Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 56 (1965)

Heft: 12

Rubrik: Mitteilungen SEV

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

chen Aufbau wie die für Gasinnendruckkabel mit Aluminiummantel. Die Endverschlüsse der Druckkabel sind ebenfalls mit Masse gefüllt, jedoch steht die Masse wie bei Ölkabeln in unmittelbarer Verbindung mit der Kabelader. Ein Ausgleichsgefäss verbindet druckmässig den Gasraum der Rohrleitung mit dem Masseraum des Endverschlusses.

6. Leckortung

Bei jedem Kabel kann durch Korrosion oder mechanische Einflüsse die äussere Metallhülle beschädigt werden. Bei der Auswahl eines bestimmten Kabeltyps ist es daher wichtig zu wissen, wie sich in einem solchen Falle die einzelnen Kabel verhalten, d. h. ob abgeschaltet werden muss, zu welchem Zeitpunkt und wie lange.

Die Praxis hat gezeigt, dass im wesentlichen mit zwei Arten von Fehlern gerechnet werden muss. Mit relativ kleinen Fehlern, wie sie vorzugsweise durch Korrosion entstehen, welche nur einen langsamen Druckabfall zur Folge haben, und mit groben mechanischen Beschädigungen, welche bei Einleiterkabeln in der Regel auch eine elektrische Störung zur Folge haben, bei Dreileiter- und Stahlrohrkabeln zu einem plötzlichen Druckabfall führen können, ohne aber, dass eine elektrische Störung eintritt.

Leckstellen der ersten Art machen im allgemeinen eine Fehlersuche erforderlich. Bei Kabeln im Stahlrohr mit Stickstoff-Füllung, also bei Druckkabeln und Gasinnendruckkabeln, kann das während des Betriebes geschehen. Bei Druckkabeln wurden auch schon mehrfach solche Fehler beseitigt, ohne dass das Kabel abgeschaltet zu werden brauchte. Bei Kabeln mit Ölfüllung, also Ölkabeln und Oilostatic-Kabeln, muss zur Ortung des Fehlers an bestimmten Stellen die Ölfüllung eingefroren werden, wozu das Kabel für mehrere Tage abgeschaltet werden muss. Den Zeitpunkt des Abschaltens kann man jedoch frei wählen, da durch Nachspeisen von Öl das Kabel trotz des Lecks weiter in Betrieb gehalten werden kann.

Bei groben Beschädigungen mit raschem Druckabfall müssen Gasinnendruckkabel, Ölkabel und Oilostatic-Kabel sofort abgeschaltet werden. In den Hohlräumen der Isolierung von Gasinnendruckkabeln treten im drucklosen Zustand nämlich starke Ionisierungen auf, bei den ölgefüllten Kabeln besteht ohne Öldruck die Gefahr der Hohlraumbildung. Lediglich Druckkabel können infolge ihres Bleimantels auch ohne Druck noch 48 h mit 75 % ihrer Vollast betrieben werden. Da bei groben Beschädigungen meist Anhaltspunkte für die Lage des Fehlerortes gegeben sind, eine Fehlersuche sich also erübrigt, genügt dieser Zeitraum für die Beseitigung des Fehlers.

Literatur

[1] *R. Tellier:* «Past and Present Practice and Experience on High-voltage Underground Cable Systems in France». AIEE Trans. Pap. No. 57...740 (1957).

[2] Installations of high-pressure Pipe-Type Cable in the Western Hemisphere Operating at 69 kV and Above. AIEE Publ. S-110-A Nov. 1962.

[3] *E. Schulze:* Das 110 kV-Netz von West-Berlin. Elektrizitätswirtschaft 58 (1959), S. 313...318.

[4] *L. Domenach:* Cables for 220 to 400 kV. Cigre Ber. No. 217 (1954).

[5] *H. W. Lücking* u. *W. Ochel:* Experiences with super-high-voltage cables with corrugated aluminium Sheat. Cigre Ber. No. 224 (1960).

[6] *M. Höchstädter, W. Vogel* u. *E. Bowden:* Das Druckkabel, ein Fortschritt im Bau von Hochspannungs-Kabelanlagen. ETZ 53 (1932)7, S. 145...150 u. 8, S. 169...174.

[7] *H. W. Lücking:* Der Entwicklungsstand des Druckkabels nach 25jähriger Betriebsbewährung. ETZ A 79(1958)20, S. 761...768, 976.

[8] *L. J. Komives:* Modern Transmission Cable Practice in the USA. Cigre-Ber. No. 230 (1960).

[9] Underground Systems Reference Book 1957, Edison Electric Institute.

[10] *C. J. Beaver* u. *E. L. Davey:* The gas-filled cable. Cigre Ber. No. 204 (1931).

[11] *H. J. Heinemann:* Gasinnendruckkabel mit gewelltem Aluminiummantel. Elektrizitätswirtschaft 59(1960)8, S. 222...226.

[12] *E. P. G. Thornton* u. *D. H. Booth:* The design and performance of the gas-filled cable system. Proc. IEE A 106(1959), S. 207...230.

[13] AIEE-Report 60...33 (1960).

Adresse des Autors:

Dipl.-Phys. *Hans Josef Heinemann,* Felten & Guilleaume Carlswerk AG, D-5 Köln-Mülheim, Schanzenstrasse (Deutschland).

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Metallische Widerstandsmaterialien und ihre Eigenschaften

621.316.84

Für die Industrie steht eine grosse Anzahl verschiedener elektrischer Heizleiterlegierungen zur Verfügung, und die Wahl der geeigneten Legierung für eine bestimmte Aufgabe kann oft Schwierigkeiten verursachen. Das Sortiment auf dem Markt ist sehr gross, weil die Heizleiterstoffe vielen verschiedenen Zwecken dienen sollen. Studiert man die Auswahl näher, so ist ersichtlich, dass die Legierungstypen ziemlich ähnlich sind. Man hat also die Möglichkeit, die verschiedenen Heizleitermaterialien auf gewisse Typen zurückzuführen. Durch eine solche Einteilung erhält man eine wesentlich einfachere Übersicht über die Eigenschaften und besonderen Merkmale der Heizleitertypen.

Schliesst man die reinen Metalle, wie z. B. Molybdän, Platin, Tantal und Wolfram aus, können die Heizleiterlegierungen in folgende zwei Gruppen eingeteilt werden: Legierungen von Nickel-Chrom und Nickel-Chrom-Eisen, welche ein recht grosses Anwendungsgebiet haben und Eisen-Chrom-Aluminium-Kobalt-Legierungen, welche besonders für die Verwendung bei hohen Temperaturen geeignet sind. Als ein typisches Beispiel für die verschiedenen Heizleiterqualitäten ist in Tabelle I eine Übersicht über die Kanthal-Legierungen wiedergegeben. Ein Merkmal für die Beurteilung der Eigenschaften dieser beiden Gruppen ist u. a. das metallische Gefüge. Die Legierungen der ersten Gruppe weisen nämlich sämtlich ein austenitisches Gefüge auf, und die der anderen Gruppe ein ferritisches; man spricht daher oft von austenitischen oder ferritischen Heizleiterlegierungen, um die in Frage kommende Werkstoffkategorie zu bestimmen.

Für die beiden Gruppen von Heizleiterlegierungen kann man eine Reihenfolge der Eigenschaften nicht so leicht aufstellen, weil die Legierungstypen stark voneinander abweichen. Die verschiedenen chemischen Zusammensetzungen der Heizleiterlegierungen weisen eine ganze Reihe von Variationen betr. die Materialeigenschaften auf, wie z. B. Änderung der maximalen Verwendungstemperatur, der Lebensdauer, des spezifischen Widerstandes, des Temperaturkoeffizienten des Widerstandes, der Zunderfestigkeit, der Wärmefestigkeit und der Resistenz gegen Angriffe von korrosiven Gasen. Für den Verbraucher dieser Werkstoffe ist es allein von Wichtigkeit, zu erfahren, welche Qualität die gewünschten Materialeigenschaften am besten erfüllt. Um dieses zu erörtern, werden die Eigenschaften der verschiedenen Legierungstypen näher besprochen und miteinander verglichen, um dem

Heizleiterlegierungen

Tabelle I

	Maximale Heizleiter-temperatur °C	Spezifischer Widerstand Ω mm²/m	Widerstands-zunahme 20...1000 °C %	Spezifisches Gewicht g/cm³	Hauptbestandteile %					
					Fe	Cr	Al	Co	Ni	Si
Gruppe 1, NiCrFe										
Nikrothal 80	1200	1,09	4,9	8,3		20			80	1...2
Nikrothal 60	1125	1,11	11,1	8,2	Rest	16			60	1...2
Nikrothal 40	1100	1,04	12,4	7,9	Rest	20			33	1...2
Nikrothal 20	1050	0,95	13,3	7,8	Rest	25			20	1...2
Gruppe 2, FeCrAlCo										
Kanthal A-1	1350	1,45	3,5	7,1	Rest	22	5,5	0,5		< 1
Kanthal A	1300	1,40	5,7	7,15	Rest	22	5,0	0,5		< 1
Kanthal DSD	1200	1,35	6,8	7,25	Rest	22	4,5	0,5		< 1
Kanthal DSI	1150	1,35	6,8	7,25	Rest	22	4,5	0,5		< 1 + Ta
Alkrothal	1050	1,25	11,3	7,28	Rest	14	4,5			< 1

Verbraucher einige Hinweise zu geben und seine Wahl zu erleichtern.

Lebensdauer und Oxydationsbeständigkeit

Die Lebensdauer eines Widerstandsmaterials ist von einer Reihe Betriebsfaktoren abhängig, von denen folgende wichtige Einflüsse ausüben: Zusammensetzung der Betriebsatmosphäre, Beschaffenheit des keramischen Trägermaterials, Temperatur, Abstrahlmöglichkeiten, Oberflächenbelastung, Schalthäufigkeit.

Der Hersteller von Heizleitermaterialien verwendet eine genormte Prüfung, die rasch die Güte des Materials mit ausreichender Genauigkeit erkennen lässt. Dazu werden Prüfdrähte von bestimmter Dimension zwischen zwei nebeneinanderliegende elektrische Kontakte angeschlossen. Durch intermittierende Stromzufuhr werden die Drähte je zwei Minuten erhitzt und dann abgekühlt, wobei sie sich wechselweise ausdehnen und zusammenziehen. Das Material wird durch diese Prüfung aussergewöhnlich stark beansprucht, bedeutend stärker als im praktischen Betrieb. Die bei der Prüfung erhaltene Lebensdauer kann nur als Vergleichsziffer der Heizleiterqualität verwendet werden. Eine Umrechnung auf praktische Betriebsstunden eines Elementes ist aber nicht möglich. Trotzdem kann man die experimentelle Lebensdauer von verschiedenen Heizleiterqualitäten serienmässig produzierter Geräte als Vergleichsgrössen heranziehen.

Die Bildung einer Oxydhaut ermöglicht es, dass Heizleiterlegierungen bei hohen Temperaturen verwendet werden können. Alle Legierungen, die zu der Nickel-Chrom- und Nickel-Chrom-Eisen-Gruppe gehören, erhalten durch die Oxydation eine Haut von Chromoxyd, die mehr oder weniger von Spinellen verunreinigt ist. Dieser Oxydfilm verhindert eine weitere Oxydation und ist also für die Oxydationsbeständigkeit massgebend. Die Verunreinigung von Spinellen setzt die Oxydationsbeständigkeit herab, während eine Oxydhaut aus reinem Chromoxyd eine Heizleiterlegierung dieser Gruppe am besten schützt. Deswegen zeigt z. B. Nikrothal 80, das praktisch eisenfrei ist, die kleinste Anfälligkeit für Oxydation von den unter Gruppe 1 in Tabelle I erwähnten Heizleiterelementen.

Die Oxydhaut, die sich auf Eisen-Chrom-Aluminium-Kobalt-Legierungen der Gruppe 2 bildet, besteht unter 1000 °C aus einem

33'870 – 872

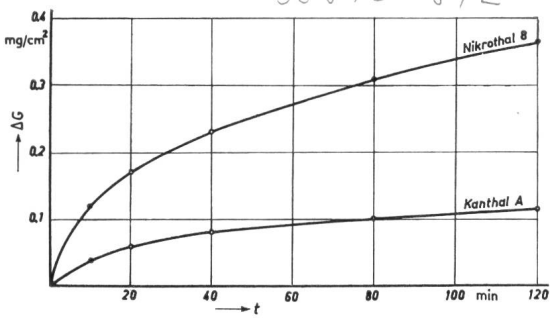

Fig. 1

Gewichtszunahme ΔG von ferritischen und austenitischen Legierungen in Abhängigkeit von der Zeit t

Temperatur 1100 °C

Gemisch von Eisen-, Aluminium- und Chromoxyd. Bei Temperaturen über 1000 °C bildet sich mehr und mehr ein reines Aluminiumoxyd. Das Aluminiumoxyd bildet einen sehr starken Film, der die weitere Oxydation unterbindet.

Eine praktische Untersuchung des Oxydationsverlaufes der beiden Qualitätskategorien ist in Fig. 1 wiedergegeben. Hier ist die Gewichtszunahme in Bezug auf die Zeit bei 1100 °C für eine eisenfreie Nickel-Chrom-Legierung und für eine Eisen-Chrom-Aluminium-Kobalt-Legierung aufgeführt. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die austenitische Legierung pro Zeiteinheit ungefähr dreimal so viel Oxyde bildet wie die ferritische. Hätte man nun eine Nickel-Chrom-Eisen-Legierung als Vergleich gewählt, wäre der Unterschied noch grösser.

Die Oxydationsbeständigkeit und somit die Lebensdauer von Heizleiterlegierungen hängt davon ab, ob die Oxydhaut durch wechselnde Aufheizung und Abkühlung abblättert oder bestehen bleibt. Ein solches Abblättern entsteht, wenn die Ausdehnung von Metall und Oxyd verschieden gross ist. Weiter spielen auch die mechanischen Eigenschaften, sowie die Dicke und Adhäsion zu Metall eine gewisse Rolle. Das Prüfverfahren des Herstellers zur Bestimmung der Lebensdauer setzt, wie bereits erwähnt, das Material einer ständigen und wechselnden Erhitzung und Abkühlung aus. Auf diese Weise hat man die beste Möglichkeit, eine eventuelle Neigung für das Abblättern des Oxydfilmes festzustellen. Vergleicht man nun diese Neigung bei den verschiedenen Qualitätstypen der Heizleiterwerkstoffe, so wird ersichtlich, dass die Aluminiumoxydfilme, die die ferritischen Legierungen der Gruppe 2 der Tabelle I schützen, die beste Haftbeständigkeit in oxydierender Atmosphäre besitzen. Fig. 2 zeigt Kurven der Lebensdauer von 0,4 mm Draht. Wie erwartet liegen die Werte von ferritischen Legierungen höher als diejenigen von austenitischen.

Die Produzenten von austenitischen Heizleiterqualitäten haben sich mit Erfolg bemüht, durch Zusatz geringer Mengen von Metallen die Neigung für das Abblättern zu unterdrücken. Als Zusatzelemente dienen z. B. Kalzium, Cermischmetall und Zirkon. Auch bei ferritischen Heizleiterlegierungen erzielt man durch solche Zusätze eine Verbesserung der Lebensdauer. Immerhin ist es schwer, den Mechanismus von Zusatzelementen zu deuten. In gewissen Fällen hat man festgestellt, dass diese in die Oxydhaut eingehen und dadurch Gitteränderungen bewirken, welche die Oxydationsgeschwindigkeit und die Neigung zum Abblättern reduzieren. Weiter kann es vorkommen, dass sie unter der äusseren Oxydhaut einen besonderen Oxydfilm bilden können, mit dem Erfolg, dass die Adhäsion verbessert wird. Eine Legierung kann, je nach Temperaturbeanspruchung, verschiedene Zunderzusammensetzungen aufweisen, was darauf beruht, dass die Oxyde untereinander bzw. mit dem Grundmaterial reagieren. Diese Reaktionen erfassen nicht gleichmässig alle im Heizleitermaterial enthaltenen Elemente, und durch Diffusion kommt es dann allmählich zur Verarmung des einen oder anderen Elementes. Die Reaktionen, die sich in der Zunderhaut abspielen, sind sehr komplex.

Die Änderung der chemischen Zusammensetzung von Legierungen bewirkt auch eine Änderung der höchsten Verwendungstemperatur. Eine solche Grenze muss man für die austenitischen Heizleiterwerkstoffe angeben, denn darüber nimmt die Oxydation

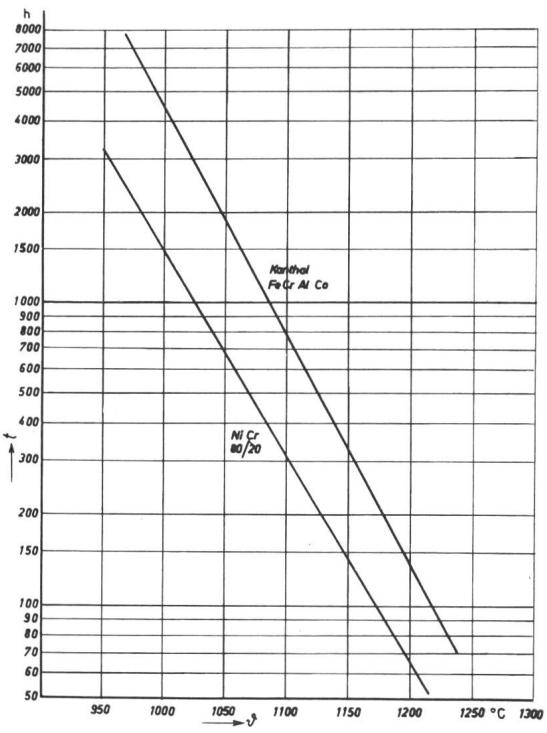

Fig. 2
Lebensdauer t in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ

so stark zu, dass die Legierung ihre Aufgabe nicht mehr erfüllen kann. Diese Temperaturgrenze wird als maximale Heizleitertemperatur bezeichnet. Für die ferritischen Werkstoffe wird diese Maximalgrenze überwiegend durch den Schmelzpunkt bedingt, weil die Oxydationsgeschwindigkeit gering ist. Aus Tabelle I geht hervor, dass für diese Gruppe die maximale Heizleitertemperatur rund 150 °C höher liegt, wobei diese Legierungen für Öfen, welche über 1100 °C arbeiten, mit gutem Erfolg verwendet werden können.

Angriff durch Gase

Im vorhergehenden Abschnitt wurde die Lebensdauer von Heizleiterlegierungen bei hohen Temperaturen in Luft besprochen, wobei Sauerstoff als aktives Gas auftrat. Nun finden Widerstandselemente in Industrieöfen, die mit Schutzgasen betrieben werden, grosse Verbreitung, wobei aber in diesen Schutzgasatmosphären andere Korrosionsreaktionen einsetzen können. Als Schutzgase kommen Gasgemische mit wechselnden Bestandteilen von Kohlenmonoxyd, Kohlendioxyd, Stickstoff, Wasserstoff und Methan zur Verwendung. In diesen Schutzgasöfen hat das Gasgemisch meistens Zutritt zu den Heizelementen, wobei es zwischen den aktiven Gaskomponenten und den Heizelementen leicht zu chemischen Reaktionen kommen kann.

Tabelle II enthält eine Zusammenstellung der drei wichtigsten Schutzgasarten mit den maximal zulässigen Heizleitertemperaturen. Das erste Gasgemisch wird durch Verbrennung oder katalytische Spaltung von Ammoniak hergestellt und besteht aus Wasserstoff und Stickstoff. Durch die Spaltung von Ammoniak erhält man ein Gasgemisch von 25 % N_2 und 75 % H_2, durch eine teilweise Verbrennung aber wird die Mischung reicher an Stickstoff. Solche Gasatmosphären werden in Öfen verwendet, in welchen man einen stark reduzierenden Effekt ohne Kohlen- und Sauerstoffverbindungen wünscht. Für Öfen mit Spaltammoniak als Schutzgas kann man mit Erfolg austenitische Heizleitertypen verwenden. Ferritische Legierungen sind gegen Stickstoff empfindlicher.

Schutzgasarten und zulässige Heizleitertemperaturen

Tabelle II

Schutzgas	Zusammensetzung des Schutzgases	Maximale Heizleitertemperatur °C — Materialgruppe	
		FeCrAlCo	NiCrFe
N_2-H_2-Mischungen	3...75 % H_2 25...97 % N_2	900...1200	1200
Exogas	0,5...25 % H_2 3...14 % CO 0,5...10 % CO_2 Rest % N_2	1050	1050
Endogas	32...50 % H_2 18...20 % CO Rest % N_2	1000	1000

Exo-Gase erhält man durch eine direkte exothermische Oxydation von z. B. Stadtgas, wobei die Verbrennung genau kontrolliert wird, um das erzielte Gasgemisch zu erreichen. Die Zusammensetzung lässt sich je nach Wahl des Luft-Gas-Verhältnisses variieren. Von diesem Gastyp werden beide Heizleiterkategorien angegriffen, und für beide gelten 1050 °C als höchste Anwendungstemperatur, obwohl man Fälle kennt, wo beide Legierungstypen bei noch höheren Temperaturen zufriedenstellend gearbeitet haben. Austenitische Heizleitermaterialien werden unter gewissen Umständen interkristallin angegriffen. Diese besondere Erscheinung wird als Grünfäule oder «green rot» bezeichnet. Durch Kohlenstoffaufnahme können sich Chrom-Karbide in den Korngrenzen bilden. Die auf der Korngrenze an Chrom verarmten Gebiete oxydieren schnell, mit dem Erfolg, dass das Element zerstört wird. Die eisenhaltigen Chrom-Legierungen sind weniger empfindlich gegen Grünfäule, und von den austenitischen Legierungen hat sich z. B. Nikrothal 60 bewährt.

Ferritische Legierungen zeigen diese Neigung zur Aufkohlung nicht und geben deshalb ein gutes Resultat. Unter diesen Umständen bildet sich die Oxydhaut nicht in normaler Weise und zeigt sich gegen Verunreinigungen sehr empfindlich. Die Bildungsmöglichkeit von Karbiden ist immer eng verknüpft mit dem Gehalt des Gasgemisches an Sauerstoff, weil die sich dabei gebildete Oxydhaut das Eindringen des Kohlenstoffes in die Legierung herunterdrückt. Deswegen ist es auch immer zu empfehlen, die Heizelemente vor Inbetriebnahme des Ofens in Luft zu oxydieren. Am besten wird der Ofen 7...10 Stunden bei 1050 °C gehalten, um den Elementen eine Voroxydation zu geben, und wenn die Betriebsverhältnisse es zulassen ist es empfehlenswert, die Elemente ab und zu kurzzeitig zu oxydieren.

Das Endo-Gasgemisch wirkt stark aufkohlend, und man darf deshalb bei höheren Temperaturen kein Widerstandsmaterial in diesem Gemisch verwenden. Besonders bei austenitischen Legierungen bewirkt ein steigender Gehalt von Kohlenstoff eine zunehmende Unterdrückung des Schmelzpunktes. Diese Erscheinung hat zur Folge, dass die maximale Anwendungstemperatur gesenkt wird. Von den austenitischen Heizleitermaterialien hat sich in diesem Gasgemisch Nikrothal 40 oder 60 am besten bewährt, ebenso die ferritischen Legierungen. Dazu kommt, dass die Endo-Gasgemische zu Russablagerungen in den Öfen führen. Es ist deshalb für die Herabsetzung der Korrosion wichtig, dass der Ofen in Zeitintervallen mit Luft durchströmt wird, um diese Kohlenstoffablagerungen zu verbrennen.

Mit der Korrosion von Gasen muss auch mit der Möglichkeit von Angriffen von Schwefelverbindungen gerechnet werden. Diese Verbindungen treten als Verunreinigungen auf und können bei höheren Temperaturen starke Korrosionen verursachen. Die Ursache kann z. B. schlecht gereinigtes Schutzgas oder Ofengut sein, und nicht zu vergessen ist, dass Isoliersteine erhebliche Mengen Schwefel enthalten können, die über eine längere Zeitspanne abgegeben werden. Die austenitischen Heizleiterwerkstoffe sind sehr empfindlich gegen Schwefelverbindungen; besonders heftig sind Angriffe auf Legierungen mit höheren Nickelgehalten. In allen Fällen sind bei Vorkommen von Schwefel die ferritischen Heizelemente weit beständiger. Doch können auch in diesen bei hohen Schwefelgehalten, z. B. in reinem Schwefelwasserstoff, zerstörende Reaktionen einsetzen.

Salze von Alkalimetallen, wie z. B. Halogensalze, Nitrate, Silikate sowie Borate, stören die Oxydbildung an den Legierungen und sind deshalb als schädliche Verunreinigungen zu betrachten. Auch Oxyde, wie diejenigen von Eisen, Kupfer und Blei, haben dieselbe Wirkung. Bleioxyd verdampft leicht, schlägt sich in kälteren Ofenteilen nieder und verursacht Angriffe, wo sie am wenigsten erwartet werden.

Emaille und Glasuren enthalten oft schädliche Verbindungen, die durch Spritzer oder Verdampfung mit den Heizelementen in Berührung kommen.

Widerstand

Unter den Materialeigenschaften in Tabelle I sind auch die spezifischen elektrischen Widerstände der Heizleiterlegierungen aufgeführt. Der spezifische Widerstand mit 1,35...1,45 Ω mm²/m bei 20 °C bei den ferritischen Werkstoffen ist 25...30 % höher als bei eisenfreien und rund 20...30 % oberhalb eisenhaltigen Chrom-Nickel-Heizleiterlegierungen. Das spezifische Gewicht von ferritischen Materialien ist 10...15 % niedriger als das bei den austenitischen. Das bedeutet, dass man mit den zum ersten Typ gehörenden Legierungen für den gleichen Zweck mit einer Gewichtsersparnis von 25...50 % rechnen kann.

Für die Heizleiterlegierungen ist nicht nur der elektrische Widerstand von Bedeutung, sondern auch die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes. Der Temperaturkoeffizient der austenitischen Legierungen ist immerhin keine definierbare physikalische Grösse, sondern hängt von der Behandlung bei der Herstellung ab. Der Temperaturfaktor wird nämlich kleiner je langsamer die Abkühlung erfolgt, und deswegen ist der Faktor für die gröberen Dimensionen kleiner als für die feineren. Diese Variation der Temperaturabhängigkeit des Widerstandes rührt nicht nur von der Abkühlungsgeschwindigkeit her, weil Änderungen des Silizium-, Eisen- und Mangangehaltes auch einen Einfluss ausüben. Auf ferritische Materialien hat die Abkühlungsgeschwindigkeit nach der letzten Wärmebehandlung auch einen Einfluss. Der Temperaturfaktor des Widerstandes wird hier aber grösser je langsamer diese Abkühlung erfolgt, wodurch die grösseren Abmessungen einen höheren Faktor erhalten. Die Betriebszeit des Materials spielt auch in dieser Beziehung eine Rolle.

Wärmefestigkeit

Die Zugfestigkeit der ferritischen Eisen-Chrom-Aluminium-Kobalt-Legierungen sinkt bei hohen Temperaturen schneller und auf kleinere Werte als die der austenitischen Legierungen, und deshalb ist die Wärmefestigkeit der Werkstoffe sehr verschieden. In Fig. 3 sind die zulässigen Belastungen in kg/cm² für die beiden

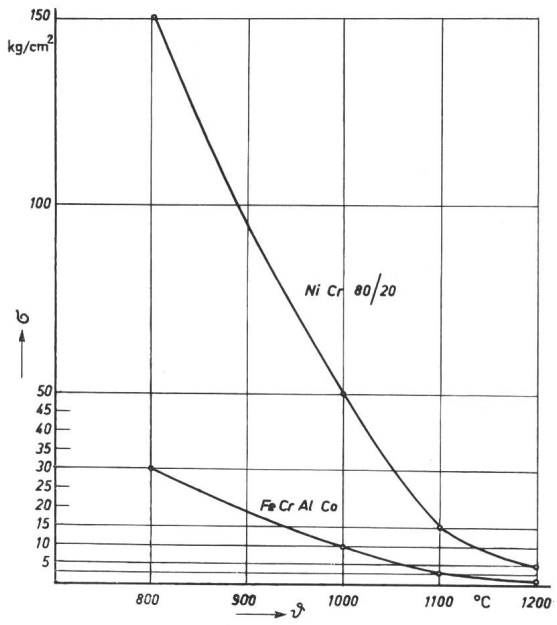

Fig. 3

Zulässige Belastung σ in Abhängigkeit von der Temperatur ϑ

Legierungskategorien angegeben. Es geht daraus hervor, dass die Werte für eine eisenfreie austenitische Legierung ungefähr 5mal höher liegen als die für eine ferritische Legierung. Immerhin sind die mechanischen Belastungen in den meisten praktischen Fällen sehr gering. Trotzdem muss man auf Konstruktionen achten, in welchen das Gewicht vom Heizleitermaterial auf einen Hebelarm wirken kann. In jenen Konstruktionen, in denen höhere mechanische Belastungen auftreten, ist es vorteilhaft, austenitische Werkstoffe zu verwenden.

Bei den ferritischen Legierungen tritt nach einer längeren Erhitzungszeit zwischen 400 und 550 °C eine auffallende Sprödigkeit auf. Die Erscheinungen bestehen in einer recht beträchtlichen Steigerung der Härte und einer auffallenden Änderung vieler Materialeigenschaften; dieser Effekt wird 475°-Versprödung genannt. Für die praktische Verwendung von Heizleiterlegierungen kann natürlich gesagt werden, dass eine Temperatur von 475 °C von keiner besonderen Bedeutung ist, doch kann diese Sprödigkeit bei Heizelementen im Dauer- und Wechselbetrieb von mittleren Temperaturen und einer gleichzeitigen Beanspruchung von stärkeren Erschütterungen auftreten. Um diesen Nachteil zu beseitigen, ist die Legierung Alkrothal entwickelt worden, welche bei 475 °C praktisch keine Versprödung aufweist. Diese Erscheinung tritt bei austenitischen Materialien nicht auf, man kann jedoch hier eine Herabsetzung der Festigkeitseigenschaften zwischen 400 und 900 °C feststellen, die zum Teil mit dem sog. K-Zustand zusammenhängen.

Bei den ferritischen Heizleiterlegierungen tritt bei Temperaturen über 1000 °C eine ganz besondere Tendenz zur Verlängerung auf, die aber nur bei unbelastetem Material vorkommt. Untersuchungen von diesem Effekt haben zu der Auffassung geführt, dass die Verlängerung des Materials von seinem Oxyd verursacht wird. Wenn die Temperatur eines Elementes sinkt, werden sich sowohl Metall als Oxydhaut zusammenziehen. Wegen verschiedener thermischer Ausdehnungskoeffizienten versucht das Metall sich mehr zusammenzuziehen als das Oxyd, mit der Folge, dass im Metall Zugspannungen entstehen, die es dann ausdehnen. Erhöht man die Temperatur wieder, so entstehen Druckspannungen im Metall und Zugspannungen in der Oxydhaut. Da aber das Oxyd keine Zugspannungen verträgt, treten Risse auf, die sich bald mit neugebildetem Oxyd auffüllen. Bei Wiederholung dieser Erscheinung verlängert sich allmählich das Material; man hat bei den höchsten Temperaturen eine Verlängerung von rund 10 % festgestellt. Deswegen ist bei Ofenkonstruktionen zu empfehlen, die Temperaturänderungen so klein wie möglich zu halten. Weiter ist es wichtig, die Elemente so zu dimensionieren, dass die Oberfläche des Elementes im Verhältnis zu seinem Querschnitt klein wird. Eine ferritische Legierung mit besserer Wärmefestigkeit ist Kanthal DSI, welche in Tabelle I aufgeführt ist.

Die beschriebenen Legierungstypen sind zwar handelsübliche Heizleitermaterialien; trotzdem ist es nicht möglich, eine zusammenfassende Reihenfolge der Qualitäten aufzustellen. Die einzelnen Typen enthalten verschiedene Gruppen von Qualitätseigenschaften und können dadurch den vielfältigen Anforderungen der Industrie entsprechen. Weiter ist zu bemerken, dass kleine Zusätze von bestimmten Elementen zu diesen Grundtypen von Heizleiterlegierungen zu beachtlichen Qualitätsverbesserungen führen können.

H.-J. Bauck, Hallstahammar

Steuerung der Ausgangsspannung bei Wechselrichtern

621.316.722 : 621.314.57

[Nach *E. Eder* und *K. Samberger:* Steuerung der Ausgangsspannung bei Wechselrichtern. Siemens Z. 38(1964)10, S. 755...781]

Zur Umformung einer Gleichspannung in eine Wechselspannung werden oft statische Wechselrichter verwendet. Soll dabei die Wechselspannung geregelt werden, so kann dies auf verschiedene Arten geschehen, es kann aber ausserdem auch notwendig sein, die Wechselspannung vom jeweiligen Ladezustand der Batterie, welche als Gleichspannungsquelle dient, unabhängig zu machen. Gewöhnliche selbstgeführte Wechselrichter liefern eine rechteckähnliche Wechselspannung, deren Amplitude im Leerlauf der Eingangsgleichspannung proportional ist. Wenn die Ausgangsspannung geregelt werden soll, so kann entweder die Höhe der Eingangsspannung verändert werden (Amplitudensteuerung), oder die Breite der rechteckförmigen Spannungs-Zeit-Fläche (Anschnittsteuerung). Das Stellglied kann dabei in beiden Fällen hinter, in oder vor dem Wechselrichter angeordnet sein.

Die in letzter Zeit entwickelten elektronischen Gleichstromregler erlauben es, eine Gleichspannung kontinuierlich und verlustlos zu verändern; ein Beispiel einer solchen Regelung ist in

33'853-854

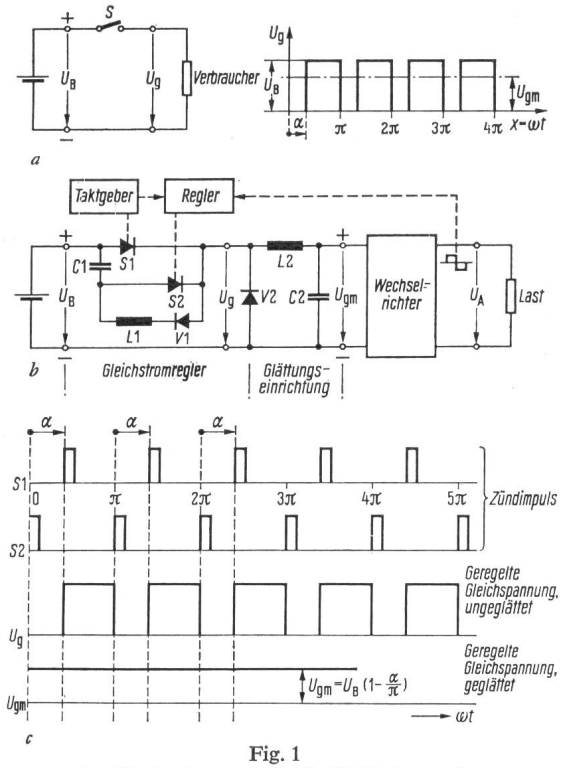

Fig. 1
Amplitudensteuerung durch Gleichstromregler
a Arbeitsprinzip eines Gleichstromreglers; *b* Gesamtschaltung von Regler und Wechselrichter; *c* Verlauf der Zündimpulse und der Ausgangsspannung eines Gleichstromreglers
U_B Batteriespannung; U_g geregelte Gleichspannung; α Phasenwinkel; U_{gm} Mittelwert der geregelten Gleichspannung; C_1, C_2 Löschkondensatoren; S_1, S_2 Stromtore; V_1, V_2 Nebenwegventile; L_1, L_2 Induktivitäten; U_A Ausgangswechselspannung

Fig. 1 dargestellt, welche das Arbeitsprinzip und die Schaltung einer Amplitudensteuerung zeigt. Da die vom Gleichstromregler abgegebene pulsierende Gleichspannung nicht ohne weiteres zur Speisung eines Wechselrichters geeignet ist, so muss zwischen Regler und Wechselrichter eine Glättungseinrichtung geschaltet werden. Der Vorteil dieses Regelverfahrens besteht darin, dass an den Gleichstromregler jeder beliebige ungeregelte Wechselrichter angeschlossen werden kann.

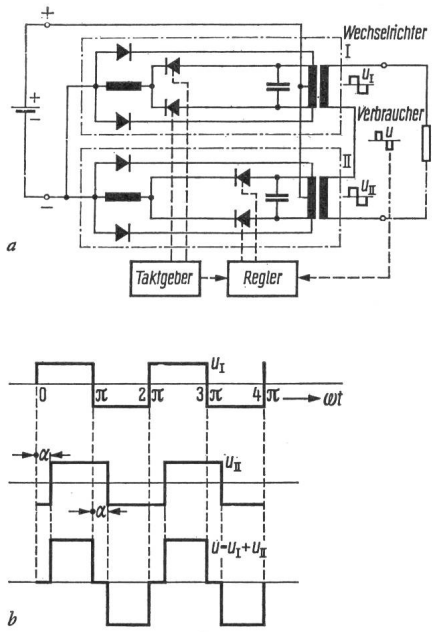

Fig. 2
Prinzip des Drehtransformators
a Grundschaltung; *b* Kurvenverlauf
U_I, U_{II} Ausgangsspannung der beiden Wechselrichter
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Bei der Anschnittsteuerung wird die Wechselspannung ohne Beeinflussung der Amplitude nur durch Variation der Dauer der rechteckförmigen Spannung während einer Halbschwingung auf den gewünschten Wert gebracht. Aus den theoretischen Überlegungen folgt, dass ein sehr unterschiedlicher Aussteuerungsgrad notwendig ist, je nachdem, ob der Gleichrichtwert, der Effektivwert der Rechteckschwingung oder der Grundschwingung geregelt werden soll, was wiederum von der Art des Verbrauchers abhängt.

Auch das Prinzip des Drehtransformators ist auf die Wechselrichter anwendbar. Dabei werden nach Fig. 2 zwei ungeregelte, jedoch mit gleicher Frequenz gesteuerte Wechselrichter wechselspannungsseitig in Reihe geschaltet. Die Phasenlage der Wechselspannungen wird dann durch einen Regler verändert, bis die vektoriell addierte Spannung den gewünschten Wert erreicht. Die Ausgangsspannung der gesamten Anordnung hat den für die Anschnittsteuerung charakteristischen Verlauf, ist aber im Gegensatz zu anderen Anschnittsteuerungen unabhängig von der Art der Belastung und bleibt auch bei Anschluss des Verbrauchers über einen Siebkreis erhalten.

Die praktische Anwendung liegt für Wechselrichter bis etwa 5 kW und Batteriespeisung mit max. 48 V bei der Anschnittsteuerung, bei höheren Batteriespannungen empfiehlt sich eine gesteuerte Brückenschaltung und für grössere Ausgangsleistungen, wofür es sowieso notwendig wäre Wechselrichtereinheiten parallel zu schalten, ist die Regelung nach dem Prinzip des Drehtransformators am wirtschaftlichsten. *A. Baumgartner*

Elektrostatisches Lackieren

621.793.734

[Nach *W. Kleber:* Elektrostatisches Lackieren von Lichtmasten im Freien. Der Elektro-Praktiker 19(1965)2, S. 59...62]

Lichtmaste aus Stahl werden gegenwärtig mit Pinsel lackiert. Das Spritzen ist viel produktiver, hat aber den Nachteil grosser Lackverluste, zudem ist der teilweise schräge Einfall des Lacks ungünstig für die Oberflächenqualität. Mit der elektrostatischen Lackierung können alle diese Nachteile vermieden werden, doch sind die atmosphärischen Einflüsse bei der Arbeit im Freien noch unbekannt.

Die Zerstäubung des Lackes erfolgte bei den vorliegenden Versuchen mit einer sog. Zerstäuberglocke von 100 mm Durchmesser und mit einer Drehzahl von 1500...3000 U./min. Die Glocke wird von einem hochohmigen Generator auf minus 90 kV aufgeladen, während der Lichtmast geerdet wird. Dadurch erhalten die zerstäubten Lackteilchen eine gleichmässige Ladung und fliegen entlang den Feldlinien auf den geerdeten Mast.

Die elektrische Spritzpistole ist berührungssicher (d. h. der Berührungsstrom darf 0,5 mA nicht übersteigen) und funkensicher und hat eine Leistung von 200 W. Die Glocke wird von Pressluft angetrieben. An die versprühten Lacke werden gewisse Forderungen bezüglich Viskosität und spezifischer Widerstand gestellt, die von den heute gebräuchlichen Lacken noch nicht restlos erfüllt werden.

Die Lackierung im Freien wird durch die folgenden Faktoren eingeschränkt: Temperatur + 10 bis + 28 °C, relative Feuchtigkeit maximal 65 %, Wind maximal 2...3 m/s. Nur in diesen Grenzen ist eine einwandfreie Lackierung möglich.

Bei kleineren Durchmessern des Lichtmastes (im Versuch 100 mm) erhält man auf der Rückseite eine grössere Schichtdicke, bei grossen Durchmessern (160 mm) ist die Schicht auf der Vorderseite dicker. Durch Verkanten und seitliches Verschieben der Pistole lässt sich jedoch eine brauchbare Gleichmässigkeit der Lackschicht erzielen.

Die Arbeitszeit für einen Auftrag auf einem 10 m langen Mast beträgt rund 5 min. Die Geschwindigkeit des Lackierens ist durch die Leistung der Spritzpistole (100 cm³/min) begrenzt.

Bei weiteren Untersuchungen müssen folgende Schwerpunkte bearbeitet werden:

a) Ermittlung eines für die elektrostatische Zerstäubung geeigneten Anstrichsystems (Grund-, Vorstreich- und Decklack).

b) Aufbau eines Versuchslackierstandes und Entwicklung eines Arbeitsverfahrens für den stehenden Lichtmast. *F. Kamber*

Raumfahrt mit Atomenergie

629.7.036 : 621.039.578

Wie wir von der Schweiz. Vereinigung für Atomenergie vernehmen, befindet sich seit Anfang April 1965 ein kleiner amerikanischer Reaktor mit der Bezeichnung SNAP-10A in der Umlaufbahn um die Welt. Die im Reaktor erzeugte Hitze wird durch thermoelektrische Elemente direkt in eine elektrische Leistung von 500 W umgewandelt. Soweit bis jetzt bekannt wurde, funktioniert dieses Miniaturatomkraftwerk im Weltraum ausgezeichnet. Es ist weiter nicht verwunderlich, dass dieses Ereignis in der Öffentlichkeit kaum Beachtung fand, da es weit weniger spektakulär ist als Zwillingskosmonautenflüge. Dennoch ist das Experiment für die Zukunft der Raumfahrt von überragender Bedeutung.

Es hat sich nämlich gezeigt, dass die hauptsächliche Begrenzung der Mission von Raumfahrzeugen durch die Lebensdauer der verfügbaren elektrischen Energiequellen gegeben ist. Dies gilt in erster Linie für herkömmliche Batterien, weil deren Lebensdauer und Leistung pro Gewichtseinheit nicht den besonderen Anforderungen der Weltraumfahrt entsprechen. Aber auch die naheliegende Ausnutzung der Sonnenenergie ist nicht ohne Probleme; so sind z. B. Sonnenzellen gegen radioaktive Strahlungen, wie sie in den van-Aellen-Gürteln sowie bei solaren Eruptionen vorkommen, sehr empfindlich und verursachten schon den Ausfall mancher Satelliten. Die Atomkraft bietet sich deshalb als die ideale Lösung für die Energieversorgung von Weltraumflugkörpern an.

In den Vereinigten Staaten wurde 1956 die Entwicklung von nuklearen Stromerzeugungsquellen für die Raumfahrt in Angriff genommen, und zwar im Rahmen des Programmes SNAP (*S*ystems for *N*uclear *A*uxiliary *P*ower = Systeme für die nukleare Hilfsstromerzeugung). Dieses Programm besteht aus zwei Teilen, nämlich einerseits sog. Radioisotopen-Generatoren und anderseits Miniaturreaktoren.

Die Radioisotopen-Generatoren, welche mit ungeraden Zahlen numeriert sind (SNAP-1, SNAP-3 usw.), wandeln die beim Zerfall von radioaktiven Elementen entstehende Wärme direkt in Elektrizität um. Eine erste solche «Atombatterie» mit dem Isotop Polonium-210 als Strahlenquelle wurde im Jahre 1959 von Präsident Eisenhower der Öffentlichkeit vorgestellt. Sie wog 1,7 kg und hatte eine Leistung von 2,5 W. Ziemlich rasch konnte das kostspielige Polonium-210 durch billigere Radioisotope mit längerer Lebensdauer ersetzt werden. Im Juni 1961 wurde ein erster Satellit, der TRANSIT 4A, mit einem Radioisotopengenerator vom Typ SNAP-3 in die Umlaufbahn gebracht. Der Generator hat die Form einer weissen Metallkugel von 12 cm Durchmesser und enthält eine kleine Menge Plutonium-238, welches bei seinem Zerfall Alpha-Strahlung abgibt. Die dabei entstehende Wärme wird durch Thermoelemente in Elektrizität (2,7 W) zum Betrieb der Sendeanlagen des Satelliten umgewandelt, welche theoretisch 90 Jahre funktionieren könnten. Mit Generatoren vom Typ SNAP-9A, die ebenfalls mit Plutonium-238 arbeiten und eine Leistung von 25 W aufweisen, wurden 1963/64 verschiedene DOD-Navigationssatelliten ausgerüstet. Gegenwärtig befinden sich eine ganze Reihe weiterer SNAP-Generatoren in Vorbereitung, die u. a. für das Projekt Surveyor — welches eine unbemannte «weiche» Landung auf dem Mond zum Ziel hat —, für interplanetarische Sonden und meteorologische Satelliten bestimmt sind. Es wird schon an SNAP-Generatoren mit einer Leistung von 250 W gearbeitet, für die Strontium-90 als Strahlenquelle dienen wird.

Im allgemeinen empfiehlt sich der Einsatz von Radioisotopen-Generatoren nur dann, wenn die benötigte elektrische Leistung die Grössenordnung von einigen 100 W nicht übersteigt. Für Leistungen ab 500 W bis etwa 300 kW entwickelte die amerikanische Atomenergiekommission leichte, wartungsfreie Miniaturreaktoren, welche mit geraden Zahlen bezeichnet sind (SNAP-2, SNAP-8 usw.). Eben dieser Familie gehört der kürzlich in die Umlaufbahn gebrachte SNAP-10A an, der nun den Beweis erbringt, dass ein kleines Kernkraftwerk im Weltraum funktionieren kann. Neben der Erzeugung der für den Betrieb der Apparaturen benötigten Elektrizität sind die SNAP-Reaktoren auch dafür bestimmt, Strom für den elektrischen Antrieb oder sog. Ionenantrieb von Raumflugkörpern zu liefern. Im Gegensatz zum thermischen Antrieb, mit dem eine Rakete unter hoher, aber kurzzeitiger Beschleunigung von der Erdoberfläche abgeschossen wird, verfügt ein elektrischer Antrieb nur über einen geringen Schub und wird deshalb erst nach Überwindung der Erdanziehung in Betrieb gesetzt werden. Da der Schub aber ununterbrochen während der gesamten Flugzeit auf das Raumschiff einwirkt, können dennoch sehr hohe Geschwindigkeiten erzielt werden. Auf dem Flug zum Jupiter könnte ein Ionenaggregat eine Geschwindigkeit von 160 000 km pro Stunde erreichen und die Entfernung in weniger als einem Jahr bewältigen. Eine chemische Rakete würde für dieselbe Entfernung $2^1/_2$ Jahre benötigen. Wegen der Notwendigkeit des Einsatzes von Ionenantrieben für interplanetarische Missionen und im Hinblick auf den grossen Elektrizitätsbedarf fortgeschrittener Raumflugkörper, Mondbasen und bemannter Satelliten wird in den Vereinigten Staaten schon heute ein Reaktor mit einer elektrischen Leistung von 300...1000 kW entwickelt, der den Namen SNAP-50/SPUR trägt.

Kurznachrichten über die Atomenergie

621.039

Der indische Botschafter übergab der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) sechs Geräte für die Strahlenkontrolle und drei Apparate für die Überwachung der Kontamination. Diese Apparate sollen in den Laboratorien der IAEO und in Seibersdorf zum Schutze des Personals gegen gefährliche Strahlungen dienen.

Im Rahmen der Schweizerischen Vereinigung für Atomenergie (SVA), Bern, wurde kürzlich eine «Beratungskommission für industrielle Strahlennutzung» geschaffen. Ihr Zweck besteht darin, die Industrie über die Anwendungen ionisierender Strahlen zu informieren und zu beraten sowie ihr die Benützung von Spezialanlagen zu vermitteln.

In den USA wurde der Bau eines der grössten Atomkraftwerke beschlossen. Auf dem Gelände des ersten Dresden-Reaktors soll für rund 76 Millionen Dollar ein Einkreis-Siedewasserreaktor von rund 750 MW gebaut werden. (Der Preis der Anlage versteht sich ohne Brennstoffladung.) Die Gestehungskosten der erzeugten elektrischen Energie wurden merkwürdig niedrig angesetzt, nämlich auf 1,6 Rp./kWh.

Bekanntlich versank im April 1963 das amerikanische Unterseeboot «Thresher» aus unbekannten Gründen. Seither setzt das Marineministerium der USA alle Mittel ein, um das gesunkene Boot oder Teile desselben zu finden, bzw. zu heben. Nun gelang es mit Hilfe eines Bathyskaphs, das Heckteil und den Turm des Unterseebootes aufzufinden und zu photographieren. Das Boot liegt in einer Tiefe von 2500 m.

Eine Stockholmer Brennelement-Fabrik lieferte kürzlich 3,5 t Kernbrennelemente aus Uranoxyd an das Eidg. Institut für Reaktorforschung (EIR) in Würenlingen. Die 1000 mit Aluminium umhüllten Elemente enthalten je 200 Uranpillen. Sie werden im Rahmen des schweizerischen Entwicklungsprogrammes für Schwerwasser-Leistungsreaktoren des EIR für Experimente eingesetzt.

Zwei neu errichtete Atomkraftwerke von je 500 MW Leistung, die bisher die grössten der Welt sind, nahmen in Grossbritannien kürzlich die Erzeugung von elektrischer Energie auf. Zur Zeit befinden sich weitere vier Gross-Atomkraftwerke im Bau, womit Grossbritannien bis 1970 über etwa 5000 MW installierte Leistung verfügen wird.

In der Schweiz arbeiten schätzungsweise 2000 Personen mit radioaktiven Stoffen und etwa 15 000 im Zusammenhang mit Röntgenapparaten. Sie müssen gemäss der Verordnung über Strahlenschutz vom April 1963 dauernd kontrolliert werden.

Schi.