

## Die Temperaturen technischer Oberflächen unter dem Einfluß der Sonnenbestrahlung und der nächtlichen Ausstrahlung.

Von Dipl.-Ing. Karl Schropp, München.

(Mitteilung aus dem Forschungshaus für Wärmeschutz e. V., München.)<sup>1)</sup>

*Einleitung. — Theoretische Betrachtungen über Wärmestrahlung. — Die an verschiedenen technischen Oberflächen bei Sonnenbestrahlung und nächtlicher Ausstrahlung gemessenen Temperaturen. — Messung der von der Sonne zugestrahlten Wärmemenge. — Das Absorptionsverhältnis einer weißen Oberfläche bei Sonnenbestrahlung. — Kritik der Versuchsergebnisse. — Folgerungen für die Praxis. — Zusammenfassung.*

Die nachfolgenden Ausführungen dienen dem Zweck, Klarheit zu schaffen über das thermische Verhalten verschiedener Oberflächen unter dem Einfluß der Sonnenbestrahlung und der Ausstrahlung bei Nacht. Zum allgemeinen Verständnis werden, soweit es notwendig erscheint, dem Bericht über die eigentlichen Versuche theoretische Betrachtungen vorausgeschickt. Die Versuche selbst erstrecken sich auf Temperaturmessungen an verschiedenen, der Sonnenbestrahlung bzw. dem Strahlungsaustausch gegen den nächtlichen klaren Himmel ausgesetzten Stoffen, ferner auf die mit einer kreisrunden Wärmeflußmeßplatte durchgeführte Bestimmung der von der Sonne auf eine geschwärzte und auf eine weiße Oberfläche senkrecht eingestrahlten Wärmemenge und damit auf die Ermittlung des Absorptionsverhältnisses der weißen Oberfläche. Das verschiedene Verhalten der weißen Fläche gegenüber lang- und kurzwelliger Strahlung wird damit erklärt, daß ihr Absorptionsverhältnis abhängig ist von der Wellenlänge der ankommenden Strahlung. Schließlich wird an einem Beispiel die praktische Bedeutung der gefundenen Ergebnisse erläutert.

Die Temperatur, die eine der Sonnenbestrahlung ausgesetzte Körperoberfläche, z. B. das Dach eines Hauses, annimmt, hängt in erster Linie davon ab, wie groß derjenige Teilbetrag der gesamten ankommenden Strahlungsenergie ist, der an der jeweiligen Oberfläche in Wärme umgesetzt und aufgenommen, d. h. absorbiert wird; dabei wird die von der Sonne auf die Einheit der Oberfläche in der Zeiteinheit gestrahlte Wärmemenge selbst beeinflußt einerseits durch die atmosphärischen Verhältnisse, andererseits durch die Richtung in welcher die Strahlung auftrifft. Da die vorliegenden Betrachtungen sich hauptsächlich auf die Höchsttemperaturen, welche die Sonnenbestrahlung in unserer geographischen Breite hervorruft, beziehen sollen, so wird senkrechter Einfall der Strahlen bei wolkenlosem, blauem, nach unseren Verhältnissen klarem Firmament vorausgesetzt. In zweiter Linie sind für die sich einstellende Temperatur von Einfluß die Wärmeabgabebedingungen an der bestrahlten Oberfläche, bestimmt durch die Abmessungen (bei ebener Fläche die Dicke) und wärmetechnischen Eigenschaften des betreffenden Körpers bzw. auch seiner Unterlage, Temperatur und Bewegungszustand der Umgebungsluft, Temperatur und Fläche etwaiger mit ihr im Strahlungsaustausch stehender anderer Körper.

Zum Verständnis und zur Beurteilung der Versuchsergebnisse ist die Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten der Wärmestrahlung notwendig. Diese sollen vorweg soweit

behandelt werden als es für den gegenwärtigen Zweck notwendig erscheint. Es können diese Ausführungen deshalb auf Vollständigkeit keinen Anspruch erheben und es muß für eingehende Orientierung auf die einschlägige Literatur verwiesen werden<sup>1)</sup>.

### Theoretische Betrachtungen über Wärmestrahlung.

Als Wärmestrahlung bezeichnen wir den physikalischen Vorgang, daß ein Körper einen Teil seines Wärmeinhaltes an seiner Oberfläche in strahlende Energie verwandelt, welche das Zwischenmedium durchmißt und beim Auftreffen auf einen anderen Körper ganz oder teilweise wieder in Wärme zurückverwandelt wird. Beim Studium des Strahlungsvorganges hat man demnach zu fragen: Nach welchen Gesetzen erfolgt die Ausstrahlung oder Emission? Welche Einflüsse erfährt die Strahlung auf dem Weg zum bestrahlten Körper? Wie verhält sich der bestrahlte Körper zur auftreffenden Energie?

Zum besseren Verständnis möge die dritte Frage zuerst behandelt werden.

#### 1. Die Aufnahme oder Absorption von Strahlungsenergie.

Trifft auf einen Körper eine Strahlung, so kann er diese aufnehmen (absorbieren), er kann sie zurückwerfen (reflektieren) und er kann sie schließlich ungeschwächt hindurchlassen. Im allgemeinen wird keiner dieser Vorgänge allein vorhanden sein, es wird vielmehr meist von der ankommenden Strahlung ein Teil absorbiert, ein Teil reflektiert und der Rest durchgelassen werden. Denjenigen Bruchteil der ganzen auftreffenden Strahlung, der absorbiert wird, bezeichnet man als Absorptionsverhältnis  $A$ , den reflektierten als Reflexionsverhältnis  $R$ , den durchgelassenen mit Durchlaßverhältnis  $D$ . Setzt man die auftreffende Strahlungsmenge gleich 1, so besteht demnach die Beziehung:

$$A + R + D = 1,$$

worin  $A$ ,  $R$ ,  $D$  unbenannte echte Brüche darstellen. Für die bei den vorliegenden Betrachtungen in Frage kommenden festen Körper kann, in Anbetracht der Dicke bei der sie verwendet werden, das Durchlaßverhältnis vernachlässigt werden, sodaß die obige Gleichung sich vereinfacht zu

$$A + R = 1.$$

Lediglich Glas ist in diesem Zusammenhang auszunehmen. Sein Verhalten wird, soweit es hier interessiert, später noch besonders besprochen werden.

Ein Körper, der alle auftreffenden Strahlen absorbiert, wird als »absolut schwarzer Körper« bezeichnet. Da es eine derartige absolut schwarze Oberfläche in Wirklichkeit jedoch nicht gibt, wurde der absolut schwarze Körper bekanntlich realisiert durch einen auf überall gleicher Temperatur gehaltenen Hohlraum, der eine kleine Öffnung besitzt. Ein durch diese eintretender Strahl verliert an die Innenwandung des Hohlraumes durch wiederholtes Absorbieren des jeweils reflektierten Restes bis zu seinem Wiederaustritt aus der Öffnung praktisch seine gesamte Energie. Die Öffnung des Hohlraumes besitzt demnach, entsprechend obiger Definition, die Eigenschaft des absolut schwarzen Körpers.

<sup>1)</sup> O. Lummer, »Grundlagen, Ziele und Grenzen der Leuchttechnik«. München und Berlin 1918, R. Oldenbourg.

E. Schmidt, »Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlichen Temperaturen«. Beihefte zum Gesundh.-Ing., Reihe I, Heft 20, München und Berlin 1927, R. Oldenbourg.

W. Wien u. C. Müller, »Wärmestrahlung«. Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 9, 1. Teil, Leipzig 1929. Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H.

<sup>1)</sup> Dem wissenschaftlichen Leiter des Forschungshauses, Herrn Dr.-Ing. E. Ratsch, spreche ich für die Anregung zur Bearbeitung des Themas und für sein stetes Interesse am Fortgang der Arbeit meinen aufrichtigsten Dank aus.

2. Die Gesetze der Wärmeausstrahlung oder Emission.

Die von einem strahlenden Körper in der Zeiteinheit von der Flächeneinheit ausgesandte Energie nennt man sein Emissionsvermögen. Die Beziehung zwischen dem Absorptionsverhältnis  $A$  und dem Emissionsvermögen  $E$  eines Körpers ist im Kirchhoffschen Gesetz ausgedrückt. Es sagt aus, daß für alle Körper das Verhältnis

$$\frac{\text{Emissionsvermögen } E}{\text{Absorptionsverhältnis } A}$$

gleich und, da das Absorptionsverhältnis des schwarzen Körpers 1 ist, gleich dem Emissionsvermögen des schwarzen Körpers sein muß.

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = \frac{E_n}{A_n} = E_s$$

Die notwendige Gültigkeit dieser Gesetzmäßigkeit kann durch folgende Überlegung veranschaulicht werden. Zwei Flächen gleicher Temperatur sollen im gegenseitigen Strahlungsaustausch stehen. Die eine besitze ein sehr großes, die zweite ein sehr kleines Absorptionsverhältnis. Würde man nun für die erste schwarze Fläche ein kleines und für die zweite ein großes Emissionsvermögen annehmen, so würde die schwarze Fläche die große Zustrahlung absorbieren, selbst aber wenig aussenden. Die zweite Fläche müßte umgekehrt mehr emittieren als absorbieren. Die unvermeidliche Folge wäre eine Temperaturerhöhung der schwarzen Fläche bei gleichzeitiger Temperaturerniedrigung der zweiten Fläche. Diese Temperaturänderung ohne Energieaufwand ist aber erfahrungsgemäß unmöglich; der Vorgang würde dem zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmelehre widersprechen.

Es muß also gelten: Ein Körper mit hohem Absorptionsverhältnis besitzt ein hohes Emissionsvermögen und umgekehrt. Demnach besitzt der schwarze Körper nicht nur das größte Absorptionsverhältnis, sondern auch das größtmögliche Emissionsvermögen. Die Öffnung des oben beschriebenen Hohlraumes emittiert also auch absolut schwarz.

a) Die Emissionsgesetze des schwarzen Körpers.

Für das Emissionsvermögen des schwarzen Körpers gilt das folgende Gesetz von Stefan Boltzmann, das, theoretisch abgeleitet, durch experimentelle Nachprüfung Bestätigung gefunden hat. Es sagt aus, daß die in der Zeiteinheit von der Einheit der Fläche ausgestrahlte Gesamtenergie, d. i. das Emissionsvermögen, proportional ist der vierten Potenz der absoluten Temperatur ( $T$ ), welche der strahlende schwarze Körper besitzt. Es gilt demnach die Beziehung

$$E_s = \sigma \cdot T^4$$

worin der Proportionalitätsfaktor  $\sigma$ , der als Strahlungskonstante des absolut schwarzen Körpers bezeichnet wird, den Wert besitzt

$$\begin{aligned} \sigma &= 5,76 \cdot 10^{-12} \text{ Watt/cm}^2 \cdot (\text{abs. Grad})^4 \\ &= 1,38 \cdot 10^{-12} \text{ cal/sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot (\text{abs. Grad})^4. \end{aligned}$$

Nimmt man, zwecks bequemerem Rechnens vom Faktor  $10^{-12}$  den Betrag  $10^{-8}$  zur absoluten Temperatur und bezeichnet man mit  $C_s$  die Strahlungszahl des schwarzen Körpers, so lautet, wenn man gleichzeitig auf die in der Technik üblichen Maßeinheiten umrechnet, die Gleichung

$$E_s = C_s \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

worin bedeutet:

$$\begin{aligned} C_s &= 5,76 \text{ Watt/m}^2 \cdot (\text{abs. Grad})^4 \\ &= 4,96 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2 \cdot (\text{abs. Grad})^4. \end{aligned}$$

Die starke Abhängigkeit des Emissionsvermögens von der Temperatur ist aus der folgenden Zusammenstellung zu ersehen:

T (abs. Grad)	0°	100°	200°	300°	400°	500°	1000°	2000°
$E_s$ (kcal/m <sup>2</sup> · h)	0	4,96	79	402	1270	3100	49 600	790 000

Das Gesetz von Stefan-Boltzmann bestimmt die Größe der Gesamtstrahlung; es gibt jedoch keinen Aufschluß über ihre Verteilung auf die einzelnen Wellenlängengebiete und sagt ebenfalls nichts aus über die Richtung der Strahlung.

Das Plancksche Verteilungsgesetz erfaßt die Verteilung der schwarzen Strahlen über die Wellenlängengebiete; ist  $E_{s\lambda}$  die Intensität der schwarzen Strahlung bei der Wellenlänge  $\lambda$ , so gilt die Beziehung

$$E_{s\lambda} = c_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1} \quad (\text{Watt/cm}^2 \text{ bzw. kcal/h} \cdot \text{cm}^2),$$

worin bedeuten:

- $T$  die absolute Temperatur in Grad,
- $\lambda$  die Wellenlänge in cm,
- $e$  die Basis der natürlichen Logarithmen,
- $c_1$  eine Konstante =  $3,69 \cdot 10^{-12}$  Watt · cm<sup>2</sup>

$$= 0,881 \cdot 10^{-12} \frac{\text{cal} \cdot \text{cm}^2}{\text{sec}}$$

- $c_2$  eine zweite Konstante =  $1,430$  cm · Grad.

$E_{s\lambda} \cdot d\lambda$  bedeutet sodann die im Wellenlängenbereich  $d\lambda$  emittierte Energie der schwarzen Strahlung. Durch Integrieren über alle Wellenlängen ergibt sich als zweiter Ausdruck für die Gesamtemission

$$E_s = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} E_{s\lambda} \cdot d\lambda = c_1 \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} - 1} = \sigma \cdot T^4.$$

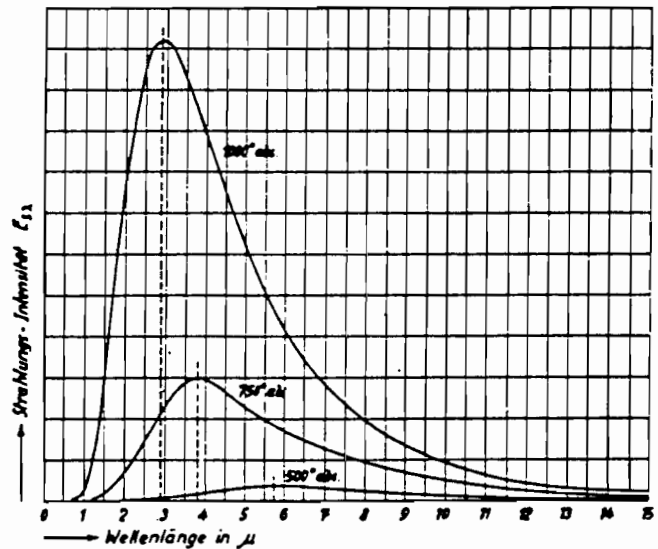


Abb. 1. Die Intensität der schwarzen Strahlung für verschiedene Temperaturen in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

In Abb. 1 sind für drei Temperaturen die Energiekurven gezeichnet. Die unter der jeweiligen Kurve liegende Fläche stellt das eben entwickelte Integral, also die Gesamtemission bei der betreffenden Temperatur dar. Aus der Abbildung ist zu ersehen, daß mit steigender Temperatur die Intensität der Strahlung an jeder Stelle wächst; der Charakter aller Kurven ist derselbe, sie beginnen bei kleiner Wellenlänge mit Null, steigen rasch zu einem Maximum an, um mit weiter zunehmender Wellenlänge wieder langsam auf Null abzufallen. Mit zunehmender Temperatur verschiebt sich das Maximum mehr und mehr ins kurzwellige Gebiet; seine Lage wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz bestimmt. Nach diesem ist

$$\lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{const} = 2880,$$

wenn man die Wellenlänge in  $\mu$  ( $1 \mu = 0,001$  mm) mißt. Die Temperatur des strahlenden Körpers ist also nicht nur für die Quantität, d. h. die Größe der Gesamtstrahlung von großem Einfluß, sondern auch für die Qualität, d. h. die Art der Verteilung auf die verschiedenen Wellenlängen von

bemerkenswerter Bedeutung. Das Gesetz gibt rasch Aufschluß über die Wellenlängen, mit denen man bei einer bestimmten Temperatur vornehmlich zu rechnen haben wird. Anschließend ist die Lage des Maximums der Emissionskurven für einige Temperaturen angegeben:

20 °C (293° abs.) (Zimmertemperatur)	$\lambda_{max} = 10 \mu$
100 °C (373° abs.)	$\lambda_{max} = 7,7 \mu$
400 °C (673° abs.) (Beginn der sichtbaren Rotglut)	$\lambda_{max} = 4,3 \mu$
2000 °C (2273° abs.)	$\lambda_{max} = 1,3 \mu$
~ 6000° abs. (Sonnentemperatur)	$\lambda_{max} = 0,48 \mu$

Für das menschliche Auge sichtbar ist das Gebiet zwischen 0,4  $\mu$  bis höchstens 0,8  $\mu$ .

Die Richtungsverteilung bei schwarzer Strahlung behandelt das Lambert'sche Gesetz. Es ist gültig sowohl für die Strahlung bei jeder einzelnen Wellenlänge, als auch für die Gesamtstrahlung. Bezeichnet man mit  $E_n$  die Strahlung in Richtung der Normalen zur strahlenden Fläche und mit  $\varphi$  den Winkel, den ein Strahl anderer Richtung ( $E\varphi$ ) mit dieser einschließt, so lautet das Gesetz

$$E\varphi = E_n \cdot \cos \varphi,$$

und man erhält durch Summieren der Strahlen aller Richtungen für die Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers die dritte Beziehung

$$E_s = \pi \cdot E_n.$$

Die Gesetze der schwarzen Strahlung ergeben oberste Grenzwerte, die von keinem anderen strahlenden Körper überschritten werden können, weder was die Gesamtstrahlung, noch die Strahlung in einzelnen Wellenlängenbereichen anbelangt. Als unterste Grenzgesetze hat O. Lummer<sup>1)</sup> diejenigen von blankem Platin bestimmt.

b) Die Strahlung wirklicher Flächen.

Wie eben erwähnt, kann das Emissionsvermögen (und analog das Absorptionsverhältnis) des schwarzen Körpers von keinem anderen Körper übertroffen werden. Es wird hingegen, je nach der Oberflächeneigenschaft des betreffenden Körpers, mehr oder weniger stark unterschritten. Wenn angenommen werden darf, daß seine Ausstrahlung in allen Wellenbereichen in demselben bestimmten Verhältnis zu der des schwarzen Körpers steht, also z. B. stets 30% beträgt, so sprechen wir von »Graustrahlern« und es können zur Berechnung die für die schwarze Strahlung gültigen Gesetze angewandt werden, wenn man die Konstanten der Gesetze ändert. In der Gleichung

$$E = C \left( \frac{T}{100} \right)^4$$

bedeutet dann C die Strahlungszahl des betreffenden Körpers. Bleibt aber das Verhältnis der gestrahlten Energie zu der des schwarzen Körpers nicht überall dasselbe, so äußert sich dies in einer Abhängigkeit der Strahlungszahl von der Temperatur. Für die in Frage kommenden technischen Oberflächen wird ein »graues« Emissions- und Absorptionsspektrum (Abb. 2 a u. b) angenommen und es ist diese Annahme in den Temperaturbereichen, in denen Messungen vorgenommen wurden, wohl auch berechtigt.

3. Die Beeinflussung der Strahlung durch das Zwischenmedium.

Auf dem Weg von einem Körper zum andern hat die Strahlung das Zwischenmedium zu durchdringen. Für die Wärmestrahlung handelt es sich hauptsächlich um Gase oder Gasgemische. Je nach der Zusammensetzung dieses Zwischenmediums wird die Strahlung mehr oder weniger geschwächt, indem ein Teil der Strahlung absorbiert wird. Auf die Verhältnisse der »Gasstrahlung«<sup>2)</sup> kann hier nicht

näher eingegangen werden. Es sei nur erwähnt, daß ein bestimmtes Gas, im Gegensatz zu einem Graustrahler, nur in einem oder mehreren schmalen Wellenlängenbereichen absorbiert (bzw. emittiert), während es für die Strahlung in anderen Wellenbereichen völlig durchlässig sein kann. Die Absorptions- bzw. Emissionsspektren solcher Gase, z. B. Kohlensäure, Wasserdampf, bestehen also aus einzelnen Bändern, weshalb man sie Bandenspektren nennt. Aus der tagtäglichen Erfahrung ist uns bekannt, daß die aus winzigen schwebenden Wasserteilchen bestehenden Wolken einen großen Teil der Sonnenstrahlung absorbieren; aber auch bei sogenanntem klarem Himmel schwächt die unsere Erde umgebende Atmosphäre den Strahlungsaustausch und

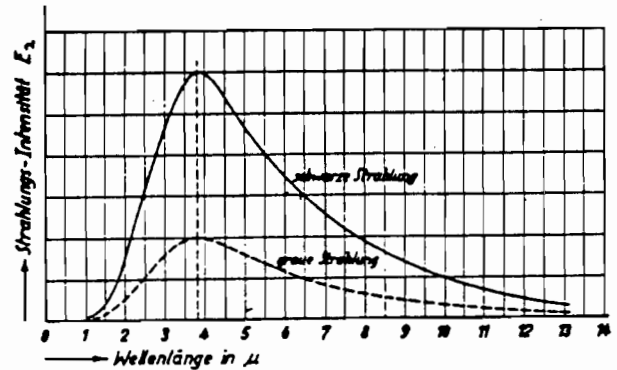


Abb. 2a. Die Intensität der Strahlung des schwarzen und eines grauen Körpers.

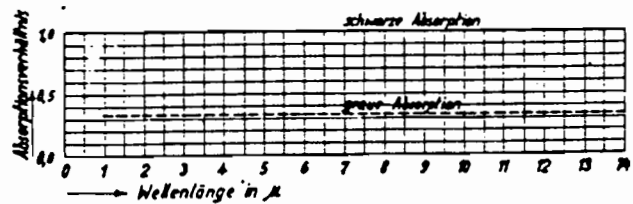


Abb. 2b. Das Absorptionsverhältnis des schwarzen und eines grauen Körpers.

schützt uns dadurch bei Tag vor zu großer Erwärmung und nachts vor zu starker Abkühlung durch Ausstrahlung (dieser schützenden Hülle entbehrt beispielsweise der Mond, dessen Oberfläche deshalb sehr schroffen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist). Bei nächtlichem Aufklaren kann man der damit verbundenen gefürchteten Frostgefahr durch künstliche Wolkebildung begegnen. So werden in den Tälern Südtirols und wohl auch in anderen Weinregionen von altersher in kalten, klaren Frühjahrsnächten stark qualmende Feuer entfacht, um durch die sich über das Tal legende Rauchwolke die Ausstrahlung gegen das Firmament zu verhindern und die jungen Reben vor Erfrieren zu schützen.

Für die vorliegenden Betrachtungen genügt es zu wissen, welche Wärmestrahlung nach Absorption durch die Atmosphäre tatsächlich im Höchsthalle auf unserer Erde ankommt und wie sich die einzelnen technischen Oberflächen unter ihrem Einfluß verhalten.

Versuchsordnung<sup>1)</sup> und Versuchsergebnisse.

Die Strahlungszahlen einer großen Anzahl technischer Oberflächen wurden in neuerer Zeit von E. Schmidt<sup>1)</sup> bestimmt und damit die bis dahin nur spärlich vorliegenden und teilweise unrichtigen Forschungsergebnisse wertvoll erweitert bzw. berichtigt. Besonders auffallend waren namentlich die von ihm festgestellten sehr hohen Strahlungszahlen für helle und weiße Oberflächen und Anstriche sowie für Glas; standen sie doch scheinbar in Widerspruch zu der Erfahrung, nach der sich beispielsweise zum Schutz gegen Sonnenbestrahlung das Tragen weißer statt dunkler

<sup>1)</sup> a. a. O.  
<sup>2)</sup> W. Nußelt, »Der Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschine«. Mitt. Forsch.-Arb. Heft 264.  
 A. Schack, »Strahlung von Gaskörpern«. Zeitschr. Technische Physik 1924, Heft 8. »Der Wärmeübergang in techn. Feuerungen unter dem Einfluß der Eigenstrahlung der Gase«. Mitt. Wärmestelle Verein d. Eisenhüttenleute Mitt. 55. Verlag Stahl Eisen, Düsseldorf.

<sup>1)</sup> a. a. O.

Kleidung empfiehlt und nach der unser Fensterglas für Sonnenlicht- und Wärme durchlässig ist. Zur Klärung dieser vermeintlichen Unstimmigkeiten wurden die nunmehr zu besprechenden Messungen der Temperatur und des Absorptionsverhältnisses durchgeführt.

1. Messung der unter dem Einfluß der Sonnenbestrahlung bzw. der nächtlichen Ausstrahlung an verschiedenen technischen Oberflächen sich einstellenden Temperaturen.

Nachdem die Erkenntnis der günstigen wärmeschutztechnischen Wirkung dünner, von Oberflächen kleinstmöglicher Strahlungszahl begrenzter Luftschichten in der Isoliertechnik durch die sogenannte Aluminiumfolien-Isolierung<sup>1)</sup> praktische Anwendung fand, lag es zunächst nahe, das Verhalten von glänzender Aluminiumoberfläche auch gegenüber der Sonnenbestrahlung zu untersuchen. Als Vergleichsfläche diente hierbei mattes schwarzes Papier. In der Folge ergab sich dann sozusagen von selbst das Interesse an der Untersuchung verschiedener anderer Stoffe.

Die Versuchsanordnung konnte einfach gewählt werden: es wurde bei allen Messungen eine 5 cm starke Isolierplatte aus Kork oder Torf benutzt, auf welche die verschiedenen dünnen Stoffe aufgeklebt bzw. durch Drähte festgezogen wurden; die einzelnen Stoffe bedeckten je eine Fläche von etwa 15 x 20 cm. Die Temperaturen wurden durch Thermolemente, deren Lötstellen unter dem betreffenden Stoff eingelegt waren, mit zwei registrierenden Millivoltmetern bzw. einem hochempfindlichen Bändchenmillivoltmeter gemessen. Die Unterlage aus Kork oder Torf mit ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit wurde verwendet, um einerseits einen Temperatenausgleich zwischen den einzelnen Meßflächen zu verhindern, andererseits um durch ihren großen Wärmedurchlaßwiderstand die verschiedene Isolierwirkung der einzelnen Abdeckstoffe, bedingt durch die Unterschiede in ihrer Wärmeleitfähigkeit und Dicke, nicht merklich zur Geltung kommen zu lassen und außerdem, weil zu erwarten war, daß wegen der geringen Wärmedurchlässigkeit der Unterlage die festzustellenden Temperaturunterschiede sich besonders stark ausprägen würden. Die Platte wurde an möglichst windgeschützter Stelle auf freiem Dach senkrecht zur Sonne aufgestellt; mit Hilfe einer senkrecht in die Platte gesteckten Nadel, die keinen Schatten werfen darf, wurde die Stellung der Platte eingerichtet und von Stunde zu Stunde nachgerichtet; die Bestimmung der Lufttemperatur erfolgte mit strahlungsgeschütztem Quecksilberthermometer bzw. Thermolement in der Nähe der Meßanordnung. Die Drähte der Thermolemente wurden durch ein Dachfenster in den Dachraum geführt, wo die elektrischen Meßinstrumente aufgestellt waren.

In erster Linie wurden, wie bereits erwähnt, Vergleichsversuche zwischen glänzender Aluminium- und mattschwarzer Papieroberfläche angestellt. Die nachstehend angeführten Meßergebnisse sind die Extremtemperaturen als Mittelwerte über etwa je 1 Stunde. Die höchsten Temperaturen treten durchschnittlich zwischen etwa 12<sup>00</sup> und 13<sup>30</sup> Uhr, die tiefsten zwischen etwa 3<sup>00</sup> und 5<sup>00</sup> Uhr auf. Die angegebenen Werte beziehen sich alle auf wolkenlosen, blauen bzw. sternklaren Himmel. Es wurden folgende Temperaturen festgestellt:

	Ausstrahlung bei Nacht, tiefste Temperaturen		Sonnenbestrahlung, höchste Temperaturen		
	schwarzes Papier	glänz. Aluminium- folie	schwarzes Papier	glänz. Aluminium- folie	Luft
VI. 27			62°	32°	
5. VII. 27	10,5°	15°	72°	44°	27°
6. VII. 27	12,5°	15°	78°	48°	29°
VII. 27	15°	17,5°	65°	39°	

<sup>1)</sup> E. Schmidt, „Wärmeschutz durch Aluminiumfolie“, VDI-Zeitschrift, Bd. 71 (1927), S. 1395.

Daran angeschlossen wurden Vergleichsversuche mit Dachpappe und altem verzinktem Eisenblech; beide Materialien verhielten sich völlig gleichartig wie geschwärztes Papier.

Eine zweite Versuchsreihe im September 1928 umfaßte als Oberflächenmaterialien mattes Papier, sowohl weiß als auch geschwärzt; grobes Leinewebe, ebenfalls weiß und geschwärzt; glänzende Aluminiumfolie. Die Versuchsbedingungen zu dieser Zeit waren wegen der Witterungsverhältnisse nicht so günstig, um besonders extreme Werte zu erzielen. Immerhin waren sie aber geeignet, eine auffallende Verschiedenheit im Verhalten der weißen Materialien im Vergleich zu den geschwärzten bei Sonnenbestrahlung zu beweisen. Dabei nahmen die weißen Oberflächen eine nur um wenige Grade höhere Temperatur an als glänzende Aluminiumfolie, während man hätte erwarten können, daß die metallisch glänzende Oberfläche des Aluminiums die Sonnenstrahlen wesentlich stärker reflektiert als die weißfarbigen Stoffe. Im übrigen konnten Unterschiede im Verhalten der verschiedenen weißen Materialien untereinander als auch der geschwärzten unter sich nicht festgestellt werden.

Die Untersuchungen wurden im Herbst 1929 weitergeführt mit folgenden Stoffen: glänzende Aluminiumfolie, rohes Aluminiumblech, aluminiumbronziertes Eisenblech; schwarzes Papier; weißemaltes Eisenblech, schwarzemaltes Eisenblech; weißes Papier unter Fensterglasscheibe, schwarzes Papier unter Fensterglasscheibe. Die überaus günstigen Witterungsverhältnisse ermöglichten die Durchführung der Versuche noch Ende September.

Höchsttemperaturen verschiedener Oberflächen bei Sonnenbestrahlung nach den Versuchen vom September 1929.

	glänz. Alum.- Folie	rohes Alum.- Blech	Papier schwarz	Glas auf weißem Papier	Glas auf schwarzem Papier	Luft
27. IX.	38°	57°	75°	45°	74°	21°
	glänz. Alum.- Folie	Alum.- Bronze	Papier schwarz	Emaille weiß	Emaille schwarz	Luft
28. IX.	37°	50°	66°	43°	67°	20°
29. IX.	32°	50°	61°	40°	65°	20°

Die Untersuchungen bei wolkenlosem Nachthimmel wurden, abgesehen von den bereits erwähnten registrierten Beobachtungen im Juli 1927 im Februar 1930 vorgenommen. Die Meßanordnung war dieselbe wie oben beschrieben; lediglich wurde zur Erzielung einer höheren Genauigkeit bei der Messung der in Frage kommenden kleineren Temperaturunterschiede ein hochempfindliches Ablesemillivoltmeter benutzt. Als Oberflächenbeläge kamen zur Verwendung glänzende Aluminiumfolie, schwarzes Papier, weißes Papier, Aluminiumbronze; die Lufttemperaturen wurden wiederum mit strahlungsgeschützten Thermolementen gemessen. Bei den Versuchen am 12. II., 0<sup>00</sup> Uhr und 21<sup>35</sup> Uhr, war die Aluminiumfläche mit einer Fensterglasscheibe bedeckt.

Tiefste Temperaturen verschiedener Oberflächen bei nächtlicher Ausstrahlung nach den Versuchen vom Februar 1930.

	glänz. Alum.- Folie	Alum.- Bronze	Papier schwarz	Papier weiß	Luft
11. II.					
21 <sup>00</sup> Uhr	— 6,9°	— 9,5°	— 10,9°	— 10,3°	— 7°
24 <sup>00</sup> Uhr	— 9°	— 11,2°	— 11,8°	— 12,5°	— 9°
12. II.					
0 <sup>00</sup> Uhr	— 11,8°	— 11,6°	— 12,1°	— 12,5°	— 9,1°
21 <sup>35</sup> Uhr	— 7,9°	— 7,1°	— 8,3°	— 8°	— 4°
22 <sup>35</sup> Uhr	— 5,3°	— 7,8°	— 7,8°	— 7,3°	— 4°

Die maximalen Unterschiede zwischen glänzender Aluminiumfolie und schwarzem Papierbelag bewegen sich zwischen etwa 2° und 4°, also in der gleichen Größe wie bereits im Sommer 1927 festgestellt. Bei bewölktem Firmament oder trüber Witterung konnten merkbare Temperaturunterschiede an den einzelnen Oberflächen sowohl untereinander als auch gegen Luft weder bei Tag noch bei Nacht festgestellt werden. Es ist dies erklärlich, da zu einem nennenswerten Strahlungsaustausch mit den Wolken, deren Temperatur meist nicht sehr von der der Erdoberfläche verschieden ist, kein Anlaß vorliegt. Interessant war auch die Beobachtung, daß eine Reifschicht, die sich über Nacht gebildet hatte, auf der schwarzen Fläche bei Sonnenbestrahlung am Morgen viel rascher abschmolz als auf der weißen. Der Grund hierfür ist in der Durchlässigkeit der dünnen Reifschicht für Sonnenstrahlung zu suchen.

Zusammenfassend ergibt sich, daß die Oberflächen verschiedener dünner, auf einer Korkplatte aufgebracht Materialien, die alle ohne Strahlungseinflüsse die Temperatur der umgebenden Luft besitzen würden, bei Sonnenbestrahlung höhere Temperaturen als diejenige der Luft annehmen; die Größe dieser Übertemperatur stellt sich bei den einzelnen Abdeckmaterialien verschieden ein. Sie wurde für praktisch ruhende Luft bei glänzender Aluminiumfolie zu etwa 15 °C, bei mattem geschwärzten Papier zu etwa bis 55 °C festgestellt. Bei weißen Stoffen (weißes Leinen, weißes Papier, weiße Emaille) besitzt sie nur einige Grade mehr wie bei glänzender Aluminiumfolie; schwarze Oberflächen (geschwärztes Leinen, schwarze Emaille, Dachpappe, altes Eisenblech) verhalten sich wie schwarzes Papier. Rohes Aluminiumblech und Aluminiumbronze halten sich mit etwa 30 bis 35 °C Übertemperatur ungefähr in der Mitte der beiden extremen Materialien. Die Abdeckung eines Materials mit Fensterglas übt bei Sonnenbestrahlung keinen merklichen Einfluß aus.

Für die Strahlungsverhältnisse bei klarem Nachthimmel, also für die unsichtbaren langwelligen Strahlen, stimmen die Versuchsergebnisse qualitativ mit den von E. Schmidt für die Strahlung bei niederen Temperaturen bestimmten Strahlungszahlen überein; insbesondere zeigte sich dies, wenn man die blanke Aluminiumfolie mit einer gewöhnlichen Fensterglasscheibe bedeckte, die, wie festgestellt wurde, für Sonnenstrahlen durchlässig war. Das Thermoelement unter der mit Glas abgedeckten Aluminiumfolie zeigt etwa dieselbe Temperatur wie geschwärztes Papier. Die langwelligen Strahlen vermögen also das gewöhnliche Glas nicht zu durchdringen, sondern werden absorbiert<sup>1)</sup>. Die für die nächtliche Ausstrahlung gefunden verhältnismäßig kleinen Temperaturunterschiede (2 bis 4 °C) zwischen Luft und schwarzstrahlender Oberfläche sind jedoch vielfach ohne besondere Bedeutung.

2. Messung der von der Sonne zugestrahlten Wärmemenge und des hiervon von einer weißen Oberfläche absorbierten Teilbetrages.

Zur Bestimmung der zugestrahlten Sonnenenergie selbst und des von den verschiedenen Oberflächen absorbierten Anteils waren die bisher beschriebenen Versuche nicht geeignet. Die aufgenommene Wärmemenge fließt infolge der großen Isolierwirkung der Korkplatte nur zu einem kleinen Teil durch diese ab; ein verhältnismäßig ebenfalls geringer Betrag wird an Umgebung und Firmament abgestrahlt, der größere Teil geht durch Leitung und Konvektion an die Umgebungsluft über. Während der durch die Korkplatte abfließende Teil bei bekannter Wärmeleitfähigkeit derselben ermittelt werden kann, ist der an die Luft übergehende Betrag durch die Unsicherheit in der Annahme der jeweiligen Wärmeübergangszahl nur ungenau zu bestimmen. Es wurde deshalb hierzu eine zweckmäßigere Versuchsanordnung gewählt (Abb. 3). Eine runde Wärmeflußmeß-

platte<sup>2)</sup> von 25 cm Dmr. mit der, unter Verwendung eines zu ihr geeichten registrierenden Millivoltmeters, die pro Stunde und Quadratmeter hindurchfließende Wärmemenge bestimmt werden kann, ist auf eine mit Wasser beschickte,

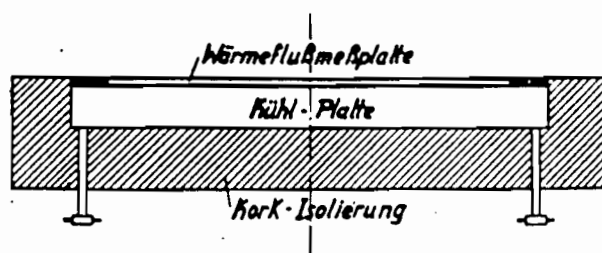


Abb. 3. Meßanordnung zur Bestimmung der Wärmeaufnahme verschiedener Oberflächen bei Sonnenbestrahlung.

ebenfalls runde Kühlplatte aufgeklebt. Letztere besteht aus einer bifilar gewickelten, in Aluminium eingegossenen Kupferrohrschlange. Die Anordnung ist in eine Korkplatte eingelassen. Die Temperatur des Kühlwassers wäre nunmehr eigentlich so zu wählen, daß die bestrahlte Oberfläche der Meßplatte dieselbe Temperatur besitzt wie die umgebende Luft. Auf die Einrichtung einer hierzu erforderlichen Apparatur zur Temperaturregelung des Kühlwassers konnte aber verzichtet werden, da es sich zeigte, daß bei Kühlung mit gewöhnlichem Leitungswasser der Temperaturunterschied von Oberfläche zu Luft nur mehr gering war und daher eine Ungenauigkeit in der Berechnung der durch Leitung und Konvektion übergehenden Wärmemenge für den vorliegenden Zweck nicht wesentlich ins Gewicht fällt.

Abb. 4 zeigt eines von den an mehreren Tagen mit dem registrierenden Millivoltmeter aufgenommenen Diagrammen, das in Abhängigkeit von der Beobachtungszeit die durch die Wärmeflußmeßplatte fließende Wärmemenge darstellt, und zwar einmal, wenn die Oberfläche mit matschwarzem Anstrich versehen, das andere Mal mit dünnem weißem Papier beklebt war. Unter günstigen Bedingungen, d. h. an nach Münchner Verhältnissen besonders klaren Tagen, wurden für senkrecht auffallende Strahlung folgende Versuchsergebnisse erzielt:

Aufnahme der schwarzen Fläche . 590—670 kcal/h · m<sup>2</sup>  
Aufnahme der weißen Fläche . . 220—270 kcal/h · m<sup>2</sup>.

Nimmt man für die verwendete schwarze Oberfläche ein Absorptionsverhältnis von 0,9 an, so erhält man für die weiße Oberfläche ein Absorptionsverhältnis  $A$  von etwa 0,35.

#### Besprechung der Versuchsergebnisse.

Der Wert der sogenannten Solarkonstanten, worunter man die Wärmemenge versteht, die von der Sonne bei senkrecht auffallenden Strahlen einem Quadratcentimeter pro Minute zugestrahlt würde, wenn die Strahlung ungeschwächt durch die Lufthülle zur Erde gelangen könnte, ist bis heute noch nicht genau bekannt<sup>3)</sup>. Er liegt zwischen 2 und

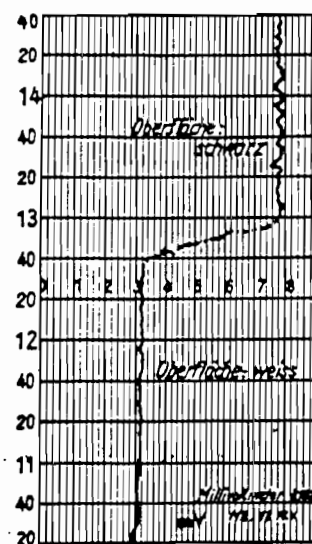


Abb. 4. Registrierstreifen einer Messung der durch eine weiße und eine schwarze Oberfläche bei Sonnenbestrahlung absorbierten Wärmemenge.

<sup>1)</sup> Über die Wirkungsweise eines Wärmeflußmessers siehe: E. Schmidt, »Die Messung von Wärmeverlusten im Betriebe«. Archiv für Wärmewirtschaft 1924, Heft 1.

<sup>2)</sup> E. Raich u. K. Schropp, »Die thermoelektrische Temperatur- und Wärmeflußmessung«. Mittell. aus dem Forschungsbereich f. Wärmeschutz e. V., München, Heft 8, 1930.

<sup>3)</sup> Vgl. H. Koenen, »Strahlungsprobleme«. VDI-Zeitschr., Bd. 75, S. 1033.

<sup>1)</sup> Diese bekannte Tatsache hat bei physikalischen Apparaten für Arbeiten im Gebiet der langen Wärmestrahlung zum Ersatz des Glases durch Steinsalz und Sylvin geführt.

8 cal/min · cm<sup>2</sup>, das sind umgerechnet auf Stunde und Quadratmeter etwa 1200 bis 1800 kcal/h · m<sup>2</sup>. Nach den vorstehenden Messungen beträgt die wirklich zur Erde kommende Wärmemenge, unter Annahme eines Absorptionsverhältnisses von 0,9 für den verwendeten schwarzen Anstrich, bis etwa 740 kcal/h · m<sup>2</sup>, so daß etwa die Hälfte der wirklich ausgesandten Strahlung auf dem Wege zur Erde absorbiert worden ist. In der Meteorologie rechnet man überschlägig mit einer Einstrahlung von 1 cal/min · cm<sup>2</sup>, d. s. 600 kcal/h · m<sup>2</sup>, eine Zahl, die mit dem hier gefundenen Wert von 590 bis 670 kcal/h · m<sup>2</sup> für schwarzen Anstrich befriedigend übereinstimmt.

Zu erklären ist nunmehr das Verhalten weißer Oberflächen unter dem Einfluß von Sonnenbestrahlung, das den von E. Schmidt<sup>1)</sup> bestimmten hohen Werten der Strahlungszahlen weißer Oberflächen und Anstriche dann widerspricht, wenn diese Versuchsergebnisse auch auf Verhältnisse übertragen werden, bei denen die Bedingungen, unter denen die Versuche angestellt worden waren, nicht mehr zutreffen. Es gelten nämlich die von E. Schmidt bestimmten Strahlungszahlen streng genommen nur für Temperaturen

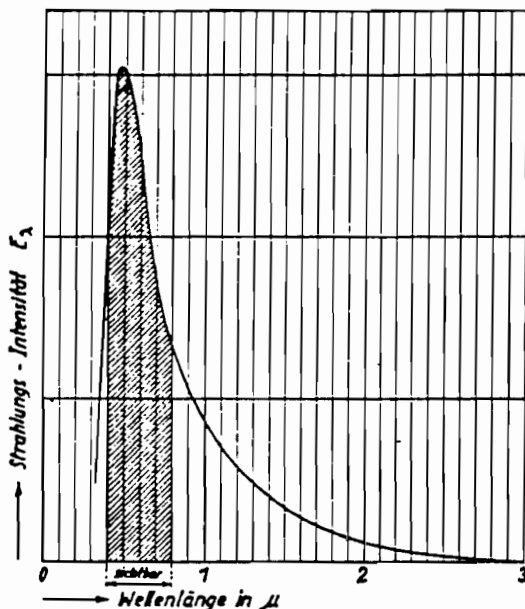


Abb. 5. Die Strahlungsintensität der Sonne in Abhängigkeit von der Wellenlänge nach Abbot und Fowle.

von 20 bis 30 °C, für die sie ermittelt wurden, dürften aber, wie der Verfasser angibt, bis etwa 200 °C benutzbar sein. Das Energiemaximum liegt bei einer Temperatur von 20 °C bei einer Wellenlänge von etwa 10 μ; Wellenlängen kleiner als 3 μ sind an der Strahlung kaum mehr beteiligt. Eine Temperatur von etwa 400 °C liefert für unser Auge den ersten Lichteindruck, es werden hierbei also auch Wellen kürzer als 0,8 μ ausgesendet. Quantitativ ist ihre Beteiligung an der Gesamtstrahlung aber noch gänzlich untergeordnet, denn wie aus der Zusammenstellung auf Seite 731 ersichtlich, liegt das Maximum der Energiekurve für diese Temperatur immer noch bei einer Wellenlänge von 4,3 μ. Erheblich anders ist die Qualität der Sonnenstrahlung. Die Energieverteilung im Normalspektrum der Sonne wurde von Abbot und Fowle<sup>2)</sup> aufgenommen und ist in Abb. 5 dargestellt. Es mag hier dahingestellt sein, inwieweit der von ihnen angegebene regelmäßige Verlauf der Emissionskurve zutreffend ist. Für die vorliegenden Betrachtungen interessiert hauptsächlich die Lage des Maximums der Emissionskurve und die Frage der Beteiligung unsichtbarer Wärmestrahlen. Über diese beiden Fragen jedenfalls dürfte die gefundene Kurve hinreichend genauen Aufschluß geben. Das Maximum liegt bei einer Wellenlänge von etwa 0,5 μ,

<sup>1)</sup> a. a. O.

<sup>2)</sup> Abbot u. Fowle, *Annals of the Astrophysical Observatory to the Smithsonian Institution* Vol. III, 1913.

also innerhalb des sichtbaren Gebietes, das sich, wie schon erwähnt, auf den Bereich von 0,4 μ bis 0,8 μ erstreckt. In diesem wird nach der angegebenen Kurve die Hälfte oder etwas mehr der gesamten Energie ausgesandt. Wellen über 3 μ sind praktisch überhaupt nicht mehr beteiligt, was auf die Absorption durch die Kohlensäure und den Wasserdampf der Atmosphäre zurückzuführen ist. Will man nun die Ergebnisse der vorstehenden Versuche für weiße Oberflächen mit den bei niederen Temperaturen hierfür gefundenen hohen Strahlungszahlen in Einklang bringen, so bleibt der Schluß, daß das Absorptionsverhältnis der weißen Oberflächen von der Qualität der zugestrahlten Energie, d. h. von der Wellenlänge der Strahlen abhängt, und zwar derart, daß es bei kurzwelliger Strahlung wesentlich kleiner ist als bei langwelliger. Oder mit anderen Worten: die Farbe einer Oberfläche, die bei langwelliger Wärmestrahlung ohne Einfluß auf die Absorption ist, wird bei kurzwelliger von ausschlaggebender Bedeutung. Die eben gezogene Folgerung steht im Einklang mit der in der Optik geltenden Anschauung, daß ein Körper beispielsweise in gelber Farbe erscheint, weil er alle anderen auftreffenden Lichtwellen absorbiert und nur die gelben reflektiert, daß ein für unser Auge schwarzer Körper alle Lichtstrahlen verschluckt und der weiße hingegen alle reflektiert. Über die Art der Änderung

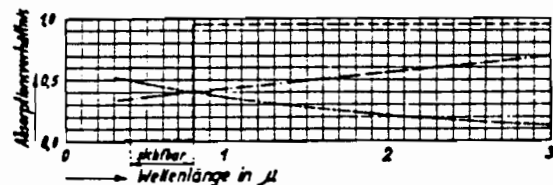


Abb. 6. Annahmen über die Abhängigkeit des Absorptionsverhältnisses weißer Oberflächen und glänzendem Aluminiumbelag von der Wellenlänge der zugestrahlten Energie.

des Absorptionsverhältnisses einer weißen Oberfläche mit der Wellenlänge sind auf Grund der bisherigen Versuche nur Vermutungen angebracht. Aus der Abb. 5 war zu entnehmen, daß etwas mehr als die Hälfte der Gesamtstrahlung vom sichtbaren Gebiet stammt. Das für eine weiße Oberfläche gefundene Absorptionsverhältnis von etwa 0,35 könnte dann so erklärt werden, daß die Strahlen im sichtbaren Gebiet fast ganz reflektiert würden (gestrichelte Kurve im Absorptionsschaubild Abb. 6); wahrscheinlicher ist jedoch ein langsamer Übergang der Kurve vom langwelligen ins kurzwellige Gebiet (in Abb. 6 strichpunktiert). Schließlich bleibt noch das Verhalten der blanken Aluminiumoberfläche zu klären. Das hierfür auf Grund der Temperaturmessungen anzunehmende Absorptionsverhältnis von fast derselben Größe wie das der weißen Fläche erscheint reichlich hoch, wenn man bedenkt, daß seine Strahlungszahl bei 20 °C nur etwa  $\frac{1}{100}$  der des absolut schwarzen Körpers beträgt. Aber auch das Verhalten von blankem Aluminium ist nicht unerklärlich, wenn man berücksichtigt, daß für blankes Platin eine Abhängigkeit des Emissionsvermögens von der fünften Potenz der absoluten Temperatur gefunden wurde, was nach früherem eine gleichzeitige Zunahme des Absorptionsverhältnisses bedeutet. Als dritte Kurve ist in Abb. 6 die für blankes Aluminium ungefähr geschätzte Abhängigkeit eingetragen (punktierte Kurve).

Genau zu bestimmen wären die Verhältnisse wahrscheinlich spektroskopisch, also durch Messung der Strahlungsenergie von Wellenlänge zu Wellenlänge dadurch, daß die Bestimmung gleichzeitig mit schwarzem, weißem und mit Aluminium belegtem Bolometerstreifen durchgeführt würde. Hieraus ergäbe sich das Absorptionsschaubild für die weiße bzw. die Aluminiumoberfläche.

Es sei noch kurz auf die Verhältnisse bei Strahlung gegen das nächtliche Firmament eingegangen. Bei dieser langwelligen Strahlung verhält sich die weiße Oberfläche gleichartig wie die schwarze. Besonders auffällig tritt das unterschiedliche Verhalten gegen verschiedene Qualität

der Strahlung bei gewöhnlichem Glas in Erscheinung. Während für Sonnenstrahlung Glas praktisch völlig durchlässig und deshalb die Beschaffenheit der durch die Glasscheibe abgedeckten Oberfläche für die Absorption und damit für die Temperaturerhöhung maßgebend ist, wurde bei Nachtstrahlung ganz in Übereinstimmung mit den von E. Schmidt gefundenen Strahlungszahlen für Glas durch die Versuche festgestellt, daß die angenommene Temperatur unabhängig von den Eigenschaften der Unterlage allein durch das Absorptionsverhältnis bzw. in diesem Fall das Emissionsvermögen des für langwellige Strahlung undurchlässigen Glases bedingt ist. Ähnlich also wie bei weißen Oberflächen das Absorptionsverhältnis, ist bei Glas das Absorptions- und Durchlaßverhältnis abhängig von der Wellenlänge der ankommenden Strahlung.

#### Folgerungen für die Praxis.

Die praktische Bedeutung der aus den Versuchen gewonnenen Erfahrungen wird am besten durch ein Beispiel belegt.

Die bei den Versuchen verwendete Korkplatte sei als Wandung eines Dachgeschoßraumes gedacht; die Raum- und Außenlufttemperatur sollen gleich, beispielsweise 20°C sein. Ein Strahlungsaustausch sei zunächst nicht vorhanden, es besitzen dann auch die äußere und die innere Plattenoberfläche diese Temperatur und eine Wärmeströmung findet mangels eines Temperaturunterschiedes nicht statt. Die Platte sei schwarz abgedeckt, z. B. mit Dachpappe, und nehme bei nunmehr erfolgter intensiver Sonnenbestrahlung gemäß den Versuchen an ihrer äußeren Oberfläche eine Temperatur von 65°C an.

In der Gleichung für den Wärmedurchgang durch eine Wand

$$q = k (t_1 - t_2)$$

bedeutet  $k$  die sogenannte Wärmedurchgangszahl;  $t_1$  und  $t_2$  die Temperaturen der Luft auf beiden Seiten der Wand.

Der Wert  $\frac{1}{k}$ , als Wärmedurchgangswiderstand bezeichnet, setzt sich aus den vom Wärmestrom zu überwindenden Einzelwiderständen zusammen nach der Gleichung

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

darin sind  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  die Wärmeübergangszahlen, also  $\frac{1}{\alpha_1}$

$\frac{1}{\alpha_2}$  die Wärmeübergangswiderstände an den beiden

Seiten von Luft zu Wand bzw. umgekehrt.  $\frac{\delta}{\lambda}$  bezeichnet den Wärmedurchlaßwiderstand; er ist um so größer, je größer die Dicke  $\delta$  und um so kleiner die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Wand ist.

In dem hier interessierenden Fall der Sonnenbestrahlung aber wird die Temperatur der äußeren Wandoberfläche sozusagen aufgedrückt; diese Temperatur muß zur Berechnung des Wärmedurchgangs auf Grund der vorstehenden Versuche jeweils angenommen werden. Die Gleichung für den Wärmedurchgangswiderstand lautet dann:

$$\frac{1}{k} = \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

und die Gleichung für den Wärmedurchgang

$$q = k (t_a - t_2)$$

$t_a$  ist die Temperatur der Außenseite der Wand, die für das Beispiel zu 65°C angenommen wurde. Ferner sollen sein:

$\delta$  = Dicke der Korkplatte = 0,05 m,

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit der Korkplatte = 0,04 kcal/h · m · °C,

$\alpha_2$  = Wärmeübergangszahl innen = 5 kcal/h · m<sup>2</sup> · °C,

demnach

$$\frac{1}{k} = \frac{0,05}{0,04} + \frac{1}{5} = 1,25 + 0,2 = 1,45.$$

$$\text{Wärmedurchgangszahl } k = \frac{1}{1,45} = 0,69 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C},$$

damit die pro Quadratmeter in der Stunde in dem Raum fließende Wärmemenge

$$q = k \cdot (t_a - t_2) = 0,69 (65 - 20) = 31 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2.$$

Für den Fall, daß die Oberfläche mit Aluminiumfolie oder mit weißem Anstrich versehen wird, ist die sich einstellende Übertemperatur mit etwa 15°C anzunehmen und es rechnet sich die eintretende Wärmemenge zu

$$q = 0,69 (35 - 20) = 10,3 \text{ kcal/h} \cdot \text{m}^2.$$

Es kommt also im ersten Fall für die übermäßige und für den Aufenthalt unzutragliche Erhöhung der Temperatur der Raumluft, die wegen ihres unangenehmen Einflusses auf den Menschen möglichst verhindert werden soll, eine dreimal größere Wärmemenge in Betracht als bei Anwendung einer strahlungsschützenden äußeren Oberfläche.

Umgekehrt läßt die Rechnung erkennen, daß in Fällen, wo es sich darum handelt, gegen Sonnenbestrahlung zu isolieren, für eine bestimmte vorgeschriebene Isolierwirkung eine wesentlich geringere Isolierstärke, für obiges Beispiel etwa nur  $\frac{1}{3}$ , notwendig wird, wenn die äußere Oberfläche mit glänzendem Aluminiumbelag oder mit weißem Anstrich versehen wird. Soll außerdem nachts eine starke Abkühlung durch Ausstrahlung vermieden werden, so ist dem Aluminiumbelag gemäß den vorliegenden Versuchsergebnissen der Vorzug vor dem weißen Anstrich zu geben; allerdings ist hier, wie schon erwähnt, die Wirkung verhältnismäßig gering.

#### Zusammenfassung.

In vorstehender Abhandlung wurde von der Messung der Temperaturen, die verschiedene technische Oberflächen bei intensiver Sonnenbestrahlung bzw. unter dem Einfluß der nächtlichen Ausstrahlung annahmen, berichtet. Die untersuchten Oberflächen waren auf einer 5 cm dicken Kork- oder Torfplatte angebracht, deren Isolierwirkung etwa der eines gut isolierten Wohnhausdaches entspricht. Bei Sonnenbestrahlung und praktisch ruhender Luft ergeben sich an schwarzen Oberflächen gegenüber der Temperatur der Umgebungsluft höchste Übertemperaturen von etwa 45 bis 55°C, an glänzender Aluminiumfolie von etwa 15°C, an weißen Oberflächen von 15 bis 20°C und an rohem Aluminiumblech und Aluminiumbronze auf Eisenblech von 30 bis 35°C. Bei nächtlicher Ausstrahlung verhielten sich weiße und schwarze Materialien erwartungsgemäß gleichartig und nahmen gegenüber der Umgebungsluft Untertemperaturen von 2 bis 4°C an, während glänzende Aluminiumfolie infolge ihres sehr geringen Ausstrahlungsvermögens bei niedrigeren Temperaturen etwa die Temperatur der Luft beibehielt.

Da die Temperatur einer von der Sonne bestrahlten Oberfläche in erster Linie von dem Absorptionsverhältnis der betreffenden Fläche abhängt und da die großen Temperaturunterschiede an weißen Materialien gegenüber schwarzen besonders aufgefallen waren, wurden die von einer weißen Oberfläche einerseits und einer mattschwarzen andererseits bei senkrechter Sonnenbestrahlung absorbierten Wärmemengen mit Hilfe einer Wärmeflußmeßplatte bestimmt. Es wurde für die weiße Oberfläche eine Wärmeaufnahme von 220 bis 270, für die schwarze eine solche von 590 bis 670 kcal/h · m<sup>2</sup> gefunden. Daraus errechnet sich für die weiße Oberfläche ein Absorptionsverhältnis von etwa 0,35. Der bemerkenswerte Unterschied im Verhalten weißer Oberflächen gegenüber langwelliger Bestrahlung im Vergleich zu ihrem Verhalten bei der verhältnismäßig kurzwelligen Sonnenbestrahlung ist dadurch zu erklären, daß das Absorptionsverhältnis weißer Oberflächen stark abhängt von der Wellenlänge der ankommenden Strahlung; es spielt bei kurzwelliger Bestrahlung die Farbe eine wesentliche Rolle.

Durch die Versuche wurde gefunden, daß den besten Schutz gegen unerwünschte Temperaturerhöhung durch

Sonnenbestrahlung glänzender Aluminiumbelag bietet, der Schutz durch weißen Anstrich aber fast ebenso wirksam ist. Es ist jedoch selbstverständlich, daß einer allgemeinen Anwendung eines weißen Anstriches oder eines Aluminiumbelages zum Schutz gegen eine unangenehme Einwirkung der Sonnenstrahlung neben anderen Gesichtspunkten technische und wirtschaftliche Hindernisse entgegenstehen können, begründet hauptsächlich durch die Frage der Beständigkeit derartiger Oberflächen. Aber es muß andererseits doch hervorgehoben werden, daß eine bewußte Anwendung in vielen Fällen möglich ist und dann auch erfolgen sollte. So kann der menschliche Aufenthalt durch entsprechenden Schutz der Dächer angenehmer gestaltet werden in Dachgeschoß- und Sommerwohnungen, in Eisenbahnwagen und Autos; es kann die oft unerwünschte, u. U. sogar gefährliche Wärmeausdehnung beispielsweise von Eisenkonstruktionen wesentlich vermindert werden. Die Verringerung der eindringenden Wärmemenge ist selbstverständlich von Wichtigkeit für Kühlhäuser- und Wagen, für Gasbehälter, Benzintanks und anderes mehr. Wenn auch schon in manchen Fällen teilweise bereits lange von weißen Anstrichen zum Schutz gegen die Sonnenbestrahlung Gebrauch gemacht wurde, so war man doch über den Wirkungsgrad und die technisch-wirtschaftliche Bedeutung eines derartigen Schutzes vielfach nicht hinreichend unterrichtet. Der Zweck der vorliegenden Arbeit war es, für die Beurteilung dieser Fragen sichere Unterlagen zu liefern und damit die bisherige mehr gefühlsmäßige Einstellung hierzu zu ersetzen.

## Betriebsergebnisse und Betriebserfahrungen mit getrennter Schlammfäulung auf der Kläranlage Essen-Frohnhausen.

Von Dr.-Ing. W. Husmann, Chemiker der Emscher-Genossenschaft, Essen.

*Beschreibung der Kläranlage Frohnhausen, Reinigungserfolg, Menge und Zusammensetzung des anfallenden Frischschlammes, Wirkung der Schraubenschaufler, Zusammensetzung des ausgefäulten Schlammes, Art, Zusammensetzung und Behandlung des Faulraumwassers, Einfluß der Schlammumwälzung, anfallende Gas-mengen, Zusammensetzung des Gases, Gehalt an Kohlensäure, Ausnutzung der Gase.*

Von den Kläranlagen, die im Einzugsgebiet der Stadt Essen liegen, behandelt die Anlage Essen-Frohnhausen das Abwasser von etwa 50 000 Einwohnern. Dieses setzt sich im wesentlichen aus häuslichen Abläufen ohne nennenswerte gewerbliche Beimengungen zusammen. Gelegentlich aus einer Färberei anfallende geringe Mengen erschöpfter Farbwässer stören den Betrieb nicht. Der Trockenwetterabfluß beträgt etwa 120 l/s. Die eine Hälfte des ankommenden Abwassers wird in einer alten Emscherbrunnenanlage entschlammte, für die andere Hälfte dient eine neuere Anlage mit getrennter Schlammfäulung. Über die Erwägungen, die zum Bau der letzteren geführt haben und über die Konstruktion im einzelnen ist schon verschiedentlich berichtet worden<sup>1)</sup>. Hier soll nur kurz das besprochen werden, was zum Verständnis des Betriebes notwendig ist.

Die Abb. 1 gibt den Teil der Frohnhauser Kläranlage mit getrennter Schlammfäulung wieder.

In der Abb. 2 ist ein Querschnitt durch den Faulraum und die Absetzräume dargestellt.

Um die Wirksamkeit der Anlage in bezug auf den Reinigungseffekt und auf die Zersetzung des Schlammes klarzustellen, wurden im Verlauf der letzten Betriebsjahre recht häufige Untersuchungen und eingehende Beobachtungen durchgeführt. Die Kontrolle wurde dabei auf die Klärwirkung der Absetzanlage, auf die mengenmäßige Bestimmung und genaue Untersuchung des zugepumpten Frisch-

schlammes und des aus dem Faulraum abgelassenen Ausfaulproduktes ausgedehnt. Weiter wurde das abgelassene Faulraumwasser untersucht, die täglich anfallende Gasmenge gemessen, die Zusammensetzung des Gases geprüft und der

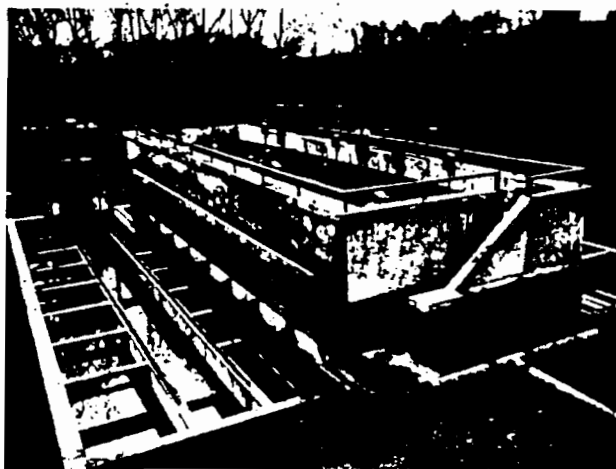


Abb. 1.

Im Vordergrund links eins der Absetzbecken. Am Ende desselben ist die verfahrbare Mammulpumpe, mit der der täglich anfallende Frischschlamm aus dem Absetzraum in den hochliegenden Faulbehälter gepumpt wird, zu erkennen. Auf dem Faulbehälter selbst sieht man die Schlammablaßrohre, dazwischen die Antriebsmotoren für die beiden Schraubenschaufler. An der rückseitigen Wand des Faulbehälters drei Kästen, die Fernschrifftthermometer enthalten, um die Temperatur im Faulraum kontrollieren zu können.

Einfluß der vertikalen Umwälzung des Schlammes mittels Schraubenschaufler auf die Gaszusammensetzung festgestellt. Hierbei interessierte es ganz besonders, ob etwa infolge des Umwälzens der Gehalt an Kohlensäure im Faulgas anstieg.

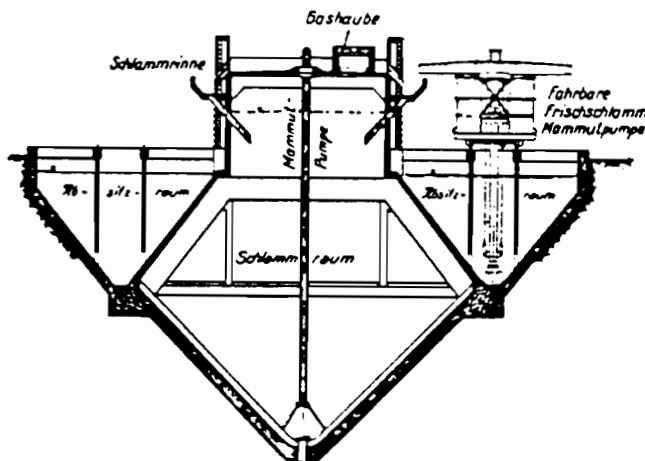


Abb. 2.

Die Absetzräume sind, wie ersichtlich, von dem 900 m<sup>3</sup> großen Faulraum getrennt. Die Wände zwischen dem Faulraum und den Absetzräumen sind verhältnismäßig dünn, sodaß der Schlammrauminhalt durch das warme Abwasser mit erwärmt wird.

Da sich die Untersuchungen über einen Zeitraum von mehreren Jahren erstrecken, können die hier mitgeteilten Ergebnisse den Anspruch auf wirkliche Mittelwerte machen. Sie lassen somit eine sichere Beurteilung der Wirkungsweise der Anlage zu.

In den zu beiden Seiten des Faulraumes liegenden Absetzräumen hält sich der Trockenwetterzufluß etwa 1 1/2 h auf. Diese Aufenthaltszeit genügt, um an allen Tagen eine befriedigende Klärwirkung zu erzielen. Im Zulauf und im Ablauf der Anlage wurde der Schlammgehalt, d. h. die Menge der absetzbaren Stoffe volumetrisch nach 1 h Absetzzeit in Imhoff-Gläsern ermittelt. Diese Werte gestatten die Klärwirkung einer Absetzanlage einigermaßen zu beurteilen. In der Zahlentafel 1 sind die Mittelwerte der letzten Jahre eingetragen.

<sup>1)</sup> PRÜG, „Eine neue Frischwasserkläranlage für getrennte Schlammfäulung mit künstlicher Beheizung“. Gesundh.-Ing. 1928, Heft 7.