bis 150° C bestehen kann, wandert also während einer Speicherperiode über die gesamte Speicherhöhe. Ein Wärmeaustausch findet nur in geringem Maße statt, solange die Trennungsfäche nicht verhältnismäßig groß ist. Da sich beim liegenden Behälter eine vielfach größere Trennungsfäche ergibt und Undichtigkeiten leichter auftreten können, wird der Verdrängungsspeicher durchweg als stehender Behälter (Abb. 67) ausgeführt. Der Mischvorwärmer findet entweder im obersten Teil oder in einem domartigen Aufbau Platz. Die Ansicht eines Speichers (22) zeigt Abb. 68.

Für die Messung des Ladezustandes bietet die Höhe des Wasserstandes keinen Anhaltspunkt mehr, da nur die Trennungsfäche ihre Lage mit dem Heißwasservorrat verändert. Unmittelbar lassen sich die Bewegungen

der Grenzschicht nur durch Temperaturmessung über die ganze Höhe des Speichers verfolgen. Dazu werden Thermolemente oder elektrische Widerstandsthermometer benutzt, die mit ca. 1 m Abstand über die Speicherhöhe verteilt werden und direkt die Lage der Grenzschicht auf einem Zeigerinstrument angeben. Dieses wird im

Kesselhaus aufgestellt, um die Feuerführung nach dem Speicherzustand richten zu können. Die übrigen Armaturen werden wie bei den anderen Dampfspeicherarten ausgeführt.

#### 4. Vorwärmung mit Gegendruckdampf.

Die verschiedenen Möglichkeiten der Gleichdruckspeicherung mit Dampf, der bereits in Kraftmaschinen zur Leistungserzeugung ausgenutzt wurde, können gemeinsam betrachtet werden, da sie die Speicherwirkung in gleicher Weise beeinflussen. In Hochdruckanlagen wird der Speicher für einen niedrigeren Betriebsdruck als die Kessel ausgelegt, da die Anlagekosten stärker mit dem Druck anwachsen als die erzielte Zunahme an Speicherfähigkeit. Dann ermöglicht vor allem die Vorwärmung des Speisewassers mit Gegendruckdampf (Regenerativverfahren) in Anlagen, die ausschließlich oder hauptsächlich zur Krafterzeugung dienen, einen besseren Wirkungsgrad als im Kondensationsverfahren. Schließlich erfordert auch die Angleichung des verschiedenen schwankenden Kraft- und Heizdampfbedarfes und die Abdampfspeicherung den Anschluß des Gleichdruckspeichers an ein Niederdrucknetz. Verglichen mit der oben dargestellten Vorwärmung mit Frischdampf ergibt sich grundsätzlich in jedem dieser Fälle die gleiche Veränderung des Speichervorganges, für die der einfache Gegendruckbetrieb kennzeichnend ist.

Die Einschaltung des Gleichdruckspeichers ist in Abb. 69 vereinfacht dargestellt (ohne Rauchgasvorwärmer und Ausgleichsbehälter bzw. Verdrängungssystem). Das Speisewasser wird im Speicher durch



Abb. 68. Ansicht eines Verdrängungs-Gleichdruckspeichers (Kraftanlagen A.-G., Heidelberg).

Gegendruckdampf vorgewärmt und der Kessel ständig mit Heißwasser aus dem Speicher versorgt. Die Wasserzufuhr zum Speicher kann abhängig vom Druck im Gegendrucknetz, die Zufuhr zum Kessel vom Wasserstand geregelt werden. Die vom Kessel erzeugte Dampfmenge durchfließt die Gegendruckmaschine und verteilt sich dann auf Niederdruckverbraucher und Speicher. Die Speicherwirkung tritt also nur beim Verbrauch an Gegendruckdampf auf, dessen Schwankungen an den Verlauf des Kraftverbrauches angeglichen werden. Solange die anfallenden Dampfmen gen gleich dem Heizdampfverbrauch einschließlich Vorwärmung der in den Kessel gespeisten Wassermenge sind, greift der Speicher nicht ein. Überschuß an Gegendruckdampf dient zur

Vorwärmung einer zusätzlichen Speisewassermenge, während bei erhöhtem Bedarf an Heizdampf die Dampfzufuhr zum Speicher entsprechend verringert wird. Schwankungen im Hochdruckverbrauch können gleichzeitig ausgeglichen werden, sofern eine Verbindung beider Netze durch ein Regelventil (gestrichelt eingezeichnet) hergestellt wird. Die Speicherwirkung stimmt dann mit der oben beschriebenen bei Vorwärmung mit Frischdampf vollständig überein.

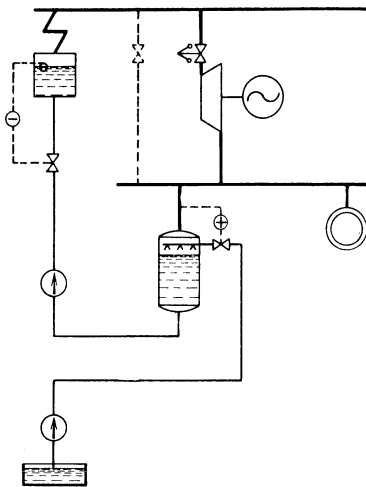


Abb. 69. Prinzipielles Schaltbild des Gleichdruckspeichers mit Vorwärmung durch Gegendruckdampf.

In Dampfanlagen mit mehreren Verbrauchernetzen muß daher, ähnlich wie beim Gefällespeicher, bei der Einordnung des Gleichdruckspeichers auf die erzielbare Leistungsausbeute, die Speicherfähigkeit und

die Anlagekosten Rücksicht genommen werden. Hinzu kommt hier noch der Einfluß des Betriebsdruckes auf die Leistungsfähigkeit der Speicheranlage. Um die auftretenden Schwankungen vollständig ausgleichen zu können, ist meist der Anschluß des Speichers an das Frischdampfnetz bis etwa 20 at erforderlich. Nur wenn das Speisewasser mit besonders niedrigen Temperaturen zur Verfügung steht, wie in Anlagen ohne Kondensatrückgewinnung oder Rauchgasvorwärmung, kann der Speicher an ein Niederdrucknetz angeschlossen werden.

Besonders wichtig für die Gleichdruckspeicherung ist die Verbindung mit dem Regenerativverfahren in Kraftanlagen geworden. Man erzielt grundsätzlich denselben Vorteil wie beim Gegendruckbetrieb; die Speisewasservorwärmung wirkt dabei wie Heizdampfverbraucher.



Um die Vorwärmung möglichst hoch treiben zu können und andererseits einen Gefälleverlust zu vermeiden, muß den Kraftmaschinen Dampf von verschiedenem Druck, im Idealfall, an unendlich vielen Anzapfstellen entnommen werden. Praktisch werden jedoch höchstens drei bis vier Stufen der Vorwärmung vorgesehen. Durch die stufenweise Vorwärmung wird am Speichervorgang nichts verändert, jedoch sowohl die Speicherfähigkeit, als auch die größte Leistungsfähigkeit beeinträchtigt. Die Schaltung des Gleichdruckspeichers bei zwei Anzapfstufen zeigt Abb. 70. Das Speisewasser wird in zwei Oberflächenvorwärmern mit Anzapfdampf erwärmt und durch Frischdampf im Mischvorwärmer im Speicher auf die Endtemperatur gebracht. Die dem Speicher zugeführte Wassermenge wird entsprechend dem Dampfbedarf ebenso wie beim Frischdampfspeicher geregelt. Sind noch Economiser vor dem Speicher geschaltet, so kann dieser als Verdrängungsspeicher ausgebildet werden.

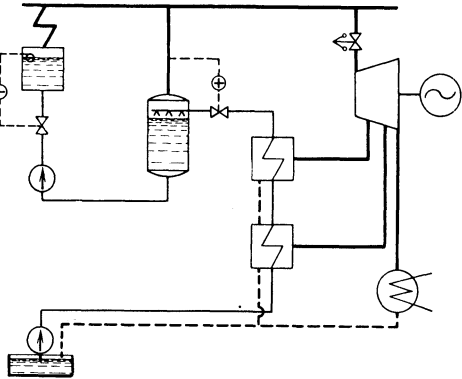


Abb. 70. Schaltung des Gleichdruckspeichers in Anlagen mit Regenerativvorwärmung.

Die dem Speicher zugeführte Wassermenge wird entsprechend dem Dampfbedarf ebenso wie beim Frischdampfspeicher geregelt. Sind noch Economiser vor dem Speicher geschaltet, so kann dieser als Verdrängungsspeicher ausgebildet werden.

Die stufenweise Vorwärmung kann nach neueren Vorschlägen (38) auch zur stufenweisen Speicherung ausgenutzt werden, wie die in Abb. 71 dargestellte Schaltung zeigt. Der Speicher wird in mehrere Behälter aufgeteilt, die nur für den Anzapfdampf der betreffenden Stufe gebaut zu werden brauchen. Da bei gleichem Gesamtvolumen und gleicher Speicherwirkung der Speicherdruck teilweise herabgesetzt werden könnte, ergibt sich eine Verbilligung der Speicheranlage. Voraussetzung ist allerdings, daß die Anlage so groß ist, daß die Zahl der Behälter dabei nicht vermehrt werden muß.

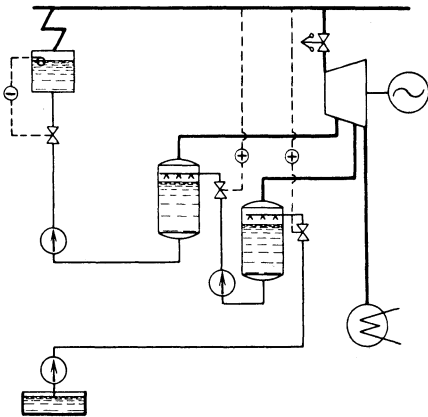


Abb. 71. Zweistufige Gleichdruckspeicherung in Anlagen mit Regenerativvorwärmung.

Für die Speicherung von schwankend anfallendem Abdampf wurde eine besondere Bauart ausgebildet. Grundsätzlich bietet die Schaltung (s. Abb. 72) und Wirkungsweise nichts Neues. Die niedrigere Temperatur,

auf die das Speisewasser mit Abdampf gebracht werden kann, begrenzt die Anwendung dieser Ausführungsart auf Anlagen mit Speisewassertemperaturen von höchstens  $50^{\circ}\text{C}$ . Um die kurzzeitigen Dampfstöße von sehr großer Leistung aufnehmen zu können, müßte die Speisewasserpumpe übermäßig dimensioniert werden. Man vermeidet das durch einen über dem Speicher angebrachten Behälter, in den gleichmäßig von einer Pumpe mittlerer Leistung das Wasser gefördert wird. In die Verbindungsleitung zum Speicher ist ein Regelventil geschaltet, das besonders empfindlich auf die beim stoß-

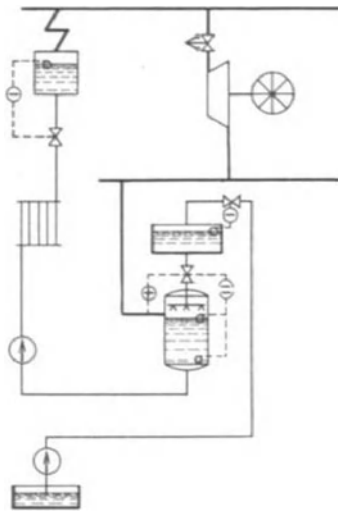


Abb. 72. Schaltung des Gleichdruckspeichers für stoßweise anfallenden Abdampf.

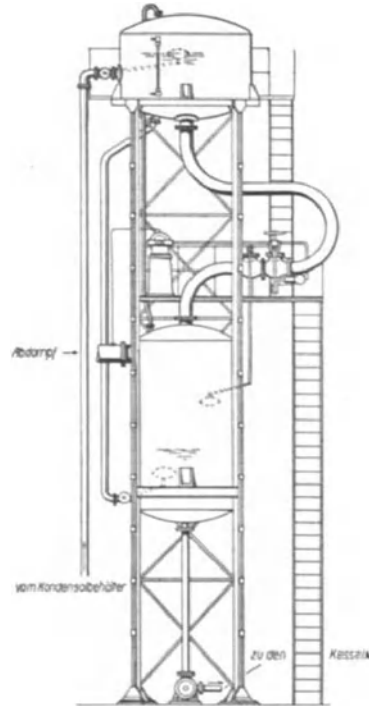


Abb. 73. Aufbau des Gleichdruckspeichers für stoßweise anfallenden Abdampf (Kraftanlagen A-G., Heidelberg).

weisen Anfall des Abdampfes auftretenden Drucksteigerungen anspricht. Damit sind die zum Niederschlagen des Dampfes nötigen großen Wassermengen sofort verfügbar. Den Aufbau des Abdampfspeichers zeigt Abb. 73. Zum Ausgleich der Schwankungen im Frischdampf kann gleichzeitig ein zweiter Speicher am Kesselnetz angeschlossen werden. Man erhält so eine Schaltung der Anlage (s. Abb. 74), die der zweistufigen Gleichdruckspeicherung entspricht.

### 5. Vereinigter Gefälle-Gleichdruckspeicher.

Durch die gegebenen Betriebsverhältnisse wird der Anteil an der gesamten Spitzenleistung, der vom Gleichdruckspeicher übernommen werden kann, beschränkt. Dagegen ist seine spezifische Speicherfähig-

keit meist bedeutend größer als die des Gefällespeichers, der wiederum fast unbegrenzt in der Leistungsfähigkeit ist. Es ist daher nahelegend, daß man beide Systeme zu vereinigen sucht, um die Dampfspeicherung in wirtschaftlichster Weise auszunutzen. Möglich ist dabei, entweder einen Speicher in zweierlei Weise wirken zu lassen oder zwei verschiedene Speicher gemeinsam zum Ausgleich der Schwankungen einzusetzen.

In beschränktem Maße findet sich schon beim Kiebelbach-Gleichdruckspeicher (s. S. 83) auch Gefällewirkung, da durch die Druckausgleichleitung der Dampfraum mit dem Kessel verbunden ist. Fällt also infolge erhöhter Belastung der Kesseldruck ab, so wird der Wasserinhalt des Speichers ebenso wie der des Kessels eine bestimmte Dampfmenge ausdampfen. Die Speicherefähigkeit der Kesselanlage nach dem Gefälleprinzip (s. S. 9) wird also durch den Gleichdruckspeicher erweitert. Da das Eingreifen des Speichers vom Kesseldruck, der die Speisewasserzufuhr regelt, abhängig ist, wird immer erst die Gleichdruckwirkung bis an die Grenze (also ausschließliche Heißwasserspeisung) ausgenutzt werden, bevor der Kesseldruck absinken kann.

Daher wird die Gefällewirkung erst für die höchsten Spitzen eingesetzt. Der verhältnismäßig kleine Druckabfall, der in den meisten Betrieben zugelassen werden kann, beschränkt jedoch den Ausgleich auf Spitzen von sehr kurzer Dauer.

In ähnlicher Weise wurde versucht, kurzzeitige Dampfstöße durch einen besonderen Speicher mit Gefällewirkung („Regelspeicher“) aufzunehmen, während der Ausgleich der Hauptschwankungen durch einen Gleichdruckspeicher bewirkt wird. Der Speicher ist, wie beim Rateau-Gefällespeicher, ohne besondere Druckregelung, die die Druckschwankungen im Speicher von den Verbrauchernetzen fernhalten könnte, arbeitet aber im viel höheren Druckgebiet des Gleichdruckspeichers. Auch die Einbauten (s. S. 31) sind besonders dazu ausgebildet, den ganzen Wasserinhalt gleichmäßig am Speichervorgang teilnehmen zu lassen und mit dem geringsten Druckverlust auszukommen.

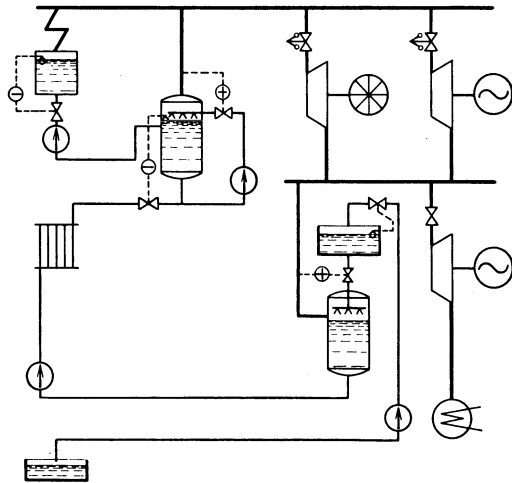


Abb. 74. Zweistufige Gleichdruckspeicherung für Frisch- und Abdampf.

Diese Schaltung stellt den Übergang zur ausgeprägten Vereinigung beider Systeme dar.

Die Vereinigung beider Speichersysteme in einer Anlage erfordert nur die zweckmäßige Einstellung der Regler, um das günstigste Zusammenarbeiten zu erzielen.

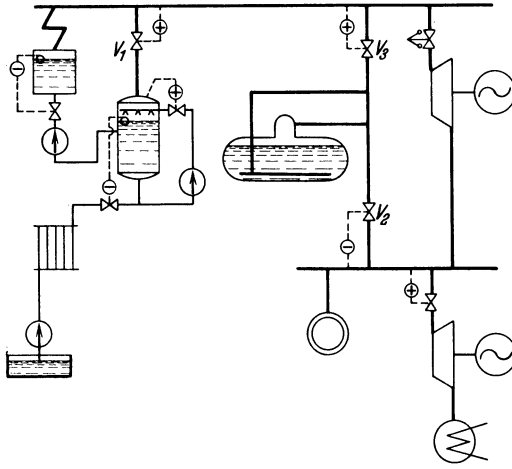


Abb. 75. Schaltbild für das Zusammenarbeiten von Gleichdruck- und Gefällespeicher in einer Anlage.

Die zu speichernden Dampfmen- gen werden so verteilt, daß zunächst der Gleichdruck- speicher bis zur Grenze seiner Leistungsfähigkeit ausgenutzt wird. Infolge der größeren Speicher- fähigkeit kann dieser Anteil der Ausgleichswirkung billiger als durch Gefälle- speicherung erzielt werden. Nur für die obersten Leistungsspitzen, die auch eine kürzere Ent- ladedauer erfordern, wird

der Gefällespeicher eingesetzt. Die Speicher selbst werden unverändert ausgeführt. In Abb. 75 ist die Schaltung grundsätzlich wiedergegeben,

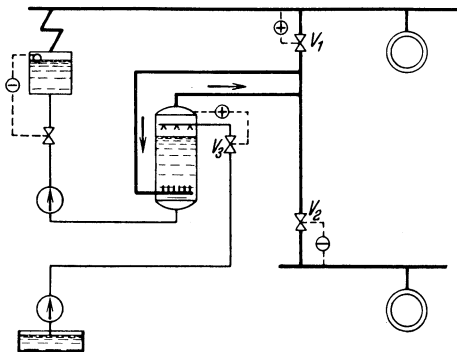


Abb. 76. Schaltung des vereinigten Gefälle- Gleichdruckspeichers.

wobei bei beiden Speicherarten die Ladung durch Überström- ventile (nach Ruths) geregelt wird. Übersteigt der Bedarf die Dampfleistung der Kessel, so wird zuerst die Dampfzufuhr zum Gleichdruckspeicher gedrosselt, bis bei vollständigem Schließen des Regelventils  $V_1$  die Grenze der von diesem Speicher zu deckenden Spitze erreicht ist. Dann erst wird die Entladung des Gefällespeichers durch ein Reduzierventil  $V_2$  (oder bei Entladung in Speicher- turbinen: durch die Turbinensteuerung) eingesetzt. Bei sinkender Be- lastung wirken die Regler in umgekehrter Reihenfolge. Die Ladung kann zweckmäßig mit dem Gefällespeicher durch das Überströmventil  $V_3$  begonnen werden, um dessen Dampfreserve längere Zeit zur Ver- fügung zu haben.

Bei sinkender Be- lastung wirken die Regler in umgekehrter Reihenfolge. Die Ladung kann zweckmäßig mit dem Gefällespeicher durch das Überströmventil  $V_3$  begonnen werden, um dessen Dampfreserve längere Zeit zur Ver- fügung zu haben.

Dieselbe Betriebsweise läßt sich auch dann durchführen, wenn in einem Speicher gleichzeitig beide Wirkungen nach dem Gleichdruck- und Gefälleprinzip ausgenutzt werden sollen. Die Schaltung des vereinigten Speichers zeigt Abb. 76. Zur Ladung des Speichers dient ein einziges Überströmventil  $V_1$ . Die Entladung als Gefällespeicher bewirkt ein Reduzierventil  $V_2$ , während durch den Speisewasserregler  $V_3$  die Gleichdruckspeicherung eingesetzt wird. Im geladenen Zustand enthält der Speicher Heißwasser bis zur oberen Grenze seines Fassungsvermögens. Sinkt der Kesseldruck bei erhöhter Belastung, so läßt das Ventil  $V_1$  weniger Dampf zum Speicher strömen als zur Vorwärmung der vom Kessel benötigten Speisewassermenge erforderlich wäre. Infolgedessen schließt auch  $V_3$  bis bei weiterem Lastanstieg die Dampf- und Speisewasserzufuhr zum Speicher vollständig eingestellt ist und die Gleichdruckspeicherung die größte Leistungsfähigkeit erreicht. Die Kesselspeisung wird, wie beim einfachen Gleichdruckspeicher, durch Entladung des Heißwasservorrates weitergeführt. Erst wenn die Belastung noch darüber hinaus ansteigt, wird durch Öffnen des Reglers  $V_3$  der Druck im Speicher sinken müssen und die Entladung zusätzlicher Dampfmengen, wie beim einfachen Gefällespeicher, eingeleitet. Die beiden Wirkungen beeinträchtigen sich gegenseitig, da einerseits durch die Verringerung des Wasserinhaltes auch die Speicherfähigkeit als Gefällespeicher herabgesetzt wird und andererseits der absinkende Druck die Leistungsfähigkeit als Gleichdruckspeicher verkleinert. Im Verlauf der zu deckenden Spitze wird der Anteil der Gleichdruckwirkung nach einem Höchstwert allmählich um so mehr abfallen, je niedriger die untere Druckgrenze im Speicher ist. — Im entladenen Zustand enthält der Speicher kein Speisewasser mehr (bis auf einen „toten Raum“, der zum Beginn der Dampfladung nötig ist). Da Anfangs- und Endzustand gegenüber dem einfachen Gleichdruckspeicher nicht verändert sind, muß auch die Wärmespeicherfähigkeit (in kcal/m<sup>3</sup>) dieselbe sein. Der Vorteil liegt ausschließlich in der Möglichkeit, durch gleichzeitige Gefällespeicherung die Begrenzung der Leistungsfähigkeit aufzuheben. — Die Ladung vollzieht sich — nachdem der restliche Inhalt wieder auf vollen Druck gebracht wurde — in gleicher Weise wie beim Gleichdruckspeicher.

## 6. Berechnung der Speicherwirkung.

Die Berechnung der gespeicherten Dampfmengen kann für alle Arten der Gleichdruckspeicherung von derselben Grundgleichung ausgehen, die weiter oben aus der prinzipiellen Wirkungsweise abgeleitet wurde. Dabei interessiert in erster Linie die Steigerung der Kesselleistung in kg/h, die als Grenzfall zu erzielen ist. Man kann diese als größte Leistungsfähigkeit der Speicheranlage bezeichnen, obwohl die

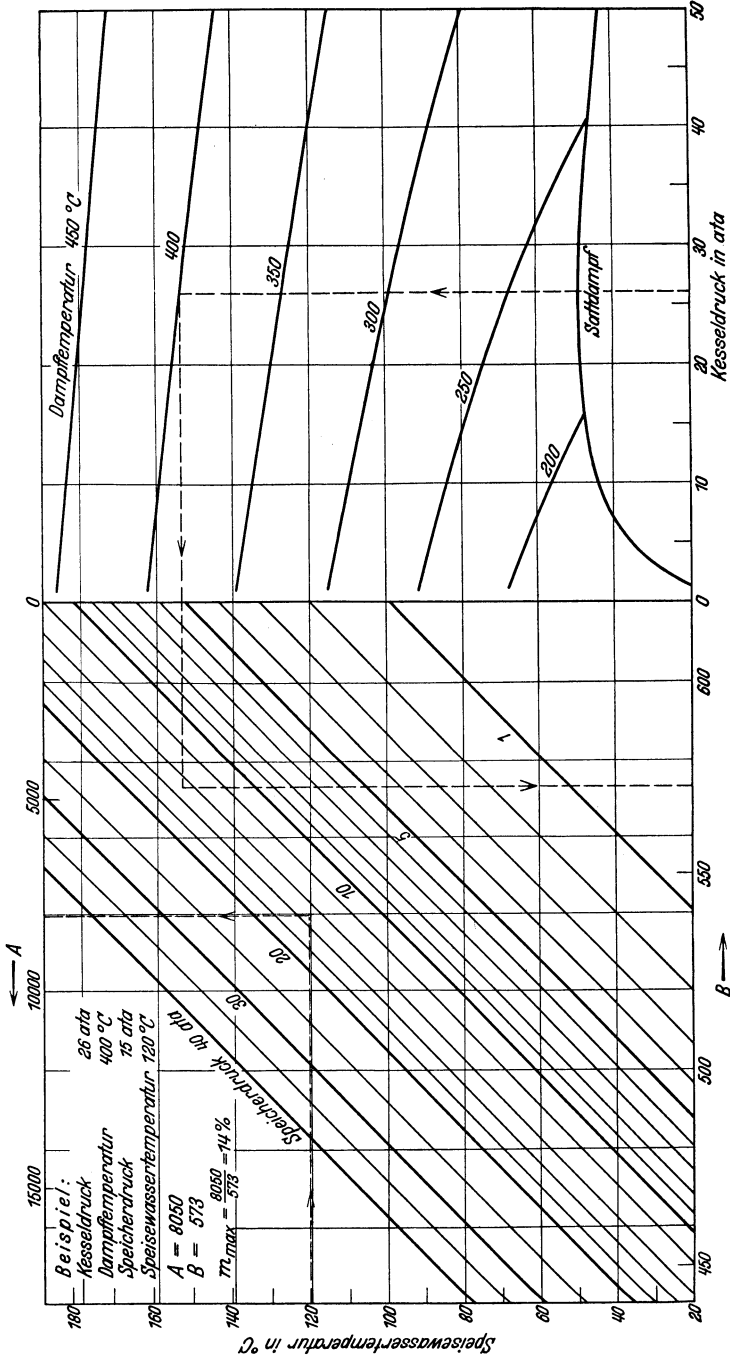


Abb. 77. Rechentafel zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Gleichdruckspeichern (größte Leistungsfähigkeit  $m_{max} = \frac{A}{B} \%$ ).

Dampferzeugung selbst im Kessel erfolgt. Im Gegensatz zum Gefälle-speicher kann die Leistungsfähigkeit des Gleichdruckspeichers nicht durch Vergrößerung des Speichervolumens beliebig gesteigert werden. Durch die Betriebsdaten der Kesselanlage und den Speicherdruck ist der Höchstwert der Leistungsfähigkeit beim Gleichdruckspeicher festgelegt.

Für den allgemeineren Fall, daß Kesseldruck und Speicherdruck nicht übereinstimmen, läßt sich die größte Leistungsfähigkeit bei

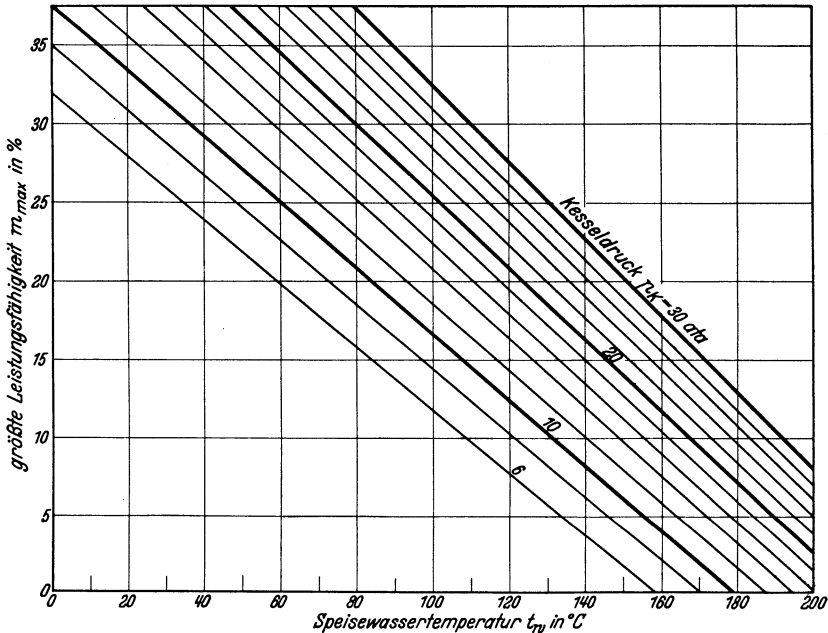


Abb. 78. Größte Leistungsfähigkeit von Gleichdruckspeichern mit Vorwärmung im Kessel.

Speisung mit Heißwasser vom Wärmehalt  $i_h$  (kcal/kg) und bei einem Kesseldampf vom Wärmehalt  $i_d$  aus

$$m_{\max} = \frac{i_h - i_w}{i_d - i_h} \cdot 100 [\%]$$

bestimmen. Eine Rechentafel zur direkten Ablesung von  $m_{\max}$  bei gegebenen Kessel- und Speicherverhältnissen (Druck und Temperatur des Kesseldampfes, Speicherdruck und Speisewassertemperatur) ist in Abb. 77 aufgezeichnet.

Erfolgt die Vorwärmung im Kessel, so muß der Speicher mit demselben Druck wie der Kessel betrieben werden ( $p_s = p_k$ ). Da weiter die Überhitzungswärme ohne Einfluß auf die Leistungsfähigkeit bleibt, ist als  $i_d$  der Wärmehalt von Satttdampf einzusetzen. Die vereinfachte Beziehung für die Leistungsfähigkeit von Gleichdruckspeichern mit Vorwärmung des Speisewassers im Kessel zeigt Abb. 78.

Gleichzeitig läßt sich allgemein der Einfluß der Speisewassertemperatur  $t_w$  erkennen. Je höher diese liegt, um so kleiner wird die erreichbare Leistungsfähigkeit, die bei der Sättigungstemperatur des Kesseldruckes keine Speichermöglichkeit mehr ergibt. Die Spanne zwischen den Wärmehalten des heißen Speisewassers  $i_h$  und des kalten Speisewassers  $i_w$  wird also von letzterem besonders stark beeinflusst. Unter Umständen kann schon durch Veränderungen von  $t_w$  um 10 bis  $20^\circ\text{C}$  die Leistungsfähigkeit derart verändert werden, daß die wirtschaftliche Berechtigung der Gleichdruckspeicherung stark herabgesetzt wird. Die Vergrößerung des Speichervolumens hat, wie bereits erwähnt, keine Bedeutung für  $m_{\max}$ . Es sind durch die meist festliegenden Betriebsverhältnisse auch die Möglichkeiten der Gleichdruckspeicherung begrenzt. Die Speisewassertemperatur  $t_w$  kann je nach der Betriebsart in weiten Grenzen schwanken. Hauptsächlich ist sie davon abhängig, ob die restliche Wärme der Rauchgase zur Vorwärmung des Speisewassers oder der Verbrennungsluft ausgenutzt wird und mit welcher Temperatur bei Rückspeisung das Kondensat anfällt.

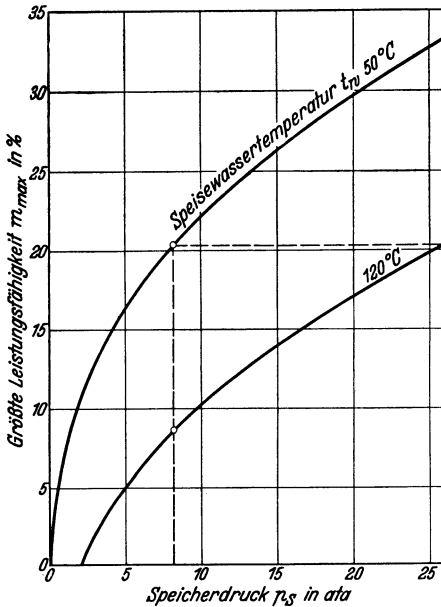


Abb. 79. Einfluß des Speicherdruckes auf die größte Leistungsfähigkeit von Gleichdruckspeichern. (Angenommen: Kesseldruck 26 ata Dampftemperatur  $400^\circ\text{C}$ .)

inhalt  $i_h$  des Heißwassers verändert werden und damit, wie Abb. 79 für ein bestimmtes Beispiel (Kesseldruck 26 ata, Dampftemperatur  $400^\circ\text{C}$ , Speisewassertemperatur 50 bzw.  $120^\circ\text{C}$ ) zeigt, ein wirksamer Einfluß auf die Leistungsfähigkeit erzielt werden. Da gleichzeitig auch das Speichervolumen infolge der vergrößerten spezifischen Speicherfähigkeit verkleinert werden kann, läßt sich wirtschaftlich meist die Erhöhung des Speicherdruckes rechtfertigen. Deutlich erkennbar ist aber auch der überragende Einfluß der Speisewassertemperatur  $t_w$ , durch deren Herabsetzung von  $120$  auf  $50^\circ\text{C}$  dieselbe Leistungssteigerung von 8,6 auf 20,3% erzielt wird, als durch Steigerung des Speicherdruckes von etwa 8 auf 26 ata. Daher wird praktisch immer zunächst die kleinstmögliche Speisewassertemperatur anzustreben sein, damit die mit



dem Speicherdruck anwachsenden Kosten der Anlage nicht zu hoch werden.

Schließlich interessiert noch die Bedeutung des Kesseldruckes  $p_k$ , wobei die zugehörigen Dampftemperaturen in üblicher Höhe angenommen werden. Für verschiedene Speisewassertemperaturen  $t_w$  ergibt sich das Kurvenbild Abb. 80, einerseits unter der Voraussetzung, daß der Speicherdruck gleich dem Kesseldruck gewählt wird. Zwar steigt mit höheren Drücken auch der Wärmehalt des Kesseldampfes  $i_d$  an, doch bleibt der Unterschied gegen den Wärmehalt des Heißwassers  $i_h$  annähernd gleich. Daher ist das Ansteigen der Differenz  $(i_h - i_w)$  ausschlaggebend, das eine allmählich flacher werdende Zunahme der Leistungsfähigkeit hervorruft. Wird dagegen angenommen, daß ein bestimmter Speicherdruck einzuhalten ist, so verringert der höhere Kesseldruck die Leistungsfähigkeit, wie die gestrichelt gezeichneten Kurven zeigen.

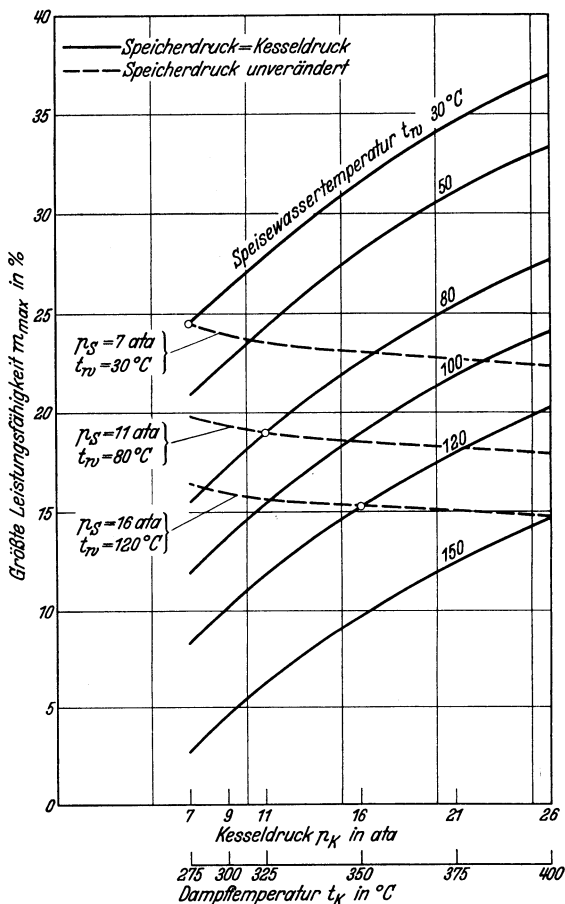


Abb. 80. Einfluß des Kesseldruckes auf die größte Leistungsfähigkeit von Gleichdruckspeichern.

Die gestrichelt gezeichneten Kurven zeigen, wie die Leistungsfähigkeit, wenn ein bestimmter Speicherdruck einzuhalten ist, mit dem Kesseldruck abnimmt.

Zur Bestimmung der spezifischen Speicherfähigkeit  $g_s$  kann man von der Wärmebilanz bei der Ladung oder der Entladung des Gleichdruckspeichers ausgehen. Je kg Wasserinhalt wird die Wärmemenge  $(i_h - i_w)$  kcal aufgespeichert, während zur Erzeugung von 1 kg Dampf insgesamt  $(i_d - i_w)$  kcal aufgebracht werden müssen. Mit Berücksichtigung des spezifischen Gewichtes des Heißwassers  $\gamma_h$  (in  $\text{kg/m}^3$ ) wird bei der Entladung die je  $1 \text{ m}^3$  Wasserinhalt mehrerzeugbare

Dampfmenge

$$g_s = \frac{i_h - i_w}{i_d - i_w} \cdot \gamma_h \text{ [kg/m}^3\text{]}.$$

Auch die Überlegung, daß im Grenzfall der Entladung die gesamte Kesselspeisung aus dem Speicher erfolgen muß, führt zum

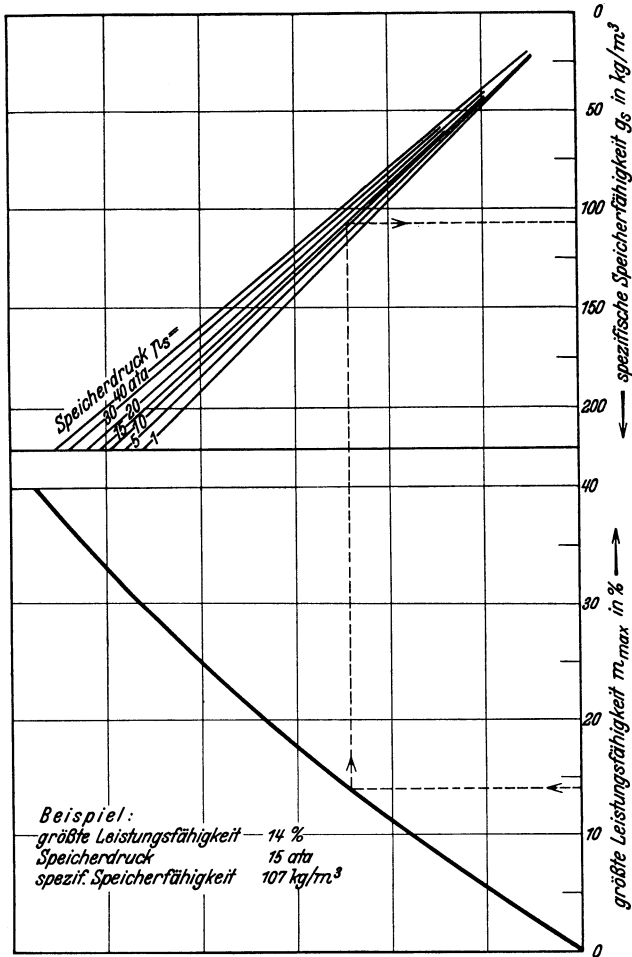


Abb. 81. Zusammenhang zwischen spezifischer Speicherfähigkeit und größter Leistungsfähigkeit von Gleichdruckspeichern.

gleichen Ergebnis. Um durch Leistungssteigerung der Kessel um  $m_{\text{max}}$  kg/h während  $z$  Stunden die Dampfmenge  $m_{\text{max}} \cdot z$  kg zusätzlich zu erzeugen, muß die gespeiste Wassermenge für die gesamte Kesselleistung  $(1 + m_{\text{max}})$  kg/h ausreichen, also  $(1 + m_{\text{max}}) \cdot z$  kg oder  $(1 + m_{\text{max}}) \cdot \frac{z}{\gamma_h}$   $\text{m}^3$  betragen. Also kann je 1  $\text{m}^3$  Wasserinhalt eine Dampf-

menge

$$g_s = \frac{m_{\max}}{1 + m_{\max}} \cdot \gamma_h \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

gespeichert werden, woraus sich nach Einsetzen des Ausdrucks für  $m_{\max}$  wieder dieselbe Form bilden läßt. Da die größte Leistungsfähigkeit  $m_{\max}$  als bekannt vorausgesetzt werden kann (aus Abb. 77), läßt sich damit, ohne nochmals die Wärmehalte festzustellen, auch die spezifische Speicherfähigkeit bestimmen; wozu Rechentafel Abb. 81 benutzt werden kann. Der Speicherdruck wirkt sich durch geringeres

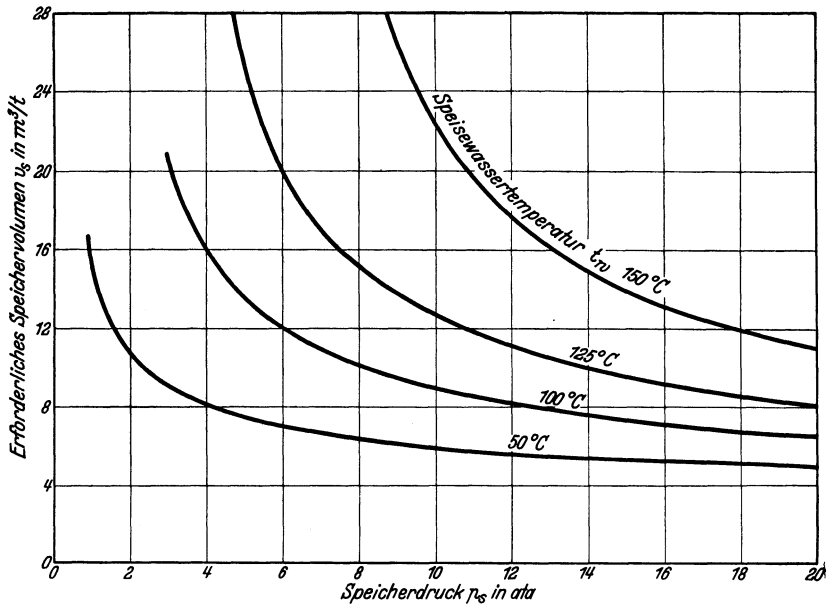


Abb. 82. Spezifisches Speichervolumen von Gleichdruckspeichern für 1000 kg Dampf.

spezifisches Gewicht erst bei höheren Drücken merkbar auf das Ergebnis aus.

Damit läßt sich nun auch das spezifische Speichervolumen für 1000 kg Dampf ermitteln, das für gegebene Verhältnisse einen klaren Vergleich mit anderen Speicherarten zuläßt. Abb. 82 zeigt den kennzeichnenden Verlauf für die Abhängigkeit vom Speicherdruck bei verschiedenen Speisewassertemperaturen, wobei angenommen wurde, daß der Kesseldruck 21 ata und die Dampftemperatur  $350^\circ\text{C}$  beträgt.

Auf Grund der allgemeingültigen Zusammenhänge soll nun noch die Berechnung der Speicherwirkung für jeden beliebigen Belastungsfall abgeleitet werden, um in einfacher Weise die jeweils vorgewärmten Wassermengen und gespeicherten Dampfmengen bestimmen zu können. Die Grenzfälle des Speicherbetriebes treten bei Abstellung der Speise-

wasservorwärmung (größte Dampfleistung) und Abstellung der nutzbar abgegebenen Dampferzeugung (größte Wasservorwärmung) auf. Dazwischen liegen alle möglichen Betriebsfälle, bei denen der Gleichdruckspeicher mehr oder weniger geladen oder entladen wird, also eine beliebig große Wassermenge vorgewärmt wird. Abb. 83 gibt das Be-

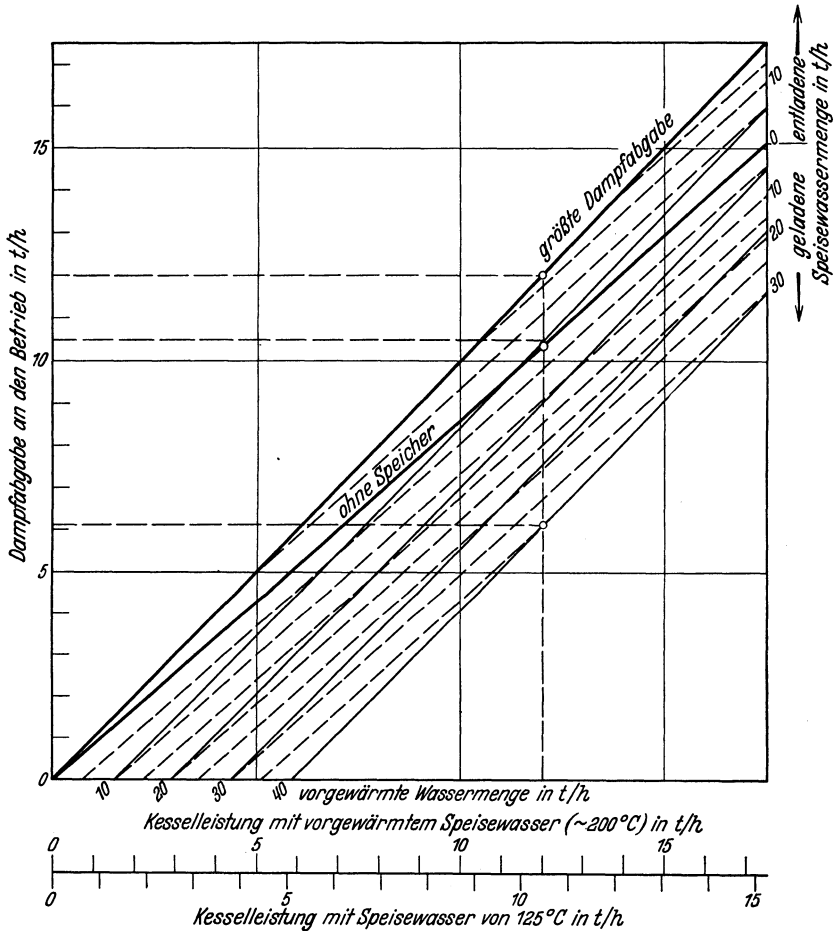


Abb. 83. Betriebsdiagramm eines Gleichdruckspeichers. Ausgleichsbereich und vorgewärmte Wassermenge bei beliebiger Kesselbelastung.

triebsdiagramm für Gleichdruckspeicherung bei Vorwärmung mit Dampf wieder; bei Zusammenarbeiten mit Kesseln für 15 atü Druck und 300° C Dampf­temperatur. Das Speisewasser von 125° C wird im Speicher auf ca. 200° C [14,5 atü] vorgewärmt. Durch die Vorwärmung wird die Dampf­abgabe z. B. von 10,5 t/h bei 125° C auf 12 t/h bei 200° C gesteigert. Je nach dem Anteil, der davon zur Wasservorwärmung bestimmt wird, kann die an den Betrieb abgegebene Dampf-

menge in weiten Grenzen schwanken. Die obere bedeutet, daß kein Wasser vorgewärmt wird, also die gesamten 12 t/h für den Betrieb zur Verfügung stehen. Die Versorgung der Kessel mit Heißwasser erfolgt aus dem Vorrat des Gleichdruckspeichers, der dabei entladen wird und zwar mit derselben Menge von 12 t/h. Jedem Betriebsfall bei unveränderter Kesselleistung entspricht ein Punkt auf der Senkrechten, z. B. wird bei einer Dampfabgabe an den Betrieb von nur 10,5 t/h eine Dampfmenge von 1,5 t/h in den Speicher geführt, wodurch 10,5 t/h Speisewasser vorgewärmt werden. Das Diagramm zeigt auch deutlich, daß in jedem Fall die gesamte Dampfmenge zur Wasservorwärmung verwendet werden könnte, sobald die Belastung auf Null sinkt. Allerdings muß bei hoher Kesselleistung dann derartig viel Speisewasser zum Speicher geführt werden, daß meist die Leistung der Speisepumpen hierzu nicht ausreicht.

Schwieriger wird die Berechnung der Speicherwirkung, sobald die Gleichdruckspeicherung mit dem Regenerativverfahren verbunden wird. Die Vorwärmung wird durch Dampf vorgenommen, der bereits zur Leistungserzeugung herangezogen wurde. Die Leistungsfähigkeit der Speicheranlage wird also nicht mehr durch die Dampfmenge allein gekennzeichnet, die bei Abstellung der Vorwärmung zusätzlich zur Verfügung steht. Es muß vielmehr die verschiedene Arbeitsfähigkeit mitberücksichtigt werden, also entweder

durch Angabe des Wärmegefälles oder der elektrischen Leistung. Werden in einem Diagramm (Abb. 84) die Dampfmenge als Abszissen und das ausnutzbare Wärmegefälle in den einzelnen Maschinenteilen als Ordinaten aufgetragen, so läßt sich die Verteilung der Dampfmenge bei den typischen Betriebsfällen verfolgen und die jeweilige Arbeitsfähigkeit feststellen. Bei normalem Betrieb, also ohne Inanspruchnahme des Speichers, wird z. B. bei 3 verschiedenen Drücken Dampf zur Speisewasservorwärmung entnommen. Dann ist mit den durch Abb. 84 gegebenen Bezeichnungen

$$A_0 = D_1(i_0 - i_4) + D_2(i_0 - i_3) + D_3(i_0 - i_2) + D_4(i_0 - i_1) \text{ [kcal/h].}$$

Bei der Entladung kann die gesamte Dampfmenge in den nachgeschalteten Turbinenteilen eine Leistung mehr erzeugen, die durch die schraffierte Fläche  $A_E$  gekennzeichnet wird:

$$A_E = D_2(i_3 - i_4) + D_3(i_2 - i_4) + D_4(i_1 - i_4) \text{ [kcal/h].}$$

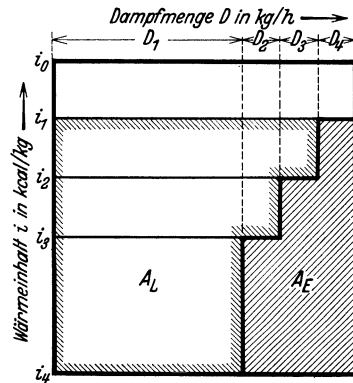


Abb. 84. Darstellung der Leistungsfähigkeit der Gleichdruckspeicherung beim Regenerativverfahren.

Durch das Verhältnis dieser Fläche zur restlichen wird die größte Leistungsfähigkeit des Speichers bestimmt:

$$m_{\max} = \frac{A_E}{A_0} \cdot 100 [\%].$$

Die Herabsetzung der abgegebenen Leistung bei der Ladung ist nur praktisch durch die Größe der Speisepumpen begrenzt. Theoretisch kann die gesamte Kesselleistung nach dem Hochdruckteil zur Speichervorladung ausgenutzt werden, also die Leistung ohne Änderung der Kesselheizung entsprechend der Fläche  $A_L$  verkleinert werden:

$$A_L = D_1 (i_1 - i_4) + D_2 (i_1 - i_3) + D_3 (i_1 - i_2) [\text{kcal}],$$

$$m_{\min} = \frac{A_0 - A_L}{A_0} \cdot 100 [\%].$$

Die Anteile der gesamten Kesselleistung, die in den einzelnen Stufen zur Speisewasservorwärmung angezapft werden können, bestimmen sich aus dem Verhältnis der Zunahme des Wärmeinhalts des Speisewassers zur Wärmeabgabe des niedergeschlagenen Dampfes, also z. B.

$$\frac{D_2}{\Sigma D} = \frac{i_3 - i_4}{i_3 - i_3'}.$$

Mit Berücksichtigung des Maschinenwirkungsgrades, der mit der wechselnden Belastung der Turbine veränderlich ist, kann in

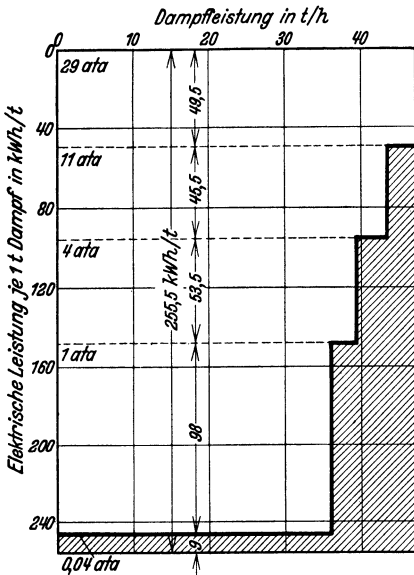


Abb. 85. Beispiel für die Ausgleichsfähigkeit der elektrischen Leistung durch Gleichdruckspeicherung in Anlagen mit Regenerativverfahren.

ähnlicher Weise unmittelbar die Ausgleichsfähigkeit der elektrischen Leistung abgelesen werden. Beispielsweise ist für folgende Anlage das Ausgleichsdiagramm in Abb. 85 aufgezeichnet: Die Kessel geben Dampf von 35 ata und 425° C ab, der mit 29 ata und 400° C in zwei Turbinen je 10000 kW geleitet wird. An 3 ungesteuerten Entnahmestellen wird Dampf zur Speisewasservorwärmung, die mit 11 ata im Mischvorwärmer am Speicher und mit 4 und 1 ata in 2 Oberflächenvorwärmern erfolgt, entzogen. Die Leistung der Maschinen erreicht den Höchstwert, sobald die Vorwärmung vollständig eingestellt wird, also die ganze Dampfmenge von 47 t/h, die von den Kesseln bei Speisung mit Heißwasser von 182,5° C abgegeben werden kann, bis auf Kondensatordruck von 0,04 ata arbeitet. Dabei können je 1 t Dampf 255,5 kWh

erzeugt werden, insgesamt also 12100 kW. Für den normalen Betrieb ohne Speicher gilt die von der treppenförmigen Linie eingeschlossene Fläche, die sich durch Abzug der bei den einzelnen Drücken angezapften Dampfmengen und infolge des etwas geringeren Wirkungsgrades gleich 10000 kW ergibt. Die größte Leistungsfähigkeit des Gleichdruckspeichers wird also 21% .

Könnte das Speisewasser ohne Regenerativverfahren, also nur durch den Gleichdruckspeicher, vorgewärmt werden, so wäre die größte Leistungsfähigkeit 25% bei gleicher Anfangstemperatur von 35° C. Die mit Regenerativbetrieb erzielten 21% entsprechen einer Speisewassertemperatur von 60° C. Da aber meist mittels Rauchgasvorwärmung eine bedeutend höhere Temperatur zu wählen wäre, ergibt die Verbindung mit dem Regenerativverfahren für die Gleichdruckspeicherung einen erweiterten Ausgleichsbereich. — Für andere Betriebsfälle kann in gleicher Weise wie für einfachen Speicherbetrieb (Abb. 83) ein Ausgleichsdiagramm aufgezeichnet werden, das die jeweils erzielbare elektrische Leistung und die durch Anzapfdampf vorgewärmte Speisewassermenge angibt.

## VII. Anwendung der Dampfspeicherung.

### 1. Schwankungen im Dampfbedarf.

Die Dampfspeicherung konnte erst größere Verbreitung finden, seitdem sich wärmewirtschaftliche Grundsätze immer stärker im praktischen Betrieb durchzusetzen begannen. Es mußte vor allem der wenig beachteten Tatsache mehr Gewicht beigemessen werden, daß der Dampfbedarf der meisten Verbraucher keineswegs über die ganze Arbeitszeit in gleicher Höhe bleibt, sondern sehr oft in weiten Grenzen schwankt. Andererseits hat gerade der Einbau einer Dampfspeicheranlage oft erst dazu geführt, daß ausreichende Dampfmengen zur Verfügung standen und durch die ungehemmte Produktion noch viel schärfer schwankende Dampfanforderungen auftraten. Die neuzeitliche Wärmewirtschaft baut zum großen Teil auf den hierdurch gewonnenen Erkenntnissen über den Belastungsverlauf und die Auswirkungen des unregelmäßigen Charakters auf.

Die Ursachen der Belastungsschwankungen lassen sich in den meisten Fällen eindeutig nachweisen. Ein vollständig gleichmäßiger Dampfverbrauch muß als nur theoretisch möglicher Idealfall betrachtet werden, da er voraussetzt, daß sämtliche Produktionsbetriebe ohne jegliche Pausen und kontinuierlich arbeiten können. Tatsächlich setzt sich das gesamte Belastungsdiagramm einer Dampfanlage aus einer großen Anzahl einzelner Verbraucher zusammen, von denen die meisten

nur zu bestimmten Zeiten und auch dann nicht ständig mit demselben Dampfbedarf betrieben werden. Die Hauptursachen des schwankenden

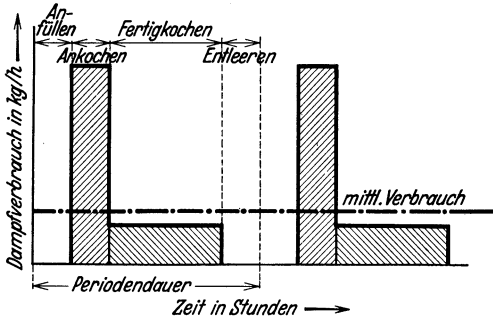


Abb. 86 a. Kochprozeß.

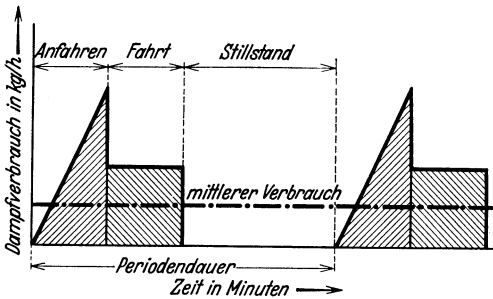


Abb. 86 b. Fördermaschine.

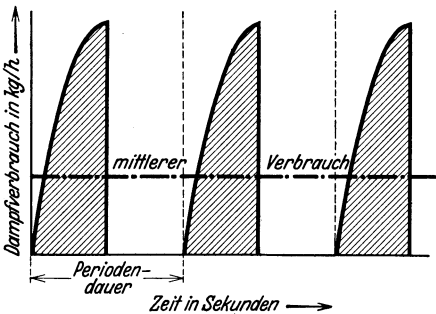


Abb. 86 c. Kolbenmaschine.

Abb. 86 a bis c. Kennzeichnende Formen des periodischen Dampfbedarfes.

Belastungsverlaufes sind:

1. Periodisch betriebene Einzelverbraucher.
2. Unregelmäßig einsetzende Einzelverbraucher.
3. Periodisch verlaufende Einflüsse der Umgebung.
4. Unvorhergesehene Betriebsfälle.

Für den Ausgleich durch Dampfspeicher sind die Schwankungen, die durch periodische Arbeitsweise der Produktionsmittel entstehen, darum am wichtigsten, weil die Dauer der Perioden einen Tag meist nicht überschreiten. Kochprozesse, wie sie z. B. bei der Herstellung von Zellstoff auftreten, benötigen einen Zeitraum von insgesamt etwa 20 Stunden. Je nach dem Produkt und der Größe der Kochapparate sind die Periodendauern sehr verschieden, jedoch zerfällt der kennzeichnende Verlauf des Dampfbedarfes fast stets in drei ausgeprägte Teile (Abb. 86a): Solange die Kocher entleert und nachgefüllt werden, wird kein Dampf gebraucht. Zum Anwärmen und Ankochen des

Kochgutes wird die Dampfzufuhr bis zur technologisch zulässigen Grenze gesteigert, da meist die eigentlichen Produktionsvorgänge erst einsetzen, wenn die notwendige Temperatur erreicht ist. Dann aber wird der Dampf nur zum Ersatz der Wärmeverluste benötigt, so daß die Zufuhr stark herabgesetzt werden kann. — Im Kraftverbrauch treten ähnliche periodische Vorgänge beim Antrieb von Beförderungs-



maschinen aller Art (z. B. Fördermaschinen, Walzenzugmaschinen) auf. Auch hier finden sich in ähnlicher Weise drei Teile der Periode (Abb. 86b): Stillstand — größter Verbrauch zur Überwindung der Trägheit, bis die erforderliche Geschwindigkeit erreicht ist — herabgesetzter Verbrauch während der Fahrt zur Überwindung der Reibungsverluste. Die Anfahrspitzen, die sich im Gesamtdiagramm am deutlichsten ausprägen, haben meist nur eine Dauer von einigen Minuten. — Schließlich treten noch kürzeste Schwankungen durch den Verbrauch von Kolbenmaschinen auf, die sich in einer Sekunde bereits einige Male wiederholen, in einer Form, wie sie in Abb. 86c wiedergegeben ist.

Neben diesen gesetzmäßig verlaufenden Arbeitsprozessen kommen im praktischen Dampfbetrieb zahlreiche Verbraucher mit unregelmäßigem, nicht vorher bestimmbar dem Bedarf vor. Andere werden gelegentlich eingesetzt, z. B. zum Reinigen oder Dämpfen der Apparate und Leitungen. Ebensowenig sind die zufällig auftretenden Pausen durch Störungen an den Arbeitsmaschinen u. ä. zu erfassen. Im Gesamtdiagramm eines Werkes jedoch überlagern sich diese den regelmäßigen Schwankungen, die infolge des gleichzeitigen Betriebes mehrerer Apparate wiederum einander überdecken können, so daß meist ein völlig regelloser Verlauf entsteht. Wird nicht ein fester Fahrplan eingehalten, so kann nicht damit gerechnet werden, daß die Schwankungen durch die Zusammenfassung mehrerer Einzelverbraucher ausgeglichen werden können. Vielmehr verschärfen diese sich meist, sobald z. B. zwei oder mehr Ankochspitzen gleichzeitig eintreten.

Hinzu kommen die Einflüsse der periodisch wechselnden Tages- und Jahreszeiten. Also zunächst der Wechsel der Betriebszeit mit dem Stillstand des Werkes während einer Periode von 24 Stunden. Außer in der Begrenzung der täglichen Dampfanforderung auf etwa 8 Stunden, hat das Stillsetzen der Apparate zur Folge, daß diese sich stärker abkühlen und vor der Inbetriebnahme am nächsten Tag angewärmt werden müssen. Ähnlich, aber noch deutlicher, prägt sich meist die Anwärmespitze nach der wöchentlichen Pause des Sonntags aus. Kennzeichnend ist die Wirkung des Zeitenwechsels auf die Außenbedingungen für Raumheizung und Beleuchtung, also auf die Außentemperatur und Außenhelligkeit. Die Belastung von öffentlichen Kraftwerken z. B. weist im Winter meist zwei ausgeprägte Leistungsspitzen am Morgen und Abend auf (s. Abb. 87), die durch den erhöhten Lichtbedarf in den dunkleren Tageszeiten entstehen. Im Verlauf des Jahres wechseln die täglich benötigten Strommengen zwischen einem Höchstbedarf im Winter und einem Mindestbedarf im Sommer. Ähnlich wird die für Heizung aufgewandte Wärme beeinflusst, die täglich nach einer Spitze am Morgen allmählich abnimmt. Für den

Ausgleich durch Dampfspeicher ist allein der Wechsel im Verlauf des Tages wichtig. Die Heizung, die in allen Industriebetrieben einen be-

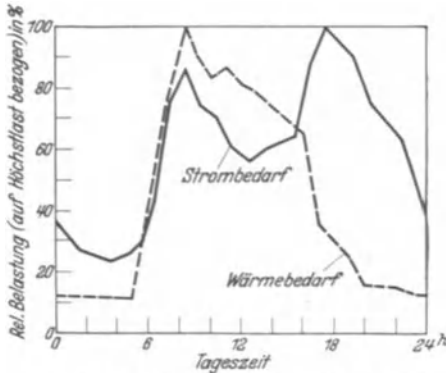


Abb. 87. Relative Belastung von Kraft- und Heizwerken.

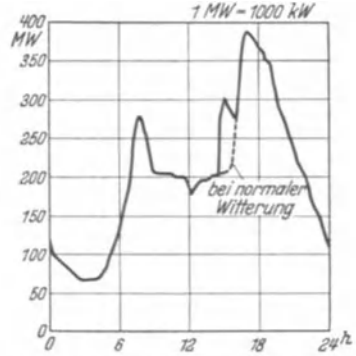


Abb. 88a. Unerwartete Stoßbelastung von fast 100000 kW infolge Wettersturz (Berliner Elektrizitätswerke).

trächtlichen Teil des Dampfverbrauches bildet, beansprucht auch keineswegs dauernd unveränderte Dampfmen- gen. Doch sind mit den Außen-

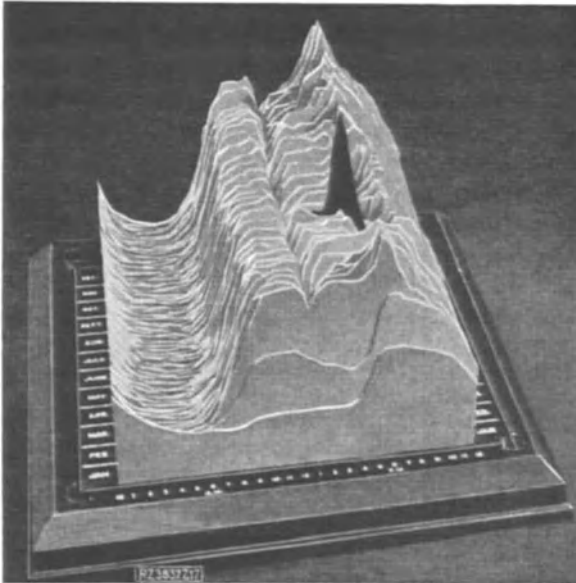


Abb. 88b. Gewitterspitze im Belastungsgebirge von New York.

Abb. 88a und b. Unvorhergesehene Leistungsspitzen im Stromverbrauch durch Witterungseinflüsse.

temperaturen auch diese Wärmemengen den stark zufälligen klimatischen Verhältnissen unterworfen und daher nicht genauer zu erfassen.

Insbesondere äußern sich plötzlich auftretende Wetterumschläge, z. B. Schneestürme oder Gewitter, durch erhöhten Energiebedarf. In erster Linie wird der Lichtverbrauch beeinflusst, während bei der Heizung die Eigenspeicherung der versorgten Objekte ausgleichend wirkt. Abb. 88 zeigt die scharfen zusätzlichen Bedarfsspitzen im Stromverbrauch (44)<sup>1</sup>.

Hervorgehoben soll noch der wesentliche Unterschied der auszugleichenden Bedarfsschwankungen werden, der die beiden wichtigsten Möglichkeiten für die Wirkung von Dampfspeichern kennzeichnet:

1. Leistungsspitzen von längerer Dauer, die mit starken Absenkungen wechseln und nur wenige Male am Tage auftreten (Kraftwerksbelastung).

2. Schwankungen um den Mittelwert von meist kürzerer Zeitdauer, wobei nur der augenblickliche Dampfbedarf stark veränderte Werte annimmt, dagegen der stündliche Mittelwert ungefähr gleich bleibt (Industriebelastung).

Zur Deckung von Leistungsspitzen erfolgt der Einsatz des Speichers nur ein- bis zweimal täglich. Ladung und Entladung fallen auf ganz bestimmte Tageszeiten, die vorher bekannt sind. Im zweiten Fall wird der Dampfspeicher dauernd beansprucht, wobei er mehrere Male am Tage voll ausgenutzt werden kann.

## 2. Speicherfähigkeit und Ausgleichswirkung.

Aus dem Verlauf der Schwankungen, also z. B. aus dem gesamten Belastungsdiagramm einer Dampfanlage, ist die notwendige Speicherfähigkeit zu bestimmen, für die man die Speicheranlage zu bemessen hat und zwar zunächst noch ohne Rücksicht auf die Wahl des Systems. Mit dem oben gekennzeichneten Unterschied der Belastungsart ergeben sich die beiden Hauptarten der Speicherwirkung, die auch zu verschiedenen Methoden für die Bestimmung der Speicherfähigkeit führen:

1. Spitzendeckung,
2. Ausgleich der fortlaufenden Bedarfsschwankungen.

Im ersten Fall hat man ausschließlich die vom Speicher zu übernehmende Leistungsspitze der Berechnung zugrunde zu legen. Die Speicherladung, ebenso wie die Möglichkeit gleichzeitig noch weitere Spitzen im Laufe des Tages zu decken, können außer acht gelassen werden, sofern der Speicher zu Beginn der eigentlichen Leistungsspitze voll geladen sein kann. Der Speicher muß so groß bemessen werden, daß die durch seine Entladung zusätzlich verfügbare Energiemenge (kg Dampf oder kWh Strom) gleich dem Arbeitsinhalt des abgeschnittenen

---

<sup>1</sup> VDI-Nachr. 1932 Nr. 1.

Spitzenanteiles ist. Durch Planimetrieren dieser Fläche kann also unmittelbar die Speicherfähigkeit festgestellt werden.

Folgen dagegen Belastungsspitzen und Absenkungen derart aufeinander, daß nicht eine ausgeprägte Leistungsspitze allein die Speicherentladung bestimmt, so muß die Ausgleichswirkung über die ganze Betriebszeit verfolgt werden. Es wird nach einer ähnlichen Methode, wie bei der Berechnung von Schwungmassen (die bei jeder Art der

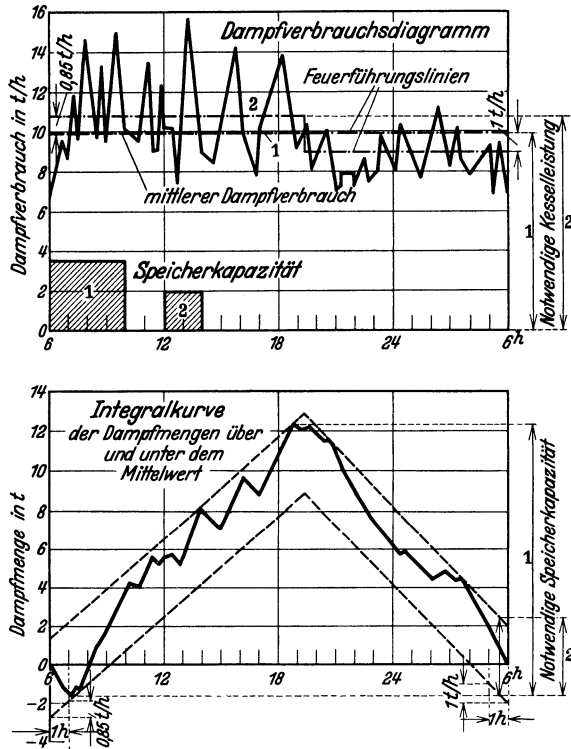


Abb. 89. Bestimmung der notwendigen Speicherfähigkeit.

Speicherung angewandt werden kann) zunächst der Mittelwert der Belastung (Abb. 89) ermittelt. In ein zweites Diagramm wird der Verlauf der Dampfmengen (Integralkurve) eingezeichnet, die sich durch Addition der über und Subtraktion der unter dem Mittelwert liegenden Flächen ergibt. Die Integralkurve gibt also in jedem Zeitpunkt die Dampfmengen an, die von Beginn der Betriebszeit insgesamt gegenüber der mittleren Belastung zusätzlich durch die Speicherung zu liefern bzw. von ihr aufzunehmen sind. Sie stimmt daher bei vollständigem Ausgleich mit dem Verlauf des Ladezustandes im Speicher restlos überein, so daß man aus dem gesamten Bereich (Höchstwert + Mindestwert)

die notwendige Kapazität des Speichers entnehmen kann. Im aufgezeichneten Beispiel muß die Speicherfähigkeit  $12,1 + 1,6 = 13,9$  (t Dampf) betragen.

Weist das Dampfverbrauchsdiagramm erkennbare Zeiträume mit verschieden hoher mittlerer Belastung auf, wie z. B. infolge geringerer

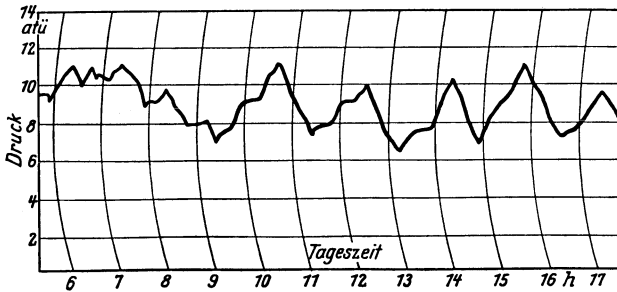


Abb. 90 a. Druckverlauf ohne Speicher.

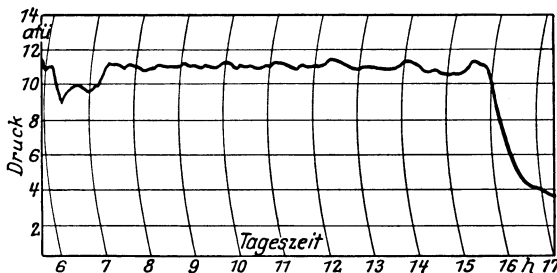


Abb. 90 b. Druckverlauf bei Betrieb mit Gefällespeicher von 5000 kg Dampf Speicherfähigkeit.

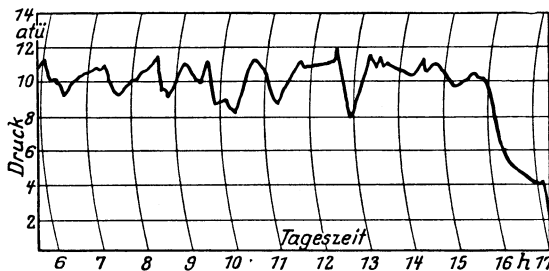


Abb. 90 c. Druckverlauf bei Betrieb mit Gefällespeicher von 2000 kg Dampf Speicherfähigkeit.

Abb. 90 a bis c. Einfluß der Speichergröße auf die Ausgleichswirkung.

Betriebsbeanspruchung bei Nacht (s. Abb. 89), so wird man eine Änderung der Kesselfeuerung zulassen, um zu einer wesentlich kleineren Speicheranlage zu gelangen. Auch hierbei kann das Dampfverbrauchsdiagramm benutzt werden, um Speicherfähigkeit und Ladezustand festzustellen. Die Veränderung der Feuerführungslinie gegenüber dem Mittelwert kennzeichnet sich durch verschieden geneigte Linien des

gleichen Ladezustandes, da die Abweichungen des Dampfverbrauches entsprechend der angepaßten Dampferzeugung verringert werden. Wird also die Integralkurve des Verbrauches durch parallele Gerade eingefafßt, so gibt deren Abstand in Richtung der Ordinaten die herabgesetzte Speicherfähigkeit (im Beispiel 4 t Dampf) an. Aus der Neigung der ansteigenden Erzeugungsgeraden kann man die Erhöhung der Kesselleistung entnehmen, die in diesem Falle nur 0,85 t/h beträgt. Hierdurch erreicht man eine Verkleinerung der Speicheranlage von fast 14 auf 4 t und einen unzweifelhaft wirtschaftlicheren Ausgleich.

Andrerseits haben die Betriebserfahrungen an ausgeführten Speicheranlagen gezeigt, daß die Wirksamkeit bei zu knapp bemessener Speicherfähigkeit stark beeinträchtigt wird und unter Umständen gänzlich verloren gehen kann. Das wird besonders durch die meist schärferen Verbrauchsschwankungen verursacht, die sich beim Betrieb mit Speicher gegenüber dem gemessenen Verlauf ohne Speicher einstellen. Dann muß aber auch berücksichtigt werden, daß im allgemeinen die zu erwartende Belastung nicht vorher bekannt ist und daher Änderungen der Feuerführung rechtzeitig einzusetzen haben, um mit Hilfe der restlichen Speicherfähigkeit allmählich durchgeführt werden zu können. Der Speicher wird daher normal nur in einem engeren Bereich (von Druck oder Füllung) arbeiten können, damit bis zu den zulässigen Grenzen eine gewisse Reserve bleibt. Man wird also gewöhnlich die Speicherfähigkeit um etwa ein Viertel noch zu vergrößern haben. Die in Abb. 90 wiedergegebenen Druckdiagramme eines Textilbetriebes (41) lassen deutlich erkennen, daß ein zu kleiner Speicher praktisch ohne Wirkung bleibt. Während bei Betrieb ohne Speicher (Abb. 90a) heftige Schwankungen zwischen 6,5 und 11 atü auftreten, läßt sich mit dem ausreichend bemessenen Speicher (Abb. 90b) der Druck fast dauernd unverändert halten. Abb. 90c zeigt den Druckverlauf, wenn die Speicherfähigkeit auf etwa die Hälfte herabgesetzt wird. Der Druck schwankt hier fast ebenso stark wie ohne Speicherung.

### 3. Dampfspeicher in Industriebetrieben.

Der Dampfspeicherung werden in den einzelnen Industrien sehr verschiedene Aufgaben gestellt, da sowohl die Art und Größe der auszugleichenden Schwankungen als auch der Aufbau der Dampfanlage vom Charakter der Fabrikationsprozesse beeinflusst werden. Ohne auf die technologischen Einzelheiten näher eingehen zu können, sollen die kennzeichnenden Unterschiede der Dampf- und Kraftverbraucher und ihr Einfluß auf die Arbeitsbedingungen der Dampfspeicher, sowie typische Beispiele ausgeführter Anlagen beschrieben werden.

Die Bedeutung der Dampfspeicherung hängt dabei in erster Linie davon ab, welchen Schwankungen der Bedarf der wichtigsten

Dampfverbraucher unterworfen ist. Durch sie wird das Diagramm der gesamten Belastung eines Betriebes hauptsächlich bestimmt, das für die notwendige Ausgleichswirkung der Speicheranlage maßgebend ist. Wichtig ist, daß in vielen Fällen die Dampferzeugungsanlage nicht den tatsächlichen Dampfbedarf decken kann, wie er sich bei einer betriebswirtschaftlich günstigsten Produktion einstellen würde. Zahlreiche Prozesse müssen daher in längerer Zeit durchgeführt werden, um scharfe Spitzen zu vermeiden oder es müssen Wartezeiten eingeschoben werden, damit nicht durch das gleichzeitige Ankochen mehrerer Apparate ein unzulässig hoher Dampfbedarf entsteht. Schließlich kann auch durch das Zuschalten neuer größerer Verbraucher der Druck so stark absinken, daß die übrigen nur bedeutend weniger Dampf erhalten (sog. „Dampfdiebstahl“). Um den wirklich bei einer bestimmten Industriart auftretenden Belastungsverlauf zu beurteilen, wird man nur Diagramme von solchen Werken gebrauchen können, deren Dampferzeugungsanlage dem Bedarf bei der günstigsten Produktion genügen kann. Daher gibt u. U. ein berechnetes Diagramm eine richtigere Darstellung der Anforderungen. Im folgenden wird stets vorausgesetzt, daß die Prozesse nicht durch unzureichende Dampflieferung verzögert werden müssen.

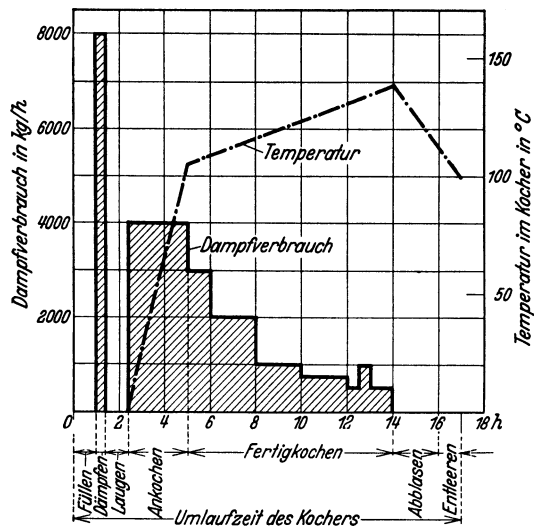


Abb. 91a. Verlauf des Dampfverbrauches und der Temperatur eines Zellstoffkochers.

Im folgenden wird stets vorausgesetzt, daß die Prozesse nicht durch unzureichende Dampflieferung verzögert werden müssen.

a) Zellstoff-Industrie. Die Kocher, die zur Herstellung von Zellstoff aus dem vorbereiteten Holz und Lauge dienen, gehören zu den größten der in der Industrie verwendeten Kochapparate (bis 300 m<sup>3</sup> Volumen). Der Kochprozeß verbraucht den größten Teil des gesamten Dampfbedarfes der Zellstoffherzeugung. Die Umlaufzeit hängt von dem Kochverfahren und der Kochergröße ab und beträgt etwa 18 bis 20 Stunden, wobei sehr hohe Dampf- und Ankochspitzen auftreten (s. Abb. 91a). Durch das Dämpfen der in den Kocher gefüllten Holzschnittel brauchen diese nicht gestampft zu werden. Da es in etwa 20 Minuten durchgeführt werden kann, entsteht ebenfalls eine sehr scharfe Spitze im Dampfverbrauch. Nach Einfüllen der Lauge werden die Kocher geschlossen,

worauf durch direktes Einleiten von Dampf oder indirekte Erwärmung durch Heizschlangen der Kocherinhalt bis auf Siedetemperatur gebracht

wird. Die Ankochzeit soll auf die kürzeste Zeit beschränkt werden, da erst anschließend der eigentliche Fabrikationsprozeß beginnt. Bei diesem Fertigmachen steigt die Temperatur noch bis etwa  $140^{\circ}\text{C}$ , wobei die benötigte Dampfleistung stark zurück geht.

Das Belastungsdiagramm eines Zellstoffwerkes (Abb. 91b) weist deutlich die scharfen Ankochspitzen auf, die entsprechend der Zahl der verwendeten Kocher ganz unregelmäßig aufeinander folgen und sich zum Teil auch überdecken.

Wenn man zusätzliche Wartezeiten vermeiden will, läßt sich ein bestimmter Fahrplan der Kocher nicht einhalten, so daß mit einem Zusammentreffen zweier Ankochzeiten gerechnet werden muß. Dadurch ergeben sich die hohen Dampfbedarfsspitzen, die bis 100% des Mittelwertes erreichen können und die vollständig meist nur mit Hilfe des Gefällespeichers gedeckt werden können. Der übrige Dampfbedarf zum Trocknen und Bleichen des Zellstoffes, zur Papierherstellung u. a. weist keine nennenswerten Schwankungen auf.

Zellstoffwerke gehören zu den wärmewirtschaftlich am weitesten entwickelten Betrieben. Bei

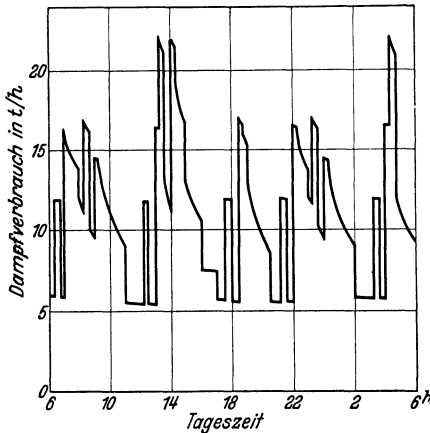


Abb. 91b. Belastungsdiagramm einer Zellstofffabrik (berechnet für 5 Kocher).

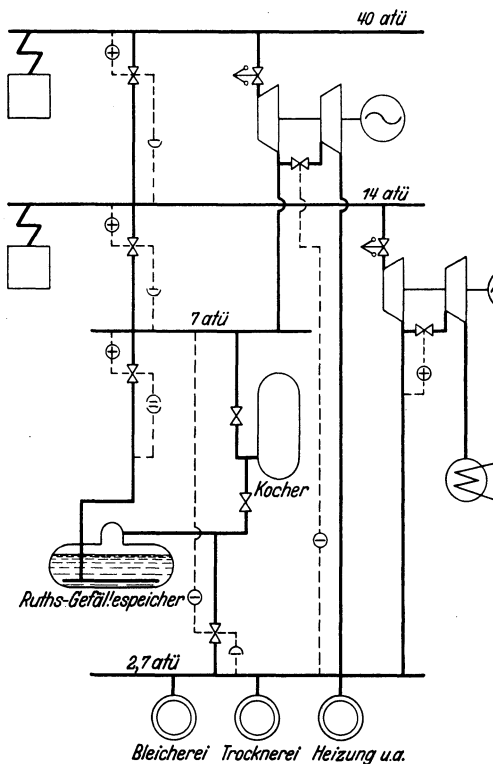


Abb. 92. Schaltung eines Ruths-Gefällespeichers in einer Zellstofffabrik.



Übergang zu Betriebsdrücken von 20 bis 40 at kann der gesamte Kraftverbrauch im Gegendruckbetrieb erzeugt werden. Die Kocher werden meist mit etwa 7 bis 10 at betrieben, während für die übrigen Dampfverbraucher nur ein Druck von 2 bis 3 at benötigt wird. Hierdurch entstehen 3 getrennte Netze, zu denen u. U. noch ein viertes durch Niederdruckkessel mit etwa 10 bis 15 at kommen kann, wie beispielsweise in der in Abb. 92 dargestellten Anlage. Für die Einschaltung des Gefällespeichers kommen hierbei drei Möglichkeiten in Betracht, die allgemein bereits S. 60 beschrieben wurden. Da die Niederdruckverbraucher in diesem Falle einen ausreichenden Bedarf haben, können die Schwankungen der Kocherei indirekt ausgeglichen werden. Also wird der Speicher beim Ankochen in das 2,7 at-Netz entladen, wodurch die gleiche Dampfmenge mit 7 at für die Kocherei frei wird. Nur die sehr hohen Dämpfspitzen werden direkt aus dem Speicher gedeckt, der für diesen Zweck von Hand mit dem neuangesetzten Kocher verbunden wird.

**b) Textil-Industrie.** Die heftigsten Bedarfsschwankungen treten in der Färberei und der Bleicherei auf. Durch das Anwärmen der Farbkufen entstehen jedesmal deutliche Bedarfsspitzen, wenn die kürzeste Zeit von etwa einer Viertelstunde eingehalten wird. Bei der meist großen Anzahl von Farbkufen und einer Umlaufzeit von etwa 3 Stunden folgen diese Spitzen sehr rasch aufeinander, so daß sie im Gesamtdiagramm nicht mehr einzeln nachzuweisen sind, wie z. B. in einer mit Ruths-Gefällespeicher (18) ausgerüsteten Anlage (Abb. 93). Bei Beginn der Betriebszeit bilden sich die schärfsten Spitzen im Dampfverbrauch aus, da nach Vorbereitung der Farbkufen diese fast gleichzeitig in Betrieb genommen werden.

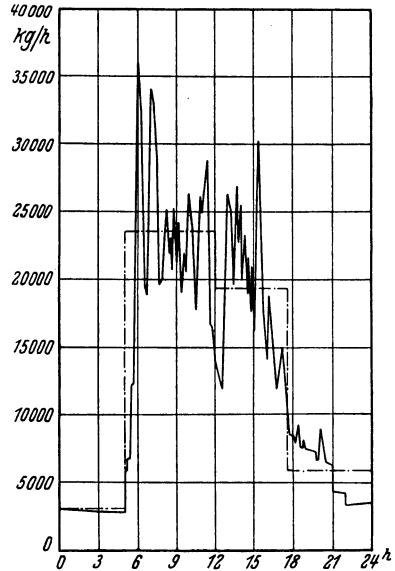


Abb. 93. Gesamtdampfverbrauch einer Färberei.

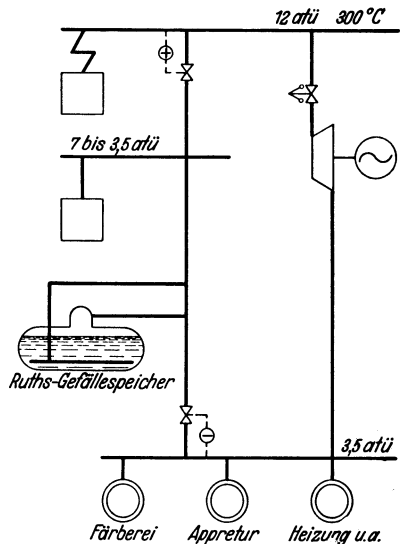


Abb. 94. Schaltung einer Textilfabrik mit Ruths-Gefällespeicher.

Bei Beginn der Betriebszeit bilden sich die schärfsten Spitzen im Dampfverbrauch aus, da nach Vorbereitung der Farbkufen diese fast gleichzeitig in Betrieb genommen werden.

Nur mit Hilfe des Speichers ist es dennoch möglich, den Dampfdruck vor der Turbine und im Gegendrucknetz unverändert zu halten. Der Speicher arbeitet, wie das Schaltschema (Abb. 94) zeigt, zwischen 7 und 3,5 atü in der Zuleitung zu den Dampfverbrauchern. Nur ein kleinerer Teil des gesamten Verbrauches wird von den 12 atü-Kesseln an die Gegendruckturbine geliefert.

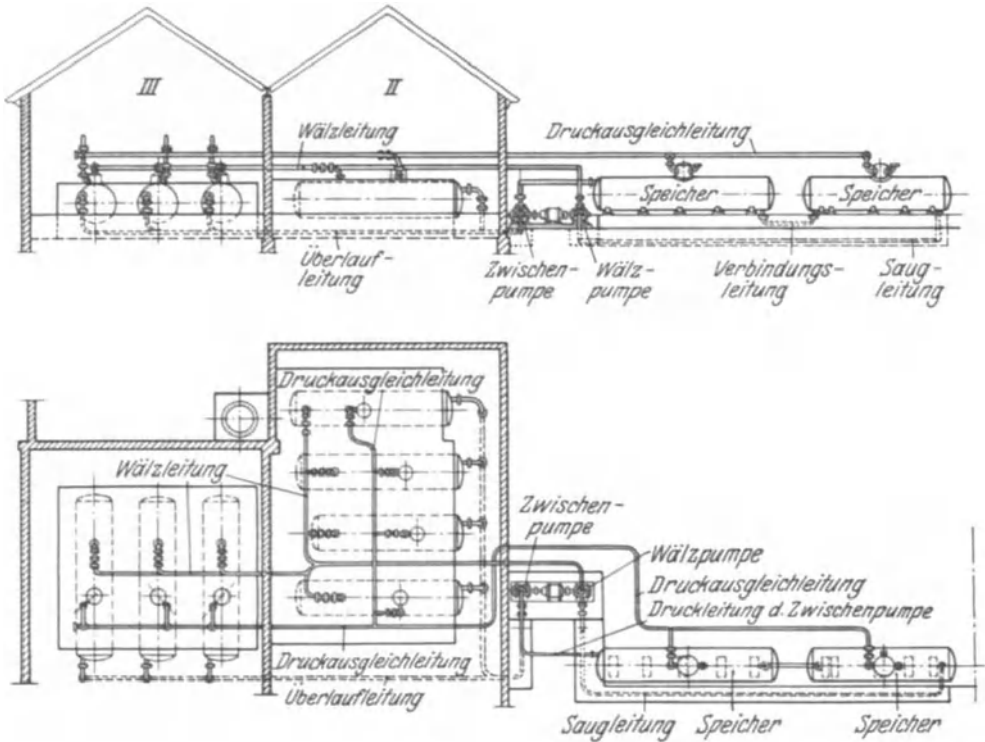


Abb. 95. Kießelbach-Gleichdruckspeicher in einer Stückfärberei und Appreturanstalt.

In solchen Betrieben, die außer der Färberei noch andere Abteilungen mit weniger stark schwankendem Bedarf haben, kann auch mit Gleichdruckspeicher der Ausgleich geschaffen werden. Durch seinen einfachen Betrieb konnte der Kießelbach-Gleichdruckspeicher, vor allem auch in kleineren Werken der Textilindustrie, vielfach angewandt werden. Soweit der Kesseldampf nur zu Fabrikationszwecken benützt wird, war die Möglichkeit gegeben, auch die Gefällewirkung in stärkerem Maße heranzuziehen. Die kurzzeitigen höchsten Leistungsspitzen werden unter Drucksenkung um mehrere at aus dem Wasserraum von Kessel und Speicher gemeinsam gedeckt. Die Einordnung einer Speicheranlage (3) in eine Stückfärberei- und Appreturanstalt zeigt Abb. 95.

Da Kessel und Speicher in gleicher Höhe liegen, muß eine Zwischenpumpe das überlaufende Kesselwasser in den Speicher fördern.

c) **Zucker-Industrie.** Der Wärmebedarf verteilt sich bei der Zuckerherstellung auf die Diffusion des Saftes aus den Rüben, die Vorwärmung, Verdampfung und das Verkochen des Saftes. Der größte Dampfverbrauch fällt auf die Verdampfstation, die aus mehreren Stufen besteht, die jeweils durch den Brühdampf der vorhergehenden Stufe beheizt werden. Beim Verdampfen des Saftes handelt es sich um einen kontinuierlich verlaufenden Prozeß, so daß sich ein fast völlig gleichmäßiger Bedarf einstellt. Dennoch weist der Gesamtdampfverbrauch

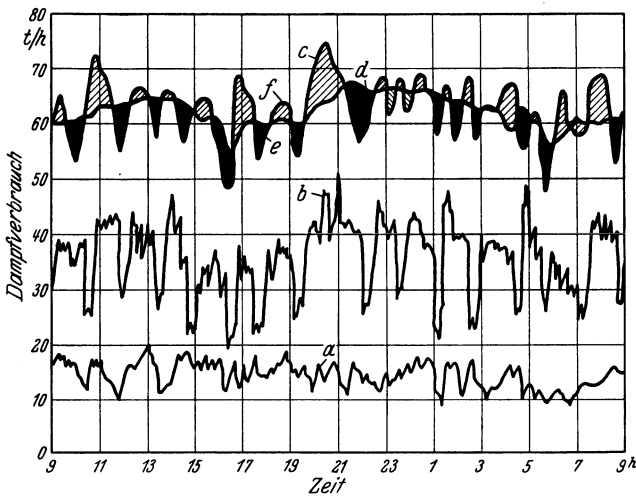


Abb. 96. Dampfverbrauchsdiagramm einer Zuckerfabrik.

a Verbrauch im Niederdrucknetz, b Verbrauch im Mitteldrucknetz, c Gesamtdampfverbrauch, d Gesamtzeugung der Kessel, e Speicherladung, f Speicherentladung.

der Zuckerfabrikation dauernde Schwankungen auf, die, abgesehen vom periodischen Kochvorgang der Dicksaftkocher, durch Unregelmäßigkeiten in der Rübenbeschaffenheit und bei den meisten Betriebsvorgängen hervorgerufen werden. Weiterhin verläuft auch der Kraftbedarf meist sehr ungleichmäßig, so daß der anfallende Gegendruckdampf dem Heizdampfbedarf angeglichen werden muß. Da in Zuckerfabriken der gesamte Kraftbedarf schon bei mäßigen Kesseldrücken im Gegendruckbetrieb erzeugt werden kann, ist hier die Angleichung von größter Bedeutung.

Ein typisches Belastungsdiagramm mit Unterteilung des Dampfverbrauches auf Mittel- und Niederdrucknetz ist in Abb. 96 wiedergegeben<sup>1</sup>. Die auftretenden Spitzen betragen höchstens 25%

<sup>1</sup> Schiebl: Arch. Wärmewirtsch. 1929 S. 162.

des Mittelwertes. Sie sind also nicht so stark ausgeprägt wie in Zellstoff- oder Textilwerken. Man erkennt deutlich, daß vor allem durch den

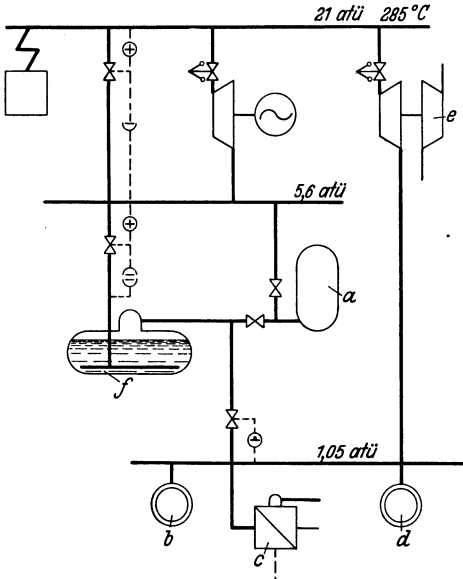


Abb. 97. Schaltung eines Ruths-Gefällespeichers in einer Zuckerfabrik.

a Kocher, b Vorwärmer, c Verdampfstation, d Heizung, e Speisepumpen.

stark schwankenden Verbrauch des Mitteldrucknetzes, an das die Vakuumkocher angeschlossen sind, der ungleichmäßige Verlauf hervorgerufen wird, während die Niederdruckverbraucher (Verdampfer, Vorwärmer u. ä.) nur geringe Schwankungen zeigen. Damit ergeben sich für die Einordnung des Gefällespeichers ähnliche Möglichkeiten wie in Zellstofffabriken: entweder der Speicher arbeitet im Hochdruckgebiet und gleicht die Kocherschwankungen unmittelbar aus oder man schaltet ihn zum indirekten Ausgleich ins Niederdruckgebiet. Letztere Anordnung zeigt die Schaltung desselben Werkes

(Abb. 97). Hier ist noch eine weitere Verbindung des Speichers mit dem Kocher vorgesehen, um zu Beginn des Kochvorganges Speicherdampf direkt verwenden zu können.

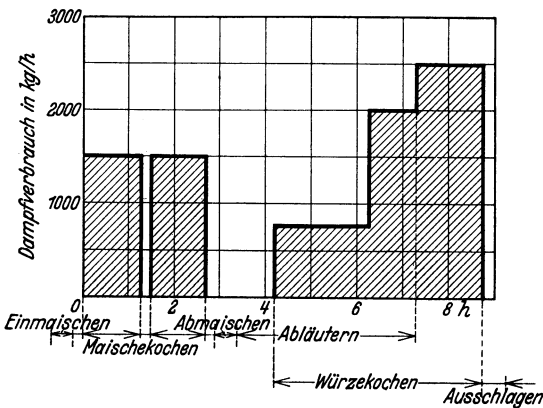


Abb. 98a. Dampfverbrauch eines Sudprozesses.

der berechnete Dampfverbrauch während eines Sudes aufgezeichnet und hieraus der Gesamtverbrauch des Sudhauses bei 3 Sud/Tag bestimmt

**d) Brauereien.** Bei der Bierherstellung beansprucht der periodisch verlaufende Sudprozeß den Hauptteil des Dampfverbrauches, wodurch auch in erster Linie die Schwankungen verursacht werden. Die vorgewärmte Bierwürze wird im Sudzeug auf Siedetemperatur gebracht und in bestimmten Teilvorgängen (Maische) gekocht. In Abb. 98a ist

worden (Abb. 98b). Da noch vor dem Ende eines Sudprozesses schon mit dem nächstfolgenden begonnen werden muß, überdecken sich die

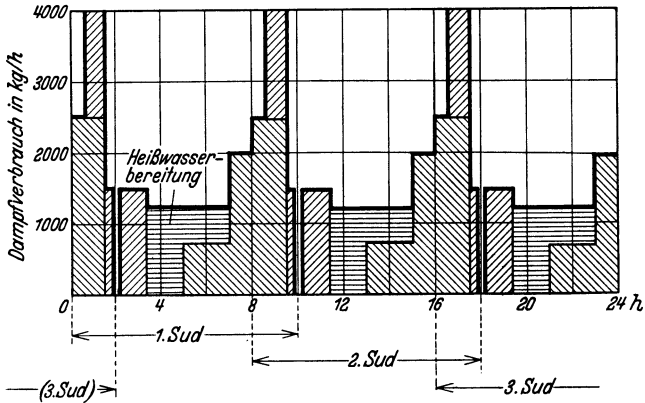


Abb. 98b. Dampfverbrauch einer Brauerei (berechnet für 3 Sud-Tag).

angeforderten Dampfleistungen und ergeben in regelmäßigen Abständen stark ansteigende Bedarfsspitzen. Darüber können sich noch, je nach der Fabrikationsweise, Stoßspitzen von sehr kurzer Dauer (5 bis 10 Minuten) lagern, so daß sich oft im Gesamtdiagramm Leistungsschwankungen bis zum doppelten Wert des mittleren Verbrauches ausbilden. Dagegen wirkt der Wärmebedarf zur Heißwassererzeugung (50 bis 60° C) ausgleichend.

Da sowohl für den Sudprozeß als auch für die übrigen Verbraucher nur Dampf von 2 bis 3 at Druck benötigt wird, ergibt sich meist ein einfacher Aufbau der Anlage bei Gegendruckbetrieb. Eine Anlage mit Gefällespeicher (die bisher in Brauereien fast ausschließlich angewandt wird) zeigt Abb. 99. Der Speicher wird mit reduziertem Kesseldampf geladen und gibt bei der Entladung zusätzlichen Dampf an das 2 at-Netz ab. Ähnlich wie bei den Zuckerfabriken ist auch in Brauereien der wechselnd anfallende Gegendruckdampf dem Verlauf der Heizdampfbelastung anzupassen.

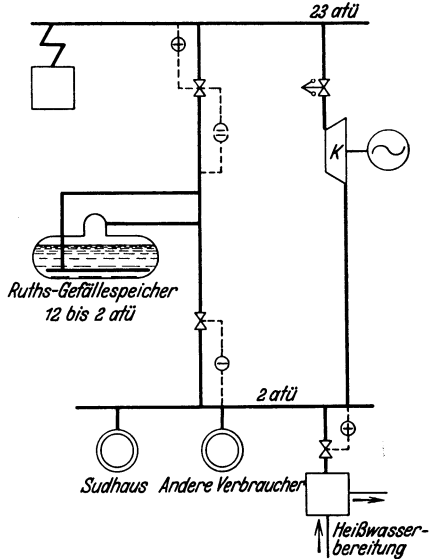


Abb. 99. Schaltung einer Brauerei mit Ruths-Gefällespeicher.

e) **Bergwerke.** Die Schwankungen im Dampfverbrauch entstehen in Bergwerken besonders durch den Betrieb der dampfangetriebenen Fördermaschinen. Zunächst treten kurzzeitige Schwankungen von etwa 1 bis 2 Minuten Periodendauer bei jedem einzelnen Zug auf. Ihr grundsätzlicher Verlauf wurde bereits dargestellt (s. S. 108). Da die Antriebsmaschinen meist mit Auspuff arbeiten, fällt stoßweise Abdampf an, der zur günstigeren Verwertung in besonderen Abdampfturbinen oder für Heizzwecke gespeichert wird. Daneben aber äußert sich noch die ungleichmäßige Folge der einzelnen Züge im Laufe der Betriebszeit durch Veränderung des mittleren (etwa stündlichen) Dampfverbrauches. Im Belastungsdiagramm sind nur diese längerdauernden Schwankungen

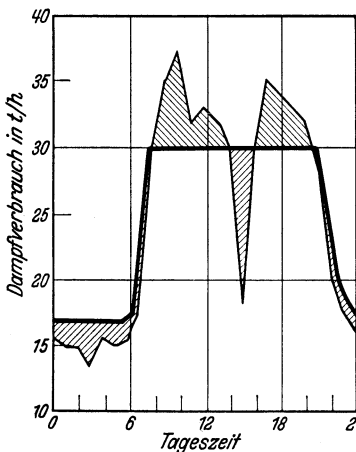


Abb. 100. Dampfverbrauchsdiagramm eines Bergwerks.

erkennbar (s. Abb. 100), die meist mehrere ausgeprägte Leistungsspitzen und das tiefe Belastungstal der Mittagspause aufweisen. Die übrigen Dampfverbraucher (Kompressoren) haben fast gleichmäßigen Bedarf.

Für die Dampfspeicherung ergeben sich zweierlei Aufgaben, die meist auch getrennt gelöst werden:

1. Ausgleich der Kesselbelastung,
2. Speicherung des stoßweise anfallenden Abdampfes.

Dabei handelt es sich vor allem um den im Belastungsdiagramm dargestellten Ausgleich der Stundenschwankungen, der in ganz ähnlicher Weise wie in Elektrizitätswerken zur Spitzen-

deckung führt. Man verzichtet auf einen vollständigen Ausgleich, der nur mit übermäßig großen Speichereinrichtungen zu erzielen wäre, und beschränkt sich auf den Teil der Spitze, bei dem sich durch Speicherung die größten Ersparnisse ergeben. Da solche Belastungsspitzen gewöhnlich im Bereich der Leistungsfähigkeit von Gleichdruckspeichern liegen, haben sich diese hier und in ähnlichen Betrieben stärker als Gefällespeicher durchgesetzt. Auf einem Steinkohlenbergwerk (52), dessen Belastungsdiagramm Abb. 100 zeigt, wird der Ausgleich durch zwei Kießelbach-Gleichdruckspeicher von ca. 170 m<sup>3</sup> Gesamtvolumen durchgeführt. Sie arbeiten mit modernen Strahlungskesseln von 20 atü zusammen.

Die Gleichdruckspeicherung mit Vorwärmung des Speisewassers durch Dampf ermöglicht es, beide Aufgaben vereint zu lösen. Zu diesem Zweck wird nach der Schaltung Abb. 74 (s. S. 95) die zweistufige Speicherung von Frisch- und Abdampf angewandt. Der Frischdampfspeicher arbeitet mit Verdrängung, damit der vorgeschaltete Ekonomiser

gleichmäßig durchflossen wird. Für die Gefällespeicherung, ebenso wie für unmittelbare Dampfspeicher sind die weiter unten beschriebenen Beispiele auch für Bergwerke ausführbar.

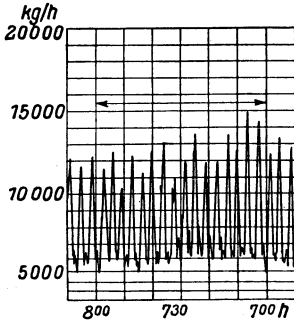


Abb. 101a. Minutenschwankungen der Walzenzugmaschine.

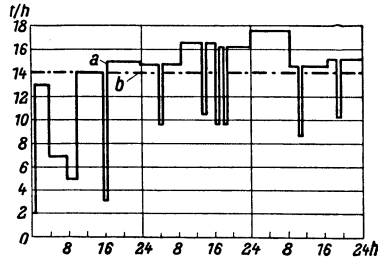


Abb. 101b. Stundenschwankungen während 3 Tage.

Abb. 101a und b. Dampfverbrauch eines Stahl- und Walzwerkes.

f) Eisen- und Stahlwerke. Der Dampfverbrauch in Hütten-, Walz- und Preßwerken zeigt in ähnlicher Weise kurzzeitige Schwankungen, die durch die einzelnen Arbeitsvorgänge von Walzenzugmaschinen, Dampfpresen und Dampfhammern entstehen und daneben längerdauernden Veränderungen infolge der verschieden starken Beanspruchung der Maschinen. Da zum Teil der Dampf in Kesseln erzeugt wird, die zur Ausnutzung der unregelmäßig anfallenden Abhitze und Abgase der Hoch- und Wärmeöfen dienen, ist auch der Verlauf der Dampferzeugung festgelegt und Angleichung an den Bedarf erforderlich.

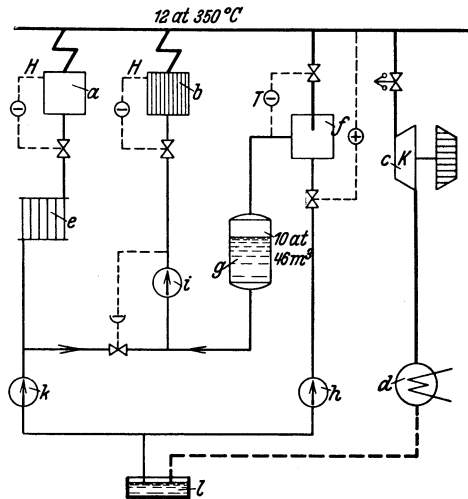


Abb. 102. Schaltung eines Walzwerkes mit Ruths-Gleichdruckspeicher.

*a* Kessel, *b* Abhitzeessel, *c* Walzenzugmaschine, *d* Kondensator, *e* Ekonomiser, *f* Mischvorwärmer, *g* Gleichdruckspeicher, *h* Kaltwasserpumpe, *i* Heißwasserpumpe, *k* Kesselspeisepumpe, *l* Speisewasserbehälter.

In Abb. 101 ist der Dampfverbrauch eines Walzwerkes (42) wiedergegeben und zwar sowohl (mit vergrößertem Zeitmaßstab) die Minutenschwankungen als auch die Veränderungen im Laufe der Betriebszeit. Letztere kennzeichnen sich in diesem Falle besonders durch sehr starke Lastabsenkungen. Die Schaltung des hier eingebauten Ruths-Gleichdruckspeichers von 46 m<sup>3</sup> Rauminhalt zeigt

Abb. 102. Der Kesseldruck regelt die Speisewasserzufuhr zum Mischvorwärmer und durch die erreichte Temperatur des in den Speicher fließenden Heißwassers indirekt die Dampfmenge. Da der Dampf fast ausschließlich von Abhitzekesseln geliefert wird, ergaben sich ohne Speicher große Abblaseverluste und Schwierigkeiten, den Kesseldruck zu halten. — Schließlich ist noch die Schaltung eines Kießelbach-Gleichdruckspeichers in einem Walz- und Hammerwerk (3) in Abb. 103 dargestellt. Da die Speicheranlage mit zwei Kesselanlagen von verschiedenem Druck (10 und 15 atü) zusammenarbeiten muß, wurde hier ein unterteilter Behälter gewählt.

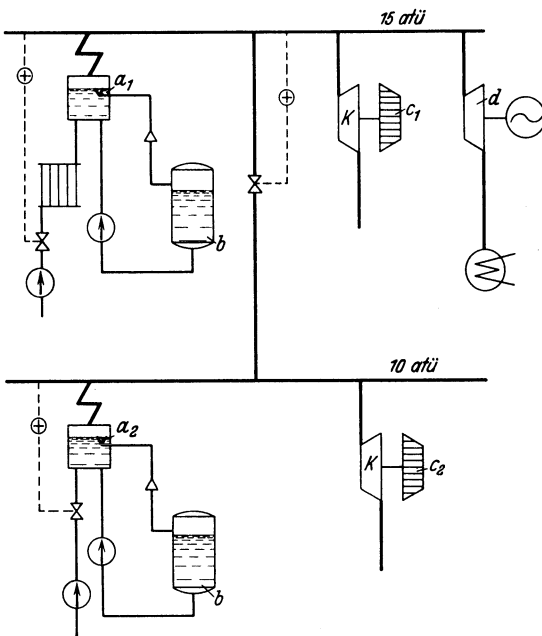


Abb. 103. Schaltung eines Walz- und Hammerwerkes mit Kießelbach-Gleichdruckspeicher.

$a_1$  Wasserrohrkessel 15 atü,  $a_2$  Flammrohrkessel 10 atü,  $b$  Kießelbach-Gleichdruckspeicher, unterteilt für 15 und 10 atü,  $c_1, c_2$  Walzenzugmaschine, Hammerwerk,  $d$  Turbine.

Die Einordnung des Gefällespeichers richtet sich danach, welche Schwankungen ausgeglichen werden sollen. In Betrieben mit Großwasserraumkesseln werden die Minutenschwankungen von Rohrleitung und Kessel ohne Schwierigkeiten übernommen. Daher schaltet man den Speicher zum Ausgleich der Stundenschwankungen zwischen 2 Verbrauchernetze verschiedenen Druckes (siehe Abb. 104).

— Dagegen ist die Speicherfähigkeit

von Wasserrohrkesseln nur sehr gering, so daß hier zur Deckung von Stoßspitzen ein besonderer Speicher an das Mitteldrucknetz angeschlossen wird, der einen gleichmäßigen Durchfluß des Hochdruckteiles der Turbine ermöglicht. Da die zu speichernde Dampfmenge verhältnismäßig klein ist, kann der Druckbereich des Speichers auf 1 bis 2 at beschränkt werden. Die Stundenschwankungen werden von einem Gefällespeicher zwischen Hoch- und Mitteldrucknetz mit vielfach größerer Speicherfähigkeit übernommen. Zur Abdampfspeicherung wird noch ein dritter Speicher nötig, der ebenso wie der Mitteldruckspeicher ohne Druckregler eingeschaltet wird und nur 0,2 bis 0,4 at Druckunterschied aufweist. — Das Anwendungsgebiet der unmittel-



baren Dampfspeicher beschränkt sich ausschließlich auf diese letztere Aufgabe.

g) **Sonstige Industrien.** Außer in den oben genannten Industrien finden sich Dampfspeicheranlagen noch in den verschiedensten Betrieben, deren Dampfbedarf aus technologischen, örtlichen u. a. Gründen ungleichmäßig ist. Der Anwendungsbereich deckt sich fast mit der Verwendung von Dampf überhaupt, da nur sehr selten ein gänzlich unveränderlicher Verbrauch vorliegt.

Insbesondere ist es die chemische Industrie in weitestem Sinne, deren Fabrikationsprozesse immer wieder zu Schwankungen führen. So wurden Dampfspeicher in Seifen-, Gummi- und Lederfabriken, in Erdöl- und Olivenölraffinerien aufgestellt. — Kalksteinwerke haben durch den periodischen Betrieb von dampfbeheizten Härtekesseln sehr scharfe Leistungsspitzen. — Industrien, die leicht verderbliche Stoffe unmittelbar nach der Anlieferung verarbeiten, z. B. Molkereien, haben kurze Betriebszeiten mit starken Schwankungen. — Schließlich sind noch Speicheranlagen im Eisenbahnbetrieb zur Zugvorwärmung, in Hotels und Krankenhäusern ausgeführt worden.

#### 4. Dampfspeicher in Kraftwerken.

Die Anwendung der Dampfspeicherung in Werken, die der öffentlichen Energieversorgung dienen, unterscheidet sich schon dadurch von der oben beschriebenen industriellen Verwendung, daß die Belastung fast ausschließlich durch die Notwendigkeiten der Abnehmer bedingt ist. Abhängig von der Art der Energieverbraucher stellt sich ein bestimmter zeitlicher Verlauf ein, der nur zum geringsten Teil durch tarifliche Maßnahmen ausgleichend beeinflusst werden kann. Die stärksten Schwankungen weist das Belastungsdiagramm städtischer Elektrizitätswerke auf, das im Winter scharf ausgeprägte Spitzen am frühen Morgen und in den Abendstunden enthält (s. Abb. 87). Diese werden in erster Linie durch den fast gleichzeitigen Einsatz aller Lichtverbraucher verursacht, wodurch ein steiler Belastungsanstieg entsteht. Beliefert das Werk auch Industrieabnehmer in größerem Maße, so verbessert sich zwar der Belastungsfaktor; doch bleibt die Abend-

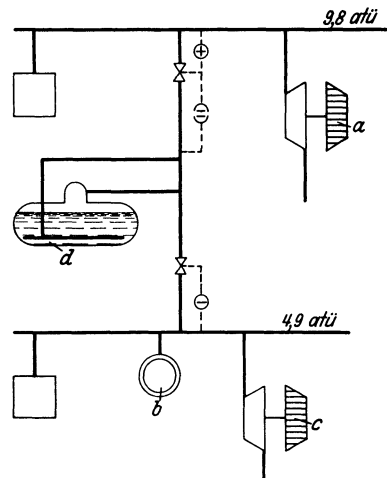


Abb. 104. Schaltung eines Stahlwerks mit Ruths-Gefällespeicher.  
*a* Blockwalzwerk, *b* Heizung, *c* Radwalzwerk, *d* Ruths-Gefällespeicher.

spitze im wesentlichen unverändert, da meist der erhöhte Lichtverbrauch noch vor Schluß der Fabrikzeit einsetzt, wie verschiedene Untersuchungen gezeigt haben<sup>1</sup>.

Da die höchsten Leistungsspitzen nur wenige Stunden täglich während der Wintermonate auftreten, sind die gesamten Kosten, einschließlich Kapitaldienst der notwendigen Anlagen, bezogen auf die erzeugten

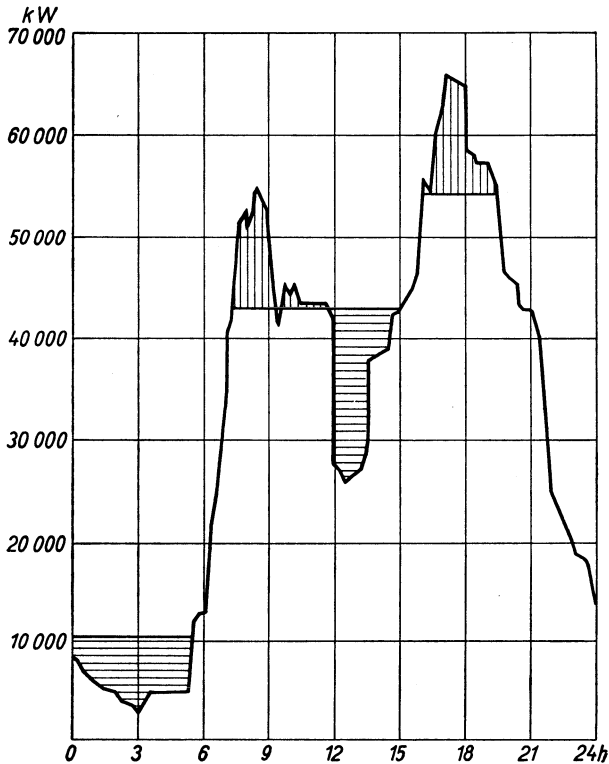


Abb. 105 a. Gesamtbelastung mit Speicherausgleich.

Abb. 105 a und b. Belastungsdiagramm eines Kraftwerks mit gemischtem Versorgungsgebiet (Gemeinschaftswerk Hattingen).

Kilowattstunden außerordentlich hoch und betragen bis zum 20fachen der durchschnittlichen Erzeugungskosten. Die Frage der wirtschaftlichen Spitzendeckung gehört daher zu den dringlichsten der modernen Elektrizitätswirtschaft. Der Einbau von Dampfspeichern ist eine der Möglichkeiten zur Lösung, da bei Spitzen von nicht zu langer Dauer die Anlagekosten niedriger sein können als für gleichwertige Kesselanlagen. Der Dampfspeicher hat also die Aufgabe, durch Entladung des

<sup>1</sup> Z. B. Adolph: Bericht der 2. Weltkraftkonferenz Bd. 15. Berlin: VDI-Verlag 1930.

während der Zeit niedrigerer Belastung aufgenommenen Dampfes die Kesselleistung zur Spitzenzeit zu ergänzen. Da sich meist auch die Mittagspause durch ein tiefeinschneidendes Belastungstal ausprägt, kann der Speicher im Laufe eines Tages zweimal zum Einsatz kommen. Die Kesselleistung kann dann meist auf nur zwei Feuerungslinien eingehalten werden.

Für die Wahl des Speichersystems sind die wirtschaftlichen Gesichtspunkte maßgebend, da ein vollständiger Ausgleich der Belastungsschwankungen nicht in Betracht kommt. Daher ist nicht mehr

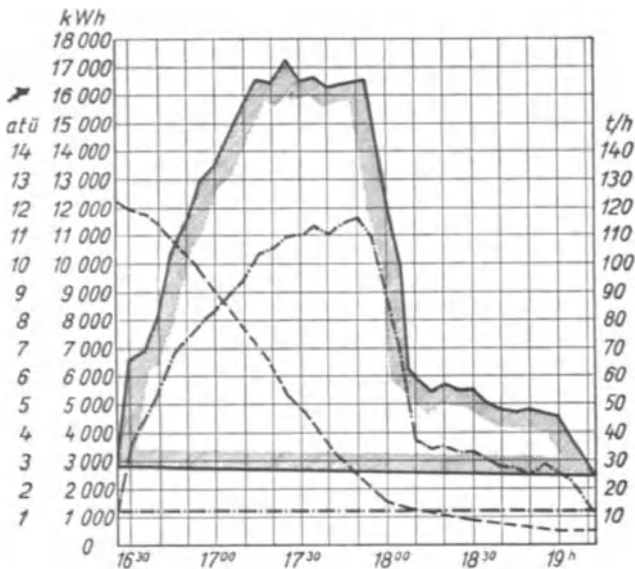


Abb. 105b. Durch Gefällespeicher gedeckter Anteil der Abendspitze (Belastung der Frischdampf-Speicherdampfturbine).

die Höhe der Leistungsspitzen über dem Mittelwert, sondern nur der Anteil entscheidend, dessen mittlere Dauer noch eine Überlegenheit des Dampfspeichers gegenüber dem Kessel ergibt. Im allgemeinen wird die Leistungsfähigkeit von Gleichdruckspeichern hierzu noch ausreichen und nur bei besonders scharfen Spitzen oder bei Verteilung der Last auf getrennte Grundlast- und Spitzenlastwerke ausschließlich der Gefällespeicher geeignet sein. Der größeren Unabhängigkeit in der Verwendung steht aber hier der Nachteil des veränderten Speicherdampfes entgegen, wodurch auch besondere Speicherturbinen erforderlich werden. Dennoch hat der Gefällespeicher gerade in Kraftwerken weitere Verbreitung gefunden, da er für den Einsatz als Momentanreserve unabhängig von der verfügbaren Kesselleistung verwendet werden kann.

Als Beispiel seien kurz die Betriebsverhältnisse der Ruths-Gefällespeicheranlage im Gemeinschaftswerk Hattingen, Ruhr (34), dargestellt. Das Belastungsdiagramm (Abb. 105a) zeigt den typischen Verlauf eines Kraftwerkes mit gemischtem Versorgungsgebiet (städtische und Industrielast). Die ausgeprägte Abendspitze kann im obersten Teil wirtschaftlich durch Speicher gedeckt werden. Unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung wurde (bei unveränderter Spitzenform) die Leistung der Speicheranlage auf 16000 kW bei etwa 1¼ h mittlerer Spitzendauer festgelegt (s. Abb. 105b).

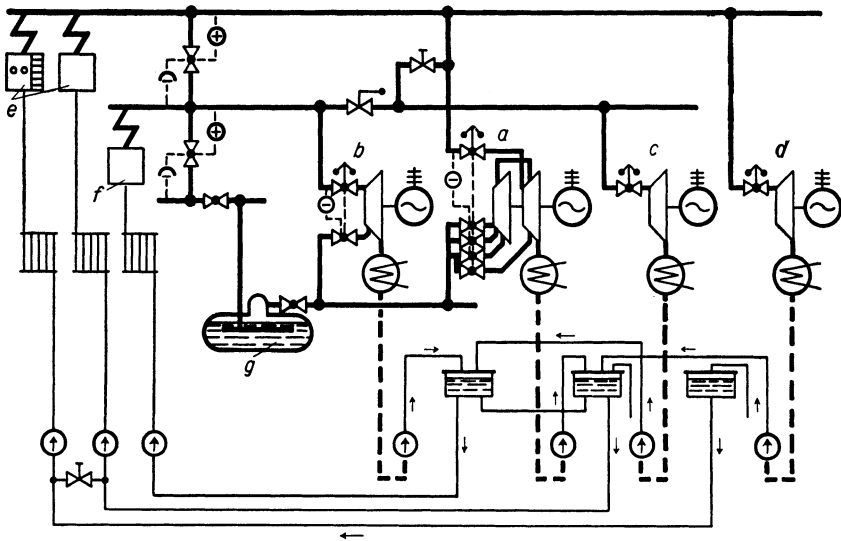


Abb. 106. Schaltung eines Kraftwerkes mit Ruths-Gefällespeicher (Gemeinschaftswerk Hattingen). *a* neue Frischdampf-Speicherdampfturbine (20000 kW), *b* umgebaute Frischdampf-Speicherdampfturbine (8000 kW), *c*, *d* Frischdampfturbinen, *e* Kessel für 21 atü, *f* Kessel für 15 atü, *g* Ruths-Gefällespeicher.

Zwei getrennte Kesselanlagen (s. Abb. 106) liefern Dampf von 21 und 15 atü. Beide Netze sind durch ein Überströmventil mit Grenzimpuls verbunden. Vom 15 atü-Netz aus werden durch ein zweites Überströmventil die Speicher geladen, sobald die Kessel mehr Dampf erzeugen, als die Turbinen benötigen. Die 4 Speicher von je 308 m<sup>3</sup> arbeiten zwischen 14 und 0,5 atü und besitzen insgesamt eine Kapazität von 160 t Dampf. Eine kombinierte Frischdampf-Speicherdampfturbine soll im normalen Betriebe 4000 kW aus Kesseldampf erzeugen und, sobald die Leistungsfähigkeit der Kessel überschritten ist, eine zusätzliche Spitzenleistung von 16000 kW aus Speicherdampf decken. Die Steuerung der Speicherturbine wird außer vom Geschwindigkeitsregler noch durch einen Druckregler beeinflusst, der bei absinkendem Frischdampfdruck die Zufuhr von Speicherdampf öffnet. Dadurch wird bei raschem An-

stieg der Belastung immer zuerst durch Speicharentladung Leistung erzeugt, bis die Kesselanlage zur Deckung der angeforderten Dampf-

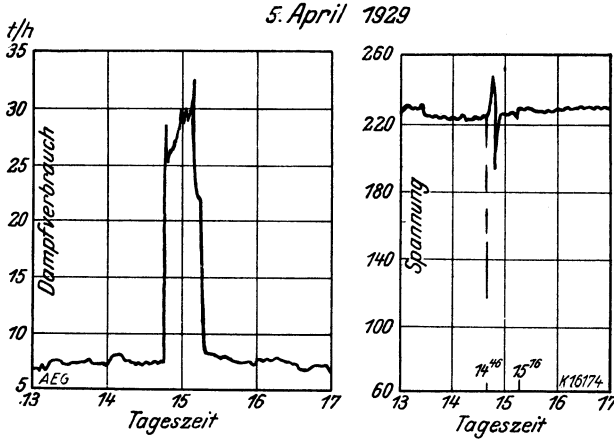


Abb. 107 a. Dampfverbrauch der Speicherturbine.

Abb. 107 b. Spannung im elektrischen Versorgungsnetz.

mengen in stande ist. Derselbe Regler bewirkt auch den Einsatz der Speicheranlage als Momentanreserve, sobald durch eine plötzliche Stö-

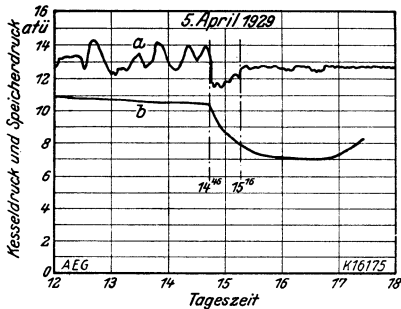


Abb. 107 c. Druckdiagramme.  
a Kesseldruck, b Speicherdruck.

Abb. 107 a bis c. Einsatz des Ruths-Gefällespeichers zur Momentanreserve (Kraftwerk Oberlungwitz).

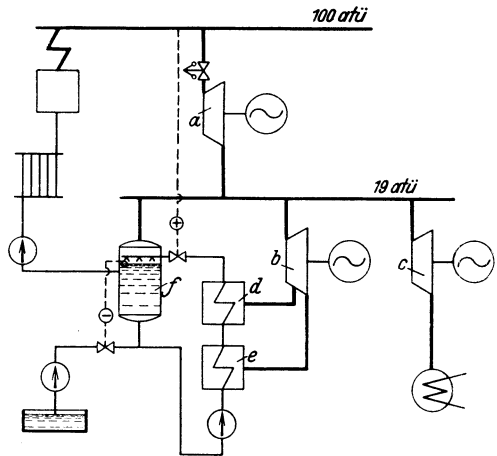


Abb. 108. Schaltung eines Höchstdruckkraftwerk mit Verdrängungs-Gleichdruckspeicher (Großkraftwerk Mannheim).

a Vorschaltturbine, b Regenerativturbine, c Kondensationsturbine, d Oberflächenvorwärmer 9,5 ata, e Oberflächenvorwärmer 4,5 ata, f Verdrängungs-Gleichdruckspeicher.

rung eine Kesseleinheit ausfällt oder eine unvorhergesehene Belastungsspitze auftritt.

Den Einsatz der Ruths-Gefällespeicher bei plötzlichem Leistungsbedarf zeigen die Messungen (4) in einem anderen Kraftwerk (Oberlungwitz bei Chemnitz). Die Speicherturbine (s. a. Abb. 48) wird zur Momentanreserve dauernd mit ganz geringer Wirklast in Betrieb ge-

Goldstern, Dampfspeicheranlagen.

halten. Durch den Kesseldruckregler kann schlagartig die volle Dampfleistung von etwa 30 t/h aus den Speichern entnommen werden, so daß ohne Unterbrechung die Stromlieferung fortgesetzt werden kann (s. Abb. 107). Die Spannungsschwankungen im elektrischen Versorgungsnetz konnten in so engen Grenzen gehalten werden, daß sie ohne Folgen

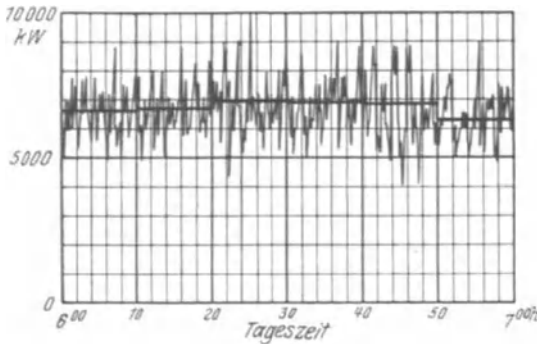


Abb. 109a. Minutenschwankungen.

für die angeschlossenen Abnehmer blieben. Da die in Bereitschaft gehaltene Speicherturbine zur Blindlastzeugung (Phasenschieben) ausgenutzt werden kann, lassen sich die Kosten der zum Antrieb erforderlichen Dampf- bzw. Strommengen wirtschaftlich rechtfertigen.

Die Verwendungsmöglichkeit des Verdrängungs-Gleichdruckspeichers im Kraftwerksbetrieb zeigt die Anlage im Großkraftwerk Mannheim. Die Kessel arbeiten (20) mit einem

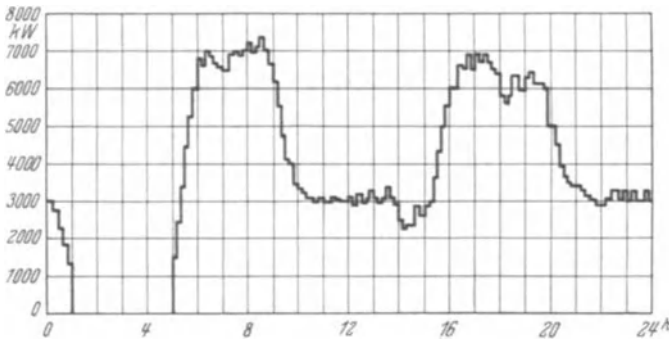


Abb. 109b. Leistungsspitzen durch verstärkten Bahnbetrieb.

Abb. 109a und b. Belastungsverlauf in Bahnkraftwerken.

Betriebsdruck von 101 ata und 475° C Dampf Temperatur. Der Speicher ist an das Mitteldrucknetz von 20 ata angeschlossen (Abb. 108) und erhält Speisewasser zugeführt, das in zwei Oberflächen-Vorwärmern mit Anzapf- bzw. Gegendruckdampf von 9,5 und 4,5 ata erwärmt wird. Die Turbinenleistung läßt sich durch Speicherentladung von 21150 auf 25400 kW steigern; man erzielt also eine größte Leistungsfähigkeit von ca. 20%. Die Vorschaltturbine wird von einer unveränderlichen Dampfmenge durchflossen. Sinkt die Belastung des Werkes, so strömt dem

Speicher mehr Dampf zu, während gleichzeitig durch den steigenden Kesseldruck der Druckregler die Speisewasserzufuhr zum Speicher vergrößert. Derselbe Regler schließt umgekehrt zur Zeit der Spitzenbelastung

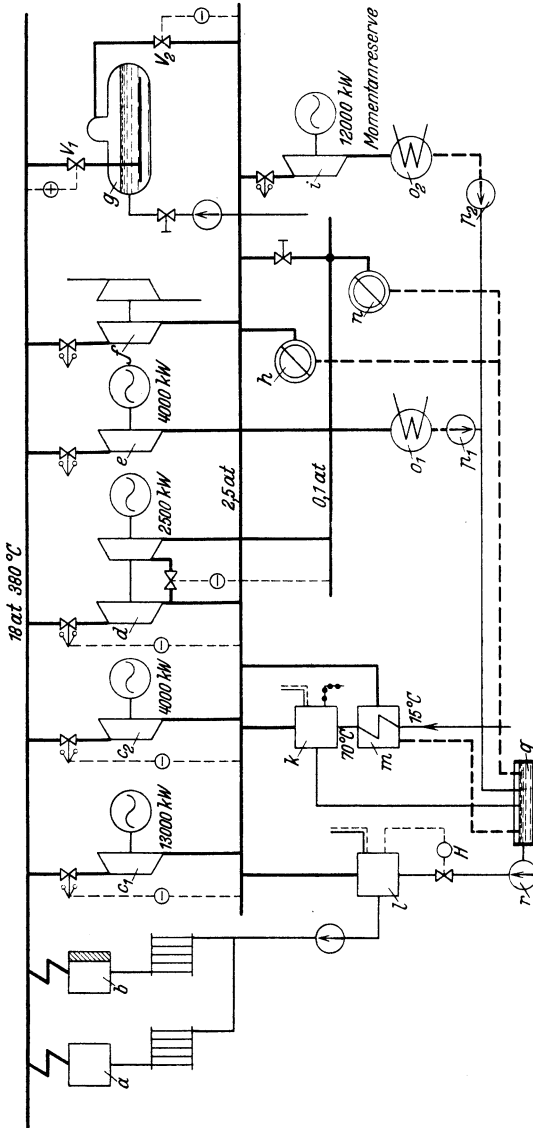


Abb. 110 a. Schaltung.

*a, b* Kesselanlage, *c* Gegendruckturbine, *d* Anzapf-Gegendruckturbine, *e* Kondensationsturbine, *f* Turbopumpe, *g* Ruths-Gefällespeicher, *h* Fernheizung, *i* Niederdruckturbine, *k* Speisewasseraufbereitung, *l* Entgaser, *m* Vorwärmer, *n* Raumheizung, *o* Kondensatoren, *p* Kondensatpumpen, *q* Speisewasserbehälter, *r* Zwischenpumpen.

Abb. 110 a und b. Heizkraftwerk mit Ruths-Gefällespeicher (Kraftwerk Leipzig-Nord).

den Wasserzufluß ab, so daß die sonst der Vorwärmung dienende Dampfmenge bis auf Kondensatordruck entspannt werden kann.

In Bahnkraftwerken hat der Belastungsverlauf (21) einen ähnlichen Charakter wie in Berg- und Hüttenwerken, da die Schwankungen

ebenfalls einerseits kurzzeitig (Abb. 109a) vom Anfahren der einzelnen Züge herrühren, andererseits zu bestimmten Tageszeiten durch den stärkeren Bahnbetrieb Leistungsspitzen entstehen (Abb. 109b). Da jedoch ausschließlich Dampf zur Stromerzeugung benötigt wird, dient der Entladedampf von Gefällespeichern, wie in anderen Kraftwerken, zur Leistungserzeugung in Speicherturbinen. Die Minutenschwankungen können im allgemeinen durch den Kesselwasserraum ausgeglichen werden.

Schließlich ist hier noch die Verwendung von Dampfspeichern in öffentlichen Heizkraftwerken zu erwähnen, die einen Übergang zu den im vorigen Abschnitt beschriebenen industriellen Werken bilden. Der Heizdampfbedarf weist im Gegensatz zur Strombelastung nur eine Spitze am Morgen auf und fällt dann allmählich im Verlauf des Tages

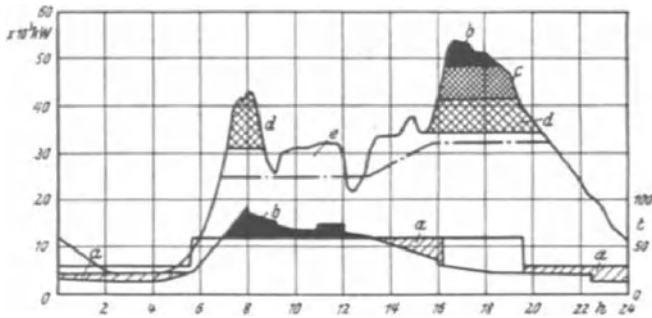


Abb. 110b. Strom- und Heizdampfbelastung.

*a* Speicherladung, *b* Speicherentladung, *c* Leistung aus Frischdampf, *d* Batterieeinsatz, *e* Leistung aus Gegendruckbetrieb.

Abb. 110a und b. Heizkraftwerk mit Ruths-Gefällespeicher (Kraftwerk Leipzig-Nord).

(s. Abb. 110b). Der Dampfspeicher kann zur Deckung der höchsten Spitzen im Strom- und Heizbedarf dienen und dadurch den Verlauf beider Belastungen einander angleichen. Die Schaltung des Werkes (46) (Elektrizitätswerk Leipzig) zeigt Abb. 110a. Der Gefällespeicher wird vom Kesselnetz geladen und gibt den Dampf an das 2,5 atü-Netz ab, an das die Fernheizung und eine Niederdruckturbinen angeschlossen sind. Die Regelung unterscheidet sich nicht von der in reinen Heizanlagen verwendeten Anordnung. Da die Niederdruckturbinen besonders auch als Momentanreserve dienen soll, setzt ihre Steuerung bei plötzlichem Leistungsbedarf durch besondere Impulse, z. B. infolge starken Tourenabfalls, unmittelbar mit der vollen Leistung ein.

Zur Ausnutzung überschüssiger elektrischer Energie kann der Gefällespeicher in Verbindung mit Elektrokesseln benutzt werden, wenn für Strom aus Wasserkraften zeitweise keine Verwendung ist (47). Der im Elektrokessel z. B. während der Nachtstunden erzeugte Dampf



wird gespeichert und steht während der Betriebszeit zur Verfügung. Da jedoch meist die lange Entladedauer (etwa 8 Stunden) sehr große Speicher erforderlich macht, sind die Anlagekosten nur dort tragbar, wo die ersparten Brennstoffmengen hoch bewertet werden können.

## VIII. Wirtschaftlichkeit der Dampfspeicherung.

### 1. Auswirkungen des Betriebes mit Dampfspeichern.

Die wirtschaftliche Berechtigung für den Einbau einer Speicheranlage muß durch die Vorteile nachgewiesen werden, die gegenüber dem Betrieb ohne Speicher erzielt werden können. Dabei muß aber vorausgeschickt werden, daß die im folgenden behandelten günstigen Folgen des Ausgleiches der Bedarfsschwankungen nicht alle gleichzeitig auftreten; vielmehr wird für den besonderen Fall jeweils ein bestimmter Bereich der Ersparnisse den Ausschlag geben. Vor allem ist vorzusetzen, daß die Speicheranlage groß genug sein muß, einen wirksamen Ausgleich herbeizuführen, was jedoch wegen der verhältnismäßig hohen Kosten nur bis zu einer gewissen Grenze möglich ist (s. auch nächstes Kapitel).

Besonders wichtig ist es, indirekte Auswirkungen nur so weit der Dampfspeicherung zuzuschreiben, als sie nicht durch andere Betriebsmittel gleichfalls erreicht werden können. Beispielsweise konnten die bei ungehemmter Produktion entstehenden scharfen Spitzen im Dampfbedarf einfach ohne Dampfspeicher nicht gedeckt werden, solange die Kesselanlage nicht elastisch genug war. Es war daher früher durchaus berechtigt, die Produktionssteigerung, die durch Abkürzung der Fabrikationsprozesse (bei gleichzeitiger Verschärfung der Leistungsspitzen) erzielt wurde, als besonderen Vorteil der Dampfspeicheranlage anzusehen. Die bedeutsamen Fortschritte, die auf dem Gebiete der Anpassungsfähigkeit der Dampferzeugung gemacht wurden, ermöglichen es jedoch, mit neuzeitlichen Kesseln allen praktisch vorkommenden Anforderungen nachzukommen. Es ist daher als Nachweis der Wirtschaftlichkeit stets nur der Vergleich mit den Kosten gleichwertiger Betriebsmittel zulässig.

Die wichtigsten Ersparnisse, die durch Dampfspeicher zu erreichen sind, bestehen in der Verringerung der notwendigen Kesselleistung. Der Speicher enthält im geladenen Zustand eine bestimmte Dampfmenge, die zur Zeit geringerer Belastung überschüssig erzeugt wurde. Bei Überschreiten des mittleren Dampfbedarfes wird der Speicher entladen und die Spitzenlast durch den Speicher gedeckt. Die dabei erzielbare Leistung hängt also nur von der Dauer der Entladung ab, die durch die mittlere Spitzenbreite gekennzeichnet wird (Abb. 111 a).

Die Ersparnis an Kesselleistung wird um so größer sein, je kurzzeitigere Spitzen das Belastungsdiagramm aufweist. Für den Fall, daß eine ungefähr dreieckförmige Spitze zu decken ist (z. B. bei Kraftwerkbelastung), vergrößert sich mit dem Anteil des Speichers an der Spitzenleistung auch die Spitzendauer und damit die je Leistungseinheit erforderliche Speicherkapazität

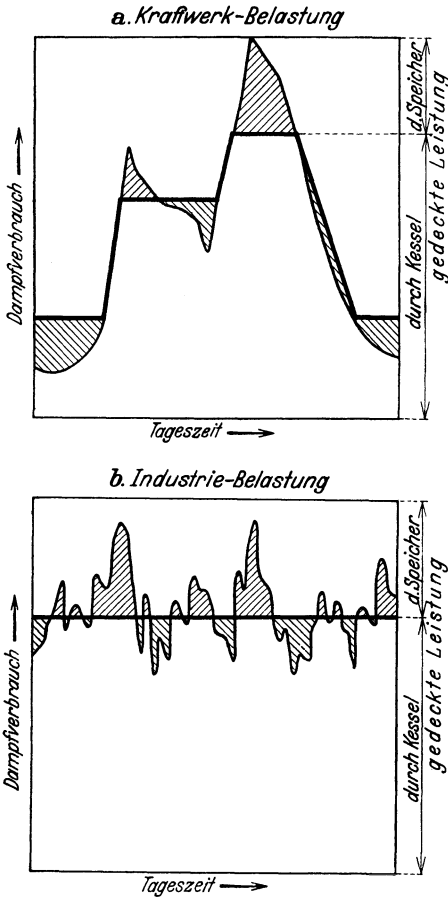


Abb. 111a und b. Verkleinerung der erforderlichen Kesselanlage durch Betrieb mit Dampfspeicher.

proportional. Bis zu einem Grenzwert der Spitzenleistung kann daher immer die Speicheranlage billiger sein als die Kesselanlage.—Wechseln die Belastungsspitzen mit Zeiten erniedrigten Dampfbedarfes (wie meist bei Industrieanlagen), so wird die Speicheranlage häufiger am Tage voll ausgenutzt (Abb. 111b). Die Ersparnis an Kesselleistung wird gleichfalls durch den Anteil der Speicherleistung an der höchsten Leistungsspitze bestimmt.

Die Möglichkeit, durch den Einbau von Dampfspeichern mit einer kleineren Kesselanlage den Bedarf zu decken, ist meist der ausschlaggebende Vorteil bei der Feststellung der Wirtschaftlichkeit. Erst in zweiter Linie kommen die wärmewirtschaftlichen Verbesserungen der Dampferzeugung in Betracht, die durch Ausgleich der Bedarfschwankungen zu erzielen sind. Die Höhe der Brennstoffverluste, die durch den ungleichmäßigen Kesselbetrieb gegenüber der

<sup>1</sup> Barth: Wärme 1929 S. 701. — Praetorius: Arch. Wärmewirtsch. 1925 S. 29. — Koeniger: Arch. Wärmewirtsch. 1929 S. 243.

Kesselbelastung unverändert auf voller Höhe gehalten werden kann. Den Entstehungsursachen nach lassen sich die zusätzlichen Verluste unterscheiden in:

1. Verluste durch Teilbelastung,
2. Verluste durch raschen Belastungswechsel,
3. Verluste durch Stillstand.

Bei Teilbelastung haben Kessel — wie fast alle anderen Betriebsmittel — einen geringeren Wirkungsgrad, der sich durch den von der Belastung unabhängigen Anteil der Verluste (Leerlaufverluste, wie z. B. Abkühlungsverluste, besonders durch Strahlung) ergibt. — Abb. 112 gibt den Wirkungsgradverlauf von neuzeitlichen Kesseln abhängig von der Belastung wieder. Gleichzeitig sind mittlere Werte für die zusätzlichen Verluste durch raschen Belastungswechsel nach Praetorius (32) eingetragen, die als praktisch erzielbare Mittelwerte anzusehen sind. —

Die Stillstandsverluste äußern sich vor allem bei Spitzenkesseln, die nur einige Stunden am Tage betrieben werden und sich während der übrigen Zeit weiter abkühlen, so daß beim Anheizen und Einlaufen ein erhöhter Kohlenverbrauch auftritt. Der

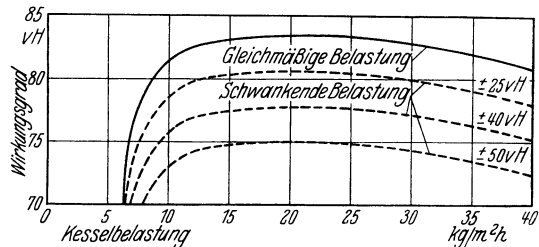


Abb. 112. Kesselwirkungsgrad, abhängig von der Belastung bei gleichmäßigem und schwankendem Verlauf (nach Praetorius).

Betrieb mit Dampfspeicher befreit nicht nur die Kesselanlage von der Deckung der Leistungsspitzen, sondern erhöht auch den Belastungsfaktor während der Ladeperiode und damit wiederum den Kesselwirkungsgrad (48).

Durch Ausgleich der Kesselbelastung werden weiterhin auch alle nachteiligen Einflüsse der Lastschwankungen auf den Dampfzustand beseitigt, die sich in den Veränderungen des Kesseldruckes, der Überhitzungstemperatur und des Wassergehaltes des Dampfes äußern. Am wichtigsten ist die Wirkung des Speichers auf die Druckschwankungen. Während ohne Dampfspeicherung alle Belastungsänderungen — nur durch die Speicherfähigkeit des Kesselwasserraumes gemildert (s. S. 8) — zu entsprechenden Druckveränderungen führen, kann bei Betrieb mit Speicher der Kesseldruck praktisch dauernd unverändert gehalten werden. Als Beispiel sind im Betrieb aufgenommene Druckkurven vor und nach dem Einbau einer Dampfspeicheranlage (22) in Abb. 113 wiedergegeben (s. auch Abb. 90). Der Ausgleich bringt dabei neben dem Wegfall der Dampfverluste beim Abblasen der Sicherheitsventile noch Vorteile für die Leistungserzeugung und Fabrikations-

prozesse. Die erzielbare Leistung wird durch oft auftretende Druckabsenkungen von mehreren at, besonders bei kleinem Gesamtgefälle (etwa bei Gegendruckbetrieb), merkbar beeinträchtigt. Für zahlreiche wärmeverbrauchende Vorgänge ist gleichbleibender Dampfdruck außerordentlich wertvoll. — Durch die wechselnde Kesselbelastung wird aber auch die im Überhitzer an den Dampf übertragene Wärmemenge nicht dauernd die normale Temperatur einstellen können. Besonders da bei stark erhöhter Belastung noch ein beträchtlicher Teil der Wärme zur

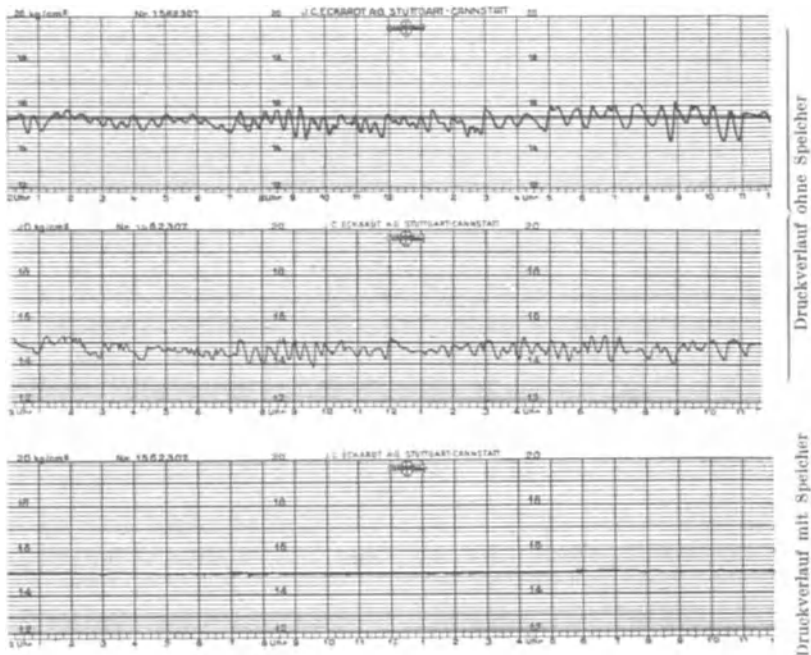


Abb. 113. Ausgleich der Druckschwankungen durch Dampfspeicherung.

Trocknung erforderlich ist, prägen sich die Schwankungen der Dampftemperatur meist sehr stark aus, wie von Praetorius (32) u. a. durchgeführte Messungen zeigen (Abb. 114). Die mitgerissenen Wasserteilchen können dabei, besonders auch bei gleichzeitigem Druckabfall, zu schädlichen Folgen des feuchten Dampfes in Kraftmaschinen und Apparaturen führen.

Schließlich muß auf die erhöhte Beanspruchung der Kesselanlage hingewiesen werden, die gerade durch die Möglichkeit, mit neuzeitlichen Feuerungen auch die schärfsten Bedarfsschwankungen aufzunehmen, gegenüber dem dauernd gleichmäßigen Kesselbetrieb hervorgerufen wird. Die Lastveränderungen führen zu rasch wechselnden

Temperaturen des Feuerraumes, wodurch sowohl Mauerwerk als auch Eisenteile, z. B. Roststäbe, betroffen werden. Im Mauerwerk treten durch die Temperaturunterschiede zusätzliche Spannungen auf. Die Folge des unregelmäßigen Kesselbetriebes wird eine stärkere Abnutzung der Baustoffe sein, wodurch häufigere Reparaturen und kürzere Lebens-

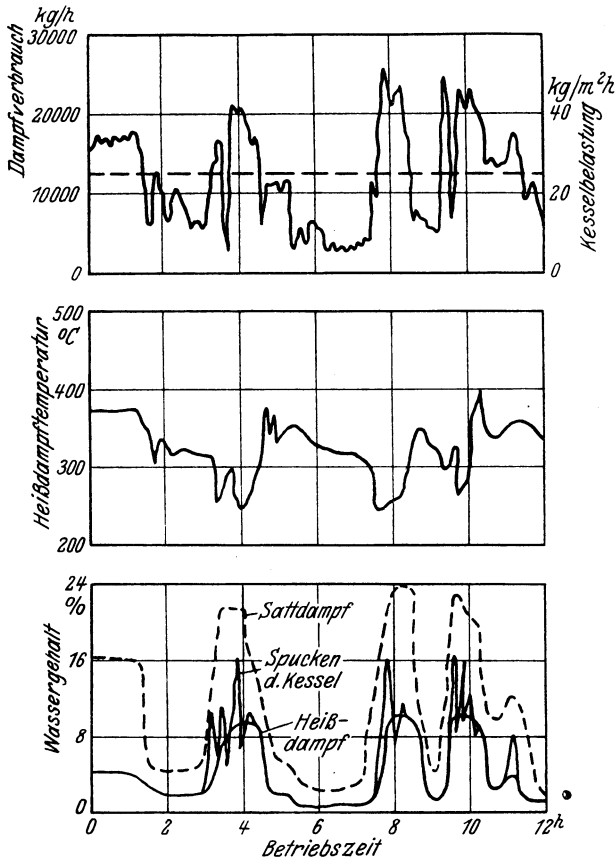


Abb. 114. Einfluß der Dampfverbrauchsschwankungen auf Heißdampf Temperatur und Wassergehalt des Dampfes (nach Praetorius).

dauer der Kesselanlage verursacht werden. Auch Betriebsstörungen treten bei plötzlichem Forcieren viel leichter auf als bei allmählicher Veränderung der Feuerführung.

Demgegenüber werden durch den Dampfspeicher möglichst alle Bedarfsschwankungen vom Kessel ferngehalten. Damit wird das Vorhandensein einer Dampfspeicheranlage auch zur erhöhten Sicherheit des Fabrikationsganges beitragen können, durch dessen Störung unter Umständen schwere Verluste entstehen können. — In gleicher

Weise übt der im Dampfspeicher vorhandene Energievorrat einen günstigen Einfluß auf die Betriebssicherheit aus, da er in verhältnismäßig großer Menge fast ohne jeden Zeitverlust eingesetzt werden kann. Unvorhergesehene, plötzliche Leistungsanforderungen können zum Ersatz von Kesseln, deren Erzeugung plötzlich gestört wurde, oder zur Deckung zusätzlicher Verbrauchsspitzen auftreten. Die Möglichkeit, hierbei auf den Dampfspeicher zurückzugreifen, führt zu einer Beruhigung und Sicherung des ganzen Betriebes.

Besonders zur Momentanreserve aufgestellte Dampfspeicheranlagen übernehmen die Dampflieferung bis ausreichende Kesselreserve angeheizt werden konnte. Diese Aufgabe ergibt sich vor allem in Kraftwerken, von deren ungestörter Stromlieferung die Sicherheit ganzer Städte mit Verkehr, Beleuchtung usw. abhängig ist. Aber auch für zahlreiche Fabrikationsvorgänge würde die Unterbrechung der Dampflieferung eine schwere Gefährdung und Verluste bedeuten, wie z. B. bei der Biererzeugung das Produkt verderben kann, wenn die Kochung (Sud) unterbrochen werden muß.

Schließlich muß der Versuch, alle Schwankungen durch den Kessel aufzunehmen, zu einem komplizierten Betrieb führen, der große Aufmerksamkeit für die dauernden Regelvorgänge erfordert. Demgegenüber kann der Dampfspeicher bei selbsttätigem Betrieb fast ohne jede Bedienung auskommen. Die Kesselfeuerung bleibt fast ständig auf derselben Höhe, so daß der Dampfbetrieb außerordentlich vereinfacht wird und die ganze Aufmerksamkeit der Einstellung günstigster Verbrennungsverhältnisse zugewandt werden kann. Im einzelnen werden noch verschiedenerlei Vereinfachungen möglich, wie z. B. die weitere Dampflieferung an Abteilungen mit geringem Dampfbedarf nach Abstellen der Kessel.

## 2. Kosten der Speicheranlage.

Bevor durch Gegenüberstellung der erzielbaren Ersparnisse und notwendigen Kosten die Grenzen der wirtschaftlichen Anwendung der Dampfspeicherung untersucht werden soll, muß auf die Zusammensetzung der gesamten Kosten zur Errichtung einer Speicheranlage eingegangen werden. Diese unterteilen sich auf die in Abschnitt III dargestellten Elemente, die in sehr verschiedenem Maße für die Gesamtkosten von Bedeutung sind. — Da die absolute Höhe der Kosten von der Zeit, also den augenblicklich geltenden Preisen, stark beeinflußt wird, kann nur auf das gegenseitige Verhältnis und die entscheidenden Kenngrößen näher eingegangen werden.

Zunächst wirkt sich die Größenordnung der Anlage, ebenso wie die der einzelnen Behälter dadurch aus, daß die von der Kapazität weniger abhängigen Kosten bei kleineren Speichern stärker in Er-

# Kostenaufstellung d. Ruthsspeicheranlage Kraftwerk Charlottenburg 40000/50000 kW 8 120 000 RM

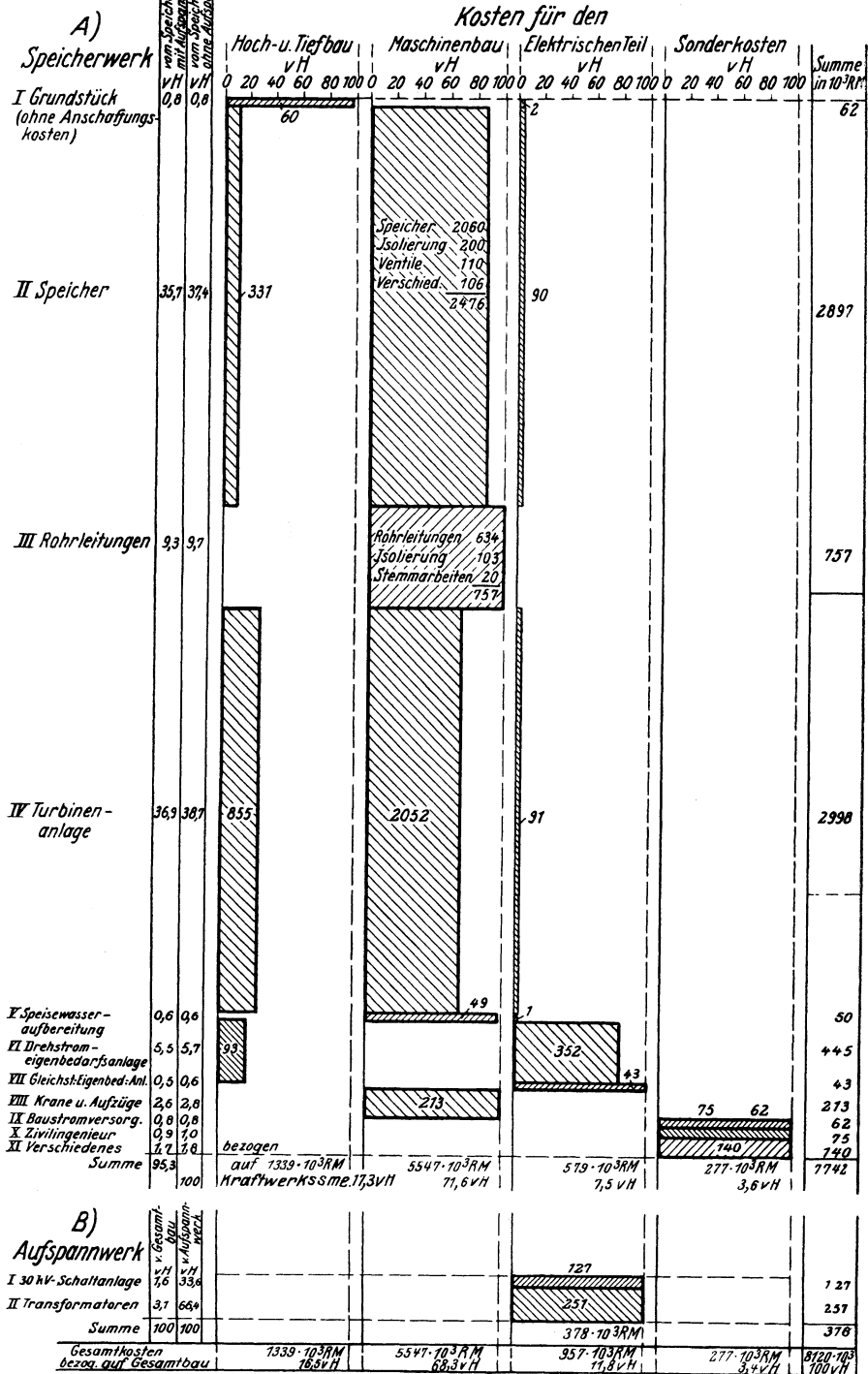


Abb. 115. Beispiel für die Verteilung der Anlagekosten einer Speicheranlage in Kraftwerken (Kraftwerk Charlottenburg).

scheinung treten. Das sind besonders alle zur Ausrüstung und Regelung gehörenden Armaturen. Bei größeren Anlagen von über 300 m<sup>3</sup> dagegen werden die Anlagekosten fast ausschließlich vom Speicherbehälter (mit Wärmeschutz) bestimmt. Beispielsweise ist die Kostenverteilung (einschließlich Turbinen und elektrischem Teil) der Speicheranlage des Kraftwerks Charlottenburg in Abb. 115 dargestellt (48).

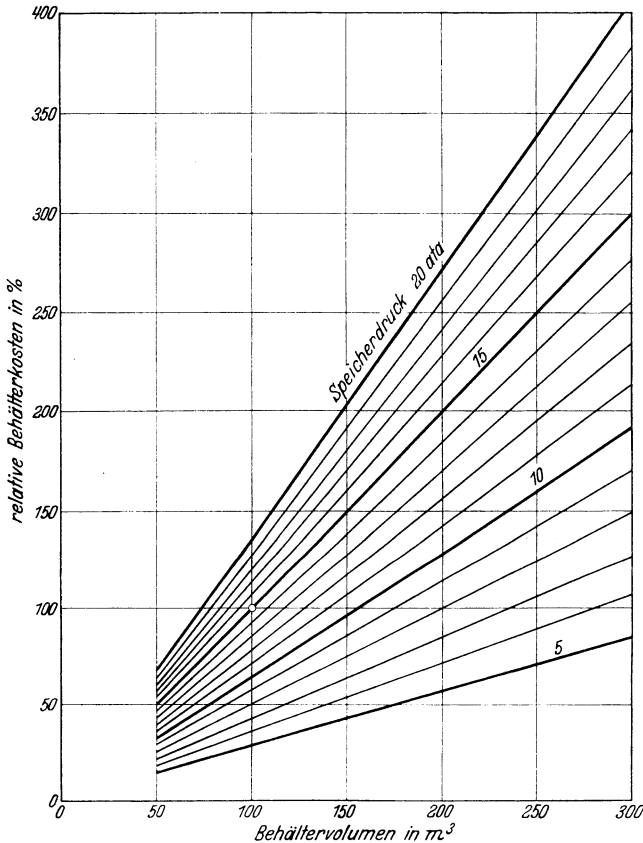


Abb. 116. Relative Behälterkosten.

Die Kosten des Speicherbehälters wachsen in einem gewissen Bereich direkt mit dem Gewicht des verarbeiteten Eisens. Dieses ergibt sich zunächst proportional dem Produkt von Oberfläche mal Blechstärke und nach einfachen Umrechnungen der Gleichungen dieser Größen (s. S. 20) auch proportional dem Produkt von Volumen mal Betriebsüberdruck des Speichers. In Abb. 116 ist das hieraus bestimmbare Verhältnis der Kosten zu einem Behälter von 100 m<sup>3</sup> bei 15 ata als Bezugspunkt dargestellt. Für heute gültige Preise betragen die



Kosten eines solchen Behälters etwa 25 bis 30000 Mark. Dabei sind die Kosten der Lade- und Entladevorrichtungen am Behälter selbst, also beim Gefällespeicher die Düsen und Umlaufrohre, beim Gleichdruckspeicher der Mischvorwärmer, eingeschlossen. Neben den eigentlichen Behälterkosten treten sie meist wenig in Erscheinung. Behälter in stehender Bauart sind im Preise höher als die angegebenen für liegende Bauart und zwar durchschnittlich 10 bis 15%. Enthält die Anlage mehrere Einheiten, so wird infolge der verbilligten Herstellung und Aufstellung der Preis herabgesetzt.

Bei großem Speichervolumen von niedrigem Druck stimmt der Zusammenhang mit dem Produkt beider nicht mehr vollständig, da die Herstellungskosten, z. B. für Nietarbeiten, nicht in gleichem Maße wie das Eisengewicht abnehmen. Natürlich gelten die Preiskurven nicht mehr für unmittelbare Dampfspeicher von geringem Überdruck, da hier der Arbeitsanteil und die Kosten für zusätzliche Einrichtungen noch stärker hervortreten.

Bemerkenswert sind die weitgehenden Bestrebungen zur Verbilligung der Anlagekosten, die besonders bei kleineren Betrieben mit Kesseln älterer Bauart oft angewandt werden. Durch Umbau vorhandener Flammrohrkessel können bei wenigen Änderungen (durch Auswechseln der Böden und Anordnung der nötigen Einbauten) die Kosten auf einen Bruchteil herabgesetzt werden. — Die Möglichkeiten durch technische Weiterentwicklung zu billigeren Ausführungsarten der Dampfspeicherung zu kommen oder wesentliche Vereinfachungen zu erzielen, scheinen heute kaum aussichtsreich, da durch die physikalischen Eigenschaften der Dampfspeicherung die Grenzen eng gezogen sind. Dagegen haben modernere Herstellungsmethoden, besonders die Schweißtechnik, schon große Fortschritte im Behälterbau errungen und werden unzweifelhaft zu noch geringeren Kosten führen. Vor allem bei kleineren Dampfspeichern wird die gesamte Ausführung vereinfacht und auf die primitivste Form zurückgeführt.

Die Kosten für den Wärmeschutz sind, abgesehen vom Material, abhängig von der Isolierstärke und der Behälteroberfläche. Da die spezifische Oberfläche (je Raumeinheit) mit wachsendem Durchmesser kleiner wird, sind auch die Wärmeschutzkosten größerer Behälter verhältnismäßig geringer. Die Bemessung der Auftragstärke hängt von der Bedeutung der Wärmeverluste ab, wie bereits weiter oben (S. 32) dargestellt wurde.

Die Armaturen am Behälter nehmen angenähert mit seiner Größe zu; nur die Sicherheitsventile werden durch die höchste Ladeleistung bestimmt. Die Kosten dieser Armaturen sind besonders bei kleineren Einheiten zu berücksichtigen. — Dagegen spielen die Kosten der in die Zuleitungen eingebauten Armaturen eine größere

Rolle. Meist müssen Absperrschieber mit geringstem Durchflußwiderstand und auch Rückschlagklappen in besonderer Ausführung mit geringem Druckabfall gewählt werden. Die Kosten steigen mit den notwendigen Leistungen (bei schnellster Ladung bzw. Entladung), die die Leitungsdurchmesser festlegen. — Schließlich sind bei Gleichdruckspeichern noch die Kosten der Pumpen einzuschließen, deren Zahl, Förderhöhe und Druck durch die gewählte Schaltung bestimmt sind.

Während sämtliche bisher behandelten Teile der Speicheranlage mit der Zahl der Behältereinheiten zusammenhängen, ist die Regelung nur einmal für die ganze Anlage nötig. Die Kosten sind wie für die anderen Leitungsarmaturen vom Durchmesser der geregelten Leitungen abhängig. Bei mehr als 3 Einheiten verschwindet der Kostenanteil fast vollständig gegenüber den Ausgaben für die übrigen Teile der Anlage.

Da in jedem Anwendungsfall außer der Kapazität und dem Dampfdruck auch die größten Leistungen bei Ladung und Entladung veränderlich sind, und damit die Durchmesser der Leitungen und die übrigen Bedingungen, können die Gesamtkosten nur unter bestimmten Annahmen festgestellt werden. Für Speicheranlagen über  $100 \text{ m}^3$  Volumen muß bei einem Betriebsdruck von etwa 12 atü mit durchschnittlich  $500$  bis  $600 \text{ M/m}^3$  als Anlagekosten gerechnet werden (s. Abb. 115), und zwar sowohl für Gleichdruck- als für Gefällespeicher. Es wird also von der unteren Druckgrenze bzw. von der Speisewassertemperatur abhängen, welche Speicherung günstiger ist. Ist beispielsweise der Entladedruck  $p_u = 4 \text{ ata}$ , so ergibt sich aus Abb. 43a ein spezifisches Volumen des Gefällespeichers von etwa  $12 \text{ m}^3/\text{t}$  gegen nur etwa  $8 \text{ m}^3/\text{t}$  des Gleichdruckspeichers, wenn die Speisewassertemperatur  $t_w$  nur  $100^\circ \text{C}$  beträgt (s. Abb. 83). Mit Berücksichtigung der Wasserfüllung (95%) werden die spezifischen Kosten je 1 t Kapazität:

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| beim Gefällespeicher  | 6300 bis 7600 RM. |
| „ Gleichdruckspeicher | 4200 bis 5000 RM. |

Diese Zahlenwerte dürfen jedoch nicht verallgemeinert werden, da sie mit der unteren Speichergrenze ( $p_u$  bzw.  $t_w$ ) veränderlich sind. Unter günstigen Bedingungen (besonders bei sehr kurzzeitigen Spitzen) können die spezifischen Kosten auf die Hälfte bis ein Drittel der Anlagekosten für die Kesselleistung von 1 t/h sinken.

### 3. Wirtschaftlichkeitsgrenzen.

Für Dampfspeicheranlagen muß, wie für alle Betriebsmittel, die Ersparnisse gegenüber den bisherigen Verfahren der Energieversorgung bringen sollen, der Anwendungsbereich durch wirtschaftliche Überlegungen festgestellt werden. Den Vorteilen und Ersparnissen muß immer die Höhe der notwendigen Ausgaben für die Errichtung und

den Betrieb der Speicheranlage entgegengehalten werden. Nur dort, wo ein Überschuß zugunsten der Dampfspeicherung zu erzielen ist, kann sie Anwendung finden. Trotz der Versuche, die Kosten des Speichers durch Vereinfachung und technische Weiterentwicklung herabzusetzen, sind sie noch immer verhältnismäßig hoch und ein Hauptgrund für die bisher noch beschränkte Verbreitung.

Der korrekte Wirtschaftlichkeitsvergleich muß von den gesamten Kosten ausgehen, die jährlich aufzuwenden sind, um den gestellten Anforderungen zu entsprechen. Die Gegenüberstellung der für die verglichenen Betriebsmittel notwendigen Jahreskosten ergibt die Grenze, bis zu welcher bei wechselnden Betriebsbedingungen (z. B. Benutzungsdauer) und Preisen noch eine wirtschaftliche Berechtigung vorliegt. Die Wirtschaftlichkeitsgrenzen kennzeichnen also:

1. bei gegebenen Preisvoraussetzungen für die einzelnen Betriebsmittel, Brennstoff usw. den Anteil des Einsatzes an Leistung, Betriebsdauer usw., der zu den geringsten Gesamtkosten führt.

2. bei festliegenden Anforderungen bestimmter Betriebsarten den Anwendungsbereich, innerhalb dessen die Preisvoraussetzungen zu einem wirtschaftlichen Einsatz gegeben sind.

Die gesamten Jahreskosten  $K$  (in  $M/a$ )<sup>1</sup> kann man in einen Anteil, der von der angeforderten Höchstleistung abhängig ist, und einen Anteil, der sich mit der im Jahr abgegebenen Energie verändert, zerlegen. Die leistungsabhängigen Kosten umfassen vor allem die Ausgaben für den Kapitaldienst (Zinsen und Amortisation) für die errichteten Anlagen, weiterhin lassen sich aber auch die Kosten der Bedienung und Instandhaltung ebenso wie die Generalunkosten (für Steuern, Versicherung u. ä.) gut angenähert von der ausgebauten Leistung abhängig ansetzen. Legt man der Berechnung die Anlagekosten  $A$  (in  $M$ ) zugrunde, so lassen sich die leistungsabhängigen Jahreskosten mit einer Jahresziffer  $\gamma$  (in  $\%/a$ ) im Verhältnis zu den Anlagekosten ausdrücken. — Die arbeitsabhängigen Jahreskosten umfassen die Brennstoff- und Betriebskosten, die sich je abgegebener Energieeinheit spezifisch ausdrücken lassen:  $b$  (in  $M/t$  Dampf oder  $M/kWh$ ) für spezifische Brennstoffkosten und  $c$  für spezifische Betriebskosten. Bezeichnet noch  $a$  die spezifischen Anlagekosten (in  $M/t/h$  oder  $M/kW$ ) und  $t$  die Benutzungsdauer (in  $h/a$ ), so ist die allgemeine Kostengleichung der Energieerzeugung für die spezifischen Jahreskosten

$$k = \gamma \cdot a + t (b + c) \quad \left[ \frac{M}{h} \cdot a \quad \text{oder} \quad M/kWa \right].$$

Für die einzelnen grundsätzlichen Möglichkeiten die Dampfspeicherung anzuwenden, läßt sich von dieser Grundgleichung — unter Ab-

<sup>1</sup>  $M/a = M/\text{Jahr}$ .

scheidung der unverändert bleibenden Kostenanteile — jeweils diejenige Gegenüberstellung der Kosten ableiten, durch die der wirtschaftliche Anwendungsbereich bestimmt ist. Im wesentlichen handelt es sich um Anwendung:

1. Zur Deckung von Leistungsspitzen,
2. zum Ausgleich der Kesselbelastung,
3. zur Angleichung des Kraft- und Heißdampfverbrauches,
4. zur Momentanreserve.

1. Kennzeichnend für den ersten Fall ist die Verwendung in Kraftwerken, da hier die Frage der wirtschaftlichen Verteilung der Belastung auf Grund des zeitlichen Verlaufes besonders wichtig ist. Sieht man von den übrigen Arten der Krafterzeugung (Wasser- oder Verbrennungskraft) ab, so handelt es sich um den Vergleich von Kessel und Dampfspeicher bei Deckung einer begrenzten Leistungsspitze. Da die jährliche Benutzungsdauer des obersten Spitzenteiles nur wenige hundert Stunden beträgt, spielen ausschließlich die leistungsabhängigen Kosten eine Rolle. Mit dem Index  $k$  für Kessel und  $s$  für Speicher lautet die vergleichende Gleichung:

$$k_k = \gamma_k \cdot a_k = k_s = \gamma_s \cdot a_s \quad \left[ \frac{M/t}{h} \cdot a \quad \text{oder} \quad M/kW a \right].$$

Wie bereits im vorigen Kapitel abgeleitet, können die spezifischen Anlagekosten für Dampfspeicher  $a'_s$  nur von der gespeicherten Energie abhängig gesetzt werden, so daß die Kosten je Leistungseinheit  $a_s$  erst nach Feststellung der Entladedauer, also der Spitzenbreite  $\tau$  ( $h$ ) zu ermitteln sind. Also wird

$$a_s = \tau_s \cdot a'_s \quad \left[ \frac{M/t}{h} \quad \text{oder} \quad M/kW \right]$$

und damit der Kostenvergleich

$$\gamma_k \cdot a_k = \gamma_s \cdot a'_s \cdot \tau.$$

Der Grenzwert der wirtschaftlichen Entladedauer ist

$$\tau_{gr} = \frac{\gamma_k}{\gamma_s} \cdot \frac{a_k}{a_s} [h].$$

Das bedeutet also zunächst, daß Kostengleichheit zwischen Kessel und Speicher besteht, wenn für eine bestimmte Leistung die Einsatzdauer der Speicheranlage  $\tau_{gr}(h)$  beträgt. Betrachtet man beispielsweise eine dreieckförmige Leistungsspitze (Abb. 117), so nimmt die Entladedauer  $\tau$  linear mit der Leistung  $M$  zu. Die Kosten je Leistungseinheit bleiben für Kessel unverändert gleich  $a_k \cdot \gamma_k$ , während sie für Speicher mit der Dauer  $\tau$  zunehmen, bis sie bei  $\tau_{gr}$  ebenso hoch sind wie die Kesselkosten. Die Kostendifferenz wird immer kleiner. Eine Erweiterung der Speicheranlage über die Grenzdauer  $\tau_{gr}$  würde Mehr-

kosten gegenüber der Kesselanlage verursachen. Schließlich sind noch die Gesamtkosten  $K$  für die ganze Leistung angegeben, die als Integralkurve der spezifischen Werte für Kessel linear, für Speicher parabelförmig ansteigen. Die Grenzdauer  $\tau_{gr}$  kennzeichnet das Maximum der Kostendifferenz  $\Delta K$ , die von diesem Punkt wieder abnimmt. Die Grenze der mittleren Spitzenbreite  $(\tau_m)_{gr}$  erst ist von der Spitzenform abhängig. Für Dreieckform wird:

$$[\tau_m]_{gr} = \frac{\tau_{gr}}{2} = \frac{\gamma_k}{\gamma_s} \cdot \frac{a_k}{2 a'_s} [h].$$

Für das Verhältnis der Jahresziffern ist in erster Linie der Kapitaldienst maßgebend, der für beide Betriebsmittel die Zinsen in gleicher Höhe enthält. Dagegen wirkt sich beim Anteil der Amortisation die längere Lebensdauer der Speicheranlage aus. Gerade beim Vergleich mit Spitzenkesseln, die sehr ungleichmäßig und rasch wechselnd beansprucht werden, muß die geringere Abnutzung des einfachen Speichers berücksichtigt werden. — In der Jahresziffer sind weiterhin alle leistungsabhängigen Kosten enthalten. Während die Generalunkosten beider Betriebsmittel ungefähr gleich gesetzt werden können, fallen die Ausgaben für Bedienung und Instandhaltung nur bei der Speicheranlage praktisch vollständig fort. Das Verhältnis der Jahresziffern wechselt je nach dem gültigen Zinsfuß und beträgt durchschnittlich

$$\frac{\gamma_k}{\gamma_s} = 1,3 \text{ bis } 1,6.$$

Mit einem Durchschnittswert  $\frac{a_k}{a'_s} = 2$  (für Gefällespeicher) wird

$$\tau_{gr} = 2,6 \text{ bis } 3,2 [h]$$

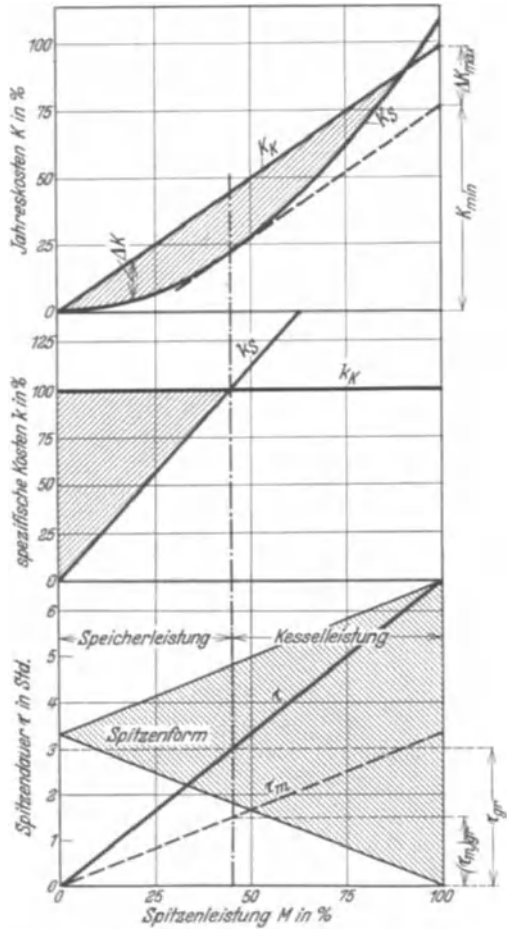


Abb. 117. Vergleich der Kosten für Kessel und Speicher bei dreieckförmiger Leistungsspitze.

und bei Dreieckspitze

$$[\tau_m]_{gr} = 1,3 \text{ bis } 1,6 [h].$$

Die bisher ausgeführten Speicheranlagen zur Spitzendeckung sind fast sämtlich für Entladedauern in diesem Bereich ausgelegt worden.

Erst bei längerer Benutzungsdauer  $t$  muß auch der Unterschied der Brennstoffkosten berücksichtigt werden. Gegenüber den nur für kurze Zeit in Betrieb genommenen Kesseln, deren Wirkungsgrad infolge der Abkühlungsverluste während des Stillstandes stark verschlechtert wird, kann man durch zusätzliche Dampflieferung mittels Speicher den Kohlenverbrauch verringern. Der in den Speicher geladene Dampf kann in Zeiten niedriger Belastung von Kesseln geliefert werden, die bereits in Betrieb sind, also mit bestem Wirkungsgrad. Die Abkühlung des isolierten Speicherbehälters ist gering im Vergleich zu den Verlusten des Kessels (32), so daß der gesamte Wirkungsgrad bei Spitzendeckung mit Speicher beträchtlich verbessert werden kann. Bei der Krafterzeugung muß für den Gefällespeicher allerdings noch der Gefälleverlust berücksichtigt werden, der meit den größten Teil der Ersparnisse wieder ausgleicht.

Für Industriebetriebe kann man zu gleichen Ergebnissen gelangen, wenn man die betriebswirtschaftlichen Hemmungen der Produktion durch ungenügende Dampflieferung beseitigt und dasjenige Belastungsdiagramm der Dampferzeugung zugrunde legt, das bei voller Ausnutzung der Fabrikationseinrichtungen auftreten würde. Die zur Deckung der dann meist sehr scharfen Leistungsspitzen notwendigen Kosten bei Kessel- oder Speicherbetrieb können verglichen und die wirtschaftliche Grenze des durch Speicher zu übernehmenden Leistungsanteiles bestimmt werden. Da die Leistungsspitzen hier während des ganzen Jahres auftreten, spielen die Brennstoffersparnisse eine größere Rolle.

2. Ist die Dampferzeugungsanlage zur Lieferung der angeforderten Leistung vollständig ausreichend, so müssen sich die Kosten der Speicheranlage aus den Ersparnissen, die durch Ausgleich der Kesselbelastung allein zu erzielen sind, amortisieren. Sobald also die jährliche Ersparnis an Brennstoff- und Betriebskosten kleiner wird als die Jahreskosten der Speicheranlage, ist die Grenze der wirtschaftlichen Anwendung überschritten. Es handelt sich also nicht mehr um die Bestimmung des wirtschaftlichsten Ausgleiches, da auch im allgemeinen der vollständige Ausgleich der Belastungsschwankungen erst zu merklichen Ersparnissen führt. Damit sind aber die notwendige Größe und die Kosten der Speicheranlage festgelegt.

Man erhält als Gleichung der Grenzbedingung:

$$\gamma_s \cdot a'_s \cdot \sigma \leq t[(b_1 - b_2) + (c_1 - c_2)],$$

wenn man mit  $\sigma$  die je Leistungseinheit (bezogen auf die mittlere Belastung) erforderliche Speicherkapazität bezeichnet. Diese Größe von der Dimension  $\frac{t}{t/h}$  oder  $\frac{\text{kWh}}{\text{kW}}$ , also  $h$ , gibt an, wie lange Spitzenleistungen von 100% über dem Mittelwert durch den Speicher gedeckt werden könnten. Die Ersparnis an spezifischen Brennstoffkosten  $b_1 - b_2$  kann aus der Wirkungsgradverbesserung von  $\eta_1$  auf  $\eta_2$  abgeleitet werden, wenn die Kosten der Rohenergie  $r$  (in  $M/1000$  kcal) und die Dampf-erzeugungswärme  $i_D$  (kcal/kg) bekannt sind.

Sind durch den Einbau des Speichers ausschließlich Brennstoffersparnisse zu erzielen, so wird also

$$t \cdot r \cdot i_D \left[ \frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \right] \geq \gamma_s \cdot a'_s \cdot \sigma.$$

Aus dieser Bedingung läßt sich der Mindestwert der Wirkungsgradverbesserung bei feststehenden Kostengrößen bestimmen, sofern aus den Belastungsverhältnissen  $t$  und  $\sigma$  ermittelt wurden.

Beispielsweise soll in einem bestimmten Fall  $r = 0,001$  [ $M/1000$  kcal] und  $i_D = 700$  [kcal/kg] betragen. Zum vollständigen Ausgleich der Kesselbelastung wurde die notwendige Speicherfähigkeit  $\sigma = 0,3 \frac{t}{t/h}$  ermittelt, für deren Kosten etwa  $a'_s = 5000$  [ $M/t$ ] bei  $\gamma_s = 15$  [%/a] zu setzen wären. Dann ergibt sich bei einer Benutzungsdauer  $t = 3000$  [h/a]

$$\frac{1}{\eta_1} - \frac{1}{\eta_2} \geq \frac{0,15 \cdot 5000 \cdot 0,3}{3000 \cdot 700 \cdot 0,001} = 0,107.$$

Also müßte bei einem Kesselwirkungsgrad ohne Speicher von z. B.  $\eta_1 = 70$  [%] durch den Ausgleich der Schwankungen eine Steigerung auf mindestens  $\eta_2 = 75,5$  [%] zu erreichen sein.

Bei ausreichender Kesselanlage bewirkt die Herabsetzung der angeforderten Dampfleistung auf den Mittelwert eine Entlastung, die unter Umständen zur Stilllegung von älteren Kesseln und auch ganzer Kesselhäuser führen kann. Damit wird der Betrieb vereinfacht und an Ausgaben für Bedienung, Reparaturen u. ä. gespart, was auf die erzeugte Dampfmenge umgerechnet den Brennstoffersparnissen zuzuzählen ist.

3. Die wirtschaftlichen Vorteile, die durch Angleichung des Kraft- und Heizdampfbedarfes zu erreichen sind, hängen von der Durchführung der Speicherung ab. Zunächst kann die im Gegen-druckbetrieb erzeugte Strommenge vergrößert werden, indem der überschüssig anfallende Dampf in den Speicher geführt wird. Der geringere Wärmeverbrauch gegenüber dem Kondensationsverfahren multipliziert mit dem Gewinn an Leistungsausbeute bestimmt die Ersparnis an Brennstoff. Stimmt der tägliche Mittelwert des anfallenden Gegen-druckdampfes mit dem des Heizdampfbedarfes überein, so kann statt

einer Anzapfmaschine eine bedeutend billigere, einfache Gegendruckmaschine gewählt werden. Von den Speicherkosten sind diese ersparten Anlagekosten abzuziehen. Der Verlauf der Belastungen spielt also hierbei eine entscheidende Rolle. Ist z. B. nur der Kraftverbrauch schwankend, während mit einem praktisch unveränderlichen Heizdampfbedarf zu rechnen ist, so ist zweckmäßiger die Speicherung zur Spitzendeckung einzusetzen, so daß im Gegendruckbetrieb nur die möglichst gleichmäßig von den Kesseln gelieferten Dampfmengen zur Erzeugung der Grundlast verwendet werden.

4. Besonders in Elektrizitätswerken hat die Forderung nach höchster Sicherheit gegen Unterbrechungen in der Stromlieferung zur augenblicklich eingriffsbereiten Reserve geführt. Für den wirtschaftlichen Vergleich kann angenommen werden, daß in voller Bereitschaft gehaltene Reservekessel mit elastischer Feuerung auch in so kurzer Zeit die angeforderten Dampfmengen liefern können wie Dampfspeicher. Die zugehörigen Turbosätze müssen in beiden Fällen leer mitlaufen, wobei sie unter Umständen zur Blindstromerzeugung ausgenutzt werden können. Es stehen also den Jahreskosten der Speicheranlage, einschließlich Abkühlungsverlusten, die Bereitschaftskosten einer Kesselanlage gleicher Leistung gegenüber. Die notwendige Speichergröße hängt von der Zeitdauer  $\tau_a$  (h) ab, in der Reservekessel vom kalten Zustand aus angeheizt werden können. Bezeichnet noch  $b_0$  (M/t) die stündlichen Kohlekosten zum Bereithalten einer Kesselleistung von 1 (t/h), so kann man die Kostengleichheit ausdrücken:

$$\gamma_s \cdot a'_s \cdot \tau_a \leq t_0 \cdot b_0.$$

Je schneller die Reservekessel angeheizt werden können, desto kleiner kann die Speicheranlage gehalten werden und desto weiter rückt die Wirtschaftlichkeitsgrenze in das Gebiet niedriger Bereitschaftskosten vor.

Ist bei gleichen Werten von  $\gamma_s = 15$  [%/a] und  $a'_s = 5000$  [M/t] beispielsweise  $\tau_a = 0,2$  [h], so wird die Momentanreserve mit Speichern wirtschaftlich, sobald für  $t_0 = 8760$  [h/a] die stündlichen Bereitschaftskosten größer als  $b_0 = 0,017$  [M] je 1 [t/h] Kesselleistung sind. Es wird also von den Brennstoffkosten und der verbrauchten Kohlenmenge, die je nach Bauart und Kesselgröße sehr verschieden sein kann, abhängen, ob die Errichtung einer Speicheranlage wirtschaftliche Vorteile bringen kann.



## Literaturverzeichnis.

1. Balcke: Wärmespeicher für Großheizungs- und Heißwasser-Bereitungs-Anlagen. *Gesundh.-Ing.* 1927 S. 550.
2. — Die Abwärmetechnik. München u. Berlin: Oldenbourg 1928.
3. — Der Kießelbach-Wärmespeicher in der Praxis. Firmendruckschrift 1929.
4. Beuthner: Erweiterung des Kraftwerkes Oberlungwitz. *Elektr.-Wirtsch.* 1929 S. 407.
5. Burghardt: Die Ruths-Speicher-Anlage des Bahnkraftwerks Mittelsteine. *Siemens-Z* 1927 S. 402.
6. Föhl: Ruthsturbinen. *Arch. Wärmewirtsch.* 1928 S. 243.
7. — Über die Ladung von Ruthsspeichern. *Ing.-Arch.* 1930 Heft 4.
8. Grunewald: Abdampfverwertungsanlagen. *Z. VDI* 1911 S. 247 u. 378.
9. Halle, Schmidt: Wasserstandsanzeiger für stehende Ruthsspeicher. *Arch. Wärmewirtsch.* 1930 S. 301.
10. — — Die Dampfspeicheranlage im Kraftwerk Charlottenburg. *Wärme* 1931 S. 925.
11. Heller: Das Rateausche Verfahren zur Verwertung des Dampfes von Maschinen mit unterbrochenem Betrieb. *Z. VDI* 1906 S. 355.
12. Jurenka, Wirz: Das Wärmespeicherproblem unter besonderer Berücksichtigung der Leistungselastizität von Dampfkesseln. *Arch. Wärmewirtsch.* 1923 S. 187.
13. Knopf: Beitrag zur Theorie des Dampfspeichers von Ruths. Diss. Dresden 1925.
14. Koch: Ausgleich durch Speisewasserspeicherung. *Arch. Wärmewirtsch.* 1927 S. 394.
15. — Einfluß der Betriebsverhältnisse auf Ausgestaltung und Ausbaurkosten von Dampfkraftanlagen. *Wärme* 1929 S. 955.
16. Kundt: Die Gesetze der Gleichdruckspeicherung. *Arch. Wärmewirtsch.* 1929 S. 207.
17. Landau: Ruthsturbine, Entwicklung und Aufbau. *Wärme* 1930 S. 409.
18. Leppin: Betriebserfahrungen und Bedeutung des Ruthsspeichers für die Färberei. *Wärme* 1931 S. 615.
19. Marguerre: Über ein neues Verfahren zur Aufspeicherung elektrischer Energie. *Elektr.-Wirtsch.* 1924 S. 27.
20. —, Koch: Gleichdruckspeicher als Ausgleich in Vorschalt- und Heizkraftanlagen. *Wärme* 1929 S. 334.
21. Mattersdorff: Ruthsspeicher im elektrischen Schnellbahnbetrieb. *Arch. Wärmewirtsch.* 1927 S. 375.
22. May: Gleichdruckspeicher in Papierfabriken. *Wbl. Papierfabr.* 1930.
23. Mayer: Wärmespannungen in Gleichdruckspeichern. *VDI-Forsch.-Heft* 346.
24. Melan: Speicherdampfturbinen für Spitzenkraftwerke. *Siemens-Z.* 1927 S. 417.
25. Molin: Die Reservekraftanlage im städtischen Elektrizitätswerk zu Malmö. *Elektr.-Wirtsch.* 1923 S. 46.

26. Musil: Wirtschaftlichkeit der Energiespeicherung für Elektrizitätswerke. Berlin: Julius Springer 1930.
27. — Die Speicherung in Heizkraftwerken. Wärme 1931 S. 795.
28. Nesselmann, Dardin: Ausdampfversuche an Ruthsspeichermodellen. Wiss. Veröff. Siemens-Konz. 1930 S. 369.
29. Oelschläger: Verbilligung der Dampfkraftanlagen durch Kießelbachspeicher. Wärme 1929 S. 918.
30. — Gekuppelter Gleichdruck- und Gefällespeicher für Belastungsausgleich in Dampfkraftwerken. Wärme 1930 S. 469.
31. Pauer: Energiespeicherung. Dresden und Leipzig: Th. Steinkopf 1928.
32. Praetorius: Ursachen und Folgen der Belastungsschwankungen im Kesselbetrieb. Z. bayer. Revis.-Ver. 1930 S. 91.
33. — Strahlungs- und Abkühlungsverluste von Kesseln und Wärmespeichern. Arch. Wärmewirtsch. 1932 S. 157.
34. Roentsch: 20000 kW-Ruthsspeicher-Anlage im Gemeinschaftswerk Hattingen. AEG 1931 S. 669.
35. Ruths: Der Ruthsspeicher. Z. VDI 1922 S. 509.
36. — Spitzendeckung in Großkraftwerken. Elektrotechn. Z. 1927 S. 916.
37. Schiebl: Der Ruthsspeicher in chemischen Betrieben. Arch. Wärmewirtsch. 1927 S. 379.
38. Schult: Wirtschaftlichkeit der Gleichdruckspeicherung bei Dampfkraftanlagen. Berlin: Julius Springer 1930 (in „Forschung und Technik“).
39. Schulz, Grop: Ruthsspeicher für Spitzenkraftherzeugung in Berlin. Elektr.-Wirtsch. 1930 S. 153.
40. Schulze: Erste Erfahrungen und Versuche an einer Dr. Ruths-Wärmespeicheranlage in Deutschland. Wärme 1924 S. 261.
41. Severin, Scupin: Betriebserfahrungen mit einem Ruthsspeicher in einem Textilbetrieb. Arch. Wärmewirtsch. 1927 S. 369.
42. — Heißwasserspeicher in Stahl- und Walzwerk. Siemens-Z. 1929 S. 632.
43. Stein: Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen. Berlin: Julius Springer 1926.
44. — Bedeutung des Ruthsspeichers für die Elektrizitätswirtschaft. Z. VDI 1930 S. 754.
45. Stender: Wärmeverbrauch von Ruths-Kraftanlagen. Arch. Wärmewirtsch. 1930 S. 335.
46. Swoboda: Momentanreserve mit Ruthsspeichern in Leipzig. Elektr.-Wirtsch. 1930 S. 312.
47. Walder: Ausnutzung elektrischer Überschußenergie durch Wärmespeicherung. Arch. Wärmewirtsch. 1927 S. 390.
48. Wellmann: Untersuchungen an einer 50000-kW-Ruthsanlage. Z. VDI 1930 S. 743.
49. Witz: Die Entwicklung der Dampfspeicher und deren Verwendung. Elektrotechn. Z. 1925 S. 1797.
50. Wärmespeicher nach Druitt-Halpin in englischen Kraftwerken. Z. VDI 1904 S. 1396 u. S. 2011.
51. Dampfspeicher mit unveränderlichem Rauminhalt. Z. VDI 1921 S. 498.
52. Gleichdruck-Wärmespeicher der Schachtanlage Fürst Hardenberg. Elektrotechn. Z. 1931 S. 593.

## \* Die Wirtschaftlichkeit der Energiespeicherung für Elektrizitätswerke

Eine energiewirtschaftliche Studie

von Dr.-Ing. Ludwig Musil

Mit 89 Textabbildungen. X, 143 Seiten. 1930. RM 18.—

Der Verfasser untersucht zuerst die Verwendbarkeit von Speichern für Wärme- und Wasserkraftwerke, und zwar sowohl wenn diese allein als auch im Verbundbetrieb arbeiten. Er geht von einem aus der Praxis entnommenen Durchschnitts-Jahresbelastungsdiagramm aus und stellt die Gleichung für die Kosten der abgegebenen kWh auf unter Berücksichtigung der im Kraftwerk entstehenden Kosten und jener durch die Leitungs- und Umspannanlagen auflaufenden, und untersucht den Einfluß einer Speicheranlage auf diese Kosten. Das allgemeine Problem des Lastausgleiches durch Speicherung ist sehr gründlich behandelt, und daran anschließend wird die Energiespeicherung bei einem Wasser- und einem Dampfkraftwerke besprochen, die zusammen im Verbundbetrieb arbeiten. Ein besonderer Abschnitt ist der Energiespeicherung in einem Zwischenstadium der Umwandlung gewidmet und ein weiterer der Speicherung der Rohenergie. Die zweite Hälfte des Inhaltes dient den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen. Die Kosten für Kraftwerke, Leitungen und Umspannanlagen werden erörtert und die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Speicherungsarten wird verglichen. — Es liegt eine äußerst eingehende Bearbeitung dieses wichtigen Gebietes vor; dem Energiewirtschafts-Fachmann kann das Buch nur wärmstens empfohlen werden.

„Elektrotechnik und Maschinenbau“

## \* Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen

Einfluß von Lastschwankungen auf Dampfverbraucher und Kesselanlage sowie Wirkungsweise und theoretische Grundlagen der Regelvorrichtungen von Dampfnetzen, Feuerungen und Wärmespeichern

Von Th. Stein

Mit 240 Textabbildungen. VIII, 389 Seiten. 1926. Gebunden RM 30.—

Den ersten zusammenhängenden Überblick der fortschreitenden Entwicklung selbsttätiger Einrichtungen, durch die sich die Dampfanlage den Verhältnissen des schwankenden Betriebs anpassen läßt, gibt das vorliegende Werk in vorzüglicher Weise. Die wichtigsten Ausführungen werden behandelt und die Bedingungen festgestellt, die für Schaltung, Bau und Betrieb von Regeleinrichtungen und Speichern maßgebend sind. Es werden Untersuchungen der dynamischen Verhältnisse bei der Regelung von Dampfnetzen und Feuerungen angestellt, die den Verlauf dieser Regelvorgänge der rechnerischen Behandlung zugänglich machen und die Grundsätze erkennen lassen, die zur Sicherung der Stabilität der Regeleinrichtungen befolgt werden müssen. Besonders eingehend sind neuartige elektrische Aussetzsteuerungen behandelt, die als Differentialdruckregler bezeichnet werden, ferner die bisher zur Feuerungsregelung noch nicht benutzten Rauchgasprüfer. Ableitungen über die Stabilität mittelbarer Schaltungen geben Aufschluß über die Bedingungen, die die Anlage bei derartigen Regelvorgängen erfüllen muß. „Braunkohle“

\* **Forschung und Technik.** Im Auftrage der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft herausgegeben von Professor Dr.-Ing. Dr. rer. pol. e. h. W. Petersen. Mit 597 Abbildungen im Text. VII, 576 Seiten. 1930.

Gebunden RM 40.—

Enthält u. a.: Wirtschaftlichkeit der Gleichdruckspeicherung bei Dampfkraftanlagen. Von H. Schult. Mit 41 Bildern.

---

\* Auf die Preise der vor dem 1. Juli 1931 erschienenen Bücher wird ein Nachlaß von 10% gewährt.

- \* **Der Dampftrieb.** Leitfaden für Betriebsingenieure, Werkführer und Heizer. Auf Veranlassung des Schweizerischen Vereins von Dampfkessel-Besitzern herausgegeben von E. Höhn, Oberingenieur. Mit 229 Abbildungen im Text und 10 Zahlentafeln. 240 Seiten. 1929. Kart. RM 6.—
- 
- \* **Höchstdruckdampf.** Eine Untersuchung über die wirtschaftlichen und technischen Aussichten der Erzeugung und Verwertung von Dampf sehr hoher Spannung in Großbetrieben. Von Dr.-Ing. Friedrich Münzinger. Zweite, unveränderte Auflage. Mit 120 Textabbildungen. XII, 140 Seiten. 1926. RM 7.20; gebunden RM 8.70
- 
- \* **Brand-Seufert, Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebsüberwachung, insbesondere zur Überwachung des Dampfbetriebes.** Zugleich ein Leitfaden für Maschinenbaulaboratorien technischer Lehranstalten. Neu herausgegeben von Dipl.-Ing. Franz Seufert, Oberingenieur für Wärmewirtschaft. Fünfte, verbesserte und erweiterte Auflage. Mit 334 Abbildungen, einer lithographischen Tafel und vielen Zahlentafeln. X, 430 Seiten. 1926. Gebunden RM 29.40
- 
- \* **Die Gestaltung und Berechnung von Rauchgaswärmern (Economisern).** Von Dr.-Ing. Lothar Possner. Mit 117 Textabbildungen, 20 Zahlentafeln und zahlreichen Rechnungsbeispielen aus der Praxis. V, 152 Seiten. 1929. RM 14.50; gebunden RM 16.—
- 
- \* **Kraft- und Wärmewirtschaft in der Industrie.** In zwei Bänden.  
Erster Band: Allgemeine Grundlagen der Kraft- und Wärmewirtschaft in der Industrie. Von Dr.-Ing. Ernst Reutlinger, Vorstand der Ingenieurgesellschaft für Wärmewirtschaft A.-G., Köln, unter Mitwirkung von Oberbaurat Ing. M. Gerbel, beh. aut. Zivilingenieur für Maschinenbau und Elektrotechnik, Wien. Gleichzeitig dritte, vollständig erneuerte und erweiterte Auflage von Urbahn-Reutlinger, Ermittlung der billigsten Betriebskraft für Fabriken. Mit 109 Textabbildungen und 53 Zahlentafeln. V, 264 Seiten. 1927. Gebunden RM 16.50  
Zweiter Band: Spezielle Kraft- und Wärmewirtschaft in den einzelnen Industrien. Von Oberbaurat Ing. M. Gerbel, beh. aut. Zivilingenieur für Maschinenbau und Elektrotechnik, Wien, unter Mitwirkung von Dr.-Ing. Ernst Reutlinger, Vorstand der Ingenieurgesellschaft für Wärmewirtschaft A.-G., Köln. Gleichzeitig dritte, vollständig erneuerte und erweiterte Auflage von Gerbel, Kraft- und Wärmewirtschaft in der Industrie (Abfallenergie-Verwertung). Mit 102 Textabbildungen und 33 Zahlentafeln. VII, 338 Seiten. 1930. Gebunden RM 20.—
- 
- \* **Abwärmeverwertung** zu Heiz-, Trocken-, Warmwasserbereitungs- und ähnlichen Zwecken. Von Ing. M. Hottinger, Privatdozent, Zürich. Mit 180 Abbildungen im Text. X, 240 Seiten. 1922. RM 8.—; gebunden RM 10.—
- 
- \* **Die Abwärmeverwertung im Kraftmaschinenbetrieb** mit besonderer Berücksichtigung der Zwischen- und Abdampfverwertung zu Heizzwecken. Eine wärmetechnische und wärmewirtschaftliche Studie. Von Dr.-Ing. Ludwig Schneider. Vierte, durchgesehene und erweiterte Auflage. Mit 180 Textabbildungen. VIII, 272 Seiten. 1923. Gebunden RM 10.—

\* Auf die Preise der vor dem 1. Juli 1931 erschienenen Bücher wird ein Nachlaß von 10% gewährt.