Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 40 (1949)
Heft: 24

Artikel: Rohrschmiedestücke für Turbogeneratoren : Entwicklung und Fortschritte

Autor: Novák, Jii

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056432

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: 12.12.2025

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

Rotorschmiedestücke für Turbogeneratoren

Entwicklung und Fortschritte

Von *Jiří Novák*, Plzeň (Tschechoslowakei)

621.313.322.1—253

Der Verfasser beschreibt die Entwicklung der Herstellung grosser Schmiedestücke (Rotorkörper für Turbogeneratoren). Insbesondere werden die aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Anwendung von hochlegierten und lufthärtenden Stählen beschrieben. Er wirft die Frage auf, ob nicht durch Weglassung der zentralen axialen Bohrung die Beanspruchungen so reduziert werden könnten, dass auch bei grössten Durchmessern von Rotoren mit Material geringerer Festigkeitswerte auszukommen wäre im Hinblick auf die heute mögliche Homogenität des Materials und Entwicklung der zerstörungsfreien Prüfmethoden (Ultraschall).

L'auteur présente un aperçu du développement de la fabrication de grandes pièces forgées (corps de rotors pour turbo-alternateurs) et indique en particulier quelles furent les difficultés rencontrées dans l'emploi d'acier à haute teneur d'alliages et trempés à l'air. Il estime qu'en supprimant l'alésage central les contraintes pourraient être réduites à tel point qu'il serait possible d'utiliser, même pour les rotors des plus grands diamètres, un métal présentant une résistance moins élevée, ceci d'autant plus que les métaux actuels peuvent être rendus très homogènes et que l'on dispose maintenant de méthodes d'essais aux ultra-sons sans destruction des matières.

Das allgemeine technische Streben im Turbogeneratorenbau, bei kleinstem Gewichte grösste Leistungen zu erzielen, war und ist noch immer auch eine Frage der Fabrikation des Turborotors, da gerade dieser Teil die grössten Herstellungsschwierigkeiten bereitet.

Nach dem ersten Weltkriege waren die Erfahrungen mit den Eigenschaften der für die Rotoren verwendeten Stähle sehr gering. Die führenden elektrotechnischen Firmen steigerten zwar ihre Ansprüche an die mechanischen Werte der Rotorstähle, aber die damaligen Prüfungsmethoden der Rotorschmiedestücke gaben kein richtiges Bild über die Qualität des Erzeugnisses. Die Proben entnahm man aus dünnen an beiden Seiten des Rotorballens vorgesehenen Proberingen, während man über

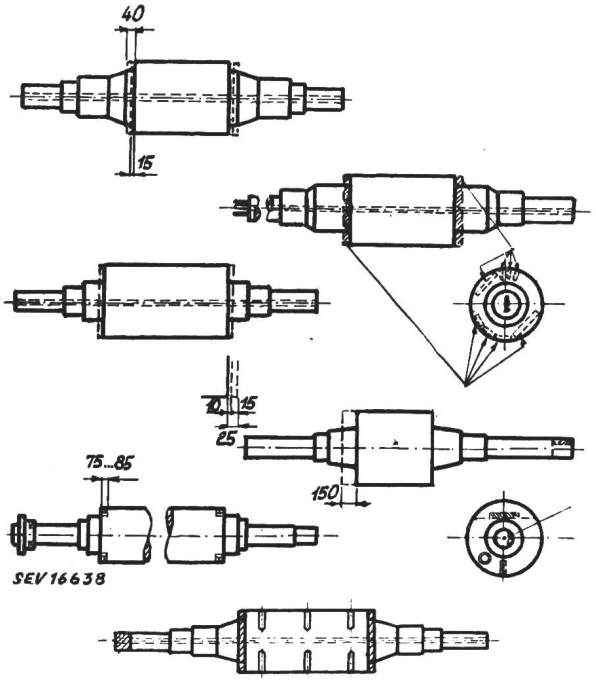


Fig. 1
Verschiedene Entnahmemöglichkeiten von Probestücken aus dem Rotorballen

die Eigenschaften im Innern des Ballens dadurch keine richtigen Kenntnisse erhielt (Fig. 1). Die Hersteller wählten die richtigen Stahlsorten, um den Anforderungen an die Proben aus den Ringen gerecht zu werden.

Später wurde das Material durch tiefe, radiale, bis an die achsiale Bohrung gehende Bohrkerne auch im Innern geprüft (Fig. 1). Es muss betont werden, dass die Schmiedestücke in ihrer ganzen Länge achsial durchgebohrt wurden, um etwaige innere Fehler, nämlich Lunker, Risse, Sandeinschlüsse und dergleichen festzustellen. Manche Firmen prüften die grossen Rotoren auch durch Zerreißstäbe aus den ausgebohrten Achsialbohrkernen, was aber bei den vor der Vergütung vorgebohrten Rotoren zu Fehlschlüssen führen konnte.

Diese verschärften Prüfverfahren brachten überraschende Resultate sowohl für den Hersteller, als auch für den Verbraucher, und zwar hauptsächlich bei den in Öl vergüteten Rotorkörpern. Das vergütete Schmiedestück zeigte eine bedeutende Senkung der Streckgrenze und des Festigkeitswertes des Materials in der Mitte des Stückes gegenüber

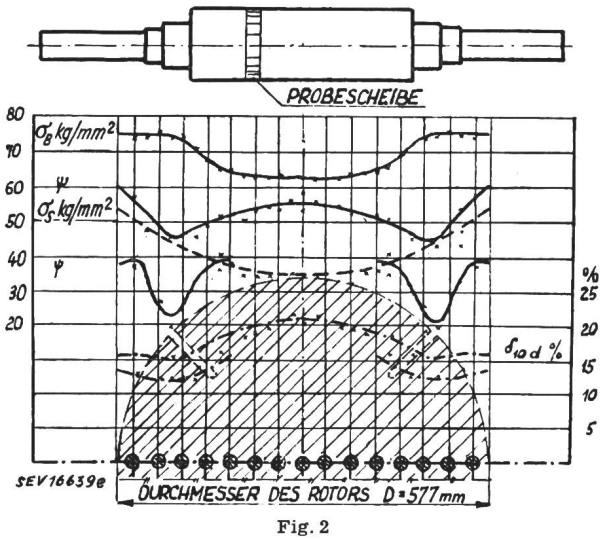


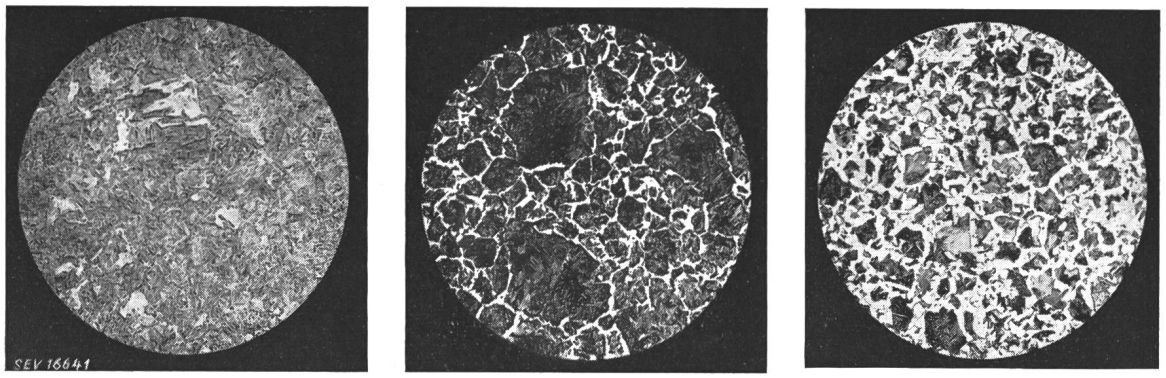
Fig. 2
Änderung der Festigkeit im Rotorkörper
Chemische Zusammensetzung: C : 0,33 %, Ni : 0,88 %, Mn : 0,75 %, Cr : 0,25 %
σ_B Zugfestigkeit bei Bruch
σ_S Zugfestigkeit an der Streckgrenze
ψ Einschnürung
δ Bruchdehnung

den Werten an der Oberfläche. Bei den schwachlegierten Stählen waren die Werte der Streckgrenze und Festigkeit und ihr gegenseitiges Verhältnis in der Mitte des Stückes nicht höher, als die Werte des Materials im bloss geglühten Zustande (Fig. 2).

Es war daher selbstverständlich, dass die Prüfvorschriften einiger Abnehmer weiter verschärft wurden, und man verlangte auch Garantiewerte für die Proben aus den radialen und achsialen Bohrkernen. Gleichmässigere mechanische Eigenschaften sollten durch bessere Durchvergütung bei Einführung der Vergütungsnuten und Ölzirkulation in der achsialen Bohrung erzielt werden. Aber die Kühlwirkung des Öles in der Bohrung war so gering und die besser durchvergütete Zone so dünn, dass sie beim Fertigbohren beseitigt wurde. Auch der Einfluss der Vergütungsnuten wurde überschätzt. Als einziger gangbarer Weg zeigte sich die Verwendung höher legierter Stahlsorten. So kam es zur Verwendung der [0,5 % Cr, 1½ % Ni] — [3 % Ni] — [1 % Cr, 2 % Ni, 0,20 % Mo] und ähnlicher Stähle. Es ist begreiflich, dass die Entwicklung von niedrig zu höher legierten Stählen ging, bis man zu den heutigen Stahlsorten gelangte.

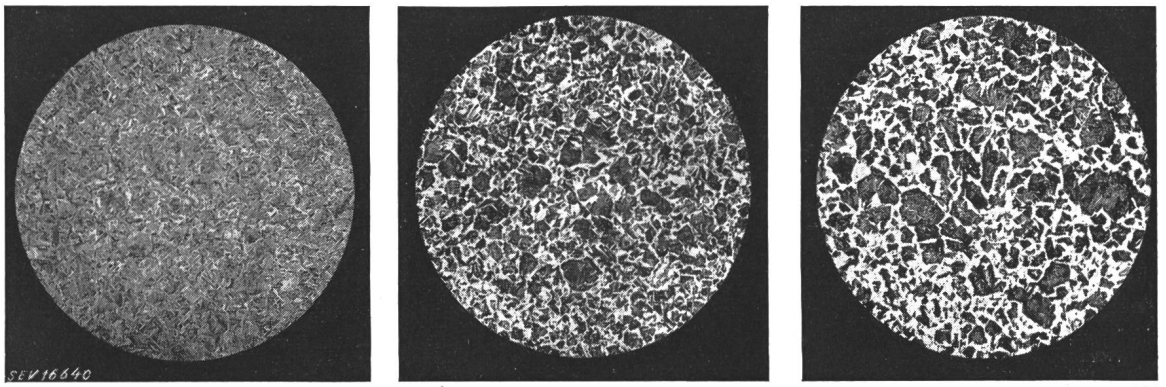
Mit der Verwendung von höher legierten und schlechter vergiessbaren Stählen musste man zunächst nicht eben billige Erfahrungen sammeln, weil man gewöhnt war, diese Stähle nur in der Kanonenfabrikation zu verwenden, wo gerade der gefährlichste, weniger homogene Teil des Blockes — nämlich seine Mitte — durch Ausbohrung beseitigt wurde. Darum gingen die Hersteller mit keiner grossen Lust an die hochlegierten Stähle heran. Aber auch manche elektrotechnische Firmen hatten keine Lust, diese Stähle zu verwenden, weil sie die inneren Spannungen der vergüteten Körper fürchteten.

In Tabelle I sind Durchschnittswerte für Proben von drei Materialgruppen angeführt. Diese wurden mehreren vergüteten Stücken entnommen, und zwar sowohl den Proberingen als auch den Radialbohrkernen. Die Tiefe der Bohrkerne war 150...180 mm.



a *b* *c* × 100

Fig. 3
Mikrogefüge des Rotorstahles mit 0,5 % Cr, 1,5 % Ni
a Oberfläche
b Radialkern aussen
c Radialkern innen



a *b* *c* × 100

Fig. 4
Mikrogefüge des Rotorstahles mit 3 % Ni
a; b; c wie bei Fig. 3

Durchschnittliche Werte der Zugfestigkeit an der Streckgrenze σ_S und der Zugfestigkeit bei Bruch σ_B von drei Materialproben

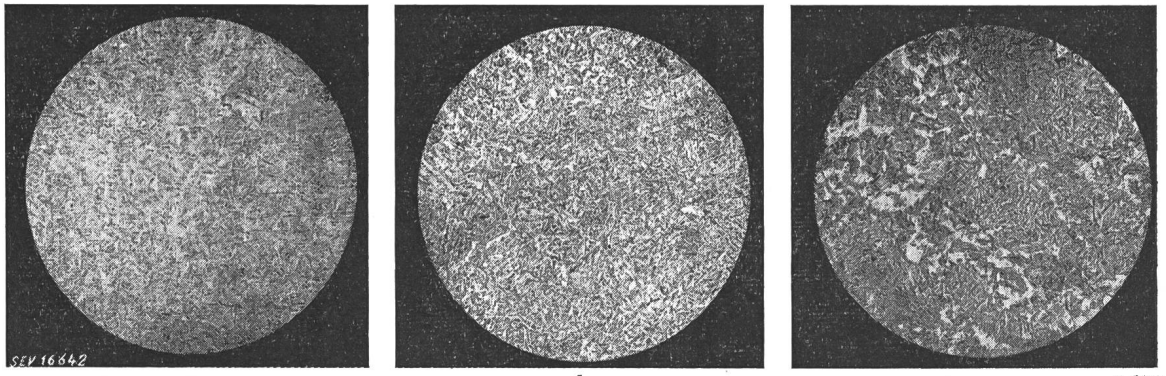
Tabelle I

Stahlsorte	σ_S Ring	σ_S Radial-Bohrkern	Unterschied s	σ_B Ring	σ_B Radial-Bohrkern	Unterschied B
3 % Ni	47,2	41,5	5,7	69,2	65,7	3,5
Cr-Ni schwach legiert .	47,5	39,0	7,5	72,1	66,7	5,4
Cr-Ni-Mo schwach leg.	56,4	50,3	6,1	72,9	69,2	3,7

Die Senkung des Wertes σ_S zwischen Oberfläche und der Mitte des Stückes betrug 8...10 kg/mm².

Die Mikrostrukturaufnahmen (Fig. 3, 4, 5) geben ein Bild über die Homogenität bzw. Heterogenität des Materialgefüges dieser Gruppen. Es zeigt sich, dass nur die Aussenzonen eine richtige Vergütung durchgemacht haben. Mit zunehmender Tiefenlage nimmt die Struktur immer mehr den Charakter eines geglühten Materials an. Die günstige Wirkung des Molybdäns ist auch bei dem schwachlegierten Stahl deutlich zu ersehen.

Der Abfall der mechanischen Werte in den inneren Partien wurde bis zur Zeit einiger «Explosionen» von Rotorkörpern als ein unabwendbares Übel in Kauf genommen. Die Prüfung der havarierten Stücke brachte als Folge eine Verschärfung der Übernahmevorschriften mancher Abnehmer mit der Forderung nach einer strukturellen Homogenität des Materials im ganzen Körper. Diese Homogenität wurde in manchen Fällen durch tiefe radiale, bis zur achsialen Bohrung reichende Bohrkerne geprüft. Auch die Reinheit der achsialen Bohrung selbst wurde mit neuen verschärften Methoden festgestellt.



a *b* *c* × 100

Fig. 5
Mikrogefüge des Rotorstahles mit Ni, Cr, Mo
a; b; c wie bei Fig. 3

Nach genügender Abklärung und gesammelten neuen Erfahrungen kann man annehmen, dass diese strukturelle Ungleichmässigkeit nicht die Ursache der «Explosionen» war. Bei der Prüfung der «explodierten» Stücke hatte man viel ernstere Fehler, nämlich Flocken, Seigerungsrisse und dergleichen gefunden. Nach Rikli [1] [1]) und Pohl [2] waren die Rotorkörper auch durch hohe innere Spannungen belastet. An der Ermüdung des Materials der «explodierten» Körper kann man zweifeln und die Erklärung durch Ermüdungsbrüche nur der Mode der damaligen Zeit zuschreiben. Eher darf man für die Havarie den Mangel an geeigneter Konstruktion oder an Bearbeitungserfahrungen verantwortlich machen.

Obschon die Ursache der «Explosionen» diese oder jene war, die Forderung nach struktureller Homogenität ist geblieben. Sie konnte nur durch eine entsprechende Legierung der Stähle befriedigt werden, und die Hersteller mussten zu noch viel schwieriger giessbaren Stählen greifen. Auf dem europäischen Kontinent lösten die Hersteller diese Frage durch Verwendung von vergütetem Cr-Ni-Mo-Stahl (sorbitische strukturelle Homogenität), oder geglühtem Ni-V-Stahl (perlitische strukturelle Homogenität). Die erste Gruppe war durch «Krupp» vertreten, die zweite durch die Skodawerke.

Der Einfluss des Blockes auf die Qualität des Schmiedestückes

Über dieses Thema wurden einige Arbeiten [3] in Zeitschriften veröffentlicht, die der Elektrotechniker normalerweise nicht in die Hand bekommt, und sie behandeln den ganzen Stoff eher vom Gesichtspunkt des Schmiedes und Stahlwerkes aus. Darum soll folgende Abhandlung direkt auf das Rotorschmiedestück bezogen werden.

Fig. 6
Saugtrichter eines im Sand abgegossenen Stahlblockes
(Baumannabdruck)

Es ist allgemein bekannt, dass das spezifische Volumen des Stahles im flüssigen Zustande grösser ist als im festen. Diese Eigenschaft verursacht beim Erstarren des Stahles, der in eine Form vergossen wird, die Bildung eines Saugtrichters. Fig. 6 zeigt einen in Sand abgegossenen Block.

Um beim Giessen des Ingots den erwähnten Trichter unschädlich zu machen, wird der Stahl in eine entsprechende Gusseisenform (Kokille) vergossen, auf welche eine mit Schamotte ausgekleidete «Haube» aufgesetzt wurde. So bildet sich der Trichter innerhalb der Haube im sog. Kopfe des Blockes. Dabei bildet der eigentlich überschüs-

[1]) Literatur siehe am Schluss.

sige Stahl im genannten Kopfe eine Reserve für den in der Kokille früher erstarrenden Stahl. Das Reservematerial wird beim Erstarren des Blockes in diesen nachgesaugt. Derart wird eine bessere Homogenität im Ingot erzielt. So kann man bis zu einer bestimmten Grösse bzw. einem bestimmten Gewicht einen homogenen Ingot mit den erforderlichen Abmessungen erreichen.

Das Erstarren von schweren Blöcken geht aber sehr langsam vor sich, so dass der Stahl im Kopfe und in der Mitte des Blockes immer dickflüssiger wird. Im Momente der spontanen Erstarrung der innersten Partien kann daher der Kopf die Aufgabe des Reservoirs an flüssigen Stahl nicht mehr gut erfüllen und so bildet sich in einer bestimmten Entfernung unterhalb des Trichters eine zentrale Materialpartie mit schwammigem und lockerem Gefüge mit makro- und mikroskopischen Hohlräumen. Neben dieser Unhomogenität zeigen die abgegossenen Blöcke — abgesehen von der Kristallsegregation — noch eine andere Ungleichmässigkeit. Flüssiger Stahl ist kein absolut reines Metall. Er ist verunreinigt durch nichtmetallische Elemente, z. B. Sulfide, Phosphide, Oxyde, Silikate, Gase, kurz, durch bei der Erschmelzung entstandene Reaktionsbestandteile. Diese Elemente haben niedrigeres spezifisches Gewicht und trachten, aus der Schmelze herauszuschwimmen. Bei dem Erstarrungsprozess werden diese Elemente durch das erstarrende Metall von der Wand der Kokille in das Innere gedrückt. Wenn auch das Innere zu erstarren beginnt, haben diese Elemente keine Bewegungsfreiheit mehr und bleiben im Guss eingeschlossen. Sie bilden dann «Seigerungen», «Schattenlinien», «Lignes sombres», «Ghost lines» (Fig. 7).

Der untere Teil des Blockes — der Boden — ist natürlich weniger durch die Einschlüsse verunreinigt. Dieser Teil ist auch von schwammigen Stellen frei. Nach Art, Grösse und Verteilung der beschriebenen Unhomogenität richtet sich die Ausnützung der Blöcke für das Schmiedestück. Hier liegt auch der Grund für die Praxis, für Schmiedestücke hoher Qualität nur den unteren Teil des Ingots — ca. 50 % des Gewichtes — zu verwenden. Diese Praxis hat zur Folge, dass man für Rotor-Schmiedestücke, die an und für sich schon schwer genug sind, unverhältnismässig grosse Blöcke abzugiessen pflegt, bei denen alle beschriebenen Mängel, poröse Stellen, Seigerungen usw., noch unvermeidlicher sind und dadurch die Qualität des Stahles noch mehr verschlechtern. Daher kann bis jetzt kein Stahlwerker garantieren, dass der für das Schmiedestück zu verwendende Teil des Blockes vollkommen frei von diesen Fehlern ist.

Das lockere Gefüge im Innern des Blockes kann durch richtiges Schmieden zusammengeschweisst werden. Dieses Wörtchen «verschweisst» hatte nicht gerade allzu guten Klang für die Propaganda der Stahlqualität solcher wichtiger Schmiedestücke und wird noch immer durch den Ausdruck einer «richtigen Durchschmiedung» ersetzt. Mag es klingen wie es wolle, der Erfolg ist eine unbestreitbare Tatsache.

Das Verschweissen gelingt nur unter Anwendung genügend hoher Drücke beim Schmieden und bei einer genügenden Querschnittverminderung, d. h. bei einem grossen Verhältnis des Querschnitts des Blockes zum Querschnitt des Schmiedestückes.

Fig. 7
Im Guss eingeschlossene «Seigerungen»
(Baumannabdruck)

Diese Forderung steht im Widerspruch zur Forderung nach der richtigen Durchschmiedung in Bezug auf die höchsten Materialwerte in der Querrichtung hinsichtlich der Dehnung, der Kontraktion und der Kerbzähigkeit.

Fig. 8 zeigt den Einfluss der Durchschmiedung auf diese Werte bei einem perlitischen Manganstahl von 65...70 kg/mm² Festigkeit und verschiedener Stärke der Segregation. In der Figur ist sehr be-

achtenswert der starke Abfall dieser Werte bei dem Stahl Nr. 2, der nach Baumannabdruck seigerungsfrei und in Bezug auf den P- und S-Gehalt noch verhältnismässig rein ist. Man kann aber nicht anders schliessen, als dass die Gründe dieses Verhaltens nur die andere Erschmelzungsweise und der höhere P- und S-Gehalt gegenüber dem Elektrostahl sind.

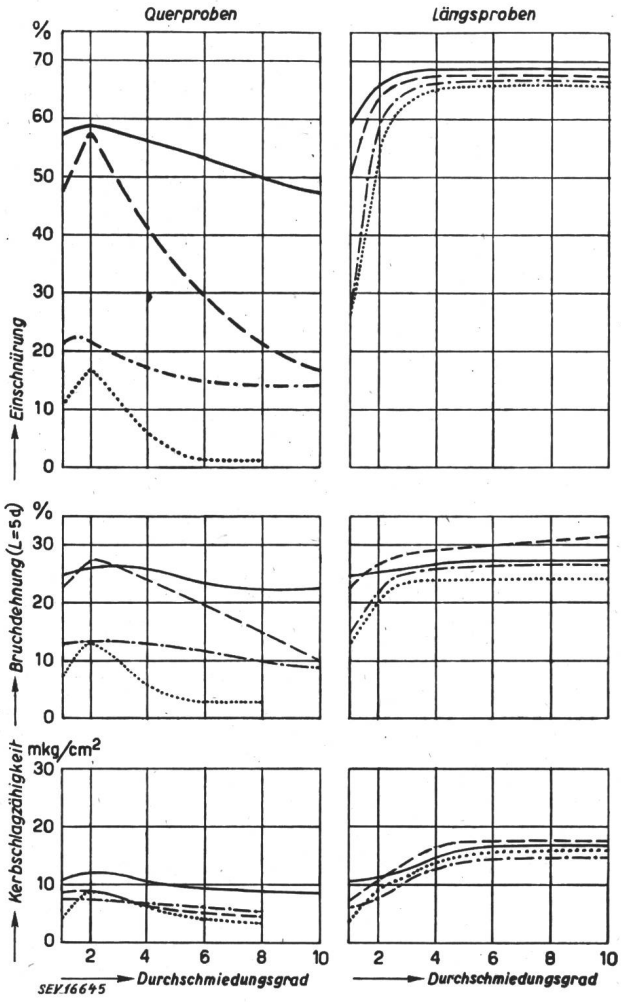


Fig. 8
Einfluss der Verschmiedung auf die Zähigkeitswerte von verschieden geseigerten Stählen

——— Schmiedung 1, seigerungsfrei (Elektrostahl)
— — — — Schmiedung 2, seigerungsfrei
—·—·— Schmiedung 5, mittelstarke Seigerung
····· Schmiedung 6, sehr starke Seigerung

Sehr starken Abfall der Dehnung und Kontraktion zeigen die Proben aus den geseigerten Partien der Blöcke. Das sind die Partien, die im Baumannabdruck (Fig. 7) die Seigerungen in Form von Streifen und gröberen Punkten zeigen. Diese Seigerungen sind aber bei grossen Blöcken eine noch häufigere Tatsache als das lockere Gefüge. Dies gilt nicht nur für einen Manganstahl, sondern auch für Ni-, Ni-V-, Cr-Ni- oder Cr-Ni-Mo-Stahl und auch für den Fall, dass er sauer erschmolzen wird.

Aus dem Gesagten ist zu ersehen, dass eine intensive Durchschmiedung die Zähigkeitswerte in der Querrichtung stark verschlechtert. Der günstigste Durchschmiedungsgrad 1:2...1:3 bietet keine Garantie für das erwünschte Verschweissen von porösen Stellen und ähnlichen Fehlern. Durch richtige Führung des Schmiedeprozesses kann das Verschweissen der Blockheterogenitäten bei annehmbaren Qualitätswerten in der Querrichtung mit genügender Sicherheit gelingen und sogar die Qualität der stark geseigerten Zone verbessert werden. Aber verhüten kann man nicht, dass die Proben, die aus diesen Partien (Radialbohrkerne) entnommen werden, vereinzelt sehr niedrige Werte der Dehnung und Kontraktion zeigen. Darum weigern sich manche Hersteller, ausser für Streckgrenze, Festigkeit und Rissfreiheit der Bohrkerne auch noch für die Zähigkeit etwaige Garantiewerte zu übernehmen.

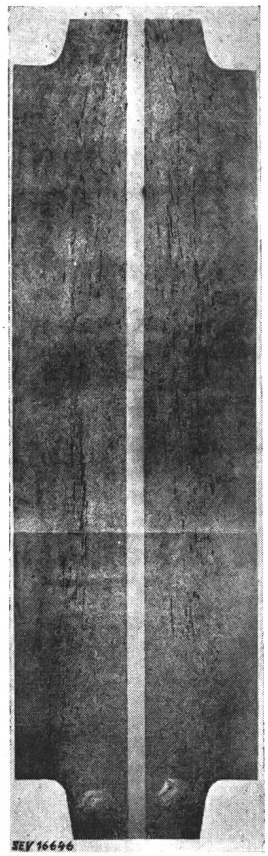


Fig. 9
Längsschnitt eines Rotorballens (Baumannabdruck)

Fig. 9 zeigt den Baumannabdruck des Längsschnittes eines Rotorballens und die Stellen, aus denen entnommene Proben in den Zähigkeitswerten durch Einfluss der Seigerungen versagen können.

Der Einfluss des Mikrogefüges auf die mechanischen Eigenschaften

Der Einfluss der Seigerungen auf die Probenergebnisse kann durch das sekundäre Mikrogefüge gemildert werden. Dieses Gefüge ist von der Zusammensetzung des Stahles und der Wärmebehandlung des Schmiedestückes abhängig. Das zeigt Tabelle II.

Die angeführten Werte sind Durchschnittswerte von Proben, welche einer grossen Zahl von vergüteten und geglühten Rotorkörpern entnommen wurden. Bei den vergüteten Rotorkörpern ist die paralysierende Wirkung der sorbitischen Struktur auf den schädlichen Einfluss der Seigerungen gegenüber der perlitischen Struktur gut erkennbar.

Bei beiden Stahlsorten handelt es sich um einen raffinierten, sauren S.M.-Stahl. Fig. 10 und 11 zeigen das Mikrogefüge beider Gruppen.

Auch die magnetischen Eigenschaften des vergüteten Stahles sind keineswegs schlechter als die des geglühten.

Auf Grund dieser Tatsachen kann die Frage gestellt werden: «*Geglühte oder vergütete Rotorkörper?*»

Einfluss der Wärmebehandlung auf die Eigenschaften des Schmiedestückes

σ_S Zugfestigkeit an der Streckgrenze; σ_B Zugfestigkeit bei Bruch; δ_5 Dehnung bei Bruch; ψ Einschnürung; Z Kerbzähigkeit

Tabelle II

Vergüteter Körper					
Probenentnahme	σ_S	σ_B	δ_5	ψ	Z Mesnager
Tangentiale und radiale Proben aus dem Ring . .	54,3	74,2	22,4	59,7	9,2
Proben aus den Radialbohrkernen	52,4	70,8	19,4	49,5	7,2

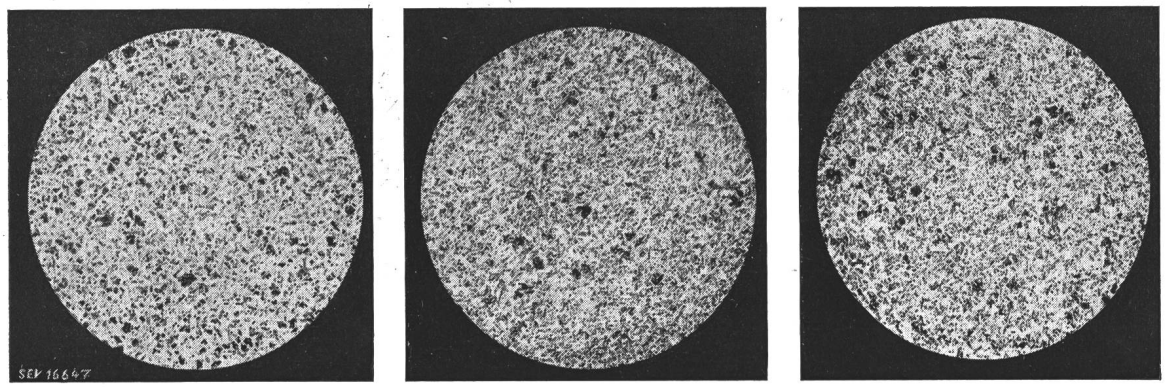
Geglühter Körper					
Probenentnahme	σ_S	σ_B	δ_5	ψ	Z Mesnager
Tangentiale und radiale Proben aus dem Ring . .	48,3	71,0	20,3	39,7	5,0
Proben aus den Radialbohrkernen	44,7	68,9	16,3	25,4	3,7

Diese Frage war schon Gegenstand einiger Abhandlungen. Die angelsächsische Welt blieb bis zum Weltkriege bei den geglühten Stählen. (Nachkriegsangaben fehlen dem Verfasser.) Auf dem europäischen Kontinent sind die Arbeiten von Rikli [1] und Pohl [2] die bekanntesten. Es ist dem Verfasser nicht bekannt, ob sich zu den erwähnten Abhandlungen auch die Hersteller äusserten.

In Bezug auf die mechanischen Werte ist der vergütete Rotorkörper gegenüber dem geglühten unbestritten im Vorteil. Dies zeigt das bereits Gesagte und auch die Arbeit von Pohl. Heute werden hingegen die geglühten Körper bereits aus einem Material von 45....50 kg/mm² Streckgrenze gegenüber den von Pohl angeführten 37 kg/mm² hergestellt. Aber in der letzten Zeit gingen einige elektrotechnische Firmen auf die Forderung von 55, ja sogar von 60 kg/mm² Streckgrenze über. Der Unterschied von 10 kg/mm² im Werte der Streckgrenze zu Gunsten des vergüteten Materials ist für den Konstrukteur sehr verlockend. Es bleibt aber noch die Frage *der inneren Spannungen in den vergüteten Rotorkörpern* offen.

Pohl zeigte, dass das vergütete Schmiedestück keine grösseren inneren Spannungen zu haben braucht als das geglühte. Dies steht im Widerspruch mit den Behauptungen Riklis. Der Verfasser stimmt Pohl zu. Rikli hat aber soweit recht, dass die vergüteten Rotorkörper, die in der «Lehrzeit» hergestellt wurden, durch sehr hohe innere Spannungen belastet sein konnten. Dafür spricht auch die Äusserung eines englischen Verbrauchers um 1930, der die Verwendung von vergüteten Rotorkörpern ablehnte, nachdem sich bei einigen Schmiedestücken beim Fräsen der Nuten die Stege deformierten. Aus dieser Tatsache schloss er auf die Grösse der Eigenspannungen.

Auf Grund seiner Fabrikationserfahrungen stimmt der Verfasser mit Rikli überein, dass an den «Explosionen» von Rotorkörpern der Herstellungsjahre um 1925 herum die inneren Spannungen eine nicht unbedeutende Rolle gespielt haben. Die heutigen Fabrikationserfahrungen sind aber schon so gross, dass man die Eigenspannungen als schädlichen Faktor unberücksichtigt lassen kann. Man wird sich aber manchmal bei den vergüteten Rotoren mit niedrigeren Werten der Kerbzähigkeit als Folge der Anlaßsprödigkeit des Stahles zufrieden geben müssen. Aber wozu übertriebene Werte der Kerbzähigkeit bei Rotorkörpern?



a *b* *c* × 100

Fig. 10
Mikrogefüge des geglühten Rotorstahles mit Ni, V
a; b; c wie bei Fig. 3

Also auch in Bezug auf die inneren Spannungen braucht der geglühte Rotorkörper gegenüber dem vergüteten nicht im Vorteil zu sein.

Wie steht es aber mit der Herstellung in der Stahlhütte? Der stark legierte Cr-Ni-Mo-Stahl ist viel schwieriger vergiessbar als niedriger legierter Ni-Stahl oder sogar Kohlenstoffstahl. Als Folge ergibt sich die grössere Wahrscheinlichkeit der Entstehung aller beschriebenen Fehler.

Eine höhere Legierung bringt auch ein grösseres Risiko mit sich, dass sich im Abguss Lunkerstellen bilden und dass im Schmiedestück während der technologischen Prozesse in der Schmiede, Glüherei und Vergüterei Risse (Flocken, Seigerungsrisse,

Spannungsrisse) entstehen. Das Risiko ist am grössten dort, wo ein geglühtes Schmiedestück mit Höchstwerten für vergütetes Material verlangt wird. Dieser Forderung kann nur durch einen entsprechend hoch legierten Stahl entsprochen werden, welcher infolge seiner Zusammensetzung schon den Lufthärtestählen sehr nahe kommt, um eben die gewünschte sorbitische Mikrostruktur durch einfache Luftvergütung zu erzielen.

Das Vergiessen und Verarbeiten von Blöcken im Gewichte von mehreren Dutzend Tonnen aus solchen Stählen ist das schwierigste Problem der Stahlerzeugung und muss begreiflicherweise auch entsprechend bezahlt werden. Es kann aber bezweifelt werden, ob es unbedingt nötig ist, bis an solche Grenzen der Leistungsfähigkeit der Hütten zu gehen.

Abgesehen von den Fällen, wo nach Rikli der Hersteller gezwungen ist, nur wegen einiger Paradezahlen solche Stähle herzustellen, kann gefragt werden, wie weit die Forderung der Konstrukteure nach der höchsten Streckgrenze die Hüttenfabrikation beeinflusst.

men können, klargelegt werden, abgesehen von dem primären Lunker, der in dem verlorenen Kopfe des Blockes bleibt.

Materialfehler, die in den Rotorschmiedestücken vorkommen

Es handelt sich um folgende Fehler (Fig. 12):

1. Bei der Erstarrung des Blockes entstandene Hohlräume als Folge des verschiedenen Volumens von flüssigem und festem Stahl, sogenanntes schwammiges oder lockeres Gefüge.

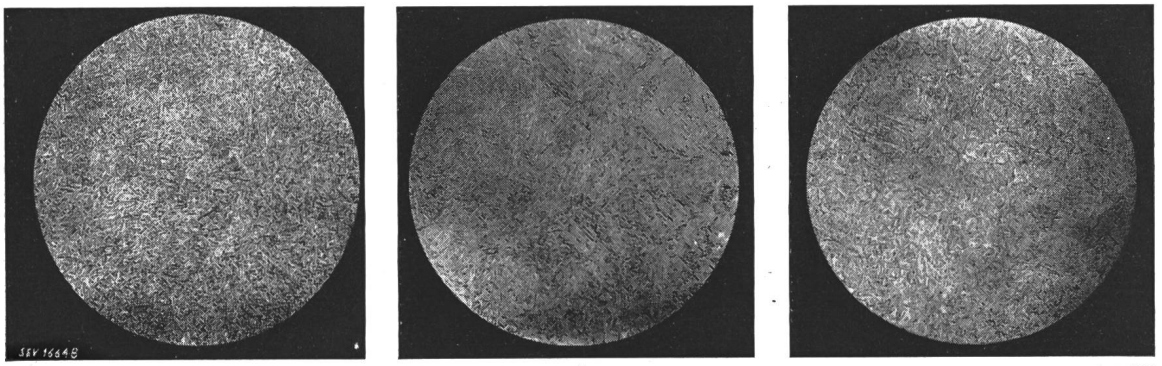
2. Sand- oder Schamotteeinschlüsse, die beim Giessen des Blockes aus der Pfanne oder aus dem ausgemauerten Kopfe mitgerissen werden können.

3. Seigerungsrisse und Flocken als Spannungsrisse.

4. Längsrisse als Oberflächenrisse aus dem Gussblock (Risse in den Kantenseigerungen) oder als Spannungsrisse beim Glühen oder Härten des Schmiedestückes.

5. Querrisse als innere Spannungsrisse.

6. Schmiederisse.



a *b* *c* × 100

Fig. 11
Mikrogefüge des stark legierten Rotorstahles mit Cr, Ni, Mo vergütet
a; b; c wie bei Fig. 3

Nach Hunziker [4] stellt sich die achsiale Bohrung eine Schwächung des ganzen Körpers dar. Ohne Ausbohrung würde die Beanspruchung in der Mitte des Körpers nur etwa die Hälfte der Beanspruchung des gebohrten Körpers betragen. Mit anderen Worten: Bei gleicher Sicherheit würde man mit der Streckgrenze 25...30 kg/mm² auskommen, wo man heute 50...55 kg/mm² verlangt. Man könnte sich derart mit einem geglühten Kohlenstoff- oder schwach legiertem Stahl anstatt des hochlegierten und vergüteten Cr-Ni-Mo-Materials zufrieden geben.

Die Erzeugungsschwierigkeiten kann man also nur der Forderung nach der achsialen Bohrung zuschreiben. Weil diese Bohrung bloss der Qualitätskontrolle dient, kann die Frage gestellt werden, ob bei den heutigen Erfahrungen in der Hüttenfabrikation und bei Möglichkeit anderer Kontrollmethoden die Kontrolle der Rotorschmiedestücke durch diese Bohrung noch nötig ist. Es sollen vorerst alle Fehler, die in den Rotorschmiedestücken vorkom-

Ad. 1. Der erste Fehler tritt bei gewöhnlichem Kohlenstoffstahl oder schwachlegierten Stählen praktisch sehr selten auf. Bei den höher legierten Stählen ist die Neigung zu diesem Fehler grösser, je nach der Höhe der Legierung.

Wie weit diese Fehler, die gewöhnlich lokale, einige Kubikmillimeter grosse Hohlräume bilden, gefährlich sein können, sollte noch überprüft werden. Die Versuche von Rikli an zwei durch starke Lunker belasteten Scheiben geben ein sehr instruktives Bild. Nach diesen Versuchen scheint die Schädlichkeit dieser Fehler stark übertrieben zu werden. Ähnliche Fehler brauchen nicht gerade in der mittleren Partie an der Wand der Bohrung des Stückes zu liegen und können daher nicht unbedingt alle durch die achsiale Bohrung entdeckt werden. Man darf mit Sicherheit behaupten, dass sehr viele Rotorkörper mit diesen Fehlern im Betriebe laufen. Es kann sich dabei hauptsächlich um solche Schmiedestücke handeln, bei denen Feh-

ler dieser Art *lokal* ausgebohrt wurden. Diese Tatsache spricht auch dafür, dass die Ansicht über die Schädlichkeit dieser Fehler einer wirklichen Korrektur bedarf.

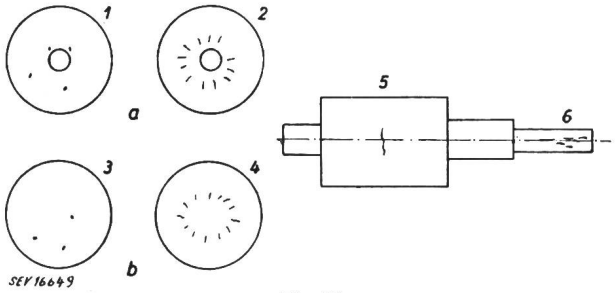


Fig. 12
Materialfehler, die in den Rotorschmiedestücken vorkommen

a bei durchgebohrten Blöcken
1 Lunkerstellen und Sandeinschlüsse
2 Seigerungsrisse und Flocken
b bei nicht durchgebohrten Blöcken
3 Lunkerstellen und Sandeinschlüsse
4 Seigerungsrisse und Flocken
5 Querrisse
6 Schmiederisse

Ad. 2. Die Sandeinschlüsse können dem ersten Fehler in der Schädlichkeit ziemlich gleichgestellt werden. Da die Sandeinschlüsse fast immer in grossen Partien des Stückes zerstreut auftreten, können diese Fehler auch bei der Bearbeitung der Oberfläche des Rotorkörpers entdeckt werden.

Ad. 3. Sehr gefährlich können die Seigerungsrisse und Flocken sein und zwar dadurch, dass sie eine scharfe Kerbe bilden und so eine bedeutende Konzentration von Spannungen verursachen. Dies gilt nicht nur für die Bohrung, sondern auch für die Wurzeln der Nutenstege. Sie treten nicht vereinzelt, sondern fast immer in wesentlicher Zahl im Rotorquerschnitt auf. Am meisten werden die stark geseigerten Zonen, welche im Querschnitt einen Ring in einiger Entfernung von der Mitte bilden, durch diese Fehler belastet.

Bei kleinem Durchmesser der Achsialbohrung brauchen sie nicht immer erfasst zu werden. Sie kommen bei mittel- und hochlegierten Stählen viel öfter vor als bei Kohlenstoff- oder schwachlegierten Stählen. Da diese Fehler regelmässig in Form von sehr feinen Haarrissen auftreten, können sie bei der Kontrolle der Achsialbohrung übersehen werden. Im Betriebe laufen sehr viele Rotoren auch mit diesen Fehlern.

Ad. 4. Die Oberflächenrisse, welche als Folge der Kristallisation bei der Erstarrung des Stahles in der Kokille entstehen, werden sehr oft schon beim Schmieden entdeckt und können durch richtige Schmiedezugabe beseitigt werden. Ihre Entdeckung auch während der mechanischen Bearbeitung macht keine Schwierigkeiten, ebensowenig wie die der Härterisse.

Ad. 5. Die inneren Querrisse, besser gesagt Quersprünge, wenn sie überhaupt noch vorkommen, sind nur die Folge einer unsachgemässen Behandlung des Ingots, des Halbfabrikates («Zaggels»), oder des Schmiedestückes selbst. Sie kamen früher am meisten vor, wenn das Schmiedestück infolge nicht genügend grosser Schmiedeöfen so geschmiedet wurde, dass eine Hälfte warm war, während die andere kalt blieb.

Eine Statistik über derartige, in den Achsialbohrungen von Rotorkörpern gefundene Fehler könnte beweisen, dass die heutigen Hüttenbetriebe in dieser Hinsicht keine groben Fehler begehen.

In seiner Praxis ist der Verfasser diesem Fehler bei den Rotorkörpern nicht begegnet. Sein Vorkommen ist ihm aus der Fabrikation anderer Schmiedestücke und aus der Arbeit Riklis bekannt. Da es sich immer nur um einen sehr groben Fehler handeln kann, wäre es sehr wünschenswert, sicherzustellen, ob durch eines der modernen Prüfverfahren (Ultraschall) dieser Fehler nicht mit genügender Sicherheit entdeckt werden könnte.

Ad. 6. Risse, die durch unsachgemässes Schmieden entstehen, kommen nur in den Wellenzapfen vor (zerschlagenes, gerissenes Material). Diese Risse kann man durch Achsialbohrung der Zapfen oder mit Hilfe der modernen Prüfverfahren ohne Achsialbohrung feststellen.

Es wurden absichtlich alle Fehler, die in den Rotorschmiedestücken gefunden werden können, auch solche, die heute infolge der Fortschritte der Fabrikation der Geschichte angehören, beschrieben. Fig. 12 veranschaulicht sie noch.

Schlussfolgerungen

Nach den Versuchen Riklis [1] bilden kleine Lunkerstellen und dementsprechend auch Sandstellen verhältnismässig nur sehr geringe Gefahrmomente. Seigerungsrisse und Flocken können durch radiale Bohrungen des Körpers erfasst werden. Risse in den Zapfen können durch Ultraschall mit Sicherheit festgestellt werden. Es kann also nur ein Fehler der Kontrolle entgehen, wenn der Rotorkörper in seiner ganzen Länge nicht durchgebohrt wird: der Querriss. Es scheint aber, dass dieser Fehler der Geschichte angehört, abgesehen davon, dass auch dieser Fehler wohl mit genügender Sicherheit durch Ultraschall erfasst werden könnte.

So darf also die Frage gestellt werden, ob das Festhalten an der achsialen Bohrung bei den heutigen technischen Fortschritten in der Herstellung und Prüfung des Rotorkörpers noch berechtigt ist, und weiter, ob wegen dieses historischen Fehlers bei der Fabrikation der Rotorkörper mit der Legierung bis an die Lufthärtestähle herangegangen werden muss. Ausdrücklich sei noch betont, dass bei so hoch legierten Stählen alle beschriebenen Fehler eher vorkommen können als bei reinen Kohlenstoff- oder schwachlegierten Stählen. Und gerade aus diesen letzterwähnten, verlässlicheren Stählen wäre es möglich, die Rotorkörper herzustellen, wenn die Ausführungen von Hunziker noch Gültigkeit haben und die Kontrolle durch achsiale Bohrung entfallen könnte.

Auf Grund seiner Erfahrungen mit der Fabrikation und Kontrolle nicht nur von Dutzenden, sondern von Hunderten von Rotorschmiedestücken verschiedener Qualitäten und Typen muss der Ver-

fasser die oben gestellte Frage verneinend beantworten. Die Sicherheit, mit der der Konstrukteur rechnet, scheint für alle Fälle genügend zu sein. Das zeigen die angeführten Versuche von Rikli und hauptsächlich die Betriebsfunktion von vergüteten und durch früher beschriebene Fehler belasteten Rotorkörpern, die in der Lehrzeit erzeugt wurden. Man kann behaupten, dass diese Schmiedestücke trotz der Kontrolle durch Achsialbohrung qualitativ viel schlechter waren, als die später erzeugten, und dass bloss aus dem Grunde, dass die Fabrikationserfahrungen der Erzeuger sowie die Kontrollmethoden der Verbraucher qualitativ weit hinter den heutigen lagen.

Durch die Beseitigung der Achsialbohrung wäre nicht nur die Hüttenfabrikation grösserer Einheiten erleichtert, sondern auch die Verwendung von Stählen mit besseren magnetischen und Schweisseigenschaften ermöglicht. Auch würde dadurch der Notbehelf, die magnetischen Eigenschaften durch Einpressung von Weicheisen in die Bohrung zu verbessern, erspart werden.

Nachdem die Kontrolle der Rotorschmiedestücke durch achsiale Bohrung eine internationale Gewohnheit darstellt, wäre eine internationale Diskussion zwischen dem Verbraucher und dem Erzeuger sehr erwünscht.

Möge diese Abhandlung als Anregung dazu dienen.

Literatur

[1] *Rikli, H.:* Mechanischer Sicherheitsgrad grosser Turbogeneratoren. Bull. SEV Bd. 21(1930), Nr. 11, S. 357...365.
[2] *Pohl, R.:* Mechanische Probleme bei grossen Turbogeneratoren. Elektrotechn. Z. Bd. 53(1932), Nr. 46, S. 1099... 1101; Nr. 48, S. 1151...1154.
[3] *Mauer-Korschan:* Stahl und Eisen 1933, S. 209...215. *Mauer-Gummert:* Stahl und Eisen 1934, S. 1281...1289. *Coupette:* Stahl und Eisen 1941, S. 1013...1022.
[4] *Hunziker, E.:* Grosse Dreiphasen-Generatoren. Bull. SEV Bd. 21(1930), Nr. 14, S. 445...455.

Adresse des Autors:
Ing. *Jiří Novák*, Kollárova 18, Plzeň, Č.S.R.

Die Eigenfrequenzen der einlagigen Zylinderspule bei Spannungsstössen

Von *B. Heller, J. Hlávka* und *A. Veverka*, Prag

621.318.4.015.33

Es werden die Eigenfrequenzen der einlagigen Zylinderspule bei Spannungsstössen unter Berücksichtigung der gegenseitigen Induktivität der einzelnen Windungen sowohl für die Spule mit geerdetem Wicklungsende, als auch mit freiem Wicklungsende berechnet. Die abgeleiteten Frequenzbeziehungen, welche die Abhängigkeit der zeitlichen Frequenz von der räumlichen Frequenz darstellen, werden eingehend besprochen.

L'auteur s'occupe du calcul des fréquences propres d'une bobine cylindrique à une seule couche, soumise à des chocs de tension, en tenant compte de l'inductance mutuelle des spires, dans le cas où l'extrémité de la bobine est mise à la terre et dans celui où l'extrémité est libre. Les rapports entre la fréquence dans le temps et la fréquence dans l'espace font ensuite l'objet d'une analyse détaillée.

Bekanntlich verhält sich eine Spule gegenüber Spannungsstössen wie ein kompliziertes, aus Induktivitäten und Kapazitäten zusammengesetztes Gebilde. Zu Beginn des Stossvorganges überwiegt der Einfluss der Kapazitäten, während später die Strom- und Spannungsverhältnisse hauptsächlich durch die Induktivitäten festgelegt werden. Im Zwischenbereich treten Ausgleichvorgänge auf, welche einen kontinuierlichen Übergang des Anfangszustandes in den Endzustand vermitteln.

Wird in erster Näherung die Spule als leitungsähnliches Gebilde aufgefasst und trifft ein rechteckiger Spannungsstoss von der Grösse U_1 auf die Spule auf, so ist nach bekannten Gesetzen die Spannung am Spulenanfang

$$U = 2\,U_1\,\frac{Z_s}{Z_s + Z_1} \qquad (1)$$

Dabei bedeutet Z_s den Wellenwiderstand der Spule und Z_1 den Wellenwiderstand der Leitung. Da $Z_s \gg Z_1$ ist, wird folglich

$$U = 2\,U_1$$

Für das Folgende wird $U = 1$ angenommen (Einheitsstoss).

I. Die Konstanten der einlagigen Zylinderspule

Jede Windung der Spule besitzt pro Längeneinheit, bezogen auf die Spulenachse, Kapazität gegenüber Erde von der Grösse C_1 und Kapazität gegenüber benachbarten Windungen von der Grösse C_2. Weiter ist jede Windung mit einem magnetischen Feld verkettet, welches aus dem Eigenfeld der betrachteten Windung und den Feldern, verursacht durch die übrigen Windungen der Spule, besteht. Für das resultierende magnetische Feld, welches mit der Windung am Ort x (gemessen längs der Spulenachse) verkettet ist, gilt daher:

$$\Phi(x) = \int_0^1 M(x, \xi)\, i(\xi)\, \mathrm{d}\xi \qquad (2)$$

Dabei bedeutet $M(x, \xi)$ den Koeffizienten der gegenseitigen Induktion zweier Windungen, welche sich an den Orten x und ξ befinden, $i(\xi)$ ist der Strom in der Windung (ξ). Weiter ist die axiale Länge der Spule der Einfachheit halber gleich eins angenommen.

Da der Stromverlauf in der Spule sich von Windung zu Windung ändert, folgt aus Gl. (2), dass es nicht möglich ist, jeder Windung einen eindeutigen Induktionskoeffizienten zuzuordnen.

Wird die Eigeninduktivität einer Windung mit M_0 bezeichnet, so gilt für das Verhältnis $\frac{M}{M_0}$ in Abhängigkeit vom Verhältnis $\frac{a}{r}$ (a Windungsabstand, r Spulenradius) in Luft der Verlauf nach Fig. 1.