

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 86 (1968)
Heft: 12

Artikel: Die Wasserkräfte Sibiriens
Autor: Kroms, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-70006>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 31.01.2026

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

beiden Kursen nur je fünf Gruppen zu fünf bis sechs Mann vorgesehen waren, mussten zehn Anmeldungen auf einen späteren Kurs verwiesen werden.

Die Arbeit in den beiden Kursen war folgendermassen organisiert: Für den ganzen Kurs gemeinsam wurden die Theoriestunden abgehalten, nämlich: Grundlagen der Maschinenlehre, Diesel- und Benzinmotoren, Kupplungen und Kraftübertragungen, Treib- und Schmierstoffe, Hydraulik, Pneumatik und elektrische Anlagen, Pneu, Drahtseile, Verkehrsvorschriften, Unfallverhütung, Rapportwesen. Demgegenüber kommt für die Instruktion an den Baumaschinen nur eine

Arbeit in kleinen Gruppen in Frage. Die Theorie- und Instruktionsstunden teilten sich je zur Hälfte in die 44 gesamthaft zur Verfügung stehenden Arbeitsstunden. In den beiden Kursen wurden zwei Seilbaggergruppen, drei Hydraulikbaggergruppen, vier Gruppen für Ladeschaufeln auf Raupen und eine Gruppe für Ladeschaufeln auf Pneu geschult.

Die in den beiden Kursen benötigten Baumaschinen und die Geräteinstructoren wurden vom Verband Schweizerischer Baumaschinen-Fabrikanten und -Händler gestellt. Die 60 Kursteilnehmer stammten aus 32 Bauunternehmungen aller Grössen.

Die Wasserkräfte Sibiriens

Von Dipl.-Ing. A. Kroms, Boston Mass. (USA)

Mit dem ununterbrochen ansteigenden Energiebedarf werden die vorhandenen Wasserkräfte in rascher Folge ausgebaut, so dass besonders in den industriell entwickelten Ländern mit einer baldigen Erschliessung aller ausbauwürdigen Möglichkeiten zu rechnen ist. Dieser Zustand wird in den meisten europäischen Ländern innerhalb der kommenden 10 bis 20 Jahre eintreffen. Reichliche Wasserkräfte sind allerdings noch in mehreren Entwicklungsländern vorhanden, doch auch diese werden allmählich erschlossen. Im allgemeinen geht der Wasserkraftausbau seiner Endphase entgegen [1].

Ein grosses Land, in welchem ergiebige, noch nicht ausgebauten Wasserkräfte vorhanden sind, ist Sibirien. Hier befinden sich wasserreiche Flüsse, deren verwertbare Jahresarbeit in der Grössenordnung von 1000 TWh (10^9 MWh) liegt. Mit der zunehmenden Industrialisierung dieses ausgedehnten Landes werden riesige Flussausbau-Projekte durchgeführt. Sie gehören zu den grössten bisher ausgeführten Vorhaben der Flussausnutzung.

1. Das Wasserkraftpotential Sibiriens

Eine systematische Erforschung der Wasserkraftreserven Sibiriens begann erst vor einigen Jahrzehnten. Die allmähliche Verlagerung der russischen Industrie ostwärts des Uralgebirges hat die Suche nach Naturschätzen im asiatischen Teil der UdSSR eingeleitet. Dabei hat es sich herausgestellt, dass die grossen Flüsse Sibiriens günstige Gefällsverhältnisse aufweisen, die in grossen, wirtschaftlich vorteilhaften Wasserkraftwerken ausgebeutet werden können.

Die potentielle Leistung aller Wasserkräfte der Welt wird bei mittlerer Wasserführung auf 3600 bis 3800 GW, ihre Jahresarbeit auf 32 000 TWh geschätzt [2, 3, 4]. Auf Russland entfallen davon 450 GW oder 12 %, mit 3900 TWh/Jahr [5 bis 9]. Dieses theoretische Potential kann praktisch nur teilweise zur Energieerzeugung eingesetzt werden. Die Wasserkräfte der rund 1450 grossen und mittleren Flüsse Russlands und ihre Verteilung auf die Hauptgebiete des Staates sind in Tabelle 1 angegeben [6, 9]. Hierzu ist folgendes zu bemerken: a) Die Ausbauwürdigkeit der Wasserkräfte wird von verschiedenen technischen und wirtschaftlichen Umständen beeinflusst und stellt keinen festen Begriff dar; so werden die Vorräte der ausnutzbaren Wasserkräfte Russlands in verschiedenen Literaturquellen zwischen 1100 und 2100 TWh/Jahr angegeben. b) Die in den Wasserkraftwerken installierbare Leistung kann je nach dem voraussehbaren Leistungsbedarf im Verbundbetrieb die mittlere Wasserleistung der Flüsse beträchtlich übertreffen.

Die Wasserkräfte Russlands sind bis jetzt nur in geringem Masse ausgebaut worden, so dass noch grosse Entwicklungsmöglichkeiten bestehen. Im Jahre 1962 betrug die installierte Leistung 18,5 GW und ihre Jahresarbeit 72 TWh. Der Anteil der Wasserkraftenergie in der Leistungs- und Energiebilanz des ganzen Landes betrug 22 bzw. 19,5 %. Obschon der Ausbau der Wasserkräfte in den letzten Jahrzehnten stark vorangetrieben wurde, ist er doch wegen den mit ihm verbundenen, riesigen Aufwendungen begrenzt. Dieser Umstand bewirkt, dass auch in Zukunft der überwiegende Anteil der elektrischen Energie von Wärmekraftwerken gedeckt werden wird. Da die günstigsten Flüsse des europäischen Russland schon weitgehend ausgebaut sind, hat sich der Schwerpunkt der grossen Bauvorhaben auf die reichlichen Wasserkräfte Sibiriens verlagert.

Mehr als 80 % der potentiellen Wasserkräfte Russlands befinden sich auf asiatischen Gebieten, vorwiegend in Sibirien. Diese sind hauptsächlich in drei Flusssystemen — Jenissei, Ob und Lena — konzentriert, was ihren Ausbau begünstigt. Hier können

riesige Wasserkraftwerke errichtet werden, welche imstande sind, grosse Mengen billiger Energie zu liefern. Angaben über die zehn grössten Flüsse Russlands sind in Tabelle 2 enthalten.

Die Flüsse Sibiriens ergiessen jährlich mehr als 1400 Gm³ Wasser (1 Gm³ = 10^9 m³) ins Nördliche Eismeer. Sie zeichnen sich aber nicht bloss durch reichliche Wasserführung aus; für die Zwecke der Wasserkraftausnutzung weisen sie auch ein hohes spezifisches Gefälle auf. Eine Verbindung dieser beiden Eigenschaften kommt im allgemeinen nur selten vor, weil hohe Gefälle gewöhnlich bei kleineren Gebirgsflüssen oder am Oberlauf der grossen Flüsse anzutreffen sind, wo die Abflussmengen noch gering sind. Während das spezifische Gefälle der Wolga nur 0,07 m/km beträgt, erreicht das Gefälle des Jenisseis und der Angara 0,37 bzw. 0,20 m/km. Die hohen Gefälle und die steilen Ufer der sibirischen Flüsse erlauben die Errichtung hoher Staudämme. Die schmalen Täler einiger Flüsse verkürzen die Staudämme, wobei der harte Boden die Fundamente der Wasserbauten verbilligt. Dies trägt zur Konzentrierung grosser Leistungen und zur Senkung der spezifischen Kosten solcher Anlagen beträchtlich bei.

Die Betriebsergebnisse der Wasserkraftwerke werden von der Gleichmässigkeit der Wasserführung und dem Ausmass der

Tabelle 1. Die Aufteilung der Wasserkräfte Russlands

Gebiet	potentielle Vorräte		ausbauwürdige Vorräte	
	GW	TWh/J	GW	TWh/J
Europäisches Russland	60	530	29	255
Sibirien	165	1445	106	930
Zentral-Asien	67	590	33	285
Ferner Osten	48	420	29	250
Insgesamt	340	2985	197	1720

Tabelle 2. Die grössten Flüsse Russlands

Fluss	Gebiet	Länge km	Mittlere Wasserführung 10^3 m ³ /s
Jenissei	Sibirien	3850	17,4
Lena	Sibirien	4270	15,5
Ob-Irtysch	Sibirien	5570	12,5
Amur	Ferner Osten	4510	11,0
Wolga	Europäisches Russland	3690	8,0
Aldan	Sibirien	2240	5,2
Angara	Sibirien	1830	4,2
Petschora	Europäisches Russland	1790	4,1
Kolima	Ferner Osten	2600	3,8
Kama	Europäisches Russland	2030	3,8

Tabelle 3. Schwankungen der Wasserführung

Fluss	Beobachtungspunkt	Verhältnis der Durchflussmengen max./min.	Koeffizient Cr ¹
Wolga	Gorki	81	0,36
Dnepr	Kamenka	224	0,33
Kama	Molotov	116	0,40
Jenissei	Jenisseisk	52	0,31
Angara	Irkutsk	6	0,12
Angara	Bratsk	10,5	0,14

¹) Der Koeffizient Cr deutet den Inhalt des Jahresspeichers im Verhältnis zum Jahresabfluss, der zum vollständigen Ausgleich des Durchflusses benötigt wird.

Durchflussregelung stark beeinflusst. Auch diesbezüglich sind die Flüsse Sibiriens günstig zu beurteilen; dies bezieht sich vor allem auf die Angara, weil sie dem grossen Baikalsee ($31\,500\text{ km}^2$) entspringt, der als ein vortrefflicher Ausgleichsspeicher dient. Die Abflusschwankungen einiger Flüsse sind in Tabelle 3 angegeben [5].

Die Aufteilung der potentiellen Wasserenergiemengen (bei mittlerer Wasserführung) auf die vier grossen Flussysteme Sibiriens wird wie folgt geschätzt:

Jenissei	475	TWh/J
Angara	87	TWh/J
Lena	435	TWh/J
Ob	210	TWh/J
Gesamt	1207	TWh/J

Da im Einzugsgebiet des Jenisseis und der Angara die günstigsten hydrologischen, geologischen und topographischen Verhältnisse bestehen, nimmt dieses Gebiet zurzeit die erste Stelle in der Erschliessung der Wasserkräfte Sibiriens ein. Einige Grosskraftwerke befinden sich hier in Betrieb und im Bau, einige weitere Werke grosser Leistung werden geplant. Durch diesen Ausbau werden leistungsfähige Kraftwerksketten, mit einer Gesamtleistung von 30 GW und einer Jahresarbeit von rund 180 TWh entstehen, Bild 1. Die Angara-Kraftwerkskette soll aus sechs Werken, mit 10 GW und 70 TWh/J bestehen, wobei zwei schon im Betrieb sind. Infolge der Ausgleichswirkung des Baikalsees können diese Werke das ganze Jahr mit fast voller Leistung fahren und Grundlastenergie für die Industrie liefern. Die Jenissei-Kraftwerkskette wird plangemäss vier Grosskraftwerke mit Einzelleistungen von 3 bis 6 GW enthalten. Das Kraftwerk bei Krasnojarsk, für 5 GW und 20 TWh/J, geht seiner Fertigstellung entgegen; sein Wasserspeicher wird auch zur Regelung der abwärts liegenden Werke auf dem Jenissei wesentlich beitragen.

2. Die Ausbauverhältnisse

Die Wasserkraftwerke gehören zur Gruppe der abhängigen Energieerzeugungsanlagen, weil ihre verfügbare Leistung sowohl von der Gleichmässigkeit ihrer Energiequelle als auch von der Belastungsweise beeinflusst wird [10]. Der Verlauf der verfügbaren Wasserkraftleistung wird von der Jahreskurve der Wasserführung, dem Umfang der Wasserspeicherung und dem Zusammenwirken der Wasserkraftwerke mit anderen Kraftwerken des Energiesystems bedingt.

Da der Oberlauf des Jenisseis keine natürlichen Speicher aufweist, treten hier grössere Schwankungen des Wasserdargebots als bei der Angara auf; doch sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Jahren auch hier gering. Die Staudämme werden im Jenisseital grosse Stauseen bilden, weshalb auch die Kraftwerkskette dieses Flusses anpassungsfähig sein wird; sie wird dem Verbundsystem eine beträchtliche Ausgleichsleistung zur Überbrückung der Leistungsschwankungen anderer Kraftwerke zur Verfügung stellen können. Wenn die Kraftwerksketten des Jenisseis und der Angara auf ein gemeinsames Netz arbeiten werden, dann wird der Wasservorrat des Baikalsees dem ganzen Kraftwerkssystem zugute kommen.

Der Inhalt der möglichen Speicher und der damit erzielbare Ausgleich der Energieabgabe sind für einige Flüsse in Tabelle 4 angeführt [5]. Die Wasserspeicher der sibirischen Flüsse können auch zur Jahresregelung herangezogen werden und dadurch den Anteil der gesicherten Wasserkraftleistung erhöhen; dies ermöglicht die benötigte Ausgleichsleistung im Energiesystem entsprechend herabzusetzen [11].

Die Kosten der Wasserenergie werden in sibirischen Flussystemen durch günstige geologische und topographische Bauverhältnisse herabgesetzt. So überquert z. B. der Jenissei in seinem oberen und mittleren Lauf mehrere Gebirgsketten, wo das Flussbett aus harten Gesteinflözen gebildet ist, so dass die Staudämme verhältnismässig kurz ausfallen und auf gutem Untergrund erstellt werden können; dies ermöglicht die Nutzung grosser Fallhöhen mit geringen Bauaufwendungen sowie Zusammenfassung grosser Wasserkraftleistungen. Zwischen den Gebirgsüberquerungen befinden sich flachere Flussstrecken mit breiten Flusstälern, wo grosse Wassermengen aufgestaut werden können. Die spärliche Bevölkerung der Flusstäler erlaubt es hier, grosse Flächen zu überfluten, ohne unzulässigen Schaden zu verursachen.

Tabelle 4. Der Ausgleich der Energieabgabe

Fluss	Inhalt der Wasserspeicher ¹⁾ für: Saison- ausgleich	Jahres- ausgleich	Insgesamt	Leistungs- verhältnis ²⁾
<i>Sibirien:</i>				
Angara	0,21	0,18	0,39	0,93
Jenissei	0,125	0,125	0,25	0,92
Irtysch	0,55	0,38	0,93	0,96
<i>Europ. Russland:</i>				
Wolga-Kama	0,14	0,00	0,14	0,75
Kama	0,14	0,01	0,15	0,76
Dnepr	0,11	0,00	0,11	0,53

¹⁾ Im Verhältnis zum Jahresabfluss.

²⁾ Verhältnis der gesicherten zur mittleren Leistung.

Die erwähnten Umstände vermindern die spezifischen Baukosten der Wasserkraftwerke. Deshalb kann der Flussausbau in Sibirien günstiger als auf den Flachlandflüssen des europäischen Russlands durchgeführt werden. Die relativen Bauaufwendungen je kWh der Jahresarbeit sind für die verschiedenen Gebiete Russlands in Tabelle 5 angeführt, wo die Baukosten auf den Flüssen der Flachlandgebiete des europäischen Russlands als 100 % gesetzt worden sind.

Man schätzt, dass die spezifischen Baukosten der Kraftwerke auf dem Jenissei und der Angara 85 bis 110 Rubel/kW betragen werden; dies ergibt Bauaufwendungen je Einheit der Jahresarbeit von 1,6 bis 2,4 Kop/kWh. Die hohen Leistungen der geplanten Kraftwerke und die Anwendung grosser Maschinensätze tragen ebenfalls zur Verminderung der Anlagekosten bei. Die Energiekosten werden sehr niedrig angegeben: sie liegen unterhalb 0,1 Kop/kWh. Es ist hier aber zu berücksichtigen, dass die Gestehungskosten der Energie im russischen Wirtschaftssystem ohne Kapitalzins berechnet werden. Nach der privatwirtschaftlichen Verzinsung des Baukapitals würden sie sich erheblich erhöhen. Dieser Umstand erschwert den wirtschaftlichen Vergleich der russischen Kraftwerke mit den Kraftanlagen der westlichen Länder.

Auf Grund der Baukosten allein kann man noch nicht über die wirtschaftlichen Aussichten der Wasserkraftwerke urteilen. Es muss die Energieabgabe an die bestehenden Lastbedürfnisse angepasst werden. Vom Mass, wie das gelingt, hängt die tatsächliche Verwertung der anfallenden Wasserenergie, wie auch die im Energiesystem benötigte Ausgleichsleistung ab. Die letztgenannte erhöht die installierbare Leistung und die Bauaufwendungen des ganzen Energiesystems [12]. Die meisten der sibirischen Wasserkraftwerke können erhebliche Lastschwankungen ohne thermische Aushilfe aufnehmen, weshalb sie nur eine geringe Ausgleichsleistung benötigen. Die Ersparnisse an Baukosten können sich deshalb in vollem Masse auf die Gestehungskosten der Energie auswirken. Je mehr das Verbundnetz erweitert wird, desto grösser ist die Rolle,

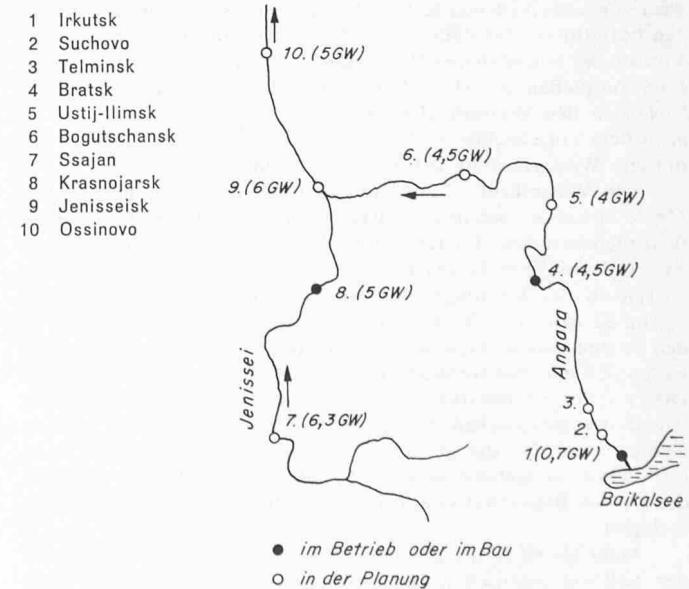


Bild 1. Die Grosskraftwerke im Jenissei-Angara-Fluss-System

Tabelle 5. Relative Baukosten, je kWh/J.

Gegend	Kostenzahl %
Europäisches Russland	70 bis 100 ¹⁾
Kaukasus	83
Zentral-Asien	67
Sibirien	31 bis 42

¹⁾ Die kleineren Zahlen gelten für sehr grosse Kraftwerke.

welche die regelbaren Wasserkraftwerke in der Leistungsbilanz des Energiesystems einnehmen werden, weil sie bei niedrigem Wasserdargebot die Spitzenlast decken und dadurch imstande sind, während der Höchstlaststunden eine hohe Leistung zur Verfügung zu stellen [13]. Da die Wasserkraftwerke Sibiriens einen hohen Grad der Durchflussregelung aufweisen und in einem ausgedehnten Verbundnetz arbeiten, kann ihre Leistung in die Leistungsbilanz des Energiesystems ganzjährig fast vollständig eingesetzt werden. So wird z. B. das Kraftwerk Bratsk auf der Angara (3,6 GW) mit dem Wasserkraftwerk Krasnojarsk (5 GW) derart zusammenwirken, dass das eine das andere unterstützt. Man schätzt, dass eine gut aufeinander abgestimmte Zusammenarbeit der Kraftwerksketten beider Flüsse die gesicherte Leistung des Verbundsystems um 500 bis 600 MW erhöhen wird.

Beim Bau der grossen sibirischen Wasserkraftwerke sind verschiedene ungewöhnliche, technische Schwierigkeiten zu überwinden. Sie müssen in spärlich bewohnten Gegenden errichtet werden, wo besonders herbe klimatische Verhältnisse herrschen und keine bequemen Transportwege vorhanden sind. Um die Bauzeit trotz langen Winterperioden zu verkürzen, müssen die Betonierungsarbeiten auch bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt durchgeführt werden. Zu diesem Zweck sind mehrere Verfahren entwickelt worden, welche die Betonierung bei Temperaturen bis -20°C ermöglichen. Ahnliche Verfahren sind für die umfangreichen Erdbewegungsarbeiten ausgearbeitet worden. Dadurch können die Bauarbeiten auf das ganze Jahr ausgedehnt werden. Wegen den riesigen Ausmassen der Bauten müssen die schweren Arbeitsprozesse mechanisiert werden. Vorfabrizierte Elemente und vorgespannter Beton tragen zur Baurationalisierung bei. Somit können grosse Kraftwerke auch bei schwierigen Bauverhältnissen in 4 bis 5 Jahren fertiggestellt werden.

Weitere Probleme entstehen beim Betrieb der sibirischen Wasserkraftwerke durch den schweren Eisgang während der Schneeschmelzperiode. Grosses Eisblöcke müssen ohne Verstopfung und Beschädigung der Kraftwerksausrüstung über das Wehr abgeleitet werden. Die Anhäufung von Eismassen vor den Staudämmen wird durch die dicke Eisdecke der Flüsse verursacht und ausserdem noch dadurch verstärkt, dass die sibirischen Flüsse grösstenteils nach Norden fliessen, so dass die Schneeschmelze zuerst am Oberlauf beginnt, wenn deren Mittel- und Unterlauf noch mit festem Eis bedeckt sind. Gute Erfolge sind durch ein zeitweiliges Zurückhalten des Eises in den ausgedehnten Staubecken erreicht worden, weil das Eis seine Härte bald verliert und danach über das Wehr ohne Gefahr abgeleitet werden kann.

Besondere Schwierigkeiten entstehen beim Transport der grossen Maschinensätze an die Baustellen. Schon jetzt werden in das Krasnojarsk-Kraftwerk 500-MW-Wasserkraftaggregate eingebaut; man erwägt für die nächsten Grosskraftwerke die Maschinenleistung noch zu erhöhen, wobei die Grenze bei 700 bis 1000 MW liegen kann. Die grossen Francisturbinen werden deshalb an die Kraftwerke in mehreren Teilen herangeschafft und erst an der Baustelle zusammengeschweisst.

3. Geplante Kraftwerksketten

Zum zweckmässigen Einsatz der Wasserenergie in die elektrische Energieversorgung müssen folgende Massnahmen getroffen werden:

1. der Ausbau der Wasserläufe muss so geplant werden, dass er ganze Flusssysteme umfasst;
2. die Errichtung von Kraftwerksketten und ihre Einschliessung in ausgedehnte Verbundnetze zur Zusammenarbeit mit thermischen Kraftwerken;
3. der Einbau hoher Maschinenleistungen in jene Kraftwerke, welche wenigstens Tagesspeicher haben und dadurch zur Spitzendeckung herangezogen werden können.

Die erwähnten Massnahmen sind miteinander verbunden und

dienen der vollen Ausnutzung der natürlichen Gegebenheiten der Wasserkraftwerke. Die Vorteile solcher Anlagen bei der Deckung der schwankenden Tageslast können am besten in Verbundnetzen, in denen grosse Lastspitzen auftreten, verwertet werden. Dazu muss in den regelbaren Wasserkraftwerken eine genügende Maschinenleistung bereitgehalten werden, so dass sie auch bei niedrigem Wasserdargebot grosse Lastspitzen aufnehmen und eine entsprechende thermische Leistung einsparen können. Die Erhöhung der Maschinenleistung ist besonders in den Flusskraftwerken nur mässigen Aufwendungen verknüpft.

Bei der Rahmenplanung des Wasserkraftausbaus soll jede Staustufe in das Kraftwerkssystem organisch hineingefügt werden. Dadurch entstehen Kraftwerksketten, welche den naturbedingten Anfall an Wasserenergie am vollständigsten ausnutzen können. Von besonderem Wert sind die Wasserspeicher am Oberlauf der Flüsse, mittels welcher die Energieabgabe der ganzen abwärts liegenden Kraftwerkskette geregelt wird. Die Leistungsregelung kann im Schwellbetrieb auch dann durchgeführt werden, wenn an den tiefer liegenden Kraftwerken nur kleine Staubecken vorhanden sind.

Der Ausbau der grossen sibirischen Flüsse — Jenissei, Ob und Lena — ist nach den erwähnten Grundsätzen geplant worden, wobei die neu zu errichtenden Kraftwerke von Anfang an einem ausgedehnten Hochspannungsnetz angeschlossen werden.

3.1. Jenissei—Angara. Nach der installierbaren Leistung, der möglichen Jahresarbeit und dem Nutzinhalt der Wasserspeicher nimmt dieses Flusssystem die erste Stelle in der Wasserkraftausnutzung der Welt ein, Bild 1. Da in diesem Gebiet auch reichliche Kohlevorkommen vorhanden sind, können die Wasserkraftwerke mit grossen Wärmekraftwerken zusammengeschlossen werden.

Der **Jenissei** ist der wasserreichste Fluss Russlands; er hat eine Länge von 3850 km und ist in seinem Unterlauf 5 bis 9 km breit. Die mittlere Wasserführung beträgt $17\,400 \text{ m}^3/\text{s}$, der höchste Durchfluss wird auf $130\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ geschätzt. Die jährliche Abflussmenge, einschliesslich die der Nebenflüsse, erreicht 580 bis 590 Gm^3 . Die wichtigsten Nebenflüsse sind: Angara, Untere-, Steinige- und Obere-Tunguska.

Die geplante Kraftwerkskette auf dem Jenissei ist in Bild 2 veranschaulicht. Am Oberlauf, im Ssajan-Gebirge, befindet sich ein Kraftwerk für 6,3 GW bereits im Bau. Dieses Werk wird voraussichtlich die niedrigsten Energiekosten im Jenissei-System aufweisen, weil günstige Bauverhältnisse vorliegen, und ein hohes Gefälle eine grosse Leistung ermöglicht. Die nächste grosse Staustufe befindet sich bei Krasnojarsk, wo zurzeit ein Kraftwerk für 5 GW errichtet wird. Hier werden 500-MW-Turboaggregate aufgestellt, Bild. 3. Abwärts von Krasnojarsk sind zwei weitere Kraftwerke bei Jenisseisk (6 GW) und Ossinovo (5 GW) vorgesehen. Das Jenisseisk-Kraftwerk wird unterhalb des Zusammenflusses von Jenissei und Angara liegen; das Volumen seines ausserordentlich grossen Staubecken soll ungefähr 120 Gm^3 betragen. Bei dem Zusammenwirken dieser Werke mit den Staubecken von Krasnojarsk und Bratsk, wie auch mit dem Baikalsee, wird die Wasserdarbietung des Jenissei soweit ausgeglichen, dass die ganzjährige Auslastung von rund 90 % der installierten Leistung des Jenissei-Kraftwerks ermöglicht wird. Dies soll die Errichtung energieintensiver Industriezweige in den umliegenden Gebieten fördern, welche die billige Grundlastenergie verwerten werden.

Ein grosses Kraftwerk von 4 bis 6 GW wird auch auf der Unteren Tunguska geplant. Die Gesamtleistung der Kraftwerke im Jenisseigebiet, ohne Angara, wird etwa 25 GW, ihre Jahresarbeit 160 TWh, betragen.

Die **Angara** ist der grösste Nebenfluss Jenisseis; energiewirtschaftlich wird sie als ein unabhängiges Flusssystem betrachtet. Die Angara ist die wirtschaftlich günstigste Wasserenergiequelle Russ-

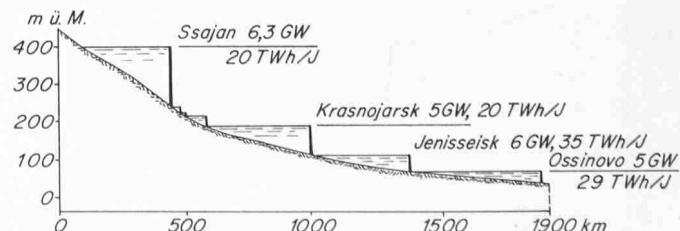


Bild 2. Die Kraftwerkskette auf dem Jenissei

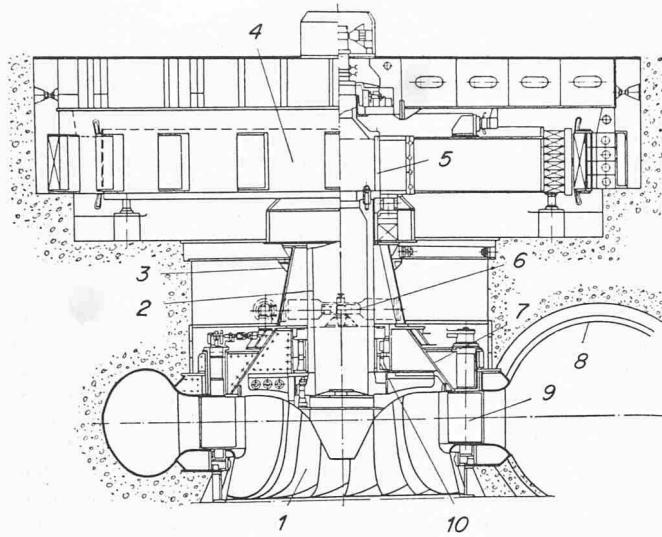


Bild 3. 500-MW-Turbosatz des Krasnojarsk-Kraftwerkes

1 Laufrad	4 Generator	7 Turbinendeckel
2 Welle	5 Generator	8 Spiralgehäuse
3 Lagerstütze	6 Servomotoren	9 Leitschaukel
		10 Führungslager

lands. Auf ihrer gesamten Länge von 1850 km hat sie ein Gefälle von 380 m (spezifisches Gefälle rund 0,2 m/km). Der Betrieb von Kraftwerken auf der Angara wird dadurch begünstigt, dass der Baikalsee einen natürlichen Ausgleichsspeicher bildet, welcher die Frühjahrsgewässer auffängt.

Die geplante Kraftwerkskette auf der Angara enthält sechs Wasserkraftwerke, Bild 4, drei davon mit einer Leistung von mehr als 4 GW. Die Kraftwerkskette wird in einem Jahr mittlerer Wasserführung rund 70 TWh erzeugen können. Das erste Kraftwerk bei Irkutsk befindet sich seit 1958 mit 660 MW in Betrieb. Auch bei Bratsk ist ein Werk von 3,6 GW erstellt worden. Zwei weitere Staustufen sind bei Ustj-Ilimsk (rund 90 m; 4 GW) und Bogutschansk (70 m; 4,5 GW) geplant; die Bauarbeiten bei Ustj-Ilimsk wurden bereits begonnen. Alle erwähnten Kraftwerke werden eine geschlossene Kette mit grossen Staubecken bilden; ihre Leistung kann zum Leistungsausgleich anderer, weniger regelbarer Kraftwerke des sibirischen Verbundsystems eingesetzt werden.

3.2. Ob. Der Ob entspringt dem Altaigebirge. Er ist der grösste Fluss des westsibirischen Tieflands. Seine Länge ist 3400 km (Ob-Irtysch 5570 km), das Einzugsgebiet $2,9 \cdot 10^6$ km 2 , die jährliche Wasserführung 400 Gm 3 .

Die geplante Kraftwerkskette auf dem Ob enthält eine grösere Anzahl von Staustufen als auf dem Jenissei, Bild 5, weil hier die topographischen Verhältnisse weniger günstig sind. Da die Ufer des Ob niedriger und das Flusstal breiter als am Jenissei sind, müssen niedrigere Staustufen erstellt werden. Ausserdem ist der Boden zur Errichtung hoher Wasserbauten nicht so günstig wie im Flusstal des Jenissei. Die besten Verhältnisse bestehen am Oberlauf des Flusses, wo ein grosses Kraftwerk bei Kamenetsk geplant ist; hier soll ein Staubecken mit einem Inhalt von mehr als 26 Gm 3 entstehen, welches sowohl zur Regelung der Kraftwerkseleistung als auch zur Bewässerung von rund 700 000 ha des Steppengebietes dienen wird. Das Kraftwerk an der nächsten Staustufe mit 400 MW bei Nowosibirsk ist fertiggestellt worden und befindet sich in Betrieb. Einige tiefer liegende Stufen bei Tschulimsk, Timsk und Wachsk liegen auf einer flachen Flusstrecke, wo das

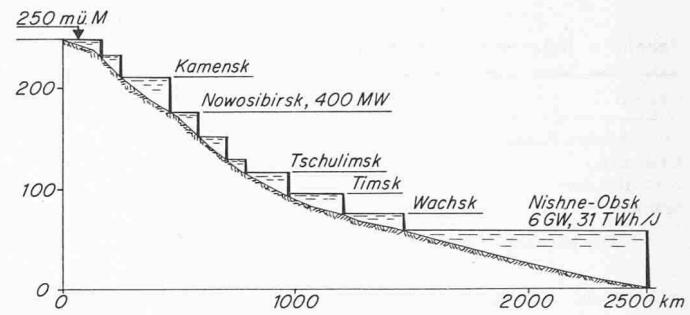


Bild 4. Die Kraftwerkskette auf der Angara

Flusstal sich erheblich erweitert hat (an einigen Stellen bis 30 km) und der Boden aus weichen Flözen besteht; der Ausbau dieser Stufen ist deshalb für einen späteren Zeitpunkt vorgesehen.

Am Unterlauf des Flusses, kurz vor seiner Mündung ins Nördliche Eismeer, kann ein Grosskraftwerk mit einer Leistung von 6 GW und einem langen Stausee mit rund 1000 Gm 3 Inhalt erstellt werden. Dieses Werk sollte Energie an das Industriegebiet des Nordurals liefern. Sein Wasserspeicher würde in der flachen Gegend eine ausserordentlich grosse Überflutung und dadurch Verluste in anderen Wirtschaftszweigen verursachen, weshalb der Bau dieser Stufe noch nicht beschlossen wurde.

Kraftwerksketten werden auch auf den Nebenflüssen Irtysch und Tom geplant, wobei einige Staustufen auf dem Irtysch auch zur Bewässerung der Steppengebiete von Kasachstan dienen werden. Der Irtysch ist der grösste Nebenfluss des Ob; seine Länge ist 2970 km, das gesamte Gefälle 367 m. Das potentielle Arbeitsvermögen des Flusses wird auf 28 TWh geschätzt. Zur Wasserkraftausnutzung kommt hauptsächlich die obere, 1700 km lange Flusstrecke, bis zur Stadt Omsk, in Frage. Die geplante Kraftwerkskette auf dem Irtysch soll 13 Staustufen mit einer Gesamtleistung von rund 3 GW und einer Jahresarbeit von 16 TWh enthalten, Bild 6. Die wichtigsten Staustufen befinden sich bei Buchtarma, am Auslauf des Flusses aus dem Saissan-See (rund 0,5 GW; 2,4 TWh/J) und bei Ustj-Kamenogorsk (Kraftwerk mit 320 MW in Betrieb); sie liegen aber schon in Kasachstan, d. h. ausserhalb Sibiriens. Die untere Strecke, in West-Sibirien, ist zur Energieerzeugung weniger geeignet, weil hier der Fluss durch das westsibirische Flachland fliesst.

3.3. Lena. Die Lena ist der grösste Fluss Ostsibiriens. Sie entspringt dem Baikalgebirge, durchquert das mineralreiche Jakutgebiet und mündet nach einem 4270 km langen Lauf ins Nördliche Eismeer. Das Einzugsgebiet beträgt $2,42 \cdot 10^6$ km 2 , der mittlere Jahresabfluss 490 Gm 3 . Der Fluss strömt durch unbewohnte, nördliche Gebiete und ist etwa 7 Monate im Jahre vereist.

Ogleich die Lena hinsichtlich der Wasserführung die zweite Stelle unter den Flüssen Russlands einnimmt, ist sie viel weniger als der Jenissei und der Ob erforscht worden. Ihre Ausbaupläne sind mit der Entwicklung des Bergbaus im Jakut-Gebiet verbunden. Es sind einige Varianten des Flussausbaus ausgearbeitet worden, doch liegt ein endgültiger Plan noch nicht vor. Die Bauverhältnisse sind schwierig, weil die Temperaturen während des langen Winters sehr niedrig liegen und der Grund gefroren ist; es sind auch keine brauchbaren Transportwege vorhanden. Ausserdem schwankt der Wasserabfluss erheblich, weshalb die Kraftwerke grosse Wasserspeicher benötigen. Da dieser Fluss jedoch imstande ist, enorme Mengen an Wasserenergie abzugeben und die industrielle Entwicklung Ostsibiriens zu fördern, wird er als eine wichtige Energiequelle der östlichen Gebiete betrachtet. Aus die-

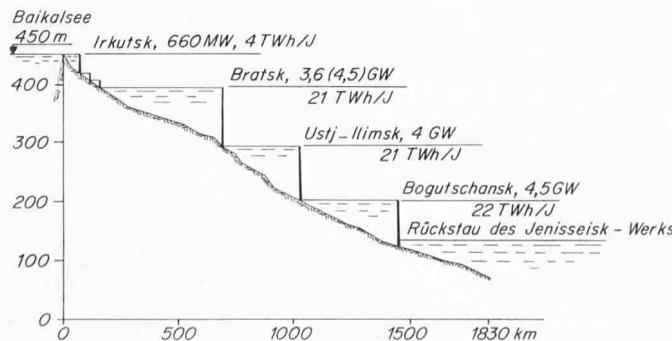


Bild 5. Die Kraftwerkskette auf dem Ob

Die Bildunterschriften sind gegenseitig zu vertauschen

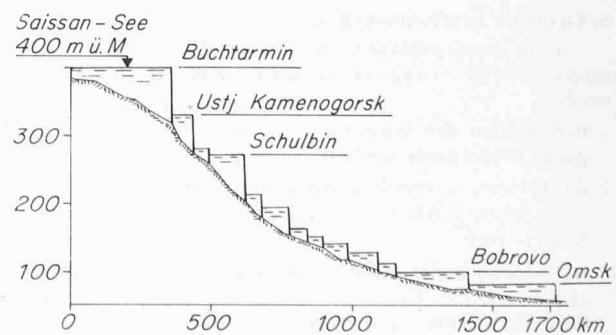


Bild 6. Die Kraftwerkskette auf dem Irtysch

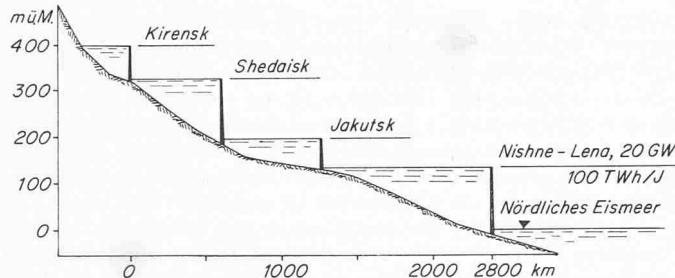


Bild 7. Eine Ausbauvariante der Lena

sem Grunde wird auf der Lena die Errichtung einer geringen Anzahl von grossen Wasserkraftwerken mit hohen Anstauungen und grossen Staubecken geplant. Man erwägt den Bau von vier Grosskraftwerken, Bild 7. Am Unterlauf soll das grösste bisher geplante Wasserkraftwerk der Welt, mit einer Leistung von 20 GW und einer Jahresarbeit von 100 TWh, entstehen.

Die Flüsse Sibiriens werden nicht bloss der Energieerzeugung dienen. Auch die Mehrzweckausnutzung der wasserreichen Ströme wird in Betracht gezogen, wobei besondere Aufmerksamkeit der Bewässerung der Steppengebiete West-Sibiriens und Kasachstans gewidmet wird. Man erwägt die Wasserablenkung aus den Wasserspeichern des Ob-Flusssystems; das Wasser soll den trockenen Gebieten Zentral-Asiens zugeleitet werden. Dazu müsste die Wasserscheide am Turgaisk-Gebirge durchbrochen und mächtige Pumpwerke zur Wasserbeförderung erstellt werden. Endgültige Projekte sind noch nicht ausgearbeitet. Es sei erwähnt, dass auch auf den Flüssen Zentral-Asiens umfangreiche Mehrzweckprojekte durchgeführt werden, welche Energieerzeugung und Bewässerung bezeichnen [14].

4. Die ausgebauten Kraftwerke

Die reichlichen Naturschätze Sibiriens fördern die Entwicklung der Grossindustrie, wodurch der Bedarf an elektrischer Energie rasch zunimmt. Die Errichtung der ersten grossen Kraftwerke bei Irkutsk und Nowosibirsk begann 1950. Danach wurde der Bau von zwei riesigen Kraftwerken im Jenissei-Flusssystem aufgenommen. Die Auswahl fiel auf die Staustufen bei Bratsk und Krasnojarsk. Diese beiden Werke stellen die grössten bisher errichteten Wasserkraftwerke der Welt dar. Die meisten sibirischen Wasserkraftwerke sind Mitteldruckwerke mit einer ausnutzbaren Fallhöhe von 70 bis 120 m. Sie werden als Flusskraftwerke mit Schwerpunkt-Betonmauern und dem Maschinenhaus gleich hinter der Staumauer entworfen.

Das erste Kraftwerk grosser Leistung ist auf der Angara bei Irkutsk errichtet worden. Es befindet sich am Auslauf der Angara aus dem Baikalsee und stellt die oberste Stufe der Kraftwerksskette dar. Sein Damm staut die Angara um 30 m und den Baikalsee um

1 bis 1,5 m auf; das Volumen des Stauraums beträgt 46 Gm³. Das Werk wird seit 1958 mit 660 MW betrieben und kann der gleichmässigen Wasserführung wegen einer jährlichen Energiemenge von rund 4 TWh ins Netz abgeben. Da hier keine ausgeprägte Hochwasserspitze vorkommt, ist auf ein besonderes Überlaufwehr verzichtet worden; zum Ablass des mässigen Wasserüberschusses wurden im Maschinenhaus zwischen den Turbosätzen Ablassschächte erstellt, Bild 8. Die Gestehungskosten der Energie werden mit 0,11 Kop/kWh angegeben. Das Werk hat den Betrieb eines Aluminiumwerks, einer Ölraffinerie und die Elektrifizierung der transsibirischen Eisenbahn ermöglicht.

Mit dem Bau des Grosskraftwerks bei Bratsk auf der Angara wurde 1954 begonnen [15]. Die Baustelle ist besonders günstig, weil das Flusstal nur 850 m breit und die steilen Ufer 80 m hoch sind; das Flussbett besteht aus hartem Gestein und stellt einen guten Untergrund für die hohen Betonbauten dar. Hinter der 130 m hohen massiven Betonmauer liegt das Maschinenhaus. Im Kraftwerk wurden Francis-Turbosätze von 225 MW installiert. Das Nutzgefälle beträgt rund 100 m, die Gesamtleistung der ersten Baustufe 3,6 GW; sie soll später auf 4,5 GW gebracht werden. Der Damm bildet einen 570 km langen Stausee mit einer Oberfläche von 5,4.10³ km² und einem Wasserinhalt von 180 Gm³ (Nutzvolumen etwa 70 Gm³). Die Jahresarbeit des Werks wird nach dem Vollausbau 22 TWh betragen; rund 90 % dieser Energiemenge kann als gesicherte Energie betrachtet werden. Außerdem werden die Schifffahrtsverhältnisse auf dem Oberlauf der Angara durch das Staubecken verbessert. Die spezifischen Baukosten des Werks sind niedrig gewesen; man gibt die Energiekosten zu nur ungefähr 0,07 Kop/kWh an.

Das zweite Grosskraftwerk im Jenissei-Flusssystem wird auf dem Hauptstrom des Jenissei, bei Krasnojarsk errichtet. In diesem Werk sollen zehn Wasserkraftaggregate von je 500 MW untergebracht werden, so dass es mit seiner installierten Gesamtleistung von 5,0 GW alle übrigen, zurzeit betriebenen oder erstellenden Wasserkraftwerke übertreffen wird. Im Maschinenhaus wird Platz für noch zwei weitere Aggregate gleicher Leistung vorgesehen. Die Jahresarbeit wird auf 20 TWh geschätzt.

Das Kraftwerk Krasnojarsk stellt die erste Stufe der geplanten Kraftwerksskette auf dem Jenissei dar. Der Bau einer Staustufe am Oberlauf des Flusses, im Ssajan-Gebirge, ist auch schon in Angriff genommen worden. In diesem Kraftwerk sollen sieben Aggregate von je 900 MW installiert werden. Diese hohe Leistung wird dadurch ermöglicht, dass sich das Werk im Gebirge befindet und mit einem bedeutend höheren Gefälle als das Kraftwerk Krasnojarsk arbeiten wird.

Der Querschnitt durch das Maschinenhaus Krasnojarsk ist in Bild 9 gezeigt. Die Baustelle befindet sich auf der oberen Flussstrecke, 40 km aufwärts der Stadt Krasnojarsk, wo der Fluss eine Gebirgskette durchquert. Das Flusstal ist hier verhältnismässig schmal und tief, wobei die Talufer aus hartem Granit gebildet sind. Obgleich der felsige Boden die Errichtung von schweren Wasserbauten erheblich erleichtert, muss man doch in dieser Gegend mit Erdbeben rechnen.

Das Flusstal ist an der Baustelle 750 m breit, beidseitig von steilen Ufern begrenzt; auf der rechten Seite ist das Ufer 300 bis 350 m, auf der linken Seite dagegen nur 100 m hoch. Die massive Betonmauer ist 120 m hoch und rund 1000 m lang. Zur Sicherung gegen die tektonische Aktivität ist sie mit einer breiten Betonsohle versehen, welche sich auf den tief gelegenen, nicht gebrochenen Gesteinsschichten stützt. Senkrechte Bohrungen, welche von der Dammsohle 30 bis 40 m tief in den Untergrund hinabreichen, werden zur Beobachtung der Wassersickerung, zur Ableitung von Leckwasser und zur möglicherweise benötigten Abdichtung des Bodens mittels Zementinjektionen dienen.

Der 225 m lange Wasserüberlauf des Dammes befindet sich am linken Flussufer und ist mit hydraulisch betätigten Wehrschlüssen versehen; er soll die Hochwassermengen von rund 25 000 m³/s ableiten, wobei das Hochwasser mit dem schweren Eingang zusammenfällt. Die Aufstauung des Flusses wird einen ungefähr 250 km langen Stausee, mit einer Oberfläche von rund 2000 km² bilden. Dieser See wird auch die Stromschnellen zwischen Krasnojarsk und Abakan überfluten und dadurch den Wasserweg verlängern. Da das Kraftwerk am oberen Flusslauf gelegen ist und von grossen Schiffen nicht mehr erreicht werden kann, wird für die Schifffahrt nicht die übliche Schleusenanlage,

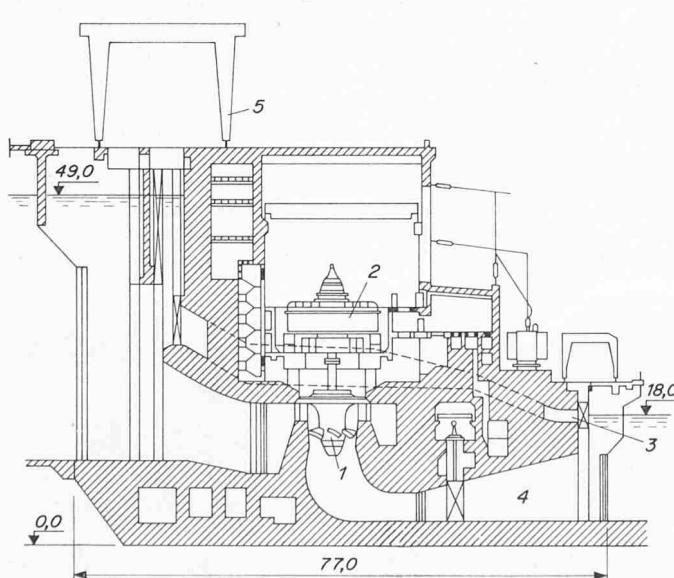


Bild 8. Das Maschinenhaus des Irkutsk-Kraftwerkes

- | | |
|----------------------|---------------------------|
| 1 Kaplanturbine | 4 Auslassrohr der Turbine |
| 2 Generator | 5 Kran |
| 3 Wasserablasstunnel | |

sondern ein elektrisch betätigtes Hebwerk errichtet. Die Fahrzeuge sollen in einem 110x25 m wassergefüllten Behälter über eine schiefe Rollerbahn heraufgezogen oder heruntergelassen werden; die Hebeoperation wird rund 15 min dauern. Diese Einrichtung wird für Schiffe bis 2000 t bemessen.

Das 360 m lange Maschinenhaus befindet sich auf dem linken Ufer des Flusses und ist für den Einbau von 12 Turbosätzen vorgesehen. Das Wasser wird jeder Turbine mittels zwei Druckrohren, 7,5 m Durchmesser, zugeleitet. Die beiden Rohre werden kurz vor dem Eintritt ins Spiralgehäuse der Turbine in einem Einlaufstutzen zusammengeschlossen. Jeder Maschinensatz wird bei Vollast 600 m³/s Wasser bei einem Nettogefälle von 90 bis 95 m verbrauchen und 500 MW leisten. Die Aggregate sind mit Francisturbinen ausgerüstet und werden mit 94 U/min laufen. Der Laufraddurchmesser beträgt 7,5 m, dessen Gewicht 250 t. Die Turbinen werden Drehstromgeneratoren von 590 MVA antreiben.

Die hohe Einheitsleistung der Maschinensätze stellt ein charakteristisches Merkmal des Kraftwerks Krasnojarsk dar. Die Aggregateleistung ist hier aus zwei Gründen erhöht worden: 1) eine geringe Anzahl der Aggregate setzt die Baukosten des Kraftwerks herab; 2) im schmalen Flusstal musste das Maschinenhaus so kurz wie möglich gehalten werden, weil sonst kein Platz für die Wehranlage übriggeblieben wäre. Wasserturbinen einer so hohen Leistung werden hier zum ersten Mal eingebaut. Ihre grossen Ausmasse stellen hohe Ansprüche an die Fertigung, und bereiten auch schwierige Transportprobleme. Die Turbinen werden in Leningrad gefertigt und müssen über eine Entfernung von mehreren tausend km bis Mittelibirien transportiert werden. Da die Abmessungen der Laufräder für den Eisenbahntransport zu gross sind, müssen sie über einen langen Wasserweg an die Baustelle des Kraftwerks herangeschafft werden. Er führt von Leningrad über das Kanalsystem des nördlichen Russland bis zum Weissen Meer und danach längs der arktischen Küste bis zur Mündung des Jenisseis ins Nördliche Eismeer. Von hier aus werden die Turbinen über den Fluss aufwärts bis zur Baustelle transportiert, Bild 10. Es ist zu bemerken, dass bei einigen anderen Kraftwerksbauten, wo die Transportverhältnisse noch ungünstiger sind, die grossen Turbinenläufer bis zur Baustelle in mehreren Teilen befördert und erst am Aufstellungsort zusammengeschweisst werden.

Die zurzeit grössten Wasserkraftaggregate befinden sich in Betrieb im Kraftwerk Bratsk, auf der Angara; sie entwickeln 225 MW. Bis vor kurzem wurde angenommen, dass sie in der Nähe der Leistungsgrenze von Wasserkraftaggregaten liegen. In den letzten Jahren bemüht man sich aber, im Wasserkraftwerksbau die Leistung der Maschinen erheblich zu steigern. So wird z. B. in den USA die Erweiterung des bekannten Grand Coulee Kraftwerks mittels zwölf 600-MW-Maschinensätzen geplant; dies wird die Leistung des Kraftwerks von gegenwärtig 2 GW bis auf 9,2 GW erhöhen. In Kanada wird ein Kraftwerk in der Provinz Labrador, an den Churchill-Stromschnellen, geplant, welches zehn Maschinensätze von je 450 MW enthalten wird. Und schliesslich

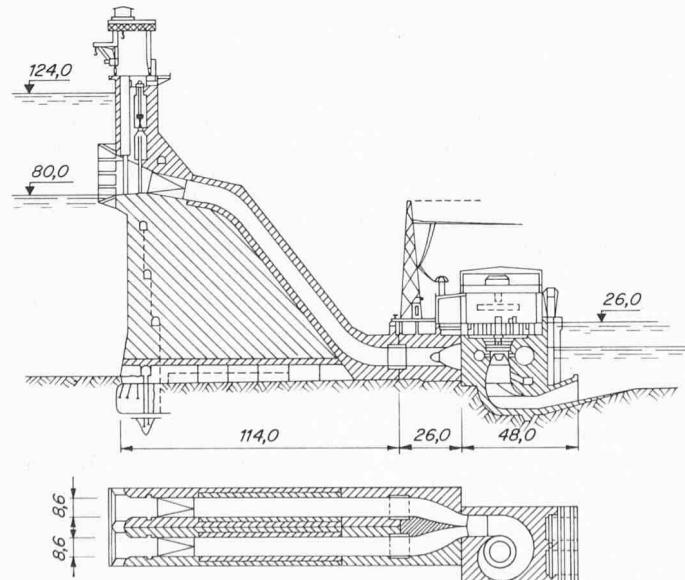


Bild 9. Querschnitt durch das Maschinenhaus des Kraftwerkes Krasnojarsk

sollen im Ssajan Kraftwerk sogar 900-MW-Aggregate installiert werden. Die Einheitsleistungen der Wasserkraftaggregate nähern sich also der 1000-MW-Grenze. Ob diese in Zukunft noch überschritten werden wird, lässt sich vorläufig noch nicht sagen. Das Kraftwerk Krasnojarsk wird allerdings praktische Erfahrungen mit Grossaggregaten, welche die bisher üblichen Leistungen wesentlich übertreffen, ergeben. Zur Energieübertragung werden am Kraftwerk Schaltanlagen für 220 und 500 kV errichtet.

Eine Vorstellung über den Umfang der Bauarbeiten bei der Errichtung des Kraftwerks geben folgende Zahlen: zur Errichtung der Wasserbauten sind 1,5 Mio m³ Gestein und 4,5 Mio m³ Erde ausgegraben worden; eine ungefähr gleiche Menge Beton muss eingebracht werden. Für die Bauten werden ungefähr 40 000 t Stahl benötigt. Trotz der andauernden Kälte der Wintersaison (die Temperaturen sinken im Januar manchmal unter -50 °C), wird die Bautätigkeit das ganze Jahr hindurch aufrecht erhalten. Dazu müssen bei der Betonierung besondere Massnahmen getroffen werden. Die Russen haben diesbezüglich reiche Erfahrungen schon bei der Errichtung des Grosskraftwerks Bratsk gesammelt und Methoden bezüglich der Betonierung bei niedrigen Temperaturen ausgearbeitet. Der Beton wird von der Mischanlage mittels isolierter Transportbänder, welche durch die bedeckten und beheizten Galerien laufen, den Betonierungsstellen zugführt. Die Betonierung wird unter Bresentumhüllungen durchgeführt; auch hier wird durch die Zuführung von warmer Luft eine annehmbare Temperatur gehalten. Im Laufe eines Monats werden durchschnittlich 120 000 m³ Beton verarbeitet. Zur Vermeidung von Rissen in den monolithischen Betonblöcken verwendet man einen besonderen Zement mit hohem Gehalt an gemahlenem Schlag.

Zurzeit werden vier Turbosätze ins Maschinenhaus eingebaut. Man beabsichtigt, im November 1967 zwei Aggregate in Betrieb nehmen zu können. Die technische Welt wird mit Interesse auf die Betriebsergebnisse dieser ungewöhnlich grossen Anlage der Wasserkraftausnutzung warten. Die hierbei gesammelten Erfahrungen können den Entwurf weiterer Grossanlagen erheblich beeinflussen.

Auf dem Ob ist das Nowosibirsk-Kraftwerk als die erste Stufe der geplanten Kraftwerkskette erstellt worden. Es befindet sich seit 1959 mit 400 MW in Betrieb; das Nutzgefälle beträgt 20 m. Das 190 m lange Wehr ist zum Ablass einer Hochwassermenge der Frühlingssaison von 13 000 m³/s bemessen; außerdem sind zwischen den Turbosätzen zusätzliche Öffnungen zum Wasserablass angeordnet. Dem Betonwehr schliesst sich ein 3 km langer Erddamm an, der ein 200 km langes Staubecken bildet; die Oberfläche des Staubeckens beträgt 1000 km², sein Inhalt 8,9 Gm³.

5. Der Verbundbetrieb in Sibirien

Die Betriebsbedingungen der Wasserkraftwerke werden von ihrer Zusammenarbeit mit anderen Kraftwerken der Energiesysteme beeinflusst. Trotz der reichlichen Wasserkräfte sind die Energiesysteme Sibiriens keine ausgesprochenen Wasserkraftsysteme. Da in Sibirien ergiebige Vorkommen an Brennstoffen vorhanden sind, werden hier Wärmekraftwerke mit Leistungen von 2 bis 3 GW errichtet. Deshalb sollen die Wasserkraftwerke im Verbundbetrieb mit den thermischen Kraftwerken arbeiten. Der Anteil der thermischen Werke beträgt z. Z. 40 bis 45 %. Da die Errichtung von Wasserkraftwerken mit grossen Aufwendungen verknüpft ist und längere Baupisten als Wärmekraftwerke beansprucht, ist damit zu rechnen, dass bei raschem Anstieg des Energiebedarfs die Rolle der Wärmekraftwerke in Zukunft zunehmen wird. Eine ähn-

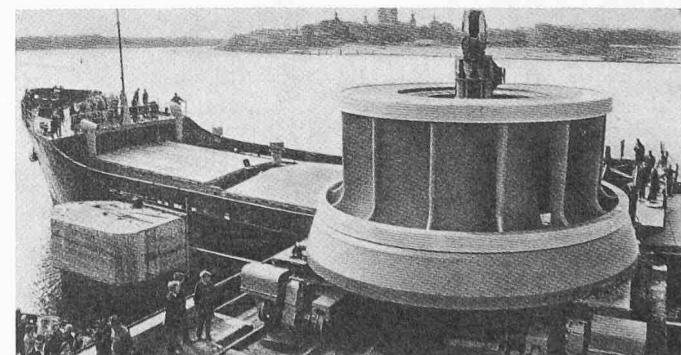


Bild 10. Verschiffung eines 500-MW-Turbinenläufers

liche Entwicklung ist fast überall in der elektrischen Energieversorgung zu verzeichnen [16].

Die Wasserkraftwerke müssen mit den Wärmekraftwerken so zusammenwirken, dass die verfügbare Wasserenergie vollständig ausgenutzt und deren Leistung in die Leistungsbilanz des Energiesystems vollwertig eingesetzt wird [17]. Deshalb decken die Wasserkraftwerke während der Hochwasserperiode die Grundlast, bei sinkendem Wasserzufluss werden sie aber in die Spitzenlastzone übergeführt. Da das russische Territorium sich über riesige Entfernung in Ost-West-Richtung erstreckt, gleichen sich die Tageslastkurven des Verbundbetriebs infolge der verschiedenen Zeiten beträchtlich aus, so dass sich die verfügbaren Kraftwerksleistungen gut auslasten lassen.

Der Schwerpunkt der Energieerzeugung liegt in Zentral-Sibirien, wo sich reichliche Wasserkräfte sowie die ergiebigsten Brennstoffvorkommen befinden. Hier wird ein Hochspannungsnetz mit 500-kV-Linien errichtet, Bild 11 [18, 19]. Das Verbundnetz verbindet die grossen, wirtschaftlich günstigen Wasserkraftwerke im Jenissei-Ob-Gebiet. Es ermöglicht, diese zweckmäßig auszunutzen; so weist z. B. die Angara infolge des Baikalsees nur geringe Saison-Schwankungen der Wasserdarbietung auf, wogegen der Jenissei erhebliche jahreszeitliche, aber geringfügige mehrjährige Schwankungen der Wasserführung hat. Nach dem Einschliessen beider Kraftwerkssketten in ein gemeinsames Verbundnetz entstehen günstige Voraussetzungen für deren Betrieb.

Das Hochspannungsnetz Sibiriens wird stufenweise ausgedehnt mit dem Ziel, die Gebiete West-Sibiriens, Zentral-Asiens und Urals anzuschliessen. Die Kraftwerke der Jenissei- und Ob-Flussysteme werden dabei mit den westlich liegenden Wärmekraftwerken des Kusnetsk-Gebiets verbunden, wo grosse Industrieanlagen des Bergbaus, der Metallurgie und Chemie konzentriert sind. Die ausgeglichenen Tageslastkurven dieser Industriezweige begünstigen den Energiebezug aus den weit gelegenen Wasserkraftwerken.

Die erste 500-kV-Linie des sibirischen Hochspannungsnetzes erstreckt sich zwischen Irkutsk-Bratsk-Krasnojarsk-Nasorovo und Kusnetsk. Die Hauptlinie ist mit mehreren 230-kV-Nebenlinien verbunden, welche die einzelnen Industriezentren an das Verbundsystem anschliessen. Die Gesamtleistung des Verbundsystems beträgt rund 13 GW; sie wird mit dem Ausbau neuer grosser Kraftwerke und der Erweiterung des Netzes ständig erhöht.

Da Zentral-Sibirien über reichliche Energiequellen verfügt, wird geplant, Energie von dort auch anderen, weit gelegenen Gebieten zu liefern. Es wird eine Fernübertragung der elektrischen Energie an die Uralgebiete oder sogar an die Verbrauchszentren des europäischen Russlands erwogen. Es handelt sich hier um Entfernung von über 2000 km, und um zu übertragende Leistungen von mehr als 15 GW. Dazu kommen entweder die 750 bis 1000-kV-Wechselstromlinien oder die Gleichstromlinien für ± 750 kV in Frage. Bezuglich der Spannung und Stromart wurde eine Entscheidung noch nicht getroffen, weil Versuche noch im Gange sind. Diese Fernleitungen werden die Betriebsbedingungen der Wasserkraftwerke Sibiriens verändern und den weiteren Ausbau der grossen Wasserenergiequellen dieser Gebiete fördern, so dass man mit neuen grossen Vorhaben im Flussausbau während der nächsten Jahrzehnte rechnen kann.

Adresse des Verfassers: Dipl.-Ing. A. Kroms, 30, Rockland Ave., Malden, Mass. 02148, USA.

Bemerkungen

In der seit Abschluss des vorliegenden Beitrages verstrichenen Zeit sind dem Autor einige Größenänderungen bekannt geworden, welche die hier erwähnten Projekte betreffen:

1. Die Jahresarbit des *Ssajan*-Kraftwerkes wurde inzwischen auf 22 TWh festgelegt (in Bild 2 ist sie noch mit 20 TWh angegeben.)
2. Sowohl das Kraftwerk *Ust'-Ilinsk* als auch jenes bei *Ssajan* befinden sich bereits im Bau. In Bild 1 (Pos. 5 und 7) sind sie noch als geplante Werke aufgeführt.

Literaturverzeichnis

- [1] Ammann, A.: Probleme der Wasserkraft heute und morgen. «ÖZE» 1964, H. 10, S. 542/46.
- [2] Salmon, R. und Serra, L.: Methodes d'évaluation des ressources mondiales en énergie hydroélectrique. Sixth World Conference, Melbourne 1962. Paper 21 I 1/1.
- [3] Solotarjow, Th. L.: Die Methodik der Berechnung von Wasserkraftvorräten. Fünfte Weltkraftkonferenz, Wien 1956. Bericht 261 B/16.
- [4] Schtschawlew, D. S. u. a.: Die Ausnutzung der Wasserenergie (russ.). Moskau und Leningrad 1965. Verlag Energiya.
- [5] Voznesenski, A. N. und Bestschinski, A. A.: A Comparative Cost Estimate and Prospects for Harnessing the Water Power Resources in the Eastern Region of the USSR. World Power Conference, Montreal 1958. Paper 85 A/8.
- [6] Butjagin, U. P. u. a.: Energiewirtschaft Sibiriens (russ.). Moskau 1963. Gosenergoizdat.
- [7] Voznesenski, A. N. und Bestschinski, A. A.: Die Erschliessung der Wasserkräfte Sibiriens und ihre Rolle in der Entwicklung der Produktionskräfte (russ.). World Power Conference, Beograd 1957. Bericht A-6.
- [8] L'état actuel de l'équipement hydroélectrique de l'U.R.S.S. «Le génie civil» 137 (1960), Heft 7.
- [9] Grossen, H.: Über den Ausbau der Wasserkräfte in der Sowjetunion. «Schweiz. Bauzeitung» 76 (1958), H. 51, S. 769/73 und H. 52, S. 785/87.
- [10] Kroms, A.: Wasserkraftwerke in Energiesystemen verschiedener Leistungsstruktur. «ÖZE» 18 (1966), Nr. 10, S. 385/96.
- [11] Kroms, A.: Der Leistungsausgleich in Energiesystemen. «E und M» 83 (1966), Nr. 3, S. 177/86.
- [12] Kroms, A.: Vergleich der Errichtungskosten von Kraftwerken. «ÖZE» 16 (1963), Nr. 4, S. 289/301.
- [13] Kroms, A.: Kraftwerke als Elemente der elektrischen Verbundsysteme. «Bulletin SEV» 51 (1960). Nr. 19, S. 221/28 und H. 20, S. 242/44.
- [14] Schelest, W. A., Kraptschin, U. P. und Grüntal, J. L.: Probleme der Entwicklung der elektrischen Energiewirtschaft in Zentral-Asien (russ.). Moskau 1964. Wissenschaftliche Akademie Russlands.
- [15] Das sibirische Grosskraftwerk Bratsk. «Schweiz. Bauzeitung» 77 (1959), H. 28, S. 460.
- [16] Rausch, H.: Russians Race Winter, 1967 Deadline on Yenisey River. «Electrical World» 167 (1967), H. 4, S. 84/86.
- [17] Kroms, A.: Wasserkraft in der Energieversorgung der USA. «ÖZE» 19 (1966), H. 2, S. 85/98.
- [18] Kroms, A.: Leistungs- und Energiebilanz der Verbundsysteme. «ÖZE» 11 (1958), H. 6, S. 265/78 und H. 8, S. 383/87.
- [19] Soviets Build 500-kV-Grid in Siberia. «Electrical World» 161 (1964), H. 13, S. 17/19.
- [20] Von Gersdorff, B.: Ausbau der Stromerzeugung und Errichtung von Verbundsystemen in der Sowjetunion. «Elektrizitätswirtschaft» 1961, H. 18, S. 647/52 und H. 19, S. 691/96.

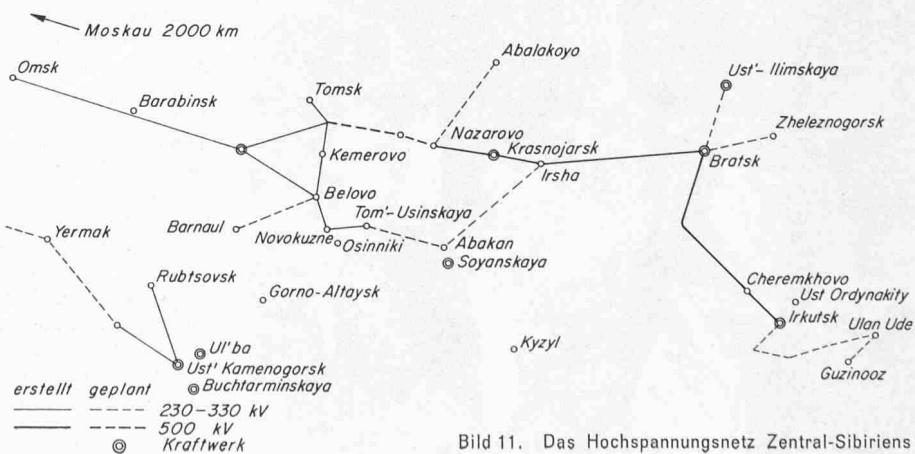


Bild 11. Das Hochspannungsnetz Zentral-Sibiriens