

Ruths-Wärmespeicher in Kraftwerken

Von

Dr.-Ing. Friedrich Münzinger

Mit 38 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1922

Ruths-Wärmespeicher in Kraftwerken

Von

Dr.-Ing. Friedrich Münzinger

Mit 38 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH
1922

Sonderabdruck aus den
Mitteilungen Nr. 319 der Vereinigung der Elektrizitätswerke e. V.

Nach einem Vortrag,
gehalten auf der Hauptversammlung der Vereinigung
der Elektrizitätswerke e. V. in Wiesbaden
am 23. Juni 1922

ISBN 978-3-662-28261-8
DOI 10.1007/978-3-662-29779-7

ISBN 978-3-662-29779-7 (eBook)

Alle Rechte vorbehalten

Ruths-Wärmespeicher in Kraftwerken.*)

I. Einleitung.

a) Die besonderen Verhältnisse bei Elektrizitätswerken.

Die Einsicht, daß für die Kohlenkosten und die gesamten Betriebskosten eines Werkes nicht der Wirkungsgrad der Kessel und Maschinen bei Vollast und im Beharrungszustand allein maßgebend ist, bricht sich mehr und mehr Bahn, wengleich sie noch nicht in dem Maße durchgedrungen ist, wie es mit Rücksicht auf ihre fundamentale Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit eines Werkes nötig wäre. Immer wieder begegnet man bei geschäftlichen Verhandlungen, in Büchern und in der Fachpresse Äußerungen, die eine vernünftige Bewertung der sogenannten Garantie- oder „Parade-wirkungsgrade“ vermissen lassen und die die für die Wirtschaftlichkeit maßgebenden Zusammenhänge verkennen.

Wenn hierin allmählich Wandel geschaffen worden ist, so haben hierzu in erster Linie die Elektrizitätswerke beigetragen, bei denen jede Erniedrigung der Betriebskosten besonders wichtig ist. In Elektrizitätswerken ist die Energieerzeugung Selbstzweck des Unternehmens. Jede kleine Kohlenersparnis hat daher einen weit größeren Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit als beispielsweise in einer chemischen Fabrik, wo Kraft- und Wärmeerzeugung doch nur ein mehr oder weniger wichtiger Nebenbetrieb sind. Die s. Zt. zunächst verblüffende Feststellung, daß zwei Elektrizitätswerke von fast genau gleicher Größe, mit nahezu denselben Maschinen und demselben Brennstoff, oft sehr verschiedenen Wärmeverbrauch für 1 kWh hatten, obgleich in beiden Fällen die Betriebsführung als etwa gleichwertig angesehen werden mußte, gab hauptsächlich Veranlassung, die die Betriebskosten beeinflussenden

Punkte zu untersuchen und die Wirkung des Belastungsfaktors festzustellen.

Man erkannte, daß nicht nur die mittlere tägliche Stromabgabe, sondern in hohem Maße der zeitliche Verlauf der Belastung während eines Tages oder während einer bestimmten Betriebsperiode den Wärmeverbrauch für 1 kWh beeinflußt. Es ist ja auch unschwer einzusehen, daß von mehreren Werken mit gleicher täglichem Stromerzeugung dasjenige am wenigsten Kohle verbraucht, dessen Belastung am gleichmäßigsten Tag und Nacht hindurchgeht. Aber nicht nur der spezifische Wärmeverbrauch, sondern auch sämtliche andere Unkosten, insbesondere die Ausgaben für Bedienung, Abschreibung und Verzinsung des Anlagekapitals und meist auch die Reparatur- und Unterhaltungskosten werden bei völlig konstanter Belastung ein Mindestwert, weil die Mannschaften und die gesamten Betriebseinrichtungen am besten ausgenutzt werden, und weil die installierte Leistung und damit das Anlagekapital nicht mehr nach einer die durchschnittliche Belastung mehr oder weniger überschreitenden Spitze bemessen werden müssen. Die Bemühungen der Leiter von Elektrizitätswerken haben sich daher im Laufe der Jahre immer mehr darauf gerichtet, Täler und Höhen der Belastungskurve durch geeignete Maßnahmen auszugleichen, um einen möglichst hohen Belastungsfaktor zu erzielen. Die Verkopplung verschiedener Werke miteinander und eine zweckmäßige Tarifpolitik haben sich hierbei als wirksamste Mittel erwiesen, dagegen war es bisher noch nicht gelungen, die Belastungsschwankungen von der Kesselanlage durch Speicherung von Dampfergie während der Schwachlastperioden fernzuhalten.

b) Die Abhängigkeit des Brennstoffverbrauches vom Charakter der Belastungskurve.

Infolge des sehr ungleichmäßigen Verlaufes der Belastungskurve der überwiegenden Zahl aller Elektrizitätswerke tritt bei Kesseln und Dampfturbinen

*) Den Herren Dipl.-Ing. Schrenk und Steinemann spreche ich für ihre wertvolle Unterstützung meinen besten Dank aus.

ein erheblicher Mehrverbrauch an Wärme gegenüber dem günstigsten Verbrauch bei Normalbelastung und im Beharrungszustande auf durch:

1. Verschlechterung des Wirkungsgrades infolge Teilbelastung und Ueberlast,
2. Verschlechterung des Wirkungsgrades durch Störungen des Gleichgewichtszustandes der Roste,
3. Leerlauf- und Abkühlungsverluste,
4. Verbrauch an Anheizkohle,
5. Verluste durch abblasende Sicherheitsventile.

Man hat versucht, durch geeignete Konstruktion von Kessel und Feuerung diese Verluste möglichst zu verkleinern und dabei schon recht bemerkenswerte Ergebnisse erzielt. Die Verluste unter 1. u. 2. können insbesondere bei gasarmer oder stark aschenhaltiger Steinkohle oder bei feuchter Rohbraunkohle sehr ins Gewicht fallen, weil bei Unter- oder Ueber-schreitung der günstigsten Rostbelastung der Verbrennungsprozeß unter Umständen erheblich leidet. Insbesondere die sogenannte „freie Rostfläche“ spielt eine große Rolle, weil von ihr der CO_2 -Gehalt der Rauchgase bei Teillast in hohem Maße beeinflusst wird. Bei Elektrizitätswerken kommt es daher besonders darauf an, Konstruktion und Bauart der Roste so zu wählen, daß sie bei der durchschnittlichen Belastung des Werkes tunlichst günstig arbeiten. Welche Unterschiede allein durch Roste auftreten können, zeigt Abb. 1, die der wertvollen

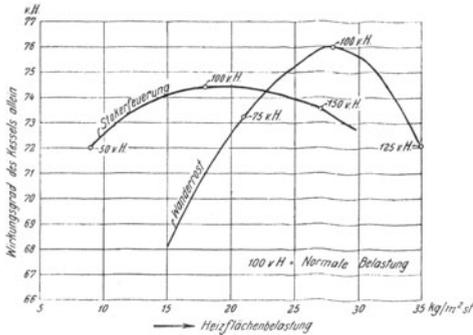


Abb. 1.

Kesselwirkungsgrad bei einer Stokerfeuerung und einem Wanderroste bei verschiedener Heizflächenbelastung.

Abhandlung von Guilleaume „Die Wärmeausnutzung neuerer Dampfkraftwerke und ihre Ueberwachung“*) entnommen ist und den Wirkungsgrad zweier Wasserrohrkessel mit Stoker (Unterschub)- und mit Wanderrosten zeigt. Die Wirkungsgradkurve der Stoker-Feuerung hat einen weit flacheren Charakter als die des Wanderrostes. Bei stark wechselnder Belastung wäre daher die Stoker-Feuerung dem Wanderrost in der Wärmeausnutzung überlegen. Ich möchte daher auch an dieser Stelle mit besonderem Nachdruck auf die Bedeutung hinweisen, die sogenannten „Hochleistungsrosten“ beigemessen werden muß, d. h. Rosten, deren Belastung innerhalb sehr weiter Grenzen verändert werden kann, eine Aufgabe, die unter Anwendung von Unterwind besonders lohnend und aussichtsreich und für viele

*) Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1915.

Betriebe weit wichtiger ist als die oft nur innerhalb enger Belastungsgrenzen erreichbare Hinaufschraubung des Vollastwirkungsgrades um Bruchteile von Prozenten. Es hätte bei solchen Rosten wenig zu sagen, selbst wenn ihr höchster Wirkungsgrad ähnlich wie in Abb. 1 etwas tiefer liegen würde als der eines anderen Rostes mit sehr steilem Verlauf des Maximums.*)

Die Verluste unter 1. und 2. werden um so größer, je schlechtere Brenneigenschaften eine Kohle hat und je unvermuteter und schärfer Belastungsspitzen und Täler auftreten und zwar vorzugsweise deshalb, weil bei unvermuteten und schroffen Belastungswechseln die große auf dem Roste lagernde Menge glühender Kohle sich nicht genügend schnell dem neuen Gleichgewichtszustand anpassen kann.

Man hat versucht, diese Verluste durch Schaffung großer Wasserräume etwas zu mildern. Kessel mit großen Wasserräumen brauchen aber viel Anheizkohle, worüber Guilleaume gleichfalls a. a. O. sehr interessante Versuche veröffentlichte. Große Wasserräume von Dampfkesseln haben manchmal den weiteren Nachteil, daß sie die Zeit, die vergeht, bis nach einem stärkeren Abfall des Kessel-druckes der Konzessionsdruck wieder erreicht ist, verlängern. Während dieser Zeit haben aber die Dampfturbinen einen größeren spezifischen Dampfverbrauch als bei normalem Betriebsdruck. Das wärmetechnische Ideal wäre daher, die Wasserräume der Dampfkessel tunlichst klein zu machen und gegebenenfalls in besonderen Speicherkörpern einen zusätzlichen Wasservorrat zu stapeln. Nach vorausgegangener Druckabsenkung würde sich dann der Kesseldruck wieder schnell erholen, und der Druck im Speicherraum könnte ganz nach der Menge des zur Verfügung stehenden überschüssigen Dampfes allmählich wieder hochgebracht werden.

Ein derartiges Verfahren ist aber nicht immer anwendbar und zwar vorwiegend deshalb nicht, weil 1. infolge des hohen Kesseldruckes die Wandstärken groß und die Speicher teuer werden würden, 2. die von 1 m^3 Wasserinhalt bei einem bestimmten Druckabfall speicherbare Dampfmenge mit zunehmendem Anfangsdruck stark abnimmt.

Abb. 2 zeigt die von 1 m^3 auf Sättigungstemperatur erhitztem Wasser bei verschiedenen Anfangsdrücken auf 1 at Druckentlastung abgegebene Dampfmenge; sie beträgt bei 20 at/abs. 5 kg/m^3 (Punkt A), bei 2 at/abs. 28 kg/m^3 (Punkt B), d. h. über 5 mal soviel. Ein bestimmtes Wasservolumen hat also bei Niederdruck eine weit größere Speicherfähigkeit, und man wird daher sowohl mit Rücksicht hierauf als auch mit Rücksicht auf das geringere erforderliche Eisengewicht die Speicherung möglichst in das Niederdruckgebiet zu verlegen suchen.

Es ist das Verdienst von Dr.-Ing. Ruths in Stockholm, diese Zusammenhänge in ihrem ganzen Umfang klar erkannt und ihnen in außerordentlich geschickter und zielbewußter Weise Rechnung getragen zu haben.

*) Münzinger: „Die Leistungssteigerung von Großdampfkesseln.“ Verlag von Julius Springer, Berlin 1922.

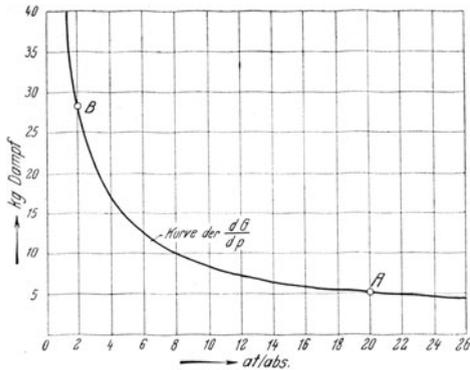


Abb. 2.
Dampfabgabe von 1 m³ auf Sättigungstemperatur erhitztem Wasser bei verschiedenem Anfangsdruck und einer Druckabsenkung um 1 at.

II. Der Wärmespeicher von Dr. Ruths.

a) Die thermischen Grundlagen der Ruths-Wärmespeicher.

Ruths-Speicher benutzen ebenso wie Rateau-Speicher und feuerlose Lokomotiven die Eigenschaft von Wasser, in überhitztem Zustand bei Druckentlastung Dampf abzugeben oder in unterkühltem Zustand eingeleiteten Dampf niederzuschlagen, während Glocken- und Frastrau-Speicher den Dampf als solchen speichern.

Das Wesen der Ruths'schen Erfindung im Gegensatz zu bekannten Speichern läßt sich etwa folgendermaßen kennzeichnen:

1. Schaffung sehr großer Speichervolumina,
2. Verlegen des Speichers in ein Gebiet niederen Druckes,
3. Zulassung großer Druckunterschiede zwischen Lade- und Entladezustand,
4. Einfügung des Speichers in das Werk derart, daß vollkommen selbsttätiger Betrieb erreicht und auch Schwankungen im Dampf- oder Kraftbedarf des Hochdruckteiles durch den Speicher ausgeglichen werden.

Das Arbeitsprinzip des Ruths'schen Speichers ist an sich nicht neu und wird z. B. bei feuerlosen Lokomotiven und in Rateau-Speichern seit langer Zeit mit Erfolg angewendet. Aber Dr. Ruths hat zum erstenmal in folgerichtiger Durchführung seiner Ideen Speichervolumina zur Anwendung gebracht, die in dieser Größe bisher unbekannt waren. Durch Verlegen der Speicher in ein Gebiet niederen Druckes und dadurch, daß im Gegensatz zu Rateau-Speichern mehrere at Unterschied zwischen geladenem und entladnem Zustand zugelassen werden können, war es ferner möglich, die auf 1 m³ Wasserinhalt des Speichers stapelbare Dampfmenge weiter zu erhöhen und die Leistungsfähigkeit der Speicher weit über alles bisher Bekannte hinaus zu steigern. Es sind Speicher im Betrieb und in der Aufstellung mit einer Speicherkapazität bis zu 36000 kg Dampf.

Tabelle I (n. S.) gibt ein Bild von den derzeitigen Möglichkeiten und der Leistungsfähigkeit der verschiedenen, erprobten Verfahren für die Speicherung

von Energie und zeigt, wie sich Ruths-Speicher im Vergleich zu anderen, ähnlichen Zwecken dienenden Vorrichtungen etwa verhalten. Es wurden jeweils möglichst kennzeichnende Fälle ausgewählt, ohne daß Gewähr dafür übernommen werden könnte, daß die ausgewählten Anlagen nicht durch größere oder kennzeichnendere übertroffen werden.

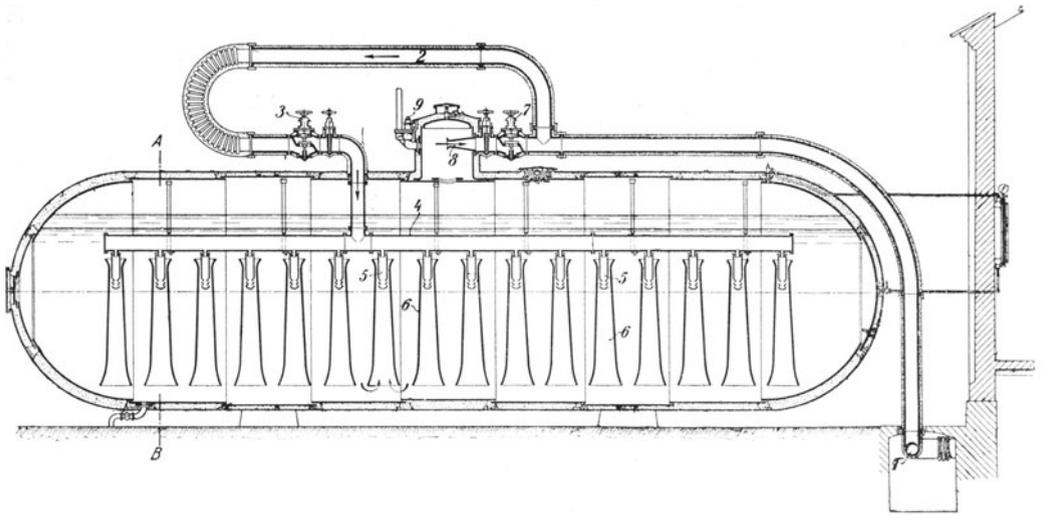
Die Planung von Ruths-Speichern verlangt viel Erfahrung und Umsicht, weil von ihrer zweckmäßigen Einschaltung in die Gesamtanlage, der Wahl der vorteilhaftesten Druckgrenzen und dem günstigsten Grade des Belastungsausgleiches Anlagekosten und Wirtschaftlichkeit in hohem Maße abhängen. Wie noch gezeigt werden wird, spielen beim Belastungsausgleich in Elektrizitätswerken auch Regelung, Bauart und Schaltung der mit Ruths-Speichern zusammen arbeitenden Dampfturbinen eine hervorragende Rolle. Ruths-Speicher können daher im allgemeinen nur auf Grund sorgfältiger Messungen oder Betriebsaufzeichnungen richtig dimensioniert und angeboten werden und nicht lediglich auf Grund einer bestimmten Speicherleistung. Dieser Hinweis erscheint mit Rücksicht auf Veröffentlichungen angebracht, die ohne die erforderliche Sachkenntnis geschrieben wurden und Verwirrung verursachen könnten.

Abb. 3 (S. 7) zeigt Schnitte durch einen Ruths-Speicher, der mit dem Rohrleitungsnetz der Anlage durch Leitung 1 verbunden ist. Bei Dampfüberschuß strömt der Dampf durch Leitung 2 und Rückschlagventil 3 in das horizontale Verteilrohr 4, an das in passenden Abständen Dampfdüsen 5 angeschlossen sind. Der aus den Düsen ausströmende Dampf wälzt infolge der die Düsen diffusorartig umgebenden Blechrohre 6 den Wasserinhalt des Speichers lebhaft um und wird schnell und sicher niedergeschlagen. Sinkt der Druck im Leitungsnetz unter den Speicherdruck, so schließt Rückschlagventil 3, und der Dampf strömt durch Rückschlagventil 7 in das Leitungsnetz zurück. Vor Rückschlagventil 7 sitzt eine Lavaldüse 8, um bei einem Rohrleitungsbruch oder einem anderen ähnlichen Schaden die sekundlich ausströmende Dampfmenge zu begrenzen und Erschütterungen des Speichers zu vermeiden. Tatsächlich erfolgen Laden und Entladen von Ruths-Speichern vollkommen geräusch- und erschütterungslos. Die Wassermwälzung im Speicher ist so gut, daß nur Temperaturunterschiede in der Größenordnung von 0,2° C innerhalb des Wasserinhaltes auftreten. Durch die eigenartige Anordnung der Lade- und Entladeleitung brauchen die Ventile usw. nur für die gespeicherte Dampfmenge bemessen und der Speicher mit dem Rohrleitungsnetz der Anlage nur durch einen Abzweig verbunden zu werden.

Eine Isolierschicht von etwa 100 mm Stärke und ein wetterfester Ueberzug vermindern die Wärmeausstrahlungsverluste so weitgehend, daß sie nur eine untergeordnete Rolle spielen. Auf eine Reihe weiterer interessanter Einzelheiten wie z. B. die Lagerung der Speicher, die Anordnung der Wasserstandsrichtung, den Zusammenhang zwischen Speicherfüllung und Speicherdruck usw. soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Tabelle I. Leistungsfähigkeit verschiedener Arten der Energiespeicherung.

Nr.	Art der Speicherung	Kinetisch: K Wasser: W Dampf: D	Speicherleistung KWh	Name der Anlage	Wasserspeicher		Druckbereich des Speichers	Wassereinhalte der Speicheranlage m ³	Ausgleichszeit	Bemerkungen
					Getäfel m W. S.	Gespeicherte Wassermenge m ³				
1	Akkumulierseen klein bei großen sehr groß bei kleinen	W	bis zu 100 000 000	Urnwerk Klöntal-Schweiz Ezelwerk- Klomsen- "	bei 10 m bei 300 m bei 2000 m	$4,5 \times 10^6$ $1,5 \times 10^8$ $2,25 \times 10^6$	—	—	1 ^{1/2} Jahr hindurch 25 000 kW	Speicherung hauptsächlich durch Sammlung natürlicher Wasser- zuflüsse
2	Kleine Stauseen, reine Akkumulierwerke	W	50 000 bis 100 000	Schaffhausen Rupoldingen	150	5—10 Millionen	—	—	Speicherung erfolgt Sonntags, Strom- abgabe wochentags je 4 Std. lang 3500 kW	Als reine Pumpenanlage ausge- führte Beispiele η tot \approx 50, keine Speicherung natürlicher Zuflüsse
					400					
3	Stauwehr in Flüssen	W	5000 bis 10 000	Aare-Werke Eglisau, Rhein	10 bis 20 m bei 1 m Ab- senkung	2 Millionen	—	—	Speicherung erfolgt täglich (nachts) Stromabgabe tägl. 4 Std. lang 2500 kW	—
4	Ruths-Speicher	D	100 bis 5000	Mahnö Lauchhammer	—	—	7 ÷ 1,0 at 3 ÷ 1,3 at	456 630	1 Stunde lang 2500 ÷ 5000 kW	Momentanreserve Spitzenausgleich
					—					
5	Elektrische Akkumulatoren	E	5000	—	—	—	—	—	—	—
6	Wasserschloß	W	100	—	\approx 50	800	—	—	10 ÷ 20 sek Speicherleistung 20 000 kW sek	Angewandt bei Wasserkraftwerken zum Mildern der Stöße bei den Ab- und Zuschaltungen
7	Wasserröhren-Kessel	D	Pro at Druck- abfall \approx 45 kWh. Bezuglassen- Abfall von 2 at \approx 90	Kessel von 550 m ² Heizfläche	—	—	16 ÷ 14	45	Einige Minuten hindurch sehr hohe Spitzen	—
8	Rateau-Speicher	D	15	—	—	—	1,3 ÷ 1,1	30	Momentan 5 ÷ 10 sek lang 2000 kW	Walzenzugmaschinen und Fördermaschinen
9	Ilgner-Umförmer	K	15	—	—	—	—	Gewicht des Schwun- rades \approx 50 t.	Momentan 5 ÷ 10 sek lang 2000 kW	Walzenzugmaschinen und Fördermaschinen



Schnitt A B

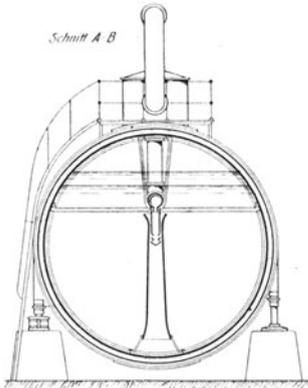


Abb. 3.
Schnitt durch einen Ruths-Wärmespeicher.
1 = Verbindungsrohr mit Dampfnetz des Werkes, 2 = Ladeleitung, 3 = Rückschlagventil, 4 = Verteilrohr, 5 = Dampfdüsen, 6 = Wasserumwälzrohre, 7 = Rückschlagventil, 8 = Laval- (Sicherheits-) Düse in Entladeleitung, 9 = Sicherheitsventil.

Besondere Regelvorrichtungen, die später noch ausführlich geschildert werden, bewirken nun, daß im allgemeinen nur noch der Speicherdruck schwankt und der Kesseldruck selbsttätig konstant gehalten wird. Es kann daher nicht mehr nach dem Kesselmanometer geheizt werden, da es ja dauernd eine um wenige $\frac{1}{10}$ at niedere Spannung als den Konzessionsdruck anzeigt, gleichgültig ob die Kessel mehr oder weniger Dampf liefern, als gerade gebraucht wird. Deshalb wird im Kesselhaus ein Manometer angebracht, das den Speicherdruck angibt, und die Feuerführung wird nur noch verändert, wenn die Spannung im Speicher nahe an ihren untersten oder obersten Grenzwert gelangt ist.

Durch Einschaltung des Ruths-Wärmespeichers kann die Kesselanlage konstant oder doch nahezu konstant belastet werden, wodurch eine Reihe nennenswerter Brennstoffverluste wegfallen. Der Ruths-Speicher absorbiert bzw. liefert für den Fall, daß vorübergehend zu viel oder zu wenig Dampf erzeugt wird, die Differenz, ohne daß die Sicherheitsventile der

Kessel abblasen. Dadurch kommt man in vielen Betrieben während mancher Tage ohne jede Veränderung der Zugstärke und des Rostvorschubes aus, in anderen Fällen werden Eingriffe nur noch in Zwischenräumen von Stunden, statt wie bisher von Minuten nötig.

Bei Neuanlagen braucht die Kesselanlage statt für die Spitzen- nur noch für die mittlere Belastung eines Werkes bemessen zu werden, in vorhandenen Anlagen, deren Kesselanlage nicht mehr ausreicht, wird häufig durch Aufstellung eines Ruths-Speichers die sonst erforderliche Vergrößerung des Kesselhauses unter Erzielung weiterer Vorteile vermieden.

In zahlreichen Betrieben, insbesondere in Zellstoff- und chemischen Fabriken haben Ruths-Speicher noch den Vorteil, daß im Bedarfsfalle fast unbegrenzte Dampfmenngen geliefert werden können, die weit über die Leistungsfähigkeit der Kesselanlage des Werkes hinausgehen. Dadurch können Anheiz- und Kochprozesse erheblich abgekürzt und die

Fabrikationsapparate weit besser ausgenutzt werden, als dies bisher möglich war. Dieser Vorteil, der für viele Fabriken außerordentliche Gewinne bedeutet, spielt in Elektrizitätswerken allerdings im allgemeinen keine Rolle.

b) Arbeitsweise von Ruths-Wärmespeichern in Kraftwerken.

Bei der Anordnung nach Abb. 4 ist der Ruths-Speicher zwischen Hochdruckstufe b und Nieder-

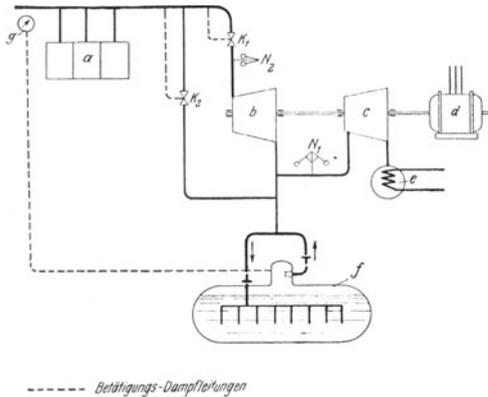


Abb. 4.

Schaltung eines Ruths-Speichers zwischen Hochdruck- und Niederdruckstufe einer Dampfturbine.

a = Dampfkessel, b = Hochdruckstufe, c = Niederdruckstufe der Dampfturbine, d = Generator, e = Kondensator, f = Ruths-Speicher, g = Manometer des Ruths-Speichers, K₁ u. K₂ = selbsttätige Ueberströmventile, N₁ = Tourenregler der Turbine, N₂ = Sicherheitsregler der Turbine.

druckstufe c einer Turbine geschaltet, die mit Generator d auf derselben Welle sitzen. Der von der Kesselanlage a erzeugte Dampf strömt durch Ueberströmventil K₁ nach der Hochdruckstufe. K₁ steht durch eine Betätigungsleitung unter dem Druck der Kesselanlage und öffnet und schließt selbsttätig, sobald der Kesseldruck auf etwa 0,1 at an den Abblasedruck der Sicherheitsventile herangekommen bzw. um mehr als 0,2 at unter ihn gefallen ist. Für eine bestimmte Belastung des Generators möge nun der erzeugte Dampf eben ausreichen. Nimmt jetzt die Belastung plötzlich ab, so wird der Tourenregler N₁ den Dampfzufluß zur Niederdruckstufe c abschwächen, wodurch der überschüssige Dampf nach Verlassen der Hochdruckstufe b zum Speicher f strömt. Ist die Belastung so weit zurückgegangen, daß der Dampfzufluß nach c nahezu ganz unterbunden ist, und hat Regler N₂ (der in Wirklichkeit mit N₁ zusammengebaut wird) auch schon angefangen, den Zufluß zur Hochdruckstufe zu schließen, so fließt der Kesseldampf unter teilweiser Umgehung von b durch ein zweites Ueberströmventil K₂, das etwa 0,1 at unter Konzessionsdruck öffnet, direkt zum Speicher. Nimmt später die Belastung der Turbinen wieder zu, so schließt zunächst K₂. Ist sie so groß geworden, daß der erzeugte Kesseldampf nicht mehr ausreicht, so schließt Ventil K₁ soweit, daß der normale Betriebsdruck in der Kesselhausdampf-

leitung aufrecht erhalten bleibt. Der fehlende Dampf wird dann dadurch, daß der Zwischendruck zwischen b und c unter den Speicherdruck sinkt, dem Speicher entnommen und leistet in Niederdruckstufe c die fehlende Arbeit.

c) Einfluß der Belastungskurve auf Größe und Kosten von Ruths-Speichern.

Die grundsätzliche Abhängigkeit der Speicherabmessungen bei gleichem (und zwar vollkommenem) Ausgleich der Belastungsschwankungen soll an Hand von Abb. 5 gezeigt werden, in der 3 Fälle

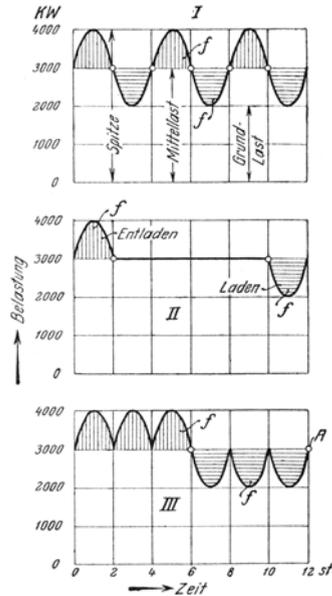


Abb. 5.

Verschiedene kennzeichnende Belastungskurven mit gleicher mittlerer, höchster und niederster Belastung.

Fall I: Ladung und Entladung wechseln regelmäßig miteinander ab, 3 Ladungen u. 3 Entladungen in 12 St.

Fall II: Wie Fall I, aber nur 1 Ladung und 1 Entladung in 12 St.

Fall III: 3 Entladungen und 3 Ladungen folgen unmittelbar aufeinander während 12 St.

mit genau gleicher Größe der Grundlast, der Spitzen- und der Mittellast dargestellt sind. In Fall I folgt auf jede Entladung eine Ladung gleicher Größe. Der Speicher muß also nur für die Aufnahme einer der Fläche f entsprechenden Dampfmenge bemessen werden. In Fall II wird der Speicher ebenso groß, obgleich die ausgeglichene Energiemenge dreimal kleiner als in Fall I ist. In Fall III folgen 3 Entladungen und 3 Aufladungen unmittelbar aufeinander, von denen jede so groß angenommen ist wie in Fall I und Fall II. Der Speicher erhält hier, obgleich er während 12 St. nur dieselbe Energiemenge speichert wie in Fall I, die dreifachen Abmessungen, da er in Punkt A die der Summe aus 3×f entsprechende Dampfmenge aufnehmen muß. Dieses einfache Beispiel zeigt sinnfällig den Einfluß des Charakters

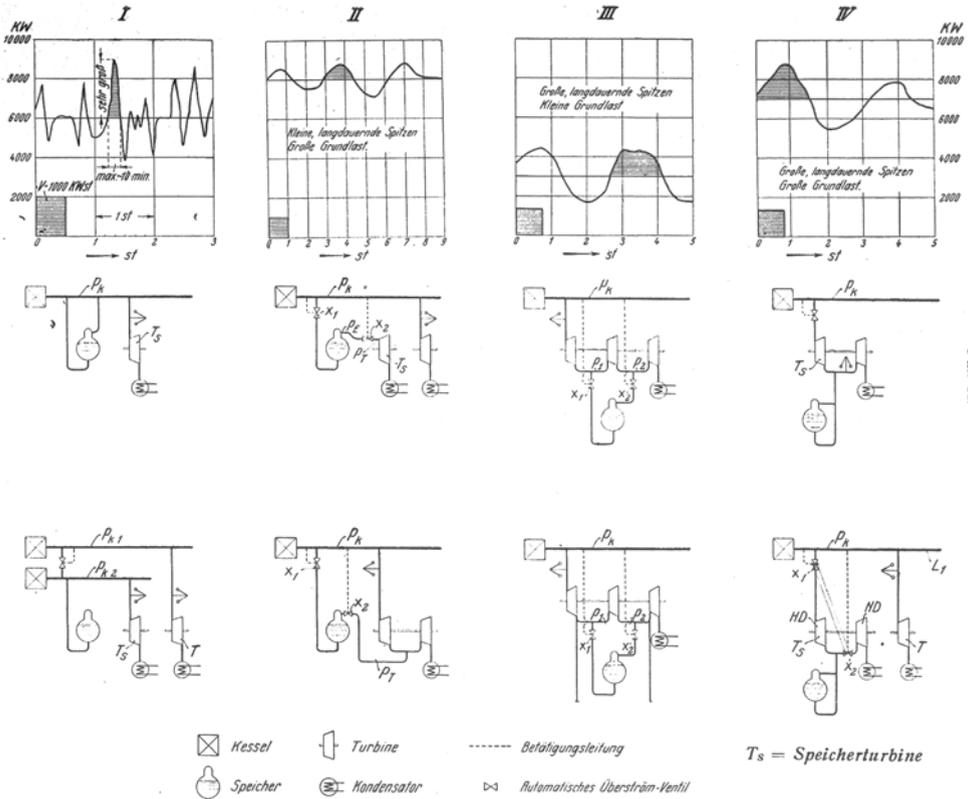


Abb. 6.

Schema der vorteilhaftesten Schaltung des Ruths-Wärmespeichers bei verschiedenen Belastungsdiagrammen.

Anmerkung: Die Fläche des horizontal schraffierten Quadrates im unteren linken Rande der Diagramme entspricht einer Speicherleistung von 1000 kWh.

der Belastungskurve auf Kosten und Abmessungen einer Speicheranlage.

Speicher werden somit um so größer bzw. bei gleichem Speichervolumen spezifisch um so schlechter ausgenutzt, je

1. größer die Ueberschuß- bzw. Unterschußflächen im Vergleich zur mittleren Belastung sind,
2. weniger Entlade- und Ladevorgänge in einer bestimmten Zeit auftreten,
3. mehr Lade- und Entladevorgänge unmittelbar aufeinander folgen,
4. verschiedener im allgemeinen die die mittlere Belastung über- bzw. unterschreitenden Belastungsflächen sind.

Eine Speicheranlage macht sich also um so besser bezahlt, je

1. öfter innerhalb einer bestimmten Zeit Belastungsspitzen und -Täler auftreten,
2. regelmäßiger Spitzen und Täler miteinander abwechseln,
3. kürzer im allgemeinen Lade- und Entladeperioden dauern,
4. mehr der Verlauf von Ueberlast und Unterlast einander ähneln.

Vom Charakter der Belastungskurve hängen aber nicht nur Größe, sondern auch Schaltung des Speichers und Anordnung und Ausführung der Dampfturbinen in hohem Maße ab. In Abb. 6 sind für verschiedene charakteristische Belastungskurven die für sie im allgemeinen geeignetsten Schaltungsschemata zusammengestellt. Tabelle II (n. S.) gibt in gedrängter Form eine Uebersicht über die kennzeichnenden Eigenschaften der jeweiligen Belastungskurve und der hierfür vorteilhaften Anordnungen. In jeder am Kopf von Abb. 6 befindlichen Belastungskurve ist in horizontaler Schraffierung ein Quadrat eingezeichnet, das einer Speicherleistung von 1000 kWh entspricht. Der Vergleich der Fläche dieser Quadrate mit der größten, die mittlere Belastung überschreitenden Diagrammfläche, die gleichfalls horizontal schraffiert ist, gibt ein Bild von der ungefähren Größe, die ein Speicher für vollkommenen Belastungsausgleich in den einzelnen Fällen erhalten müßte.

Hier soll ergänzend zu Tabelle II noch folgendes bemerkt werden:

Fall I. Bei großen, aber sehr kurzzeitigen Spitzen reicht häufig sogar der Wasserraum von

Tabelle II. Ueberblick über verschiedene kennzeichnende Schaltungen von Speichern und Turbine.

Nr.	Schaltungsart	I	II	III	IV
1	Anwendungsgebiet (Kennzeichen der Belastungskurve).	Sehr hohe, aber kurzzeitige Spitzen (≈ 5 bis 10 Min.) Für Kessel-drucke bis etwa 14 at/abs. geeignet.	Kleine, aber langdauernde Spitzen. Gespeicherte Energie ist kleiner Bruchteil der insgesamt erzeugten. Für hohe Kesseldrucke geeignet.	Gespeicherte Energie ist erheblicher Bruchteil der insgesamt erzeugten. Kleine Grundlast. Für hohe Kesseldrucke geeignet.	Große langdauernde Spitzen. Für hohe Kesseldrucke geeignet. IV.A. Für kleine Grundlast oder Erweiterung. IV.B. Für große Grundlast.
2	Durchschnittliche Speicherleistung in kWh	180 bis 300 kWh Bei größerer Speicherleistung ist Niederdruckspeicher billiger.	≈ 3000 kWh	≈ 3000 kWh	≈ 3000 kWh
3	Bedingung Speicherwirkung Drosselverluste?	Fall A: Nein. Fall B: Ja.	Wärmegefälle wird teilweise gedrosselt (zwischen p_k und p_r).	Geringere Drosselverluste als nach Schaltung IIA und IIB.	Nein.
4	Vorteilhafter höchster Speicherdruck at/abs.	≤ 10 bis 14 at/abs.	≤ 10 bis 12 at/abs.	≤ 7 at/abs.	≤ 4 at/abs.
5	Differenz zwischen Lade- und Entladendruck at	≈ 3 at Begrenzt durch Dampfquerschnitt in der Turbine.	bis zu 8 at.	≈ 5 at.	≈ 3 at
6	Ist besondere Speicherturbine nötig?	Nein.	Fall A: ja. Fall B: Zweidruck-statt gewöhnlicher Kondensations-turbine.	Nein.	Von örtlichen Verhältnissen abhängig.
7	Bleibt Kesseldruck konstant?	Fall A: $p_k =$ variabel Fall B: $p_k =$ konstant $p_{k_2} =$ variabel	Ja.	Ja.	Ja.
8	Arbeitsweise.	—	X_1 öffnet, wenn $p_k >$ X_2 öffnet, wenn $p_k <$	X_1 öffnet, wenn $p_1 >$ X_2 öffnet, wenn $p_2 <$	Fall B: X_1 und X_2 können nicht gleichzeitig öffnen. Fall A: Turbine deckt Grundlast und Spitzen. Fall B: T_s deckt Spitzen, T deckt Grundlast.
9	Bemerkungen.	Sehr einfache Anordnung. Spitzenhöhe über Mittelast nur begrenzt durch Turbinenleistung.	Größe der Spitzen begrenzt durch Leistung von T_s .	Möglichkeit der Entnahme großer Heizdampfmenngen von den Drucken p_1 u. p_2 .	—

Wasserrohrkesseln zum Ausgleich aus, ohne daß eine unzulässige Druckänderung erfolgt, wie folgendes Beispiel zeigt. Steilrohrkessel von 700 m² Heizfläche können einen Wasserinhalt von rund 50 m³ erhalten. Bei einer Heizflächenbelastung von 25 bis 30 kg/m²h und einem Dampfverbrauch von 6 kg/kWh leistet ein solcher Kessel ungefähr 2900 bis 3500 kW. Beträgt der Kesseldruck 20 at/abs. und würde man bei scharfen Belastungsspitzen einen Druckabfall von 2,0 at zulassen, so würde der Wasserinhalt rund 500 kg Dampf abgeben, entsprechend einer Leistung von rund 830 kW, wenn die Spitze nur 6 min. lang dauert, oder einen größeren Betrag, wenn sie noch kürzer ist. Sogenannte Minuten-Spitzen können also von zweckmäßig gebauten Kesseln ganz gut aufgenommen werden, selbst wenn sie im Verhältnis zur Normallast verhältnismäßig groß sind. Reicht der Wasserinhalt der Kessel nicht mehr aus bzw. überschreiten die Spitzen eine gewisse Größe, so kann gemäß Fall IA in Abb. 6 parallel zum Kessel ein Speicher geschaltet werden, der die Druckschwankungen des Kessels mitmacht. Sind, was in manchen Werken der Fall ist, 2 Kesselanlagen mit verschiedenen Drucken p_k und p_k vorhanden, so kann es bei großen Unterschieden auch vorteilhaft sein, ihn im Gegensatz zu Fall IB in Abb. 6 zwischen beide zu schalten. Die beiden Rohrleitungssysteme p_k und p_k werden in Fall IB durch ein automatisches Ueberströmventil miteinander verbunden, das überschüssigen Dampf aus der Hochdruckanlage zum Speicher abströmen läßt, sobald p_k auf etwa 0,2 at an den Konzessionsdruck herangekommen ist.

Die Anordnung nach Fall I hat den Vorteil großer Einfachheit, kommt aber nur für Kesseldrucke bis zu etwa 14 at/abs. in Betracht und für kleine Speicherleistungen.

Fall II ist für kleine, aber langdauernde Spitzen geeignet. Nähert sich p_k dem Konzessionsdruck auf etwa 0,1 at, so läßt Ventil X_1 Dampf nach dem Speicher abströmen, entfernt er sich um mehr als etwa 0,2 at von ihm, so öffnet Ventil X_2 , und der Speicher liefert Dampf in die Turbine. Für den Speicher kann entweder eine besondere Turbine aufgestellt werden (Fall A), die dann lediglich einen Regler erhält, der das Durchgehen verhindert, oder aber die Entladeleitung des Speichers wird vor der Niederdruckstufe einer gemeinsamen Turbine eingeführt, Fall B. Der grundsätzliche Nachteil dieser Anordnung besteht in Arbeitsverlusten in der Turbine infolge Drosselung des Dampfdruckes von p_k auf p_r . Sie eignet sich daher nur zum Ausgleich kleiner Energiemengen. Eine Fall II ähnliche, von der A. E. G. entwickelte, sehr einfache Schaltung verspricht für viele Kraftwerke besondere Vorteile, doch können hierüber z. Zt. noch keine näheren Mitteilungen gemacht werden.

Fall III. Der Speicher ist parallel zur Mittelstufe einer dreistufigen Turbine geschaltet, seine Steuerung erfolgt ähnlich wie in Fall II. Die Drosselverluste sind kleiner als in Fall II. Diese Anordnung empfiehlt sich besonders in dem, in Elektrizitätswerken allerdings selten vorkommenden Falle, daß größere Heizdampfmenngen von den Drucken p_1 und p_2 benötigt werden.

Fall IV. Handelt es sich um den Ausgleich großer langdauernder Spitzen in Anlagen mit hohem Kesseldruck, so kommt vor allem Fall IV zur Anwendung, bei dem Drosselverluste bei Verwendung geeigneter Turbinen und geeigneter Regelvorrichtungen ganz vermieden werden. Fall IVA zeigt eine für kleine Grundlast geeignete Anordnung. Die Durchbildung der Turbinenregelung der Speicherturbine T_s in Fall IVB stammt gleichfalls von der A. E. G. und zeichnet sich dadurch aus, daß entweder nur der Hochdruckteil oder nur der Niederdruckteil von T_s Arbeit leistet, daß also in T_s nie gleichzeitig Frisch- und Speicherdampf arbeiten. Die Ventile X_1 und X_2 sind nämlich so miteinander gekuppelt, daß nur eines von beiden offen stehen kann. Ist X_1 offen, so wird der Speicher geladen, nachdem der Ladedampf vorher im Hochdruckteil Arbeit geleistet hat; nach Oeffnung von X_2 entlädt sich der Speicher unter Arbeitsleistung des Entladedampfes im Niederdruckteil. Die Speicherturbine steht lediglich unter dem Einfluß der beiden durch die Kesselspannung p_k betätigten Ventile X_1 und X_2 . Auf die besonderen Vorteile dieser Anordnung wird noch zurückgekommen.

Tabelle II und Abb. 6 sind aber, worauf ausdrücklich hingewiesen wird, nur als ungefähre Richtlinien für Anordnung, Bemessung und Druckgrenzen aufzufassen. In einzelnen Fällen kann es sich wohl empfehlen, erheblich anders zu disponieren.

III. Die Steuerung von Wärmespeicher und Dampfturbine.

a) Allgemeines.

Aus den vorangegangenen Darlegungen geht hervor, daß im allgemeinen Wärmespeicher und Dampfturbinen (von dem immerhin seltenen Fall IA in Abb. 6 abgesehen) so zusammenarbeiten müssen, daß

1. der Kesseldruck selbsttätig konstant gehalten wird,
2. die jeweils erforderliche Energiemenge selbsttätig und sicher geliefert wird,
3. die Speicherung überschüssiger und die Lieferung fehlender Dampfmenngen durch den Speicher selbsttätig und möglichst verlustlos erfolgt,
4. möglichst normale, billige und betriebssichere Dampfturbinen verwendet werden können.

In den Fällen, wo der Speicherdampf einer Zwischenstufe der Turbine entnommen bzw. in eine Zwischenstufe eingeführt wird, ähnelt die Regelung der Turbinen derjenigen von Anzapf- bzw. Zweidruckturbinen. Da diese Regulierungen bisher in Elektrizitätswerken nur selten zur Anwendung gelangten und manchen der Herren weniger bekannt sein dürften, werden sie etwas ausführlicher behandelt.

In Abb. 7 u. 8 (n. S.) ist die Regelung einer Anzapfturbine schematisch dargestellt. In Wirklichkeit wirken die Regelorgane nicht unmittelbar, sondern mittels zwischengeschalteter Krafttriebe (Relais und Servomotoren) auf die Dampfventile ein. Bei dem in Abb. 7 dargestellten Fall geht ein Teil des Abdampfes der Hochdruckstufe H-Dr. in die Heizleitung oder zu einer anderen Bedarfsstelle. Die Spannung dieses Dampfes wird durch einen Druckregler auf wenige Zehntel at konstant gehalten. Steigt nun bei gleicher Anzapfdampfentnahme die Belastung der Turbine, so verschiebt infolge des Tourenabfalles

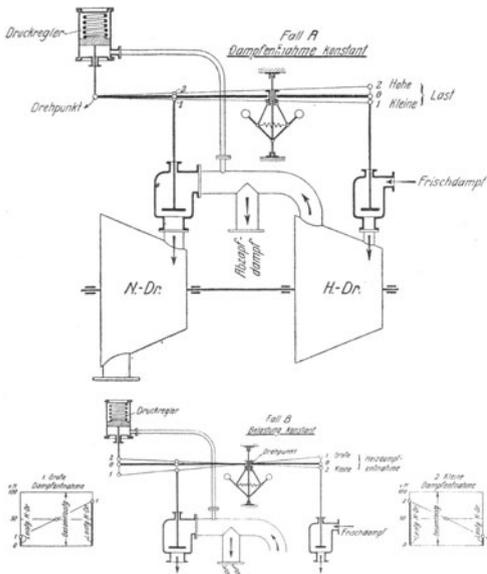


Abb. 7 u. 8.

Steuerungsschema einer Dampfturbine mit Zwischendampfentnahme.

Abb. 7 (Fall A): Die Entnahme von Zwischendampf bleibt konstant.

Abb. 8 (Fall B): Die Belastung der Turbine bleibt konstant.

der Tourenregler um den als festen Drehpunkt wirkenden Angriffspunkt des Druckreglers am Reglergestänge gleichzeitig das Frischdampfventil der Hochdruckstufe und das Ventil der Niederdruckstufe. Auch bei Belastungsabnahme bewegen sich beide Ventile in gleicher Richtung.

Soll dagegen die Leistung der Turbine konstant bleiben und die abgezapfte Dampfmenge wechseln, so verstellt der Druckregler infolge seines außerhalb den Anlenkpunkten beider Ventile liegenden Angriffspunktes beide Ventile in verschiedener Richtung. Bei abnehmendem Heizdampfbedarf wird das Frischdampfventil etwas geschlossen, das Niederdruckventil etwas geöffnet, bei zunehmendem Heizdampfbedarf erfolgt eine entgegengesetzte Verstellung. Dadurch verschiebt sich die Arbeitsverteilung auf beide Stufen derart, daß bei hohem Heizdampfbedarf die Hochdruckstufe, bei niederem Heizdampfbedarf die Niederdruckstufe mehr leistet (Abb. 8).

Die Voraussetzungen für die Turbinenregelung beim Zusammenarbeiten mit Ruths-Speichern liegen insofern grundsätzlich anders, als

1. der Druck des hinter der Hochdruckstufe entnommenen bzw. zur Niederdruckstufe strömenden Abdampfes in weiten Grenzen wechselt,
2. der Dampfzufluß zur Hoch- oder Niederdruckstufe im allgemeinen vom Druck des Frischdampfes abhängig sein muß, da ja die Konstanthaltung dieses Druckes und nicht die des Zwischendruckes Zweck der Regelung ist.

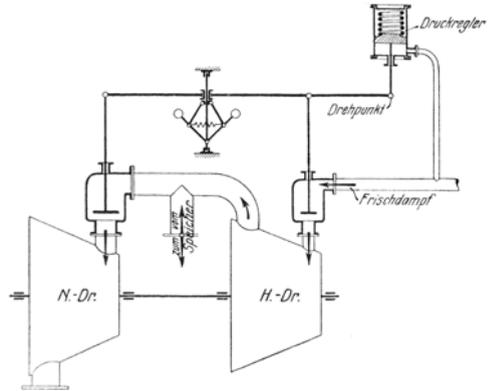


Abb. 9.

Steuerungsschema einer mit Ruths-Speicher zusammenarbeitenden Dampfturbine.

Der Tourenregler muß also ebenso wie in Abb. 7 und 8 beide Ventile im gleichen, der Druckregler im verschiedenen Sinne verstellen, aber derart, daß bei fallendem Dampfdruck (des Frischdampfes) das Hochdruckventil schließt und das Niederdruckventil öffnet und umgekehrt. Abb. 9 zeigt die zur Erfüllung dieser Forderungen gegenüber Abb. 7 und 8 nötigen konstruktiven Änderungen.

Vorstehend beschriebene Steuerungen und Schaltungen haben den Nachteil, daß, falls die Turbine einmal als reine Kondensationsturbine, das andere Mal als Speicherturbine arbeitet, in manchen Fällen eine Turbine großer Leistung mit einer Zweidrucksteuerung versehen werden müßte. Große Einheiten belastet man aber oft lieber nicht mit den für Speicherbetrieb erforderlichen Steuerorganen, um so mehr, da ja die Zweidrucksteuerung an sich nur für die Bewältigung der die mittlere Belastung überschreitenden bzw. unterschreitenden Energiemenge nötig ist. Die Niederdrucksteuerung müßte nämlich für die in der Turbine insgesamt verarbeitete und nicht nur für die gespeicherte Dampfmenge bemessen werden, und die Zwischenböden von großem Durchmesser im Niederdruckteil großer Turbinen müßten erheblich verstärkt werden, um die sich gelegentlich einstellenden großen Druckunterschiede auszuhalten. Ferner müßte der gesamte Arbeitsdampf unter wechselnden Druckverhältnissen, d. h. mit verschlechtertem Wirkungsgrad arbeiten, lediglich damit die oft nur wenige vH der Gesamtdampfmenge betragende Ausgleichdampfmenge gespeichert werden kann.

Die A. E. G. hat daher die bereits erwähnte Steuerung ausgearbeitet, die für viele Kraftbetriebe große Vorteile bietet und vorstehende Mängel vermeidet, Abb. 10, n. S. Sie verwendet für den Belastungsausgleich eine besondere Turbine, in der entweder nur Frischdampf während des Ladens des Speichers, oder nur Speicherdampf während der Entladung Arbeit leistet. Bei dem Ausführungsschema nach Abb. 10 ist z. B. der Tourenregler von Abb. 8 durch

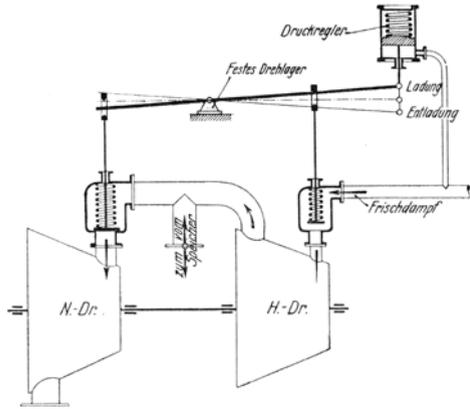


Abb. 10.
AEG-Steuerung für Dampfturbinen, die mit Ruths-Speichern zusammenarbeiten.

ein festes Drehlager ersetzt, und die Dampfventile sind mit dem Reguliergestänge so verbunden, daß nie beide Ventile gleichzeitig öffnen können.

Den durch diese Regulierung bewirkten Belastungsausgleich zeigt Abb. 11—13. Der Kessel in Abb. 14 wird gemäß dem mittleren Dampfbedarf

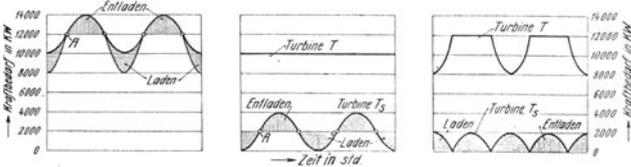


Abb. 11 bis 13.
Lastverteilung auf normale und Speicherturbine bei normaler und AEG-Steuerung der Speicherturbine.

gefeuert. Die Dampfventile im Hoch- und Niederdruckteil der Speicherturbine T_s sind nach Abb. 10 in Abhängigkeit vom Dampfdruck des Kessels gebracht. Die Speicherturbine hat außer einem Sicherheitsregler keinen Tourenregler. Die Belastung des Werkes soll gemäß Abb. 11 zwischen 10000 und 14000 kW entsprechend einer mittleren Belastung von 12000 kW schwanken. Bei den üblichen Schaltungen würde der Belastungsausgleich durch einen Speicher derart erfolgen, daß eine Turbine gemäß Abb. 12 die Grundlast von 10000 kW aufnimmt, während die Speicherturbine eine Leistung von 4000 kW haben müßte.

Bei der A. E. G.-Regulierung werden die Kessel gleichfalls entsprechend einer mittleren Belastung von 12000 kW geheizt. Steigt nun in Punkt A, Abb. 12, die Belastung über die mittlere, so sinkt der Kesseldruck p_k (Abb. 14), wodurch Ventil X_2 öffnet und durch Zuführung von Speicherdampf in die Niederdruckstufe der Speicherturbine die Ueberlast deckt. Sinkt später die Belastung unter 12000 kW, so wird X_2 geschlossen und X_1 geöffnet und der überschüssige Frischdampf nach Arbeits-

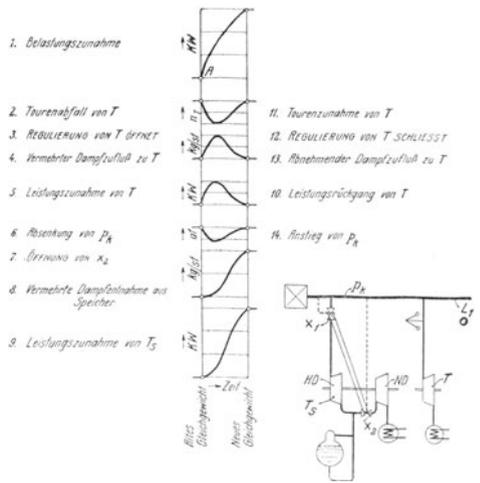


Abb. 14.
Reguliervorgang und Verhalten der Speicherturbine T_s und der Grundlastturbine T in Punkt A der in Abb. 11 dargestellten Belastungskurve.

leistung im Hochdruckteil in den Speicher geleitet. Die Arbeitsteilung zwischen normaler Turbine T und Speicherturbine T_s erfolgt gemäß Abb. 13, die zeigt, daß die Speicherturbine nur noch für 2000 kW Höchstlast bemessen zu werden braucht, da Turbine T_s völlig selbsttätig einen Teil des Belastungsausgleiches mit übernimmt (Siehe auch Abb. 11). Im Interesse eines ruhigen Zusammenarbeitens beider Turbinen ist der Regler der Pendelturbine T_s so eingestellt, daß die Pendelturbine erst nach einer Aenderung des Kesseldruckes um etwa 0,5 at Arbeit leistet. Bei dieser Anordnung wird übrigens bei Belastungsschwankungen die Periodenzahl des Netzes wesentlich weniger beeinflusst als bei anderen Verfahren.

Die Reihenfolge der einzelnen Reguliervorgänge für einen sehr kleinen Zeitabschnitt zeigt Abb. 14 und zwar für Punkt A der Belastungskurve in Abb. 11.

Im Interesse eines ruhigen Zusammenarbeitens beider Turbinen ist der Regler der Pendelturbine T_s so eingestellt, daß die Pendelturbine erst nach einer Aenderung des Kesseldruckes um etwa 0,5 at Arbeit leistet. Bei dieser Anordnung wird übrigens bei Belastungsschwankungen die Periodenzahl des Netzes wesentlich weniger beeinflusst als bei anderen Verfahren.

IV. Sonderaufgaben für Ruths-Wärmespeicher.

a) Momentanreserve.

Mit Ruths-Speichern lassen sich einige weitere Aufgaben lösen, die bisher gar nicht oder nur recht unvollkommen erfüllt werden konnten. Abb. 15 (n.S.) zeigt z. B. das Schema der für das Elektrizitätswerk in Malmö gelieferten Momentanreserveanlage, die die Stromversorgung der Stadt Malmö für den Fall des Ausbleibens von Fernkraftstrom aus dem Wasserkraftwerk Lagan (L) solange übernehmen soll, bis der Betrieb Zeit hatte, die Kesselanlage (a) des in Malmö selbst gelegenen Dampfkraftwerkes, das nur als Reserve dient, hochzuheizen. Bei Aufstellung des Speichers wurden die Betriebsmittel des Werkes gleichzeitig so verstärkt, daß es den Kraftbedarf selber

liefern kann, der die Lieferungsfähigkeit des Fernkraftwerkes (rd. 2900 kW) gelegentlich übersteigt. Das Werk liefert Gleichstrom für Straßenbahn und Licht und Drehstrom an einige Stadtteile, den es aus dem Fernkraftwerk Lagan bezieht und soweit dies erforderlich ist, in Unterstationen umformt.

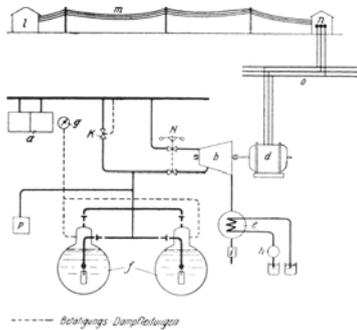


Abb. 15.

Momentanreserveanlage, bestehend aus 2 parallel geschalteten Ruths-Speichern, im Elektrizitätswerk Malmö.
a = Kesselanlage, *b* = Dampfturbine, *d* = Generator,
e = Kondensator, *f* = Ruths-Speicher, *g* = Speicheranometer,
h = Kühlwasserpumpe, *k* = selbsttätiges Ueberströmventil,
l = Wasserkraftwerk, *m* = Fernleitung, *n* = Schalthaus,
o = Leitungsnetz im Dampfkraftwerk,
p = elektrisch beheizter Dampfkessel.

Die Deckung der Spitzen im Gleichstromnetz erfolgte bisher in einem Dampfkraftwerk von 1000 kW Leistung. Für das Wechselstromnetz wurde eine Reserve als nicht erforderlich betrachtet. An das Gleichstromnetz sind zwei Blei-Akkumulatorenbatterien von 1000 kW Leistung während 3 Stunden angeschlossen, die aber keine eigentliche Reserve sind, da sie im Falle der Not sich in entladenen Zustande befinden können. Auf Grund von Verhandlungen mit der Besitzerin des Wasserkraftwerkes Lagan wegen Schaffung ausreichender Reserve hätte sich Malmö verpflichten müssen, eine im Dampfereservewerk der Lagangesellschaft vorhandene 5000-kW-Maschine nach Wunsch von Lagan zu belasten. Da diese Bedingung nicht annehmbar erschien, beschloß Malmö, eine eigene Reserve aufzustellen, und untersuchte, ob es vorteilhafter sei, eine reine Momentanreserve zu beschaffen oder Momentanreserve und Anlage für Spitzendeckung miteinander zu vereinigen, wofür sich Malmö schließlich entschied.

Auf Grund eingehender Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurde eine Ruths-Speicheranlage von 456 m³ Rauminhalt, bestehend aus zwei parallel geschalteten Speichern von 4 m Durchmesser und 19,2 m Länge, aufgestellt, die zwischen 7 und 1 at Ueberdruck arbeiten und eine Dampfmenge von 36000 kg zu speichern vermögen, was einer $\frac{3}{4}$ -stündigen Leistung von 3750 kW entspricht, Abb. 16. Während dieser Frist hat das Werk Zeit, die Kessel anzuzünden und auf Druck zu bringen, die nach Entladung des Speichers selbsttätig die Stromlieferung übernehmen, bis die Fernübertragung (*m*) wieder in Ordnung gebracht ist. Der Speicher wird

durch die Kessel wieder aufgeladen. Die Ausstrahlungsverluste des Speichers (*f*) werden durch einen kleinen Elektrokessel (*p*) gedeckt, der mit billigem Nachtstrom den $\frac{1}{2}$ at Druckabfall entsprechenden Wärmeverlust pro Tag ersetzt. Der

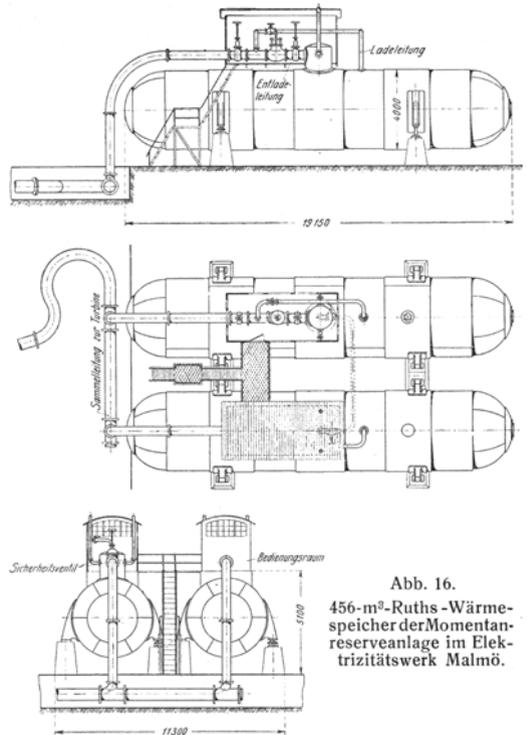


Abb. 16.

456-m³-Ruths-Wärme-speicher der Momentanreserveanlage im Elektrizitätswerk Malmö.

Generator (*d*) läuft dauernd als Synchronmotor mit und gibt zur Phasenkompensation in das Netz der Wasserkraftanlage dauernd wattlosen Strom ab. Die Turbinenwelle hat zur Vermeidung von Dampfverlusten Wasserdichtungen, die leerlaufende Turbine (*b*) wird durch eine besondere kleine Luftpumpe unter Vakuum gehalten, infolgedessen beträgt die Ventilationsarbeit nur etwa 1 kW, und die Ausstrahlung der Turbine reicht zur Abführung der Ventilationswärme aus. Der Tourenregler der Turbine (*N*) ist im Normalbetrieb so gespannt, daß die Turbine von der Dampflieferung abgesperrt ist.

Sinkt infolge einer Unterbrechung des Wasserkraftstromes die Periodenzahl etwas, so schaltet der Tourenregler selbsttätig die Dampfzufuhr zur Turbine und die Kondensationshilfsmaschinen ein.

Die Leerlaufarbeit von Turbine, Generator und Kondensationsmaschinen und der Ausgleich der Abkühlungsverluste der Speicher und Rohrleitungen benötigen 220 kW, während durch den Phasenausgleich 800 kW gewonnen werden. Es wurde also eine Momentanreserve geschaffen, die praktisch ohne Bedienung und ohne Betriebskosten dauernd verfügbar ist und ohne Umformung in Gleich-

strom direkt Drehstrom ins Netz abgeben kann. Ueber die wirtschaftlichen Vorteile wird weiter unten berichtet.

b) Speicherung der Energie brennbarer Gase.

Auf vielen Hüttenwerken stehen brennbare Abgase (aus Hochöfen oder Koksöfen) zur Verfügung, deren Menge sich mit dem jeweiligen Kraftbedarf nicht deckt. Eine Speicherung der Energie dieser Gasmengen ist bei der Anordnung nach Abb. 17 in der Weise durchgeführt, daß die Grundlast des Werkes von Gasmaschinen aufgenommen wird. Mit ihnen arbeiten Dampfturbodynamos parallel, die von gasgefeuerten Kesseln mit Dampf versorgt werden. In die Frischdampfleitung dieser Kessel werden auch die Dampfmenngen aus den hinter die Gasmaschinen geschalteten Abhitzekeesseln eingeleitet. Der Tourenregler der Turbine (C) sitzt zwischen Hochdruck- und Niederdruckstufe.

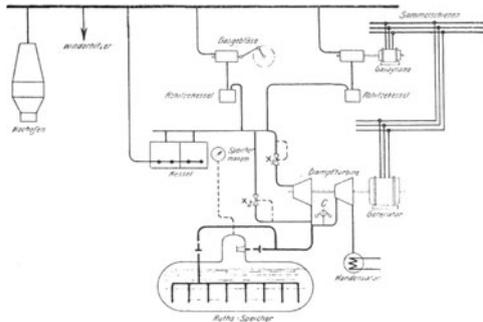


Abb. 17. Ruths-Wärmespeicher in einem Hüttenwerk.

Die Dampferzeugung der Kessel richtet sich nach dem jeweiligen Gaszufluß. Ist bei einem bestimmten Gaszufluß der durch die Turbine zu deckende Energiebedarf nur so groß, daß er von der Hochdruckstufe allein geleistet werden kann, so wird der Dampf nach ihrer Durchströmung in den Speicher geleitet. Ist er kleiner, als der aus der Hochdruckstufe erzielbaren Leistung entspricht, so fließt ein entsprechender Teil des Frischdampfes durch Ventil X_2 unmittelbar zum Speicher. Genügt zu gewissen Zeiten das Gas zur Deckung des Energiebedarfes nicht, so wird der Fehlbetrag durch den Speicher geliefert.

Auch in zahlreichen ähnlichen Fällen läßt sich durch Ruths-Speicher Gasenergie sicher und einfach speichern, was für solche Elektrizitätswerke von Bedeutung ist, die einen Teil ihrer Stromerzeugung von Hüttenwerken oder Zechen beziehen.

c) Ruths-Speicher in Nebenproduktenanlagen.

Sämtliche ernsthaften Arbeiten und Untersuchungen über Gewinnung von Nebenprodukten in Verbindung mit Elektrizitätswerken haben ergeben, daß die Einführung von Nebenproduktenanlagen in die Elektrizitätswirtschaft hauptsächlich dadurch so erschwert wird, daß sie nur etwa so groß bemessen werden können, als der nahezu stets vorhandenen Mindestbelastung des Werkes entspricht. Auch hier

bedeuten Ruths-Speicher einen Fortschritt, weil die Abmessungen der Nebenproduktenanlage nicht mehr durch die Schwachbelastung des Werkes festgelegt sind, wodurch günstigere wirtschaftliche Voraussetzungen geschaffen werden.

d) Ruths-Speicher zur Speicherung von Wasserkraftstrom.

In Gegenden mit überschüssiger Wasserkraft und teureren Kohlenkosten kommt eine Speicherung von Ueberschuß- oder Nachtstrom durch Ruths-Speicher besonders in den Fällen in Betracht, wo der gespeicherte Dampf in Form von Wärme und nicht in Form von Energie benötigt wird. Eine solche Anlage, bestehend aus 7 Elektrokesseln von je 2000 kW Leistung und 12 at Ueberdruck, ist in einer Papierfabrik in Wargön, Schweden, in Betrieb. Die Fabrik bezieht dauernd 12000 kW vom nahe gelegenen Trollhättan-Wasserkraftwerk. Die Fabrik braucht infolge Aufstellung eines Ruths-Speichers nur eine ihrem mittleren Energiebedarf entsprechende Strommenge zu beziehen und erzielt dadurch wesentlich günstigere Strompreise, weil sie sonst eine zwischen 8000 und 16000 kW schwankende Leistung abnehmen und daher nach einem wesentlich höheren Stromtarif bezahlen müßte.

e) Ruths-Speicher und Höchstdruckkessel.

Mit Rücksicht auf die infolge der hohen Drücke großen Wandstärken und Kosten von Höchstdruckkesseln wäre es erwünscht, sie mit möglichst kleinen Wasser- und Dampfäumen zu bauen. Da die Speicherfähigkeit von 1 t Wasser bei Drücken von 50 at und mehr wesentlich geringer als bei 12 bis 20 at ist, eignen sich Höchstdruckkessel für Werke mit starken Belastungsschwankungen voraussichtlich weniger, da sie auch gegen kurzzeitige heftige Spitzen empfindlich sein dürften.

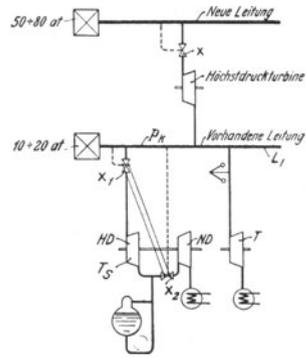


Abb. 18. Ruths-Speicher mit einer Höchstdruck-Kesselanlage zusammenarbeitend.

Die Dampfabgabe von 1 m³ auf Sättigungstemperatur erhitztem Wasser bei einer Druckentlastung um 1 at beträgt nämlich bei 60 at Anfangsdruck nur rd. 2,3 kg gegenüber 6,2 kg bei 15 at. Mit Rücksicht auf Zufälligkeiten in der Speisung und aus anderen Gründen wird man auch bei Höchstdruckkesseln für Elektrizitätswerke unter einen bestimmten Wasserinhalt nicht heruntergehen. Nun

sind bei Höchstdruckkesseln für 60 at mit einigermaßen auskömmlichen Wasserräumen die Kosten des nackten Kesselkörpers einschließlich Ueberhitzer rd. 2,5 bis 3,0-mal, die des gesamten Kessels einschließlich Ekonomiser, Rost und Einmauerung 1,5 bis 2,0-mal so hoch wie bei Kesseln für 18 bis 20 at. Dadurch werden die durch die thermische Ueberlegenheit von Höchstdruckdampf erzielbaren Ersparnisse natürlich stark beeinträchtigt. Solange also keine grundlegende Neuerungen in der Erzeugung höchstgespannten Dampfes gefunden sind, sollte man versuchen, stärkere Belastungsschwankungen den Höchstdruckkesseln fernzuhalten, um mit einer möglichst kleinen Kesselanlage, mäßigen Wasserräumen und erträglichen Kesselpreisen auszukommen. Eine Verbindung von Höchstdruckkesseln mit der vorhandenen Anlage etwa nach Abb. 18 vermeidet die gekennzeichneten Nachteile fast ganz. Eine besondere, zwischen dem hohen Druck von 50 bis 80 at und dem Druck des vorhandenen Kraftwerkes eingeschaltete Turbine wird durch ein selbsttätiges Ueberströmventil X, das konstanten Druck im Höchstdrucknetz aufrecht erhält, eingeregelt und deckt hauptsächlich die Grundlast. Der Abdampf der Höchstdruckturbine mischt sich mit dem Frischdampf der vorhandenen Kesselanlage. Der Speicher wird auf eine der in Abb. 6 angegebenen Arten an eine für den jeweiligen Fall besonders geeignete Stelle in das Niederdrucksystem eingeschaltet und hält stärkere Belastungsschwankungen von den Höchstdruckkesseln fern. Ruths-Speicher werden daher die Einführung von Höchstdruckdampf in Betriebe mit schwankender Belastung sehr begünstigen.

V. Sonderanforderungen an Dampfturbinen, die mit Ruths-Speichern zusammenarbeiten.

a) Allgemeines.

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß gutes und wirtschaftliches Zusammenarbeiten von Ruths-Speichern und Dampfturbinen sehr von zweckmäßiger Wahl, Bemessung und Bauart einer Turbine abhängt. Man kann sogar, wie noch bei Besprechung der wirtschaftlichen Vorteile von Ruths-Speichern für Elektrizitätswerke gezeigt werden wird, geradezu behaupten, daß ein voller Erfolg davon abhängt, ob Bauart, Schaltung, Regulierung und Bemessung der Turbine den besonderen Anforderungen gerecht werden, die das Zusammenarbeiten mit Ruths-Speichern stellt.

Die Schwierigkeiten bei den Turbinen bestehen hauptsächlich darin, daß sowohl die arbeitende Dampfmenge als auch der Dampfdruck in weiten Grenzen schwanken, bzw. daß in bestimmten Fällen eine Turbine auch dann noch volle Leistung bei gutem Wirkungsgrad hergeben muß, wenn der Dampfdruck stark unter seinen anfänglichen Betrag gefallen ist, so z. B. bei Schaltungen nach Abb. 15. Zur Erläuterung dieser Verhältnisse sind in Abb. 19 bis 22 verschiedene Anordnungsmöglichkeiten schematisch dargestellt, die für den Fall miteinander verglichen werden sollen, daß unter der Herrschaft irgend eines Organes, z. B. eines Tourenreglers oder eines den Kesseldruck konstant haltenden Druckreglers eine gleichbleibende Dampfmenge aus dem Speicher der Turbine zugeführt wird.

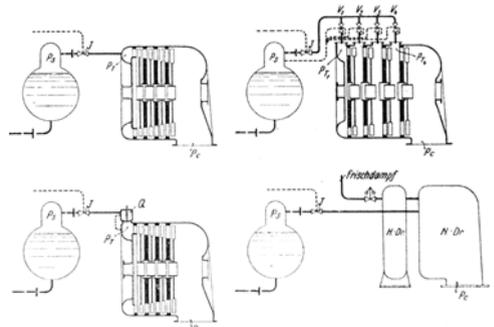


Abb. 19 bis 22.
Verschiedene Regulierverfahren von Turbinen, die mit Ruths-Speichern zusammenarbeiten.

Abb. 19 zeigt den einfachsten Fall einer vollbeaufschlagten Turbine mit Drosselregelung. Die Querschnitte dieser Turbine müssen so bemessen sein, daß sie auch bei tiefstem Speicherdruck noch volle Leistung hergibt. Infolgedessen muß bei allen höheren Drücken der Dampf unter Arbeitsverlusten heruntergedrosselt werden. Zur Vermeidung dieser Drosselverluste wird nach Abb. 20 durch den wechselnden Speicherdruck die Stufe zugeschaltet, die für den jeweiligen Speicherdruck die passendsten Druckverhältnisse hat. Diese Anordnung gibt eine verwickelte, empfindliche und teure Steuerung. Außerdem laufen die Räder in den abgeschalteten, nach dem Speicher zu gelegenen Stufen in Dampf von verhältnismäßig hohem spezifischen Gewicht, sobald der Speicherdruck gefallen ist, und verursachen dadurch große Ventilationsverluste.

In Abb. 21 wird unter Vermeidung von Drosselung jeweils die erforderliche Zahl von Düsen des nur teilweise beaufschlagten ersten Rades zugeschaltet. Bei tiefem Speicherdruck sind mehr, bei hohem Speicherdruck weniger Düsen geöffnet. Das erste Rad übernimmt den Hauptteil der Arbeit, die dahinter liegenden Räder rotieren daher unter kleinen Ventilationsverlusten in tiefem Druck. Jede der vorgenannten Regulierungen kann im Niederdruckteil einer kombinierten Frischdampf-Speicherturbine verwendet werden, Abb. 22.

b) Thermisches Verhalten von Turbinen bei verschiedenen Regelverfahren.

Nach vorstehendem Abschnitt müssen sich Speicherturbinen dem wechselnden Dampfdruck in mechanischer und in thermischer Beziehung gut anpassen und eine einfache, zuverlässige Steuerung haben.

In Abb. 23—26 (n.S.) sind die thermischen Verhältnisse für eine mit einer Grundlastturbine zusammenarbeitende Speicherturbine im Druck- und im Entropiediagramm für reine Drossel- und für reine Mengenregelung im Hoch- und Niederdruckteil der Speicherturbine dargestellt. Der Frischdampf hat 20 at/abs. Druck und 350° C Temperatur, der Kondensatordruck beträgt 0,06 at/abs. Es wurde hierbei angenommen, daß der zur Speicherung ge-

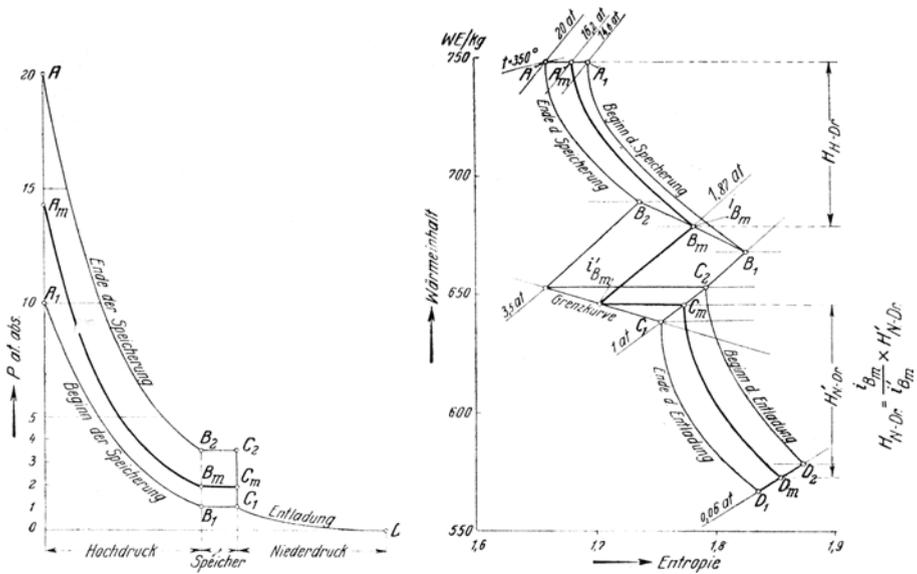


Abb. 23 und 24.

Zustandsänderung des Dampfes in einer Drosselturbine beim Zusammenarbeiten mit Ruths-Speichern.

Anmerkung: Die Punkte A_1 und A_m der Druckkurven in Abb. 23 sind falsch eingezeichnet und müssen auf 14,6 bzw. 16,2 at/abs. liegen.

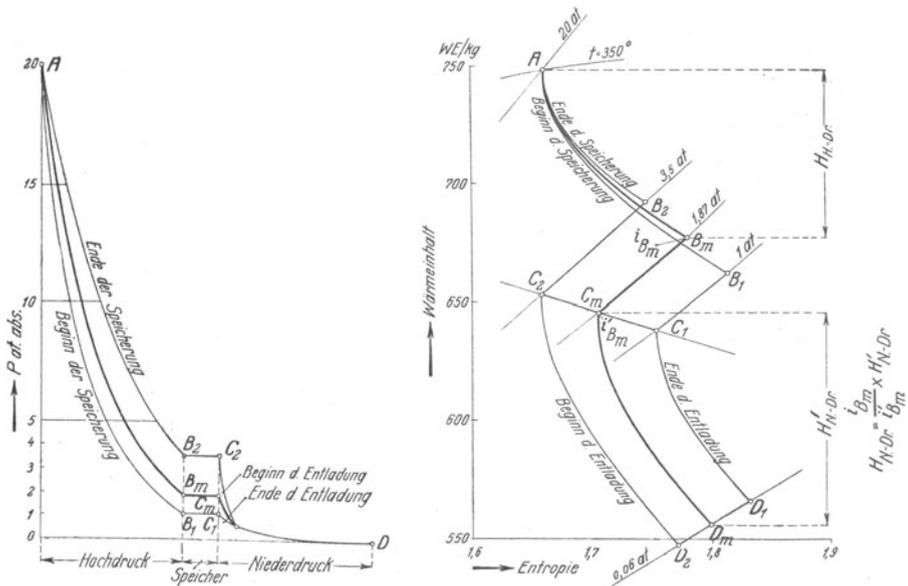


Abb. 25 und 26.

Zustandsänderung des Dampfes in einer mit einem Ruths-Speicher zusammenarbeitenden Turbine mit reiner Dieselenregulierung.

langende Teil des Frischdampfes nach Arbeitsleistung in der Hochdruckstufe der Speicherturbine in den Speicher strömt und nach Aufladen des Speichers in die Niederdruckstufe geleitet wird und dort vollends auf Kondensatordruck expandiert. Die Ladung des Speichers würde bei 1,0 at/abs. einsetzen und bei 3,5 at/abs. aufhören. Eine Drosselturbine müßte also so gebaut sein, daß sie die volle Leistung des Hochdruckteiles noch bei einem Druckgefälle zwischen 20 und 3,5 at/abs., die des Niederdruckteiles noch zwischen 1,0 und 0,06 at/abs. hergibt. Schon bei Turbinen mit konstantem Zwischen- druck treten in den Einlaßventilen der H. Dr.- und der N. Dr.-Stufe bei wechselnder Leistung erhebliche Drosselungen auf, die bei schwankendem Zwischen- druck noch verschärft werden. Die Drosselung infolge des zwischen 3,5 und 1,0 at/abs. schwankenden Zwischen- druckes bei voller Leistung der Turbinenstufen gibt ein Bild von den Mehr- verlusten gegenüber Turbinen mit konstantem Zwischen- druck, weil bei letzterem Drosselverluste bei Vollast überhaupt wegfallen. Nach Abb. 23 u. 24 wird bei Turbinen mit reiner Drosselregulierung bei tiefstem Speicherdruck der Dampf vor der H. Dr.-Stufe von 20 auf 14,6 at/abs. und bei höchstem Speicherdruck vor der N. Dr.-Stufe von 3,5 auf 1,0 at/abs. abgedrosselt. Werden dagegen H. Dr.- und N. Dr.-Stufe mit Düsenregulierung aus- gestattet, so fallen diese zusätzlichen Verluste großen- teils weg, Abb. 25 und 26. Für Turbinen, die zusammen mit Ruths-Speichern arbeiten, hat daher reine, auch im N. Dr.-Teil durchgeführte Düsen- regulierung erhöhte Bedeutung. Der Verlauf des Dampfzustandes bei mittlerer Ladung des Speichers ist in allen Diagrammen durch einen verstärkten Linienzug hervorgehoben. Maßgebend für die Aus-

nutzung des Dampfes in der Turbine ist das Ver- hältnis der Summen aus ausgenutztem Wärme- gefälle im Hochdruck- und im Niederdruckteil H.H. Dr. + H.N. Dr. beider Fälle zueinander. Es läßt sich an Hand von Abb. 23 bis 26 feststellen, daß eine Speicherturbine bei reiner Mengenregelung im Hoch- druck- und Niederdruckteil einen wesentlich besseren Dampfverbrauch hat als bei reiner Drosselregelung. Die Größe der Ersparnis hängt aber außer von den Drücken auch vom Charakter der Belastungskurven ab, weshalb sich generelle Angaben nicht machen lassen. Turbinen mit reiner Düsenregelung sind daher als Speicherturbinen besonders geeignet. Bei kleinen Dampf- mengen im Niederdruckteil macht sich die Ueberlegenheit der reinen Düsenregelung noch insofern geltend, als das erste Niederdruckrad fast das ganze Wärmegefälle verarbeitet und die übrigen Räder fast unter Kondensatordruck stehen. Bei im ersten Niederdruckrad vollbeaufschlagten Turbinen hat das erste Niederdruckrad soviel Quer- schnitt, daß es nahezu im Kondensatordruck läuft, der Dampf muß daher in der Niederdruckregelung sehr stark heruntergedrosselt werden.

Eine A. E. G.-Zweidruckturbine mit der bekannten A. E. G.-Düsenregulierung in beiden Stufen zeigt Abb. 27 und 28 im Schnitt. Bei Verwendung als Speicher- turbine bleibt der Aufbau grundsätzlich derselbe mit dem Unterschied, daß die Betätigung der Düsen- absperrentile vom Druck im Speicher oder in der Frischdampfleitung oder von einer anderen zweck- mäßigen Größe in Abhängigkeit gebracht wird. Die äußere Ansicht einer solchen Turbine zeigen Abb. 29 u. 30. Weitere Vorteile dieser Turbinen sind ihr einfacher Aufbau und die großen Schaufel- spiele, die sie unempfindlich gegen Wärmedehnungen und geeignet für rohe Betriebe machen.

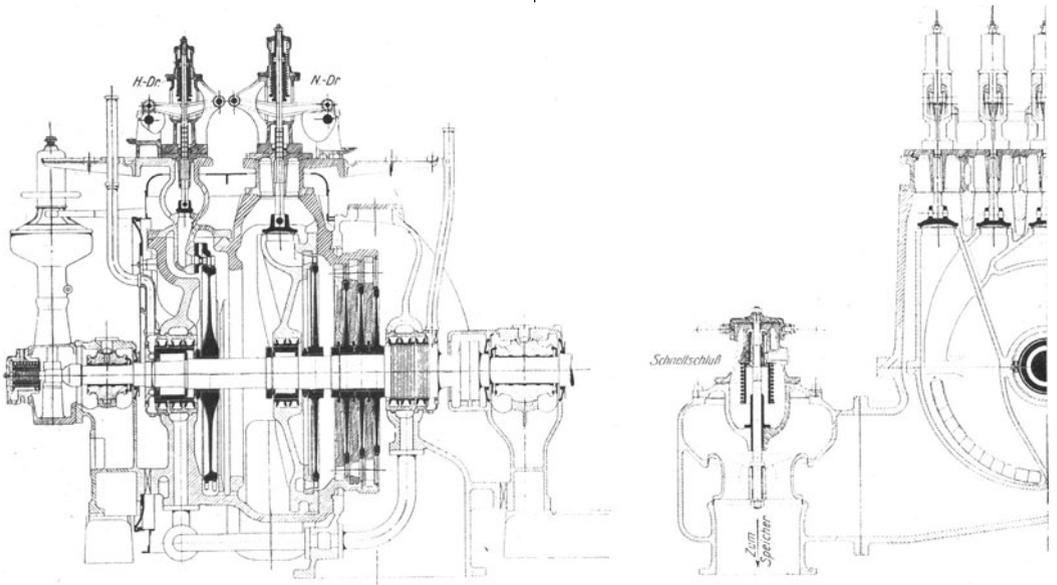


Abb. 27 und 28.
Schnitt durch eine AEG-Zweidruckturbine.

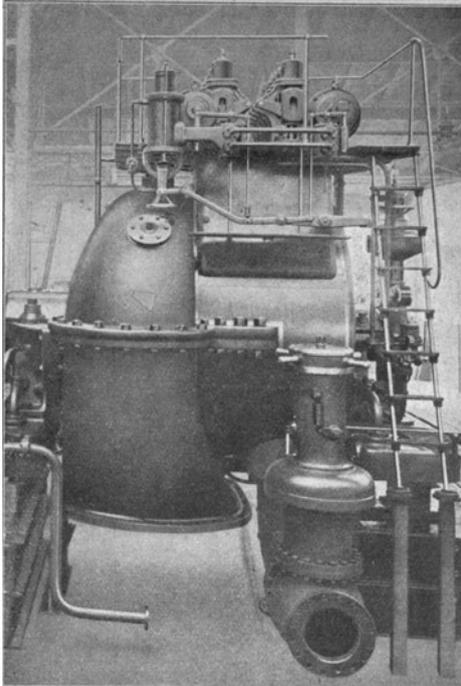


Abb. 29.

Ansicht der Anzapfseite einer AEG-Zweidruckturbine.

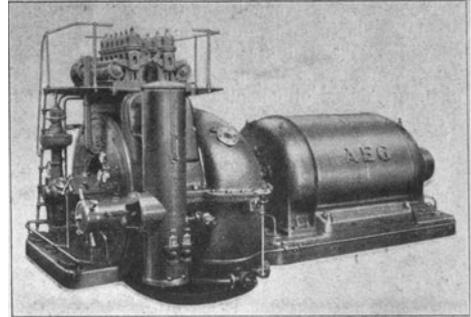


Abb. 30.

Ansicht der Frischdampfseite einer AEG-Zweidruckturbine.

des Werkes fast nicht beeinflußt, und zwar vorzugsweise deshalb, weil die Frischdampf-mengen dauernd mit voller Frischdampfspannung und höchster Ueberhitzung arbeiten. Es kommt daher die durch Aufstellung der Ruths-Speicher erzielte Verbesserung des Kesselwirkungsgrades voll zur Geltung. Die Ersparnis wird ungefähr 7 Mill. M pro Jahr betragen (Preise vom Januar 1922) und die Speicheranlage in etwa 1 Jahre bezahlt machen.

VI. Die Wirtschaftlichkeit von Ruths-Speichern für Kraftwerke.

a) Speicheranlage des Kraftwerkes Lauchhammer.

In der Zeitschrift „Stahl und Eisen“ 1922, Nr. 24, berichtet Stein über die von der A.E.G. gelieferte, im Bau begriffene Speicheranlage für Kraftwerk Lauchhammer, bei welcher erstmals die in Abb.10 dargestellte Spezialsteuerung angewendet wird. Das Werk liegt in der Nähe von Braunkohlefeldern und versorgt über eine 70 km lange Fernleitung ein Ueberlandnetz, an das hauptsächlich Hüttenwerke angeschlossen sind. Die Grundlast beträgt etwa 17000 kW, die Spitzenleistung bis zu 22000 kW. Den Dampf erzeugen zur Zeit 28 Flammrohrkessel von je 150 m² Heizfläche mit Treppenrosten für minderwertige Rohbraunkohle. Trotz sorgsamer Betriebsführung kann infolge der plötzlich und unerwartet eintretenden Spitzen im Dauerbetriebe ein Kesselwirkungsgrad von mehr als 66 vH nicht erzielt werden. Deshalb werden jetzt 2 parallel geschaltete Dampfspeicher von zusammen 700 m³ Inhalt aufgestellt, die zwischen 3 at/abs. und 1,2 at/abs. arbeiten. Stein weist a. a. O. ausführlich nach, daß durch die Aufstellung einer besonderen Speicherturbine (s. S. 11 bzw. 13 u. Abb.10—13) der Dampfverbrauch dieser Turbine, der durch größeren Leerlauf, Druckverluste und Sättigung des Dampfes im Speicher beeinflußt wird, den Gesamtdampfverbrauch

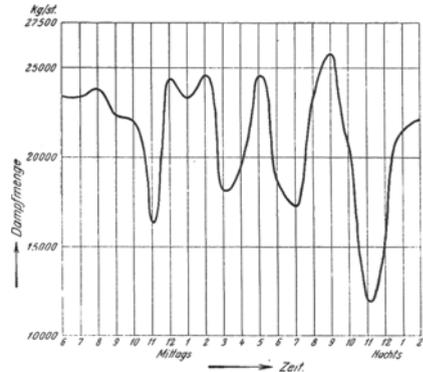


Abb. 31.

Schwankungen der Dampferzeugung einer mit feuchten Holzabfällen gefeuerten Kesselanlage bei konstanter Zugstärke.

Wie groß die Ersparnisse und Vorteile sind, die Ruths-Speicher bei Anlagen bieten, die mit minderwertigen Brennstoffen von stark wechselndem Heizwert gefeuert werden, zeigt Abb. 31, welche die Schwankungen der Dampferzeugung des mit Holzabfällen geheizten, großen Kraftwerkes einer schwedischen Papierfabrik wiedergibt. Der Wassergehalt dieser Abfälle wechselt schnell zwischen 20 und 50 vH und hätte zur Aufstellung mehrerer zusätzlicher, schlecht belasteter Kessel und dauernder Aenderung der Zugstärke gezwungen, wenn kein Speicher aufgestellt worden wäre. Ferner wären dann sehr große Brennstoffverluste unvermeidlich gewesen, da die Holzabfälle nur bei konstantem Zug und nur dann mit hohem Wirkungsgrad ver-

brennen, wenn Eingriffe in die Feuerung möglichst unterbleiben. Seit Aufstellung des Ruths-Speichers wird eine nahezu konstante Brennstoffmenge zugeführt und die Zugstärke fast gar nicht mehr geändert. Den dadurch erzielten hohen Kesselwirkungsgrad zeigt das Kohlänsäurediagramm der Rauchgase, Abb. 32.

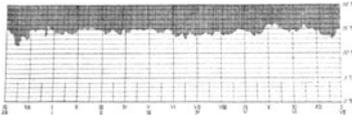


Abb. 32.
Kohlänsäuregehalt der Abgase der in Abb. 31 erwähnten Kesselanlage nach Aufstellung eines Ruths-Speichers.

b) Untersuchung eines Großstadtbelastungsdiagrammes.

Um ein Bild von den in Elektrizitätswerken durch Ruths-Speicher erzielbaren Ersparnissen zu geben und um die Hauptgesichtspunkte zu zeigen, nach welchen Speicheranlagen für solche Werke entworfen werden müssen, wurde das in Abb. 33 dargestellte Belastungsdiagramm, dessen Charakter etwa dem der Berliner Elektrizitätswerke entspricht, nach den verschiedensten Richtungen untersucht. Von den umfangreichen und mühevollen Rechnungen sollen hier 2 Fälle vorgetragen werden, die die hauptsächlichsten Zusammenhänge recht klar zeigen. Es wurde u. a. angenommen, daß der Höchstwert der Belastungskurve 8000 kW betrage und daß ohne Speicher zur Deckung der Spitzenbelastung insgesamt 4 Kessel erforderlich seien. Bei vollkommenem Belastungsausgleich wäre dann ein Speicher von etwa 25000 kWh Speichervermögen erforderlich. Die durch die Speicherturbine zu deckenden Energiemengen zeigt das obere Diagramm in Abb. 33.

Man kann aber auch die Spitzen nur teilweise ausgleichen, indem die Kessel nach der im unteren Diagramm von Abb. 34 strichpunktiert eingezeichneten Linie gefeuert werden. Man käme dann mit 3 statt mit 2 Kesseln bei völligem Ausgleich oder statt 4 Kesseln ohne Ausgleich aus, und es wären jetzt nur noch die durch Schraffur angedeuteten Flächen zwischen der Belastungskurve und der strichpunktiert eingezeichneten Leistungskurve der Kessel zu speichern entsprechend dem oberen Diagramm in Abb. 34. Infolgedessen müßte die Speicherfähigkeit nur noch 4350 kWh betragen.

Die durch die mehr oder weniger weitgehende Speicherung erzielbaren Mindestkohlenersparnisse lassen sich auf Grund der bereits erwähnten Versuche von Guillaume und eigener Versuche des Verfassers ziemlich zuverlässig berechnen. Sie bestehen vor allem in der Verkleinerung der Verluste durch Anheizen und Leerlauf von Kesseln, der Verluste durch Abkühlung stillgesetzter Kessel während der Betriebspausen und der Verluste durch Rückgang des Kesselwirkungsgrades bei Teillast. Nicht berücksichtigt sind die Verluste, die dadurch entstehen, daß Schütthöhe, Rostvorschub und Zugstärke ohne Speicher öfters verändert werden und

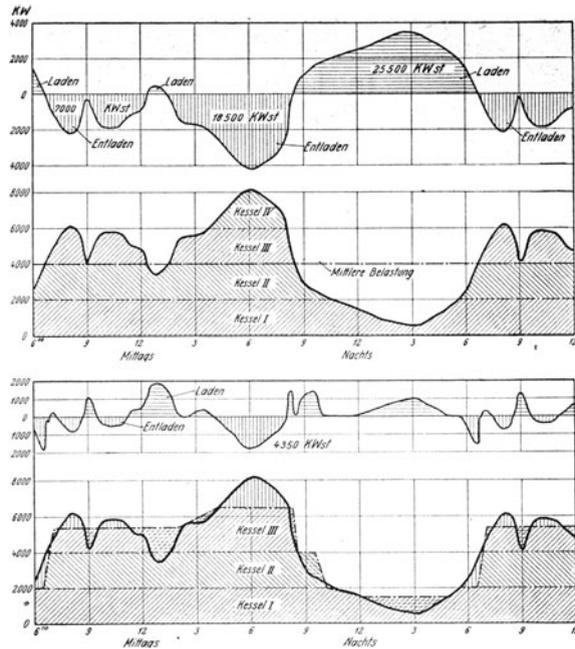


Abb. 33 und 34.
Vollkommener und teilweiser Ausgleich der Belastungsschwankungen in der Dampfkesselanlage durch Aufstellung eines Ruths-Speichers.

die bei nicht ganz sachgemäßer Bedienung oder ungeeigneter Kohle erhebliche Beträge erreichen. Die in Abb. 35 dargestellten, nach den Einzelposten gegliederten Verluste sind daher Mindestverluste bei guter Steinkohle, die durch Eingriffe in die Feuerung verursachten Verluste sind hierbei noch nicht berücksichtigt. Die tatsächlichen Verluste dürften daher um etwa 2—4 vH größer ausfallen. Auf 1 kWh Speichervermögen

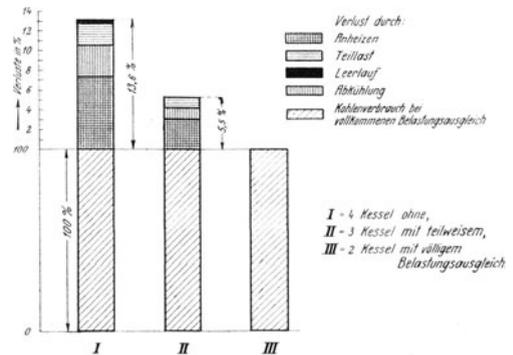


Abb. 35.
Verschlechterung des Wirkungsgrades der Kesselanlage infolge der Schwankungen der Belastungskurve in Abb. 33 bei fehlendem oder nur teilweise durchgeführtem gegenüber vollständigem Belastungsausgleich.

werden jährlich gespart bei vollständigem Belastungsausgleich 150 kg Kohle, bei teilweise Belastungsausgleich 480 kg Kohle.

Bei teilweise Belastungsausgleich wird also in dem untersuchten Fall das Speichervolumen spezifisch besser ausgenützt, und es ist eine reine Wirtschaftlichkeits- und z. T. auch Zweckmäßigkeitfrage, wie weit jeweils der Belastungsausgleich gebracht werden soll. Hierüber sind von Fall zu Fall eingehende Untersuchungen anzustellen, die die besonderen Verhältnisse sorgsam berücksichtigen.

Für den wirtschaftlichen und betriebstechnischen Enderfolg spielen aber außer dem zweckmäßigsten Grade des Belastungsausgleiches noch verschiedene andere Faktoren eine wichtige Rolle, an die zunächst kaum gedacht wird und deren richtige Bewertung und Erfüllung in iges Zusammenarbeiten von Kessel-, Speicher- und Turbineningenieur erfordern, wie das folgende Beispiel zeigen möge.

Es wurde wieder das Belastungsdiagramm von Abb. 33 zugrunde gelegt und angenommen, daß der in diesem Diagramm unter 4000 kW gelegene Teil durch ein Fernkraftwerk, der darüber gelegene durch ein Spitzenwerk gedeckt werden soll. Aus Gründen, auf die einzugehen hier zu weit führen würde, wurde der kW-Maßstab auf $1/2,5$ verkleinert, so daß die Höchstbelastung des Spitzenwerkes 10000 kW beträgt, Abb. 36. Das Spitzenwerk hätte somit von morgens 6⁴⁵ bis abends 8³⁰ mit einer $1\frac{1}{2}$ -stündigen Unterbrechung und mit sehr starken Schwankungen Strom zu liefern.

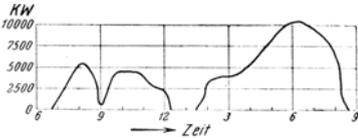


Abb. 36.

Aus Abb. 33 abgetrennter, auf $1/2,5$ fachen Maßstab verkleinerter Spitzenteil der Belastungskurve.

Es wurde nun zunächst untersucht, wie groß der Kesselwirkungsgrad wird, wenn 5, 4, 3 oder 2 Kessel von je 2000 kW Leistung den erforderlichen Dampf liefern. Bei 5 Kesseln wäre kein Speicher vorhanden (Fall I), bei 2 Kesseln wäre der Belastungsausgleich am vollkommensten. Hierbei ergab sich, daß bei Verwendung normaler, eingemauerter Zweikammerwasserrohrkessel gegenüber dauernd vollbelasteten und daher mit günstigstem Wirkungsgrade arbeitenden Kesseln ein Mehrverbrauch für Anheizkohle und für Verluste infolge Teilbelastung und Betriebspausen eintreten würde von rd. 37 vH bei Fall I und von rd. 4,5 vH bei Fall IV, Abb. 37.

Der Mehrverbrauch an Kohle aus Abb. 37 für Fall I wurde nun in Abb. 38 (n. S.) gleich 100 vH gesetzt. Diesem Mehrverbrauch wurden die Mehrverbräuche für Fall II bis IV gegenübergestellt, die dadurch entstehen, daß Kessel und Turbinen gleichfalls nicht voll belastet arbeiten. Bei Speicherbetrieb ist ferner zu beachten, daß anstelle einer oder mehrerer reiner Kondensationsturbinen in Fall I die Kombination einer (oder mehrerer) reinen Kondensationsturbine mit einer aus Lade- (Hochdruck) und Entlade-

(Niederdruck) stufe bestehenden Speicherturbine tritt. Hierdurch fallen Belastungsgrad und spezifischer Dampfverbrauch der Turbinen in den einzelnen Fällen verschieden aus. Ferner müssen bei Speicherbetrieb die Verluste berücksichtigt werden, die durch zeitweisen Leerlauf und Kühldampfverbrauch der Ladeturbine, durch verschlechterten Dampfverbrauch infolge Teillast und durch Abkühlungsverluste des Speichers auftreten. Die

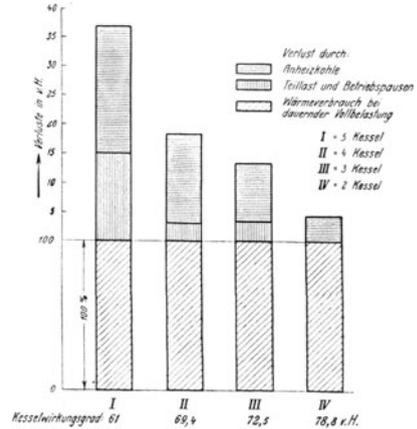


Abb. 37.

Kohlenmehrverbrauch der Kesselanlage des nach Abb. 36 belasteten Spitzenkraftwerkes ohne und mit verschieden weitgehend durchgeführtem Belastungsausgleich durch Ruths-Wärmespeicher gegenüber konstant belasteten Kesseln. (Wirkungsgrad von konstant belasteten Kesseln angenommen zu 82 vH.)

Einzelbeträge dieser Verluste sind in Abb. 38 (n. S.) übersichtlich bildlich dargestellt. Der oberste, senkrecht schraffierte Teil der einzelnen Bilanzen gibt die Kohlenersparnis gegenüber Fall I. Abb. 38 zeigt wieder, daß die Verluste in den Kesseln um so kleiner werden, je weiter der Belastungsausgleich durchgeführt wird, und daß gleichzeitig auch die Turbinenverluste abnehmen. Sie erreichen einen Mindestwert in Fall IV. Setzt man die in diesem Falle erforderliche Speichergröße zu 100 vH, so beträgt die verhältnismäßige Größe in Fall II 28 vH und in Fall III 42 vH (der voll ausgefüllte Teil des an der linken Seite der Bilanzen angesetzten schmalen Streifens und die in Kursivschrift beigeschriebenen Zahlen geben die verhältnismäßige Größe des Speichers für die einzelnen Fälle an). Das eigentümliche Verhalten der Verluste zueinander hat nun Veranlassung gegeben, die Einzelheiten noch weiter zu verfolgen. Hierbei hat sich herausgestellt, daß die absolut größten Gesamtsparrnisse bei 3 Kesseln von je 1600 kW Leistung und einem Speicher auftreten, dessen Volumen 70 vH des Speichers in Fall IV ist. Die gesamten jährlichen Ersparnisse an Betriebskosten (Kosten für Kohle, Bedienung, Verzinsung und Abschreibung) in Fall IIIa gegenüber Betrieb ohne Speicherung (Fall I) betragen auf Grund der Preise vom 1. Juni 1922 rd. 4,8 Mill. M. Die wesent-

lich größeren Anlagekosten in Fall IIIa verzinsen sich mit rd. 10 vH über einen angemessenen Betrag für Abschreibung und Verzinsung des Anlagekapitales hinaus.

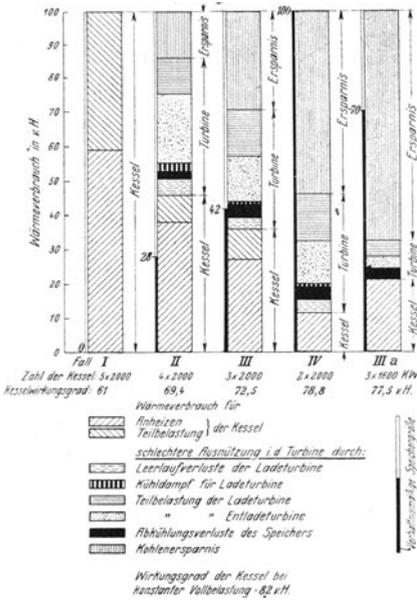


Abb. 38.

Einzelverluste in Speicher und Turbinen bei verschieden weit durchgeführtem Belastungsausgleich in einem Spitzenkraftwerk mit der in Abb. 36 dargestellten Belastungskurve.

Als wichtigstes Ergebnis der Untersuchungen, das allgemeine grundsätzliche Bedeutung für die Aufstellung von Wärmespeichern in Spitzenkraftwerken hat, kann etwa gesagt werden, daß folgende Punkte sorgsam berücksichtigt werden müssen:

A. Kesselanlage.

1. Zweckmäßige Bemessung von Zahl und Größe der Kessel,
2. zweckmäßige tägliche Betriebszeit der Kessel.

B. Turbinen und Speicher.

1. Vorteilhaftester Grad des Belastungsausgleiches,
2. richtige Verteilung der Belastung auf Fernkraft- und Spitzenwerk,
3. richtige Bemessung der Kondensations-, der Lade- und der Entladeturbine,
4. richtige, womöglich selbsttätige Verteilung der Belastung auf Lade-, Entlade- und Kondensations-turbine, um recht kleine Einzelverluste in jeder Turbine zu erhalten.

Wirtschaftlichkeit der Momentanreserve in Malmö.

Die Wirtschaftlichkeit eines Ruths-Speichers als Momentanreserve im Vergleich zu anderen demselben Zweck dienenden Anlagen untersucht ein Bericht, den die Direktion des Elektrizitätswerkes in Malmö an die Staatsbevollmächtigten erstattet hat und der folgende 4 Fälle behandelt:

1. Aufstellung einer Dampfturbinenanlage, deren Kessel dauernd in Bereitschaft gehalten werden,
2. Aufstellung eines Ruths-Speichers mit Dampfturbine, der lediglich als Momentanreserve dient und nur während eines 1 Stunde nicht überschreitenden Versagens der Fernversorgung die Stromlieferung übernehmen könnte,
3. wie unter 2. mit dem Unterschied, daß gleichzeitig eine Kesselanlage aufgestellt wird, damit auch bei längerem Versagen der Fernkraftversorgung der fehlende Strom geliefert werden kann,
4. Aufstellung eines Dieselmotors, der als Momentan- und als Dauerreserve dient.

Die Hauptwerte mit kurzen erläuternden Angaben sind in Tabelle III zusammengestellt:

Tabelle III. Anlage- und Betriebskosten bei verschiedenen Arten einer Momentanreserveanlage.

Arbeitsweise	Fall	1	2	3	4
		Turbine mit Kesseln	Turbine mit Speichern	Turbine mit Speichern und Kesseln	Dieselmotoren
Drehstromleistung kW		2630	3000	3000	—
Gleichstromleistung kW		2310	2640	2640	2000
A. Anlagekosten insgesamt					
Mit Drehstromanlage Kr		1 238 800 471	964 700 322	1 764 100 588	—
Mit Gleichstromanlage Kr		—	—	—	1 689 700 845
Mit Drehstrom- und Gleichstromanlage Kr		1 557 800 675	1 233 700 486	2 083 100 789	—
B. Kosten für Verzinsung, Abschreibung, Unterhaltung					
Auf die kW max. Gleichstromleistung bezogen Kr		75,2	55,6	88,1	107,0
C. Gesamtbetriebskosten für 1 kW max. Gleichstromleistung					
Wenn dauernd volle Reserve zur Verfügung steht					
a) reine Bereitschaftskosten Kr		90,9	5,6	5,6	—
b) Kosten unter B Kr		75,2	55,6	88,1	107
Summe		166,1	61,2	93,7	107

Da die Gleichstromleistung nicht in allen Fällen dieselbe ist, sind die verschiedenen Kosten auf 1 kW maximale Gleichstromleistung als maßgebende Vergleichsgröße bezogen worden. Die Werte zeigen, daß eine Ruths-Speicheranlage am billigsten ist. Da sie zudem durch Ausgleich des wattlosen Stromes die bereits erwähnten Vorteile gibt, wurde sie zur Ausführung bestimmt.

VII. Zusammenfassung und Schluß.

Ich hoffe, Ihnen gezeigt zu haben, daß auch für Kraftwerke Ruths-Speichern große Bedeutung zukommt. Ihre Eingliederung in die Energiewirtschaft stellt dem Ingenieur eine Fülle schwieriger Aufgaben und greift tief in Bemessung und Ausführung anderer, mit den Speichern zusammenarbeitender Maschinen ein. Insbesondere Dampfkessel, Dampfturbinen und die Regelung von Kraftmaschinen müssen sorgsam den besonderen Anforderungen des Speicherbetriebes angepaßt werden. Bei eingehender Beschäftigung mit der Materie sieht man mit Erstaunen, wie häufig wichtige Teile einer Maschine nicht auf Grund logischer Erwägungen, sondern lediglich durch Zufälligkeiten oder die Macht der Gewohnheit bemessen wurden und welche Wichtigkeit Einzelheiten zukommen kann, die man bisher als unerheblich und nebensächlich anzusehen gewohnt war.

Der neuzeitliche Dampfkraftbetrieb ist gewissermaßen ein hochkultiviertes Gebilde, bei dem, solange nicht ein grundsätzlich neuer Arbeitsprozeß gefunden wird, weitere Verbesserungen nur unter raffinierter Ausnützung aller sich bietenden Vorteile erzielt werden können. Das Herausholen der letzten paar Prozent Wirkungsgrad stellt daher oftmals an Umsicht, Geduld und Tatkraft die höchsten An-

forderungen. Dies gilt sowohl für die Betriebsleiter als auch für die Erbauer von Maschinen. Diese Tatsache kommt Ihnen vielleicht am besten zum Bewußtsein, wenn Sie sich vergegenwärtigen, welche Wandlung z. B. der Betrieb eines Elektrizitätswerkes in verhältnismäßig kurzer Zeit erfahren hat. An Stelle schlecht gelüfteter und beleuchteter Räume sind große, peinlich saubere, lichtdurchflutete Hallen getreten, und da, wo früher ein ruß- und ölbeschmutzter Maschinenmeister von manchmal recht fragwürdiger Einsicht schaltete, führen heute praktisch und theoretisch aufs beste geschulte Ingenieure, oft unter Unterstützung wohl ausgestatteter Laboratorien, das Kommando. Die Bewältigung der vielfältigen Aufgaben hat sogar über den Rahmen des einzelnen Werkes hinaus den Zusammenschluß in Fachvereinigungen nötig gemacht, unter denen die Ihrige mit ihren zahlreichen Fachkommissionen und Studienausschüssen an hervorragender Stelle steht.

Der Bau hochwertiger neuzeitlicher Kraftanlagen ist ohne einen Stab von Ingenieuren der verschiedensten Fachgebiete nicht mehr möglich. Sonst ist es fast unvermeidlich, daß durch Uebersehen wichtiger Rücksichten auf irgend einem Gebiete eine Anlage von Anfang an nicht wieder zu behebende organische Schwächen erhält und den heutigen hohen Anforderungen nicht entspricht.

Die Kunst kongenialer Zusammenarbeit, das unermüdliche, zähe Ueberwinden von tausend Schwierigkeiten, das Eindringen in immer neue Zusammenhänge und Wissensgebiete ist aber eine der reizvollsten Seiten des Berufes eines Ingenieurs in seinem Kampf um die Beherrschung der rohen Materie durch die schöpferische Kraft des menschlichen Geistes.