

lich brauchte es die ganze Belesenheit und archivarische Ausdauer eines RUDOLF WOLF (1816-1893), der vielleicht noch mehr ein grosser Historiker der exakten Wissenschaften als ein Astronom war - man denke nur an sein mit historischen Angaben gespicktes einzigartiges *Handbuch der Astronomie, ihrer Geschichte und Litteratur* (1892) oder an seine *Biographien zur Kulturgeschichte der Schweiz* (1858-1862) -, um alle Sonnenbeobachtungen seit der Entdeckung der Flecken durch SCHEINER und GALILEI (1610) ausfindig zu machen, damit die schon von einzelnen Forschern, wie HORREBOW und SCHWABE, behauptete Periodizität der Sonnenfleckextrema bewiesen werden konnte. WOLF benutzte die entlegendsten Beobachtungen, selbst solche, die nur «en passant» erwähnt wurden, wie die von GASSENDI (*Opera omnia*, 1658) und versteckte wie in der *Neuen Himmelszeitung* von GOTTFR. KIRCH (Nürnberg 1681) oder gar in nachgelassenen Manuskripten verlorenen, wie die von DANIEL HUBER in Basel aus der Zeit von 1793-1803, womit die Arbeitsweise dieses Historikers illustriert sein mag, die man im einzelnen in seinen Zürcher *Mitteilungen über die Sonnenflecken* verfolgen kann.

In der ersten Arbeit von 1852 beschränkte sich WOLF auf die Bestimmung der Sonnenfleckextrema an Hand einer Literatur von mehreren hundert Bänden aus allen möglichen Bibliotheken Europas. Er konnte dabei aus den Werten

#### Maxima

1626,0  $\pm$  1,0 (SCHEINER)  
 1717,5  $\pm$  1,0 (ROST)  
 1816,3  $\pm$  1,0 (STARK und BODE)  
 1829,5  $\pm$  1,0 (STARK und SCHWABE)  
 1837,5  $\pm$  0,5 (STARK und SCHWABE)  
 1848,6  $\pm$  0,5 (SCHWABE und WOLF)

#### Minima

1645,0  $\pm$  1,0 (HEVELIUS)  
 1755,5  $\pm$  0,5 (ZUCCONI)  
 1810,5  $\pm$  1,0 (BODE und FRITSCH)  
 1823,2  $\pm$  0,5 (STARK und BIELA)  
 1833,6  $\pm$  0,5 (SCHWABE)  
 1844,0  $\pm$  0,5 (SCHWABE)

eine Periode von  $11^a$  111  $\pm$  0,038 herleiten.

WOLF, vom Fleckenphänomen fasziniert, hat selber an einem kleinen Refraktor ( $\phi = 8$  cm,  $f = 100$  cm) über Jahrzehnte regelmässig Sonnenbeobachtungen ausgeführt. Da die Himmelsphotographie noch nicht in Gebrauch und die zeichnerischen Reproduktionen der Flecken zu wenig genau war, um das Gesamtareal der Flecken auf der Sonnenscheibe ausmessen zu können, beschränkte sich WOLF auf eine Faustregel für die Fleckenhäufigkeit, indem er die «Relativzahl»

$$R = 10 g + f$$

einführte, wo  $g$  die Anzahl der Gruppen,  $f$  die Anzahl der Einzelflecken bedeutet. Das willkürlich gewählte Gewicht 10 für die Gruppe gegenüber dem Fleck entsprang einem sicheren Instinkt WOLFS; die späteren planimetrischen Messungen auf Sonnenscheibenphotographien bewiesen nämlich eine eindeutige Proportionalität zwischen Wolfscher Relativzahl und Fleckenareal.

Obwohl WOLF später für die Zeit von 1749 an die mittlere Relativzahl für jeden Monat und jedes Jahr zu berechnen sowie historisch zu belegen und damit jeden Zweifel an der Realität seiner Periode zu beseitigen vermochte, mass man den Sonnenfleckeneobachtungen ähnliche Bedeutung bei wie den Messreihen am Barometer oder Thermometer, welche ja ebenfalls irgend-

welche Perioden enthalten. Erst die Astrophysik der Sonne und der solarterrestrischen Erscheinungen kann das Wolfsche Phänomen genügend würdigen. Der Spott LALANDES wirkte offenbar ein volles Jahrhundert nach: noch um 1900 figurierten die Beobachtungen der Sonne bei den Sitzungsberichten der Pariser Akademie unter der Rubrik der «Météorologie cosmique».

J. O. FLECKENSTEIN

## STUDIORUM PROGRESSUS

### Wärme- und Temperaturleitung in der lebenden Haut

Von HERBERT HENSEL<sup>1</sup>, Heidelberg

Die Kenntnis der physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wärme- und Temperaturleitung in der lebenden Haut ist für die verschiedensten Zweige der Forschung und Praxis von besonderem Interesse. Vor allem sind es die Physiologie des Wärmehaushaltes, die Bioklimatologie und die Bekleidungsphysiologie, die Klinik mit ihren Fragen der Anwendung von Wärme und Kälte und nicht zuletzt die Physiologie des Temperatursinnes, die eine möglichst genaue Kenntnis der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit der lebenden Haut, des Wärmedurchgangs durch die Haut und eine quantitative Ein- sicht in die intrakutanen Temperaturverhältnisse unter den verschiedensten inneren und äusseren Bedingungen erfordern. Bei Körpern aus anorganischem Material und teilweise auch an der toten, herauspräparierten Haut sind derartige Einblicke mit Hilfe der modernen Methoden der Wärme- und Temperaturmessung unschwer zu gewinnen; an der lebenden Haut jedoch, die sich in un- versehrttem Zusammenhang mit dem übrigen Körper befindet und die nicht nur ein empfindliches Organ ist, sondern infolge ihrer Durchblutung auch stark variable Verhältnisse darbietet, lagen quantitative Messungen dieser Art, insbesondere exakte Angaben über die Wärme- und Temperaturleitfähigkeit, nur in sehr be- schränktem Maße vor.

Für die physikalische Analyse der Wärme- und Temperaturverhältnisse in der lebenden Haut ist zunächst die Kenntnis der entscheidenden Größen, also vor allem der Wärmeleitzahl  $\lambda$  und der Temperaturleitzahl  $a$  erforderlich. Ferner ist es bei derartigen Problemen unerlässlich, nicht nur Berechnungen, sondern auch direkte experimentelle Registrierungen der Temperaturverläufe in den verschiedenen Tiefen der Haut vorzunehmen, für die nach dem heutigen Stand der Dinge nur thermoelektrische Methoden in Frage kommen. Viele Fragen lassen sich nur auf diesem Wege lösen, da infolge der sehr komplizierten Verhältnisse in der lebenden Haut nicht alle Probleme einer befriedigenden rechnerischen Lösung zugänglich sind.

#### Die Wärmeleitzahl der lebenden Haut

Genauere Werte für die Wärmeleitzahl  $\lambda$ , die den Wärmestrom im stationären Zustand bestimmt, lagen bisher nur für die tote, ausgeschnittene Haut vor. Von den verschiedenen Untersuchern (LEFÈVRE<sup>2</sup>, LOMHOLT<sup>3</sup>, ROEDER<sup>4</sup>) wurden dabei Zahlen von 0,0005 bis 0,0008

<sup>1</sup> Physiologisches Institut der Universität Heidelberg.

<sup>2</sup> J. LEFÈVRE, *Chaleur animale et bioénergétique* (Paris 1911).

<sup>3</sup> S. LOMHOLT, *Strahlenther.* 35, 324 (1930).

<sup>4</sup> F. ROEDER, *Z. Biol.* 95, 164 (1934).

$\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1}$  angegeben. Dagegen standen einer genaueren Ermittlung dieser Größe an der lebenden Haut (BÜTTNER<sup>1</sup>) große methodische Schwierigkeiten im Wege.

Der Wärmestrom durch die Haut im stationären Zustand, das heißt bei konstanter Temperatur in allen Hautschichten, ergibt sich aus der Gleichung

$$\frac{Q}{t} = \lambda F \frac{d\theta}{dx}, \quad (1)$$

wobei  $Q/t$  der Wärmestrom in  $\text{cal/s}$ ,  $F$  die Größe der wärmeabgebenden Hautfläche und der Quotient  $d\theta/dx$  das Temperaturgefälle in der Haut in Richtung des Wärmestromes ist.  $\lambda$  ist die Wärmeleitzahl (Dimension:  $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1}$ ).

$$\lambda = \frac{Q}{tF} \cdot \frac{dx}{d\theta}. \quad (2)$$

In der letzten Zeit wurden mit neuer Methodik direkte experimentelle Bestimmungen von  $\lambda$  an der lebenden menschlichen Haut ausgeführt (HENSEL<sup>1</sup>). Dabei ist, wie aus der Gleichung (2) hervorgeht, die Messung des Wärmestromes im stationären Zustand über einer genau begrenzten Hautfläche und eine gleichzeitige Messung des Temperaturgefälles in der Haut notwendig.

Für die fortlaufende Messung des Wärmestromes wurde ein neues empfindliches Strömungskalorimeter für eine kleine Hautfläche entwickelt (HENSEL<sup>2</sup>), das eine Messung an beliebigen Hautstellen des gesamten Körpers erlaubt (Abb. 1).

Eine flache, dosenförmige Meßkammer mit einem sehr dünnen Feinsilberboden von  $20 \text{ cm}^2$  Fläche wird auf die zu messende Hautstelle aufgesetzt. Die Meßkammer wird von äußerst temperaturkonstantem Wasser mit konstanter Geschwindigkeit durchströmt, wobei die Temperaturdifferenz zwischen ein- und ausströmendem Wasser mit einer empfindlichen thermoelektrischen Meßanordnung fortlaufend registriert wird. Aus der Strömungsgeschwindigkeit und der Temperaturdifferenz des Kalorimeterwassers lässt sich der Wärmestrom leicht er-

mitteln. Je nach Kalorimetertemperatur kann die Größe und Richtung des Wärmestromes innerhalb weiter Grenzen variiert werden. Die gesamte Meßkammer einschließlich der Thermoelemente ist, durch einen breiten Luftspalt getrennt, vollständig von einem doppelwandigen Schutzmantel umgeben, der nur den Meßkammerboden frei lässt und der durch strömendes Wasser auf derselben Temperatur wie die Meßkammer gehalten wird, so daß keinerlei Wärmeverluste auftreten. Die Empfindlichkeit der Meßanordnung beträgt bis zu  $0,00001 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ .

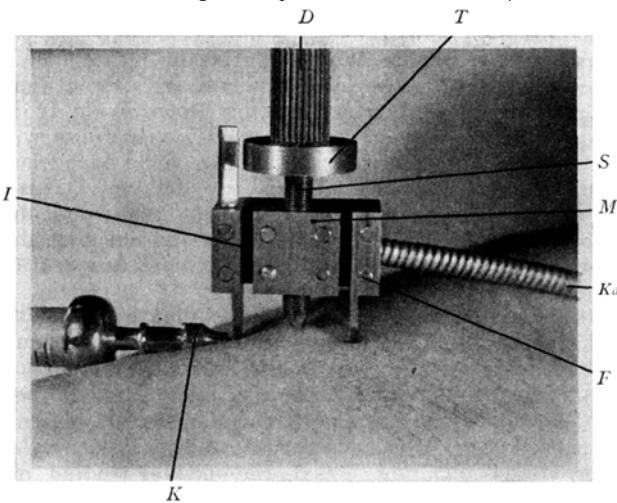


Abb. 2. Gerät zur Einführung von Thermoelementen in die Haut in genau meßbarer Tiefe.  $K$  intrakutan eingeführte Kanüle.  $I$  Isolierplatte des Mikrometers.  $F$  Metallfuße.  $M$  Mittelstück.  $S$  Mikrometerschraube.  $T$  Teiltrommel.  $D$  isolierter Drehknopf.  $Ka$  abgeschirmtes Kabel zum elektroakustischen Abhorchergerät.

Abbildung 1 zeigt die Anordnung zur Bestimmung der Wärmeleitzahl an der Haut des Oberschenkels. Man sieht das aufgesetzte Strömungskalorimeter (es ist nur der Schutzmantel sichtbar; die eigentliche Meßkammer befindet sich im Innern). – Die gleichzeitige Registrierung des intrakutanen Temperaturgefälles erfolgte mittels feinster Thermoelemente, die mit Hilfe eines besonderen Mikrometers in genau meßbarer Tiefe in die Haut eingeführt werden konnten. Im Vordergrund sind die herausgeführten Drähte der Thermoelemente sichtbar, die sich unter dem Meßkammerboden in verschiedener Tiefe der Haut befinden.

Abbildung 2 zeigt das Prinzip der Einführung und Tiefenlokalisierung der Thermoelemente.

Eine sehr feine Injektionskanüle wird flach durch die Haut durchgestochen. Auf die beiden herausstehenden Enden der Kanüle wird ein besonderes Mikrometer aufgesetzt, dessen Mikrometerschraube bis zur Berührung der Hautoberfläche heruntergedreht wird. An einer Teiltrommel kann dann die Dicke der Haut über der Kanüle abgelesen werden. Der Moment der ersten Berührung der Haut durch die Mikrometerschraube wird in einem elektroakustischen Abhorchergerät hörbar gemacht. In die Kanüle wird ein sehr feines Thermoelement aus Kupfer-Konstantan-Draht von  $0,02 \text{ mm}$  bis  $0,06 \text{ mm}$  Stärke eingeschoben. Nach Herausziehen der Kanüle liegt das Thermoelement allein in der Haut.

Ein Beispiel der Messung des Wärmestromes über dem linken Daumenballen ist in Abbildung 3 dargestellt. Man sieht die durch die spontanen Gefäßrhythmen hervorgerufenen Schwankungen des Wärmestromes, wobei die Hand bei konstanter Raumtemperatur völlig ruhig gehalten wird. Die Strichmarken bezeichnen jeweils einen einzigen Zug aus einer Zigarette, der sich in einem so-

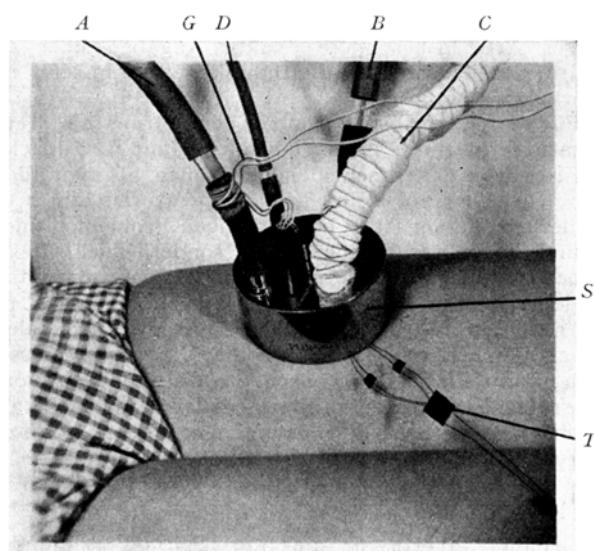


Abb. 1. Meßanordnung zur Registrierung der Wärmeleitzahl an der Haut des Oberschenkels.  $S$  Schutzmantel des Kalorimeters.  $A$  Zustrom,  $B$  Abstrom des Wassers für den Schutzmantel.  $C$  Zustrom,  $D$  Abstrom des Wassers für die Meßkammer.  $T$  herausgeführte Drähte der Thermoelemente in der Haut unter der Meßkammer.  $G$  Leitung zum Galvanometer.

<sup>1</sup> R. BÜTTNER, Strahlenther. 55, 333 (1936).

<sup>2</sup> H. HENSEL, Dtsch. Physiologentagung, Göttingen 1949.

fortigen starken Rückgang des Wärmestromes infolge der Kontraktion der Blutgefäße äußert.

Bei den Bestimmungen der Wärmeleitzahl an der lebenden Haut bekommt man, strenggenommen, keine ganz reine Größe im Sinne der üblichen physikalischen Definition, da in der lebenden Haut nicht nur *Wärmeleitung*, sondern auch *Wärmekonvektion* durch das strömende Blut stattfindet, was zur Aufstellung von Begriffen, wie «Scheinleitfähigkeit» (BÜTTNER<sup>1</sup>), «Wärmetransportfähigkeit» (ASCHOFF<sup>2</sup>), «Effective thermal conductivity» (BURTON und BAZETT<sup>3</sup>), «Physiological conductivity» (MURLIN<sup>4</sup>) usw., geführt hat. Diese Größe, die bei den oben geschilderten Versuchen direkt experimentell gemessen wird, ist die maßgebende Zahl für die *tatsächliche Wärmeleitung* in der Haut.

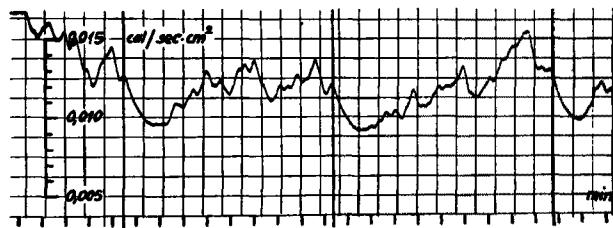


Abb. 3. Der Wärmestrom des Daumenballens bei völlig ruhiger Hand. Man sieht die spontanen Gefäßrhythmen. Bei den langen Strichmarken jeweils ein Zug aus einer Zigarette. Zeitmarken in Minuten.

Wie aus den Messungen sowie aus Versuchen von ASCHOFF und KAEMPFER<sup>5</sup> hervorgeht, hat die verschiedene *Durchblutung* der Haut einen erheblichen Einfluß auf ihre Wärme- und Temperaturleitfähigkeit, und zwar nicht nur, wie fast allgemein angenommen wird, durch Änderung der *Wärmekonvektion*, sondern vor allem auch durch Änderung des *Flüssigkeitsgehaltes* der Haut infolge der verschiedenen Blutfüllung, also eine «echte» Änderung der Wärmeleitfähigkeit. Die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit durch die wechselnde Durchblutung wäre demnach nicht nur mit einem mehr oder weniger durchströmten Kühlern, sondern vor allem auch mit einem trockenen oder nassen Gewebe zu vergleichen.

Als Beispiel seien einige der gemessenen Zahlenwerte angeführt. Haut des Oberschenkels in einer Tiefe bis 1 mm:  $\lambda = 0,0012$ , bis 2 mm:  $\lambda = 0,0023 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1}$ . Zum Vergleich: Silber:  $\lambda = 1,000$ , Wasser:  $\lambda = 0,0014$ , Luft:  $\lambda = 0,000056 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Grad}^{-1}$ .

#### Die Temperaturleitzahl der lebenden Haut

Wie schon erwähnt, gilt die Wärmeleitzahl  $\lambda$  nur für die Wärmeleitung im stationären Zustand. Bei *instationärer* Wärmestromung mit zeitlich veränderlicher Temperatur, wie es ja bei der Mehrzahl physiologisch wichtiger Fragestellungen der Fall sein dürfte, tritt an Stelle der Wärmeleitzahl die *Temperaturleitzahl*  $a$ .

Sie ergibt sich aus der Formel:

$$a = \frac{\lambda}{\varrho c},$$

wobei  $\lambda$  die Wärmeleitzahl,  $\varrho$  die Dichte und  $c$  die spezifische Wärme des Stoffes ist.

Eine Bestimmung von  $a$  aus der obigen Formel dürfte wegen der Unsicherheit der vorkommenden Größen nicht weit führen. Es gibt aber noch die Möglichkeit, die Temperaturleitzahl  $a$  direkt durch ein Meßverfahren für nichtstationäre Wärmestromungen zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden auf der Hautoberfläche annähernd rechteckige Temperatursprünge von bekannter Größe erzeugt, und zwar durch Aufsetzen wasserdurchströmter, temperaturkonstanter Metallkörper. Mittels der beschriebenen thermoelektrischen Methode wurden die durch den äußeren Temperatursprung ausgelösten Temperaturwellen in verschiedenen Tiefen der Haut registriert. Die Kurven in Abbildung 4 zeigen den gemessenen Temperaturverlauf in einer Tiefe von 0,26 mm und 1,32 mm (durchgezogene Kurven) bei einer plötzlichen Abkühlung der Hautoberfläche um  $8^\circ$ . Aus diesen Kurven wurde, ähnlich wie bei analogen Problemen in der Physik (GRÜNEISEN<sup>1</sup>, GIEBE<sup>2</sup>), die Temperaturleitzahl  $a$  dadurch bestimmt, daß der Kurvenverlauf für verschiedene Werte von  $a$  berechnet wurde und durch Probieren bestimmt, bei welchem Wert von  $a$  sich die berechnete Kurve der gemessenen am besten anschmiegt.

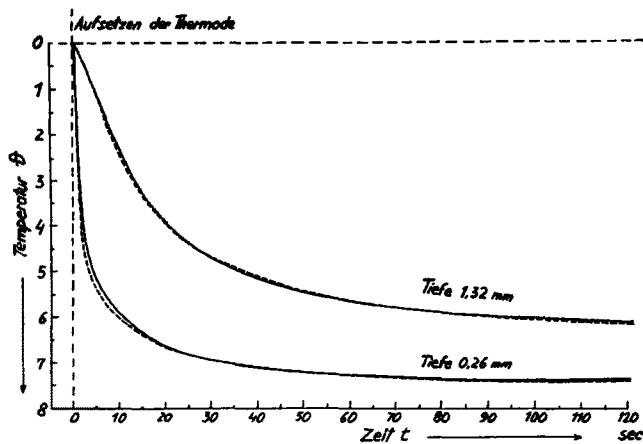


Abb. 4. Intrakutane Temperaturverlauf in 0,26 mm und 1,32 mm Tiefe bei einem rechteckigen Temperatursprung auf der Hautoberfläche von  $-8^\circ$ . Registrierte Kurven durchgezogen, berechnete Kurven gestrichelt. Die berechnete Kurve für 0,26 mm entspricht einem Wert von  $a = 0,0004$ , für 1,32 mm einem Wert von  $a = 0,0009 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Wenn die Temperatur an der Hautoberfläche ( $x = 0$ ) um den Betrag  $\vartheta_c$  springt und dann konstant bleibt, gilt, sofern die Gesamtdicke des Mediums, wie in diesem Falle, groß ist gegenüber der Tiefe  $x$ , für die Temperaturänderung  $\vartheta_x$  in der Tiefe  $x$  die Gleichung (GRÖBER<sup>3</sup>, SCHMALTZ<sup>4</sup>)

$$\vartheta_x = \vartheta_c - \vartheta_c \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2/4} at d \left( \frac{x}{\sqrt{at}} \right) = \vartheta_c - \vartheta_c \Phi \left( \frac{x}{\sqrt{at}} \right),$$

wobei  $\vartheta_x$  die Temperaturänderung in der Tiefe  $x$ ,  $\vartheta_c$  die Größe des Temperatursprunges auf der Hautoberfläche,  $x$  die Tiefe,  $t$  die Zeit und  $a$  die Temperaturleitzahl der Haut ist.  $\Phi$  ist das Gaußsche Fehlerintegral (tabelliert zum Beispiel in Hütte<sup>6</sup>).

<sup>1</sup> R. BÜTTNER, Strahlenther. 55, 333 (1936).

<sup>2</sup> E. GIEBE, Verh. dtsch. phys. Ges. 5, 60 (1903).

<sup>3</sup> GRÖBER, *Die Grundgesetze der Wärmeleitung und des Wärmeüberganges* (Berlin 1921), S. 62.

<sup>4</sup> G. SCHMALTZ, Pflügers Arch. 208, 424 (1925).

<sup>5</sup> Hütte, S. 173 (Berlin 1920).

<sup>6</sup> J. R. MURLIN, Erg. Physiol. 42, 153 (1939).

<sup>7</sup> J. ASCHOFF und F. KAEMPFER, Pflügers Arch. 249, 112 (1947).

Für die Haut wurden zum Beispiel folgende Temperaturleitzahlen gefunden: Tiefe 0,26 mm:  $a = 0,0004$ ; Tiefe 0,45 mm:  $a = 0,0006$ ; Tiefe 0,90 mm:  $a = 0,0008$  bis 0,0012; Tiefe 1,32 mm:  $a = 0,0009$  bis 0,0018  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Während in der Epidermis (Oberhaut) die Werte sehr konstant waren, zeigten sie im Corium (Lederhaut), ebenso wie die Wärmeleitzahl, starke Schwankungen mit der Durchblutungsgröße.

#### Die Temperaturbewegung in der Haut bei äußerer Temperatureinwirkung

Die genauen quantitativen Einblicke in die Temperaturverhältnisse der lebenden Haut bei äußeren Temperatureinwirkungen haben es in der neueren Zeit unter anderem ermöglicht, vor allem die *Physiologie des Temperatursinnes* auf eine sichere Basis zu stellen. Bei allen derartigen Fragestellungen handelt es sich physikalisch um ziemlich komplizierte Probleme der nichtstationären Wärmeleitung. Die nichtstationären Vorgänge der Wärmeleitung haben wegen ihres mathematischen Interesses theoretisch veranlagte Physiker, Mathematiker und auch mathematisch passionierte Physiologen vielfach angezogen. Bei der Haut kamen allerdings derartige Versuche wegen der Unsicherheit der Temperaturleitzahlen und der Kompliziertheit der Wärmeleitung über unsichere Schätzungen nicht hinaus. Sichere Einblicke lassen sich hierbei nur durch engste Verbindung von theoretisch errechneten Werten und *tatsächlichen Messungen* in der Haut gewinnen (Näheres siehe bei HENSEL<sup>1</sup>).

In der normalen Haut herrscht unter thermisch neutralen Umweltbedingungen ein Temperaturgefälle von innen nach außen. In den oberen Schichten der Haut steigt, größtenteils gesehen, die Temperatur im Durchschnitt um etwa  $0,3^\circ/\text{mm}$  an, wobei dieser Wert, je nach Körperregion, Durchblutung und Außenbedingungen, stark variieren kann. Am Unterarm wurden zum Beispiel bei Raumtemperaturen von etwa  $22^\circ$  Steilheiten des Gradienten in den oberen Hautschichten von  $0,2^\circ/\text{mm}$  bis  $0,5^\circ/\text{mm}$  gemessen (Näheres über den Gradienten siehe bei BAZETT und Mitarbeitern<sup>2</sup>).

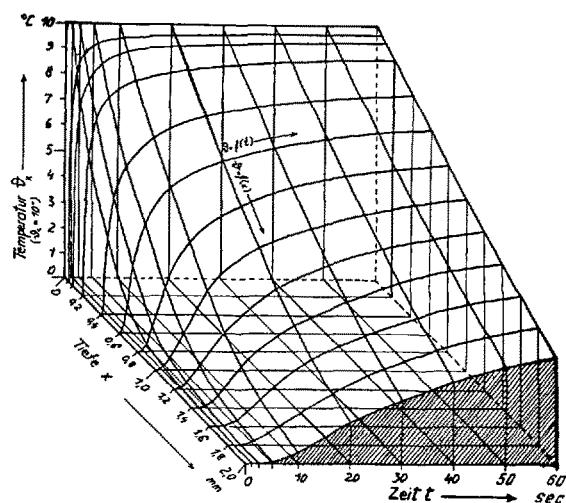


Abb. 5. Darstellung der intrakutanen Temperaturänderung als Funktion der Zeit und der Hauttiefe bei einem äußeren Temperatursprung von  $10^\circ$  bei einer Temperaturleitzahl von  $a = 0,0005 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Ein rechteckiger Temperatursprung auf der Hautoberfläche, wie er näherungsweise durch das Aufsetzen war-

mer oder kalter Körper auf die Haut gegeben ist, pflanzt sich in der weiter oben beschriebenen Weise fort. Eine solche Ausbreitung ist in dem Diagramm in Abbildung 5 dargestellt, das die durch einen Temperatursprung von  $10^\circ$  ausgelösten thermischen Vorgänge in der Haut als Funktion der Zeit und der Hauttiefe zeigt. Man sieht, daß die Intrakutantemperatur sich erst rasch, dann immer langsamer der äußeren Temperatur nähert, ohne sie aber ganz zu erreichen. Je größer die Tiefe, um so später setzt die intrakutane Temperaturänderung ein und um so geringere Beträge erreicht sie. Schon in 2 mm Tiefe bleibt die Intrakutantemperatur ganz erheblich hinter der äußeren Temperatur zurück. Aus den Kurven geht anschaulich hervor, wie schlecht äußerlich applizierte Wärme oder Kälte, etwa durch heiße oder kalte Kompressen, in die Tiefe dringt.

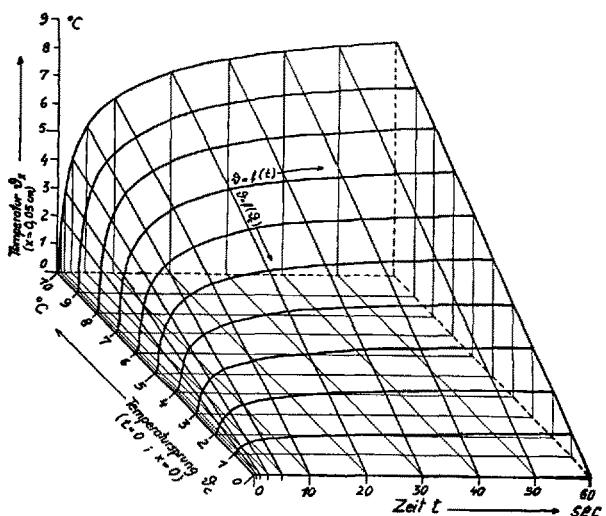


Abb. 6. Darstellung der intrakutanen Temperaturänderung in 0,5 mm Tiefe als Funktion der Zeit und der Größe des äußeren Temperatursprunges von  $0^\circ$  bis  $10^\circ$ .

Bei verschiedenen großen Temperatursprüngen auf der Hautoberfläche verhalten sich die intrakutanen Temperaturbewegungen in sehr einfacher und gesetzmäßiger Weise. Abbildung 6 zeigt die Temperaturbewegung in 0,5 mm Tiefe als Funktion der Zeit und der Größe des äußeren Temperatursprunges. Theoretisch und experimentell ergibt sich eine einfache lineare Proportionalität zwischen der Größe der intrakutanen Temperaturänderung zur Zeit  $t$  und der Größe des äußeren Temperatursprunges, die sich in dem geradlinigen Verlauf der  $\vartheta_x - \vartheta_c$ -Kurven äußert. Auch die Geschwindigkeiten der Temperaturänderungen verhalten sich linear proportional zu den äußeren Temperatursprüngen.

Bei mehreren aufeinanderfolgenden Temperatursprüngen beliebiger Größe und Richtung überlagern sich die intrakutanen Temperaturbewegungen nach dem Prinzip der einfachen Superposition der von jedem Einzelsprung ausgelösten Temperaturwellen (SCHMALTZ<sup>1</sup>). Derartige Temperaturverläufe kommen zum Beispiel vor, wenn man Untersuchungen darüber anstellt, wie groß die Differenz zweier rasch nacheinander dargebotener Temperaturen sein muß, um gerade eine Unterschiedsempfindung hervorzurufen (»Unterschiedsschwellen«). Abbildung 7 zeigt ein Versuchsbeispiel, das den Temperaturverlauf in verschiedenen Tiefen von 0 bis 0,5 mm bei zwei aufeinanderfolgenden Temperatursprüngen der Hautoberfläche – einer 2 s langen Abkühlung um  $18,2^\circ$  und einer 2 s langen Wiederaufwärmung um  $2,4^\circ$  – zeigt.

<sup>1</sup> G. SCHMALTZ, Pflügers Arch. 208, 424 (1925).

<sup>1</sup> H. HENSEL, Pflügers Arch. (im Druck).  
<sup>2</sup> H. C. BAZETT and B. McGLONE, Amer. J. Physiol. 82, 415 (1927).  
 - H. C. BAZETT, B. McGLONE, and J. R. BROCKLEHURST, J. Physiol. 69, 88 (1930). - H. C. BAZETT, Arch. Neurol. 27, 489 (1932).

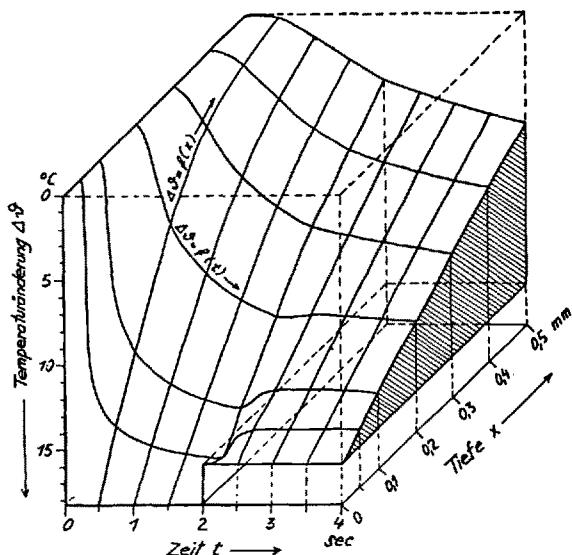


Abb. 7. Die intrakutane Temperaturbewegung bei einer plötzlichen Abkühlung um  $18,2^\circ$  von 2 s Dauer und einer anschließenden plötzlichen Aufwärmung um  $2,4^\circ$  von 2 s Dauer. Die Kurve in der Tiefe  $x = 0$  bezeichnet den doppelten Temperatursprung auf der Hautoberfläche. Darstellung des intrakutanen Temperaturverlaufes als Funktion der Zeit und der Tiefe.

Die Kurven zeigen anschaulich, wie außerordentlich verschieden die Temperaturverläufe in den einzelnen Schichten der Haut gegenüber den Änderungen der Oberfläche sein können. So macht sich schon von 0,2 mm Tiefe an der Aufwärtssprung der Temperatur nur noch in einem kleinen Knick der Geschwindigkeit einer Abwärtsbewegung bemerkbar. Daran wird die ganze Problematik der bisherigen Physiologie des Temperatursinnes deutlich, die sich ja im wesentlichen nur auf die Messung der äußeren Temperaturen gründete.

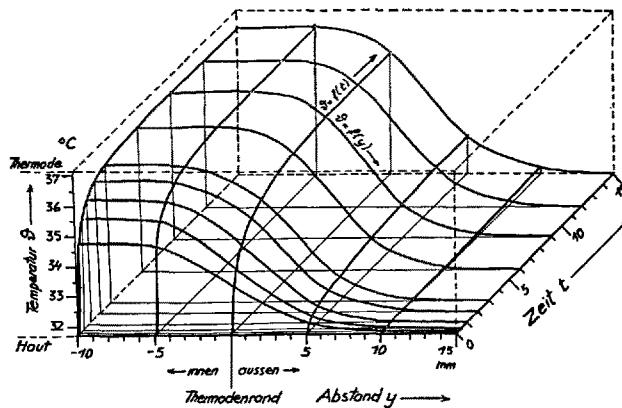


Abb. 8. Die räumliche horizontale Temperaturausbreitung in der Haut in der Umgebung eines aufgesetzten warmen Metallkörpers (Temperatursprung  $+5,4^\circ$ ). Es ist die Temperatur in 0,55 mm Tiefe als Funktion des horizontalen Abstandes vom Rand des Metallkörpers und als Funktion der Zeit dargestellt.

Die horizontale Ausbreitung von Temperaturen in der Haut, etwa in der Umgebung eines aufgesetzten Metallkörpers, ist ein Problem, das sich wohl nur durch direkte Messungen zufriedenstellend lösen lässt. Ein Beispiel ist in Abbildung 8 dargestellt, in der der intrakutane Temperaturverlauf in 0,5 mm Tiefe in der Umgebung eines aufgesetzten temperaturkonstanten Metallkörpers als Funktion des Abstandes von dessen Rand und als Funktion der Zeit dargestellt ist. Wie man sieht, strebt die

Ausbreitung der Temperatur auch in der Umgebung sehr bald einem stationären Zustand entgegen, der etwa nach 5 min und 15 mm im Umkreis erreicht ist.

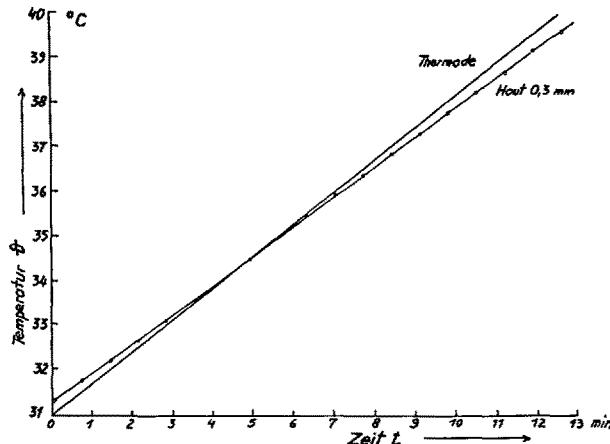


Abb. 9. Registrierte Temperaturbewegung in einer Hauttiefe von 0,3 mm bei einem linearen Temperaturanstieg der Hautoberfläche. Die Punkte stellen Meßwerte in 0,3 mm Tiefe dar.

Für beliebige Verläufe der Oberflächentemperatur ist eine allgemeine Lösung des Verlaufes der Temperaturbewegung in beliebiger Hauttiefe nicht möglich; es läßt sich jedoch eine Lösung in beliebiger Näherung dadurch erreichen, daß man die Kurve der Oberflächentemperaturänderung in eine Serie von Rechtecksprüngen zerlegt, deren einzelne Temperaturwellen sich nach Gleichung (4) berechnen lassen und durch Superposition den resultierenden Temperaturverlauf ergeben. Besonders wichtig für eine Reihe von Problemen sind äußere Temperaturänderungen von *linearem* zeitlichem Verlauf, weil bei ihnen in weiten Bereichen auch die intrakutanen Temperaturbewegungen praktisch linear verlaufen. Dabei bleibt die lineare Temperaturänderung in der Haut gegenüber der Änderung an der Oberfläche um so mehr zurück, je schneller die Oberflächentemperaturbewegung erfolgt und je tiefer die Hautschicht liegt. Die experimentelle Nachprüfung eines derartigen Verlaufs ist in Abbildung 9 gezeigt. Die durchgezogene Linie stellt eine auf der Hautoberfläche erzeugte, zeitlich lineare Temperaturänderung dar, die Punkte stellen Meßwerte in 0,55 mm Tiefe dar. Man sieht den gut linearen Verlauf der intrakutanen Temperaturbewegung, der in seiner Steilheit in gesetzmäßiger Weise gegenüber der Bewegung der Oberflächentemperatur zurückbleibt.

### Summary

New investigations on the physical laws of heat conduction in the living human skin are reported.

New methods of measurement are described for the exact experimental determination of the two important physical magnitudes in the living intact skin: the thermal conduction coefficient  $\lambda$  and the thermal diffusion coefficient  $a$ . For  $\lambda$  values were found in depths of up to 2 mm under the surface of the skin of  $0.0012$  to  $0.0023 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot {}^\circ\text{C}^{-1}$ , for  $a$  in depths up to 2 mm values of  $0.0004$  to  $0.0018 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  according to depth of the layer and cutaneous circulation.

On the basis of calculations and experimental measurements by means of a newly developed thermo-electric method, which makes possible registration of temperature at exactly measurable depths under the skin, a series of examples is cited of heat displacements resulting from the effect of certain external temperature changes.