

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

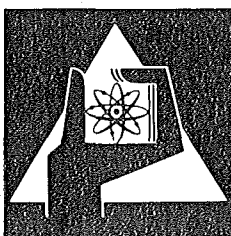
Oktober 1973

KFK 1835

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Schneller Brüter

**Vor- und Nachteile von Thyristoranlagen zur Stromversorgung
elektrisch beheizter Stäbe hoher Leistungsdichte**

L. Krebs, S. Malang, H.M. Politzky, K. Rust



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1835

Institut für Reaktorbauelemente
Projekt Schneller Brüter

Vor- und Nachteile von Thyristoranlagen zur Stromversorgung
elektrisch beheizter Stäbe hoher Leistungsdichte

L.Krebs, S.Malang, H.M.Politzky, K.Rust

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH, KARLSRUHE



Zusammenfassung

Zur experimentellen Untersuchung der thermischen Verhältnisse an den Brennstäben von Kernreaktoren werden elektrisch beheizte Stäbe verwendet. Die Stromversorgung solcher Stäbe kann sowohl mit Gleichstrom - als auch Wechselstromanlagen erfolgen. In steigendem Maß werden Thyristoren verwendet, weil mit ihnen auf die einfachste und billigste Art die Leistung der Heizstäbe zu regeln ist. Neben Problemen der Leistungsmessung verursacht eine derartige Leistungsregelung durch Phasenanschnitt oder durch Impulsgruppensteuerung jedoch mechanische Wechselbeanspruchungen in den Heizstäben infolge der zeitlich ungleichförmigen Wärmefreisetzung. Die mechanischen Auswirkungen auf den Stromleiter werden in dem vorliegenden Bericht für den Fall einer Anschnittsteuerung am Beispiel eines indirekt elektrisch beheizten Stabes dargestellt.

Advantages and Disadvantages of Thyristors at the Power Supply of Electrically Heated Rods with High Power Density.

Abstract

Electrically heated rods are used to investigate the thermal conditions at fuel rods. Direct current systems as well as alternating current systems may be used as power supply of such rods. More and more thyristors are applied, what means the simplest and cheapest manner to regulate the power of heaters. However, in addition to the problems in measuring the power the regulation by phase control or pulse train control causes mechanical stresses in the heaters due to the time depending change of heat generation. The example of an indirectly electrically heated rod was used to investigate the mechanical effects of the phase control on the current conductor.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Beurteilungskriterien von Stromversorgungsanlagen
3. Arten der Ansteuerung von Thyristoren
 - 3.1 Phasenanschnittsteuerung
 - 3.2 Impulsgruppensteuerung
4. Leistungsregelung mit Thyristoren
5. Rechenmodell
 - 5.1 Bestimmung der Temperaturen im Heizstab
 - 5.2 Bestimmung der mechanischen Spannungen
6. Zeitlicher Verlauf der Temperaturen und der mechanischen Spannungen im Stromleiter eines Heizstabes
7. Zusammenfassung
8. Nomenklatur
9. Literatur

1. Einleitung

Zur Auslegung von Brennelementen sind Experimente mit elektrisch beheizten Brennstabsimulatoren großer Leistung erforderlich. Über Eigenschaften und Herstellung dieser Stäbe wurde in [1] berichtet, während in [2] ein thermodynamischer Vergleich zwischen elektrisch und nuklear beheizten Stäben durchgeführt wurde. In dem vorliegenden Bericht werden Fragen untersucht, die mit dem Einsatz von Thyristoren verbunden sind. Ihren wirtschaftlichen Vorteilen stehen technische Nachteile gegenüber, die bei den übrigen Stromversorgungsarten nicht auftreten. Dabei interessieren hauptsächlich die mechanischen Auswirkungen der sich periodisch stark ändernden Leistungsabgabe auf die Stäbe.

In Abb. 1 ist der Querschnitt eines solchen Heizstabes dargestellt. Der Heizstab besteht aus 2 konzentrischen Rohren, die durch eine keramische Schicht gegeneinander elektrisch isoliert sind. Das stromführende innere Rohr, d.h. die Wärmequelle des Stabes, ist ferner zur mechanischen Stützung mit Keramik gefüllt. Experimentelle Untersuchungen [1] an derartigen Heizstäben, bei denen Hüllrohre und Stromleiter aus Edelstahl und die Isolation aus Bornitrid bestanden, ergaben, daß bei einer Temperatur von 700°C an der Oberfläche des Heizstabes eine Heizflächenbelastung von 450 W/cm^2 erreicht werden kann. Die Temperatur des Stromleiters erreicht hierbei ca. 1000°C . Da die Festigkeit des Edelstahls bei solchen Temperaturen sehr gering ist, stellte sich die Frage, ob die durch die Thyristorsteuerung verursachten Temperaturschwankungen zu unzulässigen mechanischen Wechselspannungen führen können.

Zum Druck eingereicht am 10.9.1973

2. Beurteilungskriterien von Stromversorgungsanlagen

Heizstäbe hoher Leistung sind bis auf wenige Ausnahmen dadurch gekennzeichnet, daß infolge eines kleinen elektrischen Leiterwiderstandes große Ströme benötigt werden. Es ist nicht außergewöhnlich, daß in einen Stab von 6 mm Durchmesser und einer beheizten Länge von 1 m ein Strom von 600 A eingespeist werden muß. Ferner erfordern die Experimente häufig eine Spannungsregelung zwischen 0 und 100%. Folgende Stromversorgungsanlagen kommen grundsätzlich in Betracht:

Gleichstromanlagen

- Gleichstromgeneratoren
- Halbleitergleichrichter mit Stelltransformatoren

Wechselstromanlagen

- Stelltransformatoren
- Transduktoren
- Thyristoren

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Gesichtspunkte zusammengestellt, die bei der Auswahl einer geeigneten Stromversorgungsanlage zu berücksichtigen sind. Zu den Beurteilungskriterien zählen insbesondere:

- Steuerbarkeit
- Betriebsverhalten
- meßtechnischer Aufwand
- Bauvolumen und Kosten

Aus der Tabelle ist zu entnehmen, daß alle Stromversorgungsanlagen außer dem Thyristor Kupferspulen großen Querschnitts und beachtliche Eisenpakete für die erwähnten Stromstärken von einigen hundert Ampere benötigen. Der Thyristor besitzt darüber hinaus noch weitere Vorteile, wie außerordentlich kurze Schaltzeiten, relativ niederen

Preis und keinen mechanischen Verschleiß. Im folgenden wird daher zunächst eine einführende Beschreibung der gesteuerten Siliziumzelle d.h. eines Thyristors gegeben [7].

3. Arten der Ansteuerung von Thyristoren

Der Thyristor weist neben der Anode und der Katode eine Steuerelektrode auf. Durch Anlegen eines entsprechenden Steuerstromes wird der Thyristor gezündet, d.h. er wird in den leitenden Zustand überführt. Zum Löschen ist ein Absenken des Anodenstromes unter den Wert des Haltestromes erforderlich, wodurch der Thyristor in den Sperrzustand zurückgebracht wird. Durch eine entsprechende elektronische Ansteuerung kann der Thyristor zu vorprogrammierten Zeitpunkten in den gewünschten Zustand überführt werden. Grundsätzlich ist dies sowohl bei Gleichstrom als auch bei Wechselstrom möglich. Im folgenden werden einige Eigenschaften des Thyristors für zwei verschiedene Ansteuerungsarten untersucht, die spezifisch sind für den Betrieb bei Wechselstrom.

3.1 Phasenanschnittsteuerung

Thyristoren, die mit einem sinusförmigen Versorgungsnetz betrieben werden, bieten die Möglichkeit durch Phasenanschnitt den Zeitpunkt einzustellen, zu dem sie im Verlauf einer Halbwelle der Versorgung in den leitenden Zustand übergehen und damit den Verbraucher an Spannung legen. Die Spannungskurve eines Wirkwiderstandes als Verbraucher hat daher den in Abb. 2 gezeigten Verlauf. Die mathematische Beschreibung dieser Spannungskurve durch eine FOURIER-Reihe hat die Form:

$$u^*(t) = \hat{u} \cdot \sin \omega t + \hat{u} \cdot \sum_{\nu=0}^{\infty} [A_{2\nu+1} \cos (2\nu+1) \omega t + B_{2\nu+1} \sin (2\nu+1) \omega t] \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

$$A_{2v+1} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\cos 2(v+1)\alpha - 1}{v+1} - \frac{\cos 2v\alpha - 1}{v} \right)$$

und

$$B_{2v+1} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sin 2(v+1)\alpha}{v+1} - \frac{\sin 2v\alpha}{v} \right)$$

Aus dieser Darstellung geht hervor, daß die auftretenden Harmonischen ungeradzahlige Vielfache der Grundwelle sind, und daß die Amplituden der Grundwelle und der Oberwellen von der Größe des Phasenanschnittwinkels α abhängen. Eine genaue Messung des Effektivwertes von Strom, Spannung und Leistung kann daher nur unter Berücksichtigung der Oberwellenanteile erfolgen [8].

Die Spannungskurven und die daraus resultierenden Amplitudenspektren sind für die Werte des Anchnittwinkels α von $\pi/4$, $\pi/2$ und $3\pi/4$ in den Abbildungen 2 a - c dargestellt. Die zugehörigen FOURIER-Koeffizienten A_{2v+1} und B_{2v+1} bis zur 41. Harmonischen sind in Tabelle 2 zusammengefaßt. Weiterhin sind die Werte des Amplitudenspektrums aufgeführt. Diese lassen sich aus den FOURIER-Koeffizienten für die Harmonischen nach folgender Beziehung berechnen:

$$|A(f_{2v+1})| = \sqrt{A_{2v+1}^2 + B_{2v+1}^2} \quad \text{für } v \geq 1$$

bzw. für die Grundwelle:

$$|A(f_1)| = \sqrt{A_1^2 + (1+B_1)^2}$$

Die Ergebnisse von Experiment (Abb. 2) und Rechnung (Tab.2) stimmen im Rahmen der Meßgenauigkeit gut überein. Danach besitzt die Amplitude der 61. Harmonischen (3050 Hz) für einen Phasenanschnittwinkel $\alpha = 3\pi/4$ beispielsweise noch etwa 4% der Grundwellenamplitude. Dieser Wert zeigt

deutlich, daß der Oberwellengehalt bei Phasenanschnittsteuerung stets zu berücksichtigen ist. Aus dem Verlauf der Spannungskurve (Abb. 2) ist weiterhin zu entnehmen, daß mit zunehmendem Ansnittwinkel α , der Effektivwert der angelegten Spannung abnimmt. Daher ist es durchaus möglich, einen Verbraucher, dessen Spannungsversorgung z.B. 100 V nicht überschreiten darf, mit Thyristoren zu betreiben, die von einem 220 V-Netz eingespeist werden. In dem HKW-Kreislauf (Heißdampf-Korrosion unter Wärmeübergang) des Instituts für Reaktorbauelemente sind sechs Stromversorgungen dieser Bauart eingesetzt für Heizstabelleistungen bis zu 70 kW, bei einer maximal zulässigen Spannung von 100 V. Sie haben die einwandfreie Funktionstüchtigkeit solcher Anlagen während einiger 1000 Stunden Betrieb demonstriert. Eine nicht zu unterschätzende Gefahr besteht allerdings darin, daß durch einen Fehler in der elektronischen Ansteuerung oder durch eine Zerstörung des Thyristors, z.B. infolge zu hoher Umgebungstemperatur, die volle Spannung der Netzversorgung am Verbraucher anliegen kann, was zu seiner Überlastung bzw. Ausfall führt, sobald das Verhältnis von U^*/U von 1 wesentlich abweicht.

Der Einbau von überflinken Schmelzsicherungen ist daher als ein in vielen Fällen ausreichender Mindestschutz unerläßlich. Darüberhinaus kann es zum Schutz von Verbraucher und Stromversorgung zweckmäßig sein, mit Grenzwertsignalen, die aus unzulässigen Änderungen von Strom oder Spannung resultieren, schnellansprechende Lastschalter (<5 ms) anzusteuern [9].

Um den großen Störeinfluß der Phasenanschnittsteuerung auf das Versorgungsnetz zu verringern, wird vor die Thyristoren eine Schutzdrossel geschaltet. Mit zunehmender Größe dieser eisenlosen Induktivität wird die Form der Spannungskurve stärker abgerundet, wodurch die Störwirkungen zwar nicht beseitigt, aber doch abgemildert wer-

den. Bei größeren Phasenanschnittwinkeln ist die Wirkung einer Schutzdrossel häufig nicht ausreichend, vor allem dann nicht, wenn Phasenanschnittsteuerungen mehrerer leistungsstarker Verbraucher dasselbe Netz belasten. Eine wesentliche Verbesserung kann erreicht werden durch die Impulsgruppensteuerung.

3.2 Impulsgruppensteuerung

Unter der Impulsgruppensteuerung ist das wahlweise Auslassen einer einstellbaren Anzahl b voller Spannungsperioden innerhalb einer gegebenen Periodenzahl a zu verstehen. Ein solches Steuerverfahren kann jedoch nur eingesetzt werden, wenn einerseits die hohen Werte der Spitzenspannung und andererseits die oft über mehrere Perioden andauernden Spannungslücken zugelassen werden können.

Mathematisch läßt sich der Spannungsverlauf bei Impulsgruppensteuerung durch folgende FOURIER-Reihe beschreiben:

$$u^*(t) = \hat{u} \sum_{v=0}^{\infty} \left[A_v \cdot \cos v \frac{\omega}{a} t + B_v \cdot \sin v \frac{\omega}{a} t \right] \quad (2)$$

Hierin bedeuten

$$A_v = \frac{a}{\pi} \cdot \frac{\cos 2 \pi \frac{b}{a} v - 1}{v^2 - a^2}$$

und

$$B_v = \frac{-a}{\pi} \cdot \frac{\sin 2 \pi \frac{b}{a} \cdot v}{v^2 - a^2}$$

Aus dieser Darstellung geht hervor, daß außer den Harmonischen der Netzfrequenz auch Subharmonische auftreten. Im Gegensatz zu Gleichung (1) sind alle Oberwellen vorhanden. Ihre Amplituden werden mit dem Quadrat ihrer Ordnungszahl kleiner. Hieraus ergibt sich ein geringer Störeinfluß auf das Netz und die Möglichkeit einer relativ genauen Leistungsmessung mit gewöhnlichen Gleichrichter-

strumenten. Die gemessenen Amplitudenspektren sind für die Fälle $a = 2, b = 1$ und $a = 6, b = 1$ in Abb. 3 dargestellt und ihre Werte in Tabelle 3 zusammengefaßt.

Beim Anschluß mehrerer Verbraucher mit Impulsgruppensteuerung wird das Versorgungsnetz weniger belastet als bei Verwendung der Phasenanschnittsteuerung, da das Auslassen voller Spannungsperioden nicht gleichzeitig sondern statistisch verteilt auftritt.

4. Leistungsregelung mit Thyristoren

Die Prinzipschaltung einer Leistungsregelung von Heizstäben mit Thyristoren ist in Abb. 4 dargestellt. Das zugehörige Blockschaltbild bei Phasenanschnittsteuerung geht aus Abb. 5 hervor.

Das dynamische Verhalten der im Blockschaltbild angegebenen einzelnen Anlageteile läßt sich auf folgende Weise beschreiben:

- Der Thyristor weist ein nichtlineares Verhalten auf. Für den Effektivwert der von ihm abgegebenen Spannung gilt:

$$U_{\alpha} = \left| \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_{\alpha}}^{T/2} \hat{u}^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt} \right| \quad (3)$$

Hierin bedeuten:

- t_{α} die Sperrzeit des Thyristors bei einem vorgegebenen Phasenanschnittwinkel α
- T die Periodendauer
- \hat{u} die Spitzenspannung des Versorgungsnetzes

- Der Heizstab weist ebenfalls nichtlineares Verhalten auf. Für die von ihm aufgenommene elektrische Leistung N_e gilt:

$$N_e = \frac{1}{R} \cdot U_a^2 \quad (4)$$

Hierin bedeutet R den elektrischen Widerstand des Heizstabes.

- Der Leistungsmesser besitzt ein aperiodisch gedämpftes Meßwerk. Sein Ausgangssignal $x(t)$ genügt folgender Differentialgleichung [10]:

$$J \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + p \cdot \frac{dx(t)}{dt} + D \cdot x(t) = N(t) \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

J das Trägheitsmoment der Drehspule

p die Dämpfung

D die Konstante des elektrischen Gegenmomentes

- Der Regler wird vorzugsweise als PI-Glied ausgebildet, um die bei P-Reglern auftretende bleibende Regelabweichung zu verhindern. Sein Ausgangssignal $U_e(t)$ genügt der Differentialgleichung [11]:

$$U_e(t) = V_R \cdot \left[\Delta x(t) \pm \frac{1}{T_n} \cdot \int_0^t \Delta x(u) \cdot du \right] \quad (6)$$

Hierin bedeuten:

$\Delta x(t)$ die Regelabweichung (Eingangssignal der Regler)

V_R die Reglerverstärkung

T_n die Nachstellzeit

- Das Ansteuergerät kann für Ansnittwinkel α zwischen 30° und 170° als reines Proportionalglied angesehen werden, wie aus Abb. 6 ersichtlich ist. Die Beschränkung auf diesen Winkelbereich ist von geringer Bedeutung, da ein Leistungsbetrieb außerhalb dieses Bereiches kaum infrage kommt.

Von großem praktischen Interesse ist die Frage, ob der hier angegebene Regelkreis stabil ist. Die Regelungstechnik bietet für die Beurteilung dieses Problems mehrere Verfahren an. Sie sind für lineare Regelkreise i.a. einfach zu handhaben und bedienen sich häufig des Frequenzbereiches. Dagegen wurden für nichtlineare Systeme, infolge ihrer schwierigen Handhabung, mehrere Näherungsverfahren entwickelt. In manchen Fällen wird das nichtlineare Verhalten für einen begrenzten Signalbereich durch eine lineare Näherung genügend genau beschrieben. Für den vorliegenden Regelkreis ergibt sich die dem Heizstab zugeführte elektrische Leistung als Funktion vom Ansnittwinkel α aus den Gleichungen (3) und (4) zu:

$$N_e = \frac{1}{R} \cdot U_\alpha^2 \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \cdot \sin 2\alpha \right) \quad (7)$$

Unter der Annahme, daß der Phasenanschnitt für die gewünschte Heizstableistung etwa bei $\alpha = 90^\circ$ liegt - was durchaus realistisch ist - kann in Gl. (7) der Ansnittwinkel α in der Form angegeben werden:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \pm \Delta\alpha$$

Damit ergibt sich für die Leistung des Heizstabes

$$N_e = \frac{1}{R} \cdot \frac{\hat{U}^2}{2} \cdot \left(0,5 \pm \frac{\Delta\alpha}{\pi} \pm \frac{1}{2} \cdot \sin 2\Delta\alpha \right)$$

Für kleine Winkel $\Delta\alpha$ kann $\sin 2\Delta\alpha \approx 2\Delta\alpha$ gesetzt werden, sodaß mit guter Näherung (für $2\Delta\alpha = 30^\circ$ beträgt der Fehler erst ca. 5 %) die Gl. (7) ersetzt werden kann durch

die lineare Gleichung

$$N_e = \frac{1}{R} \cdot \frac{\hat{U}^2}{2} \cdot \left(0,5 \pm \frac{2}{\pi} \cdot \Delta\alpha\right) \quad (8)$$

Der nichtlineare Regelkreis aus Abb. 6 kann folglich gut durch den linearen Regelkreis beschrieben werden, der in Abb. 7 dargestellt ist. Zur Untersuchung der Stabilität des linearisierten Regelkreises wird aus den Beziehungen (5), (6) und (8) für die einzelnen Regelkreisglieder die komplexe Übertragungsfunktion des offenen Kreises nach den Regeln der Blockschaltbildalgebra [11] berechnet.

$$F_0(s) = \overbrace{\frac{1}{R} \cdot \frac{\hat{U}^2}{2} \cdot \left(-\frac{2}{\pi}\right)}^A \cdot \overbrace{\frac{1}{J} \cdot \left(\frac{1}{s^2 + \frac{p}{J} \cdot s + \frac{D}{J}}\right)}^B \cdot \overbrace{V_R \left(1 + \frac{1}{sT_n}\right)}^C \cdot \overbrace{(-A_0)}^D$$

A $\hat{=}$ Thyristor und Heizstab

B $\hat{=}$ Leistungsmesser

C $\hat{=}$ PI - Regler

D $\hat{=}$ Ansteuergerät

mit der Kreisverstärkung

$$K = \frac{1}{R} \cdot \frac{\hat{U}^2}{\pi} \cdot \frac{1}{J} \cdot A_0 \cdot V_R$$

Aus der hierzu gehörigen Wurzelortkurve [12], kann die Lage der Pole und der Nullstellen des geschlossenen Regelkreises in der komplexen s-Ebene in Abhängigkeit von der Kreisverstärkung K entnommen werden (Abb. 8). Aus dem Verlauf der Wurzelortkurve (Abb. 8 a) ist zu entnehmen, daß bei kleiner Nachstellzeit T_n und kleiner Kreisverstärkung K der Kreis ohne Überschwingen einer Änderung der Führungsgröße folgt. Wird die Kreisverstärkung größer gewählt, so tritt zunächst ein Überschwingen auf, bis für $K \geq K_{\text{Krit}}$ der Regelkreis sogar instabil wird. Eine größere Nachstellzeit (Abb. 8 b) bewirkt, daß der Kreis auch für sehr große K-Werte stabil bleibt. Wird die Nachstellzeit noch größer gewählt (Abb. 8 c) so bleibt auch in diesem Fall

der Kreis für alle K-Werte stabil. Der Kreis wird allerdings bei jeder Störung oder Änderung der Führungsgröße überschwingen.

Diese Überlegungen zeigen, daß für Heizstäbe eine Leistungsregelung mit phasenanschnittgesteuerten Thyristoren in regelungstechnischem Sinn besonders gut geeignet ist. Die am HKW-Loop hiermit gesammelten Erfahrungen bestätigen diese Aussage. Spannungsschwankungen des Versorgungsnetzes werden z.B. so gut ausgeregelt, daß sie am Leistungsschreiber nicht mehr zu erkennen sind.

Untersucht man das Regelverhalten bei Spannungs- oder Stromregelung auf die gleiche Weise wie dasjenige der Leistungsregelung, so gelangt man zu ähnlich guten Ergebnissen. Allerdings bewirken in diesen Fällen Änderungen des von der Temperatur abhängigen elektrischen Widerstandes keine Regelabweichung und damit auch keinen Reglereingriff. Ist dieses Verhalten bei einem Versuch unerwünscht, so ist die Leistungsregelung vorzuziehen. Die Frage, inwieweit eine für die Meßtechnik und die Güte des Versorgungsnetzes wichtige Induktivität zur Dämpfung der Oberwellen sich auf das Regelverhalten des Kreises auswirkt, wird durch eine entsprechende Rechnung dahingehend beantwortet, daß die Neigung zum Überschwingen je nach Größe der Induktivität mehr oder weniger zunimmt.

Für Versuche, bei denen die Kühlmittelaustrittstemperatur einen einstellbaren Wert annehmen soll, ist es von Vorteil, außer der Leistungsregelung zusätzlich eine Temperaturregelung einzuführen. Hiermit können die durch Schwankungen der Kühlmittelintrittstemperatur bedingten Störungen ausgeregelt werden. Da eine Temperaturregelung stets relativ träge arbeitet, ergeben sich weitergehende Stabilitätsprobleme. Diese seien hier nicht näher behandelt, da sie

nicht durch den Einsatz von Thyristoren zur Stromversorgung bedingt sind.

Die für die Phasenanschnittsteuerung ausführlich behandelten Stabilitätsuntersuchungen lassen sich in gleicher Weise für die Impulsgruppensteuerung durchführen. Entsprechend Gl. (7) ergibt sich für die zugeführte elektrische Leistung:

$$N_e = \frac{1}{R} \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{b}{a}\right) \quad (9)$$

Man erkennt, daß diese Leistung von dem Verhältnis der ausgelassenen zu den gesamten Spannungsperioden linear abhängt. Dies bedeutet, daß im Gegensatz zur Phasenanschnittsteuerung eine Linearisierung bei der Impulsgruppensteuerung zur Untersuchung der Stabilität des Regelkreises nicht mehr erforderlich ist. Thyristoren mit Impulsgruppensteuerung sind daher hinsichtlich des Regelverhaltens zur Stromversorgung von Heizstäben ebenfalls gut geeignet.

5. Rechenmodell

Zur Abschätzung der Auswirkungen zeitlich ungleichförmiger Wärmefreisetzung in einem Heizstab müssen das zeitlich veränderliche Temperaturfeld in dem Heizstab und die daraus resultierenden mechanischen Spannungen ermittelt werden. Besonderes Interesse fand hierbei der Einfluß des Phasenanschnittes durch Thyristoren mit Schutzdrosseln, da eine darartige Stromversorgung für die Heizstäbe des HKW-Loops gewählt wurde.

5.1 Bestimmung der Temperaturen im Heizstab.

Die Berechnung des zeitlich veränderlichen Temperaturfeldes in einem Heizstab erfolgte mit dem Rechenprogramm RELAX [13], welches ein auf der Relaxationstheorie der Thermodynamik beruhendes Differenzenverfahren anwendet. Der Einfachheit halber wurde Rotationssymmetrie vorausgesetzt, so daß es sich um ein eindimensionales Problem handelte. Zu diesem Zweck wurden die einzelnen Werkstoffe des Heizstabes in ein genügend feines Netzwerk von Punkten eingeteilt, in denen die zugehörige Masse zusammengefaßt ist. Die einzelnen Punkte sind durch "Wärmestraßen" miteinander verbunden. Als veränderliche Wärmequellstärke in dem Stromleiter wurde ein gemessener zeitlicher Verlauf der elektrischen Leistung eingegeben.

5.2 Bestimmung der mechanischen Spannungen

Die Wärmespannungen in dem Stromleiter wurden unter Verwendung der in [14] angegebenen Beziehungen für das zeitlich veränderliche Temperaturfeld errechnet. Hierbei wurde für mehrere Punkte der Verlauf der Vergleichsspannung nach der Formänderungshypothese bestimmt. Da bei den vorliegenden hohen Temperaturen eine zeitlich konstante Wärmespannung sehr schnell durch Kriechen abgebaut wird, wurden außerdem die Wärmespannungen bei Gleichstromheizung berechnet. Als verbleibende Materialbeanspruchung wurde in erster Näherung nur die Differenz der Vergleichsspannungen bei Thyristorsteuerung und bei Gleichstromheizung betrachtet.

6. Zeitlicher Verlauf der Temperaturen und der mechanischen Spannungen im Stromleiter eines Heizstabes

Für einen Heizstab mit dem in Abb. 1 gezeigten Querschnitt wurde der zeitliche Verlauf des Temperaturfeldes und der mechanischen Spannungen bei verschiedenen Beheizungsarten

bestimmt. Einheitlich wurde eine mittlere Wärmestromdichte an der Staboberfläche von $313,5 \text{ W/cm}^2$ zugrunde gelegt. Es wurden folgende Fälle untersucht:

- a) Gleichstrom
- b) Wechselstrom, 50 Hz, sinusförmig
- c) Wechselstrom, 50 Hz mit Phasenanschnitt durch Thyristorsteuerung ohne Schutzdrosseln
- d) Wechselstrom, 50 Hz mit Phasenanschnitt durch Thyristorsteuerung mit Schutzdrosseln
- e) Wechselstrom, 50 Hz, sinusförmig
Impulsgruppensteuerung, $a = 2$, $b = 1$
- f) Wechselstrom 50 Hz, sinusförmig
Impulsgruppensteuerung, $a = 6$, $b = 1$

Die Schutzdrossel im Fall d) hatte eine Induktivität von $0,04 \text{ mH}$. Sie diente zum Schutz des Thyristors gegen Überlastung und zur Minderung der Störeinflüsse auf das Versorgungsnetz.

Der zeitliche Verlauf der elektrischen Spannung pro cm Stablänge ist in Abb. 9 und 10 für die 6 verschiedenen Beheizungsarten dargestellt. Die Gleichstromspannung und damit der Effektivwert der elektrischen Spannung in den Fällen b), c), d), e) und f) betrug $1,061 \text{ V/cm}$. Die Versorgungsspannung für die Thyristoren in den Fällen c) und d) entsprach der üblichen Netzspannung von 220 V . Um bei einem Heizstab von 95 cm Länge eine Effektivspannung von $1,061 \text{ V/cm}$ zu erhalten, mußte bei der genannten Versorgungsspannung der Phasenanschnitt so gewählt werden, daß die Stäbe mit nur etwa 20% der bei voller Netzspannung aufgenommenen Leistung betrieben wurden. Dies führte zu besonders großen Anschnittswinkeln mit Werten über $\pi/2$. Bei Versuchen mit kürzeren Heizstäben muß der Anschnittswinkel oft noch größer gewählt werden, da der elektrische

Widerstand pro cm Stablänge konstruktionsbedingt nicht größer gemacht werden kann.

In Fällen e) und f) handelt es sich nur um prinzipielle Überlegungen, bei denen keine Rücksicht auf eine bestimmte Versorgungsspannung genommen wurde.

Der zeitliche Verlauf der Temperaturen an der inneren und äußeren Oberfläche des Stromleiters ist für die 6 verschiedenen Beheizungsarten in den Abb. 11 und 12 dargestellt. Hierbei wurden nicht die absoluten Temperaturen aufgetragen, sondern die Differenzen zur zeitlich konstant bleibenden Temperatur an der Oberfläche des Stabes. Es ist ersichtlich, daß die Temperaturschwankungen bei Thyristorsteuerung mit Phasenanschnitt etwa doppelt so groß sind wie bei sinusförmigem Wechselstrom.

Noch wesentlich größer sind die Temperaturschwankungen bei Impulsgruppensteuerung. Die Ursache hierfür ist die wesentlich längere Pause in der Leistungszuführung.

In erster Näherung kann für alle Fälle, in denen die Leistungszuführung durch einen Thyristor periodisch unterbrochen wird, gesagt werden, daß die Temperaturschwankungen des Stromleiters proportional sind zur Dauer der Leistungsunterbrechung. Den radialen Verlauf der maximalen und minimalen Temperaturen in dem Heizstab bei Thyristorsteuerung mit Phasenanschnitt unter Verwendung von Schutzdrosseln im Stromkreis zeigt Abb. 13. Für den Temperaturverlauf, der sich bei Thyristorsteuerung mit Schutzdrosseln einstellt, wurde sodann nach dem in 5.2 beschriebenen Verfahren der zeitliche Verlauf der Wärmespannungen berechnet. Es zeigte sich, daß die Wärmespannungen an der äußeren Oberfläche des Stromleiters größer sind als an der inneren Oberfläche, obwohl sich die Temperaturschwankungen umgekehrt verhalten, wie aus

Abb. 11 hervorgeht. Dies beruht auf der Tatsache, daß die Wärmespannungen proportional sind der Differenz zwischen der Temperatur eines betrachteten Punktes und der mittleren Temperatur des Stromleiters. Diese Temperaturdifferenz schwankt an der äußeren Oberfläche mehr als an der inneren. Deshalb wurde in Abb. 14 die mechanische Wechselbeanspruchung an der äußeren Oberfläche als Funktion von der Zeit dargestellt. Es ist zu beachten, daß nicht die absoluten Spannungswerte aufgetragen sind, sondern die Differenz zwischen den bei Wechselstrombeheizung mit Thyristorsteuerung auftretenden mechanischen Spannungen und den bei Gleichstrombeheizung auftretenden. Die hieraus ermittelte maximale Amplitude der Wechelspannung beträgt etwa $0,9 \text{ kp/mm}^2$. Dieser Wert erscheint zunächst vernachlässigbar klein. Da jedoch die Festigkeit eines aus Edelstahl bestehenden Stromleiters bei ca. 1000°C sehr gering und die Frequenz der Wechselbeanspruchung sehr groß ist, kann nicht ausgeschlossen werden, daß diese Effekte zu Schäden an den Stromleitern führen.

Wesentlich größer ist die mechanische Beanspruchung des Stromleiters bei Impulsgruppensteuerung. Diese Beanspruchung in Form einer Wechelspannung ist in erster Näherung proportional der Temperaturschwankung und damit der Dauer der Leistungsunterbrechung.

7. Zusammenfassung

Für die elektrische Versorgung hochbelasteter Heizstäbe bieten sich mehrere Beheizungsarten an. Die wichtigsten Auswahlkriterien für Gleichstrom- und Wechselstromanlagen wurden diskutiert. Hierbei ergab sich, daß Thyristoren mehrere Vorteile aufweisen. Von besonderer Bedeutung sind die guten Regeleigenschaften, die für die Phasenanschnittsteuerung ausführlich dargestellt wurden. Weitere wichtige

Vorteile sind der niedrige Anschaffungspreis und das geringe Bauvolumen. Dagegen ist besondere Sorgfalt bei der Leistungsmessung erforderlich, die durch den hohen Oberwellengehalt beeinträchtigt wird. Dieser Oberwellengehalt wirkt sich außerdem ungünstig auf das Versorgungsnetz aus. Darüberhinaus hat die den Thyristoren eigene intermittierende Leistungszufuhr eine zeitliche ungleichförmige Wärmefreisetzung in den Heizstäben zur Folge.

Für einen konkreten Fall wurde untersucht, welche Wärmespannungen in einem indirekt elektrisch beheizten Stab, wie er z.B. für Wärmeübergangsuntersuchungen in der Reaktorteknik verwendet wird, durch die periodischen Temperaturschwankungen im Stromleiter verursacht werden können. Das zeitlich veränderliche Temperaturfeld und die Wärmespannungen wurden für einen Stromleiter mit folgenden Daten berechnet.

Stablänge	0,95	m
Stabdurchmesser	6,6	mm
Gesamtleistung	61,75	kW
Gesamtwiderstand	0,165	Ohm

Als Beheizungsart wurde gewählt:

Wechselstrom, 50 Hz, Phasenanschnitt durch Thyristorsteuerung mit Schutzdrosseln.

Die Auslegung der Thyristorsteuerung für diesen Fall war ungünstig, da der Stab mit einem Spannungsbedarf von $U^* \approx 101$ V an das 220 V-Netz angeschlossen wurde. Der elektrische Widerstand des Stabes konnte jedoch aus konstruktiven Gründen nicht vergrößert werden. Beim Betreiben kürzerer Stäbe ergibt sich ein noch kleineres Verhältnis U^*/U .

Es zeigt sich, daß die Temperatur des Stromleiters bei Thyristorsteuerung um etwa 25°C schwankt, was eine mechanische Wechselbeanspruchung von knapp 1 kp/mm^2 zur Folge hat. Da der aus Edelstahl bestehende Stromleiter eine Temperatur von ca. 1000°C und somit nur noch eine sehr geringe Festigkeit aufweist, kann nicht ausgeschlossen werden, daß beim Betrieb hochbelasteter Heizstäbe die von der Thyristorsteuerung verursachten Temperaturschwankungen zu Schäden führen. Dieser eventuelle Nachteil der Thyristorsteuerung ist gegenüber deren eindeutigen Vorteilen im Vergleich zu anderen Beheizungsarten abzuwägen.

8. Nomenklatur

a	vorgegebene Anzahl voller Spannungsperioden
A	FOURIER-Koeffizient
b	Anzahl ausgelassener voller Spannungsperioden
B	FOURIER-Koeffizient
D	Konstante des elektrischen Gegenmomentes
f	Frequenz
J	Trägheitsmoment der Drehspule
K	Kreisverstärkung
N	Leistung
p	Dämpfung
R	elektrischer Widerstand des Heizstabes
s	komplexe Variable
t	Zeit
T	Periodendauer
T_n	Nachstellzeit
$u(t)$	sinusförmiger Spannungsverlauf
\hat{u}	Spitzenspannung
$u^*(t)$	Thyristorspannung
U	Effektivwert der Spannung des Versorgungsnetzes
U^*	Effektivwert der Thyristorspannung (allgemein)
U_α	Effektivwert der Thyristorspannung bei Phasenanschnittsteuerung
V	Verstärkung
x	Regelgröße
α	Phasenanschnittwinkel
Δx	Regelabweichung
v	Nummer des Harmonischen
ω	Kreisfrequenz

Indices

e	elektrisch
R	Regler

9. Literaturhinweise

- [1] Casal V.
Heizstäbe mit indirekter Widerstandbeheizung zur Simulierung von Kernbrennstäben
KFK-Bericht 894, März 1969
- [2] Malang S., K.Rust
Thermische Simulation von Brennstäben durch indirekt elektrisch beheizte Stäbe
KFK-Bericht 1587, Mai 1972
- [3] Richter R.
Elektrische Maschinen, Band I
Birkhäuser Verlag, Basel, 1951
- [4] Lehmann W., R. Geisweid
Die Elektrotechnik und die elektrischen Antriebe
Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1962
- [5] Richter R.
Elektrische Maschinen, Band II und Band III
Birkhäuser Verlag, Basel, 1953 bzw. 1954
- [6] Schilling W.
Transduktortechnik
Oldenbourg Verlag, Oldenburg, 1960
- [7] Heumann K., C. Stumpe
Thyristoren
Teubner Verlag, Stuttgart, 1970
- [8] Orlopp E.
Messungen mit Dreheisen-Schalttafelgeräten
in Stromkreisen mit Thyristorsteuerung
Messwerte, Hartmann und Braun-Zeitschrift, Heft 11
Dez. 1970

- [9] Fehling H., A. Treptow
GEARAPID S 2002, ein neuer AEG-Gleichstrom-Schnellschalter mit hoher Strombegrenzung und extrem kurzen Ausschaltzeiten.
AEG-Mitt., Bd. 51, 1961, H.11/12
- [10] Moeller F.
Leitfaden der Elektrotechnik, Band IV
M.Stöckl, K.H.Winterling:"Elektrische Meßtechnik"
Teubner Verlag, Stuttgart, 1968
- [11] Pressler, G.
Regelungstechnik, Band I
Verlag Bibliographisches Institut, Mannheim, 1967
- [12] Pestel E., E. Kollmann
Grundlagen der Regelungstechnik
Vieweg Verlag, Braunschweig 1961
- [13] Malang S., K. Rust
RELAX - Ein Fortran-Programm zur numerischen Bestimmung von Temperaturfeldern mittels der Relaxationsmethode der Thermodynamik
KFK-Bericht 1053, September 1969
- [14] Krieg R.
Zur Berechnung der Spannungen und Verzerrungen in zweifach zusammenhängenden Körpern mit Rechenbeispielen für ein längsberipptes Brennstabhüllrohr
KFK-Bericht 1665, November 1972



Tabelle 1

Zusammenstellung von Beurteilungskriterien
beim Einsatz von Stromversorgungsanlagen

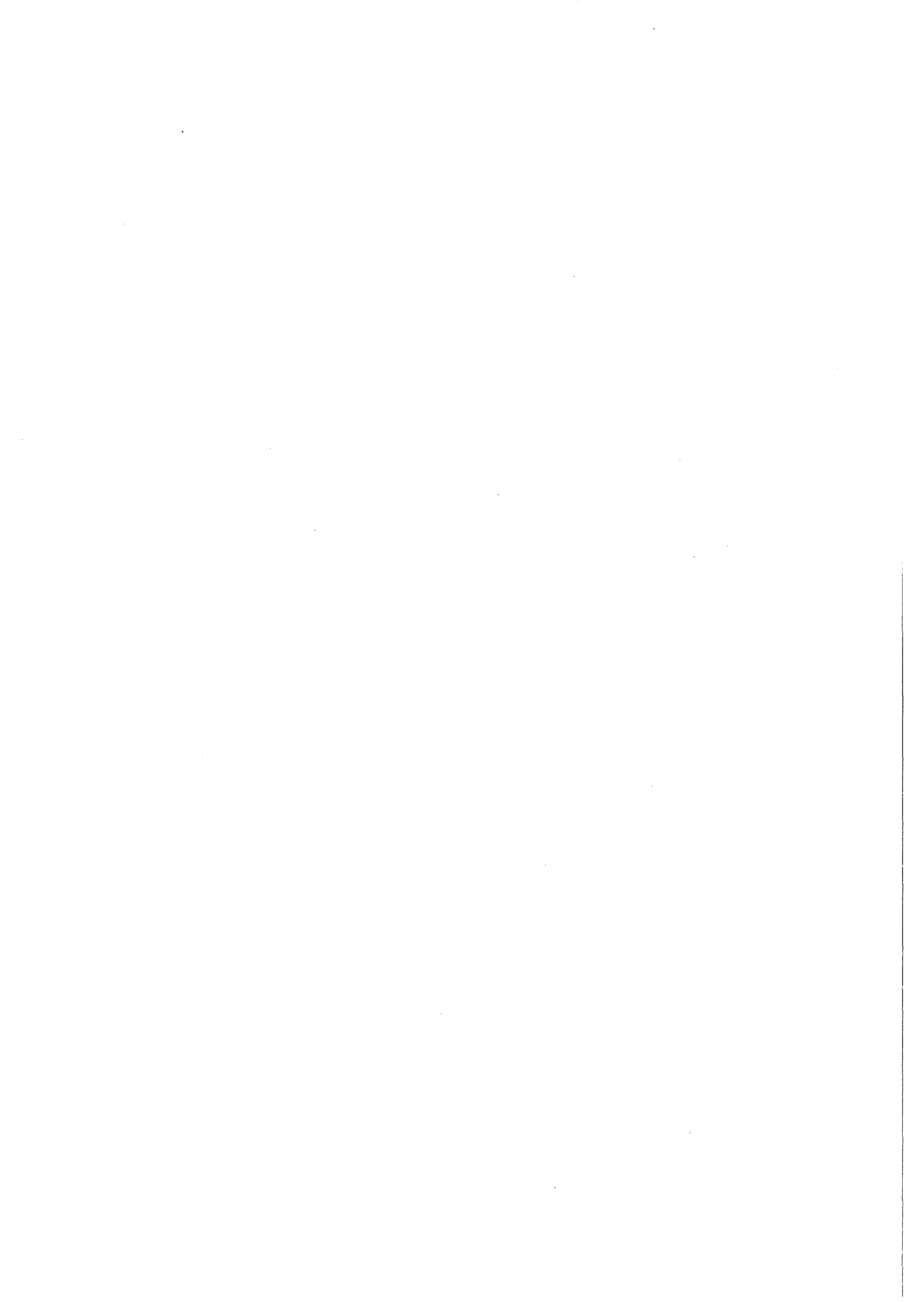
Art der Stromversorgung		Steuerbarkeit	Betriebsverhalten	Meßtechnik	Bauvolumen u. Anschaffungspreis	Literatur
Gleichstromanlagen	Gleichstrom-generator	einfach und schnell durch Ansteuern der Felderregung	sicherer Langzeitbetrieb möglich unempfindlich gegen zeitweise Überlastung, aber lange Ausfallzeiten bei Lager-, Kollektor- oder Wicklungsschaden. Gute Spannungs-konstanz erreichbar	einfache und genaue Meßmöglichkeit für Spannung, Strom und Leistung mit Drehspulinstrumenten, geringer Oberwellengehalt	Sehr großes Bauvolumen, da zusätzlich Antriebsmotor erforderlich hoher Preis	[3]
	Halbleitergleichrichter mit Stelltransformator	mechanisch aufwendig und träge durch Stelltransformator	sicherer Langzeitbetrieb möglich, aber empfindlich bei zeitweiser Überlastung, lange Ausfallzeiten bei Wicklungsschaden. Kompensation von Netzspannungsschwankungen aufwendig	erhöhter Aufwand für genaue Messungen von Spannung, Strom und Leistung infolge beachtlichen Oberwellengehaltes	großes Bauvolumen durch Stelltransformator hoher Preis	[4]
Wechselstromanlagen	Stelltransformator	mechanisch aufwendig und träge, (bei Stufentransformator durch Zahl der Wicklungsanschlüsse festgelegte Spannungsstufung)	sicherer Langzeitbetrieb möglich, unempfindlich gegen zeitweise Überlastung bei ausreichender Kühlung. Lange Ausfallzeiten bei Wicklungsschaden	einfache und genaue Meßmöglichkeit für Spannung, Strom und Leistung mit Gleichrichterinstrumenten, keine Oberwellen, rein sinusförmiger Spannungsverlauf	großes Bauvolumen mittlerer Preis	[5]
	Transduktor	einfach und schnell mit Steuerwicklung geringer Leistung	sicherer Langzeitbetrieb möglich, unempfindlich gegen zeitweise Überlastung bei ausreichender Kühlung. Lange Ausfallzeiten bei Wicklungsschaden	erhöhter Aufwand und besondere Sorgfalt zur genauen Messung von Spannung, Strom und Leistung erforderlich. Beachtlicher Oberwellengehalt, vor allem bei Teillast wirkt sich auch störend auf periphere Meßtechnik aus	großes Bauvolumen hoher Preis	[6]
	Thyristor	einfach und schnell mit handelsüblicher Ansterelektronik (bei Defekt leicht und schnell austauschbar)	sicherer Langzeitbetrieb möglich, empfindlich gegen länger andauernde Überlastung infolge unerlaubten Anstiegs der Sperrschichttemperatur, kurze Ausfallzeiten, da Thyristoren leicht auszuwechseln	<u>Bei Phasenanschnittsteuerung</u> hoher Aufwand und besondere Sorgfalt zur genauen Messung von Spannung, Strom und Leistung erforderlich. Sehr hoher Oberwellengehalt vor allem bei Teillast wirkt sich auch störend auf periphere Meßtechnik und Versorgungsnetz aus. Bei <u>Impulsgruppensteuerung</u> einfache Meßtechnik geringer Oberwellengehalt	kleines Bauvolumen niederer Preis	[7]

Tabelle 2 Koeffizienten der FOURIER-Reihen und des Amplitudenspektrums für die
Phasenanschnittwinkel

v	f [Hz]	$\alpha = \frac{\pi}{4}$			$\alpha = \frac{\pi}{2}$			$\alpha = \frac{3}{4}\pi$		
		A_{2v+1}	B_{2v+1}	$ A(f_{2v+1}) $	A_{2v+1}	B_{2v+1}	$ A(f_{2v+1}) $	A_{2v+1}	B_{2v+1}	$ A(f_{2v+1}) $
0	50	-0,1592	-0,0908	0,9230	-0,3183	-0,5	0,5927	-0,1592	-0,9092	0,1833
1	150	0	-0,1592	0,1592	0,3183	0	0,3183	0	0,1591	0,1592
2	250	0,1061	-0,0531	0,1186	-0,1061	0	0,1061	0,1061	0,0531	0,1186
3	350	0,0531	0,0531	0,0750	0,1061	0	0,1061	0,0531	-0,0531	0,0750
4	450	-0,0318	0,0318	0,0450	-0,0637	0	0,0637	-0,0318	-0,0318	0,0450
5	550	-0,0212	-0,0318	0,0382	0,0637	0	0,0637	-0,0212	0,0318	0,0382
6	650	0,0303	0,0227	0,0379	-0,0455	0	0,0455	0,0303	0,0227	0,0379
7	750	0,0227	0,0227	0,0321	0,0455	0	0,0455	0,0227	-0,0227	0,0321
8	850	-0,0177	0,0177	0,0250	-0,0354	0	0,0354	-0,0177	-0,0177	0,0250
9	950	-0,0141	-0,0177	0,0226	0,0354	0	0,0354	-0,0141	0,0177	0,0226
10	1050	0,0173	-0,0145	0,0226	-0,0289	0	0,0289	0,0174	0,0145	0,0226
11	1150	0,0145	0,0145	0,0205	0,0289	0	0,0289	0,0145	-0,0145	0,0205
12	1250	-0,0122	0,0122	0,0173	-0,0245	0	0,0245	-0,0122	-0,0122	0,0173
13	1350	-0,0105	-0,0122	0,0161	0,0245	0	0,0245	-0,0105	0,0122	0,0161
14	1450	0,0121	-0,0106	0,0161	-0,0212	0	0,0212	0,0121	0,0106	0,0161
15	1550	0,0106	0,0106	0,0150	0,0212	0	0,0212	0,0106	-0,0106	0,0150
16	1650	-0,0094	0,0093	0,0132	-0,0187	0	0,0187	-0,0094	-0,0094	0,0132
17	1750	-0,0083	-0,0093	0,0125	0,0187	0	0,0187	-0,0083	0,0094	0,0125
18	1850	0,0093	-0,0083	0,0125	-0,0167	0	0,0167	0,0093	0,0084	0,0125
19	1950	0,0084	0,0084	0,0118	0,0167	0	0,0167	0,0084	-0,0084	0,0118
20	2050	-0,0076	0,0076	0,0107	-0,0152	0	0,0152	-0,0076	-0,0076	0,0107
21	2150	-0,0069	-0,0076	0,0102	0,0152	0	0,0152	-0,0069	0,0076	0,0102
22	2250	0,0075	-0,0069	0,0102	-0,0139	0	0,0138	0,0075	0,0069	0,0102
23	2350	0,0069	0,0069	0,0098	0,0139	0	0,0138	0,0069	-0,0069	0,0098
24	2450	-0,0064	0,0064	0,0090	-0,0127	0	0,0127	-0,0064	-0,0064	0,0090
25	2550	-0,0059	-0,0064	0,0087	0,0127	0	0,0127	-0,0059	0,0064	0,0087
26	2650	0,0063	-0,0059	0,0087	-0,0118	0	0,0118	0,0063	0,0059	0,0087
27	2750	0,0059	0,0059	0,0083	0,0118	0	0,0118	0,0059	-0,0059	0,0083
28	2850	-0,0055	0,0055	0,0078	-0,0110	0	0,0110	-0,0055	-0,0055	0,0078
29	2950	-0,0051	-0,0055	0,0075	0,0110	0	0,0110	-0,0051	0,0055	0,0075
30	3050	0,0055	-0,0051	0,0075	-0,0103	0	0,0103	0,0055	0,0051	0,0075

Tabelle 3 Koeffizienten der FOURIER-Reihen und des Amplitudenspektrums bei Impulsgruppensteuerung

v	a = 2 b = 1				a = 6 b = 1			
	f [Hz]	A _v	B _v	A(f _v)	f [Hz]	A _v	B _v	A(f _v)
1	25	-0,4244	0	0,4244	8 1/3	0,0273	0,0473	0,0546
2	50	0	-0,5000	0,5000	16 2/3	0,0895	0,0517	0,1034
3	75	-0,2547	0	0,2547	25	0,1415	0	0,1415
4	100	0	0	0	33 1/3	0,1432	-0,0827	0,1654
5	125	-0,0606	0	0,0606	41 2/3	0,0868	-0,1504	0,1736
6	150	0	0	0	50	0	-0,1667	0,1667
7	175	-0,0283	0	0,0283	58 1/3	-0,0735	-0,1272	0,1469
8	200	0	0	0	66 2/3	-0,1023	-0,0591	0,1181
9	225	-0,0165	0	0,0165	75	-0,0849	0	0,0849
10	250	0	0	0	83 1/3	-0,0448	0,0258	0,0517
11	275	-0,0109	0	0,0109	91 2/3	-0,0112	0,0195	0,0225
12	300	0	0	0	100	0	0	0
13	325	-0,0077	0	0,0077	108 1/3	-0,0072	-0,0124	0,0144
14	350	0	0	0	116 2/3	-0,0179	-0,0103	0,0207
15	375	-0,0057	0	0,0057	125	-0,0202	0	0,0202
16	400	0	0	0	133 1/3	-0,0130	0,0075	0,0150
17	425	-0,0045	0	0,0045	141 2/3	-0,0038	0,0065	0,0075
18	450	0	0	0	150	0	0	0
19	475	-0,0036	0	0,0036	158 1/3	-0,0029	-0,0051	0,0059
20	500	0	0	0	166 2/3	-0,0079	-0,0045	0,0091
21	525	-0,0029	0	0,0029	175	-0,0094	0	0,0094
22	550	0	0	0	183 1/3	-0,0064	0,0037	0,0074
23	575	-0,0024	0	0,0024	191 2/3	-0,0019	0,0034	0,0039
24	600	0	0	0	200	0	0	0
25	625	-0,0021	0	0,0021	208 1/3	-0,0016	-0,0028	0,0034
26	650	0	0	0	216 2/3	-0,0045	-0,0026	0,0052
27	675	-0,0018	0	0,0018	225	-0,0055	0	0,0055
28	700	0	0	0	233 1/3	-0,0038	0,0022	0,0044
29	725	-0,0015	0	0,0015	241 2/3	-0,0012	0,0021	0,0024
30	750	0	0	0	250	0	0	0



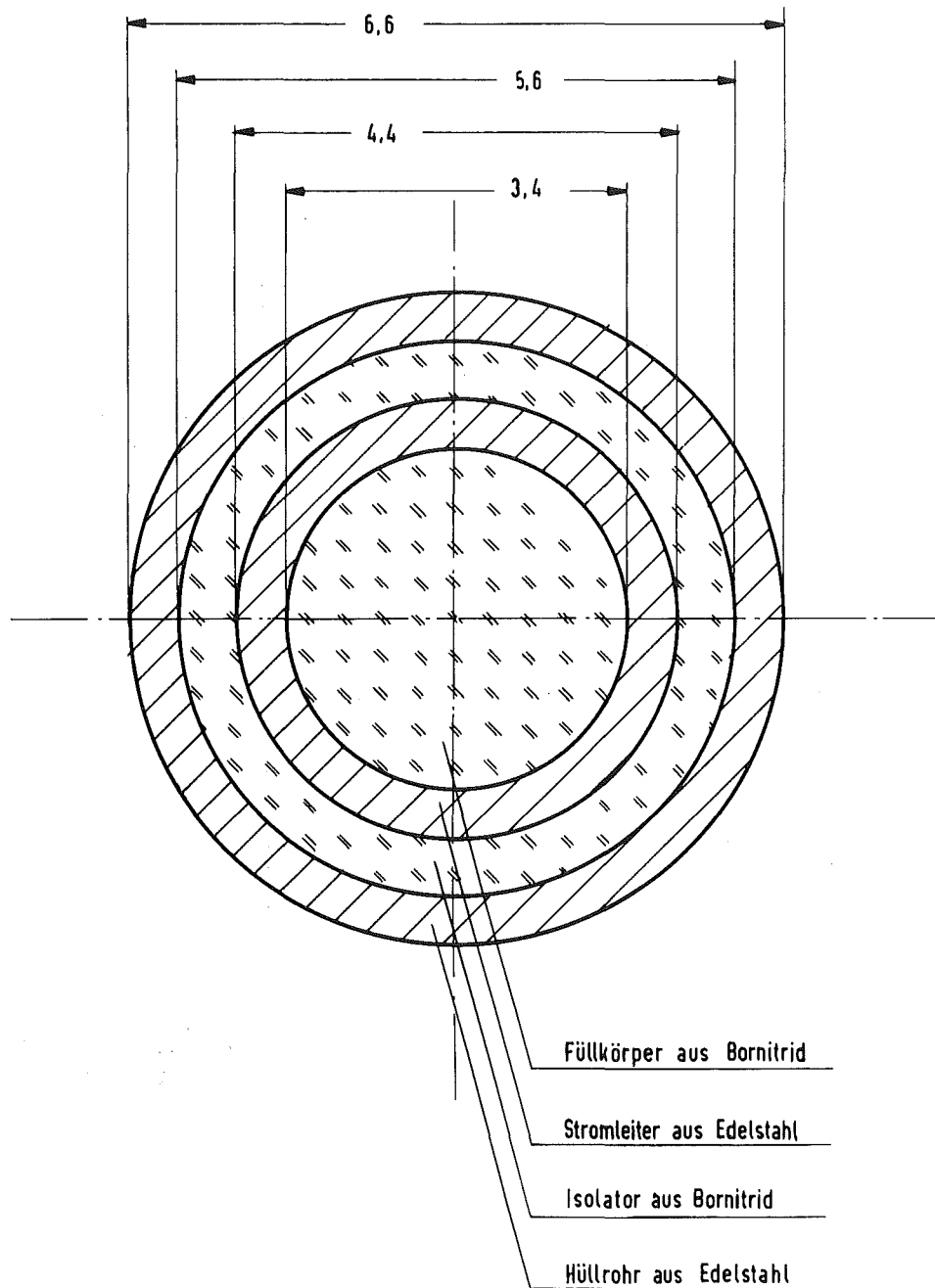


Abb.1 Querschnitt durch einen indirekt elektrisch beheizten Stab

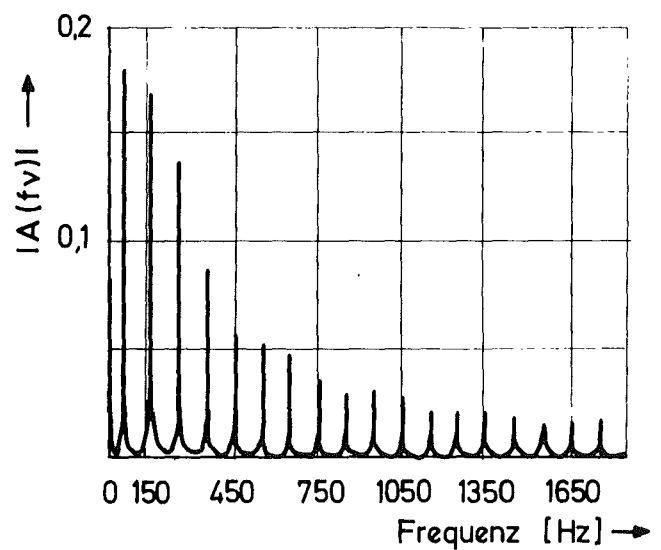
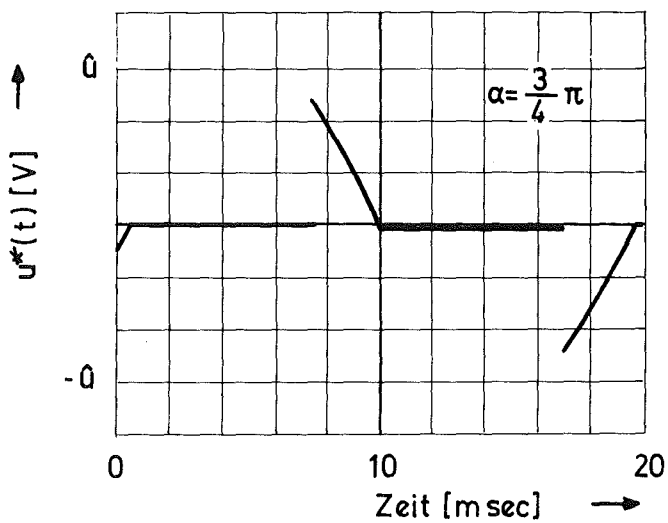
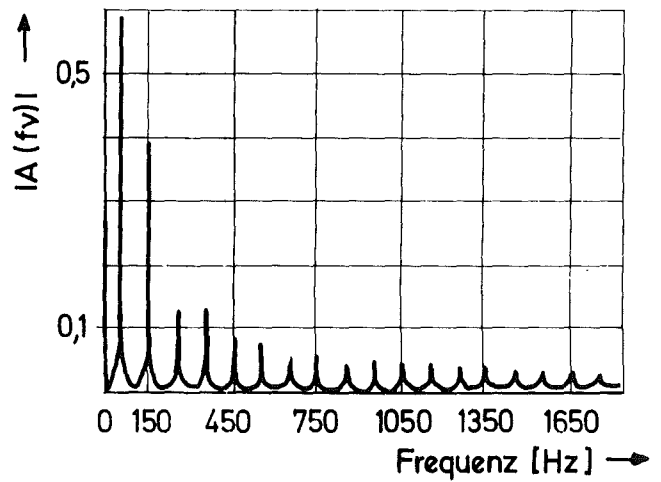
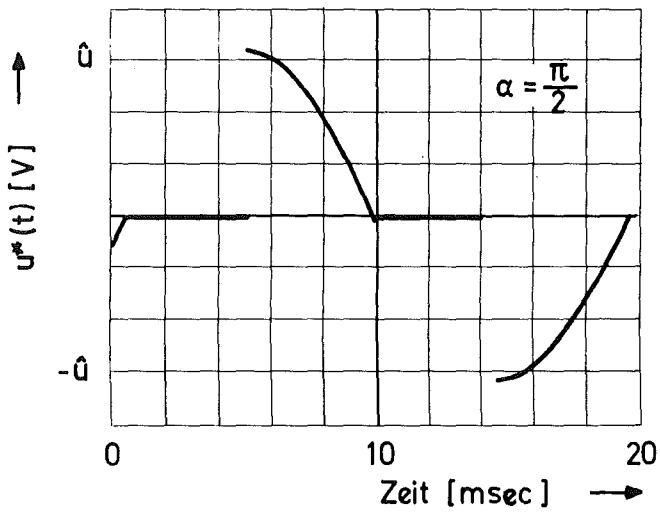
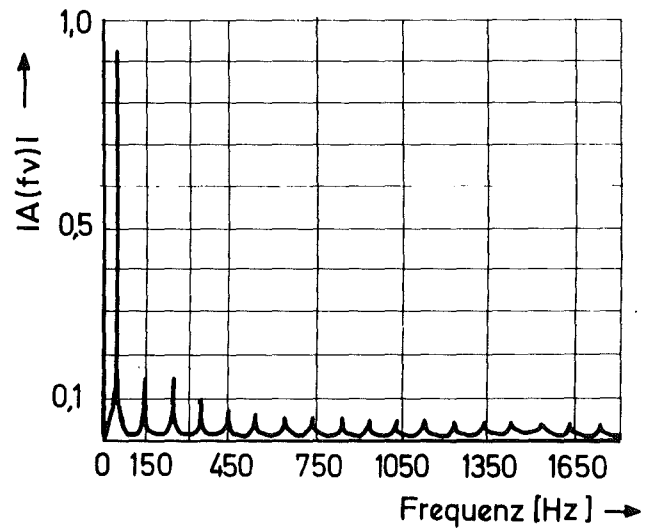
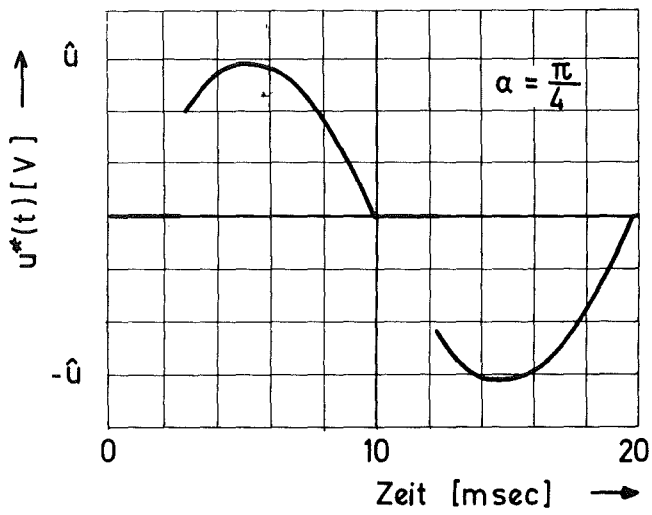


Abb. 2 Spannungsverlauf und Amplitudenspektrum bei Phasenanschnittsteuerung

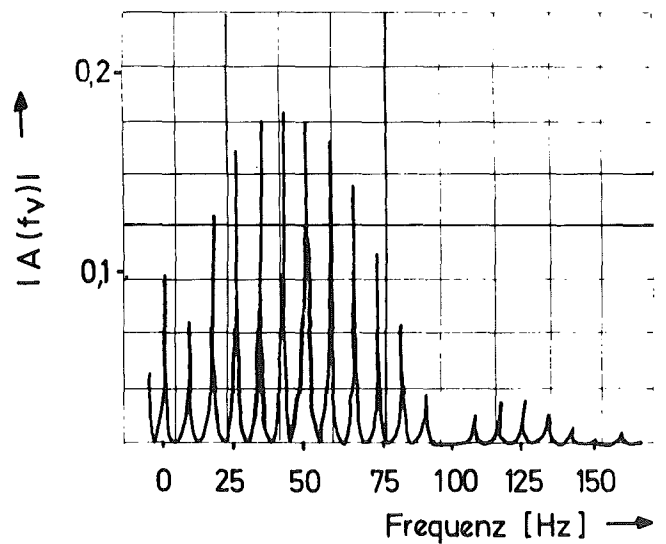
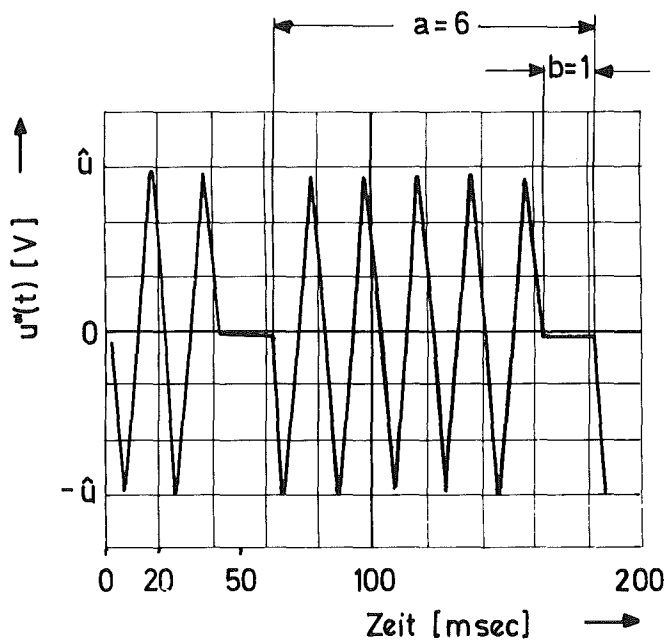
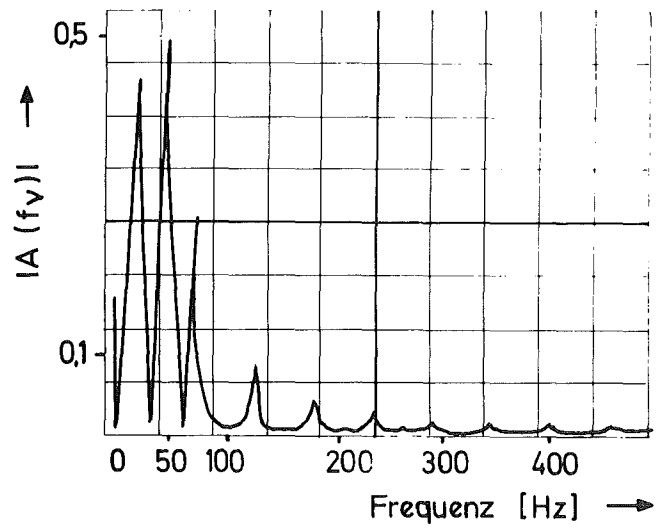
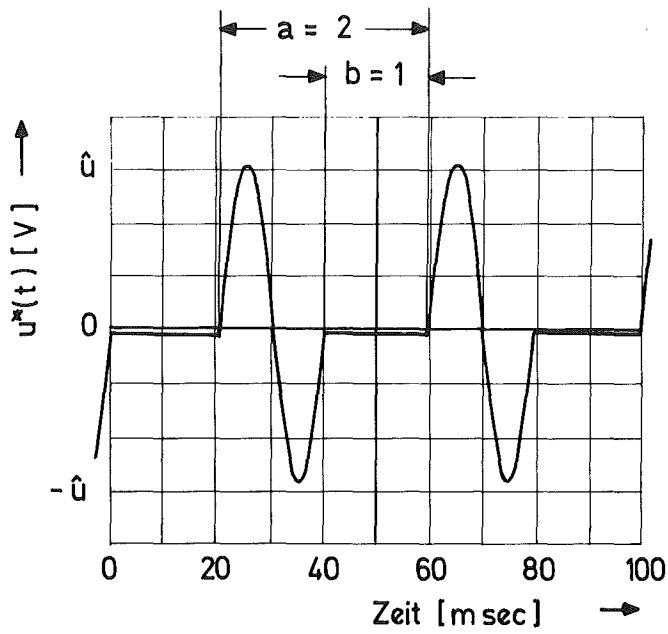


Abb. 3 Spannungsverlauf und Amplitudenspektrum bei Impulsgruppensteuerung

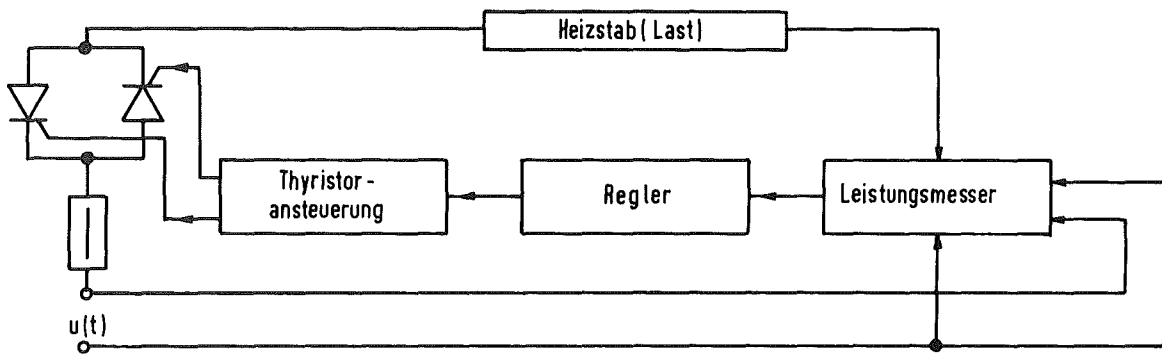


Abb. 4 Prinzipschaltung einer Heizstabregelung mit Thyristor

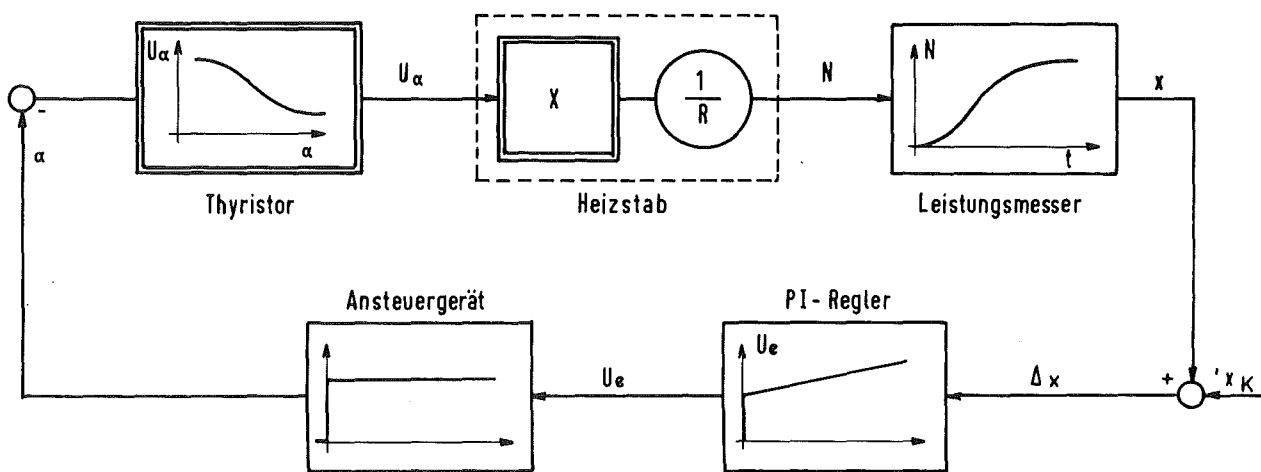


Abb. 5 Blockschaltbild einer Heizstabregelung mit phasenanschnittgesteuertem Thyristor

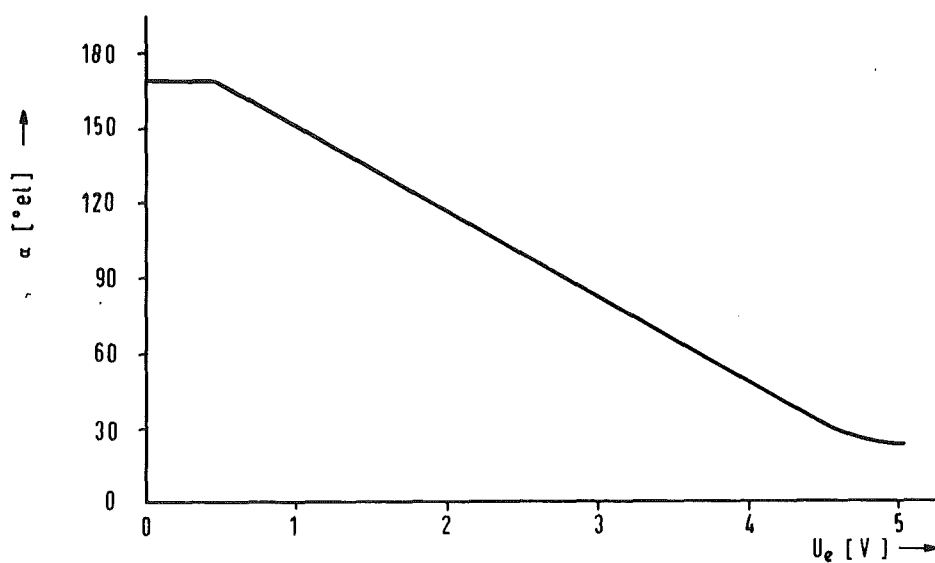


Abb. 6 Steuerwinkel α in Abhängigkeit von der Eingangssteuerspannung U_e des Impulsgebers

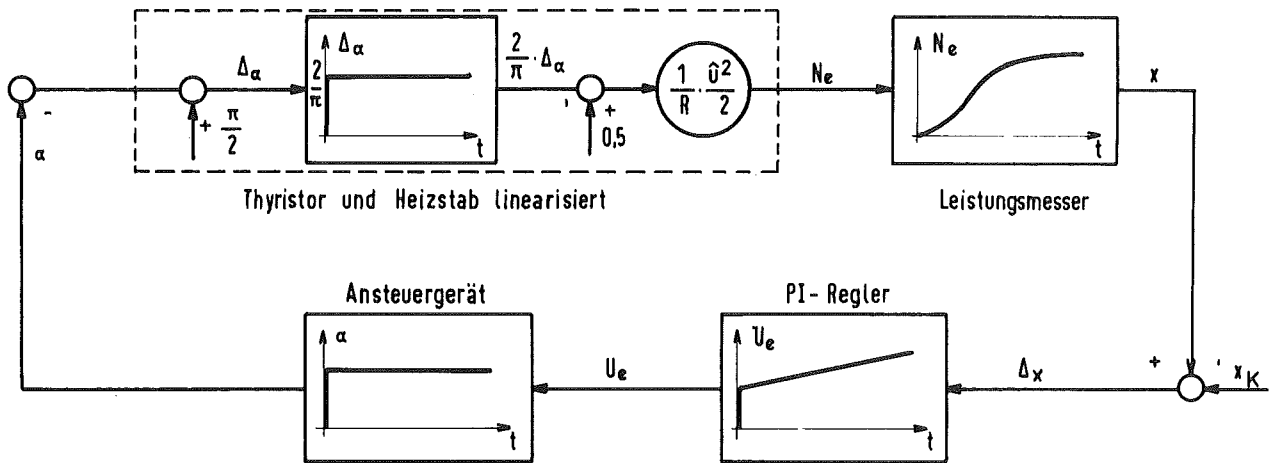


Abb.7 Blockschaltbild des linearisierten Regelkreises

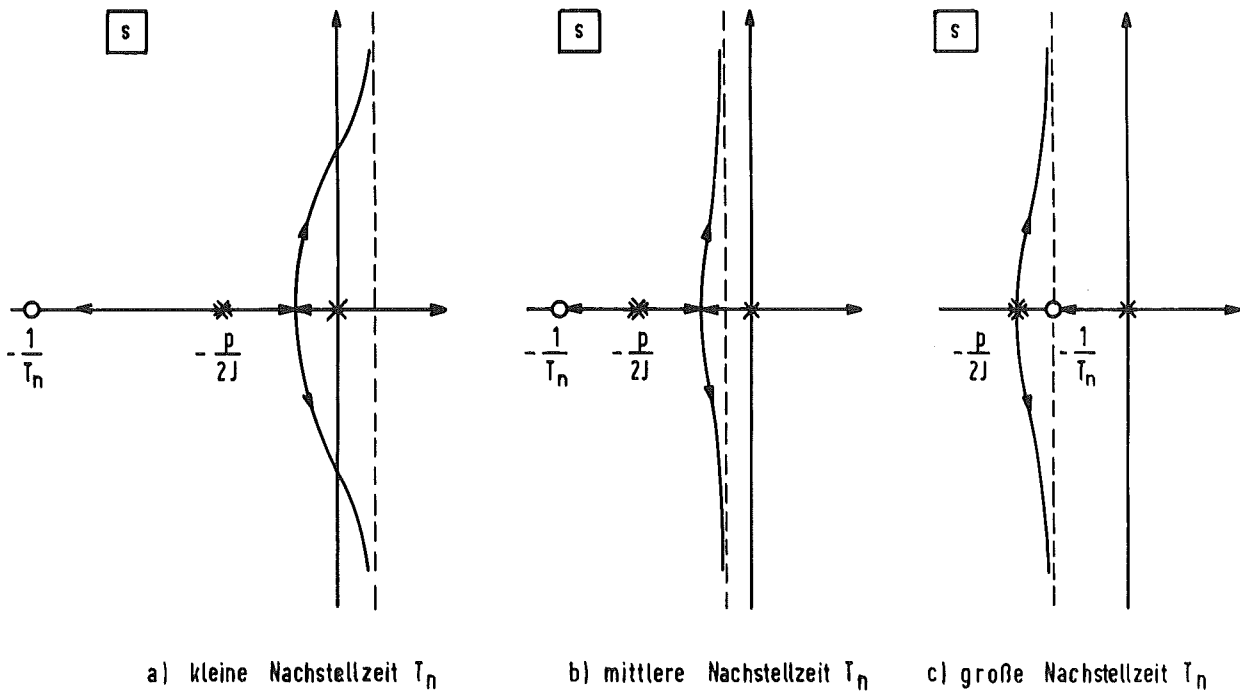


Abb.8 Wurzelortkurve des linearisierten Regelkreises

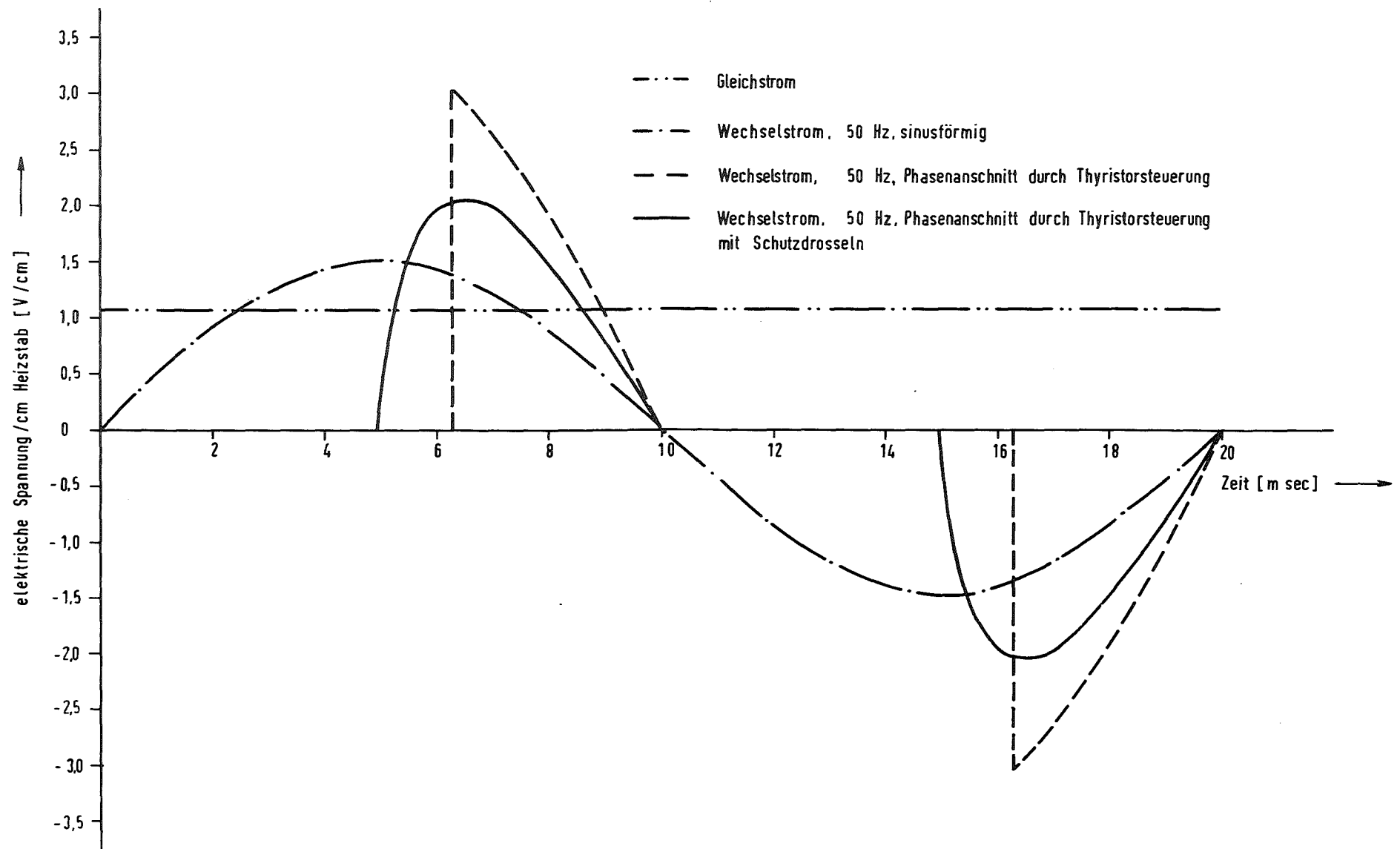


Abb. 9 Zeitlicher Verlauf der elektrischen Spannung /cm Heizstablänge bei verschiedener Beheizungsart mit einer Wärmestromdichte von $313,5 \text{ W/cm}^2$ an der Staboberfläche.

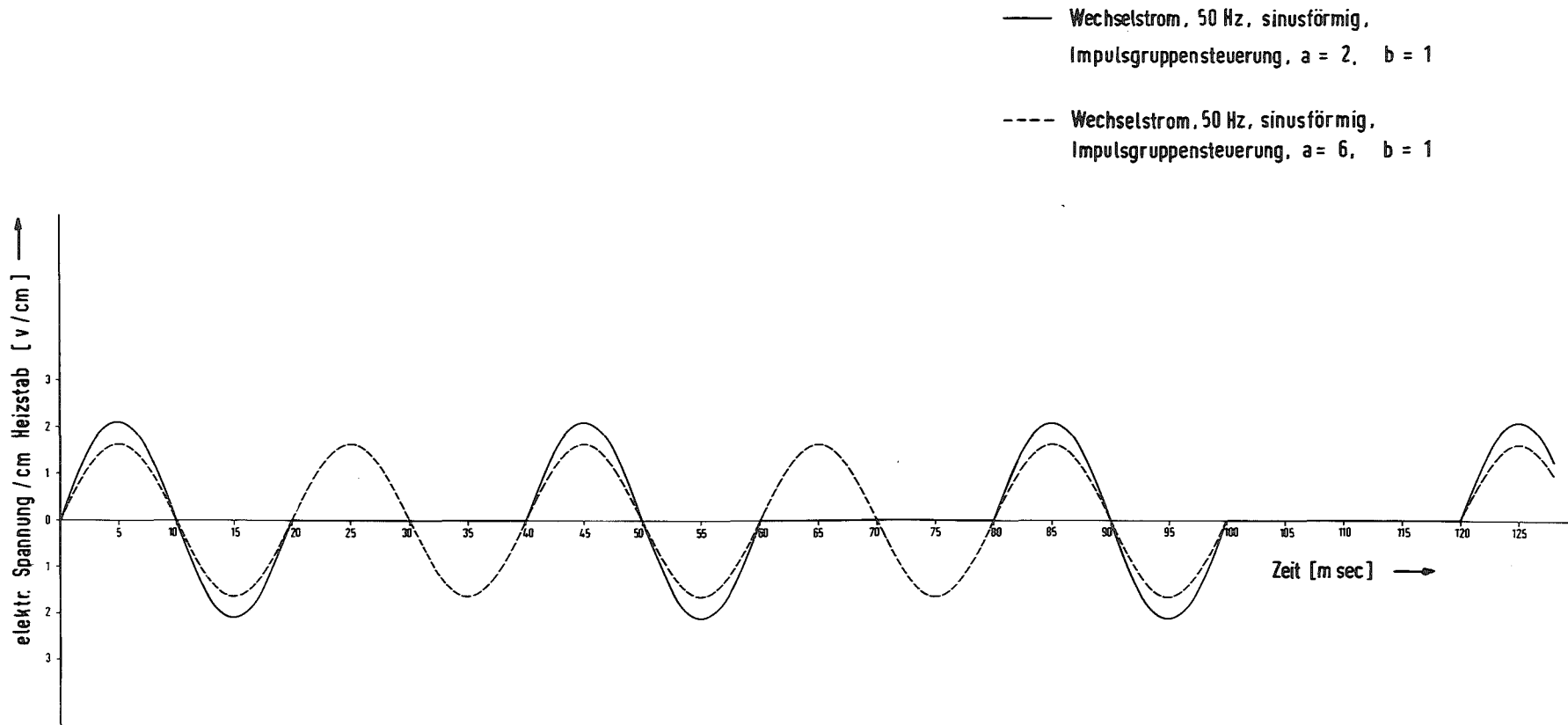


Abb. 10 Zeitlicher Verlauf der elektrischen Spannung / cm Heizstablänge bei verschiedener Beheizungsart mit einer Wärmestromdichte von $313,5 \text{ W/cm}^2$ an der Staboberfläche

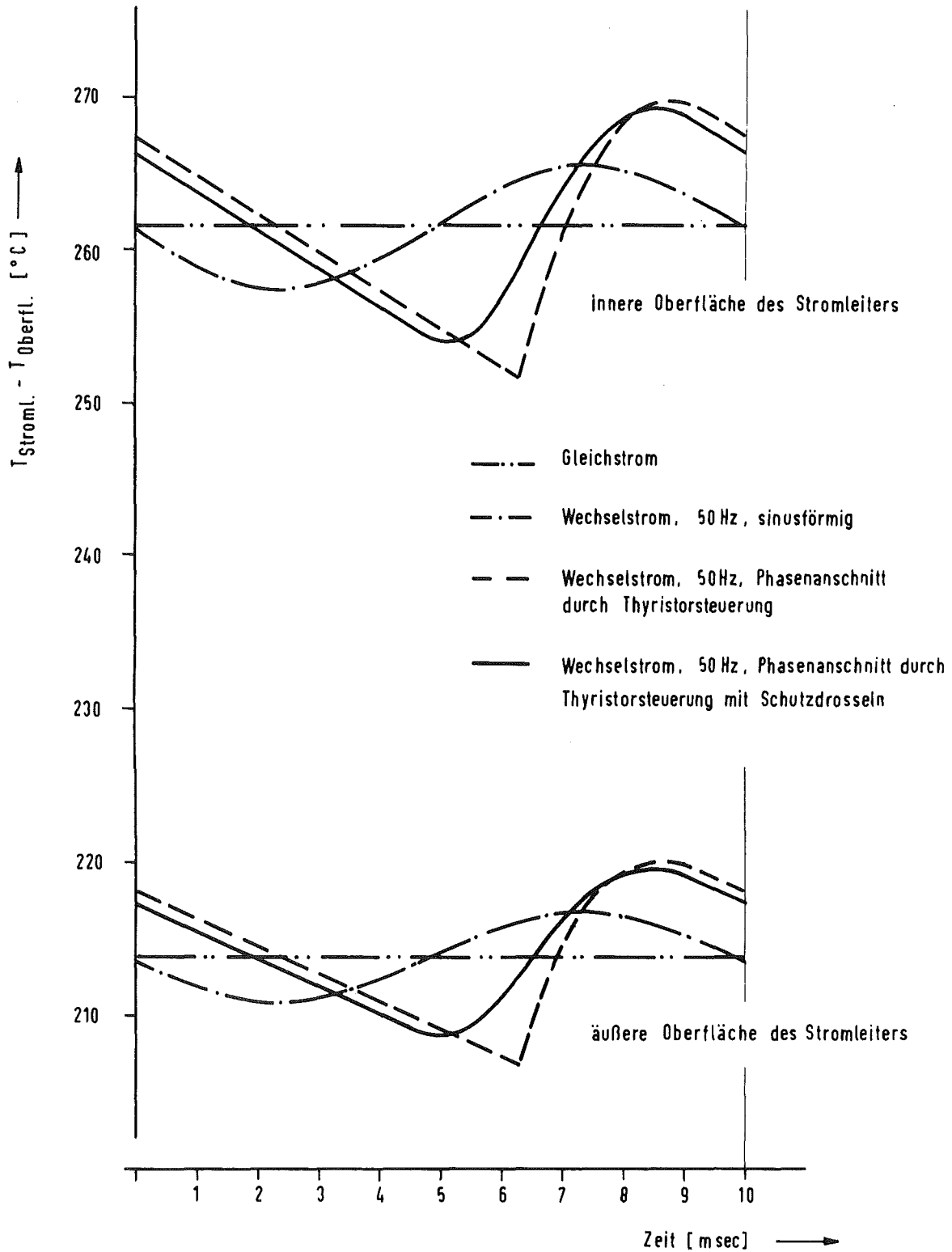


Abb. 11 Zeitlicher Verlauf der Stromleitertemperatur eines indirekt elektrisch beheizten BN - Stabes

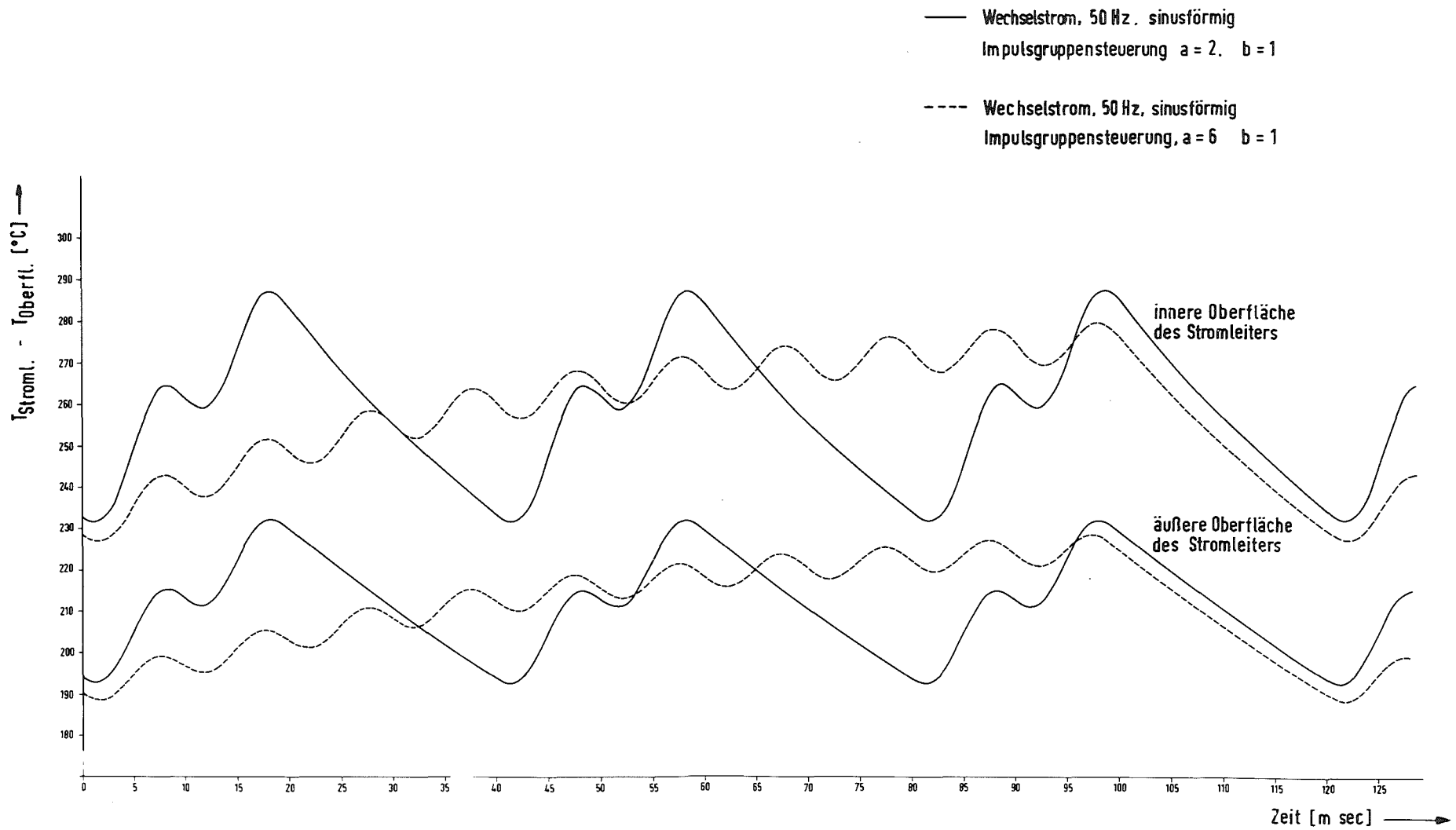


Abb. 12 Zeitlicher Verlauf der Stromleitertemperatur eines indirekt elektrisch beheizten BN-Stabes

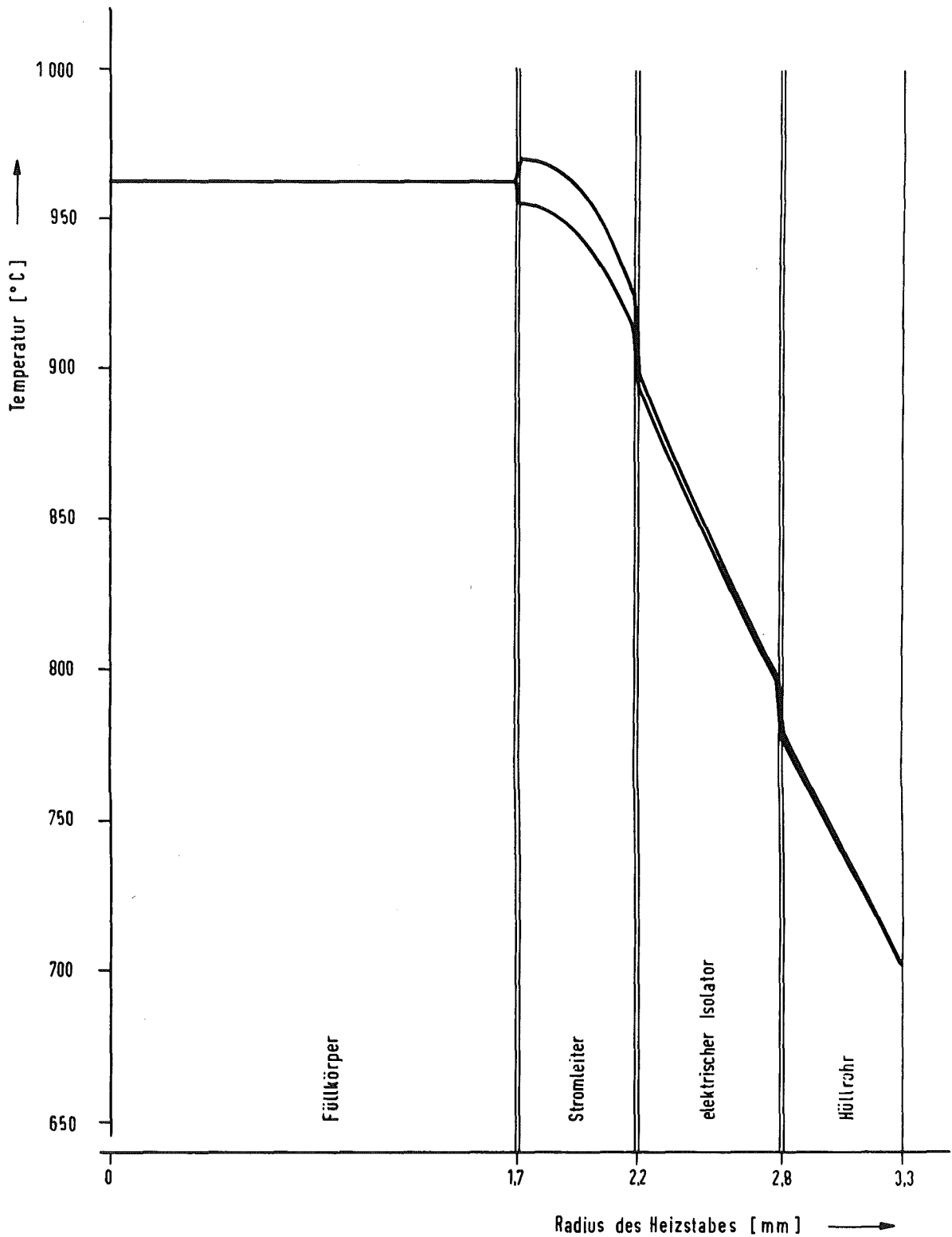


Abb. 13 Grenzkurven des radialen Temperaturverlaufes in einem indirekt elektrisch beheizten BN -Stab bei Thyristorsteuerung und Verwendung von Schutz - drosseln im Stromkreis

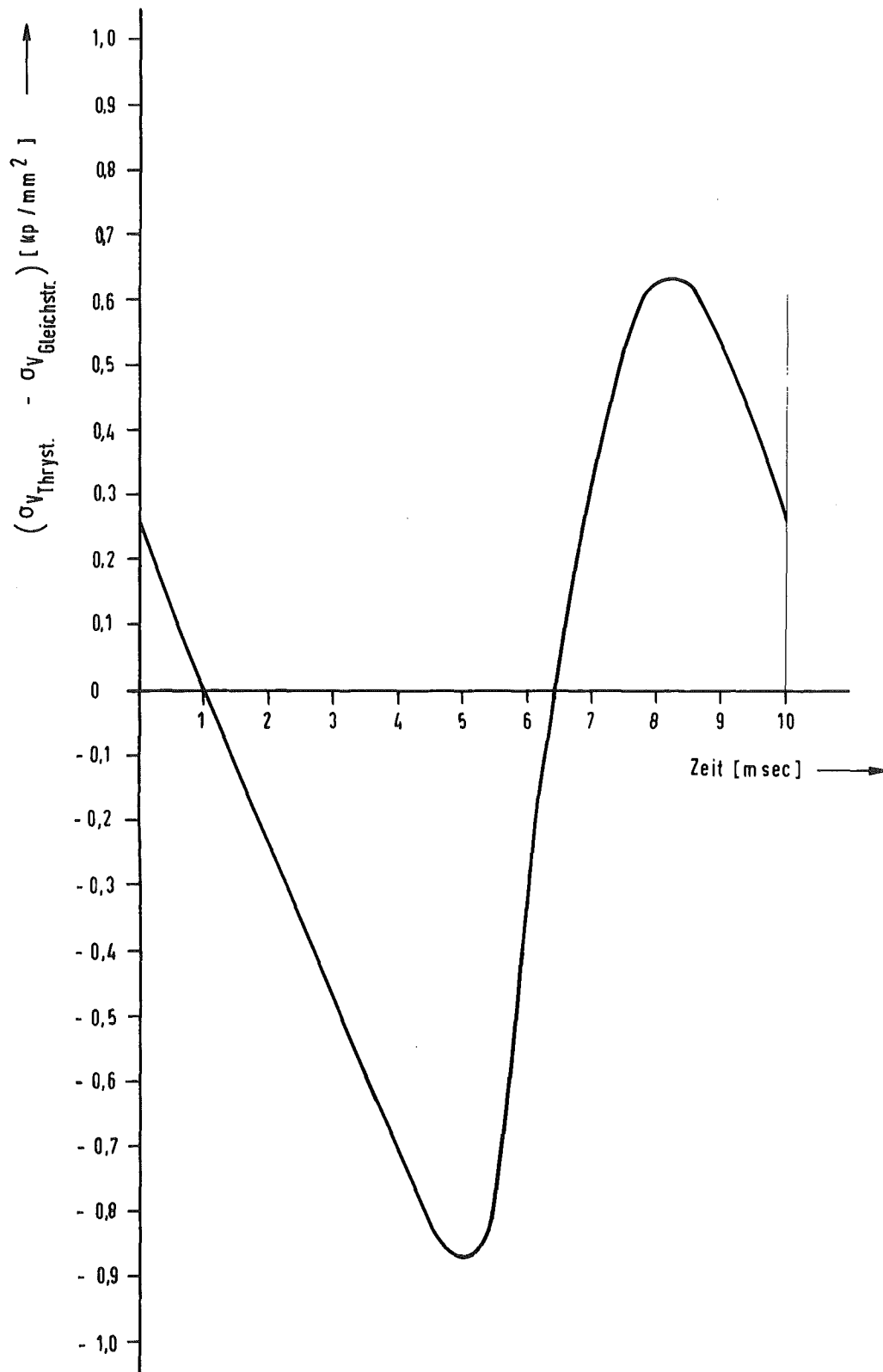


Abb. 14 Zeitlicher Verlauf der mechanischen Wechselbeanspruchung an der äußeren Oberfläche des Stromleiters eines indirekt elektrisch beheizten BN-Stabes

