Aus dem Universitätsklinikums Ulm
Klinik für Hals-Nasen-und Ohrenheilkunde
(Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. med. G. Rettinger)

Die Temperaturänderung der Nasenschleimhaut nach Inhalation von warmer und feuchter Luft

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät

der Universität Ulm

Vorgelegt von:

Johannes Weber aus Mindelheim

2009

Amtierender Dekan : Prof. Dr. Klaus –Michael Debatin

1. Berichterstatter : Prof. Dr. Tilmann Keck

2. Berichterstatter : PD Dr. Margrit-Ann Geibel

Tag der Promotion : 24.06.2010

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis
1. Einleitung. 1
1.1. Anatomie der Nase 2
1.1.1. Äußere Nase 3
1.1.2. Innere Nase 4
1.1.3. Die Nasenschleimhaut 4
1.2. Physiologie der Nase: 5
1.2.1. Funktionen der Nase. 5
1.3. Therapie von Schnupfen durch Inhalation von feuchter, warmer Luft 6
1.4. Zielsetzung 8
2. Material und Methodik 9
2.1. Versuchsgeräte und Materialien 9
2.1.1. Klimakammer 9
2.1.2. Thermoelement 11
2.1.3. Rhinomanometrie 12
2.1.4. Energiegehalt der Inhalationsluft 14
2.2. Versuchspersonen 18
2.2.1. Einschlusskriterien 18
2.2.2. Ausschlusskriterien 18
2.2.3. Blockbildung 18
2.3. Versuchsablauf 19
2.3.1. Eingangsuntersuchung 19
2.4. Studienablauf 19
2.4.1. Studiendesign und Gruppenverteilung 19
2.4.2. Ablauf eines Messtages 21
2.5. Datenverarbeitung und Statistik 23
3. Ergebnisse 24
3.1. Probanden 24
3.2. Carry-over Effekt 25
3.3. Einfluss der Expositionsdauer 28
3.4. Einfluss der thermischen Energie des Expositionsinhalats 31

3.5. Einfluss der relativen Feuchte der Expositionsbedingungen 34
3.6. Einfluss der steigenden Expositionstemperatur 40
3.7. Sonstige Ergebnisse: Rhinomanometrie 45
3.8. Sonstige Ergebnisse: Extremkonditionen 46
4. Diskussion 47
4.1. Probanden 47
4.1.1. Einschlusskriterien 47
4.1.2. Ausschlusskriterien 47
4.2. Messmethodik 48
4.2.1. Anforderungen an das Messverfahren 49
4.2.2. Fehlermöglichkeiten im Messaufbau und Ablauf 49
4.3. Bewertung der Ergebnisse 51
4.3.1. Carry-over Effekt 51
4.3.2. Einfluss der Expositionsdauer 51
4.3.3. Einfluss der thermischen Energie des Expositionsinhalats 52
4.3.4. Einfluss der rel. Feuchte der Expositionsbedingungen 54
4.3.5. Einfluss der steigenden Expositionstemperatur 56
4.3.6. Sonstige Ergebnisse: Rhinomanometrie 57
4.3.7. Sonstige Ergebnisse: Extremkonditionen 57
5. Zusammenfassung 59
6. Literaturverzeichnis 61
7. Danksagung 68

Abkürzungsverzeichnis

ϑ	=	Temperatur in Grad Celsius
A/D-Karte	=	Analog-Digital Karte
AAR	=	aktive anteriore Rhinomanometrie
dm	=	Dezimeter
g	=	Gramm
h_{1+x}	=	Spezifische Enthalpie der feuchten Luft
h_d	=	Dampfenthalpie
h_L	=	Enthalpie der trockenen Luft
HNO	=	Hals-Nasen-Ohren
HRV	=	Humanes Rhinovirus
IgA	=	Immunglobulin A
IgM	=	Immunglobulin B
K	=	Kelvin
kg	=	Kilogramm
kJ	=	Kilojoule
m	=	männlich
Max	=	Maximum
mbar	=	Millibar
Min	=	Minimum
min	=	Minute

p	=	Umgebungsdruck
$\bar{c}_{p,d}$	=	spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf
$\bar{c}_{p,L}$	=	spezifische Wärmekapazität trockener Luft
Pa	=	Pascal
p_d	=	Partialdruck
p_s	=	Sättigungspartialdruck
r.F.	=	relative Feuchtigkeit, relativer Feuchtegrad
r_v	=	Verdampfungsenthalpie
sec	=	Sekunde
V	=	Volumenstrom
V150	=	Volumenstrom bei einem Druck von 150 Pascal
w	=	weiblich
x_d	=	Wassergehalt (Dampf)
x_e	=	Wassergehalt (Eis)
x_s	=	Sättigungswassergehalt
φ	=	Relative Feuchtigkeit

1. Einleitung

Schnupfen, Erkältung, im englischen Sprachraum auch „common cold“ genannt, ist eine selbstlimitierende virale Infektion der oberen Atemwege, die alle Altersgruppen gleichermaßen befällt [59]. Sie gilt als eine der häufigsten infektiösen Erkrankungen beim Menschen [53]. Synonym wird auch der Begriff „grippaler Infekt“ benutzt, insbesondere dann, wenn eine fieberhafte Bronchitis besteht.
Die Inzidenz der Erkrankung ist umgekehrt proportional zum Alter der Patienten. Durchschnittlich erkranken Kinder sechs bis acht Mal jährlich und Erwachsene zwei bis vier Mal pro Jahr [59]. Über 200 Viren werden als Erreger mit Schnupfen in Verbindung gebracht. Als Haupterreger gelten die humanen Rhinoviren, neben Coronaviren, Parainfluenza- und Adenoviren sowie bei Kleinkindern das Respiratorische Synzytial Virus [18, 62].
Die volkswirtschaftlichen Kosten, die im Zusammenhang mit Erkältungskrankheiten entstehen, sind beachtlich. So wurden in einer Studie 2002 in den Vereinigten Staaten die wirtschaftlichen Kosten aufgrund von Produktionsausfällen auf etwa 25 Milliarden Dollar jährlich geschätzt [5].
Trotz der hohen sozioökonomischen Kosten fehlen anerkannte Empfehlungen zur Behandlung und Prävention viraler Atemwegsinfekte, somit beschränkt sich die Behandlung der oberen Atemwegsinfektionen momentan lediglich auf die Linderung der betreffenden Symptome wie Husten, Schnupfen, nasale Sekretion und Halsschmerzen, nicht aber auf die verursachenden Viren. Es fehlt also ein kausaler Therapieansatz.

Die allgemeinen angewandten Therapiemaßnahmen und Hausmittel umfassen:

- Therapie mit Vitamin C: Vitamin C zeigte in Studien keinen therapeutischen Nutzen [11]. Bei der prophylaktischen Vitamin C Einnahme konnte in der Normalbevölkerung das Auftreten der Erkrankung nicht auffallend reduziert werden. Es gibt jedoch Hinweise, dass eine prophylaktische, hochdosierte Gabe von Vitamin C bei schwerer körperlicher Betätigung oder extrem kalten Außentemperaturen zu einer Verringerung der Inzidenz der Erkältung führen kann [11].
- Echinacea: Auf dem Markt ist eine Vielzahl von Präparaten erhältlich, die durch verschiedene Verarbeitungsprozesse aus unterschiedlichen Arten

und Pflanzenteilen hergestellt werden. Es gibt jedoch Anzeichen, dass Präparate von Echinacea purpurea zur frühen Therapie von „common colds“ bei Erwachsenen wirksam sein könnten, wenn sie von den oberirdischen Teilen der Pflanze stammen [31].

- Reichliche Flüssigkeitszufuhr: Viel zu trinken ist eine gängige Empfehlung bei Erkältung, jedoch liegen außer Expertenmeinungen keine gesicherten Daten zu dieser Empfehlung vor. Eine frühere Untersuchung zeigte, dass die Einnahme von heißen Getränken oder Hühnersuppe das Nasensekret signifikant besser verflüssigte und sich somit positiv auf den Verlauf bei Infektionen der oberen Atemwege auswirkte [54].
- Inhalation von Dampf: In Studien aus Israel und Großbritannien zeigte sich eine deutliche Besserung des Erkrankungsverlaufs nach der Inhalation von heißer feuchter Luft [46, 65].

Die vorliegende Arbeit soll zeigen, wie die Nase und speziell die Nasenschleimhäute auf veränderte Temperatur- und Feuchtigkeitswerte in der Atemluft reagieren. Bisher liegen keine umfassenden Untersuchungen zur Veränderung der Nasenschleimhauttemperatur bei erhöhter Luftfeuchte und Temperatur der Inspirationsluft vor.

1.1. Anatomie der Nase

Die Nase wird grob in einen inneren und einen äußeren Anteil unterteilt. Im allgemeinen Verständnis wird unter dem Begriff Nase der äußere, sichtbare Anteil verstanden. Der innere Teil setzt sich aus zwei lang gezogenen, luftgefüllten Räumen zusammen.

1.1.1. Äußere Nase

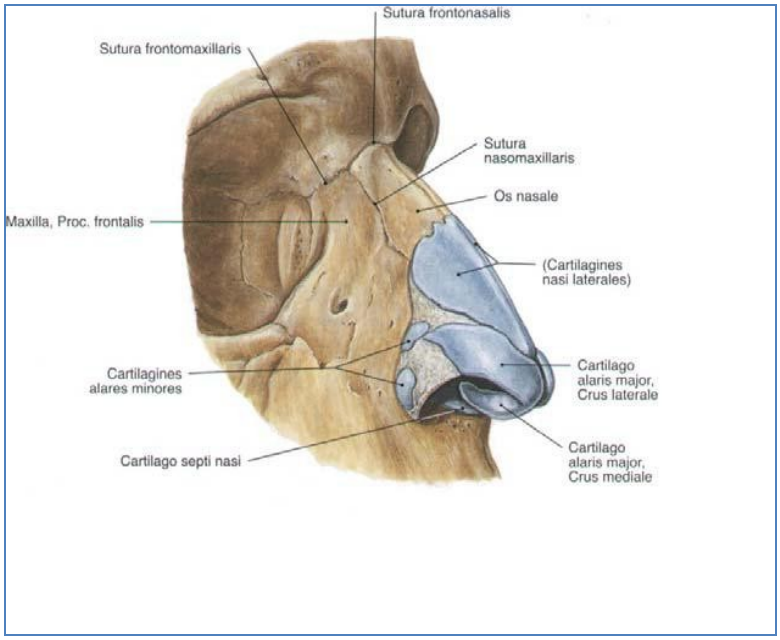

Abbildung 1: Aufbau der äußere Nase, Putz et al.[49 S.89]

Die Form der äußeren Nase wird durch Knorpel, Knochen und Bindegewebe bestimmt. Sie kann in drei etwa gleich große Abschnitte untergliedert werden:

- Nasenspitze (Flügelknorpel)
- knöcherne Nasenpyramide
  (Os frontale, Os nasale und Processus frontalis der Maxilla)
- knorpeliger Nasenrücken (Cartilago septodorsalis)

Ein großer Teil der äußeren Nase hat eine mobile, knorpelige Grundlage. Durch diese Flexibilität wird die Nase vor Verletzungen geschützt und ermöglicht zudem eine Regulierung der Weite des Naseneingangs durch bestimmte mimische Gesichtsmuskeln. Die Nasenmuskulatur wird vom Nervus facialis innerviert [4]. Die sensible Innervation der äußeren Nase übernehmen der erste und zweite Trigeminusast. Von außen ist die Nase wie der Rest des Gesichtes mit Felderhaut bedeckt.

1.1.2. Innere Nase

Der Aufbau der inneren Nase wird ebenso durch eine Infrastruktur aus Knorpel, Knochen und Bindegewebe bestimmt. Die Nasenscheidewand (Septum nasi) unterteilt die Nasenhöhle in der Medianen in eine linke und eine rechte Nasenhöhle.
Das knorpelige Septum und der Vomer ruhen auf einer knöchernen Grundlage, die aus hartem Gaumen (Maxilla, Os palatinum) und der Prämaxilla gebildet wird. Die Verbindung zur Schädelbasis wird durch die Lamina perpendicularis des Siebbeins geschaffen. An der lateralen Nasenwand befinden sich die Nasenmuscheln, durch die untere, mittlere obere Nasenmuschel werden die Nasengänge gebildet. Ihre anatomische Form dient der Vergrößerung der Oberfläche der Nasenschleimhaut. In den unteren Nasengang mündet der Ductus nasolacrimalis. Der mittlere Nasengang stellt mit dem Hiatus semilunaris die zentrale Schaltstelle zum Nasennebenhöhlensystem dar.
Das Innere der Nase ist ausgekleidet mit respiratorischem Epithel sowie in Teilbereichen aus spezialisiertem Riechepithel.

1.1.3. Die Nasenschleimhaut

Gegenüber Umwelteinflüssen und Fremdeinwirkungen auf den Organismus besitzt die nasale Mukosa eine sehr differenzierte und effiziente Abwehr.
Maßgeblich daran beteiligt ist der Mukoziliarapparat, der mittels der Zilien den Sekretfilm kontinuierlich in Richtung Choanen bewegt. Dieser auch als mukoziliare Clearance bezeichnete Vorgang befördert Partikel in circa 20 Minuten von der Nasenöffnung zu den Choanen [43].
Es werden zwei Schutzzonen bei der Nasenschleimhaut unterschieden. Zum einen das Gefäßnetz der Lamina propria und zum anderen die Sekretoberfläche mit der Epithelzone. Neutrophile Granulozyten und Makrophagen finden sich als Zeichen der unspezifischen Immunabwehr in der Nasenschleimhaut. Das Nasensekret enthält Interferon, Proteasen, Proteaseninhibitoren, Lysozym und Antioxidantien sowie als Antikörper der Klassen IgA und IgM als Zeichen der spezifischen Immunabwehr [51].

1.2. Physiologie der Nase:

1.2.1. Funktionen der Nase

Zu den wichtigsten Funktionen der Nase zählen das Riechvermögen und die Klimatisierung der Atemluft (siehe Tabelle 1). Beim Niesreflex ist die Nase unter anderem mit der Lunge funktionell gekoppelt. Sie ist bei der Stimmbildung der nasalen Laute (n, ng, m) beteiligt. Diese Funktionen erfüllen hauptsächlich die Nasenklappen und die innere Oberfläche der Nase [4].

Tabelle 1: Funktionen der Nase modifiziert nach [4]

Funktionen der Nase	
• Aerodynamik • Klimatisierung • Mukoziliarer Transport • Infektionsabwehr	• Resonanz • Reflexe • Riechvermögen

Bei der Nasenatmung wird die eingeatmete Luft in weiten Bereichen unabhängig von den äußeren Bedingungen gleichmäßig angewärmt, angefeuchtet und von gröberen Partikeln gereinigt.
Im Nasenrachenraum herrschen dadurch weitgehend konstante klimatische Verhältnisse. Bei der Ausatmung wird umgekehrt dazu wieder Feuchtigkeit zurückgewonnen. Durch alleinige Mundatmung würde dem Körper ein großer Flüssigkeitsverlust entstehen [64]. Ein Teil der Feuchte, die der Atemluft in der Nase zugeführt wird, entstammt dem Nasensekret, das von den seromukösen Drüsen und den Becherzellen produziert wird. Bedeutend für die nasale Klimatisierung ist die Erwärmung der Atemluft, was durch ein ausgedehntes Gefäßnetz sichergestellt wird [51]. Den verschiedenen Blutgefäßen der Nase sind unterschiedliche Aufgaben zugeordnet. Die Kapazitätsgefäße dienen hauptsächlich zur Regulierung des Atemwegswiderstands. An den Kapazitätsgefäßen wird durch Adrenalin, Noradrenalin und Prostaglandin E2 eine Vasokonstriktion ausgelöst. Histamin bewirkt eine Vasodilatation und damit ein Anschwellen der Nasenschleimhaut [37]. Der Wärmeaustausch wird durch die Kapillaren und Widerstandsgefäße reguliert [3]. Die Widerstandsgefäße werden ebenfalls durch Adrenalin und Noradrenalin kontrolliert, die einen verringerten Blutfluss bewirken. Eine Vasodilatation erfolgt nach Freisetzung von Prostaglandin E2.

1.3. Therapie von Schnupfen durch Inhalation von feuchter, warmer Luft

Eine alte Volksweisheit behauptet: „Wer warme Füße hat, bekommt keine Erkältung.“ In Bezug auf eine Erkältung ist dieser Zusammenhang noch nicht erwiesen, allerdings besteht erwiesenermaßen eine Verbindung zwischen der Temperatur der Füße, der Nasenschleimhauttemperatur und der nasalen Immunantwort auf Allergenprovokation [2]. Naheliegend wäre die gezielte Erwärmung der Nasenschleimhaut auch unmittelbar therapeutisch zu nutzen. Die Inhalation von warmer, feuchter Luft wird in der Bevölkerung zur Behandlung der Erkältungssymptome bei Schnupfen oder anderen Infektionen der Atemwege eingesetzt [61, 65]. Sing analysierte sechs Studien, die sich mit der Thematik "Inhalation von warmer, feuchter Luft" befassten [61]. Davon zeigten drei Studien eine Verbesserung der Erkältungssymptome nach Dampfinhalation [46, 66]. In den anderen Studien konnte kein positiver Effekt der Dampfinhalation nachgewiesen werden [38, 16].

Für die unterschiedlichen Ergebnisse werden die uneinheitliche technische Durchführung und die verschiedene Zusammensetzung der Erregerstämme verantwortlich gemacht [10, 61]. Unterschiede in der Inspirationstemperatur und Dauer müssen beachtet werden [10].

So berichten die Untersuchungen aus Israel und Großbritannien von positiven Effekten der Heißlufttherapie bei Probanden mit Rhinopharyngitis.

Eine 20 Minuten andauernde Inhalation von Luft bei 43°C führte sofort zu einer deutlichen Linderung der Erkältungssymptome mit verbesserter Nasenatmung und konnte den Krankheitsverlauf positiv beeinflussen [46, 65].

Die drei Arbeiten aus den USA konnten hingegen keinerlei positiven Einfluss auf die Erkältungssymptomatik verzeichnen [61]. Bei einer Untersuchung von Ophir et al. zeigten die Patienten mit allergischer Rhinitis nach Inhalation von gesättigter Luft mit 42-44°C über 30 Minuten eine verbesserte Durchgängigkeit der Nase ohne Nebeneffekte [45]. Conti untersuchte die Effekte kurzzeitiger Temperaturbehandlung auf die Replikation menschlicher Rhinoviren in menschlichen Epithelzellen. Es zeigte sich, dass eine 20 minütige Erwärmung bei 45°C die HRV Vervielfachung um mehr als 90% reduzierte, jedoch nur wenn sie im richtigen Zeitpunkt der Virusreplikation erfolgte. Eine ausreichende Inhibition der Virusreplikation wurde jedoch nur erreicht bei wiederholter Durchführung der Behandlung [10].

In den drei amerikanischen Studien [16, 38, 20] atmeten die Probanden die Luft, im Unterschied zu den Studien aus Großbritannien und Israel, nicht direkt über eine Atemmaske sondern über eine Art Düse. Die Probanden befanden sich dabei mit dem Gesicht vor einem Luftauslass, der die erwärmte Luft in Richtung Nase beförderte, zum Teil mussten die Probanden die Luftdüse selbstständig in einem bestimmten Abstand vor den Nasenlöchern halten und atmen [20]. In seiner Arbeit über das Flimmerepithel stellte Iravani die Abhängigkeit der Funktionsfähigkeit des Flimmerepithels von der Temperatur fest. In seinen Versuchen konnte er zeigen, dass bei einer Erhöhung der Temperatur der eingeatmeten Luft bis auf 42°C die Flimmerbewegungen stark anstiegen [23]. Daher konnte ein Temperatureinfluss auf die Nasenfunktion somit bereits vermutet werden. Auch Mercke zeigte am Flimmerhärchen eine Temperaturabhängigkeit auf [40]. Die Flimmerhärchenaktivität scheint im besonderen Maße von Umgebungsparametern wie Feuchte und Temperatur abhängig zu sein. Die gesteigerte Flimmerhärchenaktivität deutet auf eine gesteigerte mukoziliare Clearance hin und würde für die Warmluftinhalation bei grippalen Infekten sprechen.

Tyrrell kommt in seinen Untersuchungen zum Schluss, dass die Inhalation von 43° warmer, gesättigter Luft den Verlauf einer Erkältung beeinflussen kann und zur Linderung der Symptome beiträgt [65]. Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass der Effekt einer Inhalation von warmer, feuchter Luft bis dato noch nicht abschließend geklärt ist.

1.4. Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll die Klimatisierungsfunktion der Nase untersucht werden. Im Speziellen ist von Interesse, wie die Nasenschleimhauttemperatur auf die Inhalation von unterschiedlich warmer und feuchter Luft reagiert.
Die daraus resultierenden Ergebnisse sollen Aufschluss darüber geben, welche Inhalationstemperaturen zu signifikanten Temperaturerhöhungen der Nasenschleimhaut führen und somit mögliche Anhaltspunkte für den therapeutischen Einsatz von Heißluftinhalationen liefern.
Insbesondere war es die Zielsetzung der Arbeit, die folgenden Fragen im Detail zu beantworten:

- Welchen Einfluss hat die Expositionsdauer auf die Nasenschleimhauttemperatur?
- Welchen Einfluss hat die thermische Energie des Inhalats auf die Nasenschleimhauttemperatur?
- Welchen Einfluss hat die relative Feuchte der Expositionsluft auf die Nasenschleimhauttemperatur?
- Welchen Einfluss hat die Temperatursteigerung der Expositionsluft auf die Nasenschleimhauttemperatur?
- Welche sonstigen Ergebnisse traten auf?

2. Material und Methodik

An jeweils 3 Tagen wurden an 21 Probanden im Klimalabor Messungen mit unterschiedlich feuchter und warmer Luft durchgeführt. Die hierfür benötigte Luft wurde von einer Klimakammer erzeugt und den Probanden mittels eines Schlauchsystems und einer Atemmaske zugeführt. Für jeden Messtag war eine konstante relative Luftfeuchtigkeit vorgegeben (25%, 50% oder 75%). Die Temperatur der Inspirationsluft betrug an jedem Messtag initial 37°C und wurde nach jeweils 20 Minuten auf 65°C und 75°C gesteigert. In regelmäßigen Abständen (2, 5 und 20 Minuten) wurde daraufhin die Schleimhautemperatur der Probanden am Nasenseptum in Area 2 mithilfe eines dünnen Thermoelements gemessen.

2.1. Versuchsgeräte und Materialien

2.1.1. Klimakammer

Die für die Versuche benötigte Atemluft wurde für die Probanden mithilfe vom Klimaprüfschrank SB 1/160/40 (Firma Weiss Umwelttechnik GMBH®, Reiskirchen) aufbereitet (Abbildung 2: Klimakammer). Mit der Klimakammer lassen sich Temperaturwerte von –10 °C bis 95 °C und relative Feuchtewerte von 10 % bis 98 % einstellen. Extreme Feuchte- und Temperaturwerte werden von der Klimakammer nur sehr langsam erreicht.



Abbildung 2: Klimakammer des Klimaforschungslabors Ulm, zur Erzeugung der Inhalationsluft für die Versuchsteilnehmer

Die Probanden inhalierten die aufbereitete Einatemluft über ein Schlauchsystem mit Atemmaske (Abbildung 3), wie es auch in der Schlafmedizin Verwendung findet In der durchgeführten Versuchsreihe wurden die Versuchspersonen mittels eines 40 cm langes Schlauchsystem mit der Klimakammer verbunden (Abbildung 4). Mittels des speziellen Schlauch-in-Schlauch Systems wurde gewährleistet, dass sich Ein- und Ausatemluft nicht vermischen. Ein Ventilator befördert die Luft aus der Klimakammer mit leichtem Überdruck und einer Geschwindigkeit von 4m/sec im inneren Schlauch zur Atemmaske, die Ausatemluft der Probanden wurde durch den äußeren Schlauch wieder an die Umgebung abgegeben.



Abbildung 3 : Versuchsteilnehmer mit Atemmaske. Der zusätzlich mit Aluminiumfolie umwickelte Atemschlauch ist gut zu erkennen

Ein weiterer Vorteil des Doppelschlauchsystems besteht darin, dass die warme Ausatemluft die von der Klimakammer erzeugte Luft gegenüber der kühleren Umgebungsluft isoliert. Zusätzlich wurde der Außenschlauch mit Aluminiumfolie isoliert.

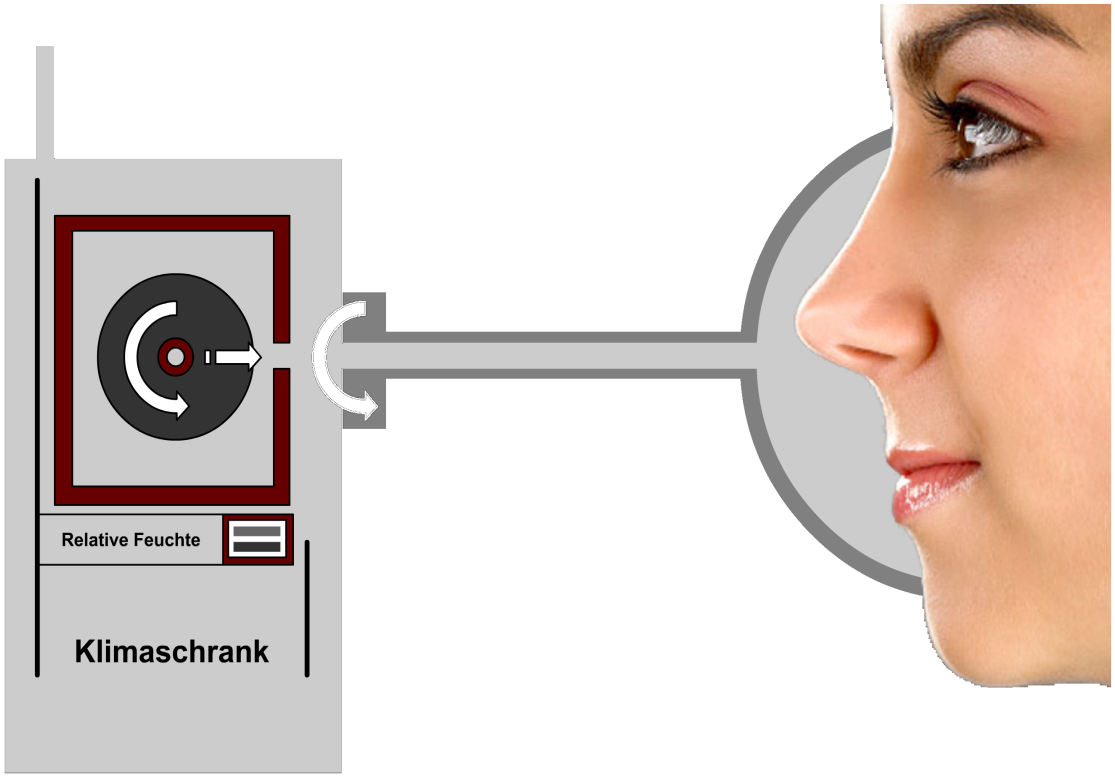

Abbildung 4: Schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus: Der Klimaschrank konditioniert die Raumluft auf die programmierte relative Feuchtigkeit und Temperatur. Das erzeugte Inhalat wird den Probanden via Schlauch und Atemmaske zugeführt

2.1.2. Thermoelement

Die Messung der Schleimhauttemperatur in der Nase erfolgte mit einem Chromium-Nickel-Aluminium Mantelthermoelement (Typ K, Thermocoax, Suresnes, Frankreich) mit einem Außendurchmesser von 0,34 mm.

Es erfüllt die Anforderungen an die Temperaturmessung: schnelle und exakte Erfassung der Temperatur, unproblematische Handhabung. Aufgrund seiner Dünne, Flexibilität und guter Biegsamkeit ist es zudem auch an schwer zugänglichen Messorten einsetzbar. Es besteht aus Chromel (90% Nickel, 10% Chrom) und Aluminium (95 % Nickel, 2% Magnesium, 2% Aluminium, 1% Silizium). Das Thermoelement setzt sich aus einem Thermopaar, dem Isolationsmaterial und dem Schutzmantel zusammen

Das bei diesem Versuchsaufbau verwendete Thermoelement besitzt eine isolierte Messstelle (Ausführung TI). Dies bedeute dass die Thermodrähte gegen den

Schutzmantel isoliert sind und nicht wie bei anderen Ausführungen eine Einheit bilden. Diese isolierte Messstelle wirkt vorbeugend gegen äußere Spannungseinflüsse.

Die durchschnittliche Thermospannung vom Chromel-Alumel-Typ K beträgt 41 μV/°C. Die Thermospannung stand der Temperatur nahezu proportional gegenüber. Es sind Temperaturmessungen im Bereich –200°C und 1150°C möglich. Die Ansprechzeit dieses Messinstrumentes beträgt 0,4s. Das Thermoelement erreicht eine absolute Messgenauigkeit von ± 1,5 °C und darunter.

Die erhobenen Temperaturdaten wurden über eine A/D-Karte in einem Computer ausgewertet und die mit verschiedenen Verzögerungszeiten erhaltenen Messwerte nachträglich rechnerisch mithilfe des Computerprogramms TurboLab (Fa. Bressner Technology, Gröbenzell) am Bildschirm dargestellt. Während der Atmung wurde ein wellenförmiger Temperaturverlauf mit Minimalwerten bei Ende der Einatemphase und Maximalwerten am Ende der Ausatemphase registriert. Durch die synchrone Aufzeichnung der Atemkurve konnten die Messwerte der Atemkurve zugeordnet werden [25]. Zur Auswertung wurden die endinspiratorischen Temperaturwerte eines Atemzyklus herangezogen.

2.1.3. Rhinomanometrie

Bei allen Probanden wurde eine aktive anteriore Rhinomanometrie (AAR) vor und nach Durchführung der nasalen Klimamessungen durchgeführt, hierbei wurden die Leitlinien von Clement P. et al [7] angewandt.

Die Rhinomanometrie ist ein in der HNO-Heilkunde übliches, nicht-invasives Untersuchungsverfahren, bei dem der Proband über eine Atemmaske einatmet und über eine vor dem Naseneingang liegende Messsonde die durch die Nase strömende Luft gemessen wird. Das Verfahren beruht auf der gleichzeitigen Registrierung von nasalem Atemstrom auf einer Nasenseite und Erhebung der Druckdifferenz zwischen Nasopharynx und Außenluft.

Der Druckschlauch wurde mithilfe eines vorgefertigten Schaumstoffadapters im nicht zu messenden Nasenloch eingebracht und entsprechend fixiert. Während die Maske aufgesetzt wurde atmeten die Probanden durch den Mund. Die Messung wurde gestartet, wenn die Maske dicht am Gesicht anlag und der Proband ruhig und gleichmäßig durch die Nase atmete. Nach der Aufzeichnung von etwa 6

Atemzügen wurden die Werte gemittelt und die Gegenseite in gleicher Weise gemessen.

Die Druckbestimmung in der Choane erfolgt bei der anterioren Rhinomanometrie durch den Messschlauch im verschlossenen Nasenloch, während durch die andere Nasenseite geatmet wird. Dabei wird die Druckdifferenz zwischen Naseneingang und Nasenrachenraum während der Inspiration und während der Exspiration durch automatisch registrierende Manometer gemessen, wobei gleichzeitig die Strömungsgeschwindigkeit erfasst wird. Als Orientierungswert wird meist der Volumenstrom bei einem Druck von 150 Pa angegeben, d.h. das Volumen an Luft in cm^3, das pro Sekunde durch die Nase strömt [13]. Die Rhinomanometrie wurde beidseits durchgeführt. Es wurde immer mit der Messung der rechten Seite der Nase begonnen und die exspiratorischen Werte notiert.

Tabelle 2: Normalwerte der aktiven anterioren Rhinomanometrie für den Volumenstrom V150 bei Nasenatmung modifiziert nach [14]

V150 (cm^3/s)		
	eine Nasenseite	Gesamtnase
Lenz		
vor Abschwellen	340+/-110	670+/-160
nach Abschwellen	410+/-100	810+/-170
Masing		
vor Abschwellen	um 300	um 600
nach Abschwellen	um 400	um 800
Bachmann		
vor Abschwellen	400-500	800-1000
nach Abschwellen	480-670	960-1330

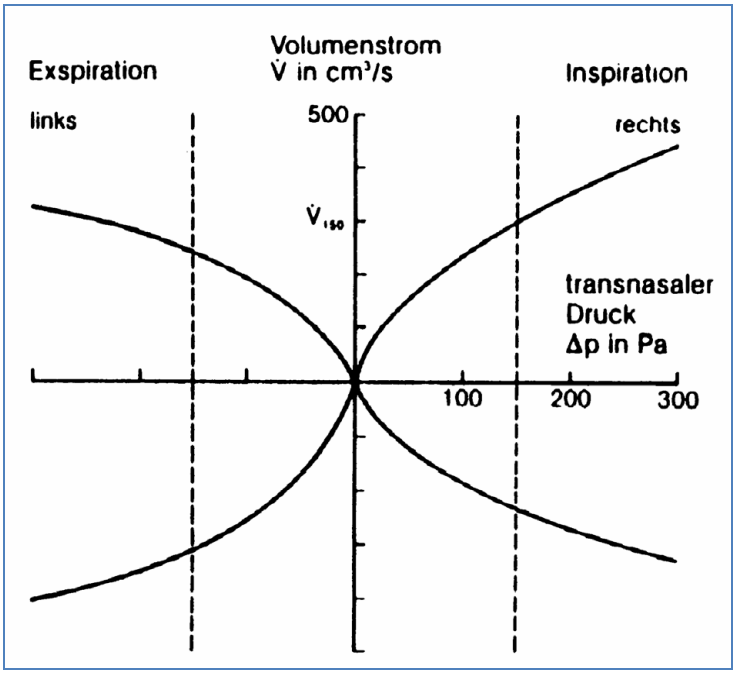

Abbildung 5: Nach Inspiration und Exspiration zeigt sich in der aktiven anterioren Rhinomanometrie dieser typische Kurvenverlauf (Eichler 1988 [12 S.11])

2.1.4. Energiegehalt der Inhalationsluft

Der Energiegehalt der Inhalationsluft (Spezifische Enthalpie h_{1+x}) unterscheidet sich abhängig von den eingestellten Konditionen.

Tabelle 3: Spezifische Enthalpie h_{1+x} der Inhalationsluft bei den relativen Feuchtegraden (r. F.) 25%, 50% und 75% bezogen auf die Luftmasse

	$\varphi = 25\%$ r. F.	$\varphi = 50\%$ r. F.	$\varphi = 75\%$ r. F.
h_{1+x} (37°C) $[\frac{kJ}{kg}]$	62,70	89,0	116,18
h_{1+x} (65°C) $[\frac{kJ}{kg}]$	174,20	298,56	442,06
h_{1+x} (75°C) $[\frac{kJ}{kg}]$	250,68	467,76	743,69

Tabelle 4: Spezifische Enthalpie $h_{1+x}\,\rho$ der Inhalationsluft bei den relativen Feuchtegraden (r. F.) 25%, 50% und 75% bezogen auf das Luftvolumen

	φ = 25% r. F.	φ = 50% r. F.	φ = 75% r. F.
$h_{1+x}\,\rho$ (37°C) $[\frac{kJ}{dm^3}]$	0,07	0,098	0,13
$h_{1+x}\,\rho$ (65°C) $[\frac{kJ}{dm^3}]$	0,17	0,27	0,37
$h_{1+x}\,\rho$ (75°C) $[\frac{kJ}{dm^3}]$	0,23	0,38	0,53

Nachfolgend ist der Rechenweg zur Berechnung der spezifischen Energie aufgeführt.

Unter der relativen Feuchte versteht man das Verhältnis der tatsächlich enthaltenen zur maximalen möglichen Masse des Wasserdampfes in der Luft.

Die relative Feuchte φ ist das Verhältnis aus dem tatsächlichen Partialdruck [p_d] des Wasserdampfs in der feuchten Luft und dem Sättigungspartialdruck [p_s] des Wassers in Luft gleicher Temperatur.

Relative Feuchte $\varphi = \frac{pd}{ps}$ (Gl. 2-1)

Nach Umstellung von Gleichung 2-1 lässt sich der Partialdruck berechnen:

$$pd = \varphi \cdot \mathrm{ps}$$

p_s (37°C) = 62,74 mbar

p_s (65°C) = 250,1 mbar

p_s (75°C) = 385,5 mbar

Die Werte für den Sättigungspartialdruck p_s wurde aus Tabelle 5 entnommen.

Tabelle 5: Wertetabelle für den Sättigungsdampfdruck ps und den Sättigungswassergehalt Xs von Wasserdampf von feuchter Luft in Abhängigkeit von der Temperatur [56 S.95]

ϑ [°C]	p_s [mbar]	x_s [g/kg]	ϑ [°C]	p_s [mbar]	x_s [g/kg]
-30	0, 373	0, 232	36	59, 40	39, 28
-29	0, 415	0, 258	37	62, 74	41, 64
-28	0, 460	0, 286	38	66, 24	44, 12
-27	0, 511	0, 318	39	69, 91	46, 75
-26	0, 567	0, 353	40	73, 75	49, 52
-25	0, 628	0, 391	41	77, 77	52, 45
-24	0, 695	0, 432	42	81, 98	55, 55
-23	0, 768	0, 478	43	86, 39	58, 81
-22	0, 848	0, 527	44	91, 00	62, 27
-21	0, 935	0, 582	45	95, 82	65, 91
-20	1, 029	0, 641	46	100, 85	69, 77
-19	1, 133	0, 705	47	106, 12	73, 84
-18	1, 247	0, 777	48	111, 61	78, 14
-17	1, 369	0, 853	49	117, 35	82, 70
-16	1, 504	0, 937	50	123, 35	87, 52
-15	1, 651	1, 029	51	129, 60	92, 61
-14	1, 809	1, 127	52	136, 12	98, 00
-13	1, 981	1, 235	53	142, 92	103, 7
-12	2, 169	1, 352	54	150, 01	109, 8
-11	2, 373	1, 479	55	157, 40	116, 2
-10	2, 594	1, 618	56	165, 10	123, 0
-9	2, 833	1, 767	57	173, 12	130, 2
-8	3, 094	1, 930	58	181, 46	137, 9
-7	3, 376	2, 107	59	190, 15	146, 0
-6	3, 681	2, 298	60	199, 19	154, 7
-5	4, 010	2, 504	61	208, 6	163, 9
-4	4, 368	2, 729	62	218, 4	173, 8
-3	4, 754	2, 917	63	228, 5	184, 3
-2	5, 172	3, 234	64	239, 1	195, 4
-1	5, 621	3, 516	65	250, 1	207, 4
0	6, 107	3, 822	66	261, 5	220, 2
1	6, 566	4, 111	67	273, 3	233, 9
2	7, 054	4, 419	68	285, 6	248, 7
3	7, 575	4, 747	69	298, 4	264, 5
4	8, 129	5, 097	70	311, 6	281, 5
5	8, 719	5, 471	71	325, 3	299, 6
6	9, 346	5, 868	72	339, 6	319, 9
7	10, 012	6, 290	73	354, 3	341, 4
8	10, 721	6, 740	74	369, 6	364, 7
9	11, 473	7, 219	75	385, 5	390, 3
10	12, 271	7, 727	76	401, 9	418, 0
11	13, 118	8, 267	77	418, 9	448, 5
12	14, 015	8, 841	78	436, 5	481, 9
13	14, 967	9, 450	79	454, 7	518, 8
14	15, 974	10, 10	80	473, 6	559, 7
15	17, 041	10, 78	81	493, 1	605, 2
16	18, 170	11, 51	82	513, 3	656, 1
17	19, 364	12, 28	83	534, 2	713, 5
18	20, 63	13, 10	84	555, 7	778, 1
19	21, 96	13, 97	85	578, 0	852, 1
20	23, 37	14, 88	86	601, 1	937, 5
21	24, 86	15, 85	87	624, 9	1036, 4
22	26, 42	16, 88	88	649, 5	1152, 8
23	28, 08	17, 97	89	674, 9	1291, 5
24	29, 82	19, 12	90	701, 1	1459, 3
25	31, 66	20, 34	91	728, 1	1665, 9
26	33, 60	21, 63	92	756, 1	1928, 6
27	35, 64	22, 99	93	784, 9	2270, 1
28	37, 79	24, 42	94	814, 6	2733, 5
29	40, 04	25, 94	95	845, 3	3399, 4
30	42, 42	27, 55	96	876, 9	4431, 7
31	44, 91	29, 25	97	909, 4	6244, 6
32	47, 54	31, 04	98	943, 0	10292, 4
33	50, 29	32, 94	99	977, 6	27151, 4
34	53, 18	34, 94	100	1013, 3	
35	56, 22	37, 05			

Tabelle 6: Partialdruck $_{pd}$ der Inhalationsluft unter den entsprechenden Klimakonditionen

Relative Feuchte 25%	Relative Feuchte 50%	Relative Feuchte 75%
p_d (37°C) = 15,685 mbar	p_d (37°C) = 31,37 mbar	p_d (37°C) = 47,055 mbar
p_d (65°C) = 125,05 mbar	p_d (65°C) = 125,05 mbar	p_d (65°C) = 187,575 mbar
p_d (75°C) = 96,375 mbar	p_d (75°C) = 192,75 mbar	p_d (75°C) = 289,125 mbar

Der Wassergehalt x_d [$\frac{g\ H2O}{kg\ Luft}$] der feuchten Luft berechnet sich aus:

$$xd = 0{,}622\ \frac{pd}{p-pd}$$ (GL 2-2)

Für den Umgebungsdruck p gilt p = 1000mbar.

Aus Gleichung 2-2 berechnet sich der Wassergehalt x_d:

Tabelle 7: Wassergehalt x_d der Inhalationsluft in Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit (r. F.) und der Temperatur

	φ = 25% r. F.	φ = 50% r. F.	φ = 75% r.F.
x_d (37°C)($\frac{g\ H2O}{kg\ Luft}$)	9,91	20,14	30,71
x_d (65°C) $\frac{g\ H2O}{kg\ Luft}$	41,48	88,90	143,60
x_d (75°C) $\frac{g\ H2O}{kg\ Luft}$	66,33	148,52	253,00

Definition Wassergehalt:

Der Wassergehalt x ist das Verhältnis aus der Masse des Wassers in seinen drei möglichen Aggregatzuständen zu der Masse der trockenen Luft.
Der Wassergehalt x ist aus drei Anteilen zusammengesetzt,
die vom Wasserdampf (x_d), vom flüssigen Wasser (x_w) und vom Eis (x_e) stammen.
Damit gilt: $x = x_d + x_w + x_e$ [56].

Die spezifische Enthalpie der feuchten Luft wird als h_{1+x} bezeichnet,
Für ungesättigte feuchte Luft, also Luft deren relative Feuchte < als 100% ist berechnet sich die spezifische Enthalpie aus der Enthalpie der trockenen Luft h_L und dem Produkt aus Wassergehalt x_d (Tabelle 7) und Dampfenthalpie h_d.

$h_{1+x} = h_L + x_d\ h_d$ (Gl 2-3)

Enthalpie der trockenen Luft : $h_L = \bar{c}_{p,L}\ \vartheta = 1{,}006\ \frac{kJ}{kgK} \cdot \vartheta$.(Gl 2-4)

Enthalpie des Wasserdampfs: $h_d = r_v + \bar{c}_{p,d}\ \vartheta$ (Gl 2-5)

$h_d = 2502 \frac{kJ}{kg} + 1{,}86 \frac{kJ}{kgK} \cdot \vartheta$ (Dampftemperatur)

Formelzeichenindex:

$\bar{c}_{p,d}$ spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf

$\bar{c}_{p,L}$ spezifische Wärmekapazität trockener Luft

h_d Dampfenthalpie

h_L Enthalpie der trockenen Luft

r_v Verdampfungsenthalpie = $2502 \frac{kJ}{kg}$

x_d Wassergehalt (Dampf)

x_s Sättigungswassergehalt

ϑ Temperatur (Referenzzustand 0°C=273,15K)

Tabelle 8: Daten für die Berechnung der Enthalpie von feuchter Luft modifiziert nach [56]

Trockene Luft	Dampf	Flüssigkeit
$\bar{c}_{p,L} = 1{,}006 \frac{kJ}{kgK}$	$\bar{c}_{p,d} = 1{,}86 \frac{kJ}{kgK}$	$r_v = 2502 \frac{kJ}{kg}$

2.2. Versuchspersonen

2.2.1. Einschlusskriterien

Eingeschlossen an der Studie waren fieberfreie Erwachsene ohne Nasenpathologie.

2.2.2. Ausschlusskriterien

Ausschlusskriterien waren Probanden mit früheren Nasen-Operationen, Schwangere oder stillende Mütter, Raucher, Allergiker, Patienten mit schwer therapierbarem Asthma bronchiale, schwerwiegenden internistisch-neurologischen Erkrankungen, Probanden unter 18 Jahren und über 65 Jahren, sowie Probanden mit rezidivierendem Nasenbluten, Blutungsneigung und Gerinnungsstörungen.

2.2.3. Blockbildung

Um einen möglichen Einfluss der Messreihenfolge auf die Messergebnisse erkennen zu können, wurden die Probanden drei unterschiedlichen Blöcken zugeordnet.

Die Zuordnung erfolgte computerrandomisiert mithilfe der integrierten Zufallsfunktion von Microsoft Excel. Es resultierte ein balanced block design.

- Gruppe 1 mit der Feuchtereihenfolge 25%, 75%, 50% relative Feuchtigkeit; Probanden Nr. 1, 2, 6, 10, 11, 20, 22
- Gruppe 2 mit der Feuchtereihenfolge 50%-25%-75% relative Feuchtigkeit; Probanden Nr. 4, 5, 7, 9, 13, 15
- Gruppe 3 mit der Feuchtereihenfolge 75%-50%-25% relative Feuchtigkeit; Probanden Nr. 3, 8, 12, 16, 17, 19, 21, 23

2.3. Versuchsablauf

Die Probanden wurden in einem Informationsgespräch über den Versuchsablauf, den Versuchsaufbau und das Ziel der Messung aufgeklärt.

Anschließend wurden die Ein- und Ausschlusskriterien überprüft; sofern der Proband für die Studie geeignet war, wurde eine Eingangsuntersuchung durchgeführt.

2.3.1. Eingangsuntersuchung

Alle Studienteilnehmer wurden zunächst hinsichtlich Vorerkrankungen und Nasenproblemen befragt und im Anschluss daran einer otorhinolaryngologischen Untersuchung unterzogen, die eine anteriore Rhinoskopie und Nasenendoskopie ohne vorherige Applikation von abschwellenden Mitteln oder Lokalanästhetika beinhaltete.

Der Proband war zur Studienteilnahme zugelassen, sofern er auch nach der endoskopischen Untersuchung die medizinischen Voraussetzungen erfüllte und zur Teilnahme an der Untersuchung bereit war.

Die Untersuchungen wurden nach Zustimmung der Ethikkommission der Universität Ulm (Antrag-Nr. 121/2006) durchgeführt und entsprachen den ethischen Standards der Deklaration von Helsinki/Hongkong (1964/1989).

2.4. Studienablauf

2.4.1. Studiendesign und Gruppenverteilung

Die Studie wurde im balanced block design durchgeführt, die Probanden durchliefen die identischen Temperaturmessungen (37°C / 65°C / 75°C) jedes Versuchstages in drei unterschiedlichen Ablauf-Szenarien. (Tabelle 9)

- Szenario A (Gruppe 1): Messtag 1: 25% r. F., Messtag 2: 75% r. F. und Messtag 3: 50% relative Feuchte.
- Szenario B (Gruppe 2): Messtag 1: 50% r. F., Messtag 2: 25% r. F. und Messtag 3: 75% relative Feuchte.
- Szenario C (Gruppe 3): Messtag 1: 75% r. F., Messtag 2: 50% r. F. und Messtag 3: 25% relative Feuchte.

Jedem Szenario wurden, wie oben beschrieben, computerrandomisiert 7 Probanden zugeordnet.

Tabelle 9: Messablaufszenarien der einzelnen Gruppen: Für jeden Messtag wurde jeder Gruppe ein anderes Szenario mit einer zugeordneten relativen Luftfeuchtigkeit (r. F.) bei den Temperaturstufen 37°, 65° und 75°C vorgegeben. In der Tabelle wurden die Feuchtestufen zur besseren Veranschaulichung farblich unterlegt: 25% r. F. – (türkis)/ 50% r. F. – (orange) / 75% r. F. – (gelb)

	Tag 1	Tag 2	Tag 3
Gruppe 1	Temperatur 37°C r. F 25% Temperatur 65°C r. F. 25% Temperatur 75°C r. F. 25%	**Temperatur 37°C r. .F. 75%** **Temperatur 65°C r. F. 75%** **Temperatur 75°C r. F. 75%**	*Temperatur 37°C r .F. 50%* *Temperatur 65°C r. F. 50%* *Temperatur 75°C r. F. 50%*
Gruppe 2	*Temperatur 37°C r. F. 50%* *Temperatur 65°C r. F. 50%* *Temperatur 75°C r. F. 50%*	Temperatur 37°C r. F. 25% Temperatur 65°C r. F. 25% Temperatur 75°C r. F. 25%	**Temperatur 37°C r. F. 75%** **Temperatur 65°C r. F. 75%** **Temperatur 75°C r. F. 75%**
Gruppe 3	**Temperatur 37°C r. F. 75%** **Temperatur 65°C r. F. 75%** **Temperatur 75°C r. F. 75%**	*Temperatur 37°C r. F. 50%* *Temperatur 65°C r. F. 50%* *Temperatur 75°C r. F. 50%*	Temperatur 37°C r. F. 25% Temperatur 65°C r. F. 25% Temperatur 75°C r. F. 25%

2.4.2. Ablauf eines Messtages

Jeder Proband wurde an drei Tagen einbestellt. Nach 15-minütiger Adaptierung an die Raumluftbedingungen des Forschungslabors der Universitäts-HNO-Klinik Ulm (Temperatur: 22±1°C, relative Feuchte: 35±4%) wurde mit der Messung des nasalen Atemwegwiderstands beider Nasenseiten begonnen.

Die durch die aktive anteriore Rhinomanometrie ermittelte Nasenseite mit der höheren Durchgängigkeit wurde zur Messung der Nasenschleimhauttemperatur herangezogen. Die Temperaturmessung erfolgte im Bereich der vorderen Nasenscheidewand, 2 cm nach dem Naseneingang (siehe Abbildung 6), in der sogenannte Area 2 nach Cottle [21]. Mittels einer Ringmarkierung am Thermoelement, im Abstand von 2cm nach der Spitze, konnte der initiale Messpunkt in den Folgemessungen immer wieder aufgenommen werden und war damit auch für alle Probanden gleich definiert.

Alle Messwerte wurden ohne die Gabe von Lokalanästhetika oder Xylometazolin ermittelt.

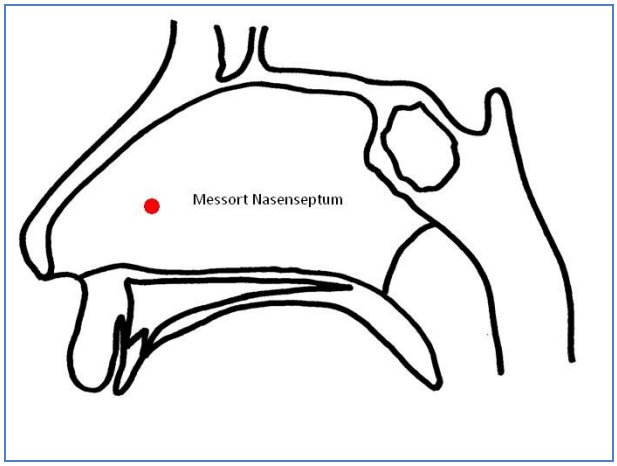

Abbildung 6: Lokalisation des intranasalen Messpunktes (rote Markierung)

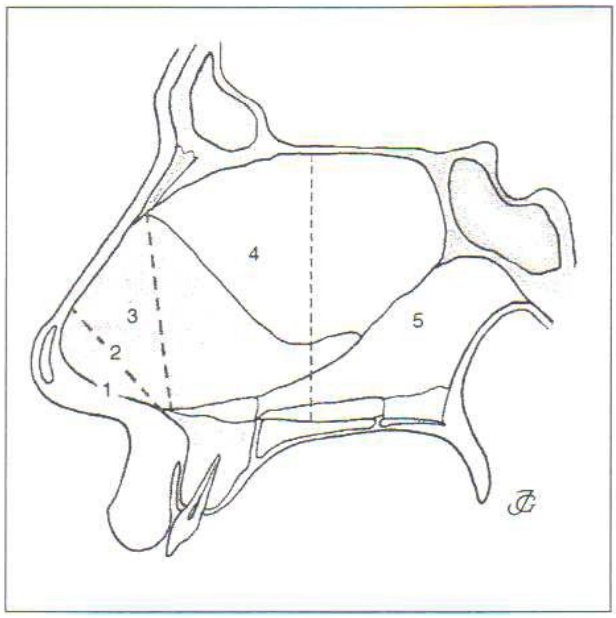

Abbildung 7: Schematische Einteilung des Nasenseptums nach Cottle aus Huizing und de Groot [21 S.14]

Zum besseren Verständnis wird nachfolgend exemplarisch der Ablauf der Messungen eines Probanden der Gruppe 1 am ersten Messtag beschrieben:

- Vor Beginn der Messung fand eine Raumluftadaption der Probanden an das Klimalabor über 15 Minuten statt.
- Vor Beginn der Exposition mit der in der Klimakammer erzeugten Inhalationsluft, wurde ein Leerwert der Nasenschleimhauttemperatur ermittelt.
- Die relative Feuchte der inhalierten Luft am ersten Messtag der Gruppe 1 beträgt 25%.
- Der Proband inhaliert temperierte Luft in der Reihenfolge 37°C, 65°C und 75°C durch die Atemmaske.
- Die Inhalationsdauer beträgt je Temperaturstufe 20 Minuten mit anschließender fünfminütiger Erholung.
- Die Messungen der Nasenschleimhauttemperatur erfolgen jeweils nach 2, 5 und 20 Minuten.
- Insgesamt werden pro Messtag 13 Temperaturwerte der Schleimhaut am Nasenseptum zu 13 festgelegten Zeitpunkten erfasst.
- Die Atemmaske wird nur zur Messung sowie während der fünfminütigen Erholungsphasen abgenommen.

Die erste Messung (Leermessung) beginnt 15 Minuten nach Akklimatisierung im Versuchslabor um einen Ausgangswert für die Nasenschleimhauttemperatur zu ermitteln. Der Proband atmet für 2 Minuten durch die Atemmaske auf 37°C temperierte Luft aus der Klimakammer. Zur Messung nach zwei Minuten wird die Atemmaske abgenommen und die Messung durchgeführt, anschließend atmet er drei Minuten weiter durch die Atemmaske und es erfolgt die Fünf-Minuten Messung. Nach weiteren 15 Minuten Inhalation durch die Maske erfolgt die 20-Minuten Messung, danach wird nach fünf Minuten Pause bei Raumluft ein Abschlusswert ermittelt. Im Anschluss daran wurde jeweils derselbe Vorgang nach Temperatursteigerung auf 65 °C und 75°C durchgeführt.

Tabelle 10: Schema der durchgeführten Einzelmessungen der Nasenschleimhauttemperatur pro Messtag mit zugehöriger Expositionstemperatur

Zeitverlauf	Nach 0 min	Nach 2 min	Nach 5 min	Nach 20 min	Nach 20+5 min
Temperatur des Inhalats	Ausgangs-messung (Leerwert)				
37°C		Messung	Messung	Messung	Messung
65°C		Messung	Messung	Messung	Messung
75°C		Messung	Messung	Messung	Messung

2.5. Datenverarbeitung und Statistik

Die Daten wurden initial auf einem Messprotokoll dokumentiert. Sie wurden anschließend in einer Microsoft Excel-Tabelle zusammengeführt. Zur Minimierung von Fehlern erfolgte eine Zweiteingabe.
Die statistische Auswertung und Visualisierung der Daten erfolgte mithilfe des Statistikprogramms WinSTAT® (Fa. Kalmia Inc., Cambridge, MA, USA). Die erhobenen Daten wurden mit Mittelwert, Median, Standardabweichung sowie Minima und Maxima in Box-Whisker-Plots dargestellt beziehungsweise in Text- oder Tabellenform wiedergegeben. Die Unterschiede zwischen den Temperaturwerten wurden mittels des Wilcoxon-Tests überprüft. Das Signifikanzniveau wurde mit $\alpha \leq 0{,}05$ als signifikant, mit $\alpha \leq 0{,}01$ als hochsignifikant festgelegt.

3. Ergebnisse

3.1. Probanden

Es konnten n= 23 gesunde Probanden eingeschlossen werden, n= 2 Probanden wurden von der Auswertung ausgeschlossen, da die Messungen jeweils nach einem Messtag abgebrochen wurden. In beiden Fällen konnten die Messungen wegen Zeitmangels und persönlicher Gründe nicht fortgeführt werden. Bei 21 Probanden konnte ein vollständiger Datensatz erhoben werden, hiervon waren n=6 weiblich und n=15 männlich. Das Durchschnittsalter der Probanden am ersten Messtag war 27,71 ± 8,58 Jahre (Min 21 - Max 56) Jahre. Hierbei wurden nur die Daten der ausgewerteten Personen berücksichtigt.

Tabelle 11: Probandenalter der ausgewerteten Versuchsteilnehmer, nach Temperaturmessung im Klimalabor der Klinik für Hals-Nasen-und Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Ulm. Angaben in Jahren

Mittelwert	27,71
Standartabweichung	8,58
Median	26
Min	21
Max	56

Min = Minimum, Max = Maximum

Tabelle 12: Probandendaten. Übersicht zur Anzahl und Geschlechterverteilung der ausgewerteten Versuchsteilnehmer an den Temperaturmessungen im Klimalabor der Klinik für Hals-Nasen-und Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Ulm

Probanden	n
Zahl	21
Geschlecht (m/w)	15 / 6

m = männlich, w = weiblich

3.2. Carry-over Effekt

Bei der Messung durchlief jede Subgruppe das identische Szenario, allerdings in unterschiedlicher Reihenfolge (Tabelle 9). Es galt festzustellen, ob durch die unterschiedliche Reihenfolge der Feuchteexposition eine Veränderungen zwischen den Messergebnissen der Subgruppen aufgetreten ist.

Hierzu wurden die ermittelten Mittelwerte, Mediane, Minima und Maxima der Gruppen bei jeweils identischem Feuchtewert (25%, 50% und 75% relative Feuchtigkeit) untereinander verglichen.

Zur Demonstration der Vorgehensweise werden nachfolgend in Tabelle 13 die Messwerte der drei Gruppen tabellarisch aufgezeigt. Mittels der für jede Subgruppe gesondert ermittelten Werte konnte die Gruppen untereinander auf Abweichungen untersucht werden. Es zeigte sich kein relevanter Unterschied bei den Messergebnissen unter den Gruppen mit verschiedener Reihenfolge der Feuchteexposition. Bei Betrachtung der Temperaturwerte und Temperaturkurven (Abbildung 8, Abbildung 9, Abbildung 10) der drei Subgruppen waren keine Unterschiede im Temperaturverlauf festzustellen. Die Messergebnisse stellten sich unabhängig von der Reihenfolge der Feuchteexposition dar. Im Vergleich zwischen den Gruppen 1, 2 und 3 waren keine relevanten Gruppenunterschiede festzustellen. Die Mittelwerte der gemessenen Temperaturen in der Nase bei allen drei Gruppen entsprachen sich.

Tabelle 13: Der Tabelle können die mittleren Temperaturwerte in Grad Celsius für alle Probanden (Gesamt, farblich blau hervorgehoben), oder der einzelnen Subgruppen (Gruppe 1, 2, 3) entnommen werden. Die mittleren Temperaturwerte sind der jeweiligen relativen Inhalationsfeuchte (25% r. F., 50% r. F., 75% r. F.) und dem Messzeitpunkt mit zugehöriger Temperaturstufe (37°, 65°, 75°C) zugeordnet. Zur optischen Abgrenzung sind einzelne Spalten gelb markiert. Die Leermessung erfolgte bevor Beginn der Inhalation aus der Klimakammer

	Leermessung	37°C	37°C	37°C	37°C	65°C	65°C	65°C	65°C	75°C	75°C	75°C	75°C
		2min	5min	20min	+5min	2min	5min	20min	+5min	2min	5min	20min	+5min
Gruppe1													
25% r.F	32,4	33,2	33,5	33,5	33,4	34,9	35,0	34,8	34,2	35,5	35,4	35,2	33,5
50% r.F.	32,3	32,7	33,3	33,1	33,0	33,4	34,6	34,7	33,0	34,8	35,8	35,8	32,7
75% r.F.	32,6	33,3	33,7	33,8	33,9	35,1	35,6	35,7	33,7	35,5	35,8	36,1	34,0
Gruppe2													
25% r.F.	31,3	32,8	32,9	33,1	32,6	34,0	34,8	34,6	33,9	35,0	35,4	35,8	34,1
50% r.F.	32,2	33,5	33,8	34,2	33,5	35,4	36,2	36,1	34,2	35,9	36,5	36,7	34,3
75% r.F.	32,2	33,7	33,8	34,0	33,1	35,1	35,7	35,6	33,4	35,6	35,9	35,7	33,8
Gruppe3													
25% r.F.	32,3	33,4	33,9	34,1	33,1	34,9	35,2	35,4	34,4	36,2	36,3	36,3	33,9
50% r.F.	31,0	33,4	33,4	33,6	32,8	34,6	35,4	35,6	33,9	35,5	35,9	36,0	33,9
75% r.F.	31,4	33,1	33,3	33,6	32,4	35,4	36,8	36,7	33,6	37,0	36,8	36,8	33,5
Gesamt													
25% r.F.	32,0	33,2	33,5	33,6	33,1	34,6	35,0	35,0	34,2	35,6	35,7	35,7	33,8
50% r.F.	31,8	33,3	33,5	33,7	33,1	34,6	35,5	35,6	33,7	35,5	36,1	36,2	33,7
75% r.F.	32,1	33,4	33,6	33,8	33,1	35,2	36,1	36,0	33,6	36,0	36,2	36,2	33,8

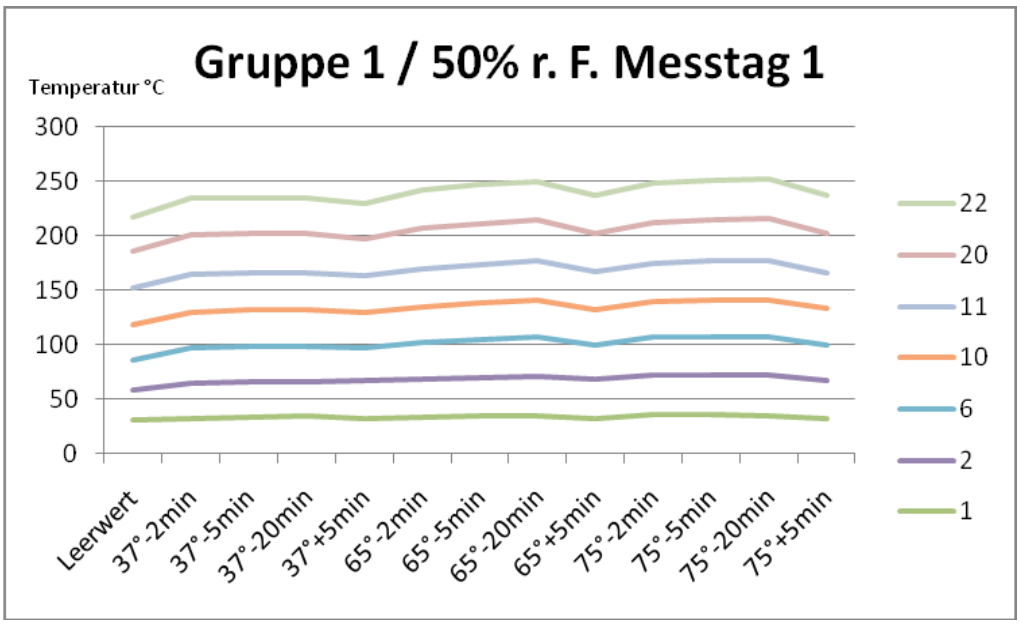

Abbildung 8: Grafische Summation der einzelnen Temperaturverlaufslinien der jeweiligen Probanden der Gruppe 1, zur Verdeutlichung des Temperaturanstiegs der Naseschleimhaut im Zeitverlauf, während eines Messtages bei 50% relativer Feuchtigkeit (r. F.). Jeder Probandennummer ist eine andere Linienfarbe zugeordnet, die aus der rechten Spalte entnommen werden kann

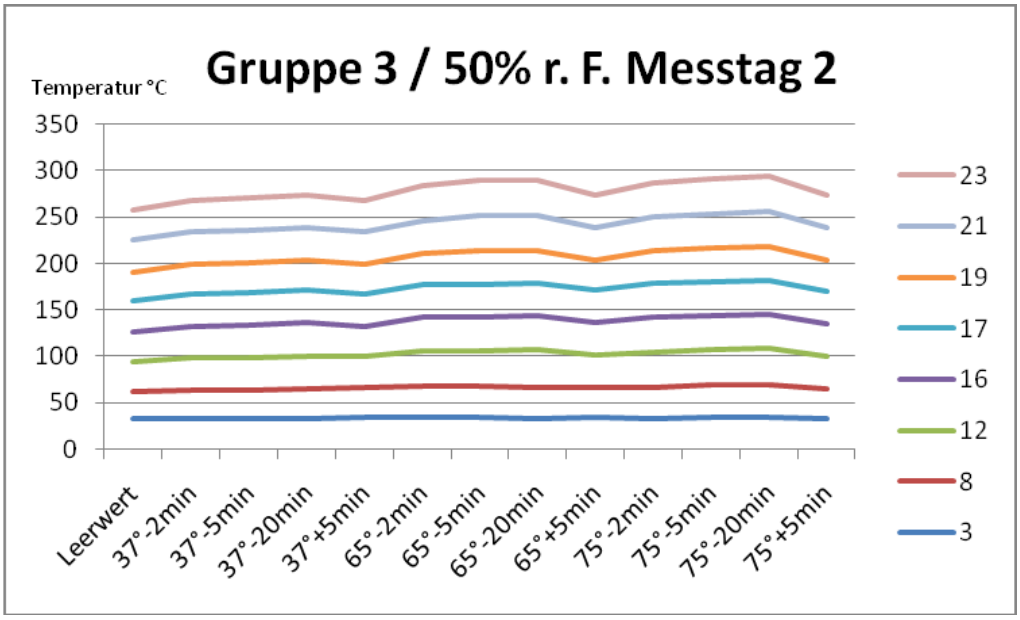

Abbildung 9: Grafische Summation der einzelnen Temperaturverlaufslinien der jeweiligen Probanden der Gruppe 3, zur Verdeutlichung des Temperaturanstiegs der Naseschleimhaut im Zeitverlauf, während eines Messtages bei 50% relativer Feuchtigkeit (r. F.) Jeder Probandennummer ist eine andere Linienfarbe zugeordnet, die aus der rechten Spalte entnommen werden kann

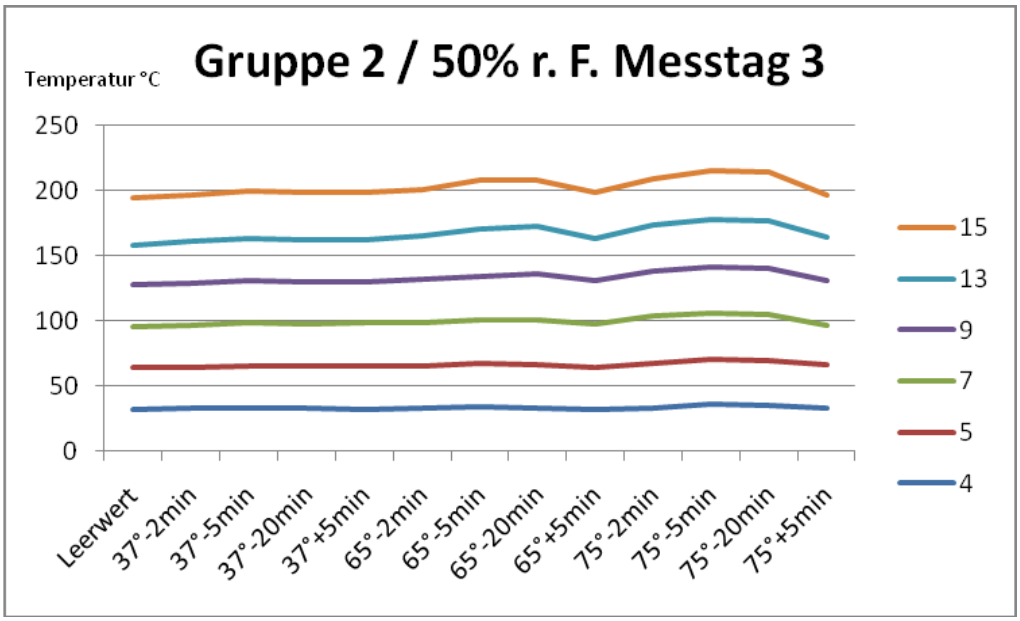

Abbildung 10: Grafische Summation der einzelnen Temperaturverlaufslinien der jeweiligen Probanden der Gruppe 2, zur Verdeutlichung des Temperaturanstiegs der Naseschleimhaut im Zeitverlauf, während eines Messtages bei 50% relativer Feuchtigkeit (r. F.). Jeder Probandennummer ist eine andere Linienfarbe zugeordnet, die aus der rechten Spalte entnommen werden kann

3.3. Einfluss der Expositionsdauer

Um den Einfluss der Expositionsdauer erfassen zu können, wurden bei gleichbleibendem Feuchtewert die gemessenen Nasenschleimhautwerte im zeitlichen Verlauf betrachtet. Zur Veranschaulichung werden alle Ergebnisse in der nachfolgenden Tabelle 14 aufgeführt und mittels Absolutwerten in Tabelle 16 gesondert aufgeführt. Hochsignifikante Veränderungen werden durch ** gekennzeichnet, signifikante Veränderungen werden durch * gekennzeichnet.

Tabelle 14: Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur, nach Inhalation der unterschiedlich konditionierten Inspirationsluft durch die Probanden, in Abhängigkeit von der Expositionsdauer

relative Feuchtigkeit	Wärmewert	Leerwert	Nach 2 min	Nach 5 min	Nach 20 min
25%	37°C		**	n.s.	n.s.
	65°C		**	**	n.s.
	75°C		**	n.s.	n.s.
50%	37°C		**	*	n.s.
	65°C		**	**	n.s.
	75°C		**	**	n.s.
75%	37°C		**	*	n.s.
	65°C		**	**	n.s.
	75°C		**	n.s.	n.s.

n.s. – nicht signifikant;* - $p \leq 0,05$; ** - $p \leq 0,01$

25% relative Feuchte

Nach zweiminütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 32,03°C ± 2,09°C auf 33,16°C ± 1,36°C, dies war hoch signifikant (p=0,007). Nach zweiminütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,06°C ± 1,28°C auf 34,6°C ± 1,42°C, dies war hoch signifikant (p<0,001). Nach zweiminütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,17°C ± 1,16°C auf 35,59°C ± 1,83°C, dies war hoch signifikant (p<0,001). Nach fünfminütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,16°C ± 1,36°C auf 33,46°C ± 1,39°C, dies war nicht signifikant (p=0,054). Nach fünfminütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,6°C ± 1,42°C auf 35,01°C ± 1,48°C, dies war hoch signifikant (p=0,006). Nach fünfminütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,59°C ± 1,83°C auf 35,67°C ± 1,89°C, dies war nicht signifikant (p=0,615).

Nach 20 minütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,46°C ± 1,39°C auf 33,55°C ± 1,28, dies war nicht signifikant (p=0,710).
Nach 20 minütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,01°C ± 1,48°C auf 34,95°C ± 1,51°C, dies war nicht signifikant(p=0,755).
Nach 20 minütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,67°C ± 1,89°C auf 35,74°C ± 1,75°C, dies war nicht signifikant (p=0,457).

50% relative Feuchte

Nach zweiminütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 31,83°C ± 2,11°C auf 33,25°C ± 1,44°C, dies war hoch signifikant (p<0,001).
Nach zweiminütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,11°C ± 1,43°C auf 34,55°C ± 1,55°C, dies war hoch signifikant (p<0,001).
Nach zweiminütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,73°C ± 1,35°C auf 35,46°C ± 1,41°C, dies war hoch signifikant (p<0,001).

Nach fünfminütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,25°C ± 1,44°C auf 33,53 ± 1,47°C, dies war signifikant (p=0,024).
Nach fünfminütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,55°C ± 1,55°C auf 35,46°C ± 1,64, dies war hoch signifikant (p<0,001).
Nach fünfminütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,46°C ± 1,41°C auf 36,09°C ± 1,28°C dies war hoch signifikant (p=0,007).

Nach 20 minütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,53 ± 1,47°C auf 33,66°C ± 1,43°C, dies war nicht signifikant. (p=0,471).
Nach 20 minütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,46°C ± 1,64 auf 35,56°C ± 1,7°C, dies war nicht signifikant (p=0,794).
Nach 20 minütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 36,09°C ± 1,28°C auf 36,18°C ± 1,39°C, dies war nicht signifikant (p=0,777).

75% relative Feuchte

Nach zweiminütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 32,08°C ± 2,04°C auf 33,36°C ± 1,23°C, dies war hoch signifikant (p=0,002).
Nach zweiminütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,12°C ± 1,58°C auf 35,18°C ± 1,59°C, dies war hoch signifikant (p<0,001).

Nach zweiminütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,59°C ± 1,35°C auf 36,01°C ± 1,48°C, dies war hoch signifikant (p<0,001).

Nach fünfminütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,36°C ± 1,23°C auf 33,62°C ± 1,26°C, dies war signifikant (p=0,033).
Nach fünfminütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,18°C ± 1,59°C auf 36,06°C ± 2,01°C, dies war hoch signifikant (p=0,001).
Nach zweiminütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 36,01°C ± 1,48°C auf 36,17°C ± 1,65°C, dies war nicht signifikant (p=0,668).

Nach 20 minütiger Inhalation bei 37°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,62°C ± 1,26°C auf 33,82°C ± 1,41°C, dies war nicht signifikant (p=0,356).
Nach 20 minütiger Inhalation bei 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 36,06°C ± 2,01°C auf 35,99°C ± 2,01°C, dies war nicht signifikant (p=0,723).
Nach 20 minütiger Inhalation bei 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 36,17°C ± 1,65°C auf 36,18°C ± 1,72°C, dies war nicht signifikant (p=0,794).

3.4. Einfluss der thermischen Energie des Expositionsinhalats

Der Temperatur und Feuchtewert der Inhalationsluft resultierte in einem gemeinsamen Energiewert (vgl. Tabelle 4 auf S.15). Um den Einfluss der thermischen Energiewerte erfassen zu können, wurden den gemessenen Nasenschleimhauttemperaturen die jeweiligen Energiewerte der Inhalationsluft pro Luftvolumen zugeordnet und graphisch dargestellt. Sowohl nach 2, als auch nach 5 und 20 Minuten zeigte sich deutlich eine Abhängigkeit zwischen der thermischen Energie des Inhalats und den gemessenen Nasenschleimhauttemperaturen.
Bei 75% relativer Feuchte und 75°C (resultierende thermische Energie 0,53kJ/dm³) weicht die ermittelte Nasenschleimhauttemperatur von der Verteilung der übrigen Septumtemperaturwerte deutlich ab, und hat keinen weiteren Temperaturanstieg der nasalen Mukosa zur Folge. Dies zeigt sich sowohl nach 2 Minuten als auch noch deutlicher nach 5 und 20 Minuten. Dieser Effekt ist in der graphischen Darstellung (Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 13) dadurch abgemildert, dass auch eben dieser abweichende Extremwert in der Steigung der Geraden Berücksichtigung findet.

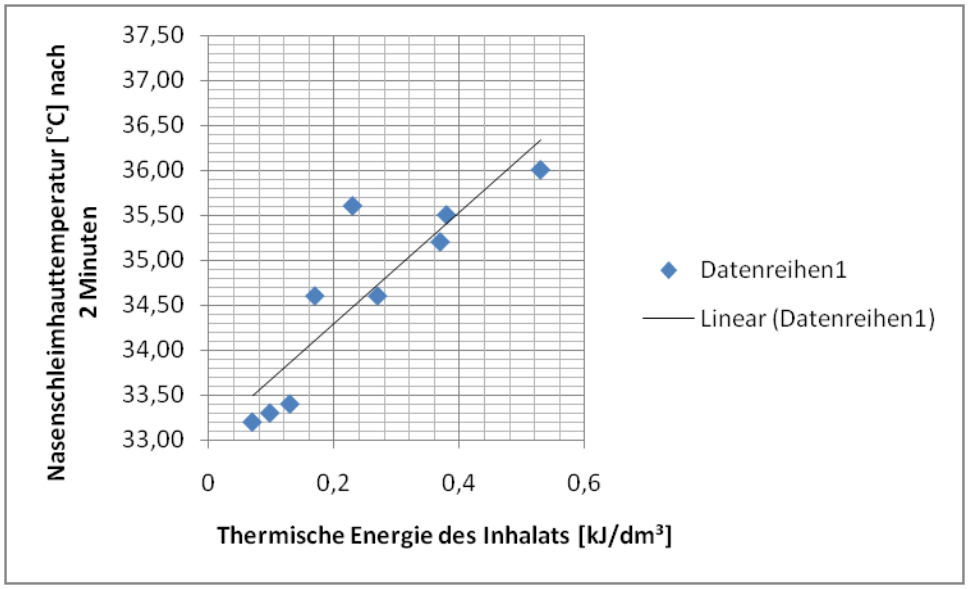

Abbildung 11: Thermische Energie in Kilojoule (kJ) pro Liter (dm³) der in der Klimakammer erzeugten Inhalationsluft mit zugehörigen Nasenschleimhauttemperaturwerten nach 2 minütiger Inhalation durch die Probanden

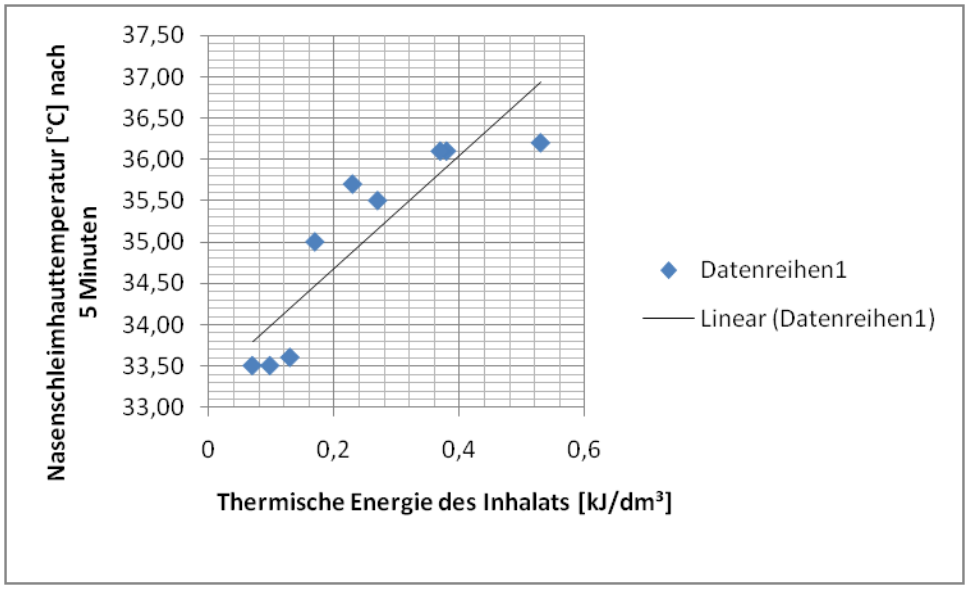

Abbildung 12: Thermische Energie in Kilojoule (kJ) pro Liter (dm³) der in der Klimakammer erzeugten Inhalationsluft mit zugehörigen Nasenschleimhauttemperaturwerten nach 5 minütiger Inhalation durch die Probanden

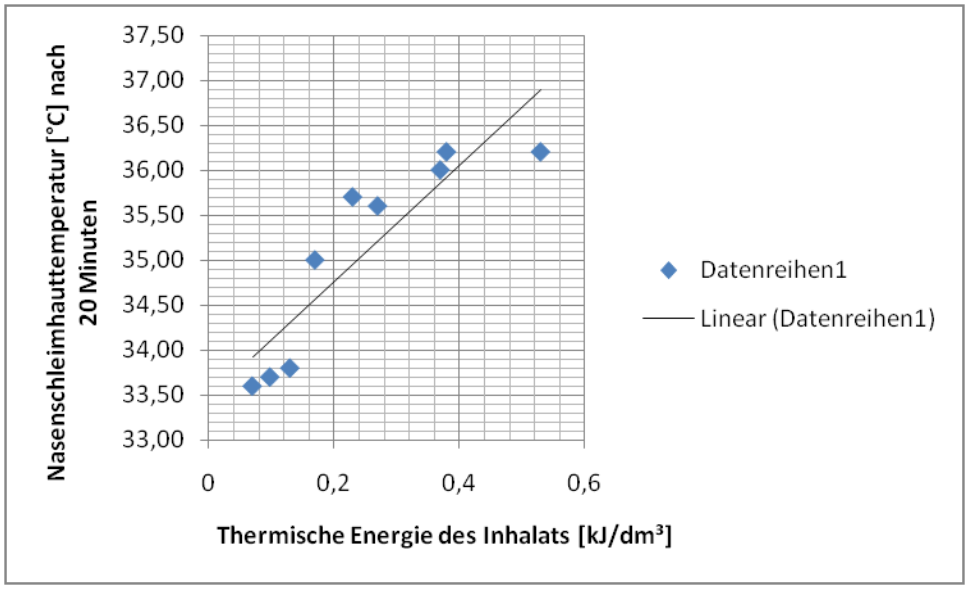

Abbildung 13: Thermische Energie in Kilojoule (kJ) pro Liter (dm³) der in der Klimakammer erzeugten Inhalationsluft mit zugehörigen Nasenschleimhauttemperaturwerten nach 20 minütiger Inhalation durch die Probanden

3.5. Einfluss der relativen Feuchte der Expositionsbedingungen

Um die Bedeutung der relativen Feuchte erfassen zu können, wurden bei gleichbleibender Temperatur die steigenden Feuchtewerte untereinander verglichen.

Tabelle 15: Einfluss der unterschiedlichen relativen Feuchtewerte (r. F.), der in der Klimakammer erzeugten Inhalationsluft, bei gleichbleibender Inhalationstemperatur auf die gemessene Nasenschleimhauttemperatur nach 2 Minuten

	T= 37°C	**T= 65°C**	**T= 75°C**
25% r. F.	n. s.	n. s.	n. s.

50% r .F.	n. s.	n. s	n. s.

75% r. F.	n. s.	*	n.s.

n. s. – nicht signifikant; * - $p \leq 0,05$; ** - $p \leq 0,01$

Tabelle 16: Die in dieser Tabelle aufgeführten mittleren Temperaturwerte, wurden für die Auswertung herangezogen. Die Temperaturwerte wurden nach 2, 5 und 20 Minuten im Klimalabor der Klinik für Hals-Nasen-und Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Ulm ermittelt, bei den jeweils zugehörigen Expositionsbedingungen. Der Leerwert wurde jeweils vor Beginn einer neuen Expositionsbedingung ermittelt

Relative Feuchte	Temperatur	Leerwert	Nach 2min	Nach 5min	Nach 20min
25%	37°C	32,03°C ± 2,09	33,16°C ± 1,36	33,46°C ± 1,39	33,55°C ± 1,28
	65°C	33,06°C ± 1,28	34,6°C ± 1,42	35,01°C ± 1,48	34,95°C ± 1,51
	75°C	34,17°C ± 1,16	35,59°C ± 1,83	35,67°C ± 1,89	35,74°C ± 1,75
50%	37°C	31,83°C ± 2,11	33,25°C ± 1,44	33,53°C ± 1,47	33,66°C ± 1,43
	65°C	33,11°C ± 1,43	34,55°C ±1,55	35,46°C ± 1,64	35,56°C ± 1,7
	75°C	33,73°C ± 1,35	35,46°C ± 1,41	36,09°C ± 1,28	36,18°C ± 1,29
75%	37°C	32,08°C ± 2,04	33,36°C ± 1,23	33,62°C ± 1,26	33,82°C ± 1,41
	65°C	33,12°C ± 1,58	35,18°C ± 1,59	36,06°C ± 2,01	35,99°C ± 2,01
	75°C	33,59°C ± 1,19	36,01°C ± 1,48	36,17°C ± 1,65	36,18°C ± 1,72

2 Minuten 37°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,16°C ± 1,36°C auf 33,25°C ± 1,44°C, dies war nicht signifikant (p = 0,954).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,25°C ± 1,44°C auf 33,36°C ± 1,23°C, dies war nicht signifikant (p=0,794).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,16°C ± 1,36°C auf 33,36°C ± 1,23°C, dies war nicht signifikant (p=0,673).

2 Min 65°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50% zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,60°C ± 1,42°C auf 34,55°C ± 1,55°C, dies war nicht signifikant (p=0,599).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,55°C ± 1,55°C auf 35,18°C ± 1,59°C, dies war nicht signifikant (p=0,125).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,60°C ± 1,42°C auf 35,18°C ± 1,59°C, dies war signifikant (p= 0,043).

2 Min 75°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50% zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,59°C ± 1,83°C auf 35,46°C ± 1,41°C, dies war nicht signifikant (p=0,890).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,46°C ± 1,41°C auf 36,01°C ± 1,48°C, dies war nicht signifikant (p=0,226).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,59°C ± 1,83°C auf 36,01°C ± 1,48°C, dies war nicht signifikant (p=0,153).

Tabelle 17: Einfluss der unterschiedlichen relativen Feuchtewerte (r. F.), der in der Klimakammer erzeugten Inhalationsluft, bei gleichbleibender Inhalationstemperatur auf die gemessene Nasenschleimhauttemperatur nach 5 Minuten

	T= 37°C	**T= 65°C**	**T= 75°C**
25% r. F.	n. s.	**	n. s.
50% r. F.	n. s.	*	**
75% r. F.	n. s.	**	**

n. s. – nicht signifikant; * - p ≤ 0,05; ** - p ≤ 0,01

5 Minuten 37°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,46°C ± 1,39°C auf 33,53°C ± 1,47°C, dies war nicht signifikant (p=0,939).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,53°C ± 1,47°C auf 33,62°C ± 1,26°C, dies war nicht signifikant (p=0,423).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,46°C ± 1,39°C auf 33,62°C ± 1,26°C, dies war nicht signifikant (p=0,555).

5 Min 65°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50% zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,01°C ± 1,48°C auf 35,46°C ± 1,64°C, dies war hoch signifikant (p=0,001).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,46°C ± 1,64°C auf 36,06°C ± 2,01°C, dies war hoch signifikant (p<0,001).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,01°C ± 1,48°C auf 36,06°C ± 2,01°C, dies war signifikant (p=0,024).

5 Min 75°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50% zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,67°C ± 1,89°C auf 36,09°C ± 1,28°C, dies war nicht signifikant (p=0,381).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 36,09°C ± 1,28°C auf 36,17°C ± 1,65°C, dies war hoch signifikant (p<0,001).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,67°C ± 1,89°C auf 36,17°C ± 1,65°C, dies war hoch signifikant (p<0,001).

Tabelle 18: Einfluss der unterschiedlichen relativen Feuchtewerte (r. F.), der in der Klimakammer erzeugten Inhalationsluft, bei gleichbleibender Inhalationstemperatur auf die gemessene Nasenschleimhauttemperatur nach 20 Minuten

	T= 37°C	**T= 65°C**	**T= 75°C**
25% r. F.	n. s.	n.s.	n. s.

50% r. F.	n. s.	n.s.	n.s.

75% r. F.	n. s.	n.s.	n.s.
	n. s.	*	n.s.

n. s. – nicht signifikant; * - p ≤ 0,05; ** - p ≤ 0,01

20 Minuten 37°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,55°C ± 1,28°C auf 33,66°C ± 1,43°C, dies war nicht signifikant (p=0,984).

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,66°C ± 1,43°C auf 33,82°C ± 1,41°C, dies war nicht signifikant (p=0,574).
Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,55°C ± 1,28°C auf 33,82°C ± 1,41°C, dies war nicht signifikant (p=0,694).

20 Min 65°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50% zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,95°C ± 1,51°C auf 35,56°C ± 1,70°C, dies war nicht signifikant (p=0,369).
Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,56°C ± 1,70°C auf 35,99°C ± 2,01°C, dies war nicht signifikant (p=0,280).
Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,95°C ± 1,51°C auf 35,99°C ± 2,01°C, dies war signifikant (p=0,014).

20 Min 75°C

Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 50% zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,74°C ± 1,75°C auf 36,18°C ± 1,39°C, dies war nicht signifikant (p=0,369).
Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 50% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 36,18°C ± 1,39°C auf 36,18°C ± 1,72°C, dies war nicht signifikant (p=0,807).
Bei einer Steigerung der relativen Feuchtigkeit von 25% auf 75 % zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,74°C ± 1,75°C auf 36,18°C ± 1,72°C, dies war nicht signifikant (p=0,305).

3.6. Einfluss der steigenden Expositionstemperatur

Um die Bedeutung der steigenden Expositionstemperatur erfassen zu können, wurden bei gleichbleibendem Feuchtewert die gemessen Nasenschleimhautwerte untereinander verglichen. Die steigende Temperatur der inhalierten Luft führte an allen drei Messtagen zu einem hochsignifikanten Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur.

Tabelle 19: Veränderung der Nasenschleimhauttemperatur nach Erhöhung der Inspirationstemperatur bei gleichbleibender relativer Feuchte (r. F.) der Inhalationsluft, am Messpunkt 2 Minuten

	25% r. F.	**50% r. F.**	**75% r. F.**
T= 37°C **----------** **T= 65°C** **----------** **T= 75°C**	** ** ** ** **	** ** ** ** **	** ** ** ** **

n. s. – nicht signifikant; * - p ≤ 0,05; ** - p ≤ 0,01

2 Minuten 25% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,16°C ± 1,36°C auf 34,6°C ± 1,42°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,16°C ± 1,36°C auf 35,59°C ± 1,83°C, dies war hoch signifikant ($p<0,0001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,6°C ± 1,42°C auf 35,59°C ± 1,83°C, dies war ebenfalls hoch signifikant ($p<0,01$).

2 Minuten 50% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,25°C ± 1,44°C auf 34,55°C ± 1,55°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,25°C ± 1,44°C auf 35,46°C ± 1,41°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,55°C ± 1,55°C auf 35,46°C ± 1,41°C, dies war hoch signifikant ($p<0,01$).

2 Minuten 75% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,36°C ± 1,23°C auf 35,18°C ± 1,59°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,36°C ± 1,23°C auf 36,01°C ± 1,48°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,18°C ± 1,59°C auf 36,01°C ± 1,48°C, dies war signifikant ($p=0,01$).

Tabelle 20: Veränderung der Nasenschleimhauttemperatur nach Erhöhung der Inspirationstemperatur bei gleichbleibender relativer Feuchte (r. F.) der Inhalationsluft, am Messpunkt 5 Minuten

	25% r. F.	**50% r. F.**	**75% r. F.**
T = 37°C	**	**	**

T = 65°C	**	**	n.s.

T = 75°C	**	**	**

n. s. – nicht signifikant; * - $p \leq 0,05$; ** - $p \leq 0,01$

5 Minuten 25% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,46°C ± 1,39°C auf 35,01°C ± 1,48°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,46°C ± 1,39°C auf 35,67°C ± 1,89°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,01°C ± 1,48°C auf 35,67°C ± 1,89°C, dies war hoch signifikant ($p<0,01$).

5 Minuten 50% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,53°C ± 1,47°C auf 35,46°C ± 1,64°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,53°C ± 1,47°C auf 36,09°C ± 1,28°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,46°C ± 1,64°C auf 36,09°C ± 1,28°C, dies war hoch signifikant ($p<0,01$).

5 Minuten 75% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,62°C ± 1,26°C auf 36,06°C ± 2,01°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,62°C ± 1,26°C auf 36,17°C ± 1,65°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 36,06°C ± 2,01°C auf 36,17°C ± 1,65°C, dies war nicht signifikant ($p=0,626$).

Tabelle 21: Veränderung der Nasenschleimhauttemperatur nach Erhöhung der Inspirationstemperatur bei gleichbleibender relativer Feuchte (r. F.) der Inhalationsluft, am Messpunkt 20 Minuten

	25% r. F.	**50% r. F.**	**75% r. F.**
T= 37°C	**	**	**

T= 65°C	**	**	n.s.

T= 75°C	**	**	**

n. s. – nicht signifikant; * - $p \leq 0,05$; ** - $p \leq 0,01$

20 Minuten 25% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,55°C ± 1,28°C auf 34,95°C ± 1,51°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,55°C ± 1,28°C auf 35,74°C ± 1,75°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 34,95°C ± 1,51°C auf 35,74°C ± 1,75°C, dies war hoch signifikant ($p<0,01$).

20 Minuten 50% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,66°C ± 1,43°C auf 35,56°C ± 1,7°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,66°C ± 1,43°C auf 36,18°C ± 1,39°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,56°C ± 1,7°C auf 36,18°C ± 1,39°C, dies war hoch signifikant ($p<0,01$).

20 Minuten 75% relative Feuchte:

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 65°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,82°C ± 1,41°C auf 35,99°C ± 2,01°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 37°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 33,82°C ± 1,41°C auf 36,18°C ± 1,72°C, dies war hoch signifikant ($p<0,001$).

Bei einer Temperatursteigerung von 65°C auf 75°C zeigte sich eine Änderung der Temperatur von 35,99°C ± 2,01°C auf 36,18°C ± 1,72°C, dies war nicht signifikant ($p=0,169$).

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Temperaturverlauf der Nasenschleimhaut exemplarisch nach 5 Minuten bei 50% relativer Feuchte auf.

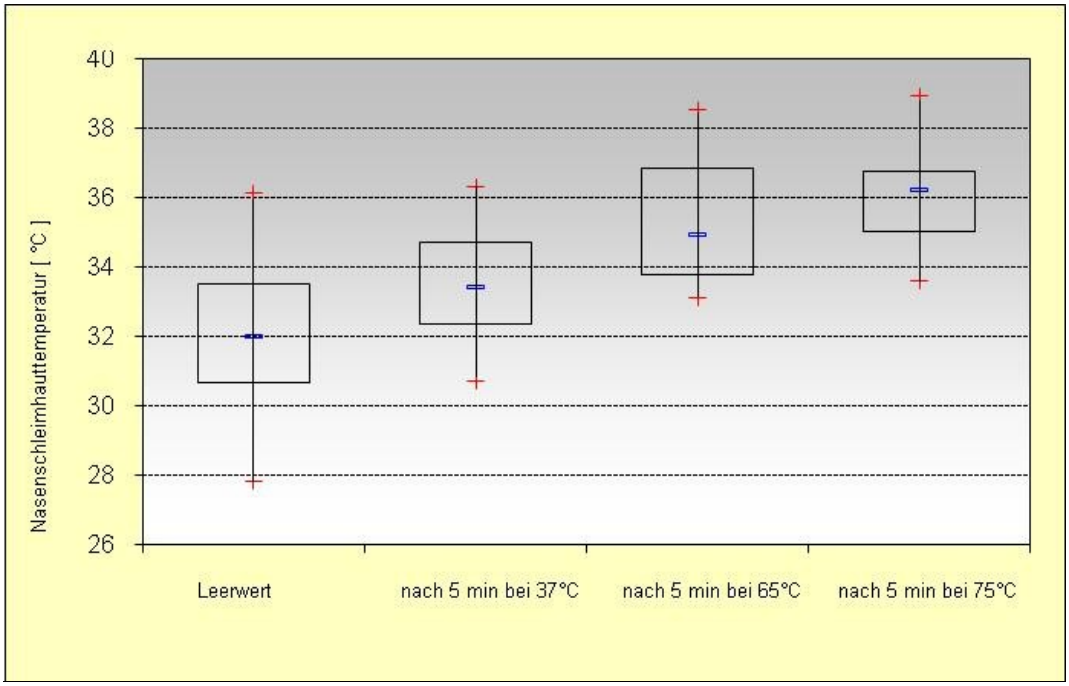

Abbildung 14: Box und Whisker Darstellung: Ermittelte Temperaturwerte der Nasenschleimhaut der Versuchsteilnehmer, nach 5 minütiger Inhalation bei 50% relativer Feuchte mit 37°, 65° und 75° C warmer Luft

3.7. Sonstige Ergebnisse: Rhinomanometrie

Die rhinomanometrischen Messungen zeigten in allen Gruppen direkt nach Beendigung der Messungen eine deutliche Verminderung des Volumenstroms (Flow) bei 150 Pa bezogen auf den Ausgangswert.
Dieser signifikante Abfall der Rhinomanometrie-Werte (der Summe aus rechtem und linkem Nasenloch) trat bei allen Feuchtestufen auf:

- 25% relative Feuchte: Beim Vergleich der Rhinomanometriewerte zeigte sich ein Abfall des Volumenstroms von 692,90 ccm/s ± 240,17 ccm/s auf 489,95 ccm/s ± 194,06 ccm/s, dies war hoch signifikant ($p < 0,01$).

- 50% relative Feuchte: Beim Vergleich der Rhinomanometriewerte zeigte sich ein Abfall des Volumenstroms von 650,10 ccm/s ± 212,66 ccm/s auf 490,48 ccm/s ± 229,58 ccm/s, dies war hoch signifikant ($p < 0,01$).

- 75% relative Feuchte: Beim Vergleich der Rhinomanometriewerte zeigte sich ein Abfall des Volumenstroms von 633,24 ccm/s ± 162,46 ccm/s auf 461,19 ccm/s ± 224,59 ccm/s, dies war hoch signifikant ($p < 0,01$).

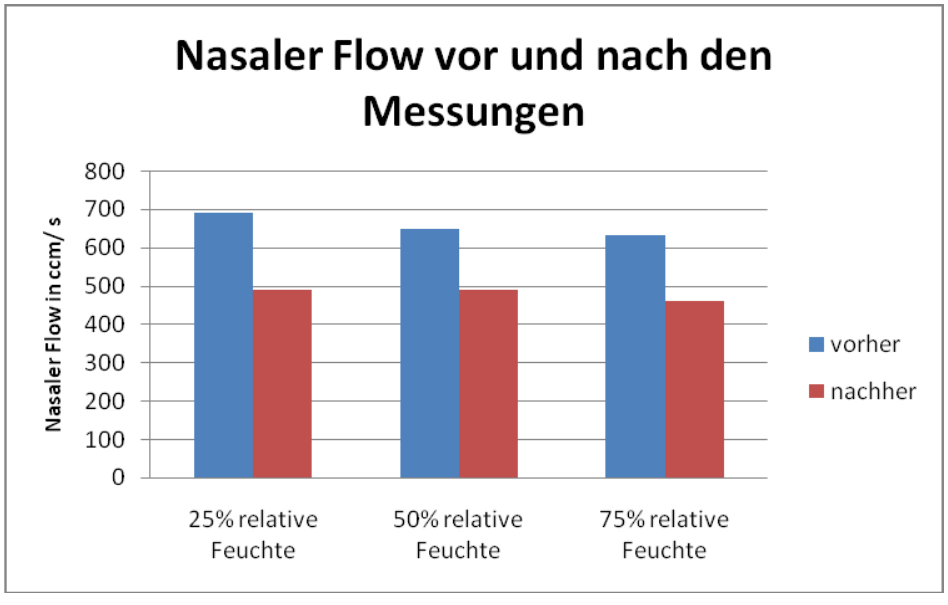

Abbildung 15: Mittelwerte des nasalen Flow (nasaler Volumenstrom) aller Versuchsteilnehmer vor (blauer Balken) und nach den Messungen (roter Balken) bei 25%, 50% und 75% relativer Feuchte. Angaben in Kubikzentimeter pro Sekunde (ccm/s)

3.8. Sonstige Ergebnisse: Extremkonditionen

Bei Betrachtung des Temperaturverlaufs im Extremwertbereich von 75% relativer Feuchte und 75°C, konnte nur initial nach zweiminütiger Messung ein hochsignifikanter Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur von 33,59°C ±1,19°C auf 36,01°C ±1,48°C ($p < 0,01$) festgestellt werden. Nach fünfminütiger und zwanzigminütiger Messung konnte kein signifikanter Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur gegenüber dem Vergleichswert mehr festgestellt werden, die detaillierten Ergebnisse sind in Abschnitt 3.6 ab Seite 40 aufgeführt.

Eine verlängerte Expositionsdauer der Inhalation über zwei Minuten hinaus erbrachte keinen weiteren Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur. Dies ist auch der Abbildung 16 zu entnehmen.

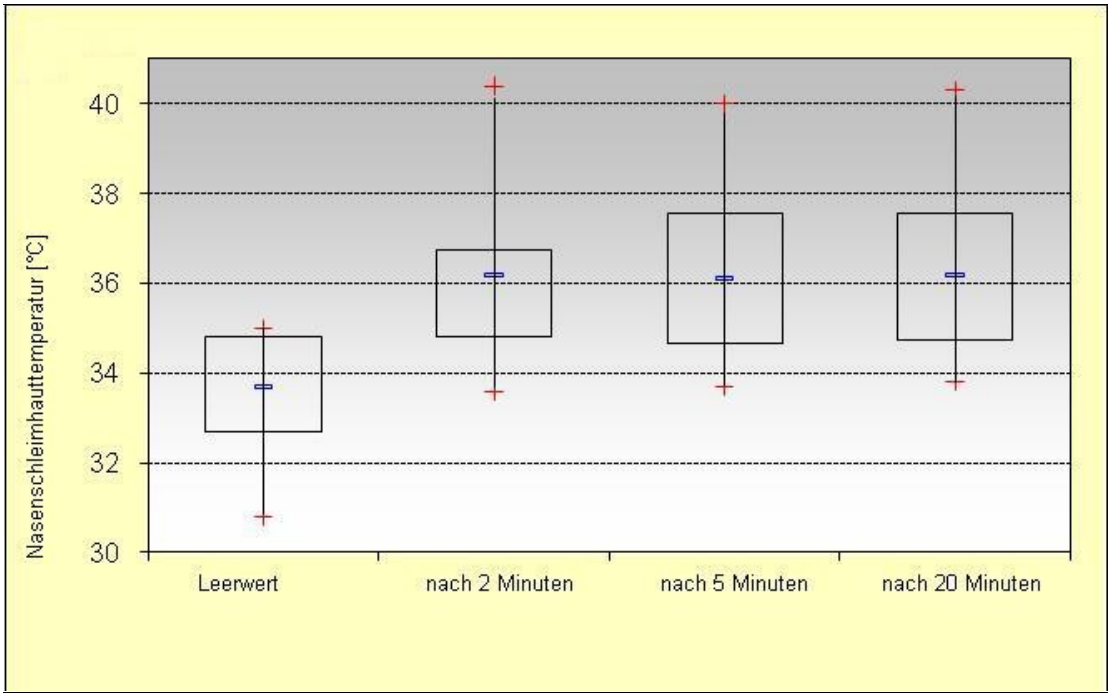

Abbildung 16: Box und Whisker Darstellung: Temperaturverlauf der Nasenschleimhaut der Versuchsteilnehmer, bei einer Inhalationsluftkondition von 75% relativer Feuchte und 75°C. Eine Verlängerung der Inhalationsdauer erbrachte keinen weiteren Temperaturanstieg

Bei n=3 Probanden konnte ein Anstieg der Nasenschleimhaut auf Temperaturwerte über 38°C ermittelt werden. Der höchste gemessene Wert lag bei 40,3°C nach zwanzigminütiger Exposition bei 75% relativer Feuchte und 75°C. Diese Probanden beklagten jedoch ein ausgesprochen unangenehmes Inhalationsgefühl.

4. Diskussion

4.1. Probanden

Insgesamt haben an der Studie 21 Personen teilgenommen, darunter 6 weibliche Probanden und 15 männliche Probanden. Die Altersverteilung der Probanden reichte von 21–56 Jahren. Das Durchschnittsalter lag bei 28 Jahren. Die Geschlechtsverteilung lag zu Ungunsten der weiblichen Testpersonen. In vergleichbaren Studien zur Temperaturmessung von Liener et al. und Keck et al. lag die Geschlechterverteilung zu Ungunsten der männlichen Versuchspersonen und wurde nicht gesondert diskutiert [30, 27].
Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Geschlechterverteilung keinen relevanten Einfluss auf die erhobenen Daten hat.

4.1.1. Einschlusskriterien

Eingeschlossen an der Studie waren fieberfreie Erwachsene ohne Nasenpathologie im Alter zwischen 18 und 65 Jahren. Ältere Probanden wurden nicht berücksichtigt, da sich mit zunehmendem Alter die Nasenphysiologie verändert und dementsprechend andere Messergebnisse zu erwarten wären. Nach Lindemann [34] scheinen altersabhängige Veränderungen der inneren und äußeren Nase die Klimafunktionen der Nase maßgeblich zu beeinflussen und führen zu niedrigeren intranasalen Feuchtigkeits- und Temperaturwerten.
Man nimmt hierbei an, dass die niedrigeren Messwerte aus der physiologischen Atrophie der Nasenschleimhaut und einer damit korrelierender Vergrößerung der Nasenhöhlen mit fortschreitendem Alter resultieren [34].
Minderjährige Probanden wurden zum einen aus ethischen Gründen, zum anderen aufgrund der Tatsache, dass die kindliche oder juvenile Klimatisierungsfunktion der Nase bislang kaum erforscht ist, nicht eingeschlossen.

4.1.2. Ausschlusskriterien

Ausgeschlossen von der Studienteilnahme waren, dem Studienprotokoll folgend, unter anderem Probanden mit früheren Nasen-Operationen, um die ermittelten Messwerte nicht durch etwaige operationsbedingte Veränderungen zu verfälschen. Unterschiedliche rhinochirurgische Eingriffe führen zu unterschiedlich ausgeprägten Veränderung der Klimafunktion der Nase [24]. Zur Vermeidung von ge-

sundheitlichen Risiken und unzumutbarer Belastung wurden folgende Personengruppen von der Untersuchung ausgeschlossen: Schwangere oder stillende Mütter, Patienten mit Asthma bronchiale oder schwerwiegenden internistisch-neurologischen Erkrankungen, sowie Probanden mit rezidivierendem Nasenbluten, Blutungsneigung und Gerinnungsstörungen.
Raucher und Allergiker waren von der Messung ausgeschlossen, da die Schleimhaut der Probanden nicht durch toxische Substanzen (Nikotin) oder Allergene beeinträchtigt sein sollte. Rauchen führt zu erhöhter nasaler Durchgängigkeit und Nikotin induziert die Kontraktion der nasalen Mukosa [39].
In vergleichbaren Arbeiten wurden ebenso Personen mit ernsthaften gesundheitlichen Problemen, Allergien, Nasenerkrankung und Nasenoperationen ausgeschlossen [25, 27, 30, 32, 67].
Gemäß der erörterten Überlegungen und dem Vergleich zur Literatur ist unser Kollektiv grundsätzlich als geeignet zu bewerten.

4.2. Messmethodik

Zur Messung der nasalen Klimatisierung wurde der Aufbau des rhinologischen Labors der Universitäts-HNO-Klinik Ulm eingesetzt. Der Aufbau hat sich in zahlreichen früheren Untersuchungen als geeignet erwiesen innerhalb der Nase Feuchte und Temperatur sowohl der Atemluft als auch der Schleimhaut zu messen [25, 26, 27, 30, 34, 67]. Die messtechnischen Anforderungen wurden von dem eingesetzten Temperaturmessinstrument erfüllt, das sehr kurze Ansprechzeiten von deutlich weniger als 1 s aufweist. Die kleine Sondenspitze und die äußerst dünne Thermosonde (Außendurchmesser 0,34 mm) ermöglichten Messungen auf der Mukosa der Nasenhöhle ohne Schleimhautabschwellung.
Seeley wandte erstmals im Jahre 1940 ein Thermoelement zur Untersuchung des intranasalen Temperaturprofils an, indem er vom Naseneingang aus die Temperatur an bestimmten Punkten innerhalb der Nasenhöhle ermittelte. Der geringe Durchmesser und die kurze Ansprechzeit der Sonde ermöglichten eine exakte Platzierung sowie die Aufzeichnung der Temperaturkurve bei normaler Atmung [58]. Thermoelemente zur Nasentemperaturmessungen wurden außerdem von Webb und Mudd verwendet [42, 66]. Andere Forschergruppen machten sich Widerstandsthermometer [9, 22] oder Infrarotthermometer zu Nutze [68].

4.2.1. Anforderungen an das Messverfahren

Eine Irritation der physiologischen Verhältnisse in der Nase, insbesondere der Nasenschleimhaut durch den Messaufbau sollte möglichst vermieden werden. Das Platzieren der Messsonde innerhalb der Nasenhöhle kann durch die Reizung der Nasenschleimhaut zu einer reaktiven Hyperämie und zu einer kurzfristigen Temperaturerhöhung an der Messstelle führen [22]. Simon und Kloiber beobachteten ebenfalls einen Temperaturanstieg und ein Anschwellen der Schleimhaut durch den Sondenkontakt [60]. Um verfälschten Messwerten vorzubeugen, wird versucht, den Durchmesser der Sonden so gering wie möglich zu halten und darüber hinaus unnötige Manipulationen zu vermeiden.

Wir konnten, wie auch in anderen Studien [32, 33] gezeigt, keine relevante Irritation der Nasenschleimhaut durch den Kontakt der Schleimhaut mit dem Thermoelement feststellen.

Im Vergleich zu anderen Arbeitsgruppen unterscheidet sich der von Keck et al. im Jahr 2000 im Ulmer rhinologischen Labor etablierte Messplatz [25] deutlich und macht durch das beschriebene Messinstrumentarium valide Ergebnisse erst möglich. Frühere Untersucher benutzten Temperaturmessinstrumente, die Ansprechzeiten bis zu mehreren Sekunden aufwiesen [8, 66], der von Rouadi et al. [52] verwandte Thermistor mit einer Ansprechzeit von 3 s machte eine atemsynchrone Temperaturaufzeichnung unmöglich.

4.2.2. Fehlermöglichkeiten im Messaufbau und Ablauf

Schon früh haben sich Arbeitsgruppen mit der Temperierung von Atemluft in der Nase beschäftigt [1]. Probleme traten allein schon durch die Durchmischung der Luft in der Nase mit Luft tieferer Atemwegsabschnitte auf: Brown-Kelly führte bei Probanden durch den Mund ein Epipharynxthermometer in den Rachenraum ein und verglich die Temperaturen dort zwischen einer engeren und einer weiteren Nasenseite [6].

Perwitzschky et al. machten Temperaturmessungen unter veränderten Ausgangsbedingungen der Einatemtemperaturen [48]. Unter veränderten Umgebungstemperaturen sollte die Luft im Nasenrachenraum etwa 32°C betragen. Perwitzschky nahm an, dass es durch einen Anstieg der Durchblutung in der Nasenschleimhaut, durch eine zusätzliche Mundatmung bei kalten Außentemperaturen mit verlangsamter Nasenluftströmung mit verlängerter Kontaktzeit der Einatemluft zur Muko-

sa, sowie Zunahme der relativen Feuchte in der Einatemluft bei kälteren Außentemperaturen zur Erwärmung der Einatemluft kommt [48].
In-vivo Messungen der Atemtemperaturen sind kompliziert und unvermeidlich fehlerbehaftet. Durch vergleichende Betrachtung der mit dem identischen Versuchsaufbau erhobenen Werte können die systematisch bedingten Fehler weitgehend relativiert werden.
Einer Veränderung der in der Klimakammer erzeugten Inspirationsluft auf dem Weg durch das Schlauchsystem wurde versucht durch die Verwendung eines in der Schlafmedizin üblichen Atmungsschlauches mit getrennter Zu- und Ausatemluft entgegenzuwirken.
Durch das Schlauch-in-Schlauch System konnte sich Ein- und Ausatemluft nicht durchmischen und es war eine verbesserte Isolation gegenüber der Umgebungsluft gewährleistet. Um einem Temperaturabfall weiter entgegenzuwirken, wurde der 40cm lange Luftschlauch darüber hinaus dickwandig mit Aluminiumfolie umwickelt (vgl. Abbildung 3 auf Seite 10).
Die Temperaturmessungen nach Inspiration von klimatisierter Luft über die Atemmaske erfolgten unmittelbar nach Abnahme der Atemmaske, fanden aber unter Raumluftbedingungen statt. Ein Vermischen der Atemluft der Versuchspersonen mit der Raumluft konnte nicht verhindert werden. In diesem Zusammenhang muss eine relativ schnelle Adaptation der Nasenschleimhaut an die Raumluftbedingungen in Betracht gezogen werden.
Durch die knapp gehaltene Zeit zwischen Inspirationsende und Messungsbeginn konnte jedoch ein merklicher Temperaturabfall weitgehend minimiert werden.
Die Versuchsteilnehmer atmeten die Inspirationsluft ausschließlich über die Atemmaske ein und aus. Um alle etwaigen äußeren Störfaktoren auf die produzierte Normluft ausschließen zu können, müsste der komplette Versuch inklusive der Messung in einer geschlossenen Klimakammer stattfinden. Somit wäre auch eine Veränderung der Schleimhauttemperatur durch Atmen von Umgebungsluft nach Inspirationsende ausgeschlossen.
Ein solcher geschlossener Messaufbau wäre als ideal anzusehen, ist jedoch aus Kosten- und Praktikabilitätsgründen schwer zu realisieren.
Mittels der beschriebenen Vorkehrungen am Schlauchsystem konnte einer Verfälschung der eingestellten Klimawerte entgegengewirkt werden. Die Probanden wurden instruiert, nach Abnahme der Atemmaske durch den Mund ein- und aus-

zuatmen und die Messung wurde ohne Zeitverzögerung durchgeführt. Somit ist unser Versuchsaufbau trotz Verbesserungspotenzial grundsätzlich als geeignet zu werten und die Messungen konnten erfolgreich durchgeführt werden.

4.3. Bewertung der Ergebnisse

4.3.1. Carry-over Effekt

In Rücksprache mit dem Institut für Biometrie und Statistik der Universität Ulm wurde eine Subgruppenanalyse einschließlich einer Analyse der Einzelfallverläufe durchgeführt.

Entsprechend den oben angeführten Ergebnissen ergab sich kein Anhalt für einen relevanten Carry-over Effekt. Demzufolge spielt es keine Rolle, in welcher unterschiedlichen Reihenfolge der relativen Feuchtewerte die einzelnen Messtage durchlaufen wurden. Hieraus ergibt sich die Legitimation der zusammenfassenden Auswertung aller Probanden in den folgenden Abschnitten.

4.3.2. Einfluss der Expositionsdauer

Es wurde deutlich, dass die Erhöhung der Schleimhauttemperatur weitgehend unabhängig von anderen Parametern innerhalb der ersten zwei bis fünf Minuten stattfindet. In diesem Zeitraum fand sich bei allen Expositionsansätzen ein signifikanter beziehungsweise hochsignifikanter Anstieg. Zwischen fünf und 20 Minuten ließen sich unter keinen getesteten klimatischen Bedingungen weitere Temperatursteigerungen nachweisen.

Nach fünf Minuten befanden sich Nasenschleimhaut und das Energieverhältnis der Inspirationsluft in einem „steady state“ Zustand, der zu keinen weiteren relevanten Temperaturänderungen der nasalen Mukosa mehr führte. Es wurden einige Untersuchungen über den Einfluss von heißer oder heißer, feuchter Luft auf die Trachealschleimhaut durchgeführt, wobei Untersuchungen zum Temperaturanstieg der nasalen Mukosa nach Warmluftinhalation bislang rar sind [42]; jedoch unterstreichen unsere Ergebnisse die herausragende Eigenschaft der Nasenschleimhaut, sich an unterschiedliche Klimabedingungen schnell zu adaptieren. Bei Ihren Untersuchungen stellten Liener et al. hierzu übereinstimmend fest, dass die Inhalation kalter Luft zu einem Konditionierungsprozess führt, der innerhalb kurzer Zeit einen signifikanten Abfall der Nasenschleimhauttemperatur zur Folge hat [30].

Olsson et al. [44] versuchten den Zusammenhang von Durchblutung und Temperatur der Nasenschleimhaut aufzuzeigen. In ihrer Studie zeigte sich bei allen Versuchsteilnehmern eine reduzierte Durchblutung der Nasenschleimhaut nach Exposition mit 6°C kaltem Wasser. Es wird angenommen, dass durch arteriovenöse Anastomosen die Durchblutung der Nasenschleimhaut reguliert wird und dadurch auch Einfluss auf die Körpertemperatur genommen wird [44].
Der vorwiegend initiale, sprich schnelle Temperaturanstieg zeigt die herausragende Eigenschaft der Nase, sich rasch an neu auftretende klimatische Bedingungen zu adaptieren. Es stellt sich dann rasch ein thermisches Gleichgewicht ein.

4.3.3. Einfluss der thermischen Energie des Expositionsinhalats

Ein hoher relativer Feuchtegehalt und ein hoher Temperaturwert der Inspirationsluft resultierten in einem hohen Energiewert des Inhalats (vgl. Abbildung 17).

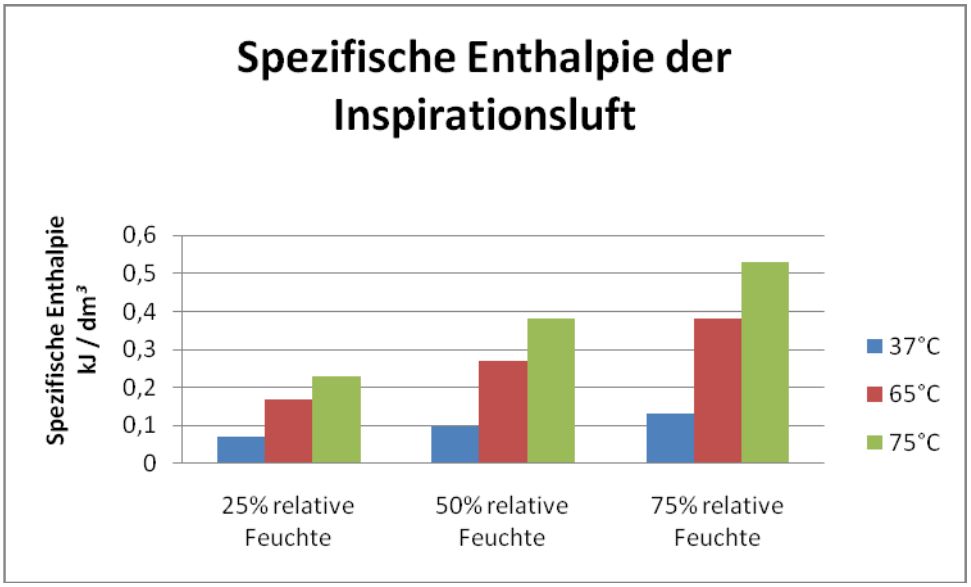

Abbildung 17: Spezifische thermische Energie der in der Klimakammer erzeugten Inhalationsluft, in Kilojoule (kJ) pro Liter (dm³) bei entsprechender relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur. 37°C (blau) / 65°C (rot) / 75°C (grün)

Mit zunehmendem Energiegehalt der Inhalationsluft zeigte sich ein proportionaler Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur. Lediglich die Exposition bei 75% relativer Feuchte und 75°C führte zu keinem weiteren Temperaturanstieg mehr, was im Abschnitt 4.3.7 „Sonstige Ergebnisse“ im Unterpunkt „Extremkonditionen“ gesondert erörtert wird.

Der mit steigendem Energiegehalt verbundene Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur entsprach unseren Erwartungen. Heiße, feuchte Luft kann ab einer bestimmten thermischen Energie nicht über längere Zeit problemlos inhaliert werden. Untersuchungen zeigten, dass warme oder heiße trockene Luft bis zu hohen Temperaturen für kurze Zeit ohne Schleimhautschäden inhaliert werden kann [35, 41]. Selbst extrem heiße, trockene Luft mit 350°C führte im Tierversuch nur zu leichten Verletzungen der oberen Trachea, während die untere Luftröhre und die Lungen keinerlei Anzeichen für Verletzungen zeigten [41]. Moritz et al. untersuchten die Effekte heißer trockener Luft auf den Respirationstrakt von Hunden, dabei atmeten die Hunde entweder 350°C heiße Luft oder wurden mit 500°C heißer Luft beatmet. Bei der nachfolgenden Untersuchung der Hunde konnten sie keine ernsten Verletzungen am Respirationstrakt feststellen. Eine Vergleichsgruppe von Hunden wurde mit dampfgesättigter heißer Luft beatmet, hierbei zeigten sich massive Verletzungen des oberen und unteren Respirationstraktes [41]. Ebenfalls tierexperimentell konnte eine Schleimhautstörung nach Inhalation von heißer trockener Luft über ein Tracheostoma (130-135°C über drei – vier Minuten) gezeigt werden. Es kam dabei zu spezifischen Veränderungen der Zellwände. Nach 12-14 Tagen konnte eine Erholung der Struktur des Lungenparenchyms gezeigt werden [28]. Trockene Luft besitzt bei 350°C einen Energiegehalt von 0,36kJ/dm³. Verglichen mit den Energiewerten unserer Klimakonditionen [Abbildung 17] entspricht 350°C (0,36 kJ/dm³) heiße Luft Temperaturen zwischen 65°C und 75°C bei 50% relativer Feuchtigkeit. Hieraus zeigt sich die Bedeutung des Wassergehalts für die Enthalpie des Luftgemischs. Daher ist der Energiegehalt trockener Luft bei 500°C mit 0,362 kJ/dm³ nur unwesentlich höher als von 350°C heißer trockener Luft. Wenn man diese Werte berücksichtig, sind die Ergebnisse der oben aufgeführten Arbeiten [41] nachvollziehbar.

Aus einem hohen Temperaturwert der Inspirationsluft kann also nicht automatisch ein hoher Energiewert abgeleitet werden. Feuchte Luft kann bei jeder Temperatur mehr Hitze an die Umgebung abgeben als ein äquivalentes Volumen trockener Luft gleicher Temperatur. Dies wird besonders deutlich, wenn der exemplarische Extremfall 99°C heißer Luft bei 100% relativer Feuchtigkeit betrachtet wird. Bei dieser Kondition beträgt die spezifische Enthalpie 1,53 kJ/dm³ und ist näherungsweise dreimal höher als der Energiegehalt bei 75°C und 75% relativer Feuchte mit 0,53 kJ/dm³ [Abbildung 17]. Aus der alleinigen Angabe eines hohen Temperatur-

werts eines Inhalationsgemischs kann daher die Wirkung auf die Nasenschleimhaut nicht direkt abgeleitet werden. Für zukünftige Arbeiten wäre eine Angabe der thermischen Energie pro Volumeneinheit des Inhalationsgemischs sinnvoll, um eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Konditionen zur ermöglichen.

4.3.4. Einfluss der rel. Feuchte der Expositionsbedingungen

Die Steigerung der relativen Feuchte hatte überraschenderweise einen relativ geringen Einfluss auf die Steigerung der Nasenschleimhauttemperatur. Dies ist umso erstaunlicher, da die relative Feuchte einen großen Einfluss auf die thermische Energie hat. Lediglich nach fünf Minuten Inhalationszeit bei höheren Temperaturen konnte ein signifikanter Anstieg gemessen werden.

Nach fünfminütiger Atmung zeigte sich bei der Steigerung der relativen Feuchtigkeit von:

- 25% auf 50% relative Feuchtigkeit bei 65°C ein hochsignifikanter Temperaturanstieg.
- 50% auf 75% relative Feuchtigkeit bei 65°C und bei 75°C ein hochsignifikanter Temperaturanstieg.
- 25% auf 75% relative Feuchtigkeit bei 65°C ein signifikanter Temperaturanstieg und bei 75°C ein hochsignifikanter Anstieg.

Bei Betrachtung des Energiegehalts der Inspirationsluft zeigt sich eine Korrelation des Temperaturanstiegs mit steigendem Energiegehalt. Die nachfolgenden Grafiken (Abbildung 18 und Abbildung 19) zeigen die spezifische Enthalpie der von der Klimakammer erzeugten Inspirationsluft auf.
Für die jeweiligen Temperaturstufen sind die Energiewerte der Inhalationsluft bei Ihren entsprechenden Feuchtewerten in einem Balkendiagramm dargestellt.
Eine Steigerung des Energiegehalts der Inspirationsluft nach Erhöhung des Feuchtegehalts ist klar erkennbar.

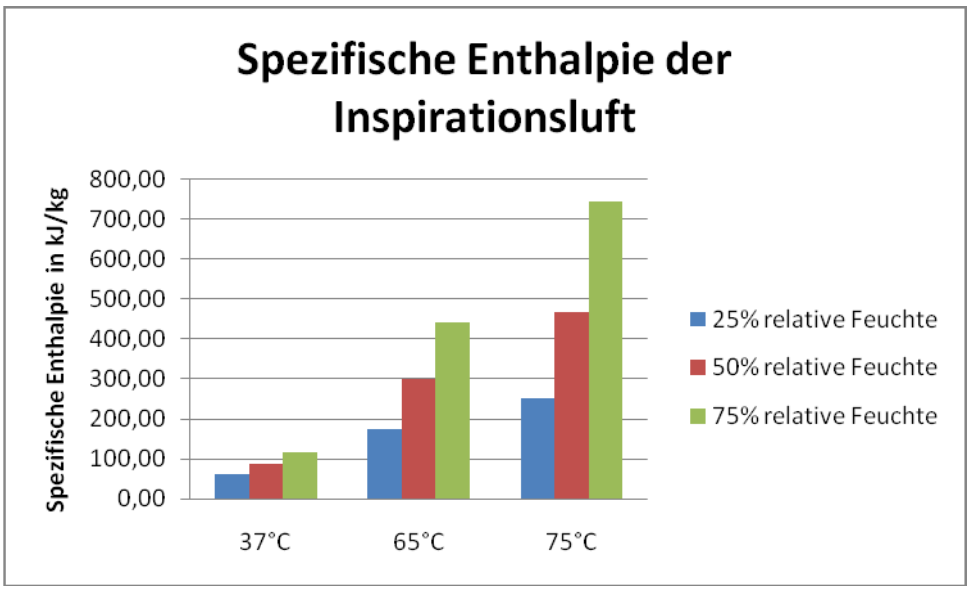

Abbildung 18: Spezifische Enthalpie der Inspirationsluft in Kilojoule (kJ) pro Kilogramm (kg), bei zugehöriger relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur. 25% relative Feuchte (blau) / 50% relative Feuchte (rot) / 75% relative Feuchte (grün)

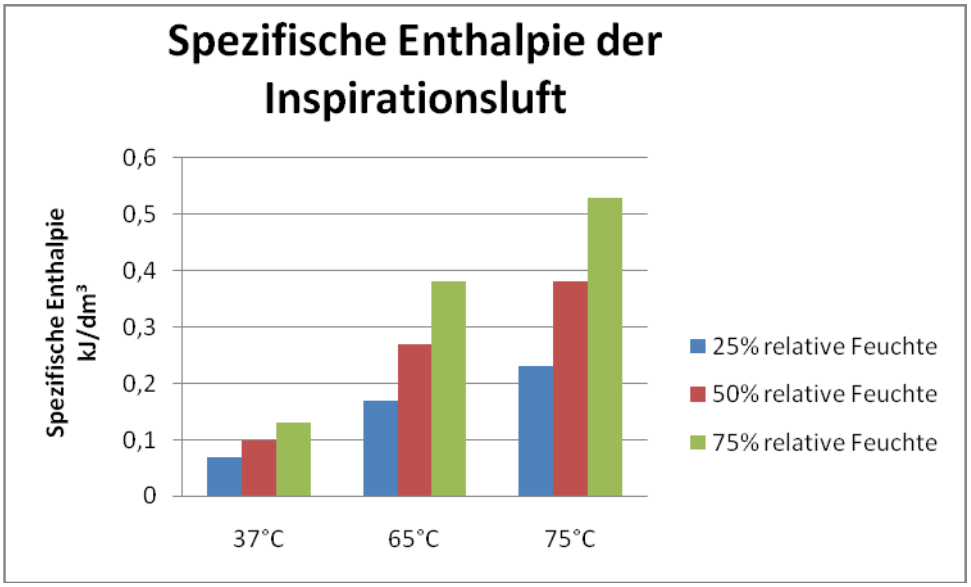

Abbildung 19: Spezifische Enthalpie der Inspirationsluft in Kilojoule (kJ) pro Liter (dm^3), bei zugehöriger relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur. 25% relative Feuchte (blau) / 50% relative Feuchte (rot) / 75% relative Feuchte (grün)

Wenngleich aus den Grafiken eine deutliche Energiezunahme der Inspirationsluft bei höheren Feuchtegraden zu entnehmen ist, hatte die Erhöhung der Feuchte lediglich nach fünf Minuten, bei höheren Inspirationstemperaturen, einen Einfluss auf die Temperatur der nasalen Mukosa. Da die Feuchte der Luft für den Wärmetransport von herausragender Bedeutung ist, entsprach dies nicht unseren Erwartungen. Eine mögliche Erklärung könnte jedoch sein, dass für die tatsächliche Wirkung an der Nasenschleimhaut nicht ein Teilaspekt der thermischen Energie, sondern diese als Ganzes von Bedeutung ist. Darüber hinaus war mit der Zielvariablen "Nasenschleimhauttemperatur" eine Größe gewählt, die den Einfluss der relativen Feuchte nur indirekt anzeigen kann.

4.3.5. Einfluss der steigenden Expositionstemperatur

Eine Temperaturerhöhung der Inspirationsluft führte bei nahezu allen Messkonditionen proportional zu einem signifikanten Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur, was unseren Erwartungen entsprach.

Liener et al. machte in Ihrer Studie die gleiche Beobachtung, warme, feuchte Luft führte zu einem signifikanten Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur durch direkte Erwärmung [30].

Obwohl die Feuchte der Luft für den Wärmetransport insgesamt von größerer Bedeutung ist, hat die Erhöhung der Inhalationstemperatur einen relevanteren Einfluss auf die Nasenschleimhauttemperatur. Ein weiterer Vergleich mit der Literatur ist schwierig, da bis dato keine vergleichbaren Untersuchungen vorliegen.

Wie bereits in Abschnitt 4.3.3 erläutert, ist die alleinige Angabe eines Temperaturwerts für ein Inhalationsgemisch unzureichend. Für den Laien stellt 350°C heiße, trockene Luft einen Extremwert mit mutmaßlich hohem Schaden auf den Organismus dar, obwohl sie den gleichen Energiegehalt wie Luft bei 70°C und 50% relativer Feuchte aufweist. Mit der Angabe der spezifischen Energie eines Inhalationsgemischs kann dessen Effekt auf die Mukosa abgeschätzt werden, indem dessen Wirkung als Resultat aus der Kombination Temperatur und Luftfeuchte betrachtet wird.

Die Variable "Temperatur des Inhalats" kann sich natürlich auch weit unmittelbarer in der Zielvariablen "Septumtemperatur" wiederfinden, da es sich hier um direkte Effekte handelt.

4.3.6. Sonstige Ergebnisse: Rhinomanometrie

Die Auswertung der Rhinomanometriewerte ergab einen signifikanten Abfall des Volumenstroms der Nase nach Beendigung des Versuchs.

An allen drei Messtagen konnte ein mittlerer Abfall von durchschnittlich 27% bezogen auf den Ausgangswert festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Inhalation von heißer Luft zu einem deutlichen Abfall der nasalen Durchgängigkeit führt.

Die Auswirkung von Temperaturänderungen der Atemluft auf die Nasenschleimhaut wird in der Literatur unterschiedlich diskutiert. Vergleichbare Resultate früherer Untersuchungen sind rar und wurden vor allem mit kalter Luft durchgeführt [15, 29, 63]. Von einigen Autoren wird eine nasale Obstruktion als Folge von Gefäßdilatation in der Wärme beschrieben [55, 50]. Andere Studien beobachteten ein Abschwellen der Nasenschleimhaut mit erhöhter Nasendurchgängigkeit [44]. Schwarz zeigte in Ihrer Untersuchung mit heißer, trockener Saunaluft, dass unter hohen Umgebungstemperaturen in der Nase verschiedene Reaktionsmöglichkeiten bestehen. Für den Einzelfall kann nicht vorhergesagt werden, ob eine Obstruktion oder verbesserte Durchgängigkeit der Nase zu erwarten ist [57]. Da in der Studie von Schwarz die Sauna-Temperatur und Feuchte nicht mit unseren Werten vergleichbar ist und zudem nicht definiert wurde, dass die Probanden Ihre Atemluft ausschließlich mittels Nasenatmung beziehen, sind die dort gemachten Ergebnisse nicht direkt mit unseren Ergebnissen vergleichbar. Die in unserer Studie beobachtete signifikant verminderte Durchgängigkeit der Nase nach der Warmluftinhalation, mit bis zu 75°C heißer Luft kann jedoch zusätzlich durch die Manipulation der Nase durch die zahlreichen aufeinanderfolgenden Messungen verstärkt worden sein. Zur abschließenden Klärung dieser Frage wäre eine Neuauflage der Exposition ohne zwischenzeitliche nasale Irritationen erforderlich.

4.3.7. Sonstige Ergebnisse: Extremkonditionen

Bei 75°C und 75% relativer Feuchte war nur initial ein Temperaturanstieg zu verzeichnen. Dies entspricht zunächst nicht unseren Erwartungen. Der Energiegehalt des Inhalats war mit 0,53kJ/dm³ deutlich höher als bei 75% relative Feuchte und 65°C (0,37 kJ/dm³), was eigentlich zu einer weiteren Temperaturerhöhung der Nasenschleimhaut hätte führen müssen.

Bei n=3 Probanden war dennoch ein weiterer Temperaturanstieg messbar, was jedoch von Missempfinden seitens der Probanden begleitet war.

Hieraus lässt sich folgern, dass die Extrembedingungen bei 75°C und 75% relativer Feuchte nur von wenigen Probanden ohne Missempfinden toleriert wurden und, ausgehend von den Ergebnissen, angenommen werden muss, dass zusätzlich zur reinen Nasenatmung auch durch den Mund inhaliert wurde. In sämtlichen Studien, die sich mit Inhalation von warmer, feuchter Luft bei Schnupfen beschäftigten wurden, wenn überhaupt, lediglich geringe Nebeneffekte im Bezug auf thermischen Stress berichtet. Guild schildert in seiner Untersuchung, dass die Inhalation dampfgesättigter Luft von Probanden bei über 47°C nach mehr als fünf Minuten als unangenehm beurteilt wird. Eine Lufttemperatur von 50°C war nach wenigen Minuten nicht mehr tolerabel, Temperaturen zwischen 55°C und 60°C waren sofort intolerabel [19].

Diese Beobachtung deckt sich mit der Beschreibung der Probanden in unserer Untersuchung. Bei 75% relativer Feuchte und 75°C scheint die Schmerzgrenze der Probanden erreicht zu sein. Expositionen der Mundrachenschleimhaut mit größerer Hitze finden sich in der medizinischen Literatur vereinzelt [17, 36]. Bislang wurden keine nasalen Schleimhautschäden nach Inhalation von trockener Luft bei Temperaturen von 70-90°C beobachtet. Das Anwärmen der Mund- und Rachenschleimhaut findet regelmäßig beim Genuss warmer Mahlzeiten statt. Auch diesem Vorgang konnte keine Schleimhautschädigung zugeordnet werden [17]. Während des Rauchens wurden in der Mundhöhle erhöhte Temperaturen gemessen, in der Rachenschleimhaut kam es dabei nur zu geringen Temperaturänderungen [17]. Die Veränderungen der Schleimhauttemperatur scheinen nicht mit der Zerstörung von Schleimhaut im Rachen einherzugehen. Schäden an respiratorischer Schleimhaut durch Saunagänge wurden bisher nicht festgestellt, in den vereinigten Staaten und Kanada sind jedoch nur Saunatemperaturen bis 194° F (90°C) erlaubt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine nachweisbare Temperaturgrenze oder vielmehr thermische Energiegrenze, an der die Nasenschleimhautfunktion reversibel oder irreversibel gestört wird, bis dato nicht eindeutig festzustellen ist.

5. Zusammenfassung

Ein Therapieansatz der "common cold" besteht in der Inhalation von warmer, feuchter Luft. Bislang fehlen jedoch Untersuchungen, die den Temperaturanstieg der Nasenschleimhaut auf die Inhalation dokumentieren.

Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss der Parameter Expositionsdauer, thermische Energie, relative Feuchte und Temperatursteigerung auf die Nasenschleimhauttemperatur festzustellen. In der vorliegenden Untersuchung wurde an 21 Probanden an jeweils 3 Tagen im Klimalabor der Klinik für Hals-Nasen-und Ohrenheilkunde des Universitätsklinikums Ulm Messungen mit unterschiedlich feuchter und warmer Luft durchgeführt. An jedem Messtag war eine konstante Luftfeuchtigkeit vorgegeben (25%, 50% oder 75%). Die Temperatur betrug an jedem Messtag initial 37°C und wurde nach jeweils 20 Minuten auf 65°C und anschließend auf 75°C gesteigert. In regelmäßigen Abständen (2, 5 und 20 Minuten) wurde daraufhin die Schleimhauttemperatur am Septum in Area 2 gemessen.

Bei Betrachtung der Expositionsdauer wurde deutlich, dass die Erhöhung der Schleimhauttemperatur weitgehend unabhängig von anderen Parametern innerhalb den ersten zwei bis fünf Minuten stattfindet. In diesem Zeitraum fand sich bei allen Expositionsansätzen ein signifikanter Anstieg. Im weiteren Versuchsverlauf ließen sich zwischen 5 und 20 Minuten keine weiteren relevanten Temperatursteigerungen der nasalen Mukosa nachweisen.

Eine Steigerung des thermischen Energiewerts pro Volumen resultierte in einem direkt proportionalen Anstieg der Nasenschleimhauttemperatur. Nur bei dem Extremwert 75°C und 75% relative Feuchte war kein weiterer Anstieg zu verzeichnen, was auf die unzureichende Nasenatmung der Probanden aufgrund des zu starken Hitzeempfindens zurückzuführen ist. Heisse feuchte Luft kann ab einem bestimmten thermischen Energiewert nicht über längere Zeit inhaliert werden.

Wir konnten durch unsere Untersuchung zeigen, dass die Steigerung der relativen Feuchte der Inspirationsluft einen nachrangigen Effekt auf die Schleimhauttemperatursteigerung hatte. Lediglich nach fünf Minuten Inhalationszeit bei Temperaturen von 65°C und 75°C konnte ein signifikanter Anstieg festgestellt werden.

Eine Temperaturerhöhung der inhalierten Luft führte bei nahezu allen Messkonditionen zu einem signifikanten Anstieg der Temperatur der Nasenschleimhaut. So-

mit kann festgehalten werden, dass sich die Temperatur der Nasenschleimhaut bereits nach kurzer Inhalationsdauer signifikant anheben lässt.
Des Weiteren ist der signifikante Abfall der nasalen Durchgängigkeit in Höhe von 27% bezogen auf den Ausgangswert nach Heißluftinspiration bemerkenswert.
Zukünftige Arbeiten in diesem Themenbereich sollten eine Angabe über den Energiegehalt der Inspirationsluft beinhalten, um die Arbeiten untereinander vergleichbarer zumachen, da aus der alleinigen Temperaturangabe nur unzureichende Vergleiche gezogen werden können.

6. Literaturverzeichnis

1. Aschenbrandt T: Die Bedeutung der Nase für die Athmung. Würzburg Stahel, (1866)
2. Assanasen P, Baroody FM, Naureckas E, Naclerio RM: Warming of feet elevates nasal mucosal surface temperature and reduces the early response to nasal challenge with allergen. J Allergy Clin Immunol 104: 285-293 (1999)
3. Bende M: The physiologic importance of the nasal mucosal vascular bed: A review. Am J Rhinol 5: 189-191 (1990)
4. Rettinger G: Nase, Nebenhöhlen, Mittelgesicht, Vordere Schädelbasis. In: Berghaus A, Rettinger G, Böhme G (Hrsg) Hals-Nasen-Ohrenheilkunde. Georg-Thieme-Verlag, Stuttgart S.228-260 (1996)
5. Bramley TJ, Lerner D, Sames M: Productivity losses related to the common cold. J Occup Environ Med 44: 822-829 (2002)
6. Brown-Kelly A: Nasal Thermometry: A method of determing the influence of the nose on the temperature of the inspired air. The Journal of Laryngology, Rhinology, and Otology, 28: f1-f10 Cambridge University Press (1913)
7. Clement PA, Gordts F: Standardisation Committee on Objective Assessment of the Nasal Airway, IRS, and ERS: Consensus report on acoustic rhinometry and rhinomanometry. Rhinology 43: 169-179 (2005)
8. Cole P: Recordings of respiratory air temperature. J Laryngol Otol 68: 295–307 (1954)
9. Cole P: Respiratory mucosal vascular responses, air conditioning and thermoregulation. J Laryngol Otol 68: 613-622 (1954)
10. Conti C, De Marco A, Mastromarino P, Tomao P, Santoro MG: Antiviral effect of hyperthermic treatment in rhinovirus infection. Antimicrobial agents and chemotherapy 43: 822-829 (1999)
11. Douglas RM, Hemila H, D'Souza R, Chalker EB, Treacy B: Vitamin C for preventing and treating the common cold. Cochrane Database Syst Rev 4: CD000980 (2004)
12. Eichler J: Einleitung, Aufgabe der Rhinomanometrie. In: Eichler J (Hrsg) Einführung in die Technik der Rhinomanometrie: Anwendungen in d. Rhino-

logie und Allergologie, Quintessenz-Verl.-GmbH, Berlin Chicago London, S.11-15 (1988)

13. Eichler J: Grundlagen zur Rhinomanometrie. In: Eichler J (Hrsg) Einführung in die Technik der Rhinomanometrie: Anwendungen in d. Rhinologie und Allergologie, Quintessenz-Verl.-GmbH, Berlin Chicago London, S.41-47 (1988)
14. Eichler J: Ergebnisse der Rhinomanometrie. In: Eichler J (Hrsg) Einführung in die Technik der Rhinomanometrie: Anwendungen in d. Rhinologie und Allergologie, Quintessenz-Verl.-GmbH, Berlin Chicago London, S.103-117 (1988)
15. Fontanari P, Burnet H, Zattara-Hartmann MC, Jammes Y: Changes in airway resistance induced by nasal inhalation of cold dry, dry, or moist air in normal individuals. J Appl Physiol 81: 1739–1743 (1996)
16. Forstall G. J, Macknin M. L, Yen-Lieberman B. R, Medendrop S: Effect of inhaling heated vapor on symptoms of the common cold. JAMA 271: 1109–1111 (1994)
17. Fritz HG, Schwenzer N: Thermal damage to the oral mucosa due to smoking Quintessenz 35: 777-789 (1984)
18. Groß Uwe: Akute Infektionen der oberen Atemwege. In: Groß Uwe (Hrsg) Kurzlehrbuch Medizinische Mikrobiologie und Infektiologie. 1. Aufl, Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York, S.232 (2006)
19. Guild WJ: Rewarming via the airway (CBRW) for hypothermia in the field? J R Nav Med Serv 64: 186-193 (1978)
20. Hendley OJ, Abbot RD, Beasley PP, Gwaltney JM Jr: Effect of inhalation of hot humidified air on experimental rhinovirus infection. JAMA 13 271: 1112-1113 (1994)
21. Huizing E, de Groot J: Basics Surgical Anatomy. In: Huizing E, de Groot J (Hrsg) Functional reconstructive nasal surgery. 1. Aufl, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York S.1-56 (2003)
22. Ingelstedt S, Flisberg K: Vascular response to feet cooling in normal and allergic nose. Acta Otolaryngol 55: 457-466 (1962)
23. Iravani J: Das Flimmerepithel. Beitr Klin Erforsch Tuberk Lungenkr 138: 313–324 (1968)

24. Kastl KG, Rettinger G, Keck T: The Impact of Nasal Surgery on air-conditioning of the Nasal Airways: a Review. Rhinology 47: 237-241 (2009)
25. Keck T, Leiacker R, Heinrich A, Kuhnemann S, Rettinger G: Humidity and temperature profile in the nasal cavity. Rhinology. 38: 167-171 (2000)
26. Keck T, Leiacker R, Meixner D, Kühnemann, Rettinger G: Erwärmung der Atemluft in der Nase. HNO 49: 36–40 (2001)
27. Keck T, Leiacker R, Lindemann J, Rettinger G. Kühnemann S: Endonasales Temperatur- und Feuchteprofil nach Exposition zu verschieden klimatisierter Einatemluft. HNO 49: 372-377 (2001)
28. Kharkhurim I, Vigalok S: Patho-anatomical changes in the lungs following inhalation of hot air; experimental and morphological studies. Arkh Patol 19: 29-31 (1957)
29. Laine M, Huggare J, Ruoppi P: A modification of the pressure-flow technique for measuring breathing of cold air and its effect on nasal cross-sectional area. Am J Orthod Dentofacial Orthop 105: 265-269 (1994)
30. Liener K, Leiacker R, Lindemann J, Rettinger G, Keck T: Nasal mucosal temperature after exposure to cold, dry air and hot, humid air. Acta Otolaryngol 123: 851-856 (2003)
31. Linde K, Barrett B, Wölkart K, Bauer R, Melchart D: Echinacea for preventing and treating the common cold. Cochrane Database Syst Rev 1: CD000530 (2006)
32. Lindemann J, Leiacker R, Rettinger G, Keck T: Nasal mucosa temperature during respiration. Clin Otorhinolaryngol Allied Sci 27: 135-139 (2002)
33. Lindemann J, Leiacker R, Wiesmiller K, Rettinger G, Keck T: Immediate effect of benzalkonium-chloride in decongestant nasal spray on the human nasal mucosal temperature. Clin Otolaryngol 29: 357-361 (2004)
34. Lindemann J, Sannwald D, Wiesmiller K: Age-related changes in intranasal air conditioning in the elderly. Laryngoscope 118: 1472-1475 (2008)
35. Lloyd EL: Accidental hypothermia treated by central rewarming through the airway. Br J Anaesth 45: 41-48 (1973)
36. López Gastón A: Cold and warm thermoregulation by oropharynx area and esophagus. Acta Gastroenterol Latinoam 30: 159-164 (2000)
37. Lund VJ: Nasal physiology: neurochemical receptors, nasal cycle, and ciliary action. Allergy Asthma Proc 17: 179-184 (1996)

38. Macknin M, Mathew S, Medendorp S: Effect of inhaling heated vapor on symptoms of the common cold. Jama 264: 989-991 (1990)
39. Maeda Y, Okita W, Ichimura K: Increased nasal patency caused by smoking and contraction of isolated human nasal mucosa. Rhinology 42: 63-67 (2004)
40. Mercke U: The influence of varying air humidity on mucociliary activity. Acta Otolaryngol 79: 33-139 (1975)
41. Moritz AR, Henriques F, McLean R: The effects of inhaled heat on the air passages and lungs. Am J Path 21: 311-331 (1945)
42. Mudd S, Goldman A, Grant SB: Reactions of the nasal cavity and postnasalspace to chilling of the body surface. Vasomotor reactions. J Exp Med 34: 11-45 (1921)
43. Ohhashi T, Sakaguchi M, Tsuda T: Human perspiration measurement. Physiol Meas 19: 449-461 (1998)
44. Olsson P, Bende M: Influence of environmental temperature on human nasal mucosa. Ann Otol Rhinol Laryngol 94: 153-155 (1985)
45. Ophir D, Elad Y, Fink A, Fishler E, Marshak G: Effects of elevated intranasal temperature on subjective and objective findings in perennial rhinitis. Ann Otol Rhinol Laryngol 97: 259-263 (1988)
46. Ophir D, Elad Y: Effects of steam inhalation on nasal patency and nasal symptoms in patients with the common cold. Am J Otolaryngol 8: 149-153 (1987)
47. Pecaut M, Veil C: Behavior of polymorphonuclear leukocytes in the lungs following inhalation of hot air. C R Seances Soc Biol Fil 148: 1603-1605 (1954)
48. Perwitzschky R: Die Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse der Atemluft in den Luftwegen. Archiv f. Ohren-, Nasen- und Kehlkopfheilkunde Bd. 125: 1- 22 (1930)
49. Putz R, Pabst R: Kopf, Caput und Hals, Collum. In: Putz R, Pabst R (Hrsg): Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen. Bd.1 Kopf, Hals und obere Extremität. 21. Aufl, Urban und Fischer Verlag, München Jena, S.30-163 (2000)

50. Ralston H, Kerr W: Vascular responses of the nasal mucosa to thermal stimuli with some observations on skin temperature. Am J Physiol 144: 305–310 (1945)
51. Rasp G: Physiologie und Immunologie der Nasenschleimhaut. In: Grevers G (Hrsg) Praktische Rhinologie. Urban & Schwarzenberg, München Wien Baltimore, S.1-15 (1998)
52. Rouadi P, Baroody FM, Abbott D, Naureckas E, Solway J, Naclerio RM: A technique to measure the ability of the human nose to warm and humidify air. Journal of Applied Physiology 87: 400-406 (1999)
53. Sakchainanont B, Ruangkanchanasetr S, Chantarojanasiri T: Effectiveness of antihistamines in common cold. J Med Assoc Thai 73: 96-101 (1990)
54. Saketkhoo K, Januszkiewicz A, Sackner MA: Effects of drinking hot water, cold water, and chicken soup on nasal mucus velocity and nasal airflow resistance. Chest. 74: 408-410 (1978)
55. Salmann S, Proctor D, Swift D, Eveering S: Nasal resistance: description of a method and effect of temperature and humidity changes. Ann Otol Rhinol Laryngol 80: 736-743 (1971)
56. Sattelmayer T: Gas-Dampf-Gemische. In Sattelmayer T (Hrsg) Technische Thermodynamik / Energielehre, Skriptum zur Thermodynamik II an der TU München, Eigenverlag, Lehrstuhl für Thermodynamik Technische Universität München, S. 87-113 (2008)
57. Schwarz G: Rhinomanometrische Untersuchungen zur thermischen Beeinflussung der Nasenventilation. HNO 46: 519-523 (1998)
58. Seeley LE: Study of changes in the temperature and water vapour content in the nasal cavity. Ann Soc Heat Vent Eng 46: 259-290 (1940)
59. Simasek M, Blandino D: Treatment of the common cold. Am Fam Physician 75: 515-20 (2007)
60. Simon H, Leoben, Schmidt- Kloiber H: The nose as an indicating organ of vegetative controlling mechanisms. Rhinology 22: 269-280 (1984)
61. Singh M: Heated, humidified air for the common cold. Cochrane database of systematic reviews (Online) 3: CD001728 (2006)
62. Sperber SJ, Hayden FG: Chemotherapy of rhinovirus colds. Antimicrob. Agents Chemother 32: 409-419 (1988)

63. Strohl KP, Arnold JL, Decker MJ, Hoekje PL, McFadden ER: Nasal flow – resistive response to challenge with cold dry air. J Appl Physiol 72: 1243–1246 (1992)
64. Svensson S, Olin AC, Hellgren J: Increased net water loss by oral compared to nasal expiration in healthy subjects. Rhinology 44: 74-77 (2006)
65. Tyrrell D, Barrow I, Arthur J: Local hyperthermia benefits natural and experimental common colds. BMJ Clinical researched 298: 1280-1283 (1989)
66. Webb P: Air temperatures in respiratory tracts of resting subjects in cold. J Appl Physiol 4: 378-382 (1951)
67. Wiesmiller K, Keck T, Leiacker R, Lindemann J: Simultaneous in vivo measurements of intranasal air and mucosal temperature. Eur Arch Otorhinolaryngol 264: 615-619 (2007)
68. Willatt DJ: Continuous infrared thermometry of the nasal mucosa. Rhinology 31: 63-67 (1993)

7. Danksagung

Hiermit möchte ich mich ganz herzlich bei all denjenigen, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben bedanken.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. med. G. Rettinger, Ärztlicher Direktor der HalsNasen-Ohrenklinik des Universitätsklinikums Ulm, für die Möglichkeit, diese wissenschaftliche Arbeit durchzuführen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. T. Keck, Vorstand der Abteilung für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf-, Hals- und Plastische Gesichtschirurgie des Krankenhauses der Elisabethinen Graz in Österreich, für die Überlassung des interessanten Themas und Übernahme der Doktorvaterschaft.

Im Besonderen danke ich Herrn Dr. med. Konrad Kastl, der mir stets in allen Fragen, die zur Erstellung dieser Arbeit beantwortet werden mussten, hilfreich zur Seite stand. Vielen herzlichen Dank für die herausragende Betreuung, die Unterstützung, die anregenden Gespräche und die fortlaufende Motivation während der Erstellung der Arbeit sowie für die Durchsicht des Textes.

Danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. (FH) Richard Leiacker, der mich bei der Vorbereitung und der Durchführung der Messungen im Klimalabor tatkräftig unterstützte.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Probanden, die kostenlos Ihre Zeit für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt haben, sowie meiner Familie für deren Geduld und Rücksichtnahme während der Entstehung dieser Arbeit.