

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 36 (1945)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Die verschiedenen Erzeugungsmöglichkeiten der Elektrowärme  
**Autor:** Sauter, O.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060222>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.04.2025

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

oder «*Seitwärts links*» und der andere Druckknopf für die andere Richtung, z. B. «*Senken*» oder «*Seitwärts rechts*». Die Mittelstellung «*Feingang*», bei nicht ganz eingedrücktem Knopf, ist deutlich fühlbar. Bei der Ausführung mit Feingang ist allerdings ein kleiner Umkehrschütz nötig. Konstruktiv sind weiter die Schnappschaltung und die in keramischer Funkenkammer eingebaute Kontaktpartie interessant.

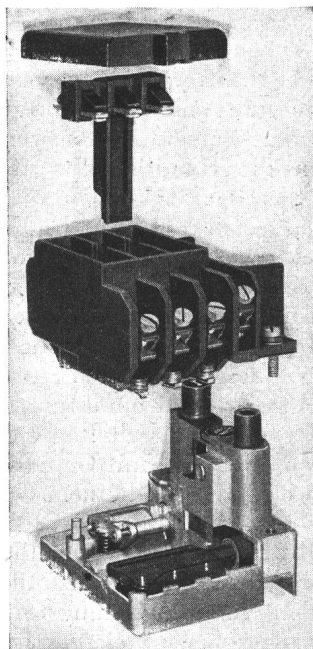


Fig. 6.  
Kleinmotorschalterschalter  
in seine Hauptbestandteile  
zerlegt

Und wie steht es mit den Nachteilen dieser gedrängten Bauweise? In der Hauptsache ist zu befürchten, dass durch die schwere Zugänglichkeit zu den verschiedenen Teilen die einfache Auswechslung und leichte Kontrolle z. B. der Kontaktpartie, der thermischen Auslöser usw., unmöglich wird. Auch darf die Zusammensetzung der geschichteten Elemente bei der Montage (Fabrikation) nicht zu einem unüberwindlichen Hindernis werden. Eine einwandfreie Lösung dieser Probleme ist unerlässlich, da sonst die Verwendbarkeit der Apparate in Frage gestellt würde. Die Untersuchung der zwei beschriebenen Klein-Schaltapparate in dieser Richtung zeigt folgendes Bild:

Der Klein-Motorschalterschalter nach Fig. 3 kann in 4 Hauptbestandteile (Fig. 6) zerlegt werden. Den oberen Deckel für die Abschaltkammer, die bewegliche Kontaktpartie, welche ohne Schrauben-

zieher durch eine im Chassis gelagerte einfache Feder-Schnappvorrichtung lösbar ist, das mittlere Isolierstück mit Dreipunkt-Schraubenbefestigung am Spritzgussteil, enthaltend feststehende Kontakte, Klemmen, Bimetall, Abschaltkammer, und das

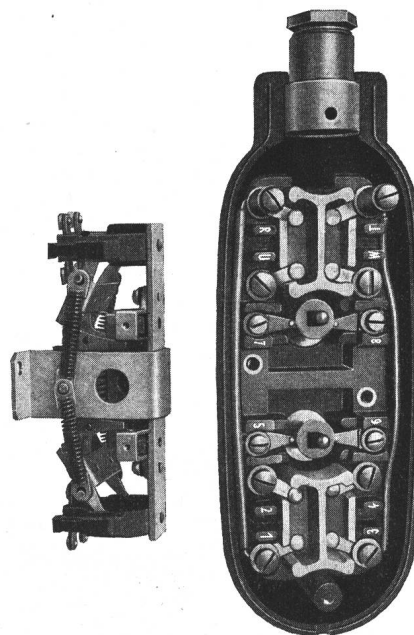


Fig. 7.  
Birnenschalter mit ausgebautem Schalter

Chassis mit Druckknopfmechanismus. Beim Birnenschalter nach Fig. 4 und 5 ist das komplette bewegliche Kontaktsystem, welches in einem Rahmen lagert (Fig. 7), durch Lösen der Schrauben demontierbar. Solche Geräte sind einfach in der Montage, und auch bei der Auswechslung einzelner Bestandteile treten keine Schwierigkeiten auf.

Ob die Leistungssteigerung pro Volumen-Einheit noch viel höher getrieben werden kann, ist fraglich. Dies hängt von der weitem Entwicklung in verschiedenen Richtungen ab. Selbstverständlich müssen bei allen diesen Bemühungen um Verkleinerung der Abmessungen die Forderungen der Vorschriften des SEV berücksichtigt werden, wodurch trotz der relativen Kleinheit diese Geräte die erforderliche Sicherheit aufweisen.

Adresse des Autors: H. Fehn, Ingenieur der Sprecher & Schuh A.-G., Aarau.

## Die verschiedenen Erzeugungsmöglichkeiten der Elektrowärme

Von O. Sauter †, Aarau

621.364.1

Es werden die technisch wichtigsten Erzeugungsarten der Elektrowärme besprochen, nämlich die Wärmeerzeugung durch den Lichtbogen, durch Wirbelströme, Niederfrequenz-Induktion und Hochfrequenz-Induktion, durch Flüssigkeitswiderstände, durch keramische und metallische Heizleiter sowie die Wärmeerzeugung durch Strahlung von Infrarot-Lampen. Am gestreckten horizontalen Draht werden die Temperaturverhältnisse für 2 Varianten (in freier Luft und mittels keramischer Masse in Rohr eingebettet) rechnerisch untersucht. Der Einfluss des Kesselsteins bei verschiedenen Heizleistungen wird ebenfalls an einem Beispiel rechnerisch dargestellt.

Exposé des principaux modes de production de chaleur par l'électricité, notamment par arc électrique, par courants de Foucault, par induction à basse et à haute fréquence, par résistances liquides, par conducteurs en céramique et métalliques, ainsi que par rayonnement de lampes infrarouges. L'auteur présente des exemples numériques pour le cas d'un conducteur métallique à l'air libre et pour celui d'un conducteur logé sous tube dans une masse céramique. Il montre également par des exemples numériques quelle est l'influence de l'entartrage pour différentes puissances de chauffe.

**Einleitung**

Die weite Verbreitung der elektrischen Heizung in den letzten Jahren lässt es nützlich erscheinen, die wichtigsten Erzeugungsarten der Elektrowärme nebeneinander zu stellen und die hauptsächlichsten Merkmale herauszuschälen. Auf diese Weise ist es eher möglich, die Eignung dieser oder jener Heizungsart für eine bestimmte Anwendung zu beurteilen.

**I. Wärmeerzeugung durch den Lichtbogen**

Die atmosphärische Luft ist ein vorzüglicher Isolator. Unter gewissen Umständen kann jedoch die Luft ihr Isoliervermögen einbüßen, sie wird zum Leiter.

Solange die Luft aus neutralen Molekülen besteht, wird sie den elektrischen Strom nicht leiten. Verlieren diese Moleküle oder ein Teil von ihnen ihren neutralen Charakter, d. h. werden sie zu positiven oder negativen Ladungsträgern, so entsteht beim Anlegen einer Spannung ein Strom; die negativen Ladungsträger wandern zur Anode und die positiven zur Kathode. In diesem Zustand bezeichnet man das Gas als ionisiert und die Ladungsträger als Ionen, den Strom selber nennt man eine Gasentladung.

Werden die Ladungsträger durch den Vorgang der Entladung selbst erzeugt, so ist die Gasentladung eine selbständige. Befinden sich die Ladungsträger aus Ursachen, die von der Entladung unabhängig sind, im Gas, so ist die beim Anlegen einer Spannung entstehende Entladung eine unselfständige.

Man kennt verschiedene Entstehungsursachen von Ionen. Gelangen bereits vorhandene Ionen in ein elektrisches Feld, so kann die dadurch den Ladungsträgern erteilte Beschleunigung so gross werden, dass beim Zusammenprall mit neutralen Molekülen durch Abspaltung positive und negative Ionen oder Elektronen entstehen. Dieser Vorgang wird mit *Stossionisation* bezeichnet.

Ferner ist bekannt, dass glühende Metalle Elektronen, *Glühelktronen*, emittieren. Ist das glühende Metallstück gleichzeitig Kathode, so wandern die austretenden Elektronen zur Anode, es entsteht ein Strom. Ist das glühende Metallstück dagegen Anode, so kehren die emittierten Elektronen wieder an die Anode zurück. Das Gas erscheint, je nach der Polarität der glühenden Elektrode, elektrisch durchlässig oder undurchlässig.

Die dritte Entstehungsart von Ladungsträgern ist die *Temperaturionisation*. Durch hohe Temperaturen kann die Molekularbewegung so stark werden, dass beim Zusammenstoss der Moleküle Ionen entstehen. Gase in der Umgebung stark erhitzter Körper werden durch Temperaturionisation leitend.

Von den vielen technischen Anwendungen der Gasentladung interessiert uns in diesem Fall nur diejenige, die der Erzeugung von Wärme dient und unter dem Namen Bogenentladung bekannt ist.

Die Spannung des Lichtbogens wächst ungefähr linear mit der Bogenlänge. Sie sinkt, im Gegensatz zu metallischen Widerständen, bei gleichbleibender Bogenlänge mit zunehmendem Strom.

Verglichen mit der Wärmeerzeugung in einem metallischen Widerstand ist der Lichtbogen als Wärmequelle, bezogen auf den Raumbedarf der beiden Erzeugungsarten, bedeutend ergiebiger. Dazu kommt noch die hohe Temperatur, die bis ungefähr 5000° C betragen kann. Der Lichtbogen fin-

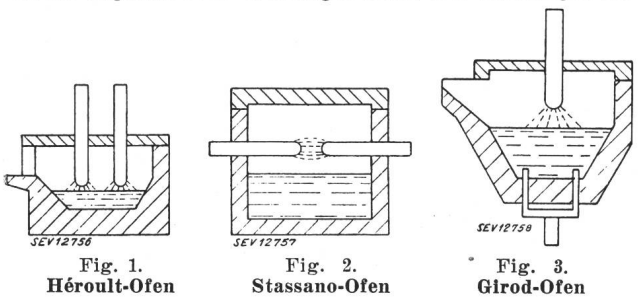


Fig. 1. Héroult-Ofen  
Fig. 2. Stassano-Ofen  
Fig. 3. Girod-Ofen

det deshalb vor allem in der Metallurgie Verwendung, wobei für die Schweiz besonders die Verhüttung der Eisenerze im Elektroofen aktuell ist.

Beim Héroult-Ofen (Fig. 1) nimmt der Strom seinen Weg von der Elektrode durch den Lichtbogen ins Metallbad und von diesem wieder durch den Lichtbogen zur zweiten Elektrode. Dieser Ofentyp hat die grösste Bedeutung erlangt.

Der Lichtbogenofen nach Stassano (Fig. 2) weist 2 oder 3 verstellbare Elektroden auf, zwischen denen der Lichtbogen entsteht. Durch die mittelbare Beheizung werden Bad und Ofenraum erhitzt.

Beim Girod-Ofen (Fig. 3) bildet das Bad die zweite Elektrode. Es ist zu diesem Zweck mit dem andern Pol des Stromkreises durch metallische Verbinder, die durch den Ofen ragen, verbunden.

Die Lichtbogenheizung ist im allgemeinen an Spannungen von 70...270 V gebunden. Bei diesen Spannungen treten Ströme von 1000...20 000 A auf. Zur Erzielung eines wirtschaftlichen Betriebes soll während der Schmelze die Ofenleistung verändert werden können. Aus diesem Grunde werden diese Oefen nicht direkt ans Netz angeschlossen, sondern durch Zwischenschaltung eines Stufentransformators.

Der Lichtbogen kann sowohl mit Gleich-, als auch mit Wechselspannung gezündet werden. Im zweiten Falle werden bei niederen Frequenzen keine Metallelektroden verwendet, weil deren Wärmeableitung gross ist. Die dadurch bedingte Abkühlung der Lichtbogenansatzstellen verhindert das Zünden des Bogens beim Wiederanstieg der Spannung.

Weiter findet der Lichtbogen als Wärmeerzeuger Anwendung beim Schweiessen und Schneiden von Metallen.

**II. Wärmeerzeugung durch Induktion**

In der Praxis unterscheidet man drei Arten von Induktionsheizungen, nämlich die Wirbelstromheizung, die Niederfrequenz- und die Hochfrequenz-Induktionsheizung.

**a) Die Wirbelstromheizung**

Entstehung und Verlauf von Wirbelströmen sind in Fig. 4 skizziert. Die Dicke *d* des Stahlbleches sei klein im Vergleich mit der Breite *b*. Der Wechselfluss  $\Phi$  sei durch äussere Einwirkungen hervorgerufen. Infolge der zeitlichen

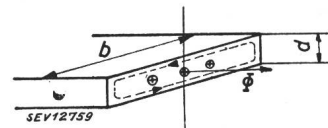


Fig. 4.  
Wirbelströme  
in einem Eisenblech

Aenderung des Flusses werden Ströme induziert, die sich dieser Feldänderung widersetzen. Für anwachsenden Fluss in der angedeuteten Richtung verlaufen die Bahnen der

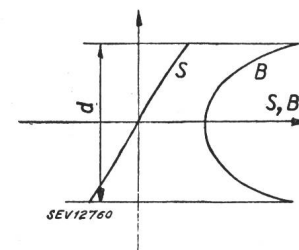


Fig. 5.  
Stromdichte und Induktion  
im Eisenblech

Wirbelströme in der Pfeilrichtung. Den Verlauf der Stromdichte *S* und der Induktion *B* über den Blechquerschnitt veranschaulicht Fig. 5. Da die Stromdichte der Wirbelströme ge-

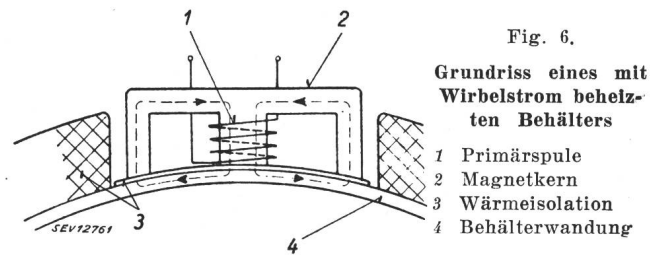


Fig. 6.  
Grundriss eines mit  
Wirbelstrom beheizten  
Behälters

- 1 Primärspule
- 2 Magnetkern
- 3 Wärmeisolation
- 4 Behälterwandung

gen die Oberfläche des Bleches hin zunimmt, werden mit Vorteil für hohe Leistungen kupferplattierte Eisenbleche verwendet.

Die Wärmewirkung solcher Wirbelströme kann je nach Umständen sehr beachtlich sein. Fig. 6 zeigt schematisch die Anwendung einer solchen Heizung in der Praxis.

Die Wirbelstromleistung ist im Gebiete niedriger Frequenzen proportional den Quadraten der Induktion, der Frequenz, der Blechdicke und proportional der elektrischen Leitfähigkeit des Materials. Im Gegensatz zur gewöhnlichen elektrischen Widerstandsheizung (s. Abschn. IV), betragen die spezifischen Flächenbelastungen bei Wirbelstromheizungen bis das 7fache der Widerstandsheizungen. Mit der Wirbelstromheizung ist es demnach möglich, die grossen spezifischen Flächenbelastungen der Dampfheizung zu erreichen und die Aufheizzeiten gegenüber der Widerstandsheizung ganz wesentlich zu reduzieren.

Die Wirbelstromheizung wird verwendet für Heizguttemperaturen bis 600° C. Der Leistungsfaktor ist von der Leistungsregelung praktisch unabhängig; er liegt ungefähr bei 0,8.

**b) Niederfrequenz-Induktionsheizung**

Die in der Industrie zum Schmelzen von Metallen und Legierungen gebräuchlichen Niederfrequenz-Induktionsöfen beruhen sozusagen alle auf dem Prinzip der Kurzschlusswindung, die von einem magnetischen Wechselfluss durchflutet

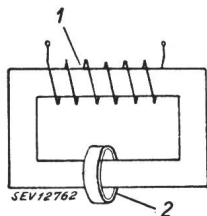


Fig. 7.

**Prinzip der Niederfrequenz-Induktionsheizung**

- 1 Primärwicklung
- 2 Kurzschlussring

wird (Fig. 7). Der im Ring als Sekundärwicklung auftretende Strom erzeugt dann die gewünschte Wärmewirkung.

Das Schema eines solchen Ofens ist in Fig. 8 wiedergegeben. Die Kurzschlusswindung, auch als «Sumpf» bezeichnet,

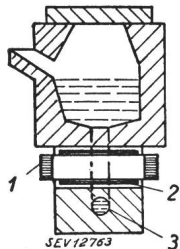


Fig. 8.

**Niederfrequenz-Hochofen**

- 1 Magnetkern
- 2 Primärspule
- 3 Schmelzrinne

net, ist hier eine mit Schmelzgut gefüllte Rinne. Diese Rinne muss beim Betrieb stets mit dem zu schmelzenden Metall gefüllt sein. Die Durchmischung der erhitzten Metallmassen mit dem kälteren Bad wird durch die intensive Wirbelbewegung des Rinneninhaltes bewirkt.

Solche Öfen werden für Leistungen bis 250 kW gebaut. Die Wärmeregulierung geschieht durch Aendern der Stromstärke in der Schmelzrinne. Zu diesem Zweck wird ein Reguliertransformator verwendet. Der Leistungsfaktor des Ofens liegt beim Schmelzen von Messing oder Kupfer ungefähr bei 0,7, beim Schmelzen von Aluminium bei 0,45...0,65.

Der Niederfrequenzofen eignet sich am besten zum durchlaufenden Schmelzen von Kupfer, Messing, Tombak, Bronze mit wenig Zinn, Aluminium usw. Beim mehrphasigen Anschluss trägt der Ofen 2 oder 3 Rinnen.

**c) Die Hochfrequenz-Induktionsheizung**

Dieser Ofentyp ist in Fig. 9 dargestellt. Ist die Wandung des Gefässes leitend, so bildet sie eine Kurzschlusswindung um das von der Primärspule erzeugte Feld. Die in einer Sekundärspule induzierte Spannung ist unter gewissen Voraussetzungen proportional der Windungszahl der Spule, der Frequenz und dem mit der Spule verketteten Induktionsfluss:  $U = \text{Prop. } N \cdot f \cdot \Phi$ .

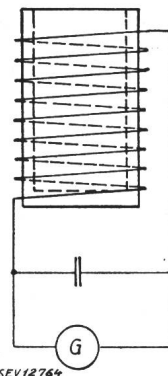
Die Vergrösserung des Induktionsflusses hat aus verschiedenen Gründen seine Grenzen, besonders, wenn der Fluss in nichtmagnetischem Material verläuft. Man behilft sich deshalb damit, durch Verwendung hoher Frequenzen die nötige Spannung bzw. die erforderlichen Ströme zu induzieren.

Die Regulierung der Wärmeerzeugung kann in der Weise erfolgen, dass das Gefäss mit dem Schmelzgut verschieden tief in das Solenoid eingetaucht wird. Die Blindstromkompensation bewirkt ein Kondensator. Der hochfrequente Strom wird in Maschinen-Umformern und bei Frequenzen über einigen 1000 Hz in Röhrengeneratoren erzeugt. Die Beschaffenheit des Einsatzes und die Ofengrösse bestimmen die Frequenz.

Ofenleistung	Frequenz
bis 40 kW	bis 20 000 Hz
40...300 kW	1000...3000 Hz
über 300 kW	350...1000 Hz

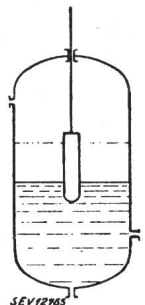
Es wurden Öfen mit Leistungen bis 1800 kW gebaut.

Der Hochfrequenzofen gilt als bester Ofen zum Umschmelzen und Legieren von Eisen, Kupfer, Bronze, Silber, Nickel, Gold.



Links:  
Fig. 9.  
Hochfrequenz-Induktionsheizung

Rechts:  
Fig. 10.  
Elektrodenkessel



Die Wärmeerzeugung durch Hochfrequenz gelangt auch bei der Oberflächenhärtung von Stahl zur Anwendung. Als hervorstechendste Merkmale der Induktionsheizung im allgemeinen können genannt werden: Geringe Uebertemperatur des Wärmeerzeugers gegenüber dem Schmelzgut. Aeusserst intensive Baddurchmischung, die selbständig erfolgt. Anschluss nur an Wechselstrom möglich. Höchste Anschlusswerte für gegebene Heizflächen.

**III. Wärmeerzeugung durch Flüssigkeitswiderstände**

Die weitaus häufigste Anwendung dieser Wärmeerzeugungsart sind die sogenannten Elektrodenkessel für die Bereitung von Heisswasser und Dampf.

Gewöhnliches Wasser zeigt beim Durchgang des elektrischen Stromes ähnliche Eigenschaften wie ein Widerstand. Beim Anlegen einer Spannung an zwei von Wasser bespülte Elektroden fliesst zwischen diesen ein Strom, wodurch sich das Wasser erwärmt. Es war nun naheliegend, zur Dampferzeugung den Strom direkt durch das Kesselwasser zu leiten, anstatt separate Heizkörper einzubauen (Fig. 10).

Diese Heizungsart ist allerdings nur möglich mit Wechselstrom, da bei Verwendung von Gleichstrom infolge Elektrolyse des Wassers Knallgasbildung auftritt.

Beim Bau von solchen Elektrodenkesseln mussten verschiedene Schwierigkeiten überwunden werden. Unter diesen seien vorerst erwähnt die starken Schwankungen, welche die Leitfähigkeit des Kesselwassers<sup>1)</sup> aufweisen kann. Die spezifische Leitfähigkeit ist annähernd proportional dem spezifischen Salzgehalt, wobei die chemische Zusammensetzung dieser Salze von untergeordneter Bedeutung ist. Die Kesselleistung ist direkt proportional der Leitfähigkeit. Diese nimmt mit steigender Temperatur zu. Die Zusammensetzung eines Wassers ändert auch innerhalb der Jahreszeiten. Chemisch reines Wasser ist für Elektrodenheizung unbrauchbar.

Zu diesen Schwierigkeiten, deren Ursachen in der Beschaffenheit des Widerstandsmaterials liegt, gesellen sich noch die Eigenheiten, die während des Betriebes auftreten. Unter diesen ist zuerst die Aenderung der Wasserzusammensetzung während des Betriebes zu nennen. Als Folge der fortschreitenden Verdampfung steigt der spezifische Gehalt des Kesselwassers an gelösten Salzen und damit auch die Leitfähigkeit. Mit der Leitfähigkeit steigt aber auch die Kessel-

<sup>1)</sup> Bull. SEV 1943, Nr. 17, S. 517.

leistung, d. h. die Elektrodenbelastung. Dieser Entwicklung begegnet man in der Weise, dass das mit Salzen übersättigte Kesselwasser teilweise abgelassen und durch frisches Speisewasser ersetzt wird. Solche Wasserentnahmen bedeuten aber immer einen Wärmeverlust und werden daher auf ein Minimum beschränkt.

Eine weitere Erschwerung für den Betrieb liegt in der Absonderung von Kesselstein an den Elektroden. Diese Ablagerung nimmt mit steigender Wassertemperatur zu und ist deshalb in der unmittelbaren Umgebung der Elektroden am intensivsten. Die dadurch bedingte Verschlechterung des Uebergangswiderstandes ist im Vergleich zu dem verhältnismässig kleinen Gesamtwiderstand gross, was wiederum zu beachtlichen Leistungsschwankungen führt.

Als weitere Schwierigkeit während des Betriebes tritt der sogenannte Wehnelt-Effekt in Erscheinung. Infolge der hohen Stromkonzentration an der kleinen Elektrode (besonders bei geringen Eintauchtiefen) kommt das Wasser in der Umgebung der Elektrode zum Kochen. Die sich bildende Dampfschicht zwischen Elektrode und Wasser unterbricht den Stromdurchgang. Es kommt zum Feuern der Elektrode als Folge von Spannungsdurchbrüchen.

Die grosse Zahl von Elektrokesseln aller Bauarten, die im Betrieb sind, kann als Beweis dafür aufgefasst werden, dass es gelungen ist, die skizzierten mannigfachen Schwierigkeiten zu überbrücken.

Die Elektrodenheizung wird mit Spannungen bis 100 kV betrieben und direkt an das Netz angeschlossen. Der Leistungsfaktor ist  $\approx 1$ . Die Leistungen sind praktisch unbegrenzt. Die Regulierung der Leistung erfolgt durch verschiedenes tiefes Eintauchen der Elektroden ins Wasser. Der Wirkungsgrad beträgt in der Regel über 95 %.

#### IV. Wärmeezeugung durch keramische und metallische Widerstände

Diese Art Wärmeezeugung sei im folgenden abgekürzt mit Widerstandsheizung bezeichnet. Sie ist wohl am verbreitetsten und wird in den mannigfaltigsten Arten ausgeführt. Die Widerstandsheizung kann sowohl mit Wechselstrom als auch mit Gleichstrom betrieben werden. Die Regulierung ist auf verschiedene Arten möglich, so dass den speziellen Wünschen in dieser Hinsicht entsprochen werden kann.

Dagegen wirken sich die hohen Heizleitertemperaturen oft nachteilig aus. Auch die im Vergleich mit der Wirbelstromheizung geringen spezifischen Heizflächenbelastungen führen in vielen Fällen zu langen Aufheizzeiten. Sehr oft beschränken die zulässigen Höchsttemperaturen des Widerstandsmaterials die obere Temperaturgrenze. Bei Verwendung offener Heizkörper ist ferner auf die Beschaffenheit der Ofenatmosphäre Rücksicht zu nehmen, damit der Heizleiter nicht durch chemische Angriffe zerstört wird.

Wie bereits angedeutet, unterscheidet man bei der Widerstandsheizung zwei Hauptgruppen von Heizleitern, keramische und metallische.

##### A. Keramische Heizleiter

Der bekannteste Vertreter dieser Gattung ist der Silitstab. Seine maximale Betriebstemperatur liegt bei 1500° C. Er wird in runden Stäben verwendet mit Durchmessern bis zu ca. 40 mm. Seine maximale spezifische Oberflächenbelastung ist ungefähr 1,5mal so gross wie bei metallischen Widerständen. Den im Betrieb auftretenden Dehnungen muss durch federnde Anschlüsse Rechnung getragen werden. Bei vertikalem Einbau und auch bei hohen Belastungen müssen die Enden vor Ueberhitzung geschützt werden. Zu diesem Zwecke werden sie mit Wasser gekühlt. Der Widerstandszunahme während des Betriebes infolge Alterung wird durch Einbau eines Vorschaltwiderstandes Rechnung getragen.

##### B. Der metallische Heizleiter

Er kommt in den weitaus meisten Fällen für die Widerstandsheizung zur Verwendung. Es existiert eine grosse Menge von Widerstandslegierungen, von denen man wiederum trennt zwischen Chrom-Nickel-, Chrom-Nickel-Eisen- und wickelfreien Legierungen. Sie kommen als Draht und Band in den Handel.

Der spezifische Widerstand liegt bei 1,1...1,45  $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m. Die maximal zulässigen Temperaturen betragen für Chrom-Nickel-Legierungen ungefähr 1100° C und für nickelfreie Chrom-Eisen-Aluminium-Kobalt-Legierungen 1350° C.

Die Arten der mit metallischen Heizleitern aufgebauten Heizkörper sind ausserordentlich zahlreich. Zur Erhitzung von Gasen können die Heizkörper häufig in offener Bauart verwendet werden, d. h. die Wärme wird vom Draht direkt an das Gas abgegeben.

Bei den sogenannten Glimmerheizkörpern wird das Widerstandsband um Glimmerstreifen gewickelt und das Ganze nochmals in Glimmer gepackt und durch Metallumhüllung zusammengepresst. Solche Heizkörper werden z. B. in Bügeleisen eingebaut.

Die Erwärmung von Flüssigkeiten geschieht meistens in der Weise, dass der Heizleiter mit dem keramischen Tragkörper in ein Rohr geschoben wird, das in die Flüssigkeit eintaucht.

Um das Widerstandsmaterial besser ausnützen zu können, werden die Heizleiter in keramische Pulver eingepresst und das Ganze mit einem Metallrohr umgeben (Fig. 11). Durch den innigen Kontakt zwischen Drahtoberfläche und keramischem Material wird der Temperatursprung, der beim Wärmeübergang vom Draht an Luft auftritt, vermieden. Der Temperatursprung tritt allerdings dann zwischen Metallrohr und Luft auf, doch steht hier zur Ableitung der gleichen Wärme-

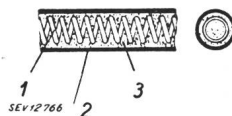


Fig. 11.  
Rohrheizkörper  
mit eingebetteter Heizspirale  
1 Heizleiter 2 Metallrohr  
3 Einbettmasse

leistung eine wesentlich grössere Oberfläche zur Verfügung, wodurch die Temperaturdifferenz reduziert wird. Zur Wärmeleitung vom Heizleiter durch die Isolierung an die Umhüllung ist ebenfalls eine Temperaturspannung nötig, die sich zu derjenigen des Wärmeüberganges addiert.

Das Grundsätzliche der Temperaturverhältnisse dieser beiden Ausführungsarten, offener und eingepresster Heizleiter, soll an einem Beispiel rechnerisch illustriert werden. Da diese Untersuchung vorwiegend prinzipieller Natur sein soll, beschränken wir unsere Rechnung des einfacheren Verständnisses wegen auf den gestreckten, horizontalen Heizleiter.

##### 1. Gestreckter horizontaler Draht in freier Luft von 20° C

Drahtdurchmesser 1 mm

Spez. Drahtoberflächenbelastung  $p_0 = 6$  W/cm<sup>2</sup>

Die Oberflächentemperatur ist abhängig von der Wärmeübergangszahl ( $W\ddot{U}Z$ ). Diese gibt die Wärmemenge an, die in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit der Drahtoberfläche an die Luft übergeht, wenn die Oberflächentemperatur 1° C über der Lufttemperatur liegt. Allgemein ausgedrückt

$$P = A \cdot \alpha_g \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_1) \quad (1)$$

$P$  Wärmeleistung [kcal/h]

$A$  Drahtoberfläche [m<sup>2</sup>]

$\alpha_g$   $W\ddot{U}Z$  für Konvektion, Leitung und Strahlung

[kcal/m<sup>2</sup> · °C · h]

$\vartheta_0 \cdot \vartheta_1$  Temperatur des Drahtes, bzw. der Umgebung [°C]

Die hier eingesetzten Einheiten sind so gewählt, weil auch die in den Handbüchern aufgeführten Stoffwerte in den weit- aus meisten Fällen in diesen Einheiten angegeben sind. Die Hauptaufgabe liegt in der Bestimmung der  $W\ddot{U}Z$   $\alpha_g$ .

$$\alpha_g = \alpha_k + \alpha_s \quad (2)$$

$\alpha_g$  Gesamt- $W\ddot{U}Z$  [kcal/m<sup>2</sup>, °C, h]

$\alpha_k$   $W\ddot{U}Z$  für Konvektion und Leitung

$\alpha_s$   $W\ddot{U}Z$  für Strahlung

##### a) Bestimmung von $\alpha_k$ :

$\alpha_k$  wird allgemein bestimmt aus der Nusseltschen Kennzahl  $Nu$  für den Wärmeübergang, die selber wieder eine Funktion der Grashoffschen Kennzahl  $Gr$  ist. Für horizontale Rohre wird

$$Nu = \alpha_k \cdot \frac{d}{\lambda} = 0,418 \cdot Gr^{0,25} \quad (3)$$

Nach Untersuchungen von R. Hermann gelten für dünne horizontale Drähte andere Werte von  $Nu$ .

Wir berechnen nun zuerst für unser Beispiel  $Gr$  nach (4).

$$Gr = \frac{d^3 \cdot g \cdot \Theta \cdot \beta}{\nu^2} \quad (4)$$

- $d$  Drahtdurchmesser [cm]
- $\beta$  Ausdehnungskoeffizient [1/293°]
- $\nu$  Kin. Zähigkeit [cm<sup>2</sup>/s]
- $g$  Erdbeschleunigung [cm/s<sup>2</sup>]
- $\Theta$  Temperaturdifferenz [°C]

Da die Stoffwerte, die für eine mittlere Temperatur  $\vartheta_m = \frac{1}{2} \cdot (\vartheta_0 + \vartheta_1)$  eingesetzt werden, mit der Drahttemperatur ebenfalls ändern, muss diese für die erste Rechnung geschätzt werden. Wir setzen für  $\vartheta_0 = 700^\circ\text{C}$ . Damit wird  $\Theta = 680^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_m = 360^\circ\text{C}$  und  $\nu = 0,565\text{ cm}^2/\text{s}$ .

$Gr = \frac{0,1^3 \cdot 680 \cdot 981}{0,565^2 \cdot 293} = 7,1$ , und für diesen Wert von  $Gr$  gilt nach den Angaben von R. Hermann für horizontale Drähte  $Nu = 1,5$ , womit nun nach (3) die  $W\ddot{U}Z$  errechnet werden kann. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Luft wird ebenfalls für die Mitteltemperatur  $\vartheta_m = 360^\circ\text{C}$  eingesetzt und beträgt  $0,0393 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$

$$\alpha_k = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} = 1,5 \cdot \frac{0,0393}{0,001} = 59 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

b) Bestimmung von  $\alpha_s$ :

Für den vorliegenden Fall kann die strahlende Drahtoberfläche als klein gegenüber der auf den Draht strahlenden Umgebung angenommen werden und wir setzen für

$$\alpha_s = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2} \cdot C \quad (5)$$

- $T_1 = 973^\circ\text{K}$
- $T_2 = 293^\circ\text{K}$
- $C = 1,5 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot (^{\circ}\text{K})^4$  Strahlungszahl des Drahtes

Mit diesen Werten wird die  $W\ddot{U}Z$

$$\alpha_s = 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C} \text{ und damit nach (2)}$$

$$\alpha_0 = 79 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Für die Berechnung der Drahttemperatur formen wir (1) um und erhalten, wenn die spez. Drahtoberflächenbelastung  $p_0 = 6 \text{ W/cm}^2 = 5,16 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{h}$  beträgt

$$\vartheta_0 = 670^\circ\text{C}$$

2. Gestreckter Draht in Magnesiumoxyd eingebettet in dünnwandigem Metallrohr von 10 mm äusserem Durchmesser. Rohr horizontal in freier Luft von 20° C

Heizdrahtdurchmesser 1 mm. Spez. Oberflächenbelastung 6 W/cm<sup>2</sup>. Die Rohrlänge betrage 1 m

Das gesamte Temperaturgefälle setzt sich zusammen aus 2 Anteilen, aus  $\vartheta_1 - \vartheta_a$  und  $\vartheta_a - \vartheta_l$  (Fig. 12).

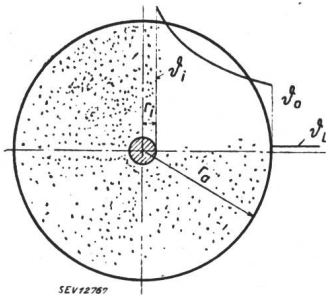


Fig. 12.

Radialer Temperaturverlauf in der Einbettmasse

a) Berechnung der Rohrtemperatur  $\vartheta_a$

Diese sei zunächst wiederum geschätzt mit  $200^\circ\text{C}$ . Gleich wie in Beispiel 1 bestimmen wir auch hier wieder

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_s$$

a) Bestimmung von  $\alpha_k$ :

Für diesen Rohrdurchmesser kann nun schon mit (3) gerechnet werden:  $Nu = 0,418 \cdot Gr^{0,25}$ . Mit den für die angenommenen Temperaturen gültigen Stoffwerten wird

$$Gr = 5 \cdot 10^3, \text{ somit } Nu = 3,52 \text{ und } \alpha_k = 11 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

\beta) Bestimmung von  $\alpha_s$

Auf gleiche Weise wie unter 1. b) findet man unter Annahme einer Strahlungszahl von  $3,7 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot (^{\circ}\text{K})^4$  und für Rohrtemperatur  $200^\circ\text{C}$  für die  $W\ddot{U}Z$

$$\alpha_s = 9 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

Damit erhalten wir auch die Gesamt- $W\ddot{U}Z$

$$\alpha_0 = 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$$

und für die Aussentemperatur des Rohres

$$\vartheta_a = 255^\circ\text{C}$$

b) Berechnung der Drahttemperatur  $\vartheta_1$

Der Vorgang des radialen Wärmeflusses durch einen Zylinder lässt sich durch (6) ausdrücken, worin  $P$  die Wärmeleistung [kcal/h],  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit der Einbettmasse [kcal/m·h·°C],  $l$  die Zylinderlänge [m],  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_a$  die Draht- bzw. Rohrtemperatur [°C],  $r_i$ ,  $r_a$  Draht- bzw. Rohrradius bedeuten.

$$P = \lambda \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \frac{\vartheta_1 - \vartheta_a}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \quad (6)$$

Für die Wärmeleitfähigkeit der stark gepressten Einbettmasse  $\lambda = 0,2 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}$  eingesetzt, wird die Drahttemperatur  $\vartheta_1 = 295 + 255 = 550^\circ\text{C}$ .

Der Temperaturverlauf in der Einbettmasse

$$\vartheta_r = \vartheta_1 - \frac{\vartheta_1 - \vartheta_a}{\ln r_a - \ln r_i} \cdot (\ln r - \ln r_i) \quad (7)$$

ist in Fig. 12 aufgetragen. Durch Verkleinern der Isolationschicht sinkt auch die Drahttemperatur. Sehr wichtig ist auch die Pressung der Einbettmasse zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit.

Die Heizleiter werden nun meistens zur Erzielung eines möglichst konzentrierten Wärmeeffektes zu schraubenförmigen Spiralen gewickelt. Die Temperatur solcher Spiralen liegt bei gleicher Oberflächenbelastung infolge des, im Vergleich zum gestreckten Draht, schlechteren Wärmeüberganges wesentlich höher als in unserem Beispiel ausgerechnet. Die Temperaturerhöhung liegt in der Größenordnung von 30...40 %, je nach den geometrischen Verhältnissen. An der Verschlechterung des Wärmeüberganges sind schuld die infolge der geometrischen Form der Spirale reduzierte freie Strahlungsfläche und die Behinderung der Luftströmung in der Spirale.

Auch die eingebettete Spirale weist naturgemäss bei gleicher Drahtoberflächenbelastung höhere Temperaturen auf als der gestreckte Draht. Die Wärmestauung im Innern einer eng gewundenen Spirale kommt einer Erhöhung der spezifischen Oberflächenbelastung gleich. Bei eingebetteten Spiralen kann der Fall eintreten, dass die Einbettmasse Hohlräume aufweist, so dass die Heizwicklung teilweise in Luft liegt. Solche Partien sind dann während des Betriebes Ueberhitzungen ausgesetzt, die mit der Zeit zu Zerstörungen führen können.

Die bei Heizanlagen mit offen angeordneten Heizleitern auftretenden hohen Heizleitertemperaturen verleiten, als Folge des ausgeprägten optischen Effektes der Heizkörper, zu der Annahme, dass auch die Wärmeübertragung solcher Systeme auf das zu beheizende Gut hauptsächlich durch Strahlung erfolge. Eine einfache Nachprüfung an unserem Beispiel zeigt, wie ausserordentlich gering der Strahlungsanteil in diesem Temperaturbereich bei solchen Heizungen ist gegenüber der Totalleistung. Beim Beispiel 1 macht der Anteil der Strahlung 25 % aus, wobei für die Festlegung der Strahlungszahl  $C$  eine ziemlich stark oxydierte Leiteroberfläche vorausgesetzt wurde. Für blanken Heizleiter redu-

ziert sich diese Strahlungszahl unter Umständen auf einen Drittel des angenommenen Wertes. Bestehen die Ofenwände, welche die Heizleiter tragen, aus gut emittierendem Material, beispielsweise keramischen Baustoffen, so kann allerdings bei hohen Ofentemperaturen dann die Strahlung dieser Wände beträchtlich werden. Diese Ausführungen zeigen, dass die Charakterisierung einer Heizung mit offenen Spiralen als Strahlungsheizung nur in den wenigsten Fällen den tatsächlichen Verhältnissen entspricht.

Heizkörper mit eingebetteten Heizwiderständen haben, neben der Möglichkeit, den Heizleiter höher zu belasten, noch den Vorteil, dass die äussere Umhüllung spannungsfrei ist und dass die Oberflächentemperatur wesentlich unter der Drahttemperatur liegt (Erwärmung explosiver Gase!).

Rohrheizkörper, bei denen der Widerstandsdraht lose in keramischen Isolatoren eingebettet ist, können nur mit geringen spezifischen Belastungen ausgeführt werden, weil hier die Wärme durch Luftschichten übertragen wird.

In den meisten Fällen liegen die Verhältnisse beim Einbau von Heizleitern so, dass für den Wärmeübergang nicht mit freier Luftströmung, sondern mit den Verhältnissen im Luftspalt gerechnet werden muss, d. h. der Wärmeübergang wird ein Problem der Wärmeleitung.

Bei der Planung von Widerstandsheizungen für Flüssigkeiten muss der Krustenbildung an der Heizkörperoberfläche besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Bei der Beheizung von Wasser schlägt sich Kesselstein am Heizkörper nieder, infolge Rückganges der Löslichkeit des Wassers für die verschiedenen Bestandteile des Kesselsteines mit steigender Temperatur. Da die Wärmeabgabe eines Heizkörpers an die Flüssigkeit bei der elektrischen Heizung nicht vom Wärmedurchgangswiderstand abhängt (im Gegensatz zu anderen Heizungsarten, z. B. mit Heisswasser, Dampf usw.), können Erhöhungen dieser Widerstände zu starken Temperatursteigerungen des Heizleiters führen, besonders, wenn sich Kesselsteinschichten bis zu einigen Zentimeter Dicke bilden. Kesselstein ist ein schlechter Wärmeleiter. Doch noch gefährlicher als der Stein selber sind Spaltbildungen zwischen Rohrwand und Kruste. In solche Spalten dringt Flüssigkeit, die beim Heizen verdampft, da ja bei der Wärmeleitung zwischen Heizkörper und Spaltflüssigkeit an der Berührungsstelle kein Temperatursprung vorhanden ist. Infolge der sehr schlechten Wärmeleitfähigkeit von Dampf kann sich die betroffene Rohrpartie, wenn die Ablösung einen grösseren Teil des Heizkörpers betrifft, stark überhitzen. An einem durch Kesselsteinbildung zerstörten Heizkörper zeigten Untersuchungen, dass die Kruste allein nicht Ursache der Ueberhitzung sein konnte, sondern erst in Verbindung mit Spaltbildung zwischen Heizkörper und Kruste zur Zerstörung des Heizdrahtes führte.

Die Temperaturverhältnisse an einem solchen Heizkörper sind in Fig. 13 dargestellt und auf eine vertikale Platte in ruhendem Wasser bezogen.

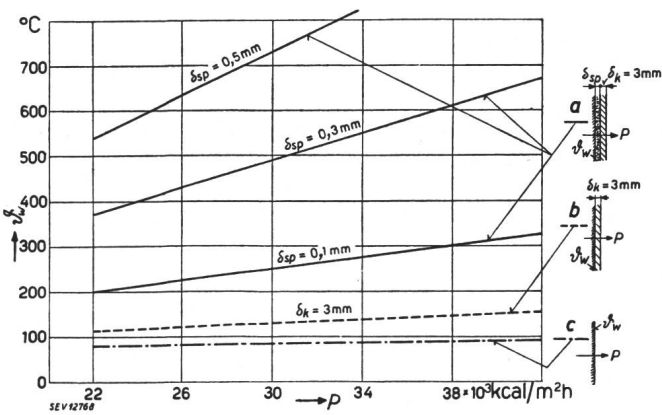


Fig. 13.

Einfluss der Krustenbildung auf die Heizkörpertemperatur  
a Spalt + Kruste. b Kruste. c reine Oberfläche.

Bedecken solche Krustenablösungen nur einen kleinen Teil des Heizkörpers, so wird die gestaute Wärme in die Umgebung, die mit der Kruste besseren Kontakt hat, abfließen. Bei grösseren Ablösungen, die gelegentlich angetroffen werden, können, wie bereits erwähnt, infolge örtlicher Ueberhitzung Heizdrahtdefekte entstehen.

### V. Wärmeezeugung durch Strahlung

Wir verstehen darunter in diesem Zusammenhang die Verwendung der Wärmestrahlung der Infrarot-Lampen zur Wärmeezeugung, die für Trocknungsprozesse in der Industrie in steigendem Masse angewendet werden. Auch der Lichtbogen erzeugt eine sehr intensive Wärmestrahlung, doch ist diese Erzeugungsart zu umständlich und zu verlustreich im Vergleich mit der Infrarot-Lampe. Diese ist im Aufbau ähnlich wie eine Glühlampe. Sie trägt in einem Glaskolben mit Reflektor eine Heizwicklung. Man hat es in der Hand, durch geeignete Wahl der Glühdrahttemperatur das Energie-maximum einer bestimmten Wellenlänge zuzuordnen.

Im Gegensatz zu den unter I..IV besprochenen Erzeugungsarten, wo die Wärme möglichst nahe bei dem zu erwärmenden Gut oder in diesem selbst erzeugt wird, benützt man bei der Infrarot-Lampe nur die Wärmestrahlung für den Energietransport. Erst beim Auftreffen der Strahlen wird die Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt. Bei dieser Umwandlung entsteht bei gleicher auftreffender Strahlungsleistung bei verschiedenen Substanzen nicht gleichviel Wärme. Bei undurchlässigen Stoffen zerfällt die auftreffende Strahlung in einen absorbierten und einen reflektierten Teil, oder anders ausgedrückt  $\alpha + \rho = 1$

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{auffallende Energie}} = \text{Absorptionsverhältnis}$$

$$\rho = \frac{\text{reflektierte Energie}}{\text{auffallende Energie}} = \text{Reflexionsverhältnis}$$

Bei durchlässigen Körpern lautet dieser Ausdruck  $\alpha + \rho + \tau = 1$ , wobei das Durchlässigkeitsverhältnis  $\tau$  sinngemäss definiert ist durch  $\tau = \frac{\text{durchgehende Energie}}{\text{auffallende Energie}}$ . Der absorbierte Strahlungsanteil richtet sich nach der sogenannten Strahlungszahl C, für welche die Definitionsgleichung gilt  $C = \alpha \cdot C_s$  [kcal/m<sup>2</sup> · h · (°K)<sup>4</sup>]

$$C_s \text{ Strahlungszahl des schwarzen Körpers} \\ = 4,96 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{°K})^4$$

Die zu trocknende Substanz, z. B. Holz, nasse Bleche, Farbstoffe, Lacküberzüge, Nahrungsmittel (z. B. Herstellung von Trockneipulver) zeigen für verschiedene Wellenlängen auch verschiedene Eindringtiefen der Strahlung. Für eine rasche, zerstörungsfreie Trocknung ist es nun wichtig, dass sich der Trocknungsprozess von innen nach aussen abspielt. Bei der Trocknung mit warmer Luft, die heute noch fast überall angewendet wird, bildet sich an der Oberfläche eine harte Kruste, durch die dann die Wärme ins Innere der Substanz eindringen muss, um dieses zu erwärmen. Der austretende Dampf muss wiederum zuerst die Kruste durchdringen, um ins Freie zu gelangen. Lange Trocknungszeiten, Rissbildungen an der Oberfläche sind häufig die Folgen dieser Trocknungsart.

Diese Nachteile werden vermieden bei der Infrarot-Trocknung. Die Wärmestrahlen dringen bis zu einer gewissen Tiefe in die Substanz ein und erzeugen in dieser Tiefe durch Absorption Wärme, die zur Verdampfung der Feuchtigkeit führt. Dieser Vorgang spielt sich von innen nach aussen ab. Die Trocknungszeiten liegen ganz bedeutend unter denjenigen bei Warmlufttrocknung. Auch können die Temperaturen leicht reguliert werden durch Aendern der Entfernung der Lampen vom Trocknungsgut.

Für sehr viele Substanzen eignet sich die Wellenlänge  $\lambda = 12\,000 \text{ \AA}$  sehr gut wegen ihrer hohen Eindringtiefe. Dieser Wellenlänge entspricht bei einer Lampe mit Wolframdraht eine Drahttemperatur von 2450° K.