

4. Diskussion

4.1. Kritik der Methoden

In der Literatur sind bisher viele mögliche Einflussfaktoren auf die Evaporation beschrieben worden. Es sind vor allem äussere Faktoren sowie Beeinflussungen durch Individuum und das Messverfahren selbst. Die wichtigsten Einflussfaktoren sollen vor der genaueren Betrachtung noch einmal kurz skizziert werden.

Zunächst müssen mögliche Veränderungen aufgrund der Messung, die einen Eingriff in den Versuchsablauf darstellt, berücksichtigt werden. Auch wenn die Sonde des Tewameters TM 210 besonders klein ist, wird unvermeidbar in die mikroklimatischen Verhältnisse der Haut eingegriffen (Kapitel 4.1.1., Seite 71).

Individuell abhängig sind die Schweisdrüsenaktivität, deren Verteilung und dessen Trainingszustand, die emotionale Verfassung des Probanden sowie der Zustand des Stratum corneum (Kapitel 4.2., Seite 79 und Kapitel 4.3.2., Seite 88). Des weiteren spielt auch die Jahreszeit und die unterschiedliche Vorbereitung der Versuchspersonen eine Rolle im Bezug auf die Ergebnisse (Pinnagoda et al. 1990).

Als wichtige äussere Umweltfaktoren kommen Luftströmungen, Umgebungstemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, atmosphärischer Luftdruck (Grice et al. 1972, Thiele et al. 1972) in Betracht. Die Hauttemperatur unterliegt nur geringfügig individuellen Schwankungen; im wesentlichen wird sie von der Umgebungstemperatur, Wärmestrahlung, Konvektion und Thermoregulation beeinflusst (Grice und Bettley 1967, Grice et al. 1971). Ausführliche Diskussion im Kapitel 4.1.2. „Die Bestimmung der Temperatur im Messzylinder“ (Seite 75).

4.1.1. Die Bestimmung der Evaporation

Die ersten Versuche zur Hautwasserabgabe machte der Physiker Sanctorius Sanctorii (1720) aus Padua Ende des 17. Jahrhunderts mit Hilfe einer Balkenwaage im Selbstversuch. Es gelang ihm bereits im Jahre 1701, Gewichtsveränderungen durch Nahrungsaufnahme und Hautwasserabgabe nachzuweisen. Mit modernen Körperwaagen (Messungenauigkeit von $100 \pm 0,1$ kg) und einer Bestimmung der über den Respirationstrakt abgegebenen Gewichtsanteile kann die PIC relativ genau

bestimmt werden (Kaufmann et al. 1955). Diese Methode wird wegen ihrer fehlenden räumlichen und schlechten zeitlichen Auflösung nur noch für wenige spezielle Fragestellungen, wie z.B. die Bilanzmessung, verwendet. Um genauere Aussagen über die Evaporation an spezifischen Hautarealen machen zu können, wurde eine entweder ventilerte oder unventilierte Kammer entwickelt, die luftdicht auf die zu messende Hautstelle aufgesetzt wurde (Scott et al. 1982).

Methoden zur Bestimmung der Evaporation

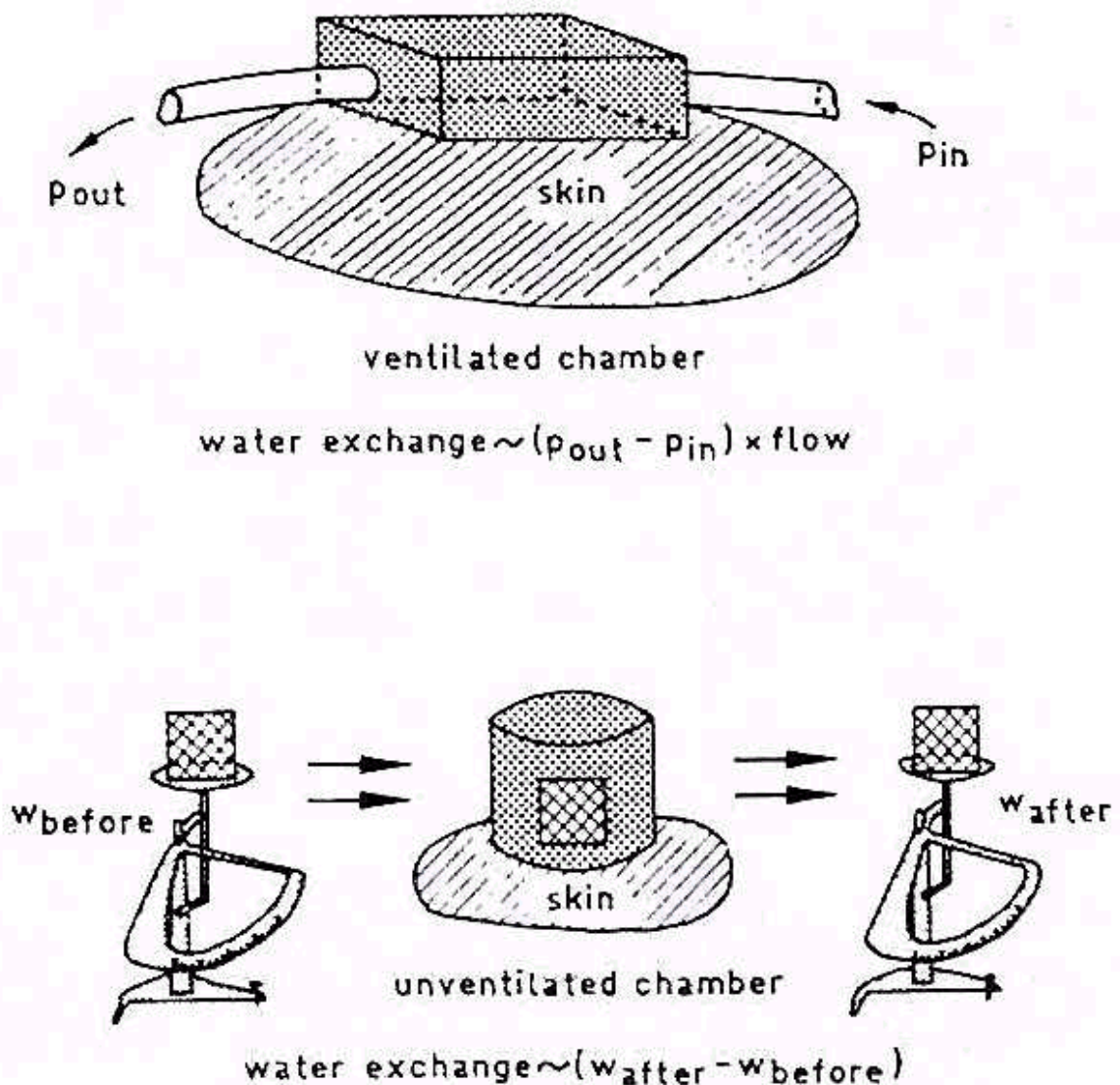


Abbildung 40: Prinzip und Methoden der ventilerten und unventilerten Kammer (Nilsson 1977).

Unventilierte Kammer (Abbildung 40, Seite 72)

Die Evaporation wird bei dieser Methode mit Hilfe von hygroskopischem Salz, z.B. 10 g CaCl_2 bestimmt. Der in der Messkammer entstehende Wasserdampf tritt mit dem hygroskopischen Salz entweder direkt in der Kammer in Kontakt oder wird in regelmässigen Abständen mittels einem Rohrsystem über die Salze ausserhalb der Kammer geleitet. Anschliessend kann die Evaporation des Hautareals innerhalb der Messkapsel über die Gewichtszunahme des ursprünglich trockenen Salzes durch Wasseraufnahme bestimmt werden (Ogawa 1987, Shahidullah et al. 1969).

Um den Messfehler unter 10 % zu halten, wird eine Messdauer von mindestens 20 min benötigt. Aufgrund der sich daraus ergebenden geringen Messrate können keine kurzfristigen Schwankungen registriert werden. Weitere Messungenauigkeiten können durch das sich ändernde Mikroklima an der Hautoberfläche und die schwer zu bestimmende relative Luftfeuchtigkeit in der Messkapsel entstehen. Der grösste Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass die Haut okkludiert wird und deswegen stark ansteigende Werte der Evaporation, wie z.B. nach der Bestrahlung mit dem Lichttherapiegerät Bioptron II, nicht gemessen werden können (Pinnagoda et al. 1990).

Ventilierte Kammer (Abbildung 40, Seite 72)

Mit dieser Methode können genauere Messergebnisse erzielt werden, das Messprinzip ist allerdings mit einem höheren apparativen Aufwand verbunden (Ghaddar 1992, Kligman 1964). Ein konstanter Gasstrom mit bekanntem Wassergehalt und bekannter Geschwindigkeit wird über ein durch die Messkammer definiertes Hautareal geleitet. Durch das bekannte Gasvolumen pro Zeiteinheit kann aufgrund der Wasserdampfdruckdifferenz zwischen ein- und ausströmendem Gas die vom Hautareal in der Messkammer abgegebene Wassermenge bestimmt werden. Als Trägergase können feuchte Gase, wie z.B. konditionierte Luft (Ogawa et al. 1981), oder trockene Gase, z.B. getrockneter Stickstoff (Grice und Bettley 1967, Kuypers und Cotton 1972), verwendet werden. Eine Zunahme des Wassergehaltes kann dann in der nachgeschalteten oder parallelen Analyseeinheit gravimetrisch mittels IR-Strahlung (Burch und Windsor 1944) oder elektrohygroskopisch aufgrund Wasserdampfgehalt abhängiger Leitfähigkeit von Lithiumbromid (Bettley und Grice 1965, Lamke 1970) bestimmt werden.

Ein grosser Nachteil dieser Methode ist die erzwungene Konvektion des zur Wasseraufnahme verwendeten Trägergases. Es wurde ausserdem auf eine mögliche vermehrte Wasserabgabe durch einen veränderten Dampfdruckgradienten aufgrund des verwendeten trockenen Trägergases hingewiesen (Hattingh 1972).

Bestimmung der Evaporation mittels Dampfdruckgradient

Der ventilierten und unventilierten Kammer gemeinsam sind die Nachteile des hohen apparativen Aufwandes, die lange Ruhigstellung des zu messenden Hautareals und die Veränderung des Mikroklimas über der Hautoberfläche. Besonders das Mikroklima in unmittelbarer Nachbarschaft zur Haut hat grossen Einfluss auf die Messergebnisse, da die Barrierefunktion der Haut durch mögliche Veränderungen massgeblich beeinflusst wird (Wu et al. 1983).

Wasserdampfdruck über der Hautoberfläche

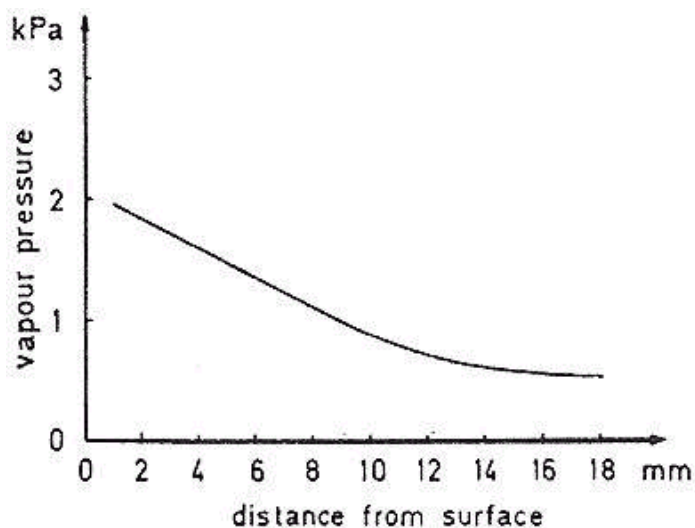


Abbildung 41:

Dargestellt ist der Wasserdampfdruck über einer Salzlösung in Abhängigkeit zur Oberflächenentfernung (Nilsson 1977). Die Elektrolytkonzentrationen der Salzlösung entsprechen dabei der Zusammensetzung des Schweißes unter Standardbedingungen.

G.E. Nilsson (1977) entwickelte ein neues Verfahren, dass auf der Schätzung des Wasserdampfdruckgradienten in unmittelbarer Nachbarschaft zur Haut beruht (Abbildung 41, Seite 74). Die Messungen des neuen Verfahrens waren mit einem sehr geringen apparativen Aufwand verbunden, da sie mit einem offenen Hohlzylinder durchgeführt wurden, wodurch eine Beeinflussung des Mikroklimas über der Haut weitestgehend vermieden werden konnte. Weitere Vorteile waren eine

leichte Handhabung und die aufgrund der kurzen Messdauer hohe Frequenz der ermittelten TEWL-Werte sowie die Möglichkeit, weitere Parameter in demselben Hautareal zu bestimmen. In der vorliegenden Arbeit wurde mit dem Tewameter TM 210 der Firma Courage & Khazaka Electronic GmbH, das auf dem von G.E. Nilsson (1977) entwickelten Verfahren beruht, die Evaporation als TEWL und die Temperatur gemessen.

Die Sonde und folglich auch die gemessene Evaporation kann nicht zwischen Perspiratio sensibilis und Perspiratio insensibilis differenzieren. Die Probanden reagieren in den Experimenten auf die VIP-Lichttherapie unterschiedlich intensiv, sowohl mit einer Erhöhung der PIC als auch mit einer verstärkten Schweißdrüsenaktivität. Eine synergetische Erhöhung von PIC und Schweißdrüsenaktivität kann aufgrund der Überlagerung durch die verhältnismässig stärkere Beeinflussung der Schweißabgabe nicht belegt werden, ist aber wahrscheinlich.

4.1.2. Die Bestimmung der Temperatur im Messzylinder

Vor der Diskussion zur Temperaturbestimmung sei noch einmal ausdrücklich erwähnt, dass die Sonde nicht die unmittelbare Hauttemperatur misst. Mit dem Tewameter kann lediglich die Temperatur, als Mass für den Wärmezustand, im Messzylinder unmittelbar über der Hautoberfläche ermittelt werden. Dieser Temperaturwert ist zwar abhängig vom Wärmegrad der Hautoberfläche, nicht aber mit der Hauttemperatur identisch. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf nur von der Temperatur gesprochen die, abhängig vom Wärmegrad der Hautoberfläche, lediglich eine Abschätzung bezüglich der Hauttemperatur zulässt.

Neben der z. B. körpereigenen Thermoregulation haben auch die unmittelbar die Haut umgebenden Luftschichten, die Körperstrahlung und die klimatischen Verhältnisse einen Einfluss auf die Temperatur. In diesem Zusammenhang sind sowohl die Konvektion als auch die Evaporation zu nennen. In Bezug auf die Konvektion wird zwischen freier (free convection) bei stehender Luft und erzwungener (forced convection) bei bewegter Luft unterschieden. Sie ist abhängig vom atmosphärischen Luftdruck (Höhe) und der Strömungsgeschwindigkeit der Luft (Büttner 1934). Freie Konvektion entsteht aufgrund einer angenommen unbewegten Luftschicht, die den menschlichen Körper umgibt und isoliert (Miheev und Miheeva

1977). Diese Luftschicht, abhängig vom atmosphärischen Luftdruck, nimmt mit der Höhe zu und führt folglich zu einer Abnahme der Konvektionsrate (Kandjov 1999). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 42 (Seite 76) graphisch dargestellt (C1).

Veränderung der höheabhängigen konvektiven und evaporativen Wärmeabgabe

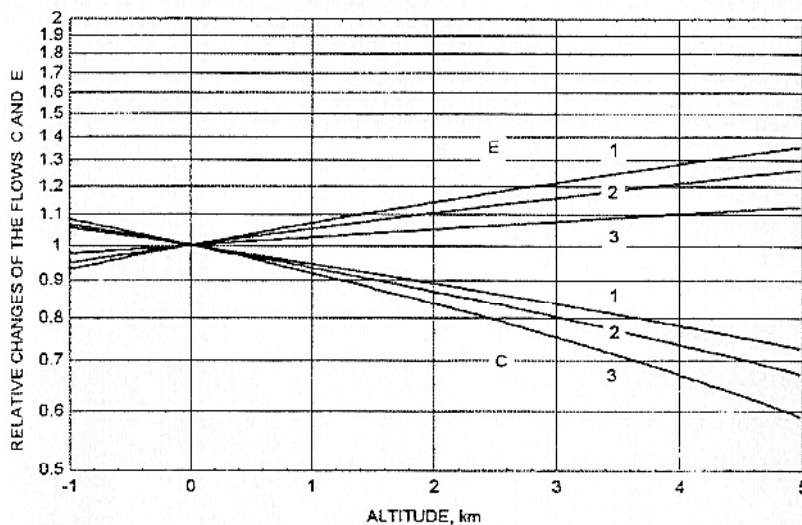


Abbildung 42:

Dargestellt sind die höheabhängigen Veränderungen der konvektiven (C) und evaporativen (E) Wärmeabgabe im Vergleich zur Meereshöhe. In Abhängigkeit von der Luftströmungsgeschwindigkeit ergeben sich die Geraden 1 (Freie Konvektion), 2 (Erzwungene Konvektion I) und 3 (Erzwungene Konvektion II). (Kandjov 1999).

Die Geschwindigkeit der Luftströmung beeinflusst die Dicke der unbewegten Luftschicht und ist der entscheidende Parameter für die erzwungene Konvektion. Die Abbildung 42 (Seite 76) zeigt, dass sich in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit unterschiedliche Werte für die erzwungene Konvektion (C2 und C3) ergeben (Kandjov 1999). Angegeben sind die Berechnungs-Formeln für einen Geschwindigkeitsbereich $[v]$ von $0,2 \leq v \leq 2$ m/s (I) und $v > 2$ m/s (II). In gleicherweise ist auch die evaporative Wärmeabgabe von der Luftströmungsgeschwindigkeit abhängig und unter E1 - E3 dargestellt (Abbildung 42, Seite 76). Die Formeln für die Berechnungsgrundlagen sind der Tabelle 3 (Seite 77) zu entnehmen. Der Hohlzylinder der Sonde konnte Einflüsse externer Störfaktoren, wie Luftturbulenzen, möglichst gering halten, aber nicht alle Störfaktoren verhindern. Es ist ausserdem anzunehmen, dass es durch aufsetzen der Sonde zu einer Zunahme der unbewegten Luftschicht über der Hautoberfläche kommt. Ein Indiz hierfür können die Messergebnisse bei kontinuierlich aufgelegter Sonde der Serie B1 & B2 Gesamt (Abbildung 26, Seite 56) sein. Aufgrund verminderter erzwungener Konvektion

bedingt durch die verminderte Luftströmung kommt es zu einem allmählichen Anstieg der Temperaturkurve im Messzylinder mit Sättigungscharakter.

Formeln für die Berechnung der Höheabhängigen konvektiven [h_c] und evaporativen [h_e] Wärmeabgabe

| | Konvektive Wärmeabgabe [h_c] | Evaporative Wärmeabgabe [h_e] |
|--|---|---|
| Freie Konvektion | $h_c = 1,78 (\Delta T)^{0,25} \times (p/p_0)^{0,5}$ angegeben in [$W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$] | $h_e = 3,08 (\Delta T)^{0,25} \times (p/p_0)^{0,5}$ angegeben in [$W m^{-2} hPa^{-1}$] |
| Erzwungene Konvektion I [$0,2 \leq v \leq 2$ m/s] | $h_c = 6,88 v^{0,618} \times (p/p_0)^{0,618}$ [$W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$] | $h_e = 11,35 v^{0,618} \times (p/p_0)^{0,382}$ [$W m^{-2} hPa^{-1}$] |
| Erzwungene Konvektion II [$v > 2$ m/s] | $h_c = 6,08 v^{0,805} \times (p/p_0)^{0,805}$ [$W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$] | $h_e = 10,0 v^{0,805} \times (p/p_0)^{0,195}$ [$W m^{-2} hPa^{-1}$] |

Tabelle 3: Mit den Formeln kann die konvektive und evaporative Wärmeabgabe in Abhängigkeit von der Höhe berechnet werden (Kandjov 1999).

h_c = Koeffizient für die Wärmeabgabe durch Konvektion [$W m^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$]

h_e = Koeffizient für die Wärmeabgabe durch Evaporation
[$W m^{-2} hPa^{-1}$]

p = Luftdruck in der Höhe h (km) [hPa]

p_0 = Luftdruck auf Meereshöhe (0 km) [hPa]

ΔT = Temperaturunterschied zwischen Hautoberfläche und der darüber liegenden unbewegten Luftschicht [$^\circ C$]

v = Strömungsgeschwindigkeit der bewegten Luft [m/s]

Ursache hierfür ist also wahrscheinlich eine Ansammlung der an der Hautoberfläche erwärmten Luft im Hohlzylinder vergleichbar mit der Zunahme der isolierenden Luftschicht in der Höhe (Abbildung 42, Seite 76). Obwohl die Sonde des Tewameters TM 210 ein offenes System ist, kommt es zu einer Veränderung des Mikroklimas über der Haut, belegt durch den exponentiellen Temperaturanstieg.

Ein völliges Ausschalten aller Einflüsse auf das Mikroklima über der Haut ist auch durch das von G.E. Nilsson (1977) entwickelte Verfahren wahrscheinlich nicht möglich. In der Serie B1 & B2 Gesamt (Abbildung 26, Seite 56) zeigte sich unmittelbar nach der Bestrahlung mit dem Lichttherapiegerät Bioptron II bei kontinuierlich aufgelegter Sonde bezüglich der Temperatur ein asymptotischer Anstieg. Der gleiche Anstieg zeigte sich während der erweiterten Kontrollmessung der Serie B2 (Abbildung 36, Seite 65) mit ebenfalls kontinuierlich aufgelegter Sonde. Ein Vergleich der beiden Kurven ergab, dass die Temperaturkurve nach der Bestrahlung signifikant ($p < 0,05$) um durchschnittlich 1°C erhöht war.

Es ist jedoch auch ein Temperaturanstieg aufgrund der veränderten Körperposition denkbar. Einen Anhaltspunkt dafür liefert die Leermessung der Serie B3 (Abbildung 35, Seite 65), bei der sich die Probanden vor der ersten Messung bereits 10 min auf der Liege befanden. Im Vergleich mit den Kontrollwerten der anderen Serien, die unmittelbar nach dem Hinlegen vor der jeweiligen Bestrahlung bestimmt wurden, ist die Temperatur um ca. $1,2^{\circ}\text{C}$ erhöht. Diese erhöhte Temperatur bleibt während den folgenden 10 min bestehen und nimmt danach bis zum Ende der Messung nach 62 min kontinuierlich ab.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ist nicht auszumachen ob der Temperaturanstieg durch das Mikroklima innerhalb des Sondenkopfes oder aufgrund reaktiver Wärmebildung in leicht bekleidetem Zustand in der waagerechten Körperposition bedingt ist.

4.2. Einflussfaktoren auf die Evaporation

4.2.1. Gesamtfettgehalt der Hautoberfläche

Die Talgdrüsen sind zum grössten Teil mit der äusseren epithelialen Wurzelscheide der Haaranlage assoziiert. Der Sekretionstyp ist holokrin, da der zelluläre Lipidinhalt durch Nekrosen in die Wurzelscheide gelangt (Stevens und Lowe 1992). Anzahl, Grösse und Aktivität ist neben der Lokalisation auch vom Alter abhängig. Ihre Anzahl ist besonders hoch auf Stirn und Kopfhaut, eher gering auf den Extremitäten, und sie fehlen in der Leistenhaut, Palma Manus und Planta Pedis. Im Kindesalter sind sie weitestgehend inaktiv und werden erst mit der Pubertät grösser und sekretorisch aktiv (Stevens und Lowe 1992). Aufgrund der Tatsache, dass die Sebumproduktion meist erst mit dem Erreichen der Pubertät eintritt, wird, im Gegensatz zu anderen Säugetieren, dem Sebum beim Menschen keine biologische Bedeutung mehr beigemessen (Kligman 1963).

Die hormonell gesteuerte Sebumsekretion hat keine bedeutende Funktion mehr und beeinflusst als wasserabstossendes Talgdrüsensekret (Sebum), bestehend aus Triglyzeriden und komplexen Wachsen, erst ab einem unphysiologisch hohen Gesamtfettgehalt der Hautoberfläche von 3,5 mg/cm² die Wasserbarriere der Haut und somit die Evaporation (Kligman 1963). In einem weiteren Experiment zur Wasserbarriere der Haut wurde durch künstliches Einfetten der Einfluss des Gesamtfettgehalts der Hautoberfläche simuliert. Es konnte nachgewiesen werden, dass ein starker Fettgehalt auf der Haut effektiv die Wasserbarriere verstärkt, auch wenn hierfür unphysiologische Fettmengen nötig waren (Bauwens 1994). Grössere Einflüsse durch den Gesamtfettgehalt der Hautoberfläche auf die Evaporation sind unwahrscheinlich, da bei allen Probanden der Lokalisation entsprechend geringe Werte für den Gesamtfettgehalt der Hautoberfläche bestimmt wurden.

4.2.2. Stratum corneum

Nach dem Absterben der Keratinozyten bilden im Zytoplasma enthaltenes Keratohyalin und Tonofibrillen die Keratinschuppen der zellfreien Oberschicht, das Stratum corneum. Vernetzt werden die Keratinschuppen mit grosser

Wahrscheinlichkeit von den sogenannten Keratinosomen, bestehend aus hydrophoben Glykophospholipiden, wodurch die Haut relativ wasserabstossend wird (Stevens und Lowe 1992).

Die experimentellen Untersuchungen zu Lokalisation und Mechanismus der Wasserbarriere der Haut konzentrierten sich auf das Stratum corneum der Epidermis. Die einzelnen Schichten des Stratum corneum konnten mittels eines Klebebands bei der sogenannten „tape stripping“ Methode sukzessiv abgelöst werden. Mit einer anschließenden Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass alle Schichten zu gleichen Teilen zur Wasserbarriere beitragen (Kligman 1964). Bei einem horizontal in 2 gleiche Komponenten geteilten Stratum corneum werden in beiden Teilschichten die gleichen TEWL-Werte gemessen (Scheuplein 1978). Ein plötzlicher und starker Wasserverlust ergibt sich erst nach Entfernung der letzten Schichten des Stratum corneum (Scheuplein und Blank 1971).

Die Wasserdurchlässigkeit des Stratum corneum ist also nicht von der Dicke, sondern, wie weitere Versuche zeigten, von der Anzahl der enthaltenen hydrophoben Glykophospholipide und deren Anordnung abhängig (Schurer et al. 1991, Lotte et al. 1987). Spätere Experimente ergaben jedoch keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Anzahl der im Stratum corneum enthaltenen hydrophoben Glykophospholipide und der Evaporation (Abraham und Downing 1989). Entscheidend ist nicht die Anzahl, sondern die kristalline Anordnung der geraden, im wesentlichen gesättigten, hydrophoben Glykophospholipidketten und die Konformation ihrer Alkylketten (Downing et al. 1987, Potts und Francoeur 1990).

Experimentell konnte nachgewiesen werden, dass eine Behandlung der Hautoberfläche mit Keratin angreifenden Substanzen nur eine geringe Zunahme der Evaporation bewirkt (Matoltsy et al. 1968). Wird die Hautoberfläche dagegen mit Lösungsmitteln wie Äther oder Alkohol entfettet, kommt es zu einem, wenn auch zeitlich begrenzten, starken Anstieg der Evaporation (Baartz 1996, Bauwens 1994, Matoltsy et al. 1968).

4.2.3. Blutvolumen, Blutdruck, körperliche und mentale Belastungen

Extreme Hitzebelastungen führen zu einer Verlagerung von 50-75% des Herzminutenvolumens in die akralen Hautgefäße (Rowell 1983). Unter hypovolämischen

Verhältnissen kommt es jedoch auch unter Hitzebelastungen zu einer peripheren Vasokonstriktion (Johnson et al. 1973). Hypovolämische Zustände führen des Weiteren zu einem Absinken der Körpertemperatur, insbesondere der Körperschale. Hierdurch können möglicherweise weitere evaporative Wasserverluste verhindert werden (Harrison et al. 1978). Unterstützt wird diese Annahme durch die Veränderungen der Plasmaosmolalität (Nielsen 1974 Apr), des Plasmaspiegels von Natrium (Nielsen 1974 May) und des Plasmavolumens (Fortney et al. 1981).

Einen möglichen Zusammenhang zwischen Blutvolumen und der Schweissrate untersuchten C. Dodt et al. (1995) mittels eines künstlich erzeugten Unterdrucks an den unteren Extremitäten namens Lower Body Negative Pressure (LBNP). Im Bezug auf die Evaluation kardiovaskulärer Funktion handelt es sich bei der LBNP um ein anerkanntes und weit verbreitetes Verfahren (Wolthuis et al. 1974). Experimentell führte ein gegenüber dem Oberkörper an den unteren Extremitäten verminderter Luftdruck zwischen 5-10 mmHg zu einem leichten Abfall des zentralen Venendruckes (Johnson et al. 1974). Vergrösserte sich das Verhältnis zwischen den Luftdrücken über 20 mmHg, kam es zu einer Volumenverschiebung in die unteren Extremitäten (Dodt et al. 1995). Die Höhe des Blutdruckes hatte jedoch keinen Einfluss auf die Schweissrate, wodurch eine Beteiligung von Barorezeptoren weitestgehend ausgeschlossen werden konnte (Dodt et al. 1995). Wahrscheinlicher scheint eine Regulation der PIC durch das Blutvolumen zu sein, da es bereits ab einem Luftdruckunterschied von 5 mmHg zu einer Abnahme der sudomotorischen Aktivität in dem Hautareal kommt (Dodt et al. 1995).

Mentale und emotionale Stresssituationen können auch bei körperlicher Ruhe zu einem Anstieg sympathischer Nervenimpulse führen. Experimentell konnte anhand mikroneurographischer Untersuchungen diese Annahme durch einen Anstieg der vasokonstriktorischen und sudomotorischen Aktivität belegt werden (Bini et al. 1980). Einflüsse auf die Schweissrate können also auch durch den Höhenunterschied, Blutvolumen und die sudomotorische Aktivität entstanden sein.

4.3. Diskussion der Ergebnisse

4.3.1. Auswirkungen der Bestrahlung

Bei allen Probanden, dargestellt in der Serie Gesamt (Abbildung 13, Seite 38) kommt es nach einer Bestrahlung von 10 min zu einem Anstieg der Evaporation und Hauttemperatur. Von anderen Autoren sind verschiedene Modelle für mögliche Ursachen entwickelt worden; die genauen physiologischen Vorgänge sind bis heute jedoch nicht vollständig geklärt.

Erhöhung der Evaporation

Die gesamte Wasserabgabe über die Haut wird als Evaporation bezeichnet und kann über zwei unterschiedliche Mechanismen erfolgen. Dies ist zum einen per Diffusion als PIC und zum anderen durch aktive Sekretion (Perspiratio Sensibilis) der Schweißdrüsen (Bettley und Grice 1965). Unter komfortablen Umgebungsbedingungen wird die Hautwasserabgabe maßgeblich durch die PIC bestimmt, d.h. die ekkrinen Schweißdrüsen sind weitestgehend inaktiv und werden erst durch körperliche, thermische oder emotionale Reize aktiviert.

Der Wasserdurchgang durch die Haut bei der PIC ist zwar ein rein physikalischen Gesetzen folgender Vorgang, der jedoch auch von der bereitgestellten Wassermenge und den Umgebungsbedingungen aktiv reguliert wird (Hattingh 1972). Eine der möglichen Ursachen für die selbständige Regulation der Wasserbarriere wäre eine veränderte Mikrozirkulation (Spruit und Herweyer 1967). Durch die Erwärmung der Haut kommt es in dem betroffenen Areal zu einer kompensatorischen Vasodilatation, und der gesteigerte Blutfluss könnte so letztendlich die Evaporation erhöhen (Thiele und van Senden 1966). In einem Experiment, bei dem Vasokonstriktion und Vasodilatation medikamentös gesteuert wurden, konnte ein Zusammenhang zwischen Blutfluss und Evaporation aber nicht festgestellt werden (Grice und Bettley 1967).

Maßgeblich wird die PIC durch die Hauttemperatur beeinflusst (Grice und Bettley 1967, Mathias et al. 1981, Spruit und Herweyer 1967, Thiele und van Senden 1966) und lässt sich durch die Ergebnisse eines in-vitro Experiments von C.G. Mathias et al. (1981) weitestgehend bestätigen. In diesem Experiment wurde eine vom lateralen Oberschenkel gewonnene Kadaverhaut in einem Wasserbad erwärmt und bei fünf

verschiedenen Hauttemperaturen die PIC gemessen. Mit den gewonnenen Daten entwickelten sie eine Gleichung, um die bei unterschiedlichen Hauttemperaturen gemessenen Werte der PIC vergleichen zu können:

$$\log \text{PIC}_{30} = \log \text{PIC}_T + 0,035 (30 - T_H)$$

PIC_T = PIC bei der Hauttemperatur T_H [g/hm²]
 T_H = Temperatur der Hautoberfläche T [°C]

Der Gültigkeitsbereich der Gleichung liegt zwischen 25 und 39 °C, und laut der Gleichung kommt es zu einer Verdopplung der PIC bei einem Hauttemperaturanstieg von 7 bis 8 °C. Diese Gleichung bezieht sich jedoch ausschliesslich auf die PIC und kann allenfalls zum Vergleich der in dieser Arbeit ermittelten Kontrollwerte herangezogen werden. Einen Vergleich der Werte der Evaporation nach der Bestrahlung ist nur dann möglich, wenn eine Beteiligung der ekkrinen Schweissdrüsen ausgeschlossen werden kann.

Aufgrund der thermischen Belastung durch die Bestrahlung muss bei den Probanden der vorliegenden Studie davon ausgegangen werden, dass ekkrine Schweissdrüsen an der Evaporation durchaus beteiligt waren. In einem weiteren Experiment konnten bei kleinen Schwankungen der Hauttemperatur keine Veränderungen der Evaporation gemessen werden (Baartz 1996). Diese Beobachtung kann auch bei der Serie Gesamt (Abbildung 12, Seite 37) gemacht werden, hier besteht ebenfalls kein signifikanter Zusammenhang. Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass in unseren experimentellen Untersuchungen in Abhängigkeit von der Höhe der Evaporation keine Aussage über die Höhe der Hauttemperatur gemacht werden kann und umgekehrt.

Erhöhung der Hauttemperatur

Nach der VIP-Lichttherapie kommt es bei fast allen Probanden, massgeblich aufgrund des in der Strahlung enthaltenen Infrarot-Spektrums, zu einem signifikanten Anstieg der Temperatur im bestrahlten Hautareal. Das vom Lichttherapiegerät Bioptron II emittierte IR-A nahe dem sichtbaren Bereich wird auch als therapeutische Wärmeoktave bezeichnet (Endres und Breit 1997). Die IR-A-Strahlung durchdringt die Epidermis und wird in Höhe des subpapillären Plexus in Wärme umgewandelt

(Meffert et al. 1990;6). Patienten mit insuffizienter peripherer Durchblutungsstörung berichteten über ein Gefühl wohliger Wärme nach einer Bestrahlung mit Infrarotlicht. Im akralen Wiedererwärmungstest wurden unmittelbar nach der Bestrahlung von Sklerodermie- Patienten Normalwerte gemessen (Meffert et al. 1990;176).

Auch im Initialstadium der Ischämie, z.B. in der Arteria femoralis superficialis aufgrund atherosklerotischer Veränderungen, konnte durch VIP-Lichttherapie der Blutfluss verbessert werden (Czernicki et al. 1994). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, daß die Übererwärmung die funktionelle Gefäßverengung zeitweise aufheben kann. Eine Bestrahlung mit einem Low Power Red Light Laser (LPRL) kann endotheliales Zellwachstum sowohl in vitro als auch in vivo stimulieren. In einem Tierversuch konnte durch Vordehnung mit einem Intravaskulären LPRL-Ballon die in-stent Restenose in Koronargefäßen signifikant gesenkt werden (De Scheerder et al. 2001).

Eine weitere Beobachtung wurde bei Hypertonikern gemacht, wo nach regelmässiger IR-A-Behandlung der Blutdruck über längere Zeit gesenkt werden konnte (Meffert et al. 1991). Aufgrund der Erwärmung kommt es durch kompensatorische Erweiterung der Blutgefäße zu einem Blutdruckabfall und daraus resultierender Wärmeabgabe. Am Anstieg der Hauttemperatur nach der VIP-Lichttherapie sind also mindestens zwei Mechanismen beteiligt. Einerseits die im subpapillären Plexus in Wärme umgewandelte IR-A-Strahlung und andererseits durch die daraus resultierende erhöhte periphere Durchblutung. Welchen Anteil die zwei Mechanismen am gemessenen Anstieg der Hauttemperatur haben, ist bisher unbekannt und bedarf in Zukunft weiterer Abklärung.

Die Temperatur bleibt in den im Anschluss an die Bestrahlung folgenden 15 min nahezu konstant erhöht mit geringfügiger Tendenz zum weiteren Anstieg sowohl bei der Serie Gesamt (Abbildung 13, Seite 38) als auch bei Serie A1 & A2 und B1 & B2 (Abbildung 24, Seite 51). Eine Abnahme lässt sich erst nach 20 min bei der Serie B1 & B2 beobachten (Abbildung 26, Seite 56). Zu einer kontinuierlichen Abnahme der Temperatur kommt es jedoch auch bei der Leermessung der Serie B3 (Abbildung 38, Seite 68). Da im Vorfeld keine Bestrahlung erfolgte, ist dies am ehesten mit einer Abkühlung infolge der leichten Körperbekleidung bei 22 – 24°C Raumtemperatur und des verminderten Grundumsatzes im Liegen zu erklären. Während die Körperkerntemperatur grösstenteils konstant bleibt (homiotherm), ist die Temperatur der

Körperschale, wie z.B. Hauttemperatur, abhängig von der Umgebungstemperatur und dem Grundumsatz (Bleichert et al. 1972).

4.3.1.1. Vergleich der Serie A1 & A2 mit der Serie B1 & B2

Die Bestrahlung von 10 min bewirkt bei Serie A1 & A2 einen stärkeren Anstieg von Evaporation und Hauttemperatur als bei Serie B1 & B2 (Abbildung 26, Seite 56). Als mögliche Ursachen aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Probandenkollektive kommen der Höhenunterschied, Alter und Körperzusammensetzung (Tabelle 2, Seite 17) sowie der Trainingszustand der Probanden in Betracht.

Im Gegensatz zur Serie B1 & B2 wurden die Experimente der Serie A1 & A2 während der Höhenstudie AMAS 2000 in 1.700 m Höhe durchgeführt. Nach der barometrischen Höhenformel halbiert sich der Luftdruck pro 5,5 km Höhengang (Scheid 1994).

$$PB_{(h)} = PB_{(0)} e^{-0,127 \times h}$$

Für 1,7 km Höhe bedeutet dies nach der barometrischen Höhenformel eine Erniedrigung des Luftdrucks [P] um 19,45% gegenüber der Meereshöhe:

$$PB_{(1,7 \text{ km})} = 1,013_{(0)} e^{-0,127 \times 1,7} \text{ [bar]}$$

$$PB_{(1,7 \text{ km})} = 0,816 \text{ [bar]}$$

$PB_{(h)}$ = Luftdruck in der Höhe h (km) [bar]

$PB_{(0)}$ = Luftdruck auf Meereshöhe (h=0 km) [bar]

Länger andauernde Höhengänge sind mit einer Reihe von Adaptionsmechanismen verbunden. Die Höhenakklimatisation führt nicht nur zu einer hypoxisch stimulierten renalen Erythropoietinbildung (Scheid 1994), sondern auch zu zahlreichen Veränderungen anderer physiologischer Parameter. In einem Experiment wurde die periphere Durchblutung bei Probanden nach einem 10 tägigen Raumflug bestimmt. Mittels einer Höhe simulierenden Unterdruckkapsel (LBNP) an den unteren Extremitäten wurde der Einfluss des Luftdruckes auf die Durchblutung gemessen. Innerhalb dieser Versuche kam es im Bereich der unteren Extremität

aufgrund des LBNP zu einem deutlichen Anstieg der peripheren Durchblutung als an der oberen Extremität (Gabrielsen et al. 1995).

In einem weiteren Experiment konnte eine Zunahme der Haut-Schichtdicke an den unteren Extremitäten bei einer Höhenexposition von 7 Tagen in 2.315 m Höhe nachgewiesen werden (Gunga et al. 1995). Aufgrund der morphologischen Struktur der Haut und ihres Flüssigkeitsgehaltes können anhand der Schichtdicke unmittelbare Aussagen über das Volumen der interstitiellen Flüssigkeit gemacht werden (Kirsch 1998). Die an der Höhenstudie AMAS 2000 beteiligten Probanden der Serie A1 & A2 zeigten eine Abnahme der Schichtdicke an der Stirn und eine, wenn auch nicht signifikante, Zunahme der Schichtdicke bzw. interstitiellen Flüssigkeit an den unteren Extremitäten (Gunga et al. 2003).

Abhängigkeit besteht auch zwischen PIC und den veränderten Luftdruckverhältnissen in der Höhe. Die PIC ist nicht nur abhängig von der jeweiligen anatomischen Lokalisation (Lotte et al. 1987), sondern auch von der relativen Luftfeuchtigkeit und dem Wassergehalt der Haut. Mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft nimmt der Wassergehalt im Stratum corneum zu. Die Zunahme der Wasserkonzentration im Stratum corneum erhöht den internen Diffusionskoeffizient und führt so, nach den Berechnungen von I.H. Blank et al., zu einem Anstieg der PIC (1984). Im Experiment liegt die maximale Wasserabgabe jedoch bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 30 und 40 % (Grice et al. 1972). Ein Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit führt zu einer Erhöhung der Wasserkonzentration im Stratum corneum. Dies führt bedingt einerseits zu den grösseren Diffusionskoeffizienten, führt andererseits aber auch zu einer Verminderung des Feuchtegradienten zwischen Stratum Corneum und der Umgebungsluft. Ab einer Luftfeuchtigkeit 40 % überwiegt die Abnahme des Feuchtegradienten und die PIC sinkt (Grice 1980).

Diffusion ist ausserdem dichteabhängig. Unter hyperbarer Umgebung, wie z.B. in einer Tauchtiefe von 300 m, nimmt die PIC um 20 % ab (Hempleman et al. 1984). Demzufolge müsste im Umkehrschluss die PIC unter hypobaren Verhältnissen zunehmen. Gegenüber den Experimenten der Serie B1 & B2 kann bei den in Österreich in 1.700 m Höhe durchgeführten Experimenten der Serie A1 & A2 von geringfügigen hypobaren Luftdruckverhältnissen gesprochen werden. Der Höhenunterschied stellt also eine mögliche Ursache für eine höhere PIC bei der Serie A1 & A2 dar.

Weitere Möglichkeiten für die höhere Evaporation der Serie A1 & A2 sind das höhere Alter und der höhere BMI (Tabelle 2, Seite 17). Welche Einflüsse die einzelnen Parameter haben, ist allerdings noch unklar. Von grösserer Bedeutung könnte die Teilnahme der Probanden der Serie A1 & A2 an dem Trainingsprogramm zum Bergwandern während des Höhengaufenthaltes sein. Die Aktivität der Schweißsdrüsen ist abhängig vom Trainingszustand, die höhere Evaporation der Serie A1 & A2 könnte auch mit einem positiven Trainingseffekt durch das Bergwandern erklärt werden (Jessen 1994).

4.3.1.2. Vergleich der Serie A1 mit der Serie A2

Die Werte der Evaporation und der Temperatur sind nach 10 min Bestrahlung bei der Serie A1 (Abbildung 25, Seite 53) mit der vorangegangenen Bestrahlung von 5 min gegenüber den Werten der Serie A2 (Abbildung 25, Seite 53) ohne vorheriger Bestrahlung erhöht. Bei genauer Betrachtung der Werte kann davon ausgegangen werden, dass bei der Serie A1 eine Addition der Strahlendosis stattgefunden hat.

Ein Vergleich der Ergebnisse nach der 2. Bestrahlung der Serie A1 (Abbildung 25, Seite 53) nach 10 min mit der 2. Bestrahlung der Serie A2 (Abbildung 25, Seite 53) nach 20 min ergibt, dass für die Reizantwort eine Obergrenze existiert. Zwischen Länge der Bestrahlung und einem weiteren Anstieg von Evaporation und Temperatur besteht dabei kein linearer Zusammenhang.

In den Experimenten waren die Werte der Serie A1 durch die 2. Bestrahlung noch zu steigern. Ein Vergleich der Werte von Serie A1 mit der Serie A2 (Abbildung 25, Seite 53) jeweils nach der 2. Bestrahlung ergibt aber keine signifikanten Unterschiede mehr. Wie oben bereits erwähnt, sind die Werte der Serie A1 (Bestrahlung von 5 und 10 min; Abbildung 25, Seite 53), gegenüber der Serie A2 (Bestrahlung von 10 min; Abbildung 26, Seite 56) erhöht. Aufgrund dieser Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass die effektive Strahlendosis zwischen 10 und 20 min liegt.

4.3.2. Der Einfluss des autonomen Nervensystems auf die Evaporation

Bei der Perspiratio sensibilis handelt es sich um einen aktiven glandulären Wasserverlust, da ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen vegetativen Nervenimpulsen und der Schweißdrüsenaktivität besteht (Bini et al. 1980, Kunimoto et al. 1991). Die Schweißrate steigt bei körperlicher Aktivität auf der allgemeinen Körperoberfläche langsam an und korreliert mit der Herzfrequenz und der Körpertemperatur gemessen im Ösophagus. Die thermoregulatorische Wasserabgabe wird hauptsächlich durch das autonome Nervensystem (ANS) kontrolliert (Ogawa und Low 1997).

Die palmare Schweißrate hingegen korreliert nur mit der Herzfrequenz (Miyagawa 1985), zu thermoregulatorisch induziertem Schwitzen kommt es nur geringfügig (Ogawa 1987). Es konnte ausserdem beobachtet werden, dass die palmare Schweißrate bereits bei der Absicht, z. B. einen Gegenstand zu greifen, anstieg (Andreassi 1980). Die palmaren Schweißdrüsen sind also bereits schon zu Beginn der körperlichen Arbeit aktiv (Kuno 1956). Dieses Phänomen wird auf eine veränderte vegetative Innervation zurückgeführt, da es schon zu Beginn einer Tätigkeit zum Anstieg der sympathischen Nervenaktivität und des arteriellen Blutdruckes kommt (Rowell 1997). Die Schweißdrüsen z. B. des Unterarms werden dagegen erst einige Minuten nach Beginn der körperlichen Arbeit aktiv (Kuno 1956). Im Gegensatz zum zeitlich verzögerten thermoregulatorischen Schwitzen handelt es sich hierbei also um corticalemotionales Schwitzen.

Individuell unterschiedliche Schweißraten ergeben sich also nicht nur aufgrund der körperlichen Aktivität, sondern auch aufgrund der momentanen emotionalen Verfassung.

Abnahme der Evaporation in waagerechter Körperposition

Die erweiterte Leerwertkontrolle der Serie B2 zeigt, dass eine Ruhephase von 20 min bei der Gruppe 2 nicht ausreichend war, da die Evaporation erst 8 min nach Beginn der Messung einen konstanten Wert erreichte (Abbildung 36, Seite 65). Zu einem ähnlichen Resultat kommt es in der Leermessung ohne Bestrahlung der Serie B3. Die Evaporation sinkt zwischen 2. und 10. min um $1,9 \text{ g/hm}^2$, im weiteren Verlauf zwischen 10. und 62. min zusätzlich um $2,4 \text{ g/hm}^2$ (Abbildung 38, Seite 69). Eine mögliche Ursache wäre z. B. die mit körperlicher Aktivität verbundene Positionsänderung von der Ruhephase im Sitzen zu den Messungen der

Versuchsreihen, die im Liegen durchgeführt wurden. Der Übergang vom Sitzen zum Stehen, verbunden mit Muskelarbeit und orthostatischer Kreislaufbelastung, führt zu einer Zunahme der Plasma Norepinephrin Konzentration (Miller und Streeten 1990). Eine Erhöhung von Norepinephrin, als Folge gesteigerter sympathischer Aktivität kann, z.B. an einer Zunahme von Herzfrequenz, Blutdruck und efferenter sympathischer Muskelaktivität, gemessen in muscle sympathetic nerve activity (MSNA) z.B. des Nervus peroneus, nachgewiesen werden (Tank et al. 2003). Dieser erhöhte Serumspiegel bliebe dann einige Zeit bestehen und könnte den hohen Kontrollwert bei den Probanden erklären.

Des weiteren wird eine Modulation der sympathischen Aktivität durch einen vestibulosympathischen Reflex der Otolithenmembran und anderer Gravizeptoren des Körpers in Abhängigkeit von der Gravitation postuliert (Yates et al. 2000). Ein Wechsel der Körperposition führt auch hier zu Veränderungen der MSNA und des Blutdruckes (Kaufmann et al. 2002). Mit diesen Ergebnissen wären auch die höheren Kontrollwerte einiger Probanden gegenüber den Werten nach der Bestrahlung zu erklären. Ein verminderter Sympathikotonus aufgrund der liegenden Körperposition könnte demzufolge einen grösseren Einfluss auf die Evaporation haben als die VIP-Lichttherapie. Neben dem Einfluss des vegetativen Status wäre die Abnahme der Evaporation auch durch die sinkende mittlere Hauttemperatur in Folge der leichten Bekleidung denkbar (siehe Kapitel 4.3.4., Seite 92)

Sudomotorische Aktivität in Abhängigkeit vom Status des autonomen Nervensystems

Die vom Sympathikus über sudomotorische Impulse gesteuerte Schweißsekretion ist ein Indikator für die zentrale sudomotorische Aktivität (Sugenoya et al. 1990) und wird aus diesem Grund auch als kortikales Schwitzen bezeichnet. Art und Intensität des Anstiegs der Evaporation nach der VIP-Lichttherapie unterliegt bei allen Probanden einer grossen Streuung.

Eine genauere Betrachtung lässt eine grobe Unterteilung in 3 Gruppen zu (Abbildungen 18, 20 und 22, Seiten 47-50 und Abbildungen 27-29, Seiten 59-61). In dieser Unterteilung reagierten die Probanden der Gruppe 1 (Abbildung 18, Seite 47; 52,1% und Abbildung 27, Seite 58; 54,2%) nur geringfügig. Die Probanden der Gruppe 2 (Abbildung 20, Seite 48; 29,2% und Abbildung 28, Seite 60; 20,8%) mittelstark auf die Bestrahlung. Im Gegensatz dazu sind die Werte der Gruppe 3 (Abbildung 22, Seite 50; 18,7% und Abbildung 29, Seite 61; 25,0%) besonders

unregelmässig und intensiv. Eine weitere Besonderheit bezüglich der Gruppe 3 konnte bei der Serie B1 & B2 in den Einzeldarstellungen beobachtet werden, denn einige Probanden zeigten erst 20 min nach der Bestrahlung einen Anstieg der Evaporation (Abbildung 31, Seite 62 und Abbildung 33, Seite 64).

Eine ähnliche Einteilung vollzogen Mano et al. (1994), die ihre 16 köpfige Kontrollgruppe anhand ihrer palmaren Schweissabgabe in Grad 1 (minimale Schweissrate; 23,1% der Probanden), Grad 2 (milde Schweissrate; 57,6% der Probanden) und Grad 3 (moderate Schweissrate; 19,2% der Probanden) unterteilten. Eine Erklärung dafür wäre die individuell unterschiedliche Verteilung der Schweissdrüsen und deren Eigenschaften. Anatomische Untersuchungen zeigen, daß die Schweißrate mit zunehmender Grösse der Drüse, pro Volumeneinheit des sekretorischen Knäuls und durch vermehrte cholinerge Sensitivität steigt (Sato und Sato 1983).

Für die grossen Unregelmässigkeiten machte J.F. Baartz (1996) den individuellen vegetativen Status, also die cholinerge Sensitivität der Schweissdrüsen verantwortlich. Auch beobachtete er sogenannte „vegetativ ruhige“ Versuchspersonen mit geringer Standardabweichung und „vegetativ unruhige“ Versuchspersonen mit hoher Streuung der Einzelwerte. Diese Ergebnisse waren an den emotional beeinflussten Stellen wie z.B. der Hand besonders deutlich, aber auch an Sternum und Tibia noch nachzuweisen. Diese Beobachtungen bekräftigen die Annahme, dass die Evaporation bei den Probanden in der Gruppe 3 (Abbildung 22, Seite 50 und Abbildung 29, Seite 61) aufgrund ihres vegetativen Status besonders intensiv ausgefallen ist. Zur genaueren Abklärung dieser Ergebnisse müsste jedoch die Dichte der Schweissdrüsen an dem gemessenen Hautareal sowie deren Eigenschaften untersucht werden.

Bestehen Wechselwirkungen zwischen Evaporation und Temperaturregulation

Mit den durchgeführten Versuchsreihen kann nicht klar abgegrenzt werden, ob für die „vegetativ unruhigen“ Versuchspersonen ein vermehrter Sympathikotonus oder eine eventuell defizitäre Verarbeitung der afferenten Temperatursignale im Hypothalamus die Ursache ist (siehe Kapitel 3.4.3., Seite 91). Im Umkehrschluss geht aus den erhobenen Daten ebenso wenig hervor, ob bei den „vegetativ ruhigen“ Versuchspersonen die Evaporation aufgrund eines verminderten Sympathikotonus erniedrigt ist oder eine verbesserte Integration der Temperatursignale im Hypothalamus vorliegt. Durchaus sinnvoll erscheint die Annahme, dass beide

Systeme in einem bisher unbekanntem Verhältnis zueinander eine Einflussgröße darstellen. Weitere Experimente, die z.B. die Eigenschaften des Hypothalamus und des vegetativen Status der Versuchsperson berücksichtigen, könnten in der Zukunft weitere Aussagen diesbezüglich zulassen.

4.3.3. Einzelne Spitzen der Evaporation

Während den Messungen kam es bei einigen Probanden nach der Bestrahlung zu einem kurzen stark erhöhten Wert der Evaporation, wie z. B. dargestellt in der Kurve des Probanden ID66 der Serie B1 & B2 (Abbildung 25, Seite 53). Dieses Phänomen kann als eine, bereits in der Literatur erwähnte, sogenannte „feedforward“ Reaktion gedeutet werden. Dabei handelt es sich um eine weitere Form der aktiven glandulären Schweißsekretion, die durch Verarbeitung periodischer Signale aus der Peripherie durch Neurone des Neokortex zustande kommt (Brumberg 2002). Mit diesem Mechanismus kann der Körper über die Schweißdrüsen aktiv seine Umgebungsbedingungen bezüglich Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Luftbewegungen testen. Dieses Phänomen tritt bereits unter thermoneutralen Bedingungen auch an nicht emotional beeinflussten Körperstellen, wie z.B. der Tibia, auf (Randall 1946).

In einer reizverarmten Umwelt, wie z.B. unter simulierter Mikrogravitation, konnten im Experiment verstärkt die „feedforward“ Reaktionen beobachtet werden. Bei simulierter Mikrogravitation werden aufgrund der fehlenden Konvektion weniger Informationen über den thermischen und hygrischen Status der Umgebung über die Hautoberfläche aufgenommen. Zur Kompensation dieser relativen Reizarmut weicht der Körper auf andere Mechanismen aus, um seine Umgebung weiterhin aktiv sondieren zu können (Baartz 1996).

Eine mögliche Ursache für das aktive Sondieren könnte auch die asymmetrische thermische Belastung aufgrund der einseitigen Bestrahlung mit der Bioptron-Lampe sein. Da diese thermische Belastung nur auf ein definiertes Hautareal begrenzt ist und nicht systemisch erfolgt, könnte so eine thermoregulatorische Kompensation über die „feedforward“ Reaktion optimiert werden. Die aktive Sondierung ermöglicht dem thermoregulatorischen Zentrum eine effiziente Kompensation durch Präzisierung des betroffenen Hautareals.

4.3.4. Einflüsse zentraler Regelgrößen auf die Hauttemperatur

Die Temperatur einer Extremität wird neben z. B. der Umgebungstemperatur, auch von der Temperatur der anderen Körperteile, insbesondere der kontralateralen Extremität beeinflusst. Ursache hierfür ist die Bilanzierung afferenter Temperatursignale im Hypothalamus zu einem integrierten Kerntemperatursignal. Die Information von den Wärme- und Kälterezeptoren aus der Peripherie wird hier ausgewertet und bei Bedarf regulatorisch eingegriffen. Eine Abweichung des Istwertes vom ebenfalls im Hypothalamus gebildeten Sollwert führt aufgrund seiner Reglerfunktion zu einer Gegenregulation in benachbarten Hirnregionen (Jessen 1994). Es kann z. B. über den motorischen Kortex und die Basalganglien Muskelzittern zur Wärmeproduktion induziert werden. Unter anderen Umständen kann aufgrund der Integration der Signale auch eine kompensatorische Gegenregulation blockiert werden. Einen Anhaltspunkt für diese Annahme liefert folgendes Experiment, in dem O. Lippross nur einen Unterschenkel erwärmte, aber bei Beiden die Temperatur gemessen hat (1951). In der Abbildung 43 (Seite 93) ist zu erkennen, dass die Temperatur auch des kontralateralen, nicht der Heizsonne ausgesetzten Unterschenkels, ansteigt. Diese Erwärmung ist zwar nur geringfügig, kann unter Umständen aber als eine konsensuelle Reaktion im Bereich der Rückenmarksegmente interpretiert werden (Lippross 1951).

In einem weiteren Versuch wurden die unteren Extremitäten in zwei unterschiedliche klimatische Kammern gebracht. In der einen Kammer ist das Bein auf 44°C erwärmt (rechts) und in der Anderen auf 28°C abgekühlt worden. Es kam zu keiner signifikant veränderten lokalen Evaporation, obwohl der gemessene Temperaturunterschied zwischen den beiden unteren Extremitäten signifikant war (Heising und Werner 1987). Diese Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass bei gleichbleibender thermischer Gesamtbelastung eine zentrale Regelgröße lokale Antriebe zur Gegenregulation blockiert (Heising und Werner 1987).

Gewebstemperatur in beiden Unterschenkeln nach Wärmebestrahlung

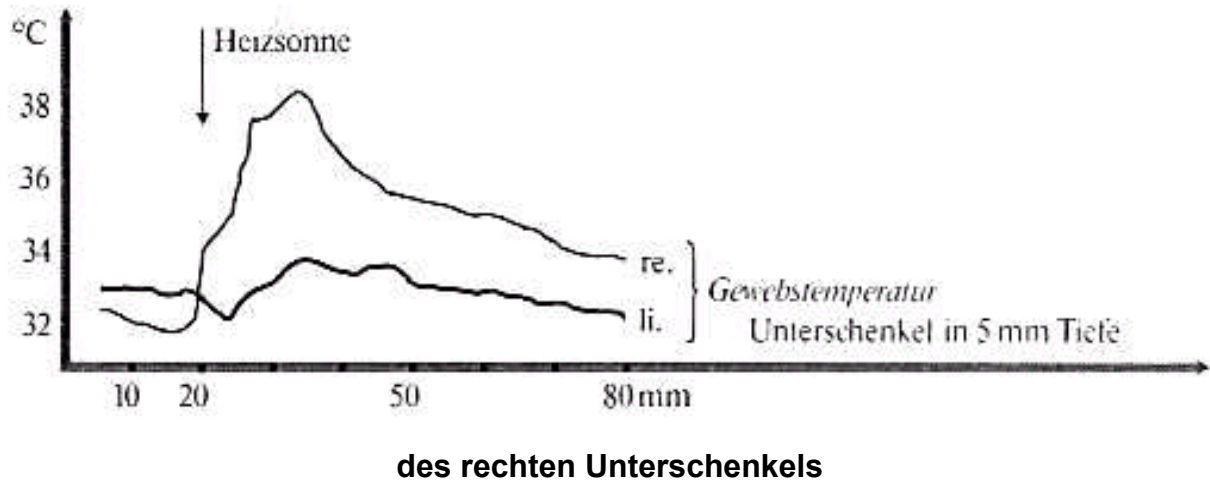


Abbildung 43: Wie die Abbildung zeigt, kommt es nach der Bestrahlung des rechten Unterschenkels auch zu einem geringfügigen Anstieg der Gewebstemperatur im linken Unterschenkel (Lippross 1951).

In unseren Experimenten mit dem Lichttherapie-Gerät Bioptron II ist jeweils nur der rechte Unterschenkel bestrahlt worden. Aus diesem Grund ist es anzunehmen, dass es zu der oben beschriebenen konsensuellen Temperaturreaktion gekommen ist. Da diese Reaktion bisher nur unzureichend bekannt ist, können keine Aussagen über das Verhältnis, deren Einfluss und Intensität, besonders im Hinblick auf den einzelnen Probanden, gemacht werden.

4.3.5. Temperaturspitzen

Die bei der Serie B1 & B2 (Abbildung 26, Seite 56) aufgetretene signifikante Temperaturspitze nach 48 min während der Langzeitmessung ist nach heutigem Wissensstand physiologisch nicht zweifelsfrei zu erklären. Ein Hinweis für einen unmittelbaren Zusammenhang der Temperaturspitze mit der VIP-Lichttherapie waren die Ergebnisse der Kontroll-Serie B3 & B4 (Abbildungen 37-39, Seiten 67-70). Während die Probanden nach der VIP-Lichttherapie den besagten Temperaturanstieg zeigten (Abbildung 37, Seite 67), kam es weder während der Leermessung (Abbildung 38, Seite 68), noch nach der Bestrahlung mit einer Quarzlampe (Abbildung 39, Seite 70) zu dieser signifikanten Temperaturspitze.

Nach gründlicher Literaturdurchsicht konnten Hinweise für dieses Phänomen der Temperaturspitze gefunden werden. Was die bisherigen Erkenntnisse jedoch von den in dieser Arbeit vorliegenden Ergebnissen unterscheidet ist, dass es sich ausschliesslich um in vitro Studien handelt. Dies kommt, neben den meist vernachlässigten zeitlichen Angaben, erschwerend für einen Vergleich mit den in vivo erhobenen Daten dieser Studie hinzu. Ein möglicher Erklärungsansatz findet sich, wenn zellproliferative und immunologische Prozesse näher betrachtet werden. Anhand der tabellarischen Darstellung auf Seite 96 (Tabelle 4) werden besonders die regulierenden Funktionen auf den Zellstoffwechsel, die Zellproliferation und die immunologischen Prozesse deutlich.

Gesteigerter Zellstoffwechsel

Erste Anzeichen für gesteigerte Stoffwechselaktivität nach VIP-Bestrahlung stellen ein erhöhter Glukose- und Triglyzerid- Verbrauch dar (Balljuzek et al. 2000). Mögliche Erklärungsansätze ergeben sich, wenn Forschungsergebnisse, die im Rahmen der therapeutischen Anwendung von Laserlicht gewonnen wurden, näher betrachtet werden. Die Laser-Bestrahlung steigert in hepatischem Gewebe die respiratorische Aktivität der Mitochondrien (Castro e Silva et al. 2001) und deren oxidativen Metabolismus der Cytochrom C Oxidase (Karu 1999). Dies führt zu vermehrter mitochondrialer Sauerstoff-Aufnahme in Verbindung mit gesteigerter ATP Synthese (Castro e Silva et al. 2003, Mochizuki et al. 2002) und einer Erregung von Photoakzeptoren in der Cytochrom C Oxidase, die dessen Aktivität moduliert (Karu 1999). Es wäre also denkbar, dass es im Zuge der Bestrahlung mit einem He-

Ne Laser (632 nm) in den Keratinozyten zu verstärkter mitochondrialer enzymatischer Aktivität und gesteigerter DNA Synthese (Yu et al. 2003) gekommen ist. Der gesteigerte Zellstoffwechsel und die damit einhergehende ATP-Produktion bzw. dessen Verbrauch wären als mögliche Ursache für die Temperaturspitze der Probanden denkbar.

Im Hinblick auf die Wundheilung ist besonders die vermehrte Produktion von Transforming Growth Factor (TGF β) von Bedeutung, da es sich hierbei um einen bedeutenden Faktor dafür handelt (Chegini 1997). Die Wirkung von TGF β wird durch verminderte Produktion von IL-6, einem TGF β Antagonisten, wahrscheinlich noch zusätzlich verstärkt (Fenyo et al. 2002). K. A. Samoilova (2000) registrierte 30 min nach der Bestrahlung einerseits bei 40% der Probanden eine zweifache Abnahme und andererseits bei 40% eine Zunahme des TGF β -Spiegels um das 1½ fache. Es kommt also in 80% der Probanden zu einem veränderten TGF β -Spiegel, wenn auch noch nicht genau geklärt ist, in welche Richtung die Veränderung tendiert. Das von K.A. Samoilova et al. in vitro beobachtete zeitliche Intervall von 30 min (2000) könnte möglicherweise ein weiterer Hinweis für die im Rahmen unserer Untersuchungen in vivo einsetzende signifikante Temperaturerhöhung nach 48 bzw. 62 min (Abbildung 26, Seite 56), sein.

Innerhalb der Lasertherapie sind weitere Veränderungen von Wachstumsfaktoren gefunden worden. So kommt es z. B. unter Anwendung eines He-Ne Laser an Keratinozyten und Fibroblasten zur Oberflächendissoziation von basic Fibroblast Growth Factor (bFGF), die zu einer gesteigerten Proliferation von Fibroblasten führt (Yu et al. 2003). Aber auch in Makrophagen wird die Freisetzung von Faktoren gefördert, die die Fibroblastenproliferation stimulieren (Young et al. 1989). Experimentell stimuliert Laserstrahlung im Bereich von 904 nm die Proliferation von Fibroblasten (Pereira et al. 2002) und steigert deren Aufnahme von Asorbic Säure, welches mit der Kollagen-Synthese in Verbindung gebracht wird (Labbe et al. 1990). Die von Yu et al. (2003) beobachtete Erhöhung des Nerve Growth Factors (NGF) kann ausserdem noch zu einem Wachstum von Nervenzellen führen. Experimentell konnte durch Bestrahlung (780 nm) ein intensives axonales Nervenwachstum (sprouting) bei Ratten mit transsektiertem Rückenmark festgestellt werden (Rochkind et al. 2002).

Veränderungen einzelner Parameter nach der VIP-Lichttherapie

| <u>Parameter</u> | <u>Änderung</u> | <u>Herkunft</u> | <u>Hauptwirkungen</u> | <u>Autoren</u> |
|---|----------------------------------|--|---|--|
| Humorale Abwehr: • IL-6 • TNF α * • IFN γ * • Serum IgM • Plasma Albumin | ↓↓ ↑↓* ↑↓* ↑↑ ↑↑ | B-Lymphomzellen Monozyten B-Lymphomzellen | Antagonisiert die negative akute Phase Wirkung von Albumin und die Wirkung von TGF β (Ono et al. 1995) Entzündung und Adhäsion (Feldman 1995) Aktiviert Makrophagen und Endothel (Feldman 1995) Primäre Immunantwort u.a. Negatives akute Phase Protein | Fenyo et al. 2001 Samoilova et al. 2000 Samoilova et al. 2000 Fenyo 1984 Fenyo 1984 |
| Zelluläre Abwehr: • Lymphozyten → CD3 → CD20 → CD25 • Monozyten • Degranulation | ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑↑ | T-Lymphozyten B-Lymphozyten IL-2 Rezeptor Neutrophile Granulozyten | Marker für T-Lymphozyten Marker für B-Lyphozyten Auf aktivierten Monozyten, B- und T-Lymphozyten Phagozytose und Migration | Zhevago et al. 2003 Glazanova et al. 2000 Glazanova et al. 2000 Glazanova et al. 2000 Zhevago et al. 2003 Obolenskaya und Samoilova 2000 |
| Wachstumsfaktoren: • TGF β * | ↑↓* | | Wichtiger Faktor in der Wundheilung (Chegini 1997) | Samoilova et al. 2000 |
| Stoffwechsel: • Triglyzeride • HDL • LDL • Glukose | ↓ ↑↑ ↓ ↓ | | Energie für Zellstoffwechsel Reverser Cholesterintransport Cholesterintransport in periphere Zellen Energie für Zellstoffwechsel | Balljuzek et al. 2000 Balljuzek et al. 2000 Balljuzek et al. 2000 Balljuzek et al. 2000 |

Tabelle 4: Die Tabelle zeigt die Veränderung bisher gemessener Parameter nach VIP-Lichttherapie und für das bessere Verständnis deren Hauptwirkung.

*Es kommt nur bei niedrigem Ausgangs-Spiegel zu einem Konzentrationsanstieg, bei hohen Ausgangswerten kommt es zu einem Abfall.

Erhöhte immunologische Aktivität

Die VIP-Lichttherapie führt zu Erhöhung des IgM-Serumspiegel (Fenyo 1984) und vermehrter Degranulation von neutrophilen Granulozyten (Obolenskaya und SamoiloVA 2000). Zusätzlich konnte ein Anstieg von B- und T-Lymphozyten, quantifizierbar durch vermehrten Marker-Nachweis, beobachtet werden (Glazanova et al. 2000). Ein erhöhter IL-6 Serumspiegel antagonisiert z. B. die negative akute Phase Wirkung von Albumin sowie, oben bereits erwähnt, die Wirkung von TGF β (Fenyo et al. 2001). Ausserdem verfügt IL-6 wie auch TNF α über pyrogene Eigenschaften (Gauldie et al. 1992), die für eine Temperaturerhöhung in Frage kommen könnten. Denkbar ist auch eine Erhöhung von IL-1 und IL-8, die bisher nur innerhalb der Lasertherapie dokumentiert worden sind (Yu et al. 1996). So gilt z. B. IL-1 als pro-inflammatorisches Zytokin, das u. a. zur Steigerung von Fibroblastenproliferation, Kollagensynthese und Temperatur führt (Dinarello 1998). Das IL-8 führt seinerseits zu Keratinozytenmigration und Proliferation (Yu et al. 1996).

Erhöhte Spiegel von TNF α und IFN γ (SamoiloVA et al. 2000) führen zu Makrophagenaktivierung und gesteigerter Adhäsion von Leukozyten bzw. Lymphozyten an Endothelzellen (Rock 1995). Weitere Hinweise liefern der Anstieg von Monozyten (Zhevago et al. 2003) und des Integralen Phagozytose Index (IPI), der die jeweilige Phagozytose Aktivität anzeigt (Obolenskaya und SamioLoVA 2000). Der erhöhte TNF α -Spiegel induziert darüber hinaus durch seine pyrogenen Eigenschaften Entzündung und Fieber (Rock 1995), was wiederum die Blutzufuhr und die Kapillarpermeabilität erhöht (Male 1995).

Wie zuvor beim TGF β haben Messungen ergeben, dass es besonders 30 min nach der VIP-Lichttherapie zu den spezifischen Veränderungen des TNF α - und IFN γ -Spiegel im Plasma kommt (Obolenskaya und SamioLoVA 2000). Die Nähe dieses Intervalls zu dem Temperaturanstieg nach 48 bzw. 62 min lassen erneut einen Zusammenhang zwischen zellulären bzw. immunologischen Vorgängen und der Temperaturveränderung vermuten. Hierbei wären mehrere Mechanismen denkbar, wie z.B. die Veränderung des intrazellulären Milieus aufgrund einer Freisetzung von Lysozymen und sauren Hydrolasen aufgrund der Makrophagenaktivierung. Weitere Ursachen könnten die erhöhte Kapillarpermeabilität und die pyrogenen Eigenschaften von IL-1, IL-6 und TNF α (Gauldie et al. 1992) sein.

Neben der Aktivierung kann die VIP-Lichttherapie auch eine Verminderung der immunologischen Vorgänge induzieren. Bei Probanden mit niedrigen Ausgangswerten kommt es nach Bestrahlung zu einem Anstieg von IFN γ , TNF α und TGF β (Samoilova 2000). Ausserdem kann die akute Phase Reaktion durch Anstieg von Plasma Albumin (u.a. negatives akute Phase Protein) und Verminderung von IL-6 (u.a. Albumin Antagonist) abgeschwächt werden (Fenyo 1984, Fenyo et al. 2001). Aufgrund dieser Ergebnisse wird die Möglichkeit einer Modulation des Immunsystems durch die VIP-Lichttherapie verständlich. Weiterhin wird verdeutlicht, dass das Immunsystem einen Einfluss auf die Auswirkungen der Bestrahlung hat.

Experimentell sollte zunächst geklärt werden, inwiefern die Eigenschaften der elektromagnetischen Welle für den therapeutischen Nutzen ausschlaggebend sind. Welche Rolle spielt es z. B., ob das Licht inkohärent nicht polarisiert, inkohärent polarisiert (VIP-Lichttherapie), kohärent nicht polarisiert (Lasertherapie) oder vielleicht sogar kohärent polarisiert ist? Welchen Einfluss haben die einzelnen Wellenlängen bzw. die Anwendung eines breiteren Spektrums?

Weiterer Klärungsbedarf besteht bezüglich des gesteigerten Zellstoffwechsels und der erhöhten immunologischen Aktivität. Eine Möglichkeit wäre z.B. die Mikrodialyse, in der das Gewebe mit Ringerlösung (plus einem Zusatz von 50 mM ethanol) perfundiert wird und anschliessend im Dialysat ethanol, glycerol, lactat und pyruvat gemessen werden. Diese Parameter erlauben anschliessend eine Abschätzung von Blutfluss, Glukolyse und Lipolyse (Boschmann et al. 2002). Weitere wichtige Hinweise im Bezug auf die therapeutische Anwendung der VIP-Lichttherapie könnten die Einflüsse auf das immunologische System liefern.

4.3.6. Kontrolle der VIP-Lichttherapie

Um kritischen Einwüfen zu entgehen, wurde nach der in Kapitel 4.3.5. (Seite 94) beschriebenen signifikanten Temperaturspitze (Abbildung 26, Seite 56) eine Placebo-Bestrahlung durchgeführt. Anlass für diese zusätzliche Kontrolle der VIP-Lichttherapie war in Erfahrung zu bringen, ob nicht eventuell thermische Reize, in Form gewöhnlicher Strahlung, diesen Temperaturanstieg auslösen können. Die dafür zusammengestellte Placebo-Gruppe der Serie B3 & B4 (Abbildung 37, Seite 67) bestand aus 10 Probanden der Serie B1 & B2, die jeweils diese signifikante Temperaturspitze nach 48 min gezeigt hatten.

Erweiterte Leerwertbestimmung (Serie B3)

Die erweiterte Leermessung der Serie B3 (Abbildung 38, Seite 68) wurde durchgeführt um sicher zu stellen, dass dieses Phänomen nicht auf bestimmte Stoffwechselfvorgänge zurückzuführen ist. Diese könnten z. B. durch eine Veränderung der Stoffwechsellage aufgrund der liegenden Körperposition erst nach 48 min einsetzen. Unter Berücksichtigung der Liegezeit während der Bestrahlung wurden die Messungen erst begonnen, nachdem die Probanden bereits 10 min, entsprechend der sonst üblichen Bestrahlungsdauer, gelegen hatten. Die im Vergleich mit anderen Kontrollwerten erhöhte Temperatur ist am ehesten mit den veränderten Raumverhältnissen durch einen Laborwechsel zu erklären. Im Gegensatz zu der Raumtemperatur von $24,8 \pm 1,15$ °C während den vorangegangenen Messungen wurden die Placebo-Bestrahlungen bei $0,3$ °C mehr ($25,1 \pm 0,53$ °C) durchgeführt. Während des gesamten Messzeitraumes kam es dann zu einem kontinuierlichen Abfall der Temperatur, wahrscheinlich bedingt durch Abkühlung infolge der leichten Körperbekleidung.

Als Ursache für die Abnahme der Evaporation kommen dagegen sowohl eine Abnahme der sympathischen Aktivität im Liegen als auch die Abnahme der Körpertemperatur in Betracht.

Placebo-Bestrahlung (Serie B4)

In der Serie B4 (Abbildung 39, Seite 70) wurden die Probanden anstelle des Lichttherapiegerätes Bioptron II mit einer handelsüblichen Quarzlampe bestrahlt. Im Vergleich zur VIP-Lichttherapie kam es nach der Bestrahlung zu einer deutlicheren

Steigerung der Werte von Evaporation und Temperatur. Dies könnte zum einen mit der Lichtqualität der Quarzlampe und zum anderen mit ihrer Lichtintensität, die nicht unmittelbar der Bioptron-Lampe entsprach, zusammenhängen. Der entscheidende Unterschied zur Serie B1 & B2 (Abbildung 26, Seite 56) ist jedoch, dass es in dem beobachteten Zeitraum von 62 min im Anschluss an die Bestrahlung in der Serie B4 (Abbildung 39, Seite 70) zu keiner Temperaturspitze kommt.

Die Ergebnisse der Placebo-Gruppe stellen demzufolge einen weiteren Hinweis für einen Zusammenhang mit der VIP-Lichttherapie dar. Mit der Leermessung der Serie B3 (Abbildung 37, Seite 68) kann nahezu ausgeschlossen werden, dass es sich bei dem Temperaturanstieg nach 48 min um einen physiologischen Vorgang aufgrund der waagerechten Körperposition während der Messung handelt. Von grösserer Bedeutung sind jedoch die Ergebnisse der Serie B4, in der die Probanden anstelle des Lichttherapiegerätes Bioptron II mit einer Quarzlampe bestrahlt wurden. Hier zeigen die Probanden eine deutliche Reaktion direkt im Anschluss an die Bestrahlung, zu einem erneuten Temperaturanstieg nach 48 min kommt es jedoch nicht.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, unter Berücksichtigung bereits bekannter Resultate im Rahmen der Untersuchungen der VIP-Lichttherapie, geben weitere Anhaltspunkte für die Induktion von Zellstoffwechsel und immunologischen Reaktionen aufgrund der Polarisierung. Die Frage nach den Wirkungen der beteiligten Lichtspektren konnte zum Teil geklärt werden. Wie dieses Zusammenspiel von Veränderungen mit dem erweiterten Spektrum der VIP-Lichttherapie seine Wirkung entfaltet, ist jedoch nicht vollständig geklärt. Besonders der Mechanismus der zur Temperaturerhöhung nach 48 bzw. 62 min führt, bleibt unklar und bedarf in Zukunft weiterer Abklärung.