

Die Pumpspeichieranlage Rodund II aus elektrotechnischer Sicht

Autor(en): **Gstettner, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **69 (1978)**

Heft 17

PDF erstellt am: **22.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-914933>

Nutzungsbedingungen

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

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

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

Haftungsausschluss

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

Die Pumpspeicheranlage Rodund II aus elektrotechnischer Sicht

Von R. Gstettner

621.221.4(436): 621.311.21(436);

Die Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft hat 1976 eine Pumpspeicheranlage mit einem 284-MW-Maschinensatz in Betrieb genommen. Bei Maschinensätzen der Bauart und Leistung ähnlich Rodund II treten kurzzeitig Beanspruchungen auf, die bei Wasserkraftwerken bisher weder konstruktiv noch technologisch besondere Berücksichtigung fanden. Einige Bereiche dieser dynamischen und transitorischen Störeinflüsse auf die elektrischen Maschinen wurden eingehend untersucht, und eine Auswahl der gewonnenen Ergebnisse wird erwähnt.

En 1976, la Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft a mis en service une installation d'accumulation par pompage, avec un groupe de machines de 284 MW. Les groupes du genre et de l'ordre de puissance de Rodund II subissent des sollicitations transitoires dont on n'avait jusqu'ici pas spécialement tenu compte des points de vue construction et technologie. Quelques aspects de ces perturbations dynamiques et transitoires agissant sur les machines électriques ont été examinés. Certains résultats obtenus sont mentionnés.

1. Das Kraftwerkskonzept

1.1 Werksgruppe Obere Ill-Lünersee

Seit der Gründung der Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft im Jahre 1924 wurden die Wasserkräfte des 1281 km² grossen Einzugsgebietes der Ill nach einem Gesamtausbauplan für Leistung, Energiemenge und Speicherraum schrittweise erschlossen. Die Gesellschaft hat bisher über 1100 MW Turbinen- und 520 MW Pumpleistung in Speicherkraftwerken erstellt. Nach Inbetriebnahme des Pumpspeicherwerkes Rodund II beträgt das über Winter und Sommer beinahe ausgeglichene Jahres-Arbeitsvermögen 1900 GWh und fällt fast vollständig in die Hochtarifzeit grosser Versorgungssysteme im europäischen Grossverbund.

Bekanntlich werden derart ausgelegte Alpenwasserkräfte für die Lieferung und Aufnahme von «Regelleistung» zur Spitzendeckung, Energieveredelung, Frequenzhaltung, Spannungs- und Stabilitätsstützung sowie für Ausfallreserve deshalb so geschätzt, weil sie ohne erhöhte Abnutzung mit unerreichter grosser Dynamik zur Verfügung stehen und dadurch die Versorgungssicherheit und Versorgungsqualität verbessern [1; 2]¹⁾.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

1.2 Anordnung und Auslegung Rodund II

Das 1943 in Betrieb gesetzte Pumpspeicherwerk Rodund I hatte als unterste Stufe der damaligen Kraftwerkskette Spitzenenergie geliefert. Zuzufolge des seither fortschreitenden Ausbaues von Jahresspeichern und Wasserleitungen verlor diese Kraftstufe den Spitzencharakter in einem unerwünschten Ausmass. Um dies zu ändern, wurde hydraulisch parallel zum bestehenden Kraftwerk das Rodundwerk II gebaut und so ausgelegt, dass beide Werke zusammen den der übrigen Werksgruppe angepassten Regelleistungsbetrieb führen [3; 4]. Die Turbinen-Vollastbetriebsstunden beider Rodundwerke fallen wieder ganz in den Zeitbereich der «Starklastenergie» eines grossen Versorgungsbereiches, die Pumpenbetriebsstunden vollständig in den Zeitbereich der «Nicht-Starklastenergie» und können weitgehend freizügig auf Werktagen und Wochenenden aufgeteilt werden. Die hydraulische Auslegung des neuen Pumpspeicherwerkes und die ausgeglichene Inanspruchnahme beider Werke geht aus Tabelle I hervor.

Der Lageplan Fig. 1 gibt Aufschluss über die wasserbauliche Anordnung. Nach zahlreichen technischen und wirtschaftlichen Vergleichen wurde für die Zusammenfassung der Werksleistung in einem einzigen Maschinensatz, für die Ausführung der hydraulischen Maschine als reversible Pumpenturbine und für das Anfahren in den Pumpbetrieb mittels Anwurfmotor entschieden. Die gewählte Leistung ergab in der vertikalachsigen Maschinenanordnung, auch wegen der für die Pumpenturbine erforderlichen tiefen Einbaulage in einem zylindrischen Kraftwerkschacht, die wirtschaftlichste Lösung [5; 6].

In Fig. 2 ist ein Längsschnitt durch die Kraftwerksanlage wiedergegeben. Nach oben wird der Kraftwerkschacht durch eine Montagehalle, durch Gebäude für Schaltanlagen und durch die 220-kV-Freiluftschaltanlage, in der sich der Maschinentransformator befindet, abgeschlossen. Rodund II ist praktisch unbesetzt und wird von der Warte Rodund I aus ferngesteuert und vom gleichen Personal gewartet.

1.3 Hauptdaten des Maschinensatzes

Zum Verständnis der nächsten Abschnitte seien die wichtigsten Kenngrössen der Maschinen angeführt. Das Kraftwerk ist in [7] eingehender beschrieben. Die Tabelle II enthält die für die elektrischen Maschinen wesentlichen Daten der Pumpenturbine.

Die höchste vom Motorgenerator abgebbare Leistung wurde auf 284 MW begrenzt, weil eine Vollastabschaltung zur höchstzulässigen Durchgangsdrehzahl führt. Der elektrohydraulische Turbinenregler betätigt die elektrischen Steuerorgane der 20 mit Einzelservomotoren ausgestatteten Leit-

Energiewirtschaft Latschau-Rodund

Tabelle I

		Rodund I (4 Maschinen)	Rodund II (1 Maschine)	
Werksleistung (MW)	Turb.-betrieb	173	273	
	Pump-betrieb	40	256	
Gesamterzeugung (GWh)	Sommer	161	235	
	Winter	171	251	
	Jahr	332	486	
hievon aus Zufluss (GWh)	Sommer	183	125	
	Winter	128	87	
	Jahr	311	212	
hievon aus Wälzpump-speicherung (GWh)	Sommer	36	52	
	Winter	84	123	
	Jahr	120	175	
Pumpenenergieaufwand (GWh)	Jahr	58	359	
Vollastbetriebsstunden	im Turbinenbetrieb	Sommer	930	860
		Winter	1010	920
		Jahr	1940	1780
	im Pumpbetrieb	Jahr	1450	1400

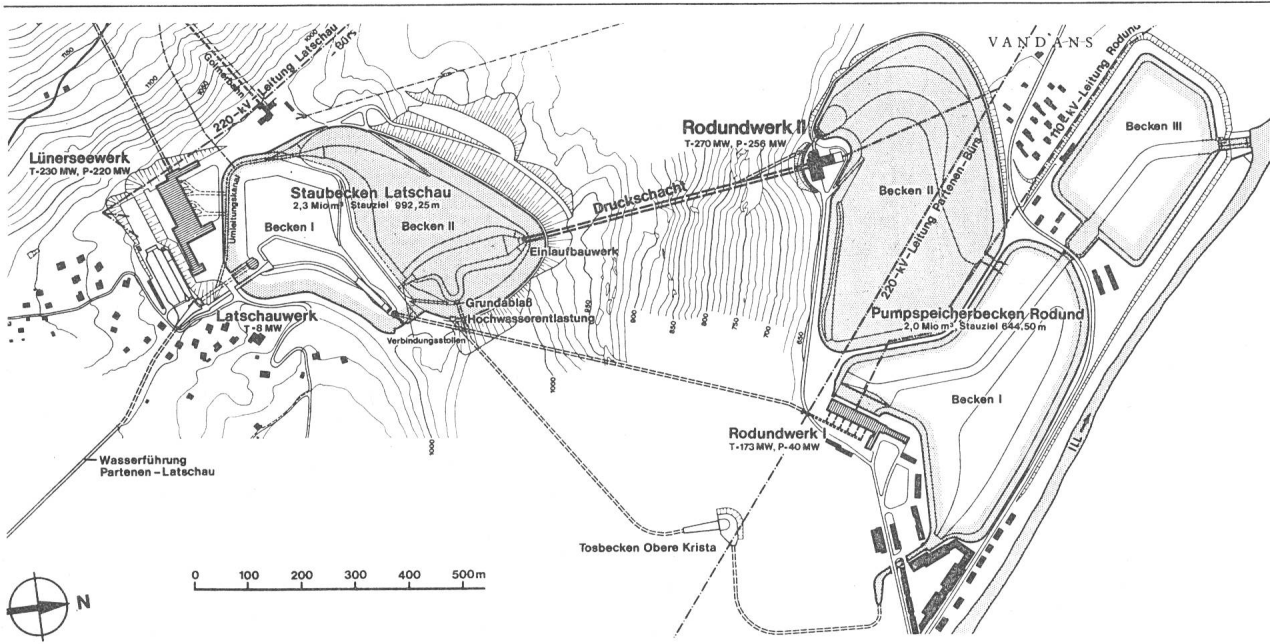


Fig. 1 Übersichtslageplan der Rodundwerke I und II

schaufeln. Unmittelbar oberhalb des Laufrades befindet sich das Führungslager und darüber das für 700 Mp bemessene Traglager. Die Turbine ist mit dem Motorgenerator über eine Zwischenwelle – zur Durchführung unabhängiger Überholungsarbeiten an den Maschinen – verbunden.

Die wichtigsten Daten des *Motorgenerators* sind der Tabelle III zu entnehmen. Bei betriebsmässigen Abstellungen erfolgt Aberregen im Wechselrichterbetrieb der Thyristorbrücken und mit verzögerter Nachholung des Entregungsschalters; bei Abschaltungen nach Störungen wird über spannungsabhängige Widerstände schnellentregt. Mit der statischen Erregereinrichtung wird bei betriebsmässigen Abstellungen immer und bei Schutzabschaltungen nur dann, wenn die Wicklungen des Motorgenerators nicht gestört sind, automatisch gebremst. Der Erregerbedarf hierfür beträgt 1300 kVA und wird der 8-kV-Eigenbedarfsanlage und somit über die Tertiärwicklung des Maschinentransformators dem 220-kV-Netz entnommen. Der rasche Stillstand des Maschinensatzes aus der Turbinendrehrichtung durch die elektrische Bremsung (in

Pumpturbinen-Kenndaten

Tabelle II

Geodätische Fallhöhe (m)	329,50–354,25
Turbinen-Vollastdurchfluss (m ³ /s)	85–89
Turbinen-Höchstleistung (MW)	255–285
Pumpen-Förderstrom (m ³ /s)	72–64
Pumpen-Antriebsleistung (MW)	
bei 50 Hz	264–252
bei 51 Hz	276–264
bei 52,5 Hz nimmt der Motorgenerator 305,5 MW auf und wird zeitverzögert abgestellt.	
Synchrone Drehzahl (min ⁻¹)	375
Höchste (dynamische) Durchgangsdrehzahl (min ⁻¹)	546

100 s ab 218 min⁻¹) entlastet das Traglager erheblich und vereinfacht die Automatikskriterien im Sinne eindeutiger Abhängigkeiten. Das Ständergehäuse wurde im Rodundwerk zusammengeschweisst und Dynamobleche und Hochspannungs-

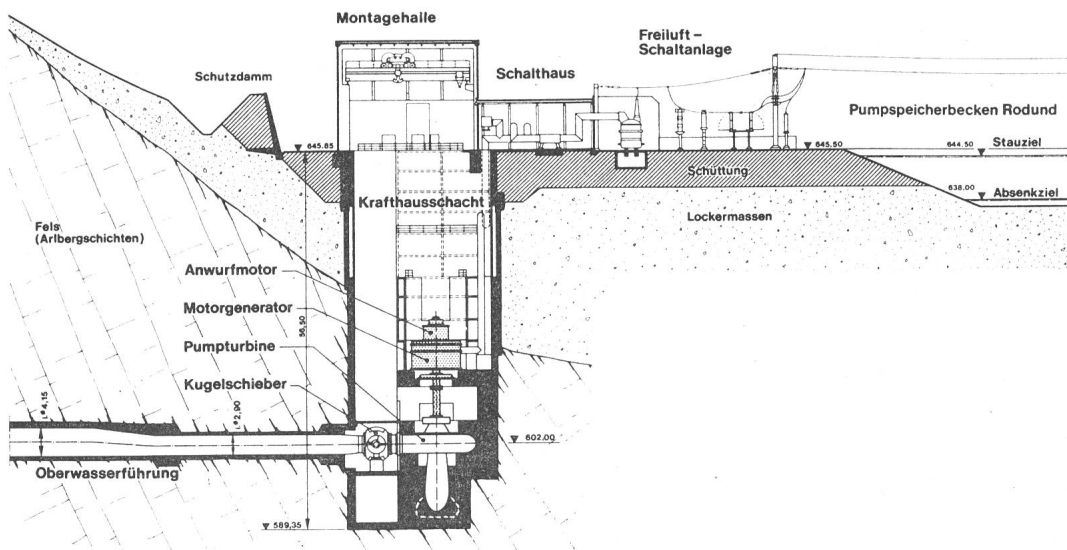


Fig. 2 Vertikalschnitt durch das Krafthaus Rodundwerk II mit Oberwasserführung und Freiluftschaltanlage

310 MVA im gesamten Spannungsbereich von 21 kV \pm 8%, 0,84 über- und untererregt.
252 Mvar bei 0,00 übererregt, 233 Mvar bei 10% Leerlaufregung.
28,4° Polradwinkel bei 260,4 MW Turbinenbetrieb und 38,7° bei 253 MW Pumpbetrieb.
375 min ⁻¹ , 50 Hz, 16polig (Trapezpole).
Polradspannung 294 V bei 3060 A, maximale Polradspannung bei Stosserregung 620 V, bei maximal 10 s Dauer mit 5160 A.
Thyristorbrückenerregung angespeist im Nebenschluss von einer dritten Wicklung (8 kV) des Maschinentransformators, der immer betriebsbereit am Netz hängt.

wicklungen eingelegt, was einen teilfugenlosen einteiligen Ständer ergab. Der Rotor mit einem Gesamtgewicht von 285 t wurde ebenfalls in Rodund zusammengebaut und besteht aus Welle, geschweisster Nabe, Blechkette und mit Doppelhammerköpfen befestigten Polen. Die Polleistung bei Überlast übersteigt 20 MVA/Pol, ein Wert, der zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme noch von keiner anderen Wasserkraftmaschine erreicht worden war.

Das relativ kleine Schwungmoment der rotierenden Massen von 3910 t/m² (entsprechend einer Trägheitskonstante von 2,43 kW/s/kVA) sicherte bei dem verhältnismässig kurzen Druckschacht die Druckstossgarantien und erleichterte die Ausnutzung der Vorteile der wassergekühlten Ständer- und Läuferwicklung.

Der Motorgenerator besitzt oberhalb des Rotors in einem Armstern eingebaut ein Segmentführungslager. Wegen des Fehlens geologischer Voraussetzungen in diesem Niveau werden diese Lagerkräfte über den Ständer des Motorgenerators auf die reichlich armierte Fundamentplatte übertragen. Diese ist ihrerseits durch breite Mauern mit dem grossen Turbinenfundament bzw. mit dem Felsbereich der Schachtsohle weitgehend starr verbunden. Das untere Führungslager des Motorgenerators ist über einen Armstern kleineren Durchmessers radial auf die Fundamentplatte abgestützt.

Umfassende Vergleiche möglicher Anfahrmethoden liessen den *Anwurfmotor* technisch und wirtschaftlich als vorteilhafteste Lösung erkennen [5]. Er ist für eine Anfahrleistung von 28600 kW (35500 kVA, 7,4 kV) während 70 s (Beschleunigungsdauer von Stillstand auf synchrone Drehzahl) bei dreimaliger Wiederholung mit 6-min-Pausendauer bemessen und bewirkt im Vergleich zu den Asynchron-Anlaufmethoden mit dem Motorgenerator unbedeutende Spannungsabsenkungen im Hochspannungsnetz. Der Drehstrom-Schleifringläufer-Asynchronmotor mit 14 Polen beschleunigt mit Hilfe eines ungewöhnlich grossen, aus drei Elektrodenkesseln bestehenden Flüssigkeitsanlassers den Maschinensatz über die Nenndrehzahl des Motorgenerators hinaus. Er bewältigt das vorumschriebene Anlaufspiel trotz fehlender Kühlung ohne unzulässige Temperaturerhöhung.

Voraussetzung für den plangemässen Ablauf des automatischen Anlaufvorganges ist die Drehrichtungsvorwahl des Motorgenerators durch die entsprechenden drei Pole des aus fünf Einzelpolen bestehenden Lastschaltersystems und ferner die Bebläsung des Laufradraumes der Pumpturbine mit Press-

luft aus derselben Anlage, die den Phasenschieberbetrieb ermöglicht. Die Spirale der hydraulischen Maschine bleibt bei diesem Vorgang wassergefüllt. Nach erfolgter Synchronisierung mit dem Lastschalter wird der Laufradraum wieder entlüftet, um nach Massgabe des Öffnens der Absperrorgane (erst Kugelschieber, dann Leitapparat) den Pumpbetrieb zu beginnen. Das betriebsmässige Abstellen aus dem Pumpbetrieb erfolgt durch Schliessen des Leitapparates, dann des Kugelschiebers. Der 21-kV-Synchronisierschalter des Motorgenerators wird bei einer Pumpen-Teilast abgeschaltet, um einen raschen Stillstand des Maschinensatzes zufolge der hydraulischen Bremswirkung zu gewährleisten. Deshalb braucht beim Abstellen aus Pumpendrehrichtung überhaupt nicht elektrisch gebremst zu werden.

Ursprünglich war beabsichtigt, den Anwurfmotor im oberen Wellenbereich fliegend anzuordnen. Nach eingehenden Untersuchungen des Schwingungsverhaltens durch Radialkraftstösse in Laufradebene der Pumpturbine erhielt der Anwurfmotor ein zusätzliches Führungslager oberhalb seines Läufers [8].

Die Auslegung und Konstruktion des *Maschinentransformators* waren durch das Eigenversorgungsprinzip dieses Pumpspeicherwerkes mitbestimmt. Zum Beispiel müssen die Leistungen für die Erregung des Motorgenerators und für das

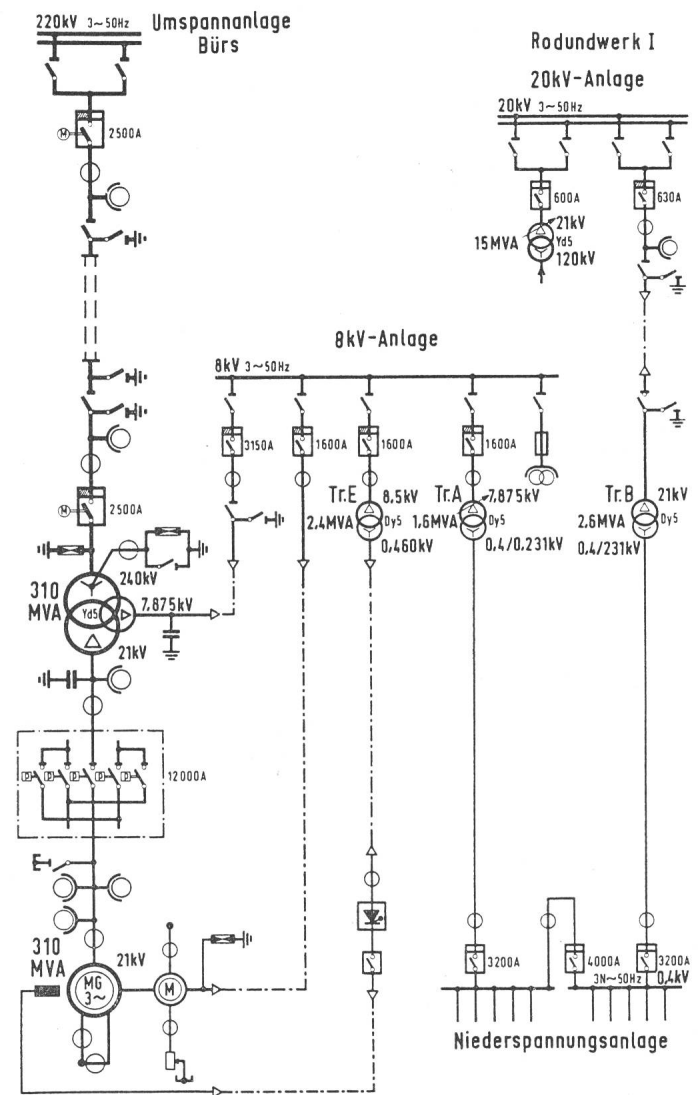


Fig. 3 Schaltungsübersicht Rodund II

Beschleunigen des Maschinensatzes in Pumpendrehrichtung, also für den Anwurfmotor, bereitstehen. Weil die Durchschaltung von Motorgenerator-Maschinentransformator-Übertragungsleitung zur Umspannanlage Bürs in jeder Betriebsart des Pumpspeicherwerkes störungsfrei betriebsbereit steht, bot sich für die Eigenversorgung der Nebenschluss zu dieser Übertragungskette gemäss Fig. 3 an. Als kurzschlusssicherster Abzweig wurde die Tertiärwicklung im Maschinentransformator errichtet, was ausserdem die 21-kV-Verbindung zwischen Motorgenerator und Maschinentransformator ohne Anzapfung und konsequent phasengekapselt auszuführen ermöglichte.

Die Ölrückkühlanlage besteht aus drei gleich grossen Öl/Wasser-Wärmetauschern, die samt drei Ölumwälzpumpen öl- und wasserseitig parallel geschaltet sind, wobei zwei Kühlabzweige genügen, um die Vollast-Verlustleistung des Transformators abzuführen, ohne die zugelassenen Temperaturgrenzen zu überschreiten.

1.4 Betriebseinflüsse auf die elektrischen Maschinen

Während der Planung sind von ähnlichen, aber wesentlich kleineren Anlagen her bekannte Beanspruchungen und Betriebsanforderungen berücksichtigt worden. Während der Konstruktion und noch während der Fertigung der elektrischen Kraftwerksausrüstung haben weiterführende Untersuchungen – teils veranlasst durch inzwischen anderweitig erfolgte Rückschläge – zusätzliche Störeinflüsse erkennen lassen. Einige Störeinflüsse haben im konstruktiven Aufbau auch der elektrischen Maschinen noch gewisse Verbesserungen bewirkt und waren der Grund für den Entschluss, die Teilschritte der Inbetriebsetzung des Maschinensatzes von einem erweiterten Messprogramm abzuleiten.

2. Radialkraftstösse in der Pumpturbine

Bei einigen kurzzeitig durchlaufenen Betriebsübergängen der Pumpturbine, die von den bestimmungsgemässen Vollast-Betriebszuständen in beiden Betriebsdrehrichtungen abweichen, entstehen instationäre Strömungen im Laufradbereich, die stossartige Radialkräfte ungleicher Grösse, zeitlich und am Umfang unregelmässig verteilt, bewirken [9; 10; 11]. Diese stochastischen Rüttelkräfte sind beim Leerlauf oder Überdrehzahlbetrieb von bis zum Jahre 1970 gebauten Francis-Maschinen zwar bekannt, aber weil sie bei Maschinen wesentlich kleinerer Leistung aufgetreten sind, bisher nicht besonders berücksichtigt worden. Bei Pumpturbinen der Grössenordnung von Rodund II sind diese dynamischen Kräfte so gross, dass sie sowohl konstruktiv als auch technologisch beachtet werden müssen. Zum Zeitpunkt der Planung Rodund II war die Maschinenindustrie nicht in der Lage, die Dynamik, Amplitudenverteilung und Grösse dieser Querkraftstösse am untersten Ende des Wellenstranges vorherzusagen. Daher mussten Näherungsberechnungen über das Schwingungsverhalten des Wellenstranges zufolge solcher schwingungsanregenden Kräfte angestellt werden und ein möglichst aussagekräftiges Messsystem aufgebaut werden.

Die Vorausberechnungen des Schwingungsverhaltens lenkten zunächst das Augenmerk auf die Kette der Steifigkeiten im Niveau der einzelnen Lager. Die Messung der dynamischen Steifigkeiten begann bereits vor der Maschinenmontage an den Fundamenten und setzte sich nach erfolgter Montage zusam-

men mit statischen Steifigkeitsmessungen fort. Gezielt während und nach der Montage vorgenommene Änderungsarbeiten im Bereich der Lager, Armsterne und Ständergehäuse verbesserten einige Teilwerte. Damit im Zusammenhang stand auch die Festlegung der Bestimmungsgrössen für die Berechnung der biegekritischen Drehzahlen, die, trotz verschärfter Rechenannahmen, noch 15 % über der höchstmöglichen dynamischen Durchgangsdrehzahl, die in seltenen Fällen einige Sekunden lang auftreten kann, liegt. Zusätzliche Beurteilungskriterien der mannigfaltigen Materialprüfungsergebnisse wurden aus den zu erwartenden Schwingungsbeanspruchungen abgeleitet und die Abnahmebedingungen entsprechend verschärft.

Die Voraussage des guten Wuchtzustandes des Maschinensatzes mit seinen umlaufenden Massen (420 t) hat sich erfüllt, da die minimale Restunwucht nur unbedeutende drehfrequente Schwingungen ergab. Diese Schwingungen konnten bei Antrieb des Maschinensatzes mit dem Anwurfmotor oder als Phasenschieber mit ausgeblasener Pumpturbine von den erzwungenen Schwingungen getrennt messtechnisch erfasst werden. Zur betriebstechnischen Überwachung dieses guten Wuchtzustandes steht eine stationäre Schwingungsüberwachungseinrichtung zur Verfügung.

Die erzwungenen Schwingungen durch Radialkraftstösse wurden während der Inbetriebsetzung gleichzeitig durch Mess-teams der Lieferfirma der Pumpturbine, derjenigen des Motorgenerators und ferner durch Spezialisten eines Schwingungslaboratoriums erfasst, wobei ein umfangreiches Aufnahme- und Analysesystem zur Verfügung stand. Aus den Messauswertungen der Elektromaschinenfirma seien hervorgehoben: Die ursprünglich aufgetretenen grossen Schwingungsaus-schläge im Bereich der Wasserkammer am obersten Wellenende wurden durch eine schwingungstechnische Entkopplung auf ein zulässiges Mass herabgesetzt. Die anregenden Radialkraftstösse zeigten ein grosses Frequenzspektrum, von der Drehfrequenz 6,26 Hz bis 100 Hz. Eine Erregerfrequenz entsprechend der ersten biegekritischen Drehzahl von 10,5 Hz bewirkt im Rotorbereich des Motorgenerators die grösste Auslenkung. Weil ab einer gewissen Überdrehzahl die Schrumpfkraft der Blechkette null wird, musste das Verkeilungssystem auf seine Zuverlässigkeit auch bei Überdrehzahl geprüft werden: Tangentialkraftkomponenten dürfen während der erzwungenen Rotorschwingung keine Blechpaketverschiebung verursachen, was messtechnisch nachgewiesen werden konnte. Erregerfrequenzen entsprechend der zweiten biegekritischen Drehzahl finden in der Ebene des Laufrades der Pumpturbine und entsprechend der dritten biegekritischen am obersten Wellenende die grösste Antwort vor, wofür sich diese Bereiche bisher als richtig ausgestaltet erwiesen haben.

Der Spitzenbetriebscharakter des Maschinensatzes erforderte von vornherein kürzeste Steuervorgänge im Automatik-konzept. Die spontane Auswertung der Schwingungsmessungen ermöglichte ferner eine günstige Justierung der Automatik-vorgänge im Sinne einer kurzen Zeitdauer der instationären Strömungsvorgänge in der Pumpturbine bei Anfahren, Abstellen, Leerlauf, Überdrehzahl und Übergang von einer Betriebsart in die andere. Die Wirkungsdauer der Schwingungsbeanspruchungen und zum Teil auch die Intensität dieser Beanspruchungen konnte dadurch verringert werden. Während Vollast (in beiden Betriebsarten) läuft der Maschinensatz bemerkenswert ruhig und zeigt praktisch keine erzwungenen Schwingungen.

3. Kurzschlüsse und Netzrückwirkungen

Infolge der hohen möglichen Kurzschlusskräfte – der auf 21 kV bezogene netzseitige Stosskurzschlußstromanteil beträgt $180 \text{ kA}_{\text{sw}}$ und der maschinenseitige $140 \text{ kA}_{\text{sw}}$ – wurde der Kurzschlussfestigkeit von Wicklungen und Anlagen grösste Aufmerksamkeit gewidmet. Als Beispiel diene die in Abschnitt 1.3 erwähnte je Phase leitend gekapselte Maschinenableitung als konsequent phasentrennte 21-kV-Verbindung zwischen Motorgenerator und Maschinentransformator. In die phasentrennte Verbindung war ein Lastschalter für Synchronisieren und betriebsmässiges Abschalten der Maschine, ebenfalls phasentrennt, einzubauen, der wegen der Drehrichtungs-umkehr beim Wechsel der Betriebsarten aus fünf Einzelpolen bestehen muss. Die fünf Pole des 10000-A-Lastschalters sind als einpolige Rohrkonstruktion in die Leitungsführung so eingebaut, dass auch die Aluminium-Kapselrohre leitend durchverbunden werden konnten. Am Anfang und Ende kurzgeschlossen und geerdet, führen die Kapselrohre als Induktionsstrom etwa den gleich grossen Strom wie die konzentrisch für 30 kV isoliert angeordneten Leiterrohre. Dadurch entsteht ausserhalb der Kapselrohre keine Kraftwirkung, aber auch kein Wirbelstromverlust in benachbarten Gerüst- oder Bauelementen. Diese Bauweise dürfte zusammen mit der Tertiärwicklung des Maschinentransformators wegen ihrer konsequenten und durchgehenden Phasenschottung einen Phasenkurzschluss in der 21-kV-Anlage praktisch ausschliessen.

Einpolige Kurzschlüsse auf der 220-kV-Seite der Übertragungseinrichtungen werden auch in unmittelbarer Nähe der Umspannanlage Bürs stabil, ohne Maschinenausfall durch Verlust des Synchronismus, bewältigt. Dies gilt auch für den ungünstigsten Fall, dass die älteren Maschinen der Werksgruppe am Vollastbetrieb beteiligt sind. Die teilweise in entfernte Netzbereiche führenden 220-kV-Übertragungsleitungen

in der Umspannanlage Bürs (Fig. 4) sind mit einpoliger Kurzschlussfortschalteneinrichtung ausgestattet. Bei nahe gelegenen zwei- oder dreipoligen Kurzschlüssen bleiben im Gegensatz zu den neueren Maschinen der Werksgruppe die älteren Maschinen nicht mehr stabil am Netz, sondern fallen «ausser Tritt». Allerdings ist hiebei auch auf den Umstand zu verweisen, dass die von der Umspannanlage Bürs in die Bundesrepublik Deutschland abgehenden 220-kV-Übertragungssysteme zum Teil schon im normalen Vollastbetrieb der Werksgruppe einschliesslich Rodund II nahe an der thermischen Grenzbelastung betrieben werden. Ein Übergang auf die weitgehend vorbereitete 400-kV-Ebene wird die statischen und transienten Stabilitätsverhältnisse auch bei dreipoligen Kurzschlüssen und sogar für die älteren Kraftwerke der Gruppe verbessern.

Durch Messungen bestätigte Vorausberechnungen der Spannungsabsenkungen in betroffenen Hochspannungsbereichen zufolge Anfahren in den Pumpbetrieb ergaben trotz der beachtlichen Anfahrleistung nur unbedeutende Werte. Im Vergleich zu den in der Planungszeit untersuchten übrigen Anfahrmethoden mit gleicher Zeitdauer von 65 s wies der Anfahrmotor eine der geringsten Netzbeeinflussungen auf und wurde schon im Hinblick auf die relative Empfindlichkeit des umgebenden Netzes auf Spannungsschwankungen bevorzugt. Auch die für den Motorgenerator schonendste Beschleunigungsart war dadurch sichergestellt. Eine automatische Lastschaltersteuerung des Eigenbedarfsumspanners sorgt für die Spannungsniveauhaltung im 400-V-Eigenbedarfssystem während des Hochlaufes des Anwurfmotors. Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass auch die anderen guten technischen und wirtschaftlichen Ergebnisse der in Rodund II ausgeführten Anfahrmethode dazu beigetragen haben, dass der grosse Anwurfmotor – vor einigen Jahren als veraltet bezeichnet – wieder für viele Anwendungsfälle interessant erscheint.

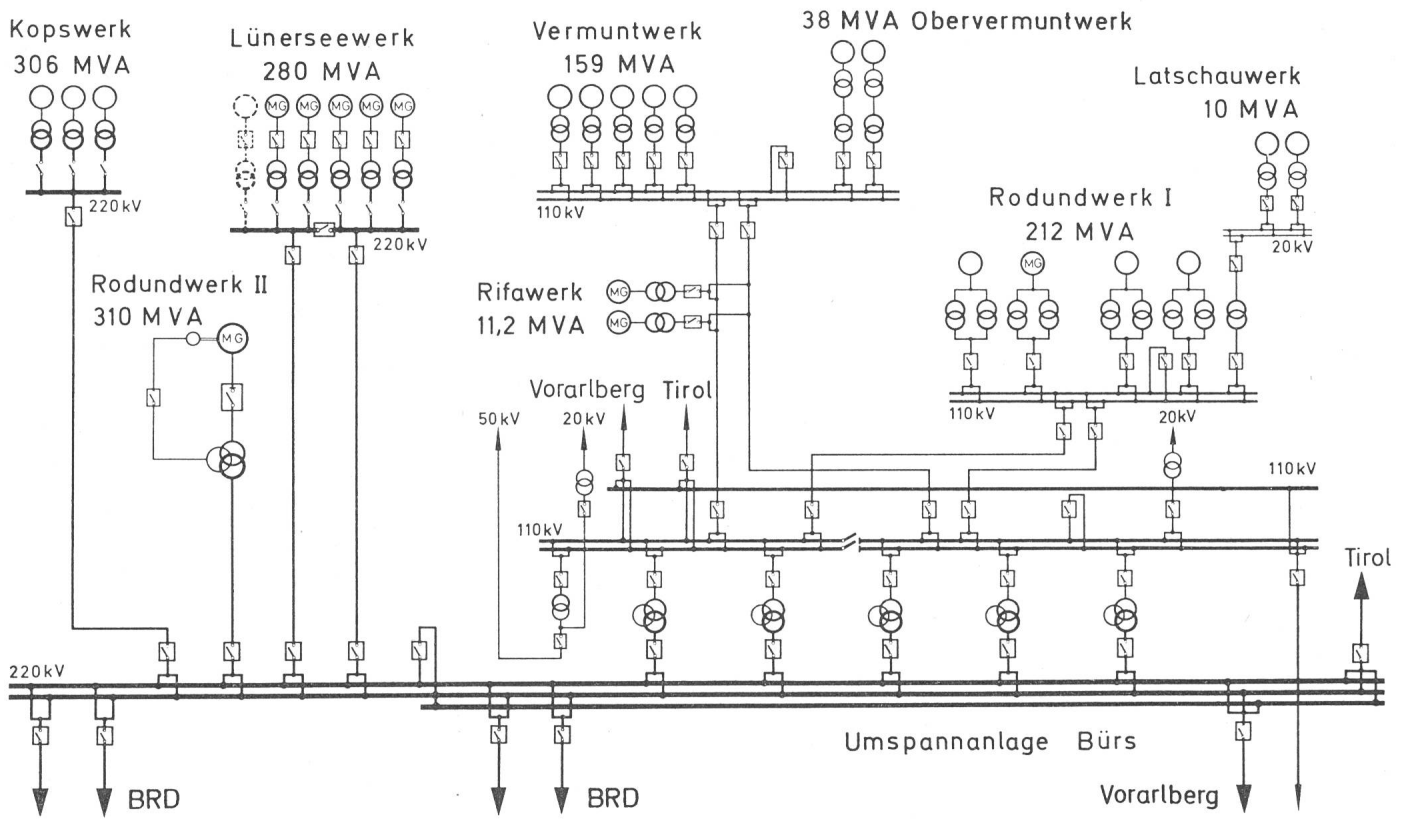


Fig. 4 Schaltbild der Kraftwerksanlagen der Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft

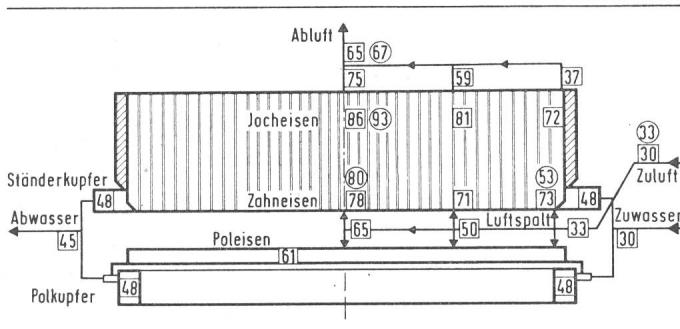


Fig. 5 Temperaturverteilung ($^{\circ}\text{C}$) in den wassergekühlten Wicklungen und im luftgekühlten Ständerblechpaket des Motorgenerators
Die Temperaturwerte in den quadratischen Kästchen stammen aus der Vorausrechnung, die Temperaturangaben in den Kreisen sind Messergebnisse aus der Erprobungszeit

4. Direkte Wasserkühlung

Die Ständerwicklung und die Rotorwicklung des Motorgenerators sind vollkommen und direkt wassergekühlt. Das Kühlwasser im Nutbereich der Wicklungsstäbe entzieht auch den umgebenden Zahnköpfen im Blechpaket den grössten Teil der Eisenverlustwärme, während das übrige Ständerblechpaket besonders im gesamten Jochbereich mit einer Fremdbelüftung gekühlt wird. Eine direkte Wasserkühlung des Ständerblechpaketes hätte gegenüber der Luftkühlung weder die Wärmehaushalt noch die Temperaturbilanz verbessert. Durch die Wasserkühlung in den Wicklungen wurde ausser der Ersparnis aktiver Materialien und der thermischen Schonung der Wicklungen trotz Spitzenbetrieb eine hohe Überlastungsfähigkeit der Synchronmaschine erreicht. Bei teilweisem Verzicht auf Reduktion der Grenztemperaturen entspricht die Rodund-Maschine einer 350-MVA-Type, womit die Plus-Toleranz der Turbinenwirkleistung ohne Leistungsfaktoreinbusse und auch der Pumpbetrieb bei höheren Frequenzen, mit stabilitätsfördernder Übererregung ohne Nachteile zugelassen werden konnte. Die direkte Wasserkühlung der Wicklungen liess in Rodund die angestrebten technischen und wirtschaftlichen Vorteile erreichen. Im übrigen dürfte sie mit der herkömmlichen Luftkühlung bei grossen Wasserkraftgeneratoren innerhalb einer grossen Leistungsspanne in einem unentschiedenen wirtschaftlichen Wettbewerb stehen.

Über die Temperaturverteilung (Vorausrechnung und Messung einander gegenübergestellt) informiert Fig. 5. Bemerkenswert sind die mässigen Temperaturwerte in den Randzonen des Ständerblechpaketes, in denen bei ungünstigen geometrischen und elektromagnetischen Verhältnissen axial gerichtete Komponenten des Nutzflusses hohe Erwärmungen verursachen könnten. Dafür können einige Gründe angeführt werden: Luftschlitze im Ständerblechpaket vergrössern entscheidend den magnetischen Axialwiderstand; das Fehlen von Pressplatten, ersetzt durch verklebte Randpakete, ermöglicht gute Luftkühlung der Randzonen des Blechpaketes; die direkte Wasserkühlung des Ständerkupfers entzieht in der wirksamsten Form auch den Grossteil der Verlustwärme der Zahnköpfe; die Polschuh- und Trapezpolausbildung sowie die den Polen angepasste Ständerpaketgeometrie, ferner die Ausbildung des Luftspaltes, unterdrücken eine extreme Ausbildung der Axialflusskomponente.

Die zahlreichen technischen Vorzüge der direkten Leiterkühlung erfordern jedoch auch bei erstklassiger Herstellung

der Wicklung den Schutz einer gegen Verschmutzung und Betauung empfindlichen Stelle im Betrieb: Die Kühlwasseranschlüsse an die Stabköpfe der 21-kV-Ständerwicklung, die trotz einer Abdeckung kriechstromanfällig bleiben, sind praktisch blanke Stellen, die es bei Wicklungen mit konventionellen Kühlsystemen nicht gibt. In Rodund hat man folgendes vorgesorgt: Kohlestaubabsaugung und Sonderkühlung im Bereich der Hauptschleifringe und der Anwurfmotor-Schleifringe; Verwenden der mechanischen Bremsböcke nur für Revisionszwecke zum Anheben des Rotors, während betriebsmässig aus Turbinendrehrichtung nur mit der elektrischen Bremse abgestellt und aus Pumpendrehrichtung nur hydraulisch gebremst wird; Stillstandsheizung der Wicklungen über den 24stündig in Betrieb bleibenden Wicklungswasserumlauf; Temperaturhaltung des Kraftwerkschachtes über einen konditionierten Luftkreislauf; eventueller Einbau einer Trocknungsanlage im Inneren des Motorgenerators, die auch als Warnanlage für Rohkühlwasser- oder Wicklungswasseraustritte herangezogen werden könnte.

Der Turbinenleerlauf durfte wegen der in dieser Betriebsart auftretenden Radialkraftstösse nicht zugelassen werden. Auch anlässlich der Wirkungsgradmessungen musste auf ihn verzichtet werden. Deshalb sind die Verluste bei verschiedenen Turbinenbelastungen und beim leerlaufenden Synchronmotor (Phasenschieben in Pumpendrehrichtung) nach der kalorimetrischen Methode gemessen worden, wofür die direkte Leiterkühlung besonders gut geeignet ist. Bei der Bestimmung des Isolationswiderstandes und des Verlustfaktors der Ständerwicklung musste auf die kühlwasserdurchströmten Wasserzuführungsschläuche der einzelnen Stäbe durch Anwendung besonderer Meßschaltungen geachtet werden. Der grosse Ableitstrom der wassergefüllten Anschlußschläuche aus Teflon war vom Ableitstrom der Wicklungsisolation zu trennen, und deren Leitwert war bei der Berechnung des Verlustwinkels der Wicklung zu berücksichtigen.

5. Spannungsdurchgriff

Besonders im Hinblick auf die Wicklungen der elektrischen Maschinen auf der 21-kV- und 8-kV-Seite des Maschinentransformators sind die von der 220-kV-Seite übertragbaren Stoss-, Schalt- und betriebsfrequenten Überspannungen untersucht und auch messtechnisch erfasst worden.

Der Kabelabgang von der Tertiärwicklung zur 8-kV-Eigenbedarfsanlage ist mit 0,6- μF -Kondensatoren Phase gegen Erde beschaltet. Der Erregertransformator des Motorgenerators und der Eigenbedarfstransformator sind dadurch ausreichend geschützt. Bei Übertragung eines einpoligen Spannungsstosses 1,2/50 (Scheitelwert 100%) von der 240-kV-Seite des Maschinentransformators auf die Ständer- und Läuferwicklung des Anwurfmotors bildet sich an den Motorklemmen eine maximale Phasendifferenzspannung von 4,4%, an den Schleifringen gegen Erde von 0,2% und an den Schleifringen gegeneinander von 0,3% bei einer Resonanzfrequenz von 8,7 kHz ab.

Die 21-kV-Seite des Maschinentransformators ist mit Schutzkondensatoren von 0,3 μF Phase gegen Erde beschaltet. Ein einpoliger 1,2/50-Spannungsstoss (Scheitelwert 100%) auf der 240-kV-Seite bildet sich über die Maschinenableitung auf die Ständerwicklung des Motorgenerators (bei angeschalteter Erregung und vollem Eigenbedarf) mit etwa 10% aus. Zum Zeitpunkt der Wicklungsfertigung wurden an einigen Stäben

der Ständerwicklung, die in einem Ständermodell im Maßstab 1 : 1 eingebaut worden waren, Schaltstoßspannungsprüfungen vorgenommen, aus denen eine Schaltstoßspannungsfestigkeit von über 110 kV_{sw} abgeleitet werden konnte. Die auf der normal isolierten 220-kV-Leitung ohne Überspannungsableiter maximal auftretende Stoßspannung beträgt 1050 kV_{sw}. Davon würden also 10 % auf die Ständerwicklung durchgreifen, ohne Schaden anzurichten. Wie üblich, sorgen jedoch 220-kV-Überspannungsableiter dafür, dass der Stoßspannungspegel von 630 kV_{sw} nicht überschritten wird. Zusätzlich könnten an den 21-kV-Klemmen des Motorgenerators Überspannungsableiter angeordnet werden, die bei einem Transformator-schaden den Übertritt betriebsfrequenter Spannungen von der 220-kV-Seite auf die 21-kV-Seite für die Ständerwicklung unwirksam machen müssten.

Zufolge einer Überspannungsableiterstörung in der 8-kV-Eigenbedarfsanlage während der Maschinenerprobung wurden in dieser betriebswichtigen Anlage umfangreiche Stoßspannungsmessungen bei verschiedenartigen Schaltzuständen und Schalthandlungen der 220-kV-, 21-kV- und 8-kV-Anlagen vorgenommen. Sie bestätigten die im Planungsstadium vorhergesagten Beanspruchungswerte im Eigenbedarfsnetz, nämlich höchste Schaltstoßspannung 23 kV_{sw} und höchste betriebsfrequente Überspannung unter 11 kV. Deshalb erhielten die sechs Ableiter eine Ansprechschaltstoßspannung von 30 kV_{sw}

und eine Löschespannung von 11 kV. Sie wurden in der Anordnung drei Ableiter zwischen den Phasen und drei Ableiter gegen Erde eingebaut.

Literatur

- [1] E. Stefko: Die alpine Speicherwasserkraft im Zeitalter der Kernkraftwerke. Das Projekt Rodundwerk II, ein neues Pumpspeicherwerk der Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft. Österreichische Wasserwirtschaft 22(1970)7/8, S. 193...201.
- [2] E. Stefko und G. Innerhofer: Das Pumpspeicherwerk Rodund II. Österreichische Wasserwirtschaft 24(1972)7/8, S. 139...143.
- [3] G. Innerhofer, A. Eder und R. Gstettner: The Rodund II pumped-storage scheme in Austria. Water Power 25(1973)11, p. 413...427.
- [4] A. Falger: Die Wasser- und Energiewirtschaft des Rodundwerkes II. ÖZE 29(1976)12, S. 524...531.
- [5] R. Gstettner: Pumpspeicheranlage Rodundwerk II. Planungsergebnisse elektrotechnischer, betriebstechnischer und wirtschaftlicher Untersuchungen. E und M 88(1971)12, S. 501...511.
- [6] K. Giersig: Grundsätzliches zur Planung der hydraulisch-maschinellen Einrichtung im Pumpspeicherwerk «Rodund II». Elektrizitätswirtschaft 72(1973) 24, S. 821...826.
- [7] G. Innerhofer, A. Eder und R. Gstettner: Pumpspeicheranlage Rodund II. Schweiz. Bauztg. 95(1977)11, S. 147...159.
- [8] K. Giersig: Das Pumpspeicherwerk «Rodund II». Ein Überblick über Inbetriebnahme und begleitende Messungen. Elektrizitätswirtschaft 76(1977)3, S. 59...65.
- [9] T. Schwirzer: Dynamische Beanspruchung von Wasserkraftmaschinensätzen durch stochastische hydraulische Kräfte am Turbinenlaufrad. Elektrizitätswirtschaft 76(1977)3, S. 66...70.
- [10] R. Gstettner: Rodund II, usine d'accumulation par pompage. Rapport CIGRE No. 11-10, 1976.
- [11] R. Gstettner: Pumpsturbinenanlage Rodund II der Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft. Hinweise zur Inbetriebsetzung und zu Messergebnissen. Elektrizitätswirtschaft 77(1978)7, S. 243...349.

Adresse des Autors

Hbv. dipl. Ing. Rudolf Gstettner, Vorarlberger Illwerke Aktiengesellschaft, A-6780 Schruns.

Literatur – Bibliographie

DK: 621.39 : 654

SEV-Nr. A 695

Nachrichtentechnik. Übertragung und Verarbeitung. Von Eberhard Herter und Walter Röcker. München/Wien, Carl Hanser Verlag, 1976; 8°, 368 S., 414 Fig. Studienbücher der technischen Wissenschaften. Preis: kart. DM 34.-.

Die Verfasser versuchen, teilweise in sehr gelungener und offenbar auch in erprobter Form, die an den höheren technischen Schulen bisher oft getrennt angebotenen Übertragungs-, Hochfrequenz-, Verstärker- und Digitaltechnik im moderneren Oberbegriff «Nachrichtentechnik» in einer praxisbezogeneren Form als bisher unter ein Dach zu bringen. Das Lehrbuch richtet sich denn auch vorwiegend an Studenten, jedoch auch an alle weiterbildungswilligen Nachrichten-Ingenieure in der Industrie und in Planungsstellen, welche darin eine Möglichkeit finden, ihr theoretisches Wissen auf den gegenwärtigen neuen Stand zu bringen.

Nach der eher zu knappen Einführung in die Grundlagen mit der Schwingungs-, Zwei-, Vierpolleitungs-, Filter-, Verstärker- und Digitaltheorie werden die Hauptthemengruppen Nachrichtenübertragung und die vielleicht weniger in den Gesamtkomplex passende Nachrichtenverarbeitung (Rechnertechnik) dargeboten. Sehr gut, kurz und informativ sind die System-, Informations- und Modulationstheorie sowie der Vergleich der Modulationsverfahren. Neben den hier überflüssig erscheinenden Grundlagen der Schaltalgebra mit längst bekannten Flip-Flop-Schaltungen, mit den nicht mehr aktuellen Röhrenverstärkern und der in Spezialbüchern noch besser dargestellten Rechnertechnik kommen leider fundiertere Grundlagen und Herleitungen zu kurz: Nachrichtensysteme, Beispiele und wirklich praxisnahe Berechnungen, die Signalaufbereitung generell. Ebenso fehlen die gesamte Messtechnik in der Nachrichtentechnik sowie die verschiedenen Definitionen, die der Praktiker in jedem Prospektblatt mit technischen Daten begegnet.

Dem Inhalt nach ist das Buch wohl eines der besten Lehrbücher der Nachrichtentechnik im deutschen Sprachbereich. Es

könnte mit thematisch zugeordneten Aufgabenstellungen, mit praxisnahen Berechnungsbeispielen und Lösungen sowie mit Datenangaben aus der Praxis und mit der Beschreibung von Nachrichtensystemen noch aufgewertet werden. Der Rezensent ist deshalb der Meinung, dass es zweckmäßiger wäre, den Themenbereich Digitaltechnik völlig wegzulassen und nur auf die entsprechende Literatur hinzuweisen. Diese ist nach jedem Thema und im Anhang des Buches ausführlich festgehalten. W. Linggi

DK: 534.773

SEV-Nr. A 696

Hörgerätetechnik. Von Werner Güttner. Stuttgart, Verlag Georg Thieme, 1978; 8°, VIII/147 S., 178 Fig. Preis: gb. DM 69.-.

Ein ausgewiesener Fachmann, ehemals Leiter der Entwicklung, Fertigung und Prüfung im Hause Siemens, hat uns hier in einem handlichen Büchlein alles Wesentliche und auch den neuesten Stand auf dem Gebiet der Hörgerätetechnik zusammengefasst.

Der Autor beschreibt in systematischer Reihenfolge Schallfelder, Wiedergabeeigenschaften von Übertragungsgeräten für Schwerhörende sowie die damit zusammengehende Messtechnik. Besonders gründlich behandelt er die technischen Aspekte und verschiedenen Lösungswege bei der Entwicklung und Konstruktion von Hörgeräten. Seine breite Erfahrung schlägt sich in einem Kapitel «Entwicklungstendenzen» nieder, in welchem die fortschreitende Miniaturisierung der Hörgeräte durch Anwendung modernster Halbleitertechnologien deutlich zum Ausdruck kommt. Sehr wertvoll ist das anwenderbezogene Kapitel «Hilfen für das akustische Anpassen des Hörgerätes». Ein sorgfältig zusammengestelltes Literaturverzeichnis sowie saubere graphische Darstellungen und technische Zeichnungen müssten den Hörgeräte-Akustiker und Elektrotechniker besonders ansprechen.

F. Furrer