Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 10

Artikel: Anlauf und Laufruhe schnelllaufender Pumpengruppen

Autor: Abegg, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916366

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: 09.08.2025

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

[35] *H. W. Schuler:* Die 15 kV Fahrleitungen der Schweizerischen Bundesbahnen. Schweiz. Bauztg. 90(1927), S. 188...192 und S. 199...203.

[36] Ein Jahrhundert Schweizer Bahnen 1847...1947. Huber, Frauenfeld 1949, Bd. 2, S. 264...284.

[37] *H. Merz:* L'entretien des installations de caténaires des chemins de fer fédéraux suisses. Bulletin de l'association international du congrès des chemins de fer. Traction électrique dans les chemins de fer. Edition française 3(1952)6, S. 255...272 und 4(1953)1, S. 21...44.

[38] *Schweizerische Bundesbahnen:* Zum Abschluss der Elektrifikation der SBB. Otto Walter, Olten 1960, S. 41...47.

[39] *E. Grimm:* Die ortsfesten elektrischen Anlagen der BLS. Techn. Rdsch. 55(1963)27, S. 27...29.

[40] *G. Naderer:* Fahr- und Speiseleitungen. Elektr. Bahnen 11(1935)4, S. 112...117.

[41] *A. Mosler:* Die Fahrleitungen für elektrisch betriebene Strecken der deutschen Bundesbahn. Eisenbahn-Ingenieur 5(1954)2, S. 32...39.

[42] *R. Wagner:* Die Fahrleitungsanlagen der deutschen Bundesbahnen. Bundesbahn 28(1954)9/10), S. 503...517.

[43] *R. Wagner:* Die Einheitsfahrleitung 1950 der deutschen Bundesbahn. Elektr. Bahnen 25(1954)7, S. 177...180.

[44] *L. Hausmann:* Einige praktische Formeln zum Verständnis des Fahr- und Fernleitungsbaues. Elektr. Bahnen 26(1955)4, S. 79...88.

[45] *R. Wagner* und *A. Mosler:* Umbau alter Fahrleitungen. Elektr. Bahnen 27(1956)4, S. 88...93.

[46] *L. Hausmann:* Fahrleitung und Stromabnehmer. Eisenbahn-Ingenieur 11(1960)10, S. 298...307.

[47] *U. Kroll:* Beitrag zur Entwicklungsgeschichte der Fahrleitungen für Einphasenwechselstrom in Europa. Elektr. Bahnen 31(1960)6, S. 121...132.

[48] *M. Vaubourdolle* und *W. Walter:* L'équipement électrique à 20 000 volts, 50 Hz de la ligne d'Aix-les-Bains à la Roche-sur-Foron. Revue générale des chemins de fer 69(1950), S. 495...514.

[49] *L. Armand, M. Walter, A. Crépet* et al.: L'électrification en courant monophasé 50 Hz de la ligne de Valenciennes à Thionville et les journées d'information de Lille (11—14 mai 1955). Revue générale des chemins de fer 74(1955), S. 429...435, 489...496, 497...520.

[50] *H. Merz:* Systemwechselbahnhöfe. (Der Zusammenschluss verschiedener Eisenbahnen in den schweizerischen Grenzbahnhöfen.) NZZ Technik Nr. 2714 vom 15. 9. 1957.

[51] *H. Merz* und *E. Palm:* Zusammentreffen zweier verschiedener Bahnstromsysteme im Personenbahnhof Basel SBB. SBB-Nachrichtenblatt 35(1958), S. 76...78.

[52] *M. Boissonnade* und *M. Dupont:* Essais à très grande vitesse sous de contact à courant alternatif 25 kV—50 Hz. Revue générale des chemins de fer 81(1962), S. 369...389.

[53] *D. Scioli:* Con l'ALe 601 a 225 km/h. Voci della rotaia 7(1964)1, S. 11.

[54] *E. Binelli* und *E. Taglienti:* Prove di alta velocità sul tratto di linea Grosseto–Montepreschati. La tecnica profesionale 29(1964)8, S. 154...161.

[55] *V. Kammerer:* England, Wahl des künftigen Bahnstromsystems Elektr. Bahnen 27(1956)7, S. 168...170.

[56] *M. Hill:* Overhead Contact Systems for Railway Electrification. Journal of the Institution of Locomotive Engineers. 49(1959/60), S. 236...268.

[57] Railway Electrification Progress. British Railway Electrification Conference, London, 3 to 7 Oct. 1960, Railway Gazette Spezial Publication. London 1960.

[58] Overhead Equipment, the Catenary System. Developments in Overhead Equipment. Proccedings of the British Railway Electrification Conference. London 1960, Paper 33 and 33A.

[59] British Railway Electrification Conference London 1960. Glasers Annalen 85(1961), S. 32...35.

[60] *V. Y. Kotwal:* Fahrleitungssysteme für elektrische Zugförderung. Monatsschrift der internationalen Eisenbahn-Kongress-Vereinigung. Elektrische Zugförderung bei den Eisenbahnen. Deutsche Ausgabe 14(1963)8, S. 593...609.

[61] Considerations of Current Collection at High Speeds. International Railway Journal 4(1964)9, S. 40...43.

[62] *S. Seki:* Die Elektrisierung der Japanischen Staatsbahnen mit Einphasenwechselstrom (50 und 60 Hz). Elektr. Bahnen 28(1957)11, S. 241...246.

[63] *I. Kumezawa:* A Study of continuous mesh catenary. Railway Technical Research Institute JNR, Quarterly Report 1(1960)2, S. 16...18.

[64] *I. Kumezawa:* Overhead Wiring System for High Speed Operation. Japanese Railway Engineering 3(1962)2, S. 14...17.

[65] *I. Kumezawa:* Overhead Wire Structure for High Speed Train Operation. Railway Technical Research Institute JNR Quarterly Report. Special Issue: Researches for Super High-Speed Railway 3(1962)Nov., S. 26...31.

[66] *I. Kumezawa:* Overhead Wire Sturcture for High Speed Operation. Railway Technical Research Institute JNR Quarterly Report. Special Issue: Researches for Super High-Speed Railway (1963)Oct., S. 36...39.

[67] *I. Kumezawa:* Overhead Wire Structure for High Speed Train Operation. Railway Technical Research Institute JNR Quarterly Report. Special Issue: Researches for Super High-Speed Railway (1964)Aug., S. 34...37.

[68] *B. Boehm:* Fahrzeuge und Stromversorgungsanlagen der neuen Schnellbahn in Japan. Elektr. Bahnen 35(1964)7, S. 181...194.

[69] *M. Manzo:* Ad oltre 200 km/h i nuovi rotabili progettati dalle F. S. Scienza e Tecnica, Ingegneria Ferroviaria 19(1964)10, S. 797...800.

Adresse des Autors:

Hugo Merz, dipl. Elektroingenieur ETH, Sektionschef der Bauabteilung der Schweizerischen Bundesbahnen, Generaldirektion, Mittelstrasse 43, 3000 Bern.

Anlauf und Laufruhe schnellaufender Pumpengruppen

Kurzvortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 11. November 1964 in Zürich

von *K. Abegg,* Zürich

621.313.323 : 621.6

Die Anlaufcharakteristik, d. h. der Drehmoment-Drehzahlverlauf und der zeitliche Verlauf des Anlaufstromes kann nur in beschränktem Mass durch die konstruktive Gestaltung des Motors beeinflusst werden und wird vorwiegend durch die Wahl der Anlaufapparatur bestimmt. Dies gilt ganz besonders für schnellaufende Pumpengruppen grosser Leistung, deren Synchronmotoren vorwiegend mit massiven Polen ausgerüstet sind.

Fig. 1 zeigt den grundsätzlichen Verlauf des netzseitigen Anlaufstromes für verschiedene Anlaufschaltungen einer 30-MW-Pumpengruppe in Blockschaltung für eine Betriebsdrehzahl von 1500 U./min. Der Preisvergleich in Prozenten umfasst dabei den gesamten elektrischen Teil, d. h. Motor, Blocktransformator und Anlaufapparatur. Ferner wird vorausgesetzt, dass im Betrieb oberspannungsseitig auf $\cos \varphi = 1$ reguliert wird.

Die Blockschaltung ist für den Anlauf von Synchronmotoren grosser Leistung besonders geeignet, weil sich die Kurzschlussimpedanz des Transformators in ihrer vollen Grösse zu jener des Motors addiert. Dadurch ist es möglich, den Anlaufstrom eines Motors, der am starren Netz 5...7 mal Nennstrom erreicht, durch einen normalen Blocktransformator mit üblicher Kurzschlußspannung von ca. 10 % auf Werte unter 4 zu reduzieren. Bei praktisch unverändertem Transformatorpreis kann die Kurzschlußspannung vergrössert werden, so dass mit der gleichen Schaltung bei doppelter Kurzschlußspannung Anlaufströme kleiner als 3 mal

33'652 - 657

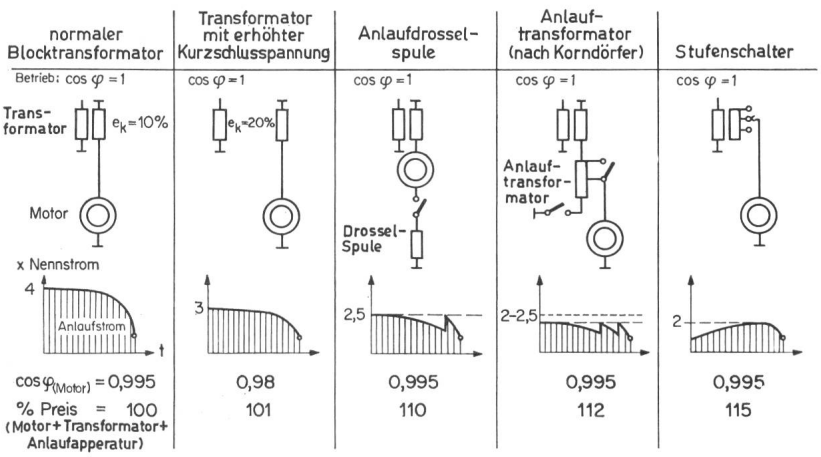

Fig. 1
Anlauf von Synchronmotoren in Blockschaltung
(30 MW, 1500 U./min)

Nennstrom eingehalten werden können. Der Motor muss dabei im Betrieb den grösseren Blindlastanteil des Transformators decken, wird daher etwas teurer, was in Fig. 1 durch eine kleine Preiserhöhung um ca. 1 % dargestellt ist.

Die weitere Reduktion des Anlaufstromes auf Werte unter 2,5 mal Nennstrom erfordert in den meisten Fällen zusätzliche Anlaufapparaturen, welche den Gesamtpreis in der Grössenordnung von 10...15 % erhöhen. Mit einer Anlaufdrosselspule können Werte unter 2,5 mal Nennstrom, mit einem Anlauftransformator in Korndörferschaltung je nach Anlaufmoment der Gruppe Werte von 2...2,5 mal Nennstrom und mit Stufenschaltern Anlaufströme bis maximal 2 mal Nennstrom eingehalten werden. Die Ausführung mit Stufenschalter bietet dabei den weiteren Vorteil des netzseitigen Sanftanlaufes, d. h. die Einschaltstromspitze kann je nach Lastmoment auf 0,5...1 mal Nennstrom reduziert werden, so dass bei geeigneter Wahl der Anlaufzeit die Möglichkeit besteht, schwache Netze entsprechend nachzuregulieren.

Beim Anlauf von Synchronmotoren werden in den massiven Polschuhen Spannungen induziert, welche Kurzschlussströme hervorrufen, die in den Polschuhen selbst, aber auch von Pol zu Pol fliessen. Bei einem vierpoligen 30-MW-Motor erreichen diese Ströme je nach Anlaufschaltung Werte in der Grössenordnung von 20 000 bis 40 000 A. Während die Kurzschlußströme in den Polschuhen keine besonderen Probleme stellen, muss dafür gesorgt werden, dass die Ströme zwischen den Polen fliessen können, ohne örtliche Überhitzungen oder gar Brandstellen zu verursachen. Es ist daher üblich, bei Motoren mit schweren Anlaufbedingungen die Polhörner stirnseitig mit Kurzschlussringen oder durch sog. Polverbinder zu verbinden.

Ich möchte auf eine weitere Möglichkeit hinweisen, die sich besonders für stark ausgenützte, schnellaufende Synchronmotoren grosser Leistung eignet. Die Pole stehen an und für sich im Bereich der Polklauen in direktem galvanischem Kontakt mit dem Rotorkörper. Dieser Kontakt wird auch im Stillstand durch die Verkeilung der Pole gewährleistet. Da jedoch die Güte des Kontaktes, besonders im Stillstand der Maschine, in hohem Masse von der Bearbeitungsgenauigkeit abhängt und nicht kontrolliert werden kann, ist es zweckmässig, einwandfreie Schraubkontakte für die Leitung der Querströme von Pol zu Pol vorzusehen.

Fig. 2 zeigt eine Lösung mit Kupferplatten, die stirnseitig am Rotorkörper befestigt sind und die äussersten Polklauen benachbarter Pole miteinander verbinden. In Fig. 3 ist eine andere Lösung dargestellt, die bei extremen Platzverhältnissen angewendet werden kann. Dabei wird die untere Seite des Polkerns über Kupferplatten mit dem Rotorkörper verbunden.

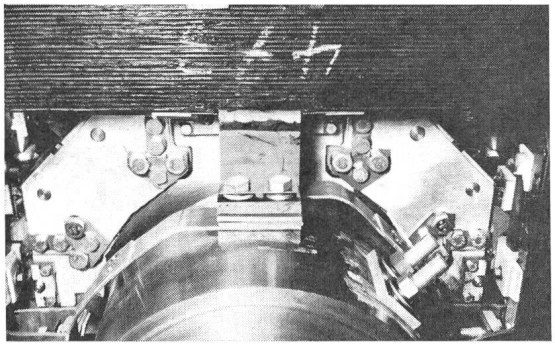

Fig. 2
Synchronmotor 30 MW, 1500 U./min
Polverbinder Klaue-Klaue

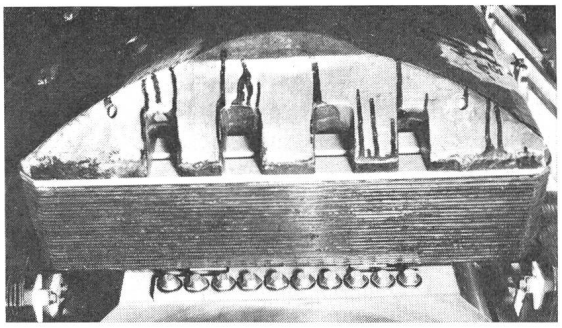

Fig. 3
Synchronmotor 30 MW, 1500 U./min
Polverbinder Polkern-Rotorkörper

Zum Abschluss noch einige Bemerkungen zum Problem der Laufruhe schnellaufender Pumpengruppen grosser Leistung. Bei 1500-tourigen Gruppen mit Leistungen von 30 und mehr MW treten bezüglich Laufruhe ähnliche Probleme auf wie bei zweipoligen Turbogruppen grosser Leistung mit Betriebsdrehzahlen von 3000 oder 3600 U./min. Besonders bei Maschinen mit vertikalen Achsen ist Vorsicht geboten, da dort die Laufruhe weitgehend von den Lagerungseigenschaften beeinflusst wird. Bei Pumpengruppen werden die Anforderungen an die Laufruhe durch die Bedingung verschärft, dass die Gruppe nicht nur bei Nenndrehzahl sondern auch bei jeder Rücklaufdrehzahl einwandfrei laufen muss.

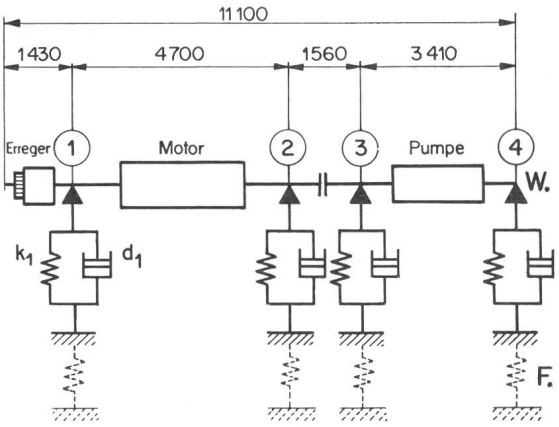

Fig. 4
Pumpengruppe Zmutt
W. Welle; *F.* Fundament-Steifigkeit

Lager

Nr.		1	2	3	4
Ölfilm-Steifigkeit *k*	t/cm	900	620	1030	1030
Ölfilm-Dämpfung *d*	ts/cm	10,8	7,5	12,3	12,3

Am Beispiel der 30-MW-Pumpengruppen Zmutt möchte ich die Einflussgrössen, welche für kritische Drehzahlen bestimmend sind, kurz erläutern. Die Gruppen laufen mit einer Nenndrehzahl von 1500 U./min und weisen Rücklaufdrehzahlen bis 2000 U./min auf. Fig. 4 zeigt die grundsätzliche Anordnung der vierlagerigen Gruppe, die mit ihrem starr gekuppelten Wellenzug von rund 11 m Länge mit Turbogruppen mittlerer Leistung verglichen werden kann. Die

Eigenfrequenzen des Schwingungssystems werden durch folgende Parameter beeinflusst:

a) Formgebung und Masse des Motor- und Pumpenrotors;
b) Elastizität der vier Lager;
c) Elastizität der Lagerabstützung, d. h. des Fundamentes.

Während früher die Laufruhe einer Gruppe durch Berechnung der kritischen Drehzahlen bei starrer Lagerung abgeschätzt wurde, ist es heute dank dem Einsatz digitaler Rechenmaschinen möglich, auch Lagerungseinflüsse rechnerisch zu erfassen. Die Federkonstante des Ölfilms oder besser die Ölfilmsteifigkeit ist eine Funktion der Lagerabmessungen und der Ölviskosität und erreicht bei den vier Führungslagern Zmutt Werte zwischen 600 und 1000 t/cm; für die viskose Ölfilmdämpfung resultieren Werte zwischen 7 und 12 ts/cm.

Im Gegensatz zu den Lagerelastizitäten, die heute analytisch und an Hand von Versuchen bestimmt werden können, bietet die Abschätzung der Elastizität der Lagerabstützung grössere Schwierigkeiten. Bei horizontalachsigen Maschinen ist sie durch die Elastizität der Lagerböcke in vertikaler und horizontaler Richtung sowie durch die Elastizität des Fundamentes gegeben. Bei vertikalachsigen Maschinen kommen dazu die Elastizitäten von Lagerbalken, Lagersternen, Gehäusen und eventuellen Abstützelementen zum Fundament. Die Steifigkeit der Lagerabstützung oder kurz die Fundamentsteifigkeit kann daher, je nach mechanischer und baulicher Gestaltung, stark variieren und Werte zwischen 200 und 2000 t/cm und mehr erreichen.

Bei der Vielzahl an Resonanzstellen in einem komplizierten Schwingungsgebilde, wie es mehrfach elastisch und gedämpft gelagerte Wellen darstellen, interessieren weniger die kritischen Drehzahlen an sich als vielmehr der Amplitudengang der Biegeschwingungen, wie er für das Beispiel Zmutt auf einer IBM 1620 berechnet wurde und in Fig. 5 dargestellt ist. Strichpunktiert ist der Amplitudengang der Pumpengruppe ohne Ölfilmdämpfung, ausgezogen der Schwingungsverlauf unter Berücksichtigung der Dämpfung eingezeichnet. Es ist dabei interessant festzustellen, dass im vorliegenden Schwingungssystem die Ölfilmdämpfung die

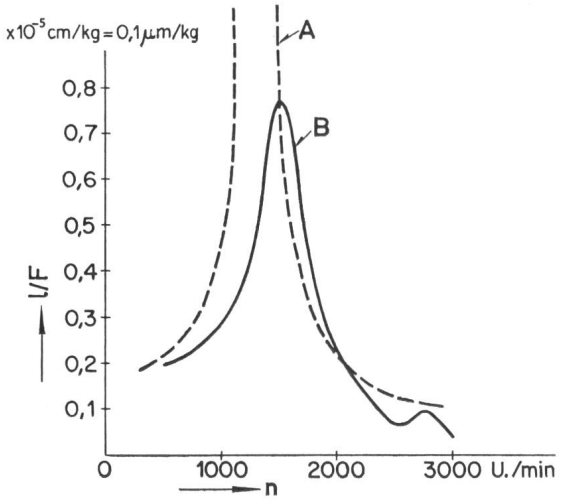

Fig. 5
Pumpengruppe Zmutt
Amplitudengang der Biegeschwingungen
l/F Wellenausschlag pro 1 kg Unwucht; *n* Drehzahl; *A* Welle und Ölfilmsteifigkeit; *B* Welle und Ölfilmsteifigkeit + Dämpfung

	1. kritische	2. kritische
(1) Rotor starr gelagert		
- max. Wellendurchmesser	2335	2673
- min. Wellendurchmesser	917	2119
- Ausführung Zmutt	1599	2553
(2) Rotor Zmutt mit Berücksichtigung von Oelfilm-Steifigkeit	1340	>3000
(3) wie (2) + Oelfilm-Dämpfung	1500	2780
(4) wie (3) + Fundamentsteifigkeit 500 U./cm	1340	2230
(5) wie (4) + Federelemente 1425 U./cm	1240	2130

Fig. 6
Pumpengruppe Zmutt
Kritische Drehzahlen

erste Systemkritische von 1340 auf 1500 U./min erhöht, während die zweite Resonanzstelle von einem Wert > 3000 U./min auf 2780 U./min reduziert wird.

Fig. 6 gibt eine Zusammenstellung der berechneten Eigenschwingungszahlen in U./min. Neben der ersten und zweiten Kritischen für die Ausführung Zmutt wurden unter Ziff. 1 auch die Grenzwerte für die gegebenen Abmessungen des aktiven Teils des Polrades untersucht. Wählt man, unbekümmert um die resultierenden grösseren Lagerreibungsverluste, die konstruktiv grösstmöglichen Motorwellendurchmesser, dann kann bei starrer Lagerung die erste Kritische um angenähert 50 %, die zweite Kritische um ca. 25 % erhöht werden. Reduziert man anderseits die Wellendurchmesser des Motors auf die aus mechanischen Gründen gerade noch zulässigen Minimalwerte, dann sinkt die erste Kritische auf 57 %, die zweite Kritische auf 83 % der für Zmutt gewählten Ausführung. Da es sich zeigte, dass auch mit dem schwersten Rotor des Pumpenmotors die erste Kritische unter Berücksichtigung der Lager- und Fundamentelastizität in den Betriebsbereich zwischen 1500 und 2000 U./min fällt, wurde beschlossen, die Gruppe überkritisch laufen zu lassen und den Rotor derart zu dimensionieren, dass dabei eine möglichst grosse Sicherheitsmarge in den Wellenbeanspruchungen erreicht wird. In Ziff. 2 sind die kritischen Drehzahlen des Rotors Zmutt mit Berücksichtigung der Ölfilmsteifigkeit, in Ziff. 3 die Werte unter zusätzlicher Berücksichtigung der Ölfilmdämpfung eingetragen.

Die grosse Unbekannte in der Berechnung der Systemkritischen ist die Fundamentsteifigkeit. Ziff. 4 zeigt, dass mit einem mittleren Wert von 500 t/cm die erste Kritische um ca. 10 %, die zweite Kritische um ca. 20 % reduziert wird. Da die kritischen Drehzahlen einer Gruppe erfahrungsgemäss nachträglich nur in sehr kleinen Grenzen variiert werden können, wurde bei den Pumpengruppen Zmutt beschlossen, erstmals Federelemente zwischen Lager und Fundament bzw. Statorgehäuse und Fundament einzubauen, deren Steifigkeit von 1400 t/cm bis ∞ variiert werden kann. Bei der angenommenen Fundamentsteifigkeit von 500 t/cm kann dadurch sowohl die erste als auch die zweite Kritische in der Grössenordnung von 100 U./min verlagert werden. Es ist damit möglich, Resonanzstellen von der Betriebsdrehzahl fernzuhalten und eine gute Laufruhe bei vernünftigem Wuchtaufwand auch bei überkritisch laufenden hydraulischen Anlagen zu gewährleisten.

Adresse des Autors:
K. Abegg, technischer Direktor, Maschinenfabrik Oerlikon, 8050 Zürich.