

Aus dem  
Institut für Medizinische Balneologie und Klimatologie  
der Universität München

Vorstand: Prof. Dr. med. H. Drexel

K L I M A T I S C H E E I N F L Ü S S E  
A U F D I E B E W E G U N G S T H E R A P I E

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Humanbiologie  
an der medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von  
Angela Schuh  
aus  
München  
1983

# Inhaltsverzeichnis:

I.	Einleitung	S. 1
1.1	Mensch - Atmosphärische Umwelt	1
1.2	Ziele und Aufbau der Arbeit	3
II.	Klimaphysiologische Grundlagen	5
2.1	Thermoregulation	5
2.1.1	Wärmeproduktion	6
2.1.2	Wärmeabgabe	7
2.1.3	Wärmeausgleich	10
2.2	Wärmebilanz	12
2.3	Beziehungen zwischen Wärmebilanz und thermischen Empfinden	13
2.3.1	Die PMV-Gleichung von Fanger	14
2.3.2	Das Modell von Jendritzky/Schmidt-Kessen	17
III.	Eigene Untersuchungen, Datenerhebung	24
3.1	Versuchsanlagen	24
3.2	Versuchspersonen	29
3.3	Meßgrößen	29
3.4	Meßgeräte	31
IV.	Vergleich zwischen den Untersuchungs- ergebnissen und den Modellen von Fanger und Jendritzky/Schmidt-Kessen	32
4.1	Ergebnisse	32
4.2	Diskussion	37
V.	Beurteilung der begangenen Kurübungswege	46
VI.	Empirisches Vorhersageverfahren für das thermische Empfinden	51
6.1	Voraussetzungen	51
6.1.1	Bestimmung des Energieumsatzes	51
6.1.1.1	Literatur	52
6.1.1.2	Vergleich Literatur - Eigene Ergebnisse	56
6.1.1.3	Gleichung zur Bestimmung des Energieumsatzes	63

6.1.2	Auswahl der Variablen und Rechenverfahren	S. 66
6.2	Gleichungssystem zur Vorhersage des thermischen Empfindens: "Befindensgleichungen"	68
6.3	Diskussion	70
6.3.1	Gültigkeitsbereich	71
6.3.2	Treffsicherheit	73
6.3.3	Vergleich mit dem Modell von Jendritzky	76
6.3.4	Handhabung des Vorhersagesystems	77
6.3.4.1	Nomogramme und Tabellen	78
6.3.4.2	Vorhersagebeispiel	88
6.3.5	Erreichtes und Ausblick	90
VII.	Zusammenfassung	94
	Literaturverzeichnis	97

# KLIMATISCHE EINFLÜSSE AUF DIE BEWEGUNGSTHERAPIE

## I. Einleitung

### 1.1 Mensch - Atmosphärische Umwelt:

Der Mensch ist Zeit seines Lebens, ob er schläft oder wacht, ob er ruht oder arbeitet, beim Aufenthalt im Haus oder im Freien, den klimatischen Bedingungen seiner Umwelt ausgesetzt.

Die Medizinmeteorologie befaßt sich als interdisziplinäre Wissenschaft mit den Auswirkungen der atmosphärischen Umgebung auf den Menschen. Dabei unterscheidet man zwischen den langfristigen Einflüssen des Klimas und den kurzfristigen biotropen Wetterfaktoren. Das Wetter ist der augenblickliche Zustand, das Klima dagegen der mittlere Zustand der Atmosphäre eines bestimmten Gebietes. Das Klima eines Ortes wird nicht nur durch einzelne Faktoren wie Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit charakterisiert, sondern durch das Zusammenspiel dieser meteorologischen Parameter.

Die biotropen Wetterfaktoren werden in den atmosphärischen Wirkungskomplexen zusammengefaßt: Man unterscheidet den thermischen, aktinischen, chemischen und luftelektrischen Wirkungskomplex.

In Abbildung 1 sind die Wirkungskomplexe und ihre meteorologischen Elemente, die den menschlichen Organismus beeinflussen, zusammengestellt.

Zahlreiche Arbeiten über diese einzelnen meteorologischen Elemente und die sich daraus ergebenden physiologischen Reaktionen wurden in letzter Zeit veröffentlicht (z. B. JENDRITZKY, 1983, (38)).

Von gleich großem Interesse ist andererseits auch der Einfluß bestimmter meteorologischer Vorgänge.

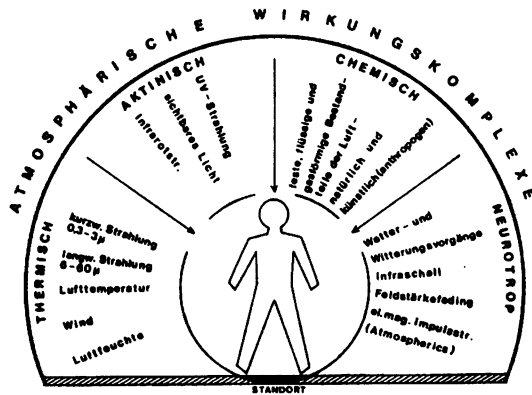


Abb. 1: Die atmosphärischen Wirkungskomplexe (SÖNNING (66)).

So hat z. B. DIRNAGL (15) die Zusammenhänge zwischen dem in Süddeutschland gut bekannten "Föhn" und den Auswirkungen auf den Menschen untersucht. Ebenso wurden Beziehungen zwischen Wettervorgängen und konkreten Krankheitsbildern betrachtet (z. B. DIRNAGL (1981, (16)), SÖNNING (1981, (65))). Von den vorhergenannten Wirkungskomplexen ist der thermische, der vor allem Lufttemperatur, Wärmestrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit umfaßt, von großer Wichtigkeit.

Schon geringe Reize, die von der Atmosphäre ausgehen, können den Organismus beeinflussen und Abläufe im menschlichen Körper verändern. Bestimmte Wetterlagen können physiologische Belastungen hervorrufen, aber gleichzeitig schreibt man dem Wetter oder Klima auch eine Heilwirkung zu. Nach AMELUNG (2) ist gerade das Ziel einer modernen ärztlichen Behandlung, nicht nur durch ein spezi-

fisches Heilmittel ein krankhaftes Organ zu erreichen, sondern vor allem durch bestimmte äußere Reize dem Körper die Möglichkeit einer vegetativ geregelten Gesamtumschaltung zu geben.

Die Möglichkeiten, unter dem Einfluß eines bestimmten Heilklimas schneller gesunden zu können, werden durch Kombination mit bewegungstherapeutischen Maßnahmen verbessert. Bei der Durchführung von Terrainkuren unter Einbeziehung von Klimaelementen kann ein Patient ein dosiertes Training durchführen, um als Prävention das Auftreten bestimmter Krankheiten zu verhindern, oder um durch Therapie und Rehabilitation seine Gesundheit wiederzuerlangen. Für diese Behandlung ist die Wahl eines geeigneten Kurortes, der über entsprechende bewegungstherapeutische und klimatische Möglichkeiten verfügt, Voraussetzung. Beispielsweise hat der heilklimatische Kurort Garmisch-Partenkirchen, in dem die für diese Arbeit notwendigen Untersuchungen stattgefunden haben, ein Netz von Kurübungswegen verschiedener Steigung und Höhenlage angelegt und beabsichtigt die Einführung von "Klimakuren" d. h. Terrainkuren mit dosierten und bekannten klimatischen Einflüssen.

## 1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit:

In dieser Untersuchung werden bereits vorhandene Systeme über die Beziehung zwischen Wärmebilanz und subjektiven Empfinden während der Begehung von Kurübungswegen überprüft und in ihrer Anwendbarkeit getestet.

Weiter soll eine für den Kurarzt einfache und anwendungsorientierte Vorhersagemöglichkeit über das thermische Empfinden eines Patienten bei der Durchführung einer Terrain- oder Klimakur entwickelt

werden. Dabei wird neben guter mittlerer Übereinstimmung eine geringe Streuung angestrebt, um eine individuelle Vorhersage zu ermöglichen.

In dem Abschnitt "Klimaphysiologische Grundlagen" werden die Thermoregulation und Wärmebilanz besprochen und die Beziehungen zwischen Wärmebilanz und subjektivem Empfinden anhand von zwei Modellen dargestellt.

Nach der Beschreibung der Datenerhebung bei eigenen Untersuchungen und dem Vergleich zwischen den Beobachtungsdaten und diesen Modellen folgt ein Abriß über die bisher getesteten Kurübungswege.

Danach schließt sich ein Kapitel an, in dem empirische Gleichungen zur Vorhersage des subjektiven thermischen Empfindens entwickelt und vorgestellt werden.

Nach der Besprechung dieses Gleichungssystems und seines Anwendungsgebietes findet sich am Schluß der Arbeit eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.

## II. Klimaphysiologische Grundlagen:

### 2.1 Thermoregulation:

Der Mensch ist ein homoiothermes Lebewesen. Er besitzt damit die Fähigkeit, seine Körperkern-temperatur auch unter wechselnden Umgebungsbedingungen und bei unterschiedlicher eigener Stoffwechselleistung, abgesehen von geringen Tagesschwankungen ( $\sim 1^{\circ}\text{C}$ ), auf konstant  $37^{\circ}\text{C}$  zu halten.

Innerhalb des Körpers ist die Temperatur nicht gleichmäßig verteilt; es existiert ein Gradient zwischen Kern und Schale (Abb. 2).

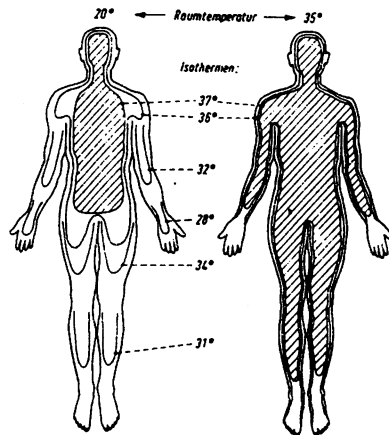


Abb. 2: Schematisierte Isothermen in der Körperschale bei  $20^{\circ}\text{C}$  und bei  $35^{\circ}\text{C}$  Raumtemperatur; schraffiert das homoiotherme Gebiet (nach ASCHOFF (3)).



Die Temperatur des Körperkerns kann durch innere Einflüsse (z. B. hormonelle Veränderungen oder Entzündungen), körperliche Arbeit und durch Umgebungsbedingungen beeinflusst werden.

Der Mensch kann Umgebungstemperaturänderungen von  $-50^{\circ}\text{C}$  bis ca.  $+100^{\circ}\text{C}$  tolerieren (ASTRAND (4)).

Die Körperkerntemperatur darf dagegen nur wenig schwanken, weil Zellstrukturen, Enzym-Systeme, chemische Reaktionen und physikalische Prozesse im Körper stark temperaturabhängig sind. So bilden sich beim Unterschreiten von  $-4^{\circ}\text{C}$  Kristalle in den salzarmen Zellen, wogegen beim Überschreiten von  $45^{\circ}\text{C}$  Kerntemperatur das Eiweiß koaguliert (MAREE (49)). Beide Vorgänge führen zum Zelltod.

Die menschliche Isothermie kann nur erreicht werden, wenn es ein Gleichgewicht zwischen der im Körper produzierten und der an die Umgebung abgegebene Wärme gibt. Dazu müssen Wärmebildung und -abgabe entsprechend den klimatischen Zuständen der Umwelt und der eigenen Tätigkeit veränderlich sein.

#### 2.1.1 Wärmeproduktion:

Der Mensch produziert Wärme durch Stoffwechselvorgänge im Körper. Dabei verbrennt der Organismus Kohlenhydrate, Fette und Eiweiß und setzt in der Hauptsache  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und die für die Lebensprozesse notwendige Energie frei. Die durch katabole Prozesse im Körper gebildete Energie tritt als äußere Arbeit, Wärme und in Form von gespeicherter Energie in Erscheinung. Die Energiespeicherung erfolgt durch den Aufbau energiereicher Verbindungen.

Größere Steigerungen des Umsatzes werden nach ASCHOFF (3) ausschließlich und allein durch Muskel-tätigkeit verursacht; bei körperlicher Arbeit,

wie sie bei der Begehung von Kurübungswegen gegeben ist, steigt deshalb der Energieumsatz an. Erfolgt kein äußerer Energieverbrauch, so wird die gesamte durch Stoffwechselprozesse freigesetzte Energie zu Körperwärme umgewandelt.

### 2.1.2 Wärmeabgabe:

Bei der Wärmeabgabe wird der Wärmestrom vom Körperinneren an die Umgebung durch die Hautoberfläche in zwei Abschnitte geteilt. Die der Stoffwechselrate entsprechend gebildete Wärme wird vom Körperkern zur Haut (innerer Wärmestrom) und von der Hautoberfläche an die Umgebung (äußerer Wärmestrom) mit mehreren zum Teil verschiedenen Mechanismen transportiert (Abb. 3).

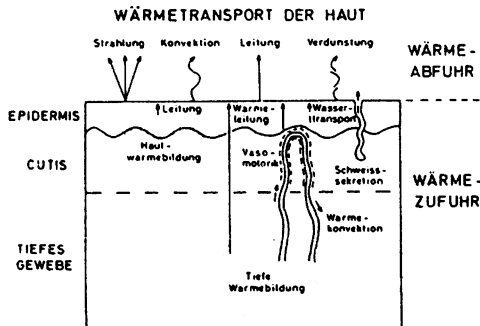


Abb. 3: Wärmetransport der Haut (nach HENSEL (30)).

Die im Körperinneren gebildete Wärme gelangt zum kleineren Teil durch Wärmeleitung in den Geweben (Konduktion), zum größeren Teil durch Konvektion mit dem Blutstrom zur Haut. Rein konduktiv wird die Wärme nur in den obersten Schichten der Epidermis geleitet; überall sonst überwiegt weitaus der konvektive Transport im Organismus.

Die an die Körperoberfläche gelangte Wärme wird an die Umgebung durch Leitung, Konvektion, Strahlung und Verdunstung abgegeben.

Die Gesamtwärmeabgabe erfolgt in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen, Körperoberfläche und Körperhaltung.

Abbildung 4 zeigt diese einzelnen Komponenten der Wärmeabgabe im Vergleich zur Wärmeproduktion und der Körperkerntemperaturen bei ansteigender Umgebungstemperatur. Die Bedingungen für den Wärmestrom durch Konduktion sind gegeben, wenn der Körper auf einer festen Unterlage steht, sitzt oder liegt, bzw. wenn die Wärme in die auf der Körperoberfläche ruhende Luftschicht abgeleitet wird. Außerdem erfolgt die Wärmeabgabe an die Luft durch Konvektion, Strahlung von der Oberfläche und Verdunstung.

Die Wärmeabgabe durch Verdunstung kann sowohl von den Schleimhäuten der Atemwege als auch in viel größerem Ausmaß von der Haut aus erfolgen. Die Wasserabgabe, die auf einer Wasserdiffusion durch die Haut oder Schleimhaut beruht, wird als perspiratio insensibilis oder extraglanduläre Wasserabgabe bezeichnet. Ihr wird die Wasserabgabe durch die Schweißdrüsen (glanduläre Wasserabgabe) gegenübergestellt.

Bei Behinderung der Abgabe des Schweißes, der auf der Hautoberfläche verdunstet und ihr somit Verdunstungswärme entzieht und damit die Haut kühlt, wird der Körper nicht mehr hinreichend abgekühlt. Die Verringerung des Temperaturgefälles zwischen Kern und Hautoberfläche erfordert so eine verstärkte Hautdurchblutung, die mit einer deutlichen Zunahme der Herzfrequenz verbunden ist. So ergibt sich eine Belastung des Kreislaufes, wenn die Schweißabgabe bei hohen Außentemperaturen behindert wird. Die Wasserverdampfung von der Haut aus

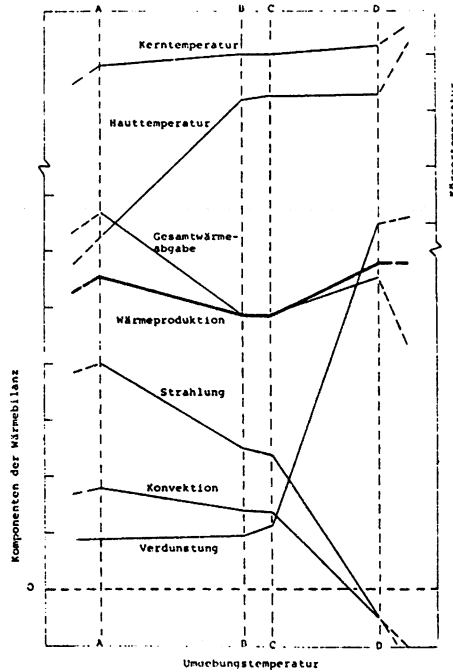


Abb. 4: Komponenten der Wärmeabgabe, Wärmeproduktion und Körpertemperaturen bei steigender Umgebungstemperatur.

AB = Regulation bei Kälte, BC = metabolische Neutralität, CD = Regulation bei Wärme (aus JENDRITZKY (37), unter Verwendung von ASCHOFF (3) und MOUNT (53) ).

ist für die Wärmeabgabe ein entscheidender Vorgang, denn bei Umgebungstemperaturen die höher sind als die Körpertemperatur, kann Wärme nur noch auf evaporative Weise abgegeben werden (vgl. Abb. 4).

### 2.1.3 Wärmeausgleich:

Die Kontrolle der Körperkerntemperatur und der Ausgleich zwischen Auskühlung und Überwärmung ist die Aufgabe der Temperaturregulation. Der Wärmeausgleich wird durch mehrere Vorgänge ermöglicht, die teils willkürlich, teils autonom ablaufen. Das Thermoregulationszentrum, das seinen Sitz im Hypothalamus hat, erhält seine Informationen von den Thermorezeptoren. Es gibt zwei Gruppen von Temperaturfühlern. Eine Gruppe befindet sich direkt im Temperaturregelzentrum im Zwischenhirn. Die Temperatur des Blutes, das durch diesen Hirnabschnitt fließt, entspricht der Körperkerntemperatur. Sie wird von den Temperaturfühlern bewertet. Die zweite Gruppe sind die Warm- und Kaltrezeptoren der Haut. Diese Rezeptoren melden Erwärmung und Abkühlung der Körperoberfläche auf nervösem Wege direkt an das Temperaturregelzentrum. So ist es möglich, ohne Änderung der Kerntemperatur Maßnahmen gegen Änderungen der Umgebungstemperatur einzuleiten. Beide Gruppen von Temperaturfühlern sprechen auf Erwärmung und Abkühlung an. Regulationen gegen Abkühlung werden hauptsächlich von den Thermorezeptoren in der Haut, die Regulation gegen Überwärmung vorwiegend von inneren Temperaturfühlern ausgelöst. Den Wärmetransport innerhalb des Körpers und vom Körperkern zur Haut übernimmt das Blut. Der Organismus versucht mit Hilfe der Durchblutung den Wärmestrom den jeweiligen Außenbedingungen anzupassen. In kalter Umgebung leiten Nervenimpulse, die von den Kälterezeptoren abgegeben werden, die

Vasokonstriktion in Blutgefäßen der Haut ein. So wird der Blutstrom und damit der Wärmefluß zur Hautoberfläche vermindert. Um konstante Kerntemperatur aufrechtzuerhalten, wird der Blutstrom zuerst in den Extremitäten verringert. Wenn alle Gefäße der Haut enggestellt sind, gibt es nur noch den Wärmeverlust durch Leitung durch die Haut an die Oberfläche. In warmer Umgebung tritt Vasodilatation ein, der Blutstrom durch die Haut verstärkt sich und die Wärme kann nach außen abgegeben werden.

Bei der autonomen Temperaturregulation werden die äußeren und inneren Signale im Thermoregulationszentrum gesammelt; auf Grund einer komplexen Bewertung wird so die Wärmeregulation, hauptsächlich durch Kältezittern der Muskulatur, variable Durchblutung der Haut und Schweißproduktion in Gang gesetzt.

Zusätzlich wird die Verhaltensregelung durch thermische Komfort- oder Diskomfortzustände aktiviert und läuft über die Willkürmotorik ab. Der Mensch versucht dabei beispielsweise über Willkürbewegungen, Kleidung und Körperhaltung die Temperaturregulierung zu beeinflussen.

HENSEL stellt die Vorgänge der Wärmeregulation in Abb. 5 dar, wobei er auch technische Einflüsse wie Heizung oder Air-conditioning zur Thermoregulation des Menschen im weitesten Sinne einbezieht.

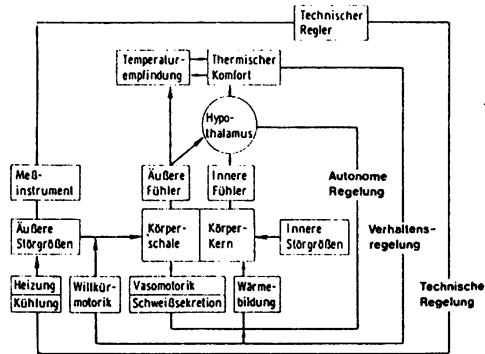


Abb. 5: Schema der menschlichen Temperaturregelung (nach HENSEL (30)).

## 2.2 Wärmebilanz:

Das Ergebnis der Thermoregulation kann durch die Wärmebilanz beschrieben werden. Damit der Mensch seine konstante Körperkerntemperatur aufrechterhalten kann, muß die Wärmebilanz im stationären Zustand ausgeglichen sein, d. h. Wärmeproduktion und Wärmeabgabe müssen gleich sein. Gerade der Vorgang der Wärmeabgabe wird durch meteorologische Gegebenheiten beträchtlich modifiziert.

Quantitativ werden die Vorgänge der Wärmebildung- und abgabe durch die Wärmebilanzgleichung erfaßt, die es erlaubt, die Wärmebilanz eines Menschen aus seiner inneren Wärmeproduktion (Aktivität), seiner Bekleidung und den meteorologischen Variablen Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung, Dampfdruck und relative Windgeschwindigkeit zu berechnen.

Die Wärmebilanzgleichung sagt aus, daß die innere Wärmeproduktion  $H$  minus dem Wärmeverlust durch die Atmung ( $E_{re}+L$ ), die Verdunstung ( $E_d + E_{sw}$ ) und durch Strahlung und Konvektion ( $R+C$ ) im ausgeglichenen Zustand Null ergibt:

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L - R - C = 0$$

### 2.3 Beziehungen zwischen Wärmebilanz und subjektivem Empfinden:

Höhere Anforderungen an die Thermoregulation, die mit einer stärkeren Inanspruchnahme aufwendiger Körperfunktionen (z. B. Kreislauf) verbunden sind, bedeuten eine Belastung für den Organismus.

Wird die menschliche Wärmeproduktion zu groß, bzw. die Wärmeabgabe an die Umgebung behindert, so empfindet man schon subjektives Unbehagen, selbst wenn die Körperkerntemperatur noch nicht erhöht ist.

Eine ausgeglichene Wärmebilanz ohne übermäßige Beanspruchung der Thermoregulation ist also eine unerläßliche Voraussetzung, daß sich der Mensch im "thermischen Komfort" befindet.

"Thermischer Komfort" heißt, daß man sich in seiner Umgebung behaglich fühlt, d. h. daß man mit den thermischen Bedingungen seiner Umwelt zufrieden ist.

Um das subjektive Empfinden einordnen zu können, benutzt man die psycho-physische ASHRAE-Skala (vgl. Kap. 3.3). So gelang es 1972 FANGER (22) und 1981 JENDRITZKY und SCHMIDT-KESSEN (40), Vorhersagemodelle für den Skalenwert des Empfindens, genannt PMV (= predicted mean vote; frei übersetzt: mittlere vorhergesagte Befindensaussage) zu finden, die



neben der Aktivität und der Bekleidung nur die Kenntnis der meteorologischen Variablen Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung, Dampfdruck und Windgeschwindigkeit benötigt.

### 2.3.1 Die PMV-Gleichung von FANGER

FANGER (22) hat eine Beziehung zwischen den Ergebnissen der Wärmebilanzgleichung und dem skalierten Wert des subjektiven thermischen Empfindens PMV hergestellt.

Dabei wird unter der Voraussetzung, daß unter Komfortbedingungen ein linearer Zusammenhang zwischen der mittleren Hauttemperatur bzw. der Schweißsekretion und der inneren Wärmeproduktion besteht, aus den meteorologischen Größen Lufttemperatur, Dampfdruck, mittlere Strahlungstemperatur, Windgeschwindigkeit und den nichtmeteorologischen Einflußgrößen Bekleidung und Aktivität der Empfindenswert PMV bestimmt.

Er gibt an, welche Einschätzung das thermische Milieu im Mittel durch ein großes Kollektiv unter Innenraumbedingungen erfährt:

$$PMV = f(M, A_{DU}) \cdot \left[ H - (E_d + E_{sw} + E_{re} + L + R + C) \right] \quad (1)$$

Dabei gilt:

- 1) PMV = predicted mean vote = Skalenwert des thermischen Empfindens.
- 2) H = innere Wärmeproduktion des menschlichen Körpers.

Nach Fanger ist  $H = M(1-\eta)$  ; (kcal/hr)

Wobei M = metabolische Rate

und  $\eta$  = äußere mechanische Effektivität ;  
Fanger führt die Bezeichnung für das Verhältnis von äußerer mechanischer Arbeit zu metabolischer Rate (= Wirkungsgrad) ein.

Bezogen auf die DUBOIS-Körperoberfläche (20):

$A_{DU} = 0,203 \cdot \text{Gewicht}^{0,425} \cdot \text{Größe}^{0,725}$  ; ( $m^2$ )  
erhält man:  $H/A_{DU} = (M/A_{DU}) \cdot (1 - \eta)$  ; ( $kcal/hr \cdot m^2$ )

Für die bei verschiedenen Gehgeschwindigkeiten entstehenden Werte von der "spezifischen metabolischen Rate"  $M/A_{DU}$  und  $\eta$  hat Fanger ausführliche Tabellen zusammengestellt.

- 3)  $E_d$  = Wärmeverlust durch Wasserdampfdiffusion durch die Haut.

Die Größe der Diffusion pro Einheitsfläche ist zur Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck bei Hauttemperatur  $p_s$  und dem Wasserdampfdruck  $p_a$  der Umgebungsluft proportional.

So ergibt sich folgende Gleichung:

$$E_d = 0,35 A_{DU} \cdot (1,92 t_s - 25,3 - p_a) ; (kcal/hr)$$

wobei  $t_s$  die mittlere Hauttemperatur ist und unter der Voraussetzung des thermischen Komforts gilt:

$$t_s = 35,7 - 0,032 M/A_{DU} (1 - \eta) ; (^{\circ}C)$$

- 4)  $E_{sw}$  = der Wärmeverlust durch Schweißverdunstung von der Hautoberfläche.

Fanger macht den Wärmeverlust durch Schweißverdunstung nur von der inneren Wärmeproduktion  $H$  abhängig und stellt für Menschen, die sich in thermischen Komfort befinden die Beziehung auf:

$$E_{sw} = 0,42 A_{DU} \cdot (H/A_{DU} - 50) ; (kcal/hr)$$

- 5)  $E_{re}$  = Verlust an latenter Atmungswärme.

$E_{re}$  hängt nach Fanger von der metabolischen Rate  $M$  und dem Wasserdampfdruck der umgebenden Luft  $p_a$  ab:

$$E_{re} = 0,0023 M \cdot (44 - p_a) ; (kcal/hr)$$

wobei  $p_a$  in mmHg angegeben wird.

- 6) L = Verlust fühlbarer Wärme bei der Atmung.  
Der Verlust der fühlbaren Wärme bei der Atmung ist der Temperaturdifferenz zwischen aus- und eingeatmeter Luft proportional. Fanger legte die Temperatur der ausgeatmeten Luft mit  $34^{\circ}\text{C}$  fest und fand:  
$$L = 0,0014 M \cdot (34 - t_a) ; (\text{kcal/hr})$$

- 7) R = Wärmeverlust durch Strahlung.  
Der Wärmeverlust durch Strahlung kann durch das von Fanger abgewandelte Stefan-Boltzmann Gesetz beschrieben werden:  
$$R = 3,4 \cdot 10^{-8} \cdot A_{\text{DU}} \cdot f_{\text{cl}} \cdot \left[ (t_{\text{cl}} + 273)^4 - (t_{\text{mrt}} + 273)^4 \right] ; (\text{kcal/hr})$$
  
Dabei ist  $t_{\text{cl}}$  die Kleidungstemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ).  
Sie wird durch ein Iterationsverfahren aus folgender Gleichung berechnet:  
$$t_{\text{cl}} = 35,7 - 0,032(M/A_{\text{DU}}) \cdot (1 - \gamma) - 0,18 I_{\text{cl}} \cdot \left[ 3,4 \cdot 10^{-8} f_{\text{cl}} \cdot \left[ (t_{\text{cl}} + 273)^4 - (t_{\text{mrt}} + 273)^4 \right] + f_{\text{cl}} \cdot h_c \cdot (t_{\text{cl}} - t_a) \right]$$
  
In dieser Gleichung geht  $I_{\text{cl}}$  als Größe für den thermischen Widerstand (total) von der Haut zur äußeren Oberfläche des bekleideten Körpers ein.  $I_{\text{cl}}$  wird in "clo - Einheiten" angegeben und ist Tabellen von Fanger zu entnehmen.  
Weiter sind für die Berechnung von  $t_{\text{cl}}$  die mittlere Strahlungstemperatur  $t_{\text{mrt}}$ , die aus gemessenen Strahlungswerten berechnet werden kann, und der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $h_c$  nötig.  $h_c$  ist wiederum abhängig von der Kleidungstemperatur, der Umgebungstemperatur und der relativen Windgeschwindigkeit.  
Schließlich ist  $f_{\text{cl}}$  das Verhältnis der Oberfläche des bekleideten Körpers zur Oberfläche des unbedeckten Körpers und ist einer Tabelle von Fanger zu entnehmen.

8) C = der Wärmeverlust durch Konvektion.

Der Wärmeverlust durch Konvektion ist proportional zur Differenz von Kleidungstemperatur und Umgebungstemperatur:

$$C = A_{DU} \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) ; \text{ (kcal/hr)}$$

Setzt man alle Terme in obige Gleichung (1) ein, so erhält man für das mittlere subjektive Empfinden:

$$PMV = (0,352e^{-0,042(M/A_{DU})} + 0,032) \cdot$$

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{M}{A_{DU}} (1-\gamma) - 0,35 \cdot \left[ 43 - 0,061 \frac{M}{A_{DU}} (1-\gamma) - p_a \right] \right. \\ & - 0,42 \cdot \left[ \frac{M}{A_{DU}} (1-\gamma) - 50 \right] - 0,0023 \frac{M}{A_{DU}} \cdot (44 - p_a) \\ & - 0,0014 \frac{M}{A_{DU}} (34 - t_a) - \\ & - 3,4 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot \left[ (t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4 \right] \\ & \left. - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \right] \quad (2) \end{aligned}$$

Da diese Gleichung ziemlich umfangreich und komplex und deshalb schwierig zu handhaben ist, kann sie nur mit Hilfe von EDV-Anlagen ausgewertet werden (FANGER (23)). FANGER (22) hat sein Modell nur für Innenräume quantitativ erprobt.

### 2.3.2 Das Modell von JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN:

Für die Übertragung von Innenräumen in Freilandverhältnisse war es nötig, vor allem die im Freien sehr unterschiedlichen Strahlungsflüsse zu berechnen, bzw.

zu messen oder aus verfügbaren meteorologischen Parametern abzuschätzen.

Der Mensch ist beim Aufenthalt im Freien verschiedenen Strahlungsflüssen ausgesetzt. Es treffen ihn von oben die direkte und die diffuse Sonnenstrahlung und die atmosphärische Gegenstrahlung. Von allen Seiten wirken zusätzlich auf ihn die von der Umgebung reflektierten Anteile der Sonnenstrahlung und die langwellige Ausstrahlung der Umgebung ein. Abbildung 6 zeigt die Strahlungsgrößen des menschlichen Wärmehaushalts.

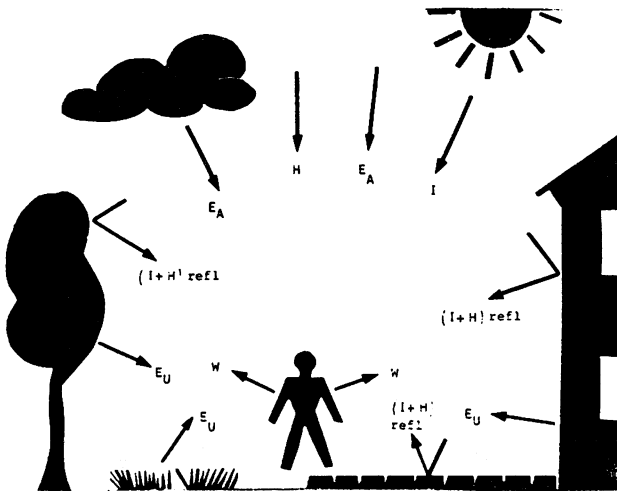


Abb. 6: Die Strahlungsgrößen des menschlichen Wärmehaushalts. Dabei ist  $I$  = direkte Sonnenstrahlung,  $H$  = diffuse Sonnenstrahlung,  $(I+H) \text{ refl.}$  = reflektierte Anteile von  $I$  und  $H$ ,  $E_a$  = atmosphärische Gegenstrahlung,  $E_u$  = langwellige Ausstrahlung der Umgebung und  $W$  = Strahlung der Kleidung (nach JENDRITZKY/NÜBLER (39)).

Diese Strahlungsflüsse können durch die Einführung der bereits erwähnten mittleren Strahlungstemperatur quantitativ zusammengefaßt und auf die besonderen Verhältnisse des Menschen bezogen werden (JENDRITZKY (36)).

Zur Anwendung der FANGER-Gleichung im Freien müssen also die Strahlungseigenschaften der Umgebung bekannt oder abzuschätzen sein.

So versuchten JENDRITZKY und SÖNNING 1979 mit ihrem "Klimamichelmodell" (41) die Ergebnisse von FANGER auf Freiland zu übertragen.

1981 stellten dann JENDRITZKY und SCHMIDT-KESSEN in ihrer Veröffentlichung "Bewegungstherapie im heilklimatischen Kurort" (40) ein auf FANGER's (22) Modell basierendes einfaches Verfahren zur PMV-Berechnung vor. Es soll z. B. einem Kurarzt die Möglichkeit geben, auf Grund leicht erhältlicher meteorologische Eingangsgrößen und mit Hilfe weniger Tabellen und Diagramme den thermischen Reizwert (PMV) abzuschätzen, der bei einem Patienten auf einem bestimmten Kurübungsweg zu erwarten ist. Dazu werden sechs Eingangsgrößen verwendet: Körperliche Aktivität, Isolationswerte der Bekleidung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Bewölkung und Sonnenhöhe.

Die Abschätzung des zu erwartenden PMV-Wertes geht wie folgt vor sich:

Das Schrittempo des Patienten und der Verlauf des Weges sind bekannt. Deshalb kann die Aktivität aus der nach FANGER abgewandelten Tabelle 1 entnommen werden.

Die Aktivität berechnen JENDRITZKY und SCHMIDT-KESSEN in MET (  $1 \text{ MET} = 58 \text{ W/m}^2$  ). Der Metabolismus einer sitzenden und sich im thermischen Komfort befindlichen Durchschnittsperson wird nach GAGGE ( 26 ) ein MET genannt.

Um die Beeinflussung der Wärmeabgabe des Patienten durch die Bekleidung bestimmen zu können, wird die Wärmeisolation der Bekleidung  $I_{cl}$  aus Tabelle 2 entnommen. Dabei wird die Einheit "clo" von GAGGE 1941 so definiert, daß eine sitzende Person, die sich in einem normal ventilierten Raum mit  $21^{\circ}\text{C}$  und einer relativen Feuchte  $< 50\%$  in thermischen Komfort befindet, eine Kleidungs-isolation von 1 clo hat. Ausgedrückt als Wärmedurchgangskoeffizient gilt nach PEIRCE (56):  
 $1 \text{ clo} = 0,18 \text{ }^{\circ}\text{Cm}^2/\text{hr/kcal} = 0,16 \text{ }^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ .

Aktivität (abgewandelt nach Fanger)				
Aktivität	Wärme- pro- duktion		Mech. Wirkungs- grad	Rel. Wind- geschwin- digkeit
	$\text{Wm}^{-2}$	MET		$\text{ms}^{-1}$
Schlafen	41	0.7	0	0
Ruhen	47	0.8	0	0
Sitzen, ruhig	58	1.0	0	0
Stehen, entspannt	79	1.2	0	0
<b>Gehen</b>				
in der Ebene	km/h			
	3.2	116	2.0	0
	4.0	140	2.4	0
	4.8	150	2.6	0
	5.6	185	3.2	0
	6.4	220	3.8	0
	8.0	340	5.7	0
<b>aufwärts</b>				
%-Steigung				
5	1.6	140	2.4	0.07
5	3.2	175	3.0	0.10
5	4.8	230	4.0	0.11
15	1.6	170	2.9	0.15
15	3.2	270	4.7	0.19
25	1.6	210	3.6	0.20

Tab. 1: Charakteristische Werte für die Wärme-  
 produktion in  $\text{W/m}^2$  und die dazugehören-  
 den MET-Werte (nach JENDRITZKY/SCHMIDT-  
 KESSEN (40)).

### Wärmeisolation der Bekleidung

(1 clo  $\approx 0.155^\circ\text{C m}^2\text{W}^{-1}$ )

	I <sub>cl</sub> (clo)
Nackt	0.0
Shorts	0.1
Freizeitbekleidung mit Shorts	0.3-0.4
Leichte Sommerkleidung	0.5-0.6
Korrektor Straßenanzug	1.0
Anzug und Baumwollmantel	1.5
Schwerer Anzug und Wintermantel	2.0
Polarkleidung	3.0-4.0

Tab. 2: Charakteristische Werte der Wärmeisolation der Bekleidung in clo (nach JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (40)).

Sind dem Kurarzt außerdem noch Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Bewölkung bekannt, so kann er aus Abb. 7 zwei Koeffizienten a und b entnehmen:

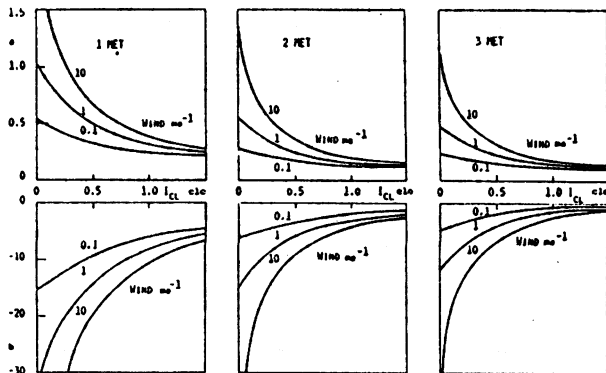


Abb. 7: Koeffizienten der Gleichung  $PMV = a \cdot t_a + b$ , der Beziehung von Empfinden PMV und der Luft-



temperatur  $t_a$  in Abhängigkeit von der Wärmeisolation der Bekleidung  $I_{cl}$  in clo-Einheiten, mit der Windgeschwindigkeit  $v$  als Parameter und drei Aktivitätsstufen in MET-Einheiten (nach JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (40)).

Man berechnet sodann unter der Annahme daß Luft- und mittlere Strahlungstemperatur gleich sind, den PMV-Wert mit der linearen Gleichung:

$PMV = a \cdot t_a + b$ , wobei  $t_a$  die Lufttemperatur in  $^{\circ}C$  ist. Unter Freilandverhältnissen muß dieser PMV-Wert aber noch um den Effekt der Abweichung der mittleren Strahlungstemperatur von der Lufttemperatur korrigiert werden.

Dazu läßt sich zunächst auf der Ordinate von Abb. 8 die Änderung des PMV-Wertes  $\Delta PMV$  ablesen, wenn die mittlere Strahlungstemperatur um 1 K variiert.

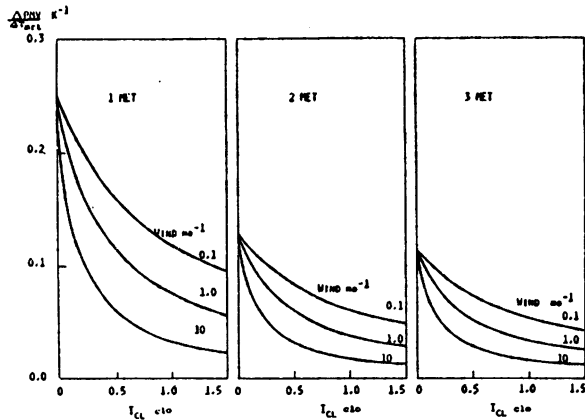


Abb. 8: Die Änderung  $\Delta PMV$  des Behaglichkeitsempfindens bei Änderung der mittleren Strahlungstemperatur  $\Delta t_{mrt} = 1K$  (nach JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (40)).

Die Abweichungen der mittleren Strahlungstemperatur  $\Delta t_{\text{mrt}}$  von der Lufttemperatur für die tatsächlichen Strahlungsbedingungen entnimmt man dann Abb. 9. Hier zeigt die Abszisse die Sonnenhöhe  $\gamma$ .

Man muß anschließend den Wert  $\Delta \text{PMV}$  korrigieren und dieses Ergebnis zu PMV addieren und erhält damit den gesuchten Schätzwert PMV, der die zu erwartende Behaglichkeit angibt.

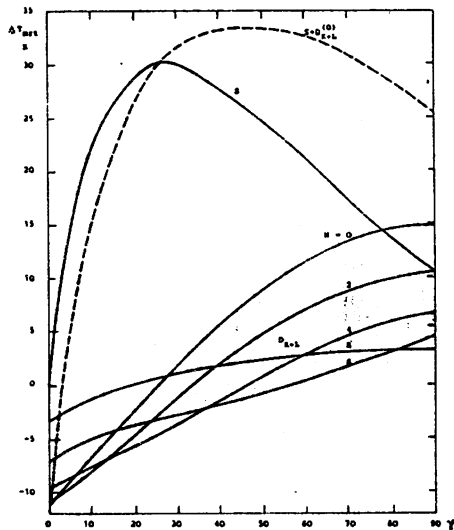


Abb. 9: Abweichung  $\Delta t_{\text{mrt}}$  der mittleren Strahlungstemperatur von der Lufttemperatur über einer Rasenfläche als Funktion der Sonnenhöhe  $\gamma$  für niedrige Bewölkung  $N$  (Summe der diffusen kurz- und langwelligen Strahlungskomponenten  $D_{k+1}$  im Bereich der punktierten Fläche). Zusatzkomponente  $S$  durch direkte Sonnenstrahlung. Gestrichelt  $S + D_{k+1}^{(o)}$ , d. h.  $\Delta t_{\text{mrt}}$  bei wolkenlosem Himmel (nach JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (40)).

### III. Eigene Untersuchungen. Datenerhebung

#### 3.1 Versuchsanlage:

Die experimentelle Grundlage der vorliegenden Arbeit war die Begehung von vier Kurübungswegen in Garmisch-Partenkirchen und die gleichzeitige Erfassung meteorologischer Größen und Befindensparameter.

Unsere Untersuchungen wurden im Oktober/November 1981 und August/September 1982 durchgeführt. Die somit auf Sommer und Herbst fallenden Untersuchungszeiträume umfaßten Wetterlagen mit einer weiten Spanne an meteorologischen Meßwerten. Es wurden vier verschiedene Wege begangen, die hinsichtlich Steigung und Höhenlage nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewählt wurden, um eine allmähliche Steigerung der Anforderungen an den Patienten zu ermöglichen. Auf allen Kurwegen ist dabei eine festgelegte Schrittfolge - je nach Schwierigkeitsgrad 60 oder 80 Schritte/min (1,6 bzw. 2,4 km/h) - vorgegeben worden.

Bei den vier Teststrecken handelte es sich um je ein Teilstück des Kramer-Plateauweges ( 800 m über NN), der Strecke von Hausberg zum Kreuzeck (1300 m über NN) sowie die Wege rund um den Riessersee (800 m über NN) und vom Kreuzeck zur Hochalm (1650 m über NN). Der Kramer-Plateauweg kann als leichteste Stufe angesehen werden. Er weist einen weitgehend ebenen Verlauf auf (Abb. 10).

Die Strecke rund um den Riessersee stellt schon etwas höhere Anforderungen an den Probanden (Abb. 11).

Der Weg vom Kreuzeck zur Hochalm wird durch eine zehn Minuten dauernde Seilbahnfahrt erreicht. Dabei werden 800 Höhenmeter überwunden. Der 1100 m

lange Weg führt in eine Höhenlage von 1700 m und hat Steigungsstücke bis zu 18 % (Abb. 12 und Abb. 13).

Der Höhenweg vom Hausberg zum Kreuzeck ist mittels Seilbahnfahrt von sieben Minuten Dauer zu erreichen; er stellt mit einem Höhenunterschied von 500 m und Steigungen bis zu 20 % die größten Anforderungen an die Probanden (Abb. 14 und Abb. 15).

### Kramer - Plateauweg

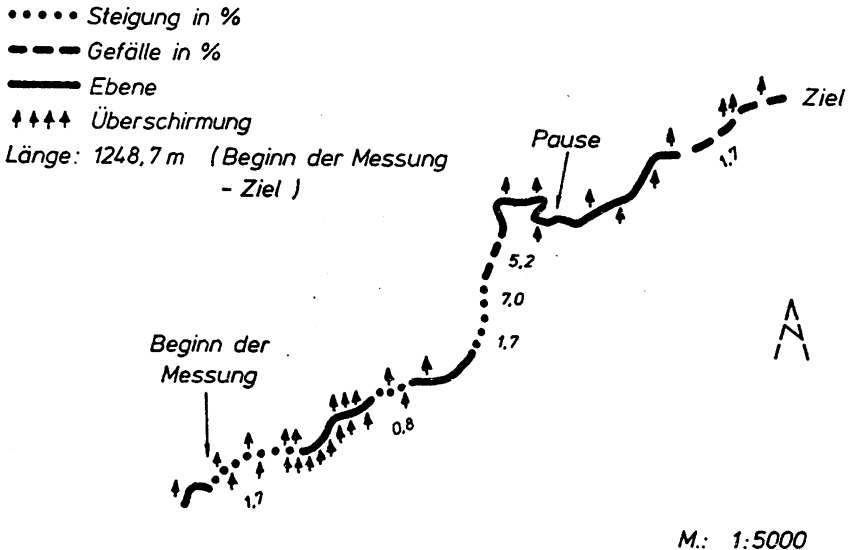


Abb. 10: Streckenverlauf des Kramer-Plateauweges  
(SCHUH 1982 (63)).

## Riessersee

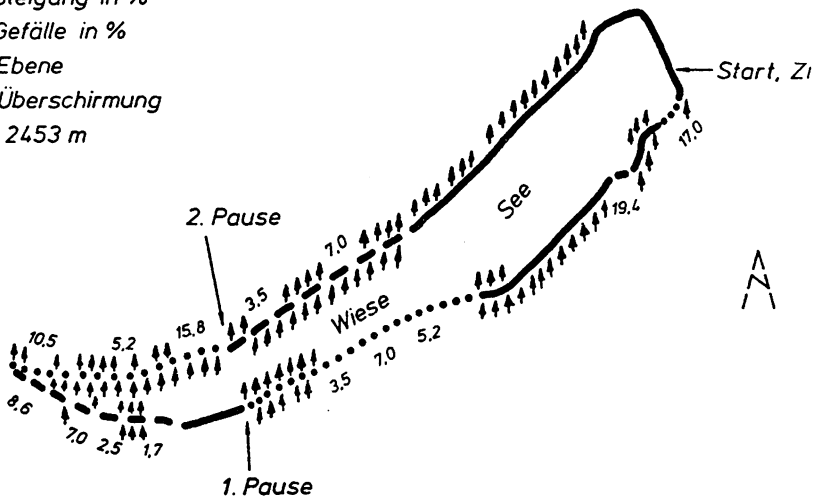
..... Steigung in %

--- Gefälle in %

— Ebene

↑↑↑↑ Überschirmung

Länge: 2453 m



M.: 1:5000

Abb. 11: Streckenverlauf des Weges rund um den Riessersee bis Aulealm (63).

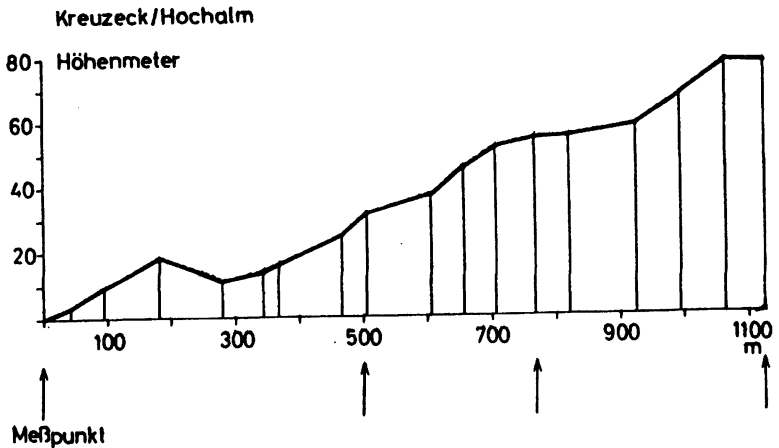


Abb. 12: Relief des Weges vom Kreuzeck zur Hochalm.

### Kreuzeck - Hochalm

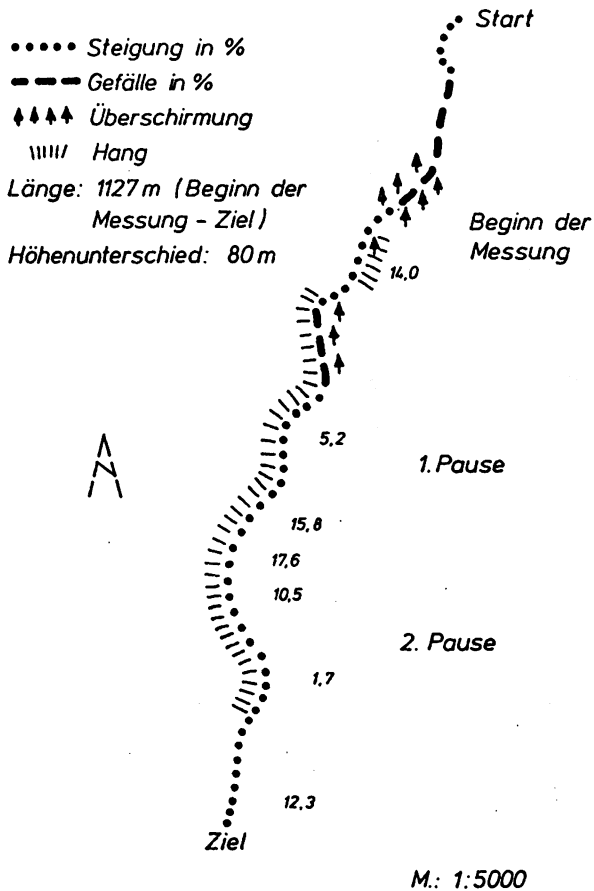


Abb. 13: Streckenverlauf des Weges vom Kreuzeck zur Hochalm.

### Hausberg - Kreuzeck

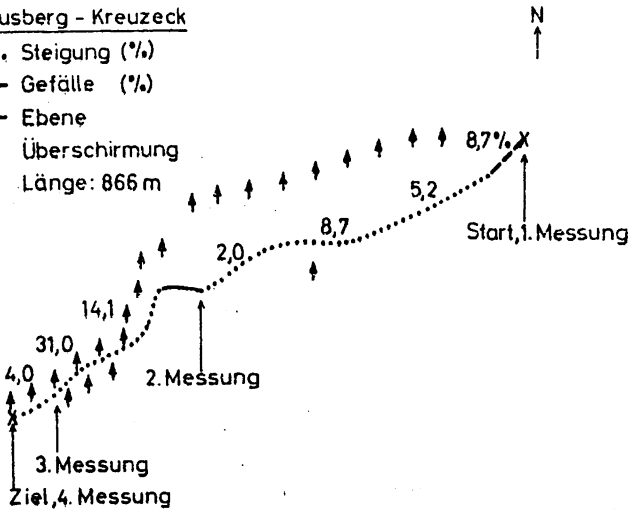
.... Steigung (%)

-- Gefälle (%)

— Ebene

↑ Überschirmung

Länge: 866 m



M: 1:5000

Abb. 14: Streckenverlauf des Weges vom Hausberg zum Kreuzeck.

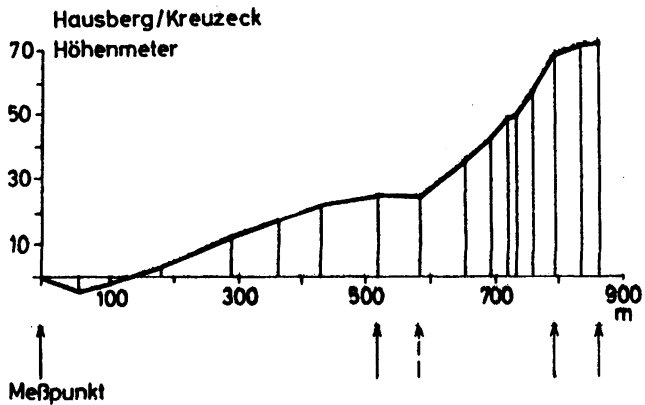


Abb. 15: Relief des Weges vom Hausberg zum Kreuzeck.

### 3.2 Versuchspersonen:

Als Testpersonen standen uns insgesamt 101 Kurpatienten, 63 Frauen und 38 Männer mit unterschiedlichen Krankheitsbildern zur Verfügung. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 53 Jahre, der jüngste Teilnehmer war 22, der älteste 77 Jahre; das Gewicht schwankte zwischen 49 und 99 kg. Es handelte sich durchwegs um untrainierte Versuchspersonen. Die Bekleidung der Probanden war frei wählbar, um eine Anpassung an die äußeren Bedingungen zu ermöglichen.

### 3.3 Meßgrößen:

An mehreren vorher festgelegten Punkten wurden unterwegs kurze Pausen gemacht. Dort erfolgte die Messung der meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Feuchttemperatur, Windgeschwindigkeit, Strahlungstemperatur der einzelnen umgebenden Oberflächen und des Bodens sowie der Handrücken- und Stirntemperaturen der Probanden.

Zur Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur wurde für die seitliche Umgebung die Strahlung aus insgesamt vier Raumwinkeln bestimmt, die jeweils auf den Weg in Gehrichtung vorne, hinten, rechts und links bezogen wurden.

Zusätzlich wurden die Bewölkung und die Bekleidung der Patienten protokolliert.

Gleichzeitig fand eine Befragung der Versuchspersonen nach ihrem thermischen Befinden statt. Die Antwortmöglichkeiten waren gemäß der sog. ASHRAE-Skala (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers) vorgegeben. Das Befinden wird dabei in sieben



Stufen unterteilt: Kalt, kühl, leicht kühl, angenehm, leicht warm, warm und heiß. Jeder dieser Stufen wird eine Zahl von -3 bis +3 zugeordnet; -3 bedeutet kalt, +3 heiß und 0 angenehm. Um zusätzlich auch Empfindenswerte zwischen den einzelnen PMV-Stufen (z. B. "warm" aber noch nicht "heiß") zuzulassen, wurde bei einer unserer Untersuchungen ein kontinuierliches Befragungsverfahren angewandt. Dabei waren auf einer Tafel, die dem Patienten vorgelegt wurde, die 7 Stufen der ASHRAE-Skala nebeneinander aufgetragen. Die Versuchspersonen gaben dann ihr Befinden durch Zeigen auf die entsprechende Stelle an (Abb. 16). So konnten auch Zwischenwerte (zehntel Stufen) bei der Auswertung erfaßt werden.

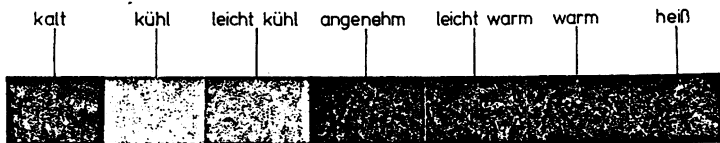


Abb. 16: Befragungstafel mit kontinuierlichen Befindenswerten.

Physiologische Werte wie Puls und Blutdruck der Probanden wurden während des Testganges von einem gleichzeitig arbeitenden Doktoranden der Medizin gemessen.

Die Leistungsfähigkeit des Patienten überprüften wir vor Beginn des Test durch ein Belastungs-EKG (Fahrradergometrie mit den Belastungsstufen 25, 50 und 75 Watt).

Außerdem wurden, um eine möglichst genaue Bestimmung der Energieumsätze zu gewährleisten, mit einem kleineren Kollektiv von Versuchspersonen

Sauerstoffverbrauchsmessungen (Douglas-Sack) durchgeführt.

### 3.4 Meßgeräte:

Luft- und Feuchttemperatur wurden mit einem kleinen Aspirationspsychrometer nach Assmann gemessen. Es besteht aus zwei Thermometern; eines ist trocken und mißt die Lufttemperatur, das andere ist mit feuchtem Mull umwickelt und mißt die sog. Feuchttemperatur, die in funktioneller Verbindung mit der Trockentemperatur die Luftfeuchtigkeit und den Dampfdruck zu berechnen erlaubt. Beide Thermometer sind von einer Chromhülle umgeben und werden ventiliert, um einen Strahlungsfehler zu vermeiden (Abb. 17). Die Messung der Windgeschwindigkeit erfolgt mit einem Schalenkreuz-Handwindmesser (Abb. 17). Die Messung der Strahlungstemperatur der umgebenden Oberflächen, sowie der Hauttemperatur wurde mit einem Infrarotthermometer (Thermophil) vorgenommen.

Die Messung der Strahlungsdaten übernahm das Institut für atmosphärische Umweltforschung der Frauenhofer-Gesellschaft in Garmisch-Partenkirchen (Leiter Dr. R. Reiter).

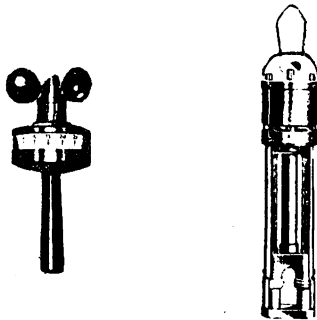


Abb. 17: Handwindmesser und Aspirationspsychrometer  
(aus LAMBRECHT (46)).

IV. Vergleich zwischen den Beobachtungsdaten und  
den Modellen von FANGER und JENDRITZKY/  
SCHMIDT-KESSEN:

4.1 Ergebnisse:

Auf den Kurübungswegen in Garmisch-Partenkirchen wurden mit den Probanden 1027 Meßphasen durchgeführt; das bedeutet, daß die Patienten 1027 mal nach ihrem thermischen Befinden befragt wurden. Es ergab sich folgende Verteilung der Antworten:

Aussage: -3,5 bis -2,5	Anzahl: 10	Häufigkeit: 0,98 %
-2,5 " -1,5	17	1,66 %
-1,5 " -0,5	97	9,44 %
-0,5 " +0,5	485	47,22 %
0,5 " 1,5	289	28,14 %
1,5 " 2,5	110	10,71 %
2,5 " 3,5	19	1,85 %

Tab. 3: Verteilung der Probandenantworten.

Aus diesem Ergebnis ist zu entnehmen, daß sich 485 von 1027, also fast jede zweite Antwort (47,22 %) im Komfortbereich  $-0,5 \leq \text{PMV} \leq +0,5$  befand. Weiter lagen 871 Antworten (84,81 %) im Bereich  $-1,5 \leq \text{PMV} \leq +1,5$ . Nur 156 Aussagen, also 15,18 % waren im Bereich  $\text{PMV} > +1,5$  bzw.  $< -1,5$ .

Nun wurde aus den gesammelten Meßwerten die PMV-Gleichung von FANGER (PMVF) an einer EDV-Anlage Cyber 175 berechnet. Dazu wurde die

mittlere Strahlungstemperatur im Freien benötigt (SCHUH (63)), um eine Anwendung im Freiland zu ermöglichen:

PMVF: < -3,5	Anzahl: 2	Häufigkeit: 0,19 %
-3,5 bis -2,5	10	0,97 %
-2,5 " -1,5	97	9,45 %
-1,5 " -0,5	256	24,93 %
-0,5 " +0,5	285	27,75 %
0,5 " 1,5	178	17,33 %
1,5 " 2,5	130	12,66 %
2,5 " 3,5	65	6,33 %
> 3,5	4	0,39 %

Tab. 4: Verteilung des PMV nach FANGER (22).

Man erkennt die stärkste Anhäufung im Bereich  $-0,5 \leq \text{PMVF} \leq +0,5$  mit 285 Fällen (27,75 %). Fast ebenso viele Berechnungsergebnisse finden sich im angrenzenden negativen Bereich "leicht kühl",  $-1,5 \leq \text{PMVF} \leq -0,5$  mit 24,93 % aller Werte. In der Spanne von  $-1,5 \leq \text{PMVF} \leq +1,5$  finden sich 719, also 70,01 % der Resultate.

Nun wurde das Verfahren von JENDRITZKY und SCHMIDT-KESSEN (40) (nachfolgend PMVJ genannt) auf die 1027 Fälle angewandt; hierbei wurden die meteorologischen Bedingungen mit Hilfe der Tabellen und Diagramme erfaßt:

PMVJ: < -3,5	Anzahl: 0	Häufigkeit: 0,00 %
-3,5 bis -2,5	6	0,58 %
-2,5 " -1,5	96	9,35 %
-1,5 " -0,5	190	18,50 %
-0,5 " +0,5	391	38,07 %
0,5 " 1,5	218	21,23 %
1,5 " 2,5	88	8,57 %
2,5 " 3,5	31	3,02 %
> 3,5	7	0,68 %

Tab. 5: Verteilung des PMV nach JENDRITZKY/  
SCHMIDT-KESSEN (40).

Es ergibt sich, daß 78 % zwischen  $-1,5 \leq \text{PMVJ} \leq +1,5$  und 38 % der Werte im Komfortbereich  $-0,5 \leq \text{PMVJ} \leq +0,5$  liegen.

In folgender Abbildung 18 sind die 1027 PMV-Berechnungen nach FANGER (22), also unter Verwendung von gemessenen Strahlungsverhältnissen, und nach JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (40), d. h. unter Verwendung der Tabellen und Nomogramme zur indirekten Abschätzung des Strahlungsflusses als Häufigkeitsverteilungen eingetragen. Sie werden mit den Werten der Probandenaussagen verglichen.

Die Spannweite reicht von -3 bis +3, also von kalt bis heiß. Das Maximum der Aussagen der Probanden liegt bei  $\text{PMV} = 0$ , also bei "angenehm" mit etwas über 47 %. Ebenso sind hier die Maxima der PMV-Berechnungen nach FANGER, allerdings nur mit knapp 28 % und der Vorhersage nach dem Verfahren von JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN mit 38 % aller Fälle zu finden. Trotz dieser anscheinenden Übereinstimmung im indifferenten PMV-Bereich, d. h. im thermischen

Komfort, wird die Häufigkeit der Probendenaussagen im negativen Bereich sowohl nach der FANGER-Formel als auch nach JENDRITZKY deutlich überschätzt. Also wird das thermische Empfinden in diesen Bereichen als zu kühl beurteilt, während im PMV = +1 Bereich, d. h. bei "leicht warm" die Häufigkeit der Antworten durch FANGER und JENDRITZKY unterschätzt wird.

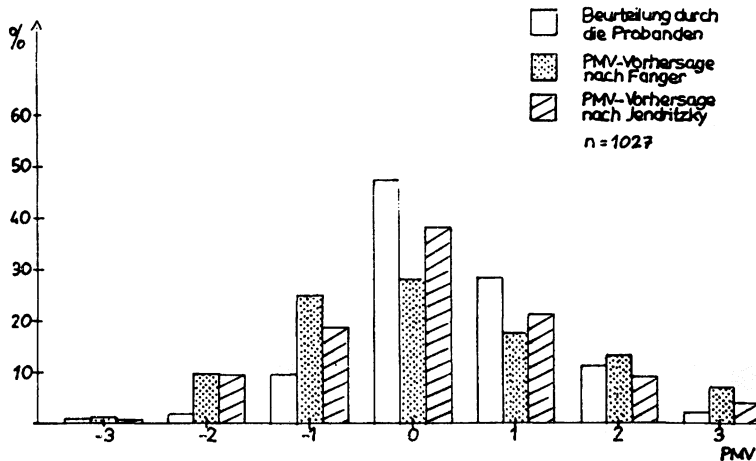


Abb. 18: PMV-Berechnungen nach FANGER und JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN als Häufigkeitsverteilungen im Vergleich mit den Probendenaussagen.

Bestätigt werden diese Feststellungen durch Abb. 19. Sie zeigt die kumulativen Häufigkeitsverteilungen der Aussagen der Probanden und der PMV-Vorhersagen nach beiden Autoren.

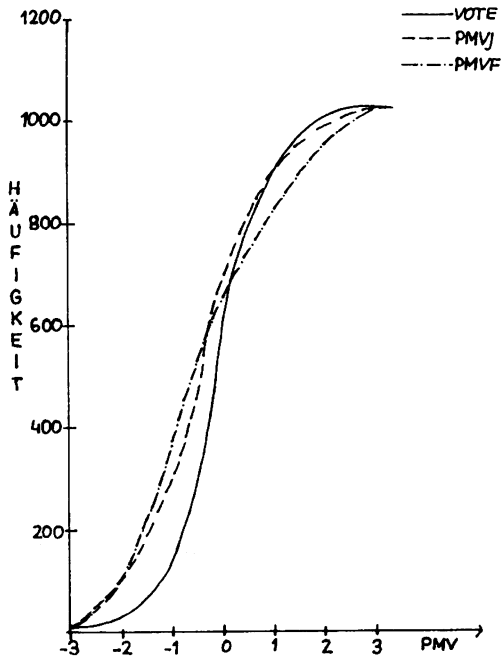


Abb. 19: Kumulative Häufigkeitsverteilung der PMV-Vorhersage nach FANGER (PMVF), JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (PMVJ) und der Aussagen der Probanden (VOTE).

Man sieht die deutliche Überbewertung der Aussagen im negativen Bereich durch PMVJ und PMVF um etwas weniger als eine halbe PMV-Stufe. Im angenehmen Bereich nähern sich alle Kurven einander an; die Verteilungskurve nach FANGER schneidet hier die VOTE-Kurve. Man erkennt dann eine deutliche Unterschätzung der Aussagen durch FANGER im positiven Bereich. Die Verteilungskurve nach JENDRITZKY paßt sich im indifferenten und positiven Bereich recht gut an die VOTE-Kurve an.

Einen Hinweis auf die starke Streuung gibt die folgende Punkteverteilung:

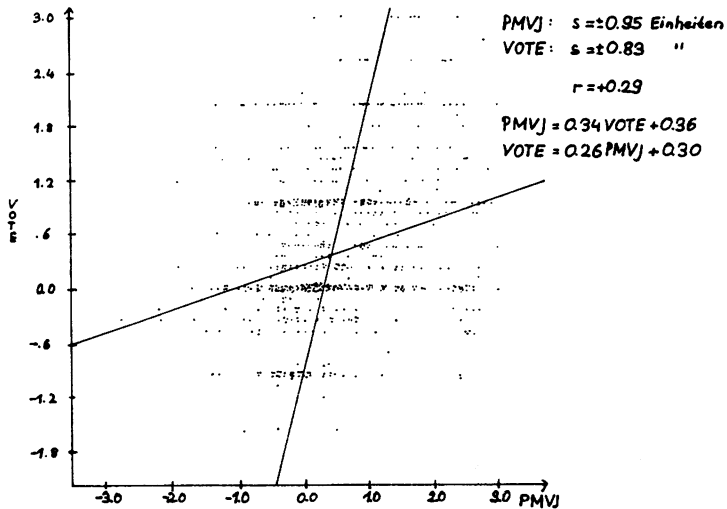


Abb. 20: Punkteverteilung von 710 im Sommer gemessenen Fällen. Aufgetragen sind die Aussagen der Patienten (VOTE) gegen die jeweiligen Schätzwerte nach JENDRITZKY (PMVJ). Zusätzlich sind die beiden Regressionsgeraden eingezeichnet.

Die Standardabweichung dieser Punkteverteilung gibt an, daß die Vorhersagen eine größere Streuung als die Aussagen haben. PMVJ und VOTE sind mit  $r = 0,29$  nur schwach korreliert. Der Punkteschwarm wird durch die Regressionsgeraden  $\text{PMVJ} = 0,34 \text{ VOTE} + 0,36$  und  $\text{VOTE} = 0,26 \text{ PMVJ} + 0,30$  repräsentiert.

#### 4.2 Diskussion:

Zusammenfassend ist festzustellen, daß sich ein hoher Anteil der Probanden, nämlich jeder zweite



bei der Begehung der vier Kurübungswege in thermischen Komfort befunden hat.

Dagegen erbrachten die Berechnungen nach FANGER (22) bzw. JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (40) überwiegend niedrigere PMV-Werte.

Die Ergebnisse aus den Berechnungen haben also bei unseren zwei Untersuchungen (Abb. 18 - 20) gezeigt, daß die Anwendung dieser Modelle bei Kurpatienten, die auf vorgegebenen Wegen im Freiland spazieren gehen, nicht nur wegen der Abweichung der Verteilung, sondern hauptsächlich wegen der großen Streuung von Aussage und Vorhersage noch auf Schwierigkeiten stößt.

Die Grundvoraussetzung der FANGER-Gleichung, daß das Empfinden eine Funktion der Wärmebilanz ist, beschränkt den Gültigkeitsbereich bezüglich Aktivität und thermischer Umgebung. Bei von Null verschiedenem PMV bedeutet die Form der Gleichung  $PMV = [M/A_{DU}] \cdot [BILANZ]$ , daß mit ansteigender Aktivität  $M/A_{DU}$  der Einfluß der Bilanz abnimmt. Diese Vorstellung ist im warmen Empfindungsbereich annähernd, im kalten Bereich aber nicht mehr verständlich.

FANGER und damit JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN bauten in ihren Modellen eine Beziehung zwischen Wärmebilanz, Thermoregulation und Empfinden auf. So ergibt nach JENDRITZKY (36) eine Abweichung von Null der Wärmebilanz ein Maß für die Beanspruchung des Thermoregulationssystem und das wiederum eine Belastung für den Organismus. Es besteht aber keine gesicherte Beziehung zwischen einer Beanspruchung beispielsweise des Kreislaufes, der Wärmebilanz und des Empfindens.

Ebenso gilt diese Gleichung nur für stationäre Verhältnisse. Der Diskomfortzustand, PMV ungleich Null ist jedoch kein steady state, weil dann die Wärmebilanz definitionsgemäß ebenfalls ungleich Null sein muß. Bei einer Wanderung oder einem Spaziergang ändern sich die Umweltsbedingungen häufig und dementsprechend ändert sich die physiologische Reaktion des menschlichen Körpers. Ein steady state kann in diesem Fall kaum erreicht werden.

Als körperliche Aktivität wurde bei den Berechnungen ein Wert eingesetzt, der entsprechend der Gehgeschwindigkeit und Wegneigung aus Tabellen, die FANGER angegeben hat, entnommen wurden. Auch JENDRITZKY und SCHMIDT-KESSEN haben diese Tabellen übernommen (Tab. 2). Sie sind für einen "Normmenschen" angelegt. Um eine konkrete Bestimmung durchzuführen, müßten jedoch diese Werte auf den Einzelfall bezogen werden. Allein schon die Größe und damit die Schrittlänge können die Gehgeschwindigkeit stark modifizieren. Die zu erbringende Leistung hängt zusätzlich vom Körpergewicht ab. Auf die Berechnung der Aktivität wird später noch einmal zurückgekommen (siehe Kap. 6.1.1).

Entsprechend dem statistischen Verfahren, das bei der Ermittlung des PMV von FANGER benutzt wurde, folgt, daß die Ergebnisse jeweils Mittelwerte für eine große Gruppe von Personen darstellen. Deshalb ist keine individuelle Betrachtung möglich, sie ist aber für die nutzbringende Anwendung im Kurbereich wesentlich.

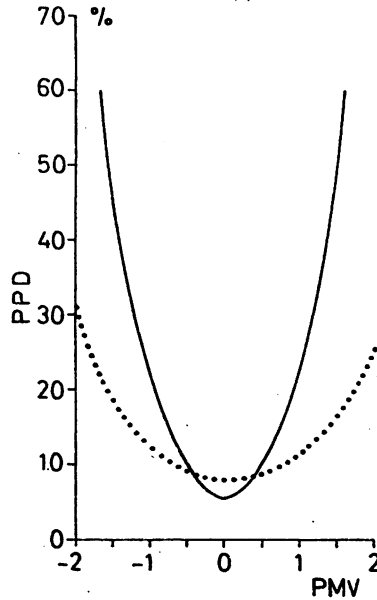
Mit Hilfe des PMV-Wertes ermittelt FANGER auch den zu erwartenden prozentualen Anteil der thermisch unzufriedenen Personen (PPD = Percentage of Persons Dissatisfied). Die biologisch bedingte

Varianz im Empfinden der Einzelpersonen innerhalb eines solchen großen Kollektivs bewirkt laut FANGER (23), daß sich unter Komfortbedingungen ( $PMV = 0$ ) immer noch 5 % der Personen im Diskomfort, d. h. bei einer Empfindensangabe von größer als +1 und kleiner als -1 befinden. Wegen der Symmetrie der Verteilung sind 2,5 % der Personen im Warm- und 2,5 % im Kalt-diskomfort. Mit zunehmender durchschnittlicher  $PMV$ -Abweichung vom Komfortzustand nimmt der Prozentsatz solcher Einzelpersonen stark zu; bei  $PMV = +/-1$  (leicht warm bzw. leicht kühl) empfinden bereits mehr als ein Viertel der Personen Diskomfort.

Der PPD gibt die Häufigkeit des Diskomforts an, wenn die optimale thermische Umgebung nicht erreicht werden kann. Mit ihm erfolgt also die Quantifizierung des durchschnittlichen Grads an Unbehagen bei Nichterreichen optimaler thermischer Umgebungsbedingungen.

Folgendes Diagramm, Abb. 21 zeigt die PPD-Kurve von FANGER als Funktion von  $PMV$  (hier nicht logarithmisch aufgetragen). Weiter ist die Kurve der PPD, die sich aus unseren Untersuchungen ergeben, mit der Basis des berechneten  $PMV$ -Wertes eingetragen. Beide Kurven decken sich in ihren Minima annähernd. Mit zunehmendem  $PMV$  wird die gepunktete Kurve breiter; bei  $PMV = +/-1$  befanden sich nur 15 % im Diskomfort, während es laut FANGER schon 25 % sein müßten. Auch bei einem  $PMV +/-2$  lagen kaum mehr als 30 % der Probanden im Diskomfort.

Im Freien liegt also die Häufigkeit des Diskomforts erheblich niedriger als es laut FANGER zu erwarten gewesen wäre.



Ab. 21: PPD-Kurve von FANGER (22) (durchgezogene Linie) und die Anzahl der PPD aufgrund unserer Untersuchungen (gepunktete Linie) gegen die Empfindenswerte PMV aufgetragen.

Weiter sind für das Verfahren von JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN in der Anwendung von Tabellen und Diagrammen Auf- oder Abrundungen vorzunehmen, die die Streuung notwendigerweise erhöhen müssen.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Anwendung der Modelle könnten die Strahlungsbedingungen im Freiland sein: JENDRITZKY und SCHMIDT-KESSEN haben ihr Strahlungsdiagramm (Abb. 9) für einen aufrecht über eine Wiese ohne Horizonteinengung stehenden Menschen theoretisch abgeleitet.

In folgender Abbildung (22) wurde ein bestimmter von uns begangener Weg (Kreuzeck/Hochalm) betrachtet, der in seiner Aussagenverteilung als einzige Strecke einen zweiten Gipfel aufwies (vgl. auch Abb. 24).

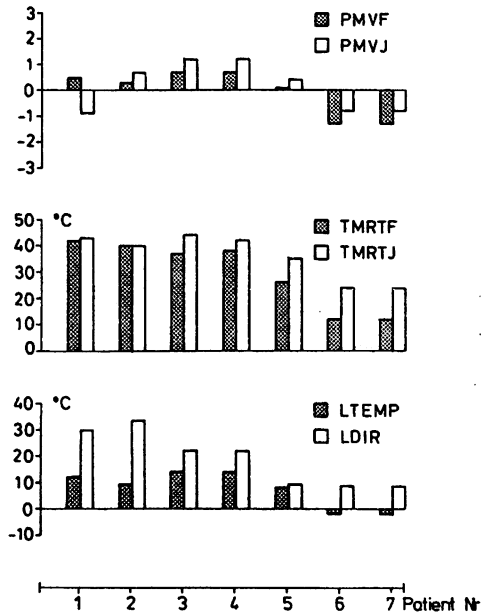


Abb. 22: In den betrachteten sieben Fällen war die Antwort der VP's immer  $PMV = +2$ . PMV-Vorhersagen nach FANGER (PMVF) und JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (PMVJ) (oben), gemessene und indirekt erhaltene Strahlungstemperaturen TMRTF und TMRTJ (mitte), im Vergleich mit der Lufttemperatur LTEMP und dem Temperaturäquivalent der direkten Sonnenstrahlung LDIR (unten).

Der Wegverlauf ging der Sonne entgegen und somit waren die Versuchspersonen am unbedeckten Kopf und im Gesicht der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt. Es werden in der Abbildung Vergleiche zwischen den PMV-Vorhersagen von FANGER und JEDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN, der gemessenen und der indirekt durch Nomogramme gewonnen mittleren Strahlungstemperatur sowie der Lufttemperatur und der Temperatur der direkten Sonnenstrahlung aufgezeigt.

Um die wirksame Temperatur der direkten Sonnenstrahlung zu erhalten, wurde das Stefan-Boltzmann Gesetz angewendet; so gewinnt man aus der 4. Wurzel des Quotienten von Strahlungsfluß und Boltzmann-Zahl die thermisch äquivalente Temperatur der den Menschen erreichenden Sonnenstrahlung.

Man sieht in Abb. 22, daß die Aussagen der Probanden von beiden Vorhersagemöglichkeiten deutlich unterschätzt werden, obwohl die mittleren Strahlungstemperaturen, besonders die indirekten, recht hoch liegen. Trotzdem haben sich die VP's im Gegensatz zur Vorhersage zu warm, also im thermischen Diskomfort gefühlt. Daher ist nicht auszuschließen, daß der Einfluß der mittleren Strahlungstemperatur unter bestimmten Bedingungen in den Vorhersagemodellen nicht richtig gewichtet wird.

Wir haben weiterhin die Unterschiede in der Güte der Vorhersagen des thermischen Befindens bei besonnten und beschatteten Wegen untersucht.

In Abbildung 23 sind die Absolutwerte der Differenz von Aussage und Fanger-Berechnung aufge-

tragen. Auf einem bestimmten Wegabschnitt wird hier die Punkteverteilung für zwei Möglichkeiten überprüft: Der Weg ist total besonnt oder ganz im Schatten. Man erkennt bei "totaler Besonnung" eine relativ große Streuung der Werte um den Mittelwert ( $\bar{x}$ ). Deutlich ist die große Abweichung der Differenz von Aussage und Berechnung; nur wenig Werte liegen im Idealbereich  $|VOTE-PMVF| = |\pm 0,5|$ , der die Übereinstimmung zwischen VOTE und PMVF repräsentiert. Es kommen dagegen Unterschiede zwischen Aussage und Berechnung von bis zu 3 PMV-Stufen vor.

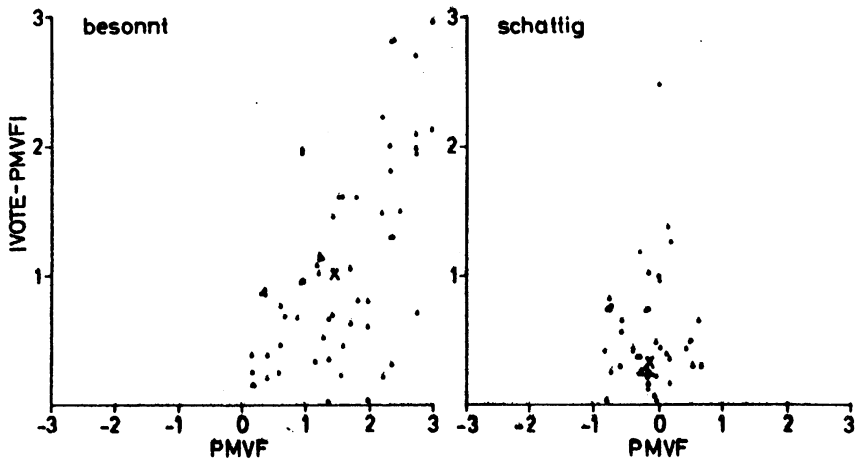


Abb. 23: Punkteverteilung der Absolutwerte der Differenz von Aussage (VOTE) und FANGER-Berechnung (PMVF) gegen die PMVF, für einen total besonnten oder ganz im Schatten liegenden Wegabschnitt.

Liegt dieselbe Teststrecke jedoch total im Schatten, läßt sich eine wesentlich geringere Streuung um den Mittelwert feststellen und man kann fast von einer Übereinstimmung zwischen Aussage und Berechnung sprechen; es finden sich keine so großen Abweichungen zwischen VOTE und PMV wie auf dem besonnten Weg.

Über die Hälfte aller Punkte zeigen eine Abweichung von weniger als eine halbe PMV-Stufe. Bis auf eine Ausnahme liegen hier alle Punkte unter 1,5 PMV-Skalenteilen.

Also stimmen Berechnung und Aussage bei vollständiger Bewölkung oder im Schatten, d. h. wenn die Versuchspersonen nicht direkt angestrahlt werden, wesentlich besser überein als bei totaler Bestrahlung der Probanden bei Besonnung.

Aus dieser Abbildung 23 folgt, daß die Vorhersagen für das thermische Befinden für besonnte und im Schatten liegende Strecken getrennt behandelt werden sollte.

Die PMV-Gleichung von FANGER (22), auf der das Verfahren von JENDRITZKY und SCHMIDT-KESSEN basiert, wurde im Labor, d. h. in der Klimakammer entwickelt. Für den erweiterten Bereich im Freiland haben wir aus den obengenannten Gründen die Entwicklung einer vollständig empirischen Gleichung bevorzugt; dieses Verfahren soll in Kap. VI erläutert werden.



### V. Beurteilung der begangenen Kurübungswege:

Zur Durchführung von Terrainkuren ist ein besonderes Wegenetz von Kurübungswegen von großer Bedeutung. Die Wege sollten vielseitig angelegt sein und alle Möglichkeiten der Sonnen- und Windexposition, ebenso wie verschiedene Höhen- und Tallagen sowie unterschiedliche Steigungen haben. So ist eine genaue Dosierung der Leistungs- und klimatischen Variablen möglich.

Wir führten unsere Begehungen auf vier verschiedenen Kurübungswegen in Garmisch-Partenkirchen durch.

Folgende Abb. 24 zeigt eine Häufigkeitsverteilung der Antworten der Versuchspersonen auf die Frage nach dem thermischen Befinden, auf den verschiedenen Wegen.

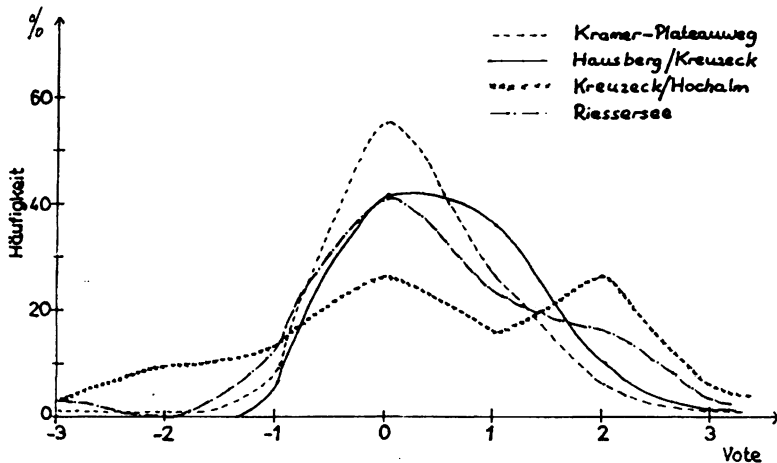


Abb. 24: Häufigkeitsverteilung der Antworten (VOTE) auf den vier verschiedenen Wegen.

Das mit einer Ausnahme vorhandene Maximum der Antwort VOTE = 0, d. h. "angenehm" ist klar zu erkennen. Bei einem Weg ist die Verteilung zweigipfelig, doch alle Kurven sind eindeutig rechtslastig, also befanden sich unsere Testpersonen überwiegend im Komfort- oder Warmdiskomfortzustand. Die Häufigkeit der Antworten im kühlen bzw. kalten PMV-Bereich ist bei allen Wegen gering, obwohl manche Begehungen sogar bei Schneefall durchgeführt wurden.

Also haben sich über 40 % auf allen Wegen, auf dem Kramer-Plateauweg sogar über 55 % im thermischen Komfort (VOTE = 0) befunden.

Bezeichnet man nun in größerer Unterteilung die Aussagen -3, -2 (kalt, kühl) als Kaltdiskomfortbefinden, -1, 0 und 1 (leicht kühl, angenehm, leicht warm) als Komfort und +2, +3 (warm, heiß) als Warmdiskomfortempfindungen so ergibt sich für die einzelnen Wege folgende Verteilung:

Weg	Kaltdiskomfort	Komfort	Warmdiskomfort
Kramer-Plateau	2 %	90 %	8 %
Riessersee/Aulealm	3 %	77 %	20 %
Hausberg/Kreuzeck	0 %	86 %	14 %
Kreuzeck/Hochalm	11 %	57 %	32 %

Tab. 6: Verteilung von Diskomfort und Komfortempfindungen auf die einzelnen Wege, wobei Diskomfort: VOTE = -3, -2 bzw. +2, +3 und Komfort: VOTE = -1, 0, +1 gilt.

Graphisch wird diese Tabelle durch folgendes Histogramm, Abbildung 25 dargestellt.

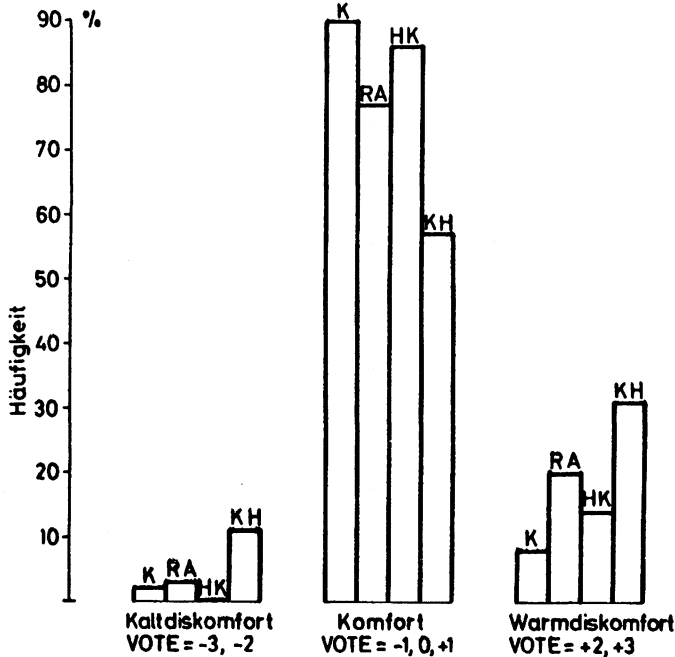


Abb. 25: Prozentuale Häufigkeitsverteilung der Aussagen (VOTE) der Versuchspersonen in der vereinfachten Einteilung Kaltdiskomfort, Komfort und Warmdiskomfort, auf die einzelnen Wege bezogen (K = Kramer-Plateauweg, RA = Riessersee/Aulealm, HK = Hausberg/Kreuzeck und KH = Kreuzeck/Hochalm).

Bei dieser Unterteilung ist zu sehen, daß nur wenige Antworten der Versuchspersonen thermisches Unbehagen ausdrücken. Kaltdiskomfort wurde kaum empfunden und könnte mit Erhöhung der Leistung (Gehgeschwindigkeit) oder durch festere Kleidung ganz vermieden werden. Warmdiskomfort mit den Aussagen "warm" und "heiß" wurde dagegen etwas häufiger gefunden. Er kommt sowohl bei Sommer- (K, HK) als auch bei Herbst bzw. Spätherbst (K, RA, KH) - Begehungen vor. Der Weg vom Kreuzeck

zur Hochalm fällt besonders auf. Hier wurde jedoch schon gezeigt (vgl. Kap. 4.2), daß es sich bei den Antworten "warm" ausschließlich um Fälle handelte, bei denen der Weg ganz in der Sonne lag (vormittags). Um also eine Überwärmung der Patienten weitgehend zu vermeiden, sollte dieser Weg nur nachmittags (schattig) oder bei Bewölkung begangen werden.

Nach JENDRITZKY und SCHMIDT-KESSEN (40) befinden sich Kurpatienten bis zu einem thermischen Empfinden "leicht warm", also  $PMV = +1$  im therapeutisch nutzbaren Bereich, der in Abb. 26 festgelegt wird.

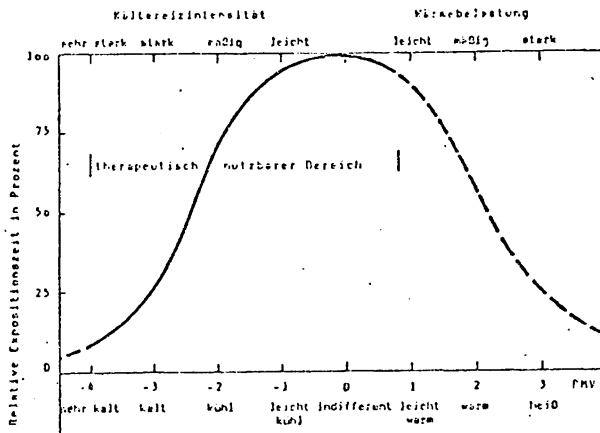


Abb. 26: Festlegung des therapeutisch nutzbaren Bereichs (40).

Hierbei wird also, wie aus obiger Abbildung zu ersehen ist, Bewegungstherapie im warmen Bereich nicht für sinnvoll gehalten; zu hohe Kaltreizintensitäten kann man durch zusätzliche Bekleidung und/oder Steigerung der Leistung neutralisieren und damit in den therapeutisch nutzbaren Bereich gelangen.

Bei allen begangenen Wegen, außer dem vorher angesprochenen Weg, haben sich die Versuchspersonen unabhängig von der Jahreszeit, Witterung oder Besonnung in sehr hohem Prozentsatz im Bereich zwischen "leicht kühl" und "leicht warm", und kaum außerhalb des "therapeutisch nutzbaren Bereich" befunden. Deshalb dürfen diese Wege bei Einhaltung der in unseren Untersuchungen angewandten Gehgeschwindigkeit, uneingeschränkt als gute Grundlage zur Bewegungstherapie gelten.

## VI. Empirisches Vorhersageverfahren für das thermische Empfinden

### 6.1 Voraussetzungen:

Aus der vorangegangenen Überprüfung der Modelle von FANGER (22) und JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (40) ergibt sich, daß diese Verfahren, hauptsächlich wegen der großen Streuung, als Vorhersagemöglichkeiten für das thermische Empfinden von Kurpatienten bei der Durchführung einer Terrainkur im Gebirge nicht gut anwendbar sind. Deshalb müßten diese Modelle durch genauere Beschreibung der beim Probanden und dem thermischen Milieu vorhandenen Bedingungen verbessert werden. Dadurch wäre aber die einfache Anwendungsmöglichkeit nicht mehr gewährleistet. Einfache Handhabung solcher Verfahren ist aber nötig, weil sie in erster Linie für den täglichen Gebrauch durch den Kurarzt gedacht sind.

Aus dieser Forderung nach Einfachkeit bei gleichzeitiger präziser Vorhersage wurde eine neue Möglichkeit zur Befindensschätzung gesucht. So haben wir auf Grund der Ergebnisse bei Begehung von Kurübungswegen mit Patienten neue, empirische "Befindensgleichungen" entwickelt.

#### 6.1.1 Bestimmung des Energieumsatzes:

Für die Vorhersage des Befindens von Patienten auf Kurübungswegen ist es nötig, Wärmeproduktion, also die Energieumsätze der Probanden beim Gehen im Gelände zu berücksichtigen.

### 6.1.1.1 Literaturstudium:

In der Literatur der letzten dreißig Jahre finden sich viele Angaben und Berechnungsmöglichkeiten über Energieumsatzwerte. Ein großer Teil der Autoren berichtet dabei über eigene experimentell gewonnene Ergebnisse, andere wiederum faßten bereits bekannte Daten in ausführliche Tabellen zusammen. Die experimentellen Bestimmungen der Umsätze fanden zumeist im Labor - überwiegend auf dem Laufband- und Fahrradergometer - statt. Seltenere wurden Versuche im Freiland unternommen. In Tabelle 7 ist eine Auswahl der zahlreichen Untersuchungen des Energieumsatzes beim Gehen angegeben. Zusätzlich sind einige Details aus der Methodik dieser Arbeiten, die Meßgröße und die Art der Darstellung aufgelistet. Ebenso werden die Autoren aufgeführt, die ausführliche Zusammenfassungen der Weltliteratur über Energieumsatzuntersuchungen erarbeitet haben.

Tab. 7: Energieumsatzuntersuchungen

Autor	Methodik	VP	Bedingungen	Meßgröße	Bezug	Darstellung
*Astrand 1977 (4)	Theor.	Durchs. 70 kg			Ergo- meter	Diagramm
*Bobbert 1960 (6)	Exp. Laufb.	2 Vp, $\sigma^1$ 75 u. 83kg 25 u. 32 J trainiert +4Vp (Test)	v=2,1-6,9km/h Ebene und Steigung	VO <sub>2</sub>	Geschw. Steig., Gewicht	Gleichung
Conso- lazio 1963 (9)	Exp. Fahrrad ergom.	7 Vp, $\sigma^1$	3 Geschw., 3 Temp.	VO <sub>2</sub>	Geschw. Temp.	Tabelle

Autor	Methodik	VP	Bedingungen	Meßgröße	Bezug	Darstellung
*Corcoran 1971 (10)	Lit.					Tabellen
Cotes 1960 (11)	Exp. Laufb.	11 Vp, ♂	v=1,6-6,4km/h Ebene und St.	VO <sub>2</sub>	Körper- bewegung	Gleichung
Dean 1965 (12)	Theor.	Durchs. 70 kg	Ebene u. St.		Körper- bewegung	Gleichung
*Di Prampero 1970 (14)	Lit.					Gleichung
*Fanger 1972 (22)	Lit.					Tabellen
Givoni 1971 (28)	Theor.		v>2,5km/h Ebene u. St.			Gleichung
Hollmann/ Hettinger 1976 (34)	Lit.					Tabellen
Lehmann 1953 (47)	Lit.					Tabellen
*Margaria 1963 (50)	Exp. Laufb.	2 Vp., 70 kg	v=0-5km/h Steigung	VO <sub>2</sub>	Geschw.	Diagramm
*McDonald 1961 (51)	Lit.	8600 Vp.	Ebene		Gewicht Geschw.	Gleichung
Passmore/ Durnin 1955 (55)	Lit.					Tabellen, Diagramme
Ralston 1960 (59)	Exp.	6 ♀ und ♂ Vp.	v=3 und 6km/h	VO <sub>2</sub>	Gewicht Geschw.	Tabellen



Autor	Methodik	VP	Bedingungen	Meßgröße	Bezug	Darstellung
*Ralston 1958 (57)	Exp. Laufb.	12 u. 7 Vp, 48- 90kg, 22-51 J. untrain.	v > 1,5km/h Ebene	VO <sub>2</sub>	Gewicht, Gleichung Geschw.	
Soule 1972 (59)	Exp. Freiland Laufb.	8 Vp mittel 21 J. " 74kg	v=2,4;4,0 u. 5,6km/h Gewichte	VO <sub>2</sub>	Bodenbed	Tabelle
*Spitzer/ Hettinger 1969 (70)	Lit.					Tabellen
Tydskrif 1971 (78)	Exp. Laufb.	25 Vp. 21-54 J. 61-112kg	v=4,8;6,4 km/h, Ebene	VO <sub>2</sub>	Gewicht Geschw.	Diagramm
*Van der Walt 1973 (74)	Exp. Laufb.	6 Vp. ♂ 63-102kg untrain.	v=3,2-12,9 km/h, Ebene	VO <sub>2</sub>	Gewicht, Gleichung Geschw.	
Wirths 1963 (75)	Lit. u. Exp.	146 Vp >65 J.	versch. Belastungen		Alter, Tabellen, Gewicht	Diagramme
Wirths 1977 (76)	Lit.					Tabellen
*Wyndham 1971 (71)	Exp. Laufb. Straße	8 Vp. 54-66 J.	v=3,2-6,4 km/h, Ebene	VO <sub>2</sub>	Geschw. Gewicht	Gleichung

Tab. 7: Zusammenfassung über Energieumsatzunter-  
suchungen. Die erste Spalte enthält Autor  
und Erscheinungsjahr, die nächsten drei  
Spalten die Methodik der Arbeiten (Lit.  
= Literaturzusammenfassung, Exp. = Experi-  
mentell, Laufb. = Laufband), die Anzahl

der Versuchspersonen (Vp) und die Bedingungen unter denen die Untersuchungen stattfanden. Zusätzlich werden die Meßgröße, der Bezug und die Darstellung der Ergebnisse aufgeführt. "\*" siehe Kap. 6.1.1.2.

Der Energieumsatz beim Gehen hängt von vielen Faktoren ab, z. B. von Geschlecht, Körperoberfläche (BROWN (8)), Gehgeschwindigkeit und Wegneigung (LEINER/HOFMANN (48), JUNG (44), GIVONI/GOLDMAN (29)) oder auch von der Wegbeschaffenheit (SOULE/GOLDMAN (69), HOLLMANN/HETTINGER (34)) und der Bekleidung (TEITLEBAUM/GOLDMAN (72)) sowie von der Umgebungstemperatur (CONSOLAZIO et al(9)) oder von der Körpertemperatur (BROWN (9)). In der Literatur finden sich, wie angegeben, zahlreiche Untersuchungen, die im Gegensatz zu denjenigen, die in Tabelle 7 aufgeführt sind, speziell diese Faktoren berücksichtigen.

Am stärksten ist nach MILLER/BLYTH (52) der Energieumsatz jedoch mit dem Körpergewicht korreliert. Höhere Körpergewichte tragen also bei beiden Geschlechtern, gleiche Gehbedingungen vorausgesetzt, stark zur Steigerung des Energieumsatzes bei. Dagegen spielt der Einfluß des Alters nach WIRTS (75,76) und DURNIN (21) nur eine geringe Rolle. Nachfolgende Figur 27, die auf Erhebungen von PASSMORE und DURNIN (55) basiert, zeigt die Auswirkungen von verschiedenen Gehgeschwindigkeiten und Körpergewichten auf den Energieverbrauch beim Gehen.

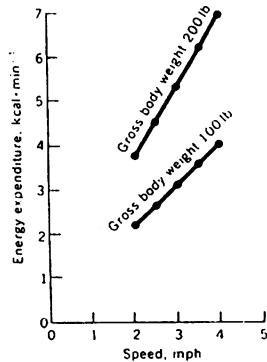


Abb. 27: Energieverbrauch beim Gehen in der Ebene (ASTRAND (4)).

#### 6.1.1.2 Vergleich Literatur - Eigene Untersuchungen:

Die in obiger Tabelle 7 mit \* versehenen Quellen haben wir auf unsere eigenen Untersuchungen angewendet. Dazu wurden mit unseren Testbedingungen (Gehgeschwindigkeit, Steigung der Wege und Gewicht der Probanden) und aus den in der Literatur angegebenen Diagrammen, Tabellen oder Gleichungen die Energieumsätze, die unsere Probanden nach Angabe der jeweiligen Autoren haben, bestimmt.

Der so zuerst erhaltene Sauerstoffverbrauch kann nach GANONG (27) für orientierende Zwecke mit dem Durchschnittswert von 4,82 kcal/l Sauerstoff multipliziert werden, um den Energieumsatz in kcal/h zu bekommen.

Aufgrund der Kenntnis der thermischen Befindensaussage der Versuchspersonen und den Bedingungen für die Wärmeabgabe während der Begehungen haben wir dann aus FANGER's PMV-Gleichung den Energieumsatz berechnet, den die Probanden laut ihrer Aussage hätten haben müssen. Dazu war es nötig,

die spezifische metabolische Rate SPM in  $\text{kcal/h m}^2$  zu berechnen. Dann wurde die SPM mit der Oberfläche der Probanden  $A_{\text{DU}}$  (Dubois-Fläche, nach DUBOIS (20)) multipliziert, um den Gesamtenergieumsatz zu erhalten.

Die aus der Literatur erhaltenen und die von FANGER abgewandelten Umsätze werden mit den Energieumsätzen verglichen, die wir aus dem Vergleich der Pulsfrequenzen während der Begehung mit denjenigen bei Ergometerbelastungen ermittelt haben (Abb. 29 - 31).

Dazu wurden bei unseren Untersuchungen die Probanden Fahrradergometertests unterzogen. Über die Beziehung Pulsfrequenz-Leistung wurde die auf dem Fahrrad erbrachte Leistung auf das Gelände übertragen (13). Aus einem Diagramm von ASTRAND (4) können dann die Energieumsätze in Abhängigkeit der Ergometerleistung, übertragen auf die Begehung, ermittelt werden.

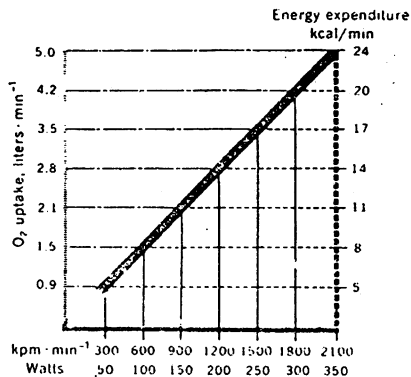


Abb. 28: Abhängigkeit der Energieumsätze von der Ergometerleistung (nach ASTRAND, 4).

Schließlich wurden mit einem kleine Kollektiv von Versuchspersonen auf der Strecke Hausberg/Kreuzeck Sauerstoffverbrauchsmessungen vorgenommen und aus Sauerstoffaufnahme und Kohlendioxidabgabe (indirekte Kalorimetrie) der Energieumsatz bestimmt (DEMPFF (13)). Dabei wurde das Douglas-Sack-Verfahren angewandt. Es beruht im Prinzip darauf, daß der Proband Frischluft einatmet und die Ausatemungsluft in einem Sack gesammelt wird. Mit der Überlegung, daß sich die vom Organismus über die Atemwege aufgenommene  $O_2$ -Menge aus der Differenz zwischen ein- und ausgeatmeter  $O_2$ -Menge berechnen läßt, kann der Sauerstoffverbrauch bestimmt werden (ULMER, 73).

Alle Berechnungen wurden in kcal/h bzw. in Watt vorgenommen, um geringstmögliche Veränderungen an der Originalliteratur vornehmen zu müssen. Um die Umrechnung in die verschiedenen Energie- bzw. Leistungseinheiten zu erleichtern, wendet man Tab. 8 an.

→ x ↑	kJ/min	kcal/min	Watt	$l O_2/min^*$	kpm/min
1 kJ/min	1	0,239	16,67	0,049	101,94
1 kcal/min	4,186	1	69,76	0,206	426,85
1 Watt	0,06	0,0143	1	$2,95 \cdot 10^{-3}$	6,12
$l O_2/min^*$	20,36	4,86	339,33	1	2074,69
1 kpm/min	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	0,1635	$0,482 \cdot 10^{-3}$	1

\* ) Respirationsquotient RQ = 0,85

Tab. 8: Umrechnungstabelle für verschiedene Energieeinheiten (nach SPITZER/HETTINGER (71)).

In folgenden Abbildungen 29 bis 31 kann man die Energieumsätze, die auf die oben beschriebene Art teils selbst bestimmt teils aus der Literatur entnommen wurden, für das Gehen in der Ebene (Abb. 29) und auf 5 % bzw. 20 % steilen Wegen (Abb. 30 und 31) ablesen. Die Umsätze werden in Watt angegeben und für 2 Geschwindigkeiten, 1,6 km/h und 2,4 km/h bestimmt.

Bei den betrachteten und verwendeten "Literaturwerten" handelt es sich in den meisten Fällen um Originalarbeiten. Lediglich die Veröffentlichung von FANGER, die auf MOREHOUSE/MILLER (54), Lehmann (47) und PASSMORE/DURNIN (55) basiert, die Tabellen von SPITZER/HETTINGER (70) und McDONALD'S (51) Gleichungen, die aus Zusammenfassungen der Weltliteratur entstanden sind, müssen als Sekundärliteratur bezeichnet werden.

Beim Gehen in der Ebene ergeben sich bei beiden Geschwindigkeiten nach allen Methoden Gesamtenergieumsätze, die relativ eng zusammenliegen. Nach SPITZER/HETTINGER finden sich die höchsten Ergebnisse, während die aus den Pulsfrequenzen im Vergleich mit der Ergometrie ermittelten Werte tiefer liegen (siehe Abb. 29). Alle anderen hier durchgeführten Berechnungsmethoden liegen maximal 20 Watt auseinander. Man kann also von einer sehr guten Übereinstimmung der in der Literatur vorgeschlagenen Gesamtenergieumsatzbestimmungen beim Gehen in der Ebene sprechen (Abb. 29).

Beim Überwinden einer Steigung von 5 % ergibt sich ein anderes Bild. Bei beiden vorgegebenen Geschwindigkeiten unterscheiden sich die Ergebnisse der verschiedenen Autoren schon um bis zu 50 Watt. Besonders wird die starke Abhängigkeit vom Körpergewicht nach den Angaben von MARGARIA et al (EMA) deutlich. Die aus Pulsfrequenz und Ergometrie gewonnenen Werte sind hier wesentlich

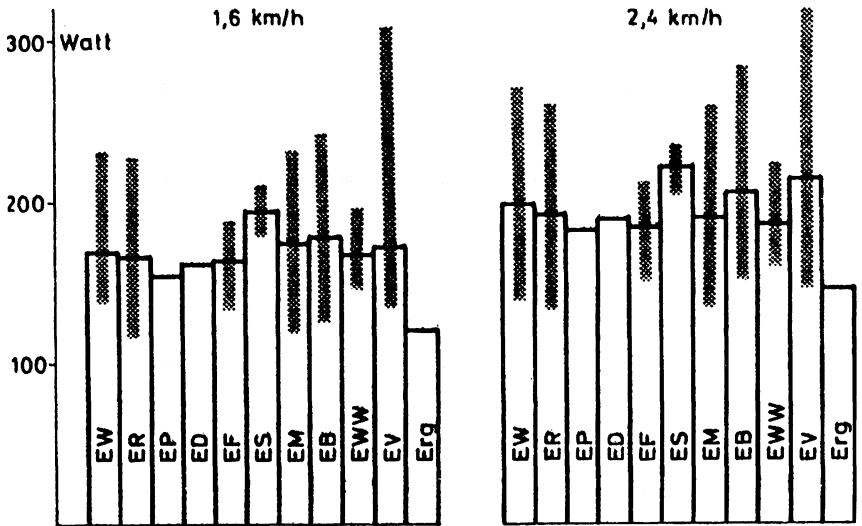


Abb. 29: Energieumsätze beim Gehen in der Ebene  
(siehe auch Legende Abb. 31).

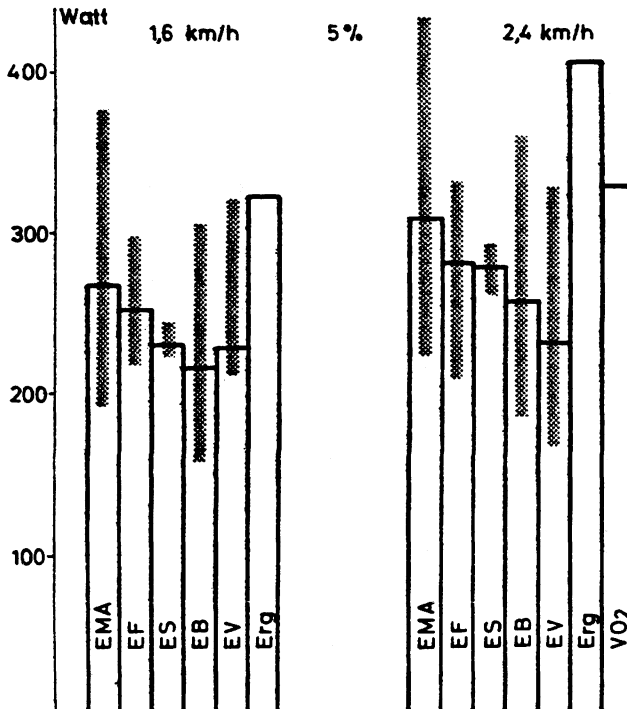


Abb. 30: Energieumsätze bei 5 % Steigung.

höher als die Literaturwerte. Der Sauerstoffverbrauch der bei 2,4 km/h an den eigenen Versuchspersonen ermittelt wurde, hebt sich nicht so stark ab.

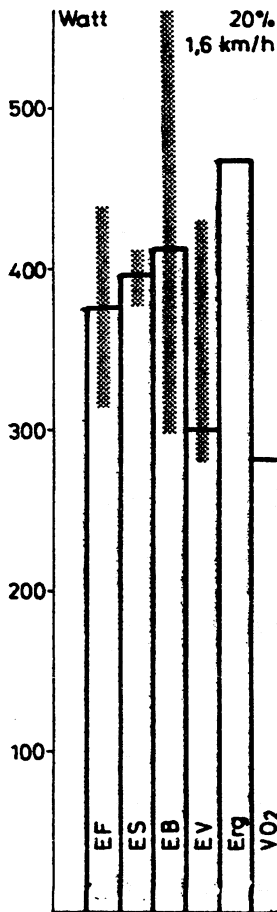


Abb. 31: Energieumsätze bei der Steigung 20 %.

Abb. 29 - 31: Dargestellt sind die Gesamtenergieumsätze unserer Probanden beim Gehen in der Ebene mit 1,6 km/h bzw. 2,4 km/h, bei einer Steigung



von 5 % mit 1,6 km/h und 2,4 km/h und bei einer Steigung 20 %, die nur mit 1,6 km/h begangen wurde. Die Ergebnisse wurden für einen mittleren Menschen mit 72,4 kg (Ebene) bzw. 70,7 kg (Steigung) berechnet. Zusätzlich sind mit den schmalen Säulen die Gesamtenergieumsätze für den Probanden mit dem geringsten bzw. größten Gewicht (51 kg bzw. 100 kg) eingezeichnet. Dabei gilt: EW = WALT (74), ER = RALSTON (56), EP = DI PRAMPERO (14), ED = CORCORAN (10), EF = FANGER (22), ES = SPITZER/HETTINGER (10), EM = McDONALD (51), EB = BOBBERT (6), EMA = MARGARIA (50), EWW = WYNDHAM (77), EV = aus Aussagen der Probanden, Erg = aus Pulsfrequenz und Ergometrie,  $VO_2$  = aus dem gemessenen Sauerstoffverbrauch (13) einiger Probanden.

Die Steigung von 20 % wurde nur mit 1,6 km/h begangen. Es zeigt sich ein Unterschied von nur rund 30 Watt bei den Autoren FANGER, SPITZER/HETTINGER und BOBBERT (EF, ES und EB), wobei nochmal darauf hingewiesen werden muß, daß die beiden ersten Autoren nur Zusammenfassungen der Literatur aufweisen und deshalb Übereinstimmung naheliegen. BOBBERT dagegen gelangte auf experimentellem Weg zu seinen Ergebnissen. Der Energieumsatz, der aufgrund der Komfort- oder Diskomfortaussagen der Versuchspersonen angenommen wurde, liegt erheblich unter den Literaturwerten. Am stärksten fallen die großen Abweichungen der Pulsfrequenz/Ergometer-Werte und der Sauerstoffverbrauchswerte sowohl von den Literaturwerten als auch untereinander auf. Hierbei muß bedacht werden, daß die Untersuchungen, die von den genannten Autoren experimentell durch-

geführt oder aus der Literatur entnommen wurden, unter steady state Bedingungen stattfanden. In unserem Falle gingen die Versuchspersonen beim Douglas-Sack-Verfahren einen relativ kurzen Wegabschnitt. Man erreicht aber erst nach einiger Zeit einen steady state Zustand und verbraucht vorher weniger Sauerstoff. Dies kann eine Erklärung für den vergleichsweise zu niedrigen Wert des Sauerstoffverbrauchs  $\dot{V}O_2$  bei der Steigungsstrecke 20 % sein.

Der Energieumsatz, der indirekt durch Pulsfrequenz und Fahrradergometrie ermittelt wurde, liegt dagegen in den Steigungsstrecken wesentlich höher als die auf andere Art ermittelten Werte. Dies ist in Übereinstimmung mit HILLE et al (33), die feststellten, daß sich Ergometerbedingungen nicht ohne weiteres auf das Gelände übertragen lassen.

In allen Abbildungen 29 bis 31 kann man die starke Abhängigkeit des Energieumsatzes vom Gewicht gut erkennen. Der Energieaufwand kann sich bei einem Gewichtsunterschied von 50 kg von der leichtesten bis zur schwersten Testperson bei 1,6 km/h Gehgeschwindigkeit und 20 % Steigung um bis zu 260 Watt verändern.

#### 6.1.1.3 Gleichung zur Bestimmung des Energieumsatzes:

In unserer Studie wurden nun die Gesamtenergieumsätze, die unsere Probanden während der Begehung aufwiesen, ermittelt. Dabei wurde die Abhängigkeit des Energieaufwandes vom Körpergewicht berücksichtigt.

Unsere Ableitung basiert auf dem Grundgedanken, daß der Gesamtenergieumsatz in drei Ausdrücke

aufgeteilt werden kann: Eine Größe repräsentiert den Ruheumsatz, ein Term beschreibt das Gehen in der Ebene und hängt von Gewicht und Gehgeschwindigkeit ab und ein Ausdruck vertritt die Hebearbeit, also das Gehen auf ansteigendem Weg und besteht aus einer funktionellen Verbindung von Gehgeschwindigkeit, Gewicht und Steigung.

Man kann also schreiben:

$$E = a + b \cdot (v \cdot w) + c \cdot (v \cdot w \cdot d)$$

wobei E = Gesamtenergieumsatz beim Gehen in der Ebene und auf Steigungsstrecken, v = Gehgeschwindigkeit, w = Gewicht und d = Steigung. a, b und c sind Konstanten.

Aus den Ergebnissen oder Zusammenfassungen der Autoren Van der WALT, RALSTON, FANGER, SPITZER/HETTINGER, MARGARIA, BOBBERT, WYNDHAM (vgl. Abb. 29 - 31) wurde mit Hilfe einer Regressionsrechnung eine lineare Gleichung errechnet, aus der sich entsprechend obigem Grundgedanken mit Kenntnis der Gehgeschwindigkeit, Steigung und des Körpergewichtes der Gesamtenergieumsatz E ermitteln läßt:

$$E = 128 + 0,41 \cdot (v \cdot w) + 0,10 (v \cdot w \cdot d) \quad [\text{Watt}] \quad (3)$$

Der Energieumsatz ergibt sich in Watt, wenn das Gewicht w in kg, die Geschwindigkeit v in km/h und die Steigung d in % eingegeben werden.

Da wir bei unseren Untersuchungen als niedrigste Gehgeschwindigkeit 1,6 km/h wählten, ist diese Gleichung erst ab diesem Bereich anzuwenden. Sie ist für das Gehen in der Ebene und Steigungen bis zu 5 % für die Geschwindigkeit zwischen 1,6 und 2,4 km/h, bei der Steigung 20 % nur für 1,6 km/h

abgeleitet worden. Größere Steigungen und Geschwindigkeiten wurden nicht untersucht.

Gleichung (3) läßt sich zur einfacheren Handhabung in einem Diagramm, Abbildung 32 für eine Durchschnittsperson mit 72 kg darstellen. Mit der oben entwickelten Gleichung (3) ist auf diese Weise eine hinreichend genaue, aber doch nicht zu komplizierte und einfach anzuwendende Bestimmung des Gesamtenergieumsatzes eines Patienten bei Bewegung im Gelände möglich.

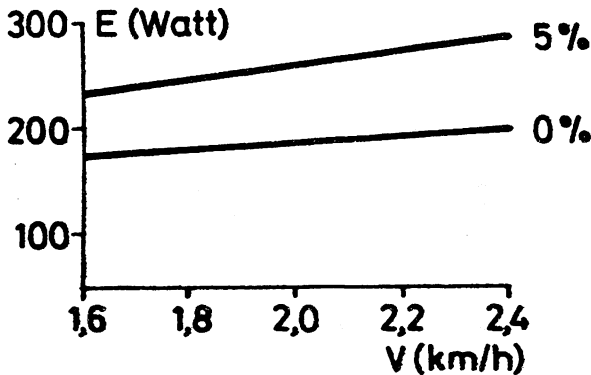


Abb. 32: Gesamtenergieumsätze in Abhängigkeit von Gehgeschwindigkeit und Steigung, für eine Durchschnittsperson mit 72 kg.

Bei der Energieumsatzbestimmung ist es unbedingt nötig, den Einfluß des Körpergewichtes zu beachten. Folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit des Umsatzes vom Gewicht bei unseren Untersuchungen, berechnet nach Gleichung (3).

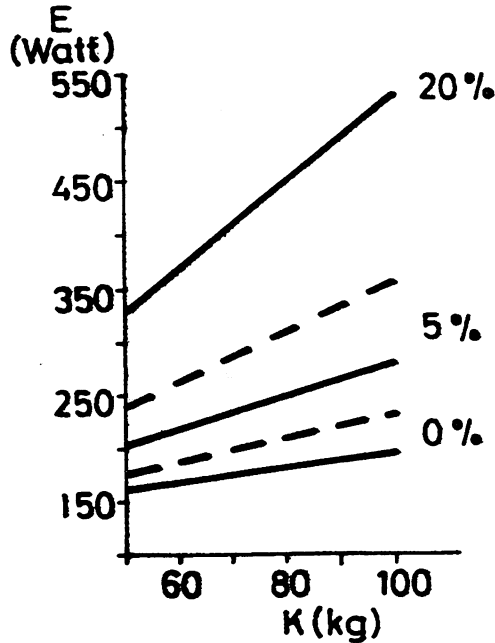


Abb. 33: Abhängigkeit des Energieumsatzes von Körpergewicht für die untersuchten Steigungen und Gehgeschwindigkeiten (durchgezogene Linie = 1,6 km/h und gestrichelt = 2,4 km/h) nach Gleichung (3).

#### 6.1.2 Auswahl der Variablen und Rechenverfahren:

Der Gesamtenergieumsatz, den ein Patient bei der Durchführung von bewegungstherapeutischen Maßnahmen aufbringt, ist im Zusammenwirken mit den meteorologischen Bedingungen der Umwelt und individuellen Parametern für die thermoregulatorische Gesamtsituation und dem nach HENSEL (30) davon abhängigen Komfort- oder Diskomfortzustand maßgeblich.

Deshalb muß eine Gleichung zur Befindsbestimmung, beispielsweise während einer Terrainkur

unter klimatischen Einflüssen, eine Kombination von metabolischen, persönlichen und meteorologischen Größen sein.

Zur Erstellung einer empirischen Gleichung war als erstes eine Auswahl der aus unseren Untersuchungsdaten zur Vorhersage des thermischen Befindens in Frage kommenden Variablen nötig. Dazu wurden um die Güte des Zusammenhangs zu erkennen, zunächst die partiellen Korrelationskoeffizienten zur Aussage berechnet.

Die am höchsten mit der Befindenaussage der Probanden korrelierten meteorologischen Variablen waren Bewölkung, Lufttemperatur, Dampfdruck und Sonnenhöhe. Als wichtigste persönliche Größen ergaben sich Gewicht, Größe und Bekleidung der Versuchspersonen. Der Metabolismus wird durch die Berechnung des Energieumsatzes repräsentiert.

Auf diese Variablen mit den höchsten partiellen Korrelationskoeffizienten wurde ein lineares, schrittweises Regressionsverfahren (BMDP (18)) angewandt. So kann eine Zielgröße, in unserem Fall die zu erwartende Aussage über das thermische Empfinden, als lineare Funktion mehrerer Komponenten ausgedrückt werden.

Aufgrund der Feststellungen, die bereits bei der Diskussion der FANGER-Gleichung und des Verfahrens von JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN dargelegt wurden, haben wir für besonnte und im Schatten liegende Strecken getrennte Analysen durchgeführt.

6.2 Gleichungssystem zur Vorhersage des thermi-  
schen Empfindens: "Befindensgleichungen".

Für die Vorhersage des thermischen Befindens  
PMV fanden wir folgende Gleichungen:

für besonnte Strecken:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & -1,61 - 0,077 B + 0,063 t_a + 0,021 \gamma + 1,57 I_{cl} \\ & - 0,013 H + 0,007 E \end{aligned} \quad (\text{I})$$

bei schattigen Strecken:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & -0,34 - 0,042 B + 0,101 t_a + 1,77 I_{cl} - 0,016 H \\ & + 0,002 E \end{aligned} \quad (\text{II})$$

Soll keine Trennung zwischen besonnten und schat-  
tigen Strecken vorgenommen werden, so gilt:

$$\begin{aligned} \text{PMV} = & -2,74 - 0,057 B + 0,066 t_a + 0,016 \gamma + 1,46 I_{cl} \\ & + 0,003 E \end{aligned} \quad (\text{III})$$

Dabei ist B = Bewölkung in 1/8;  $t_a$  = Lufttem-  
peratur in °C;  $\gamma$  = Sonnenhöhe in Grad;  
 $I_{cl}$  = Bekleidungswert in clo; H = Größe der  
Probanden (in cm); E = Gesamtenergieumsatz in  
Watt (nach Gleichung (3)).

An den standardisierten Regressionskoeffizienten,  
die in folgender Tabelle aufgelistet sind, zeigt  
es sich, daß Lufttemperatur, Bekleidung und auf-  
gewendete Energie im jeweiligen Bereich ihrer  
Variabilität die größten Beiträge leisten und  
von Bewölkung, Sonnenhöhe und Größe der Pro-  
banden gefolgt werden. Der Einfluß der Feuch-  
tigkeit über den Dampfdruck war gering und  
nicht signifikant.

Variable	in Gleichung I besonnt	in Gleichung II schattig	in Gleichung III
Bewölkung B	-0,27	-0,12	-0,20
Lufttemp. $t_a$	0,32	0,49	0,38
Sonnenhöhe $\gamma$	0,14		0,13
Bekleidung $I_{cl}$	0,32	0,30	0,28
Größe H	-0,11	-0,11	0,25
Energieum- satz E	0,36	0,25	0,25

Tab. 9: Standardisierte Regressionskoeffizienten der Variablen in Gleichung I - III.

In den nachfolgenden Tabellen 10 bis 12 sind die einzelnen Schritte der Regressionsanalysen mit den jeweiligen multiplen Korrelationskoeffizienten  $r, r^2$ , der Zunahme von  $r^2$  pro Schritt und die F-Werte, die einen Hinweis auf die Signifikanz geben, aufgeführt.

Schritt	eing. Var.	ausg. Var.	mult. r	$r^2$	Zunahme $r^2$	F-ein	F-aus
1	$t_a$		0,24	0,06	0,06	23,52	
2	B		0,33	0,11	0,05	22,92	
3	$\gamma$		0,36	0,13	0,02	7,76	
4		$t_a$	0,36	0,13	-0,00		1,49
5	E		0,44	0,19	0,06	29,92	
6	$t_a$		0,45	0,21	0,01	6,80	
7		$\gamma$	0,45	0,20	-0,01		3,44
8	$I_{cl}$		0,50	0,25	0,05	24,73	
9			0,51	0,26	0,02	8,82	
10	H		0,52	0,27	0,01	5,15	

Tab. 10: Eingegebene, herausgenommene Variablen, multiple Regressionskoeffizienten, deren Quadrat und die Zunahme des Quadrats, sowie die F-Werte der herein- bzw. Hinausnahme bei jedem Schritt der Analyse für Gleichung I (besonnt).



Schritt	eing. Var.	ausg. Var.	mult. r	r <sup>2</sup>	Zunahme r <sup>2</sup>	F-ein	F-aus
1	t <sub>a</sub>		0,43	0,19	0,19	67,49	
2	γ		0,46	0,21	0,22	8,17	
3	I <sub>cl</sub>		0,48	0,23	0,03	9,70	
4	E		0,50	0,25	0,12	4,55	
5		γ	0,49	0,24	-0,01		3,17
6	B		0,50	0,25	0,01	4,09	
7	H		0,51	0,26	0,02	4,65	

Tab. 11: Ergebnisse der Regressionsanalyse für Gleichung II (schattig).

Schritt	eing. Var.	ausg. Var.	mult. r	r <sup>2</sup>	Zunahme r <sup>2</sup>	F-ein	F-aus
1	t <sub>a</sub>		0,27	0,07	0,07	79,14	
2	B		0,31	0,10	0,03	30,12	
3	γ		0,35	0,12	0,02	25,74	
4	E		0,40	0,16	0,04	42,94	
5	I <sub>cl</sub>		0,45	0,20	0,05	56,88	

Tab. 12: Ergebnisse der Regressionsanalyse für Gleichung III (besonnt und schattig).

### 6.3 Diskussion:

Das oben vorgestellte Gleichungssystem ermöglicht es, das subjektive thermische Befinden aus allgemein zugänglichen Leistungs- und Klimaelementen vorherzubestimmen.

Auf diese Weise ist ein dosiertes und damit risikoarmes Training auf Ausdauer möglich, das nach SCHNIZER, KLEINSCHMIDT und DREXEL (62) das Hauptelement einer Bewegungstherapie im Kurbetriebsein muß und vor allem auf Anpassung im Bereich des Herz-Kreislaufs,

der Lunge und des muskulären Energiestoffwechsels abzielt. Durch den zusätzlichen Einfluß verschiedener meteorologischer Größen wird die Bewegungstherapie unterstützt und modifiziert. Dabei kann z. B. durch entsprechend ausgewählte Wegstrecken (schattig, windig usw.) eine Überhitzung der Patienten weitgehend vermieden werden. Es kann aber auch eine gezielte Abhärtung und Anpassung an Kälte, wie sie z. B. von ANDERSEN (1) oder JESSEL (42) beschrieben wurde, angestrebt werden. Dieser Akklimatisierungsprozeß an Kälte hat eine bedeutende Einwirkung auf die Stoffwechselprozesse in Form einer Steigerung des Basalstoffwechsels. Entsprechend können Belastungssituationen vorhergesagt werden, was für die tägliche Therapie während des Kuraufenthaltes bedeutsam ist.

### 6.3.1 Gültigkeitsbereich:

Die Gleichungen I, II und III wurden direkt aus unseren in Garmisch-Partenkirchen erhaltenen Meßwerten ermittelt. Ihr Anwendungsbereich wird in folgender Tabelle 13 durch die Mittelwerte, den kleinsten und größten Werten der Variablen der Gleichungen dargestellt:

Variable	Gleichung I (besonnt)			Gleichung II (schattig)		
	Mittel	Minimum	Maximum	Mittel	Minimum	Maximum
Bewölkung(1/8)	3,39	0,00	8,00	3,57	0,00	8,00
Lufttemp.(°C)	13,33	-2,00	27,00	11,61	-5,00	26,00
Sonnenhöhe (°)	30,89	14,48	49,03			
Bekleidung (clo)	0,91	0,60	1,50	0,96	0,60	1,50
Energie (Watt)	234,87	146,11	389,12	310,84	137,58	474,88

Tab. 13: Mittelwerte, Minimum und Maximum der in Gleichungen I und II vorkommenden Variablen.

Man sieht, daß die Bewölkung alle Werte annahm: von wolkenlosem (0/8) bis zum vollkommen bedeckten Himmel (8/8). Unsere Begehungen wurden bei einer weiten Spanne von Lufttemperaturen (-5 bis 27°C) durchgeführt. Die Anwendung dieser Gleichungen ist also sowohl bei sommerlichen als auch bei winterlichen Temperaturen gewährleistet. Dagegen können die Größenordnungen der Sonnenhöhe unter Umständen den Anwendungsbereich etwas einschränken. Messungen bei höheren Sonnenbahnen als 50° wurden nicht gemacht, da die Begehungen nur am Vor- bzw. Nachmittag durchgeführt wurden, um den normalen Rhythmus des Kurablaufes zu erhalten. Wir richteten uns nach dem "Kurgastbezogenen Tag" den JUNGMAN/JESSEL (43) 1977 festgelegt haben. Die Bekleidung unserer Probanden erstreckte sich von leichter Sommerkleidung ( $I_{cl} = 0,6$ ) bis hin zu dickerer Kleidung (entsprechend Anzug mit Mantel ( $I_{cl} = 1,5$ )) über einen weiten Bereich. Bei einer Terrainkur werden kaum niedrigere Bekleidungswerte zu erwarten sein. Schließlich fanden sich für den Energieumsatz Größenordnungen von 140 Watt für den leichtesten Patienten auf ebener Strecke mit geringster Geschwindigkeit (1,6 km/h), bis hin zu 470 Watt für den schwersten Probanden mit größten Anforderungen (20 % Steigung). Auch dieser Bereich ist für bewegungstherapeutische Maßnahmen durchaus angemessen. Der Einfluß der Luftfeuchtigkeit war zu gering und wurde durch das Regressionsverfahren ausgeschieden. Wir hatten bei den Begehungen im Gebirge, trotz teilweise sommerlichen Bedingungen wenig schwüle Tage; deshalb findet sich keine Auswirkung auf das Befinden.

Ebenso war der Einfluß des Windes zu gering, weil unsere Begehungen mit wenigen Ausnahmen, nur bei Windstille stattfanden. Für eine Anwendung unseres Systems an der See müßte der Einfluß des Windes jedoch geltend gemacht und die Gleichungen modifiziert werden.

Innerhalb des von uns betrachteten Komplexes sind aber den Anwendungsmöglichkeiten und dem Gültigkeitsbereich der "Befindensgleichungen" I, II und III nur wenig Grenzen gesetzt.

#### 6.3.2 Treffsicherheit:

Da wir unser Gleichungssystem aus den Untersuchungsdaten abgeleitet haben, stimmen im Mittel die Aussage der Probanden und die Vorhersage überein.

Die Hauptproblematik für die Vorhersage des thermischen Empfindens im Kurbereich ist es, neben guter mittlerer Übereinstimmung ein Vorhersagesystem mit möglichst geringer Streuung zu entwickeln, um eine individuelle Bestimmung des Empfindenwertes zu ermöglichen.

Die folgenden Punktverteilungen (Abbildung 34 - 36) geben Auskunft über die Streuung zwischen der Vorhersage nach Gleichungen I - III und der Aussage.

Abb. 34 zeigt die Punktwolke, die sich aus dem Vergleich zwischen dem tatsächlichen thermischen Empfinden (VOTE) und unserer Vorhersage (PMV) auf besonnten Strecken, ergibt.

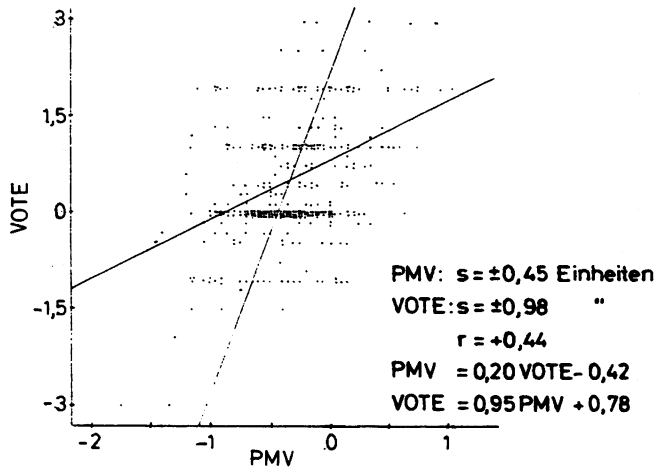


Abb. 34: Punkteverteilung auf besonnten Strecken (nach Gleichung I). Aufgetragen sind die jeweiligen Vorhersagewerte (PMV). Zusätzlich sind die beiden Regressionsgeraden eingezeichnet.

Die Standardabweichung dieser Punkteverteilung zeigt, daß die Aussagen eine größere Streuung als die Vorhersagen haben.

Vorhersage und thermisches Empfinden sind mit  $r = 0,44$  korreliert; der Punkteschwarm wird durch die Regressionsgeraden  $\text{PMV} = 0,21 \cdot \text{VOTE} - 0,42$  und  $\text{VOTE} = 0,95 \cdot \text{PMV} + 0,78$  repräsentiert.

Bei schattigen Strecken (Gleichung II) sind VOTE (Aussage) und PMV (Vorhersage) mit  $r = 0,51$  korreliert (Abb. 35).

Will man keine Unterscheidung zwischen besonnten und schattigen Strecken vornehmen, so ergibt sich bei Gleichung III eine Korrelation zwischen dem thermischen Empfinden und dessen Vorhersage von  $r = 0,44$  (Abb. 36).

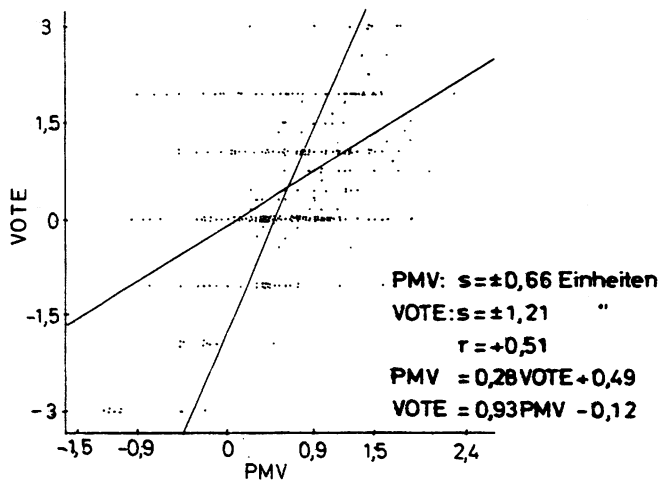


Abb. 35: Punkteverteilung für schattierte Strecken nach Gleichung II für Aussagen (VOTE) und Vorhersage (PMV).

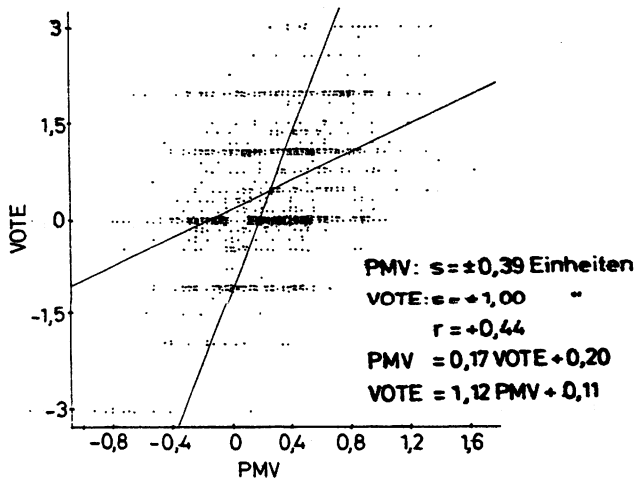


Abb. 36: Punkteverteilung der Aussage (VOTE) und der Vorhersage (PMV) für alle Strecken, nach Gleichung III.

6.3.3 Vergleich mit dem System von  
JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN:

Nach dem Vorhersageverfahren von JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (40) lagen schon im Mittel Abweichungen von den Aussagen der Patienten vor. Die Schätzungen bewegten sich etwa eine halbe PMV-Stufe niedriger als das wirkliche thermische Empfinden (vgl. Abb. 19, Kap. 41). Unsere Vorhersagen stimmen dagegen im Mittel mit den Aussagen überein.

Das Verfahren von JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN ist jedoch vor allem wegen seiner großen Streuung im Kurbereich nur begrenzt anwendbar. Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die statistischen Zusammenhänge zwischen dem thermischen Empfinden der Probanden und dem System von JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN im Vergleich mit unserem Vorhersageverfahren bei allen Strecken (nach Gleichung III):

Statistik	VOTE/PMVJ	VOTE/PMV
r	+0,29	+0,44
r <sup>2</sup>	0,08	0,19
s	±0,83/±0,95	/±0,39

Tab. 14: Korrelationskoeffizient r, dessen Quadrat und Standardabweichung s für Aussage und Schätzung nach JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN (VOTE/PMVJ) im Vergleich zu Aussage und Vorhersage nach Gleichung III (VOTE/PMV).

Es ist mit dem neuen System gelungen, sowohl Übereinstimmung im Mittel zu erreichen als auch die Streuung zu verringern. Damit ist eine genauere Vorhersage des thermischen Empfindens bei der Durchführung von Terrainkuren gewährleistet,

als nach dem Verfahren von JENDRITZKY/SCHMIDT-KESSEN.

#### 6.3.4 Handhabung des Vorhersagesystems:

Für die kurmäßige Anwendung ergibt sich die Notwendigkeit einer einfachen Handhabung der Vorhersagegleichung:

In der täglichen Praxis bestimmt der Kurarzt zunächst mit ergometrischen Tests die Belastbarkeit seines Patienten. Mit der Kenntnis des Körpergewichts und der erbrachten Wattleistung legt der Kurarzt so die zu begehende Strecke, die einen Trainingseffekt aber keine Überlastung bringen soll, fest.

Vor der Durchführung einer Terrainkur unter klimatischen Aspekten werden dann neben der gewählten Leistung und dem herrschenden Wetter die streckenspezifische Klimaexposition und das klimatherapeutische Vorgehen festgelegt. Dabei wird andauernde Überwärmung ( $PMV > +1$ ) vermieden und entweder thermische Neutralität ( $PMV = 0$ ) oder vorsichtige Abhärtung gegen Kälte ( $PMV \leq -1$ ) angestrebt. Das bedeutet, daß der Skalenwert des thermischen Empfindens  $PMV$  möglichst immer kleiner oder gleich  $+1$  (leicht warm) sein und allenfalls nur kurzzeitig Werte von  $1,5$  erreichen darf.

Zuletzt muß entschieden werden, ob und in welcher Kleidung die Streckengehung erfolgen soll. Dazu gibt der Kurarzt neben den streckenspezifischen, persönlichen und meteorologischen Größen das gewünschte thermische Empfinden in das Vorhersagesystem ein und erhält als Ergebnis die benötigten Kleidungsisolationswerte in  $clo$ -Einheiten (vgl. Tab. 2).



Die zur Vorhersage nötigen meteorologischen Parameter sind leicht zu bestimmen:

Die Bewölkung, die in  $1/8$  angegeben wird, ist durch Beobachtung selbst festzustellen. Dabei wird der wolkenlose Himmel mit  $0/8$ , der vollkommen bedeckte mit  $8/8$  und der halbbedeckte mit  $4/8$  eingestuft. Die Lufttemperatur wird abgelesen. Für die Bestimmung der Sonnenhöhe werden Tabellen herangezogen (beispielsweise vom Institut für Atmosphärische Umweltforschung in Garmisch-Partenkirchen), aus denen man unter Eingabe von Stunde, Tag und Monat ortsspezifisch die Höhe der Sonnenbahn ablesen kann.

#### 6.3.4.1 Nomogramme und Tabellen:

Die einfache Anwendung des Vorhersagesystems wird, wenn man sich nicht der Gleichungen bedienen möchte, durch Tabellen und Nomogramme zusätzlich erleichtert. Im folgenden werden diese Tabellen und Diagramme - für besonnte und schattige Strecken getrennt - vorgestellt. Man kann aus ihnen sowohl den vom Patienten benötigten Kleidungsisolationwert als auch direkt den Vorhersagewert des thermischen Empfindens ablesen:

- 1) Für besonnte Strecken (nach Gleichung I):  
Gleichung I läßt sich vereinfacht darstellen und umformen als:  
$$e = PMV - a - b - c - d \quad (4)$$

Dabei werden die ersten drei Größen der Gleichung I in "a" zusammengefaßt. Die restlichen drei Variablen ergeben sich als "b", "c" und "d".  $1,6 I_{cl}$  wird als "e" bezeichnet.

Um den Parameter "a" zu erhalten, geht man mit den Werten für die Lufttemperatur  $t_a$  und Bewölkung B in Diagramm 37 ein und erhält daraus direkt "a".

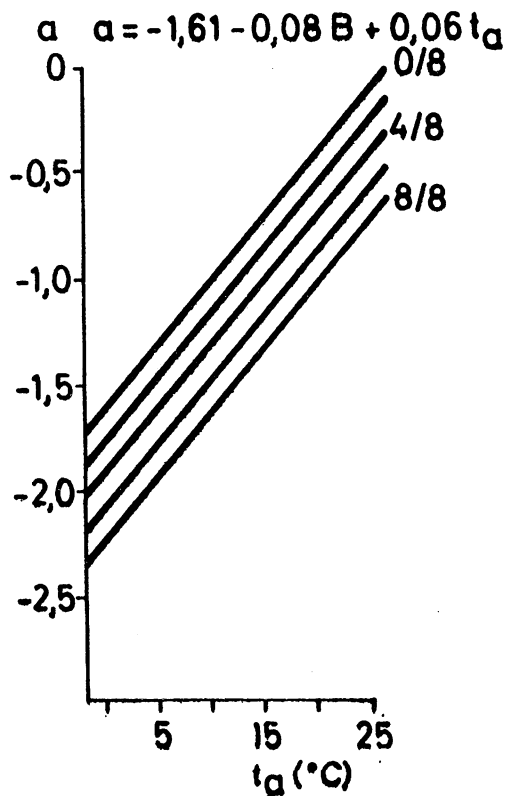


Abb. 37: Ermittlung der Größe "a" der Gleichung  $a = -1,61 - 0,08 B + 0,06 t_a$  aus Bewölkung B (1/8) und Lufttemperatur  $t_a (^{\circ}\text{C})$  bei besonnener Strecke.

Die Größe "b" entnimmt man bei Kenntnis der Sonnenhöhe aus Tabelle 15.

Die Variable "c" vertritt die Größe der Patienten und kann Tabelle 16 entnommen werden.

Sonnenhöhe $\gamma$ ( $^{\circ}$ ): 15	b : 0,32
20	0,42
25	0,52
30	0,63
35	0,74
40	0,84
45	0,95
50	1,05

Tab. 15: Erfassung des Parameters "b" bei Eingabe der Sonnenhöhe in Grad, bei besonnter Strecke.

Größe (cm):	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
c:	-1,82	-1,89	-1,95	-2,02	-2,08	-2,15	-2,21	-2,28	-2,34	-2,41
Größe (cm):	190	195	200							
c:	-2,47	-2,54	-2,60							

Tab. 16: Ermittlung von "c" aus der Größe des Probanden (bei besonnter Strecke).

Die Größe "d" entspricht dem Energieumsatz und wird aus Abbildung 38 bei Kenntnis des Gewichtes des Patienten, der Gehgeschwindigkeit und der Steigung direkt entnommen.

Subtrahiert man die so erhaltenen Werte für "a", "b", "c" und "d" von dem vorgegebenen Wert des thermischen Empfindens PMV, so erhält man die Größe "e".

Der gesuchte Kleidungsisolationswert  $I_{cl}$  ergibt sich, wenn man "e" durch 1,6 teilt.  $I_{cl}$  ergibt sich in clo-Einheiten (vgl. Tab. 2).

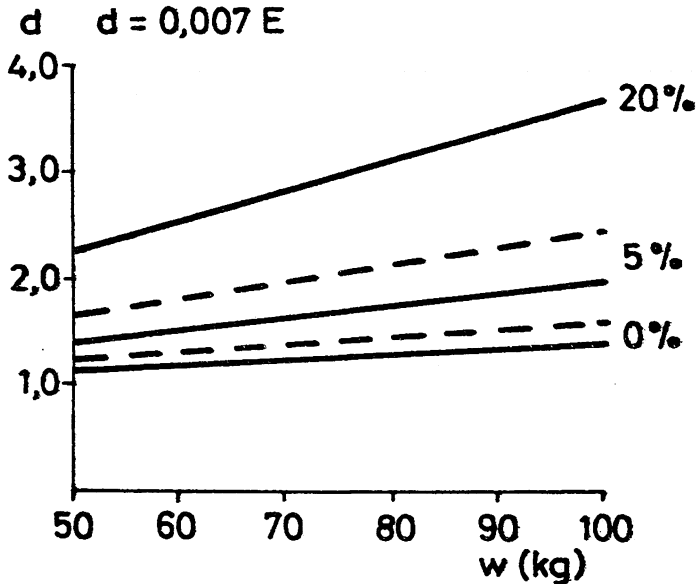


Abb. 38: Ermittlung des Parameters "d" aus der Beziehung  $d = 0,007 E$  mit Gewicht in kg, Gehgeschwindigkeit 1,6 km/h (durchgezogene Linie) und 2,4 km/h (gestrichelte Linie), bei ebener Strecke und Steigungen von 5 und 20 % (besonnte Strecken).

Auf diese Weise ist eine einfache Bestimmung der nötigen Bekleidung möglich, wenn ein Proband vom Kurarzt auf eine bestimmte Strecke geschickt und das erwartete thermische Empfinden vorgegeben wird.

Möchte man dagegen den Skalenwert des Empfindens PMV auf einer vorgegebenen Strecke bei vorgege-

bener Kleidung bestimmen, so verwendet man ebenfalls Abbildung 37 und 38 und die Tabelle 16.

Der Parameter "b" wird in diesem Fall jedoch nicht aus Tabelle 15, sondern aus folgendem Diagramm 39 bestimmt.

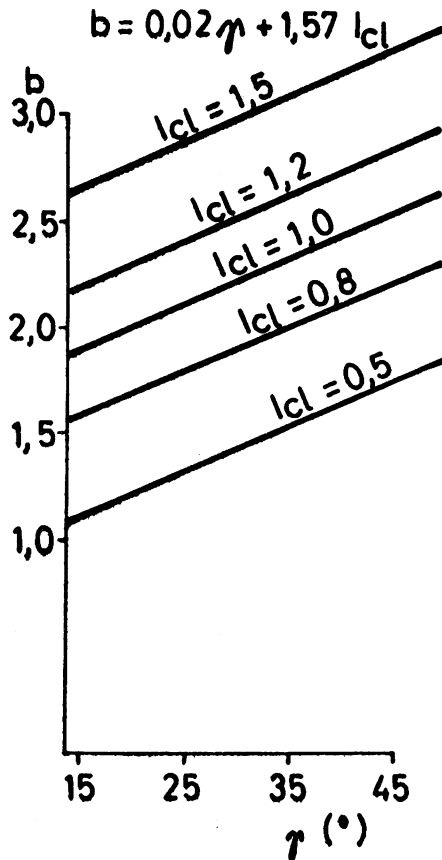


Abb. 39: Ermittlung der Größe "b" der Gleichung  $b = 0,02 \gamma + 1,57 I_{cl}$  aus Sonnenhöhe ( $^{\circ}$ ) und den Bekleidungswerten  $I_{cl}(clo)$ , bei besonnener Strecke und zur Bestimmung des thermischen Empfindens PMV.

Das zu erwartende thermische Empfinden PMV wird dann durch Addition der Parameter a, b, c und d in der Gleichung  $PMV = a + b + c + d$  berechnet.

2) Schattige Strecken (nach Gleichung II):

Gleichung II wird ebenfalls umgeformt und vereinfacht als  $i = PMV - f - g - h$  dargestellt.

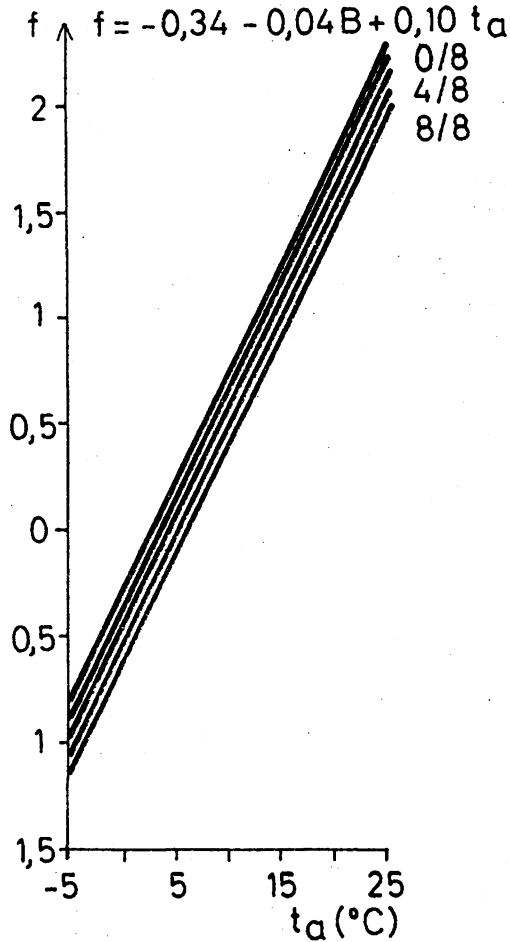


Abb. 40: Bestimmung der Größe "f" der Gleichung  $f = 0,34 - 0,04B + 0,10t_a$  aus Bewölkung B und Lufttemperatur  $t_a$  bei schattiger Strecke.

Dabei werden  $f$ ,  $g$  und  $h$  analog zu besonnten Strecken (Punkt 1) den Abbildungen 40 und 41 ( $f$  und  $h$ ) und Tabelle 17 ( $g$ ) entnommen. Teilt man schließlich  $i$  durch 1,77, so erhält man das gesuchte  $I_{cl}$  in clo-Einheiten. Zur Ermittlung des thermischen Empfindens. PMV verwendet man Abb. 40, 41 und 42. PMV wird dann durch die Gleichung  $PMV = f + g + h$  berechnet.

Größe (cm):	140	145	150	155	160	165	170
$g$ :	-2,24	-2,32	-2,40	-2,48	-2,56	-2,64	-2,72
Größe (cm):	175	180	185	190	195	200	
$g$ :	-2,80	-2,88	-2,96	-3,04	-3,12	-3,20	

Tab. 17: Ermittlung von " $g$ " aus der Körpergröße für schattige Strecken.

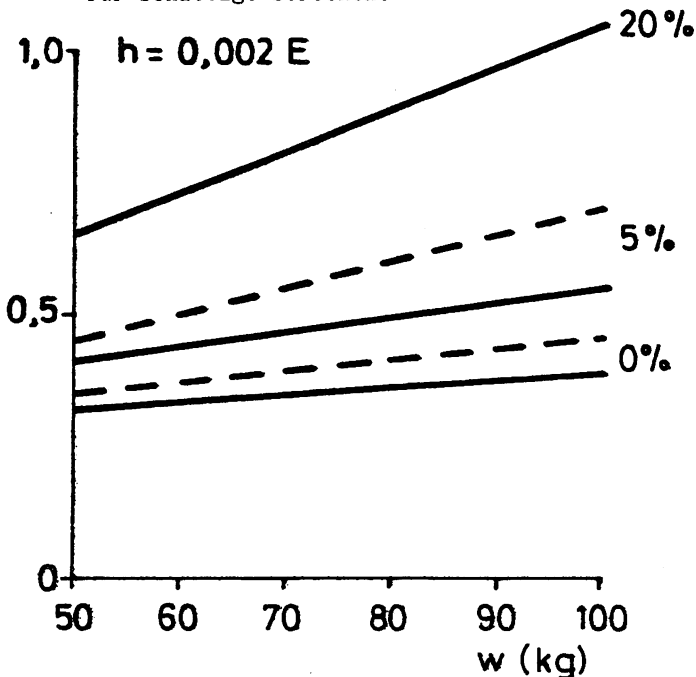


Abb. 41: Erfassung der Variablen " $h$ " aus der Beziehung

$h = 0,002$  E mit Gewicht in kg, Gehgeschwindigkeit 1,6 km/h (durchgezogene Linie) und 2,4 km/h (gestrichelte Linie) bei ebener Strecke und für die Steigungen 5 und 20 % (schattige Strecken).

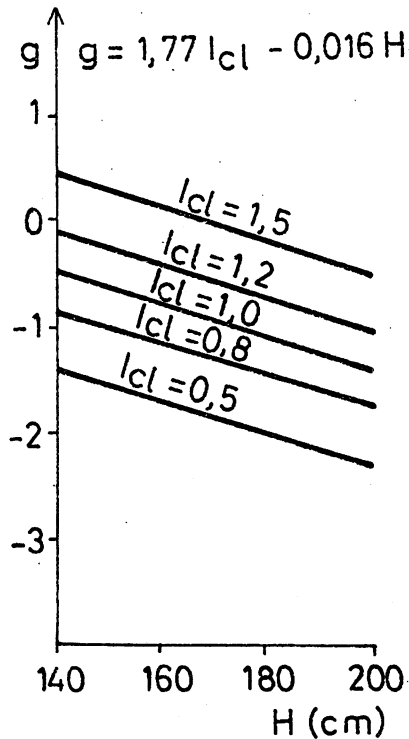


Abb. 42: Bestimmung der Größe "g" der Gleichung  $g = 1,77 I_{cl} - 0,016 H$  aus Bekleidungskoeffizienten  $I_{cl}$  ( $clo$ ) und Größe der Probanden  $H$  (cm) für schattige Strecken zur Vorhersage des thermischen Empfindens PMV.



3) Für alle Strecken (Gleichung III):

Gleichung III wird dargestellt als:

$$n = PMV - k - 1 - m$$

Wie bei Punkt 1) und 2) entnimmt man

k und m den Abbildungen 43 und 44 und

l aus Tabelle 18. Anschließend wird

n durch 1,5 geteilt um  $I_{cl}$  in clo-Einheiten zu erhalten.

Zur Vorhersage des thermischen Empfindens PMV verwendet man Abb. 43, 44 und

45. PMV ist dann  $k + l + m$ .

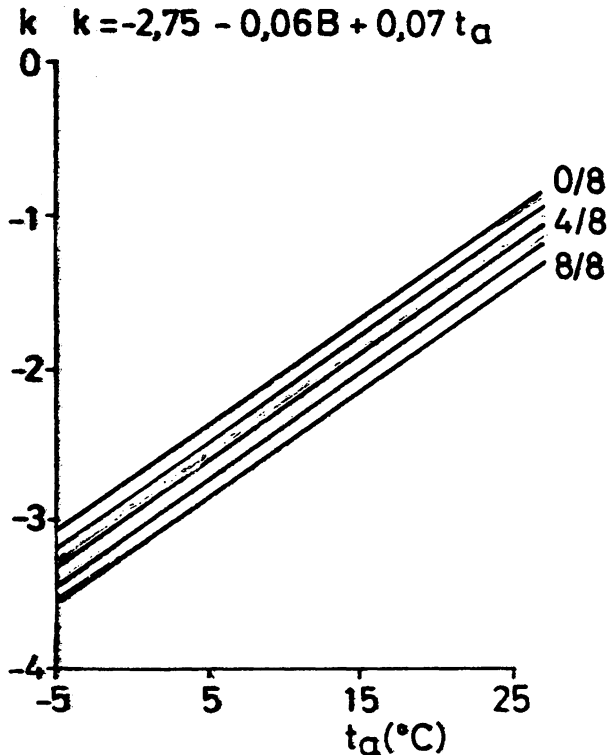


Abb. 43: Ermittlung der Größe "k" aus der Gleichung  $k = -2,75 - 0,06B + 0,07t_a$  aus der Bewölkung B (1/8) und der Lufttemperatur  $t_a$  (°C) für alle Strecken.

Sonnenhöhe $\gamma$ ( $^{\circ}$ ): 15	1: 0,24
20	0,32
25	0,40
30	0,48
35	0,56
40	0,64
45	0,72
50	0,80

Tab. 18: Erfassung des Parameters "1" bei Eingabe der Sonnenhöhe in Grad, für alle Strecken.

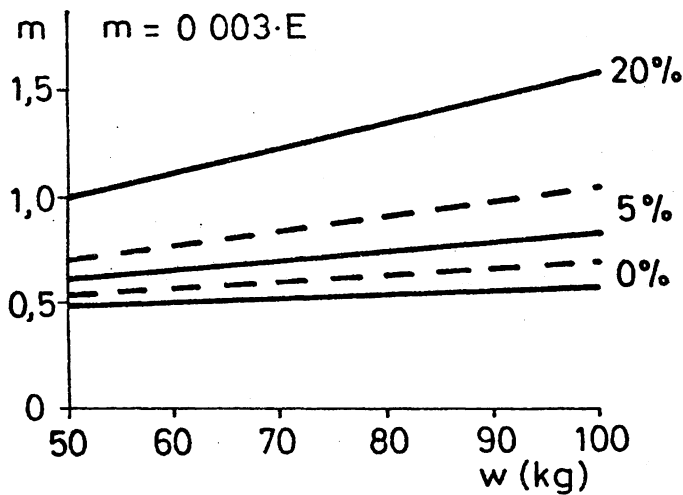


Abb. 44: Ermittlung der Größe "m" aus der Beziehung  $m = 0,003 E$ , mit Gewicht in kg, Gehgeschwindigkeit in km/h (1,6 km/h = durchgezogene Linie und 2,4 km/h = gestrichelte Linie) und die Steigungen 5 und 20 % für alle Strecken.

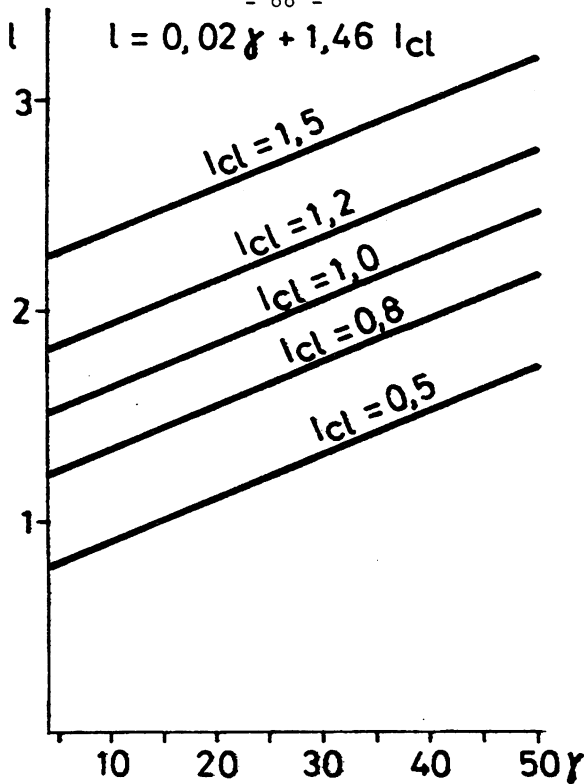


Abb. 45: Bestimmung von "l" aus der Gleichung  $l = 0,02 \gamma + 1,46 I_{cl}$  aus Sonnenhöhe ( $^\circ$ ) und Kleidungsisolation  $I_{cl}$  (clo) für alle Strecken, zur Bestimmung vom PMV.

#### 6.3.4.2 Vorhersagebeispiel:

Der Kurarzt schickt seinen Patienten auf eine Strecke mit 5 % Steigung, die mit 2,4 km/h begangen wird. Der Proband ist 70 kg schwer und 175 cm groß. Die Bewölkung wird bei halbbedeckten Himmel mit 4/8 festgelegt, die Lufttemperatur ist  $17^\circ\text{C}$  und die Sonnenhöhe beträgt  $30^\circ$ . Es wird eine leichte Wärmebelastung, also  $\text{PMV} = +1$  gewünscht. Die Gleichung für besonnte Strecken lautet:  $e = \text{PMV-a-b-c-d}$

Mit der Lufttemperatur  $t_a = 17^{\circ}\text{C}$  und der Bewölkung  $b = 4/8$  geht man in Diagramm 37 ein und erhält so  $a = -0,9$

Mit der Sonnenhöhe  $\gamma = 30^{\circ}$  ergibt sich aus Tabelle 15  $b = 0,63$ .

Die Größe des Patienten ist 175 cm, also gilt nach Tabelle 16  $c = -2,28$ .

Schließlich wird noch "d", das sich aus dem Gesamtenergieumsatz ergibt, für die Person in unserem Beispiel mit 70 kg, auf einer Strecke mit 5 % Steigung und mit 2,4 km/h Gehgeschwindigkeit (Abb. 38) abgelesen und man erhält  $d = 1,96$ .

Bei wiederholter Anwendung mit den gleichen Wegen und konstanten Gehgeschwindigkeiten, empfiehlt sich die Anlage einer Tabelle, bei der ein streckenspezifischer Faktor nur mit dem jeweiligen Körpergewicht multipliziert werden muß, um "d" zu erhalten.

Subtrahiert man die Variablen "a" bis "d" von dem vorgegebenen PMV-Wert, so ergibt sich für die Größe "e":

$$e = 1,0 + 0,9 - 0,63 + 2,28 - 1,96 = 1,59$$

Nun ist nur noch "e" durch 1,6 zu teilen und man erhält für die gesuchte Kleidungsisolation, die der Patient benötigt:

$$I_{cl} = 1,0$$

Um die gewünschte Wärmebelastung auf dem vorgegebenen Weg zu erreichen, muß der Patient in diesem Fall die einem korrekten Straßenanzug (vgl. Tab. 2) entsprechende Kleidung (beispielsweise Wanderkleidung mit Windjacke) tragen.

Sollte man zu niedrige Bekleidungsisolationen (z. B.  $I_{cl} = -1 \text{ clo}$ ) erhalten, so muß eine andere Strecke oder Tageszeit zur Begehung gewählt werden.

#### 6.3.5 Erreichtes und Ausblick:

Mit dem beschriebenen Gleichungssystem und den für die Anwendung gedachten Diagrammen und Tabellen konnte in dieser Arbeit ein Vorhersagemodell für das thermische Empfinden von Kurpatienten bei der Durchführung einer Terrainkur unter klimatischen Einflüssen entwickelt werden. Es ist für den täglichen Gebrauch in der kurärztlichen Praxis gedacht und einfach handzuhaben.

Die Gleichungen wurden aus Untersuchungsergebnissen in Garmisch-Partenkirchen, also empirisch abgeleitet; deshalb ist das System besonders für die Anwendung in diesem heilklimatischen Kurort oder unter ähnlichen Umständen geeignet. Für andere Terrainkurbedingungen kann dieses Gleichungssystem experimentell überprüft und gegebenenfalls ohne größeren Aufwand modifiziert werden. Bei stärkerem Windeinfluß an der See müßten die Gleichungen jedoch erweitert und verändert werden.

Es gibt zahlreiche Theorien und Erfahrungen über Einflußgrößen auf das thermische Befinden und die Thermoregulation, die um die praktische Handhabung der Gleichungen nicht zu gefährden, nicht in das System aufgenommen wurden:

Eine Auswirkung auf das Befinden hat z. B. der Höheneinfluß. Gerade bei einer Terrainkur im Gebirge "wandern" die Patienten in verschiedenen Höhenstufen. In Garmisch-Partenkirchen existieren beispielsweise Wege von 800 bis ca. 2600 m über NN.

Mit der Höhe ändern sich praktisch alle Komponenten der Lufthülle und vor allem des thermischen Wirkungskomplexes: Luftdruck, Sauerstoffpartialdruck, Lufttemperatur, Wasserdampfdruck der Luft und der luftchemische Wirkungskomplex. DREXEL (19) hat sich 1981 mit diesem Problem der Bioklimatologie der Höhe ausführlich befaßt.

Die Veränderungen die sich vollziehen, wenn ein Organismus wiederholt oder anhaltend einem bestimmten Klimafaktor ausgesetzt ist, werden Akklimatisation genannt und wirken auf die thermische Anpassungsfähigkeit des Menschen ein. So sind nach HENTSCHEL (31) in verschiedenen Klimabereichen lebende Menschen unterschiedlich trainiert. Dieser klimaphysiologische Effekt äußert sich darin, daß z. B. im Winter Bewohner eines Berglandes oder Küstenbewohner eine geringere Kälteempfindlichkeit aufweisen als Flachland- oder Mittelgebirgsbewohner. So wurde nachgewiesen, daß auch in unserem von besonderen Extremen freien Klimaraum dem Menschen eine mehr oder weniger starke thermische Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der klimatischen Reizstärke seines eigentlichen Lebensraums aufgeprägt wird.

Neben der durch Ortswechsel bedingten Akklimatisation sind wir durch den Ablauf der Jahreszeiten laufend gezwungen, uns auf die sich ändernden klimatischen Bedingungen einzustellen. So kommt es zu einer jahreszeitlich veränderlichen thermischen Empfindsamkeit des Menschen. Der Wechsel der Jahreszeit bringt eine sich ändernde Gewöhnung mit sich, die beispielsweise im Winter schon bei wesentlich geringeren

Temperaturen die Empfindung "warm" aufkommen läßt, als im Sommer. Im Frühjahr liegt so die Empfindungsschwelle für angenehme klimatische Reize infolge der vorherigen Gewöhnung an winterliche Bedingungen relativ niedrig und folgt nicht sofort der physikalischen Erwärmung. Die umgekehrten Verhältnisse liegen nach der Gewöhnung an sommerliche Verhältnisse vor. Die Empfindungsschwelle für angenehme klimatische Reize ist nach höheren Temperaturbereichen verschoben, so daß es schon bei einer relativ geringen Erniedrigung der Temperaturen zu einem starken Abfall der Empfindungshäufigkeit für klimatische Reize kommt (HENTSCHEL (31)). Dies ist bei der Durchführung einer Terrainkur, besonders im Herbst und Frühjahr zu beachten.

Nicht nur der jahreszeitliche, sondern auch der tageszeitliche Rhythmus könnte einen Einfluß auf das thermische Empfinden haben, ebenso wie die Körpertemperatur des Menschen im Laufe eines Tages Schwankungen ( $\pm 1^{\circ}$ ) unterliegt. FANGER (23) hält jedoch eine Änderung des Behaglichkeitsbereichs im Tagesverlauf für unwahrscheinlich, ebenso konnten von ihm keine Unterschiede zwischen dem Behaglichkeitsempfinden für die beiden Geschlechter nachgewiesen werden.

Auch das Alter der Patienten kann einen Einfluß haben. Nach ROBERTSHAW (60) ist das physiologische Thermoregulationssystem bei älteren Menschen häufig gestört und sie leiden an Hypo- oder Hyperthermie.

Auch die Zusammenhänge zwischen Körperbau, Wärmehaushalt und individueller Reaktion verdienen Beachtung. Nach PIRLET (57) gibt es unterschiedliche thermoregulatorische Verhaltensweisen, die mit der unterschiedlichen Entwicklung des Fettgewebes

einhergehen. Der Magere gibt unter den verschiedensten thermischen Bedingungen mehr Wärme ab als der Dicke; er kühlt vor allem zentral schneller aus und zeigt infolge des größeren Wärmeverlustes den intensiveren regulatorischen Einsatz seitens Stoffwechsel und Kreislauf.

Dadurch, daß einzelne Körperteile klimatischen Effekten ausgesetzt werden, kann die von ISSING/HENSEL (35) und HILDEBRAND et al (32) beschriebene Reaktion der "Allesthesie" in Gang gebracht werden. Dabei stellten die Autoren die Vermutung auf, daß die Erwärmung oder Abkühlung eines einzigen Körperteils das subjektive Empfinden stark beeinflußt.

Das allgemeine thermische Befinden kann so durch lokale Komfort oder Diskomfortbefindlichkeiten beeinflußt werden. FANGER (24) untersuchte 1980 diesen lokalen Diskomfort, der beispielsweise durch assymetrische Strahlungsfelder, den Kontakt mit warmen oder kalten Böden oder durch vertikale Lufttemperaturgradienten hervorgerufen werden kann.

Im Zeitverlauf jeder Kur kommt es am Ende der ersten und der dritten Woche zu einer reaktiven Phase (DIRNAGL, DREXEL, KLEINSCHMIDT (17)). Daß sich daraus Auswirkungen auf das thermische Befinden ergeben können, liegt auf der Hand. Schließlich sei im Rahmen einer medizinmeteorologischen Arbeit noch darauf hingewiesen, daß das thermische Empfinden eines Patienten je nach Art und Schwere seiner Erkrankung stark variieren kann. FAUST (25) beschäftigt sich ausführlich mit diesem Problem.



## VII. Zusammenfassung:

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit klimatischen Einflüssen auf die Bewegungstherapie im Kurort. Die Betrachtungen konzentrieren sich dabei auf das thermische Empfinden des Kurpatienten und dessen Vorhersage.

In den letzten Jahren wurden einige Modelle entwickelt; zur ausführlichen Diskussion fehlten aber Messungen mit Kurpatienten auf Teststrecken, über größere Zeiträume und unter verschiedenen Bedingungen.

Diese Studie verfolgte deshalb das Ziel, die Modelle in ihrer praktischen Anwendung zu testen und eine neue Vorhersagemöglichkeit des zu erwartenden thermischen Empfindens von Patienten während der Durchführung einer Terrainkur vorzustellen.

Die experimentellen Erhebungen wurden in Garmisch-Partenkirchen auf vier verschiedenen Kurübungsweegen mit 101 Patienten einer Kurklinik als Versuchspersonen durchgeführt. Die Untersuchungszeiträume lagen im Sommer (August/September) und Herbst (Oktober/November) von 1981 und 1982. Insgesamt konnten 1027 Meßphasen durchgeführt werden. Sie lieferten meteorologische und physiologische Daten ebenso wie Aussagen der Probanden über ihr thermisches Empfinden.

Die untersuchten Modelle zur Vorhersage des zu erwartenden thermischen Empfindens PMV (= Predicted Mean Vote) stoßen jedoch in ihrer Anwendung im Freiland noch auf Schwierigkeiten: Das thermische Empfinden der Probanden wurde nach diesen Modellen unterschätzt, d. h. als zu kühl beurteilt. Die Vorhersagen liegen in allen PMV-Bereichen etwa eine

halbe PMV-Stufe niedriger als die Aussagen der Versuchspersonen. Zusätzlich weisen die Ergebnisse eine große Streuung auf.

Auf Grund dieser Feststellungen wird in der vorliegenden Arbeit ein empirisches System zur Vorhersage des thermischen Empfindens, die "Befindensgleichungen" entwickelt.

Aus metabolischen, meteorologischen und persönlichen Parametern ergaben sich durch ein multiples, schrittweises Regressionsverfahren die für sonnige und schattige Wege getrennten Vorhersagegleichungen.

Hierbei wird das Befinden aus einer linearen Verknüpfung von Lufttemperatur, Bewölkung, Sonnenhöhe, Gesamternergieaufwand und Bekleidung errechnet.

Auf diese Weise wurde eine neue Vorhersagemöglichkeit des subjektiven thermischen Empfindens von Kurpatienten auf Kurübungswegen entwickelt, die für die tägliche Anwendung einfach zu handhaben ist. Es handelt sich um ein Vorhersagesystem, das im Mittel eine exakte Bestimmung des thermischen Empfindens zuläßt; es weist gleichzeitig gegenüber anderen Verfahren eine verringerte Streuung auf und ermöglicht damit eine genauere individuelle Vorhersage.

Die Gleichungen sind über einen weiten Bereich der Parameter gültig und deshalb in ihrer Anwendung kaum begrenzt.

Mit diesem Gleichungssystem läßt sich die Dosierung von Terrainkuren unter klimatischen Einflüssen festlegen und im Kurbetrieb anwenden.

Danksagung:

Diese Untersuchung entstand im Zusammenarbeit des Instituts für Medizinische Balneologie und Klimatologie der Universität München und der Kurdirektion von Garmisch-Partenkirchen.

Deshalb richtet sich mein besonderer Dank an Herrn Ltd. Akad. Direktor des Instituts für Balneologie und Klimatologie, Dipl.Phys. K. Dirnagl, der mich bei der vorliegenden Arbeit als Betreuer mit großem Engagement und persönlichen Einsatz unterstützt hat.

Ebenso danke ich dem Vorstand Herrn Prof. Dr. med. H. Drexel und allen Mitarbeitern des Institutes, die mir jederzeit hilfreich zur Seite standen. Weiter möchte ich dem Kurdirektor von Garmisch-Partenkirchen, Herrn K. Schuster, sowie der Kurklinik Dr. Beger mit der ärztlichen Leiterin Frau Dr. Vogel danken, ohne deren tatkräftige Unterstützung der experimentelle Teil der Arbeit nicht durchführbar gewesen wäre.

Mein Dank gilt auch dem Leiter des Instituts für atmosphärische Umweltforschung der Frauenhofer-Gesellschaft in Garmisch-Partenkirchen, Herrn Dr. R. Reiter, der freundlicherweise die Strahlungsmeßwerte zur Verfügung stellte.

Literaturverzeichnis:

- 1) Andersen L.K. : Kälte-Anpassung.  
Z. f. Phys. Med. 2: 117-132, 1970
- 2) Amelung W. : Medizinische Klimatologie.  
Drei Kronen-Druck und Verlag,  
Efferen b. Köln, 1970.
- 3) Aschoff J. : Temperaturregulation.  
In: Gauer, Kramer, Jung (Hrsg):  
Physiologie des Menschen. Bd. 2,  
Urban und Schwarzenberg, München, 1971.
- 4) Astrand P., : Textbook of Work Physiology.  
Rohdahl K. McGraw-Hill Book Company, New York,  
1977.
- 5) Barham N.J. : Mechanische Kinesinologie.  
Georg Thieme Verlag, Stuttgart,  
New York, 1980.
- 6) Bobbert A.C. : Energy expenditure in level and  
grade walking.  
J. Appl. Physiol. 15: 1015-1021, 1960.
- 7) Brebner D.F., : The diffusion of water vapour through  
Kerslake D., human skin.  
Waddell J.L. J. Physiol. 132: 225-231, 1956.
- 8) Brown A.C., : Energy metabolism.  
Brenzelmann G. In: Ruch T.C., Patton H.D.:  
Physiology and Biophysics: 1030-1049,  
19 th es. Philadelphia,  
W.B. Saunders Company, 1965.

- 9) Consolazio c.F. et al.: Environmental temperature and energy expenditures.  
J.Appl. Physiol. 18: 65-68, 1963.
- 10) Corcoran P.J. : Energy expenditure during ambulation. In: Downey J.A., Darling R.C.: Physiological Basis of Rehabilitation Medicine.  
W.B. Saunders Company, Philadelphia, 1971.
- 11) Cotes J.E., Meade F. : The energy expenditure and mechanical energy demand in walking.  
Ergonomics 3: 97-119, 1960.
- 12) Dean G.A. : An analysis of energy expenditure in level and grade walking.  
Ergonomics 8: 31-47, 1965.
- 13) Dempf U. : Unveröffentlichtes Manuskript.
- 14) Di Prampero et al : A biomechanical analysis of rowing.  
Proc. Reg. Congr. I.U.P.S., No 132, Brasov, 1970.
- 15) Dirnagl K. : Die Föhnkrankheit: Massensuggestion oder biometeorologisches Problem?  
Abbotempo Nr. 2: 28-33, 1967.
- 16) Dirnagl K. : Wetter und Schmerz.  
Z. f. Phys. Med. 2: 103-112, 1981.
- 17) Dirnagl K., : Analyse des Kurverlaufs.  
Drexel H., Münch. med. Wschr. 116: 529-536,  
Kleinschmidt J. 1974.



- 25) Faust V. : Biometeorologie.  
Hippokrates Verlag, Stuttgart, 1978.
- 26) Gagge A.P., : A practical system for the  
Burton A.C., description of the heat exchanges  
Bazett H.C. of man with his environment.  
Science Vol. 94: 428-430, 1941.
- 27) Ganong W.F. : Medizinische Physiologie.  
Springer Verlag, Berlin, 1972.
- 28) Givoni B., : Predicting metabolic energy cost.  
Goldman R.F. J. Appl. Physiol. 30: 429-433, 1971.
- 29) Givoni B., : Predicting rectal temperature response  
Goldman R.F. to work, environment and clothing.  
J. Appl. Physiol. 32: 812-822, 1972.
- 30) Hensel H. : Die Wärmeregulation des Menschen.  
In: Rost A.: Thermographie und  
Thermoregulation.  
Med. Lit. Verlagsgesellschaft mbH,  
Uelzen, 1980.
- 31) Hentschel G. : Die thermischen Empfindungen des  
Menschen unter natürlichen klima-  
tischen Bedingungen.  
Akademie-Verlag, Berlin, 1961.
- 32) Hildebrand G., : Temperaturregulation und thermi-  
Engel P., scher Komfort.  
Attia M. Z. f. Phys. Med. 1: 49-61, 1981.

- 33) Hille H., : Leistung, Puls- und Stoffwechsel  
Kienle D., von Kurpatienten beim Gehen und  
Kienle H. Ergometertraining.  
Med. Welt 28: 1119-1122, 1981.
- 34) Hollmann W., : Sportmedizin-Arbeits-und Trainings-  
Hettinger Th. grundlagen.  
F.K. Schattauer Verlag, Stuttgart,  
1976.
- 35) Issing K., : Temperaturempfindung und thermi-  
Hensel H. scher Komfort bei statischen Tem-  
peraturreizen.  
Z. f. Phys. Med. 11: 354-366, 1982.
- 36) Jendritzky G. : Ein einfaches Verfahren zur Vorher-  
sage der Wärmebelastung.  
Z. angew. Bäder u. Klimaheilk. 26:  
37-43, 1979.
- 37) Jendritzky G. : Zum thermischen Wirkungskomplex des  
Menschen.  
Promet 3/4: 33-42, 1982.
- 38) Jendritzky G. : Rasche Schwankungen der Lufttemperatur  
im Stadtgebiet von Freiburg i. Br. als  
Element des Bioklimas des Menschen.  
Freiburger Geographische Hefte 19, 1983.
- 39) Jendritzky G., : A model analysing the urban thermal  
Nübler W. environment in physiological sig-  
nificant terms.  
Arch. Met. Geoph. Biokl. 29: 313-326,  
1981.



- 40) Jendritzky G., : Bewegungstherapie im heilklima-  
Schmidt-Kessen W. tischen Kurort.  
Schriftreihe des Dt. Bäderverbandes  
43: 116-138, 1981.
- 41) Jendritzky G., : Ein objektives Bewertungsverfahren  
Sönning W., zur Beschreibung des thermischen  
Swantes H.J. Milieus in der Stadt- und Land-  
schaftsplanung ("Klima-michel-Mo-  
dell"). Beiträge Akademie für Raum-  
forschung und Landschaftsplanung,  
bd. 28.  
Hermann Schrödel Verlag, Hannover,  
1979.
- 42) Jessel U. : Das Regimen refrigerans in der  
Therapie der chronischen Bronchitis.  
Z. f. Phys. Med. 1: 27, 1978.
- 43) Jessel U., : Kurgastbezogene Klimadaten.  
Jungmann H. Z. f. Phys. Med. 5: 197-207, 1977.
- 44) Jung K. : Der Terraintest.  
Ther. d. Gegenw. 119: 168-184, 1980.
- 45) Jungmann H., : Kurgastbezogene Klimadaten.  
Jessel U. Z. f. Phys. Med. 5: 197-208, 1977.
- 46) Lambrecht W. : Lambrecht Meßgeräte, Übersichts-  
katalog. Wilh. Lambrecht KG, Göttin-  
gen, 1979.
- 47) Lehmann G. : Praktische Arbeitsphysiologie.  
Thieme Verlag, Stuttgart, 1953.
- 48) Leiner G., : Kardiale Rehabilitation im Terrain.  
Hofmann W. Unveröffentlichtes Manuskript.
- 49) Maree H. de : Sportphysiologie.  
Tropon, Köln- Mülheim, 1976.

- 50) Margaria R. : Energy cost of running.  
J. Appl. Physiol. 18: 367-370, 1963.
- 51) McDonald I. : Statistical studies of recorded energy  
expenditure of man. II. Expenditure on  
walking related to weight, sex, age,  
height, speed and gradient.  
Nutr. Abstr. Rev. 31: 739-762, 1961.
- 52) Miller A.T., : Influence of Body Type and Body Fat  
Blyth C. Content on the Metabolic Cost of Work.  
J. Appl. Physiol. 8: 139-141, 1955.
- 53) Mount L.E., : Heat loss from animals and man.  
Monteith J.L. London: Butterworth, 1974.
- 54) Morehouse L.E., : Physiology of Exercise, 1959.  
Miller A.T.
- 55) Passmore R., : Energy, work and leisure.  
Durnin J. Heinemann, London, 1967.
- 56) Peirce F.T., : The transmission of heat through  
Rees W.H. textile fabrics. II.  
Textile Inst. 37: 181, 1946.
- 57) Pirlet K. : Körperbau, Wärmehaushalt und in-  
dividuelle Reaktionsweise.  
Arch. Phys. Ther. 14: 11-26  
Leipzig, 1962.
- 58) Ralston H.J. : Energy speed relation and optimal  
speed during level walking.  
Intern. Z. Angew. Physiol. 17:  
277-283, 1958.

- 59) Ralston H.J. : Effects of immobilization of various body segments on energy cost of human locomotion. Prog. Intern. Congr. Ergonomics Assoc., Dortmund, 53-60, 1964.
- 60) Robertshaw D. : Man in extreme environments, problems of newborn and elderly. In: Cena K., Clark J.A.: Bio-engineering, thermal Physiology and Comfort. Elsevier Amsterdam, Oxford, New York, 1981.
- 61) Schmidt R.F., : Physiologie des Menschen. Thews G. Springer Verlag, Berlin, 1980.
- 62) Schnizer W., : Zum Bewegungstraining im Kurort. Kleinschmidt J. Heilbad und Kurort 4: 106-110, 1978. Drexel H.
- 63) Schuh A. : Menschliche Wärmebilanz und Empfindung von Patienten auf Kurübungs- wegen im Gebirge. Diplom-Arbeits in Meteorologie, München, 1982.
- 64) Shapiro Y., : Predicting Sweat Loss Response to Pandolf K.B., Exercise, Environment and Clothing. Goldman R.F. Eur. J. Appl. Physiol. 48: 83-96, 1982.
- 65) Sönning W. : Wettereinflüsse auf den Verlauf der chronischen (rheumatoiden) Polyarthrit- tis. Z. f. Phys. Med. 3: 157-159, 1981.

- 66) Sönning W. : Zur biosynoptischen Arbeitshypothese.  
Z. f. Phys. Med. 1: 2-5, 1983.
- 67) Sönning W., : Ein Verfahren zur Beschreibung des  
Jendritzky G. thermischen Umweltmilieus des Menschen.  
Zbl. Bakt. Hyg., I. Abt. Orig. B 169:  
391-397, 1979.
- 68) Soule R.G., : Energy cost of loads carried on the  
Goldman R.F. head, hands or feet.  
J. Appl. Physiol. 27: 687-690, 1969.
- 69) Soule R.G., : Terrain coefficients for energy cost  
Goldman R.F. prediction.  
J. Appl. Physiol. 32: 706-708, 1972.
- 70) Spitzer H., : Tafeln für den Kalorienumsatz bei  
Hettinger Th. körperlicher Arbeit.  
Beuth-Vertriebs GmbH, Berlin, 1969.
- 71) Spitzer H., : Tafeln für den Energieumsatz bei  
Hettinger Th., körperlicher Arbeit,  
Kaminsky G. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1982.
- 72) Teitlebaum A., : Increased energy cost with multiple  
Goldman R.F. clothing layers.  
J. Appl. Physiol 32: 743-744, 1972.
- 73) Ulmer H.V. : Zur Methodik, Standardisierung und  
Auswertung von Tests für die Prü-  
fung der körperlichen Leistungsfähig-  
keit.  
Lövennicht. Dt. Ärzteverlag, 1975.

- 74) Van der Walt W.H.,       : An equation for prediction of  
Wyndham C.H.               energy expenditure of walking and  
                              running.  
                              J. Appl. Physiol. 5: 559-563, 1973.
- 75) Wirths W.               : Die Relation von Arbeits-und Grund-  
                              umsatz zum Gesamtumsatz bei älteren  
                              Personen mit körperlicher Belastung.  
                              Gerontologia 8: 209-232, 1963.
- 76) Wirths W.               : Energieumsatz bei muskulärer Arbeit.  
                              Akt. Ernährung 2: 46-50, 1977.  
                              Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- 77) Wyndham C.H.           : The influence of Body Weight on Energy  
                              Expenditure on an Road and on a Tread-  
                              mill.  
                              Int. Z. angew. Physiol. 29: 285-292,  
                              1971.
- 78) Wyndham C.H.,       : Walk or jog for health I.  
Strydom N.B.,           S.A. Medical Journal 45: 50-53,  
Tydskif M.               1971.

## Lebenslauf

22.8.1956	Geboren in München Vater: Dr. Rudolf Schuh, wissenschaftlicher Mitarbeiter, Hoechst AG Mutter: Liselotte Schuh, geb. Zingerle, Hausfrau
ab 9.1963	Grundschule Fürstenrieder Straße, München
ab 9.1967	Louise-Schröder Gymnasium, München
25.6.1976	Abitur
ab 9.1976	Studium der Meteorologie, Universität München
2.6.1982	Diplom in Meteorologie
ab 6.1982	Dissertation am Institut für Med. Balneologie und Klimatologie der Universität München