

„Trockene Luft“ Literaturstudie zu den Auswirkungen auf die Gesundheit

baua: Bericht

K. Bux
N. von Hahn

**„Trockene Luft“
Literaturstudie zu den
Auswirkungen auf die Gesundheit**

1. Auflage 2020
Dortmund/Berlin/Dresden

Diese Veröffentlichung ist das Ergebnis einer Literaturstudie in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Kersten Bux
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Nadja von Hahn
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA)

Titelfoto: Susanne Graul, BAuA

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon 0231 9071-2071
Telefax 0231 9071-2070
E-Mail info-zentrum@buaa.bund.de
Internet www.buaa.de

Berlin: Nöldnerstraße 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Telefax 030 51548-4170

Dresden: Fabricestraße 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Telefax 0351 5639-5210

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



doi:10.21934/buaa:bericht20200624 (online)

www.buaa.de/dok/8839704

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
2 Veranlassung	8
3 Ergebnisse relevanter Reviews aus den Jahren 2006 bis 2019	10
4 Auswahl relevanter Quellen aus den Jahren 2006 bis 2019	12
5 Auswertung	16
5.1 Haut	16
5.1.1 Literaturstudien	16
5.1.2 Interventionsstudien	17
5.1.3 Empirische Modellstudien	19
5.2 Augen	20
5.2.1 Literaturstudien	20
5.2.2 Interventionsstudien	21
5.2.3 Feldstudien	23
5.3 Schleimhäute der Atemwege	24
5.3.1. Literaturstudien	25
5.3.2 Interventionsstudien	25
5.4 Übertragung krankheitserregender Keime	26
5.4.1 Literaturstudien	27
5.4.2 Interventionsstudien	28
5.4.3 Feldstudien	30
5.4.4 Empirische Modellstudien	32
6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	33
6.1 Haut	33
6.2 Augen	34
6.3 Schleimhäute der Atemwege	35
6.4 Übertragung krankheitserregender Keime	35
6.5 Schlussfolgerungen	37
7 Fazit	39
8 Nachtrag	40
Literaturverzeichnis	41
Formelzeichen	45
Tabellenverzeichnis	45

„Trockene Luft“ - Literaturstudie zu den Auswirkungen auf die Gesundheit

Kurzreferat

In einer Literaturstudie wird der Einfluss von trockener Raumluft auf die Aspekte Gesundheit von Haut, Augen und Schleimhäute der Atemwege sowie die Übertragung krankheitserregender Keime untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der Beschäftigte in technologisch nicht beeinflussten Klimaten wie Bürobereiche, bei jahreszeitlich bedingter trockener Luft (kalte Jahreszeit) und auf Ländern mit gemäßigttem Klima im Zeitraum 2006 bis 2019. Diese Studie schließt an das Review von (von Hahn 2007) an. Insgesamt wurden 10 Reviews sowie 27 Labor-, Feld- und sonstige Studien erfasst, Fragebogenerhebungen wurden dabei nicht miteingeschlossen. Im Ergebnis der Auswertung sind zwar für die einzelnen Aspekte verschiedene Effekte wie trockenere Haut und eine längere Aktivität von Influenzaviren bei niedrigen Luftfeuchten erkennbar, jedoch setzen diese bei unterschiedlichen nicht fest begrenzten Bereichen der Luftfeuchte ein. Bei an Augen und Atemwegsschleimhäuten beobachteten Effekten überwiegt oft der Einfluss anderer Faktoren. Insofern lässt sich zu den hier betrachteten Aspekten noch keine Notwendigkeit für konkrete Maßnahmen in Bezug auf eine Intervention mit Erhöhung der Luftfeuchte in der kalten Jahreszeit in Räumen von Arbeitsstätten ableiten.

Schlagwörter:

Trockene Luft, Haut, Augen, Schleimhäute, Influenzaviren, Arbeitsstätten

"Dry air" - literature study on the effects on health

Abstract

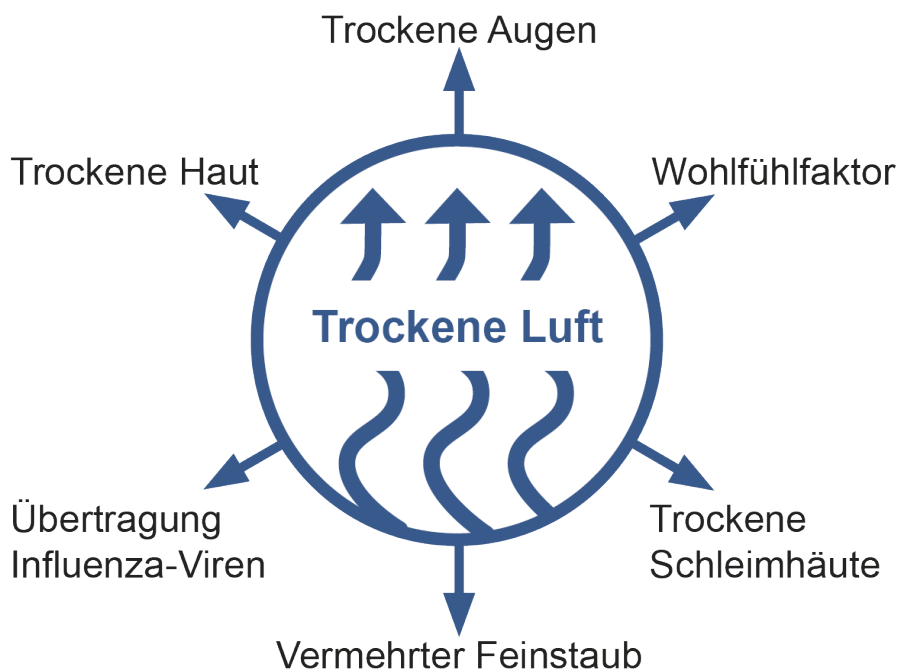
A literature study examines the influence of dry indoor air on the aspects of the health of the skin, eyes and mucous membranes of the respiratory tract as well as the transmission of pathogens. The focus is on employees, in technologically unaffected climates such as office areas, in seasonally dry air (cold season) and on countries with a temperate climate in the period 2006 to 2019. This study concludes with the review of (von Hahn 2007). A total of 10 reviews as well as 27 laboratory, field and other studies were recorded, questionnaire surveys were not included. In the result of the evaluation, different effects such as drier skin and a longer activity of influenza viruses at low atmospheric humidity can be recognized for the individual aspects, but these apply to different, mostly not permanently limited, areas of atmospheric humidity. In the case of effects observed on the eyes and respiratory mucous membranes, the influence of other factors often prevails. In this respect, it is not yet possible to derive the need for concrete measures in relation to an intervention with an increase in the air humidity in the cold season in rooms of workplaces for the aspects considered here.

Keywords:

Dry air, skin, eyes, mucous membranes, influenza viruses, workplaces

1 Einleitung

In der kalten Jahreszeit klagen Beschäftigte oft über brennende Augen, trockene Schleimhäute und juckende Haut. Die Ursache dafür wird häufig einer trockenen Raumluft zugeschrieben, die sich aufgrund des Außenklimas in dieser Jahreszeit in Innenräumen einstellen kann. Wird die Raumluft nicht befeuchtet, treten dann relative Luftfeuchten (RH) von deutlich unter 30 % auf, was physikalisch an der begrenzten Aufnahmefähigkeit von Wasserdampf in der Luft liegt, wobei kalte Außenluft deutlich weniger Wasser aufnehmen kann (z. B. bei -4 °C und $\text{RH} = 50\%$ ca. $1,3\text{ g}$ Wasser pro 1 kg Luft) als warme Raumluft (z. B. bei $+20\text{ °C}$ und $\text{RH} = 50\%$ ca. $7,3\text{ g}$ Wasser pro 1 kg Luft). Wird durch freie Lüftung die kalte Außenluft in den Raum geführt und die Lufttemperatur durch Heizung auf $+20\text{ °C}$ konstant gehalten, würde sich bei einem Luftaustausch des halben Raumvolumens eine relative Luftfeuchte von ca. 28 % einstellen (ca. $4,6\text{ g}$ Wasser pro 1 kg Luft). Ob allein die niedrige Luftfeuchte die Ursache für die Beschwerden ist, wird von der Fachwelt kontrovers diskutiert. Die Ursachen scheinen unterschiedlicher Natur zu sein. Subjektiv wird die Luft häufiger als zu trocken empfunden, selbst wenn durch Klimatisierung eine Luftfeuchte von über 30 - 40 % eingestellt ist. Bei Auswertung von Befragungen im Rahmen der ProKlima-Studie wurden beispielsweise relative Luftfeuchten von etwa 50 % mit Bewertungen von „sehr trocken“ bis zu „sehr feucht“ eingeschätzt (Bischof et al. 2003). Da der Mensch kein Sinnesorgan zur Wahrnehmung der Luftfeuchte besitzt, ist diese hohe Schwankungsbreite nachvollziehbar. Die Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft das breite Spektrum der mit trockener Luft in Zusammenhang gebrachten Wirkungen.



(Quelle: Graul, BAuA)

Abb. 1.1: Mit „trockener Luft“ in Verbindung gebrachte Wirkungen

2 Veranlassung

In einer umfassenden Literaturstudie zur Wirkung niedriger Luftfeuchten in Innenräumen von (von Hahn 2007), die die Jahre von 1960 bis 2005 mit insgesamt 29 Klimakammer- und Feldstudien erfasst, wurden Effekte auf die verschiedenen Bereiche des Körpers (Schleimhäute, Erkältungskrankheiten, Augenbeschwerden, Hautbeschwerden) und elektrostatische Auf- und Entladung ausgewertet. In den damals verfügbaren Studien wurden keine wesentlichen Auswirkungen auf das Austrocknen der Schleimhäute festgestellt. Dagegen wurde die Zunahme der Hautrauigkeit (Klagen über trockene und juckende Haut) und vermehrte elektrostatische Aufladungen („fliegende“ Haare bei weniger als 40 % relativer Luftfeuchte) in einen direkten Zusammenhang mit niedrigen Luftfeuchten gebracht. Auch deuteten die Studien an, dass mit einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte die Wahrscheinlichkeit an einem grippalen Effekt zu erkranken sowie die Anzahl der Beschwerden über trockene Augen gesenkt werden kann. Letztlich konnte durch Bewertung aller betrachteten Studien kein unterer Grenzwert für die Luftfeuchte abgeleitet werden, unterhalb dessen ein eindeutiger negativer Einfluss auf die Gesundheit der Beschäftigten besteht. Nur bei Menschen mit bestimmten Vorerkrankungen, wie allergischem Asthma oder Neurodermitis, waren Effekte vorhanden. Insofern wird hier aus Sicht des Arbeitsschutzes der Einfluss der Luftfeuchte eher als eine Frage der Behaglichkeit und des Wohlbefindens eingestuft.

Um Handlungssicherheit für den betrieblichen Arbeitsschutz zu geben, wurde von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) ein Positionspapier erstellt, das die Erkenntnisse der Literaturstudie von (von Hahn 2007) als Orientierungshilfe für die Akteure im Arbeitsschutz zusammenfasst (DGUV 2008). Hier wird festgestellt, dass üblicherweise eine Befeuchtung der Raumluft nicht erforderlich ist und die Effekte einer Luftbefeuchtung auf die Gesundheit eher gering sind. In weiteren Schriften untersetzt die DGUV diesen Standpunkt und gibt praktische Handlungshilfen zum Umgang mit „trockener Luft“, z. B. DGUV Information 215-520 (2016).

Im Rahmen internetbasierter Befragungen innerhalb der „Office 21 »Office Settings«-Studie“ des Fraunhofer Instituts wurde die Wahrnehmung von Beschäftigten (n = 1.100) erfasst, welche Wirkung trockene Luft auf die Leistungsfähigkeit, die Motivation und das Wohlbefinden von Büro- und Wissensarbeitern hat (Rief, Jurecic 2014). Die Untersuchung zeigte u. a., dass die Teilnehmer in Büroflächen mit und ohne Luftbefeuchtung unterschiedlich stark die Symptome zu trockener Luft wahrnehmen. Auf Grundlage solcher Studien wird von Herstellern verstärkt der Einsatz von Direkt-Raumluftbefeuchtern, insbesondere in Büros und ähnlichen Anwendungen über Artikel in Fachzeitschriften, beworben, z. B. (condair-systems 2017).

Im Kontrast dazu steht eine Fragebogenaktion, die (de Kluizenaar et al. 2016) 2016 in 167 Bürogebäuden in acht europäischen Ländern durchführten. Sie verglichen die Ergebnisse zu Augenbeschwerden mit den jeweiligen Gebäudeeigenschaften. Nach vollständiger Anpassung ergab das Regressionsmodell ein deutlich erhöhtes Risiko für Beschwerden über trockene Augen, u. a. beim Vorhandensein portabler Luftbefeuchter. Diese Aussage wird von weiteren Studien gestützt, die das Auftreten von Augenbeschwerden mit der Klimatisierung von Büros in Verbindung bringen.

Auf Grund solch unterschiedlicher Ergebnisse zum Einfluss trockener Luft auf das Empfinden der Beschäftigten und zur Aktualisierung der Literaturstudie von (von Hahn

2007), sollen mit dieser Literaturstudie die Kenntnisse zur Wirkung von niedrigen Luftfeuchten auf die Gesundheit des Menschen in Innenräumen auf einen neuen Stand gebracht werden. Der Fokus der Literaturstudie liegt dabei auf den für den betrieblichen Arbeitsschutz wesentlichen Faktoren in Bezug auf Sicherheit und Schutz der Gesundheit von Beschäftigten in Räumen von Arbeitsstätten. Insbesondere soll die Wirkung von trockener Luft auf folgende Bereiche erfasst werden:

- Haut (insbesondere Gesicht und Hände),
- Augen,
- Schleimhäute der Atemwege und
- Übertragung krankheitserregender Keime (z. B. Influenzaviren, Bakterien, Erkältungskrankheiten).

Zum Einschluss von Studien gelten folgende Rahmenbedingungen:

- Feldstudien, Laborstudien und klinische Studien (keine Fragebogenerhebungen),
- Beschäftigte (keine Kinder und Senioren),
- Bürobereiche (keine Schulen, Kitas, Kliniken),
- jahreszeitlich bedingte trockene Luft (keine produktionstechnisch bedingte trockene Luft),
- Zeitraum ab 2006 und
- Fokus auf Länder mit gemäßigttem Klima wie Mitteleuropa und auch Skandinavien.

Im Ergebnis soll eine Aussage abgeleitet werden, ob sich ein Erfordernis für betriebliche Maßnahmen des Arbeitsschutzes in Bezug auf die Wirkung von niedrigen Luftfeuchten ableiten lässt. Zudem soll eine Empfehlung gegeben werden, ob das Positionspapier der DGUV (DGUV 2008) einer Aktualisierung bedarf.

3 Ergebnisse relevanter Reviews aus den Jahren 2006 bis 2019

In einem ersten Schritt wurden relevante Reviews und andere Quellen unter Beachtung o. g. Rahmenbedingungen erfasst, deren wesentliche Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden:

Im Rahmen einer Literaturstudie von (Pfluger et al. 2013a) bzw. (Pfluger et al. 2013b) wurden 47 klinische Studien hinsichtlich physiologischer Beeinträchtigungen bei niedriger Luftfeuchte in Räumen ausgewertet. Demnach beeinflusst eine niedrige Luftfeuchte insbesondere die Augen, Schleimhäute und die Haut. Vor allem im Bereich besonders niedriger Luftfeuchte treten physiologische Störungen auf, die insbesondere bei entsprechenden Prädispositionen und mit zunehmendem Alter spezifische Symptome hervorrufen können. Eine dauerhafte Exposition bei extrem niedriger absoluter Luftfeuchte beeinträchtigt die allgemeine Gesundheit. Feldversuche, die nur auf einer statistischen Analyse der subjektiven Umfrageergebnisse basieren, sind weniger signifikant als Studien mit Probanden unter kontrollierten klinischen Versuchsbedingungen.

Im Ergebnis der Literaturstudie „Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt“ (Bux and Polte 2016a; Bux and Polte 2016b) wird bzgl. trockener Raumluft festgestellt, dass die physiologischen Wirkungen (insbesondere Austrocknung der Haut) und die daraus resultierende Hautreizung einen direkten Einfluss auf die Wahrnehmung durch den Menschen haben. Da diese und andere damit in Zusammenhang gebrachte Erscheinungen (insbesondere Reizungen der Augen) im komplexen Wirkzusammenhang mit anderen Mechanismen (z. B. mangelhafte Arbeitsplatzergonomie an Bildschirmarbeitsplätzen, trockene Raumluft tritt im Winter ganzheitlich auch im häuslichen Bereich auf) betrachtet werden muss, kann „trockene Raumluft“ nicht als originäres Problem des Arbeitsschutzes betrachtet werden. Aufgrund des störenden Charakters und, dass oft keine Einflussnahme darauf möglich ist, werden mitunter negative emotionale Reaktionen bei den Beschäftigten ausgelöst. Die psychische Komponente und die Selbstwahrnehmung scheinen hier einen starken Einfluss zu haben. Es deutet sich ein indirekter Zusammenhang zwischen der Wirkung von „trockener Luft“ und der psychischen Gesundheit an – „trockene Raumluft“ wirkt als Stressor.

Die Auswirkungen von geringer Luftfeuchte auf Gesundheit (Asthma, Hausstaubmilben, Bakterien, Viren und Pilze), Komfort (Augenreizung, Hautreizung, thermischen Komfort und statische Elektrizität) und Umweltqualität in Innenräumen (Indoor Environmental Quality - IEQ, Raumluftqualität) untersuchten (Derby et al. 2016) in Auswertung von ca. 120 Studien im Zeitraum 1985 bis 2015. Gut quantifizierte Effekte waren der Einfluss der Luftfeuchte auf Hausstaubmilben (niedrige Luftfeuchte RH < 60 % reduziert Milbenallergene) und auf Influenzaviren (signifikanter Rückgang der Aktivität im Bereich RH ~ 40 bis ~ 80 %). Es deutet sich an, dass eine niedrige Luftfeuchte (in Verbindung mit niedrigen Lufttemperaturen) Asthma verschlimmern kann. Leichte Hautbeschwerden wurden bei gesunden Patienten bei relativen Luftfeuchten < 30 % beobachtet. Ein erhöhter Wasserverlust von der Haut (d. h. Transepidermaler Wasserverlust) wurde bei noch niedrigerer Luftfeuchte beobachtet. Jedoch ist nicht bekannt, wie sich der Körper mit der Zeit an eine niedrige Luftfeuchte anpasst. Zwischen 20 und 30 % relativer Luftfeuchte zeigten Kurzzeitstudien eine erhöhte Verdunstung der

Tränenflüssigkeit ebenso wie eine Zunahme der Lidschlagfrequenz. Bzgl. thermischen Komforts konnten nur wenige Effekte bei niedriger Luftfeuchte beobachtet werden. Langzeiteffekte wurden nicht untersucht. Insgesamt konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es zwar geringe negative Auswirkungen auf die Gebäudenutzer gibt, aber sich daraus noch keine zwingenden Beweise für die Festlegung eines Mindestfeuchteniveaus ableiten lassen.

(Wolkoff 2018) sichtet die Literatur bis 09/2017 über die Auswirkungen einer längeren Exposition gegenüber niedriger Luftfeuchte auf die wahrgenommene Raumluftqualität (IAQ), sensorische Reizsymptome in Augen und Atemwegen, die Arbeitsleistung, die Schlafqualität, die Virusaktivität und Sprachstörungen. Die Erhöhung der Luftfeuchte kann die wahrgenommene Raumluftqualität, die Augensymptomatik und möglicherweise die Arbeitsleistung in einer Büroumgebung positiv beeinflussen. Inhalationsstudien mit Mäusen zeigten jedoch keine Verschlechterung der sensorischen Reizung in den Atemwegen durch niedrige Luftfeuchte. Eine Befeuchtung der Raumluft schien bei Patienten mit obstruktivem Schlafapnoesyndrom die nasalen Symptome zu verringern, während keine deutliche Verbesserung der Stimmstärke festgestellt wurde. Sowohl eine niedrige als auch eine hohe relative Luftfeuchte und ggf. auch eine erhöhte absolute Luftfeuchte begünstigten die Übertragung und die Aktivität von Inflenzaviren. Die Beziehung zwischen Lufttemperatur, Luftfeuchte und der Virus- und Aerosoldynamik ist jedoch komplex, was letztendlich vom individuellen Virustyp und seinen physikalisch-chemischen Eigenschaften abhängt. Die Wahrnehmung trockener und feuchter Luft wurde sowohl in Büros als auch in Wohnungen berichtet, obwohl die Wahrnehmung "trockene Luft" oder "feuchte Luft" semantisch irreführend ist, da beim Menschen kein sensorisches Organ für die Wahrnehmung der Luftfeuchte vorhanden ist. Die subjektiv wahrgenommene Raumluftqualität in Bezug auf Geruch und Staubigkeit scheint möglicherweise durch den Austrocknungseffekt bei niedriger Luftfeuchte verstärkt zu werden.

4 Auswahl relevanter Quellen aus den Jahren 2006 bis 2019

Tabelle 4.1 zeigt eine quantitative Übersicht zu den Arten der einbezogenen Studien. Insgesamt wurden 10 Sekundärstudien eingeschlossen – davon drei umfassende Reviews (Literaturstudien), die die verschiedenen Bereiche der Auswirkungen von trockener Luft erfassen, sowie 7 Literaturstudien, die jeweils nur einen bestimmten Bereich (z. B. Augen oder Haut) betrachten. Weiterhin wurden insgesamt 27 Primärstudien aufgenommen, davon 17 Interventionsstudien (Laborstudien und eine Feldstudie), 6 Nicht-Interventionsstudien (meist Feldstudien) sowie fünf Modellstudien (mathematisch-theoretische Ansätze). Insofern wurden im Rahmen dieser Literaturstudie insgesamt 37 Quellen ausgewertet.

Tab. 4.1 Quantitative Übersicht Quellen zur Wirkung trockener Luft

Bereich	Sekundärstudien	Primärstudien				Summe
		Interventionsstudien	Nicht-Interventionsstudien			
			Längsschnitt	Querschnitt	Modellstudien	
Reviews	3	-	-	-	-	3
Haut	3	4	-	-	2	9
Augen	4	7	1	3	-	15
Schleimhäute	3	4	-	-	-	7
Keime	6	4	-	3	3	14
Summe	10	17	1	6	5	37

Hinweis: Als **Interventionsstudien** wurden Studien mit Versuchsanordnungen, bei denen die Versuchsbedingungen und somit größtenteils auch die Ausprägungen der Einflussgrößen von Studienleitung bzw. -team vorgegeben und somit kontrolliert werden, eingeordnet. Ein Beispiel dafür sind **Laborstudien**, in denen die Umgebungsparameter in simulierten Settings je nach Versuchsblock und Fragestellung variiert werden. Allerdings wurden auch **Feldstudien**, bei welchen durch die Versuchsleitung aktiv Einfluss auf die Versuchsumgebung genommen und damit das Setting und die Einflussvariable je nach Anforderung modifiziert wird, als Interventionsstudie gezählt. Unter **Nicht-Interventionsstudien** werden Beobachtungsstudien und andere Studien,

bei denen die fokussierten Einflussgrößen zwar gemessen, jedoch nicht künstlich innerhalb des Studiendesigns verändert werden, verstanden. **Sekundärstudien** befassen sich mit der Beschaffung, Verarbeitung und Interpretation von bereits existierendem Datenmaterial. Da einige Quellen mehrere Zielgrößen (z. B. Augen und Haut) oder Studienarten umfassen, gibt es Doppelzählungen in einigen Bereichen. Insofern entspricht die Summe nicht in allen Fällen der Anzahl der jeweils aufgeführten Quellen.

Tabelle 4.2 zeigt den erfassten Zeitraum und Umfang von früheren Literaturstudien sowie die daraus gewonnen relevanten Studien ab 2006 für die hier betrachteten Zielgrößen. Daran wird deutlich, dass seit der Literaturstudie von (von Hahn 2007) nur relativ wenig neue Studien in Bezug auf die Zielgrößen ausgeführt wurden.

Tab. 4.2: Auswahl von Quellen aus Reviews „trockene Luft“ seit 2006

Nr.	Quelle	Zeit- raum	Quellen gesamt	Da- von ab 2006	davon als relevant ausgewählte Studien für Zielgröße ¹⁾			
					Haut	Au- gen	Schleim- häute (Atem- wege)	Viren und Bakterien
1	(Pfluger et al. 2013a)	1953-2013	47	13	-	-	1	-
2	(Derby et al. 2016)	1985-2015	120	50	1	4	1	3
3	(Wolkoff 2018)	1937-2017	161	122	2	9	4	7
4	Sonstige		-	-	3	3	2	1

¹⁾ Einige Studien sind mehrfach gezählt, da sie zum gleichen Zielorgan (z. B. Haut oder Augen) in mehreren Quellen enthalten sind

Tabelle 4.3 verdeutlicht, dass neben den hier betrachteten Zielgrößen eine Reihe weiterer Problemstellungen und Bereiche in Bezug auf „trockene Luft“ von öffentlichem Interesse sind.

Tab. 4.3: Weitere Themen aus Reviews „trockene Luft“ seit 2006, nicht einbezogen bzw. nicht Gegenstand dieser Studie

Nr.	Quelle	Themen	Anzahl
1	(Pfluger, Feist, Tietjen and Neher 2013a)	- Komfort	1
2	(Rief 2014)	- Konservierung Aerosole - Haftung Verwirbelung Aerosole	2 4
3	(Derby et al. 2016)	- Komfort - viele Quellen betreffen nicht die Altersgruppe "18-65" oder nur Studenten	1 11
4	(Wolkoff 2018)	- Büro allgemeine Symptome - Atemwege Tierstudien - Schlaf - Stimmbänder	9 8 2 2

Quelle	Studiendesign					Zielgröße			
	Sekundärstudie	Interventionsstudie	Längsschnittstudie	Querschnittstudie	Modellstudie	Haut	Augen	Schleimhäute (Atemwege)	Viren und Bakterien
(Sunwoo et al. 2006a)		x					x	x	
(Sunwoo et al. 2006b)		x				x	x	x	
(Takada and Matsushita 2013)					x	x			
(Tesón et al. 2015)				x			x		
(Um et al. 2014)			x				x		
(Vyumvuhore et al. 2013)		x				x			
(Wang et al. 2017)		x					x		
(WHO 2019)	x								x
(Wolkoff 2017)	x						x		
(Wolkoff 2018)	x					x	x	x	x
(Zhao et al. 2011)		x						x	
Summe	10	17	1	6	5	10	15	7	15

5 Auswertung

Bei der Auswertung relevanter Reviews aus den Jahren 2006 bis 2019 ((Pfluger et al. 2013a), (Derby et al. 2016), (Wolkoff 2018)) zeigt sich ein insgesamt heterogenes Bild in Bezug auf die betrachteten Bereiche (Zeiträume, Zielgruppen, Auswertefokus, Studienart – oft mit Selbstauskunft), so dass die jeweils gezogenen Schlussfolgerungen nicht verallgemeinert und auf die hier relevante Zielgruppe (erwachsene Beschäftigte in der Arbeitswelt) bezogen werden können, wobei (Pfluger et al. 2013a) mit überwiegend klinischen Studien am zielführendsten erscheint. Aus diesen Quellen wurden jeweils die Studien näher ausgewertet, die den Rahmenbedingungen in Abschnitt 2 entsprachen (Nr. 1, 2 und 3 in Tabelle 4.2). Zudem wurden mit Datenbankrecherchen (Ebsco, PubMed) weitere Studien erfasst und mit in die Auswertung aufgenommen (Nr. 4 „Sonstige“ in Tabelle 4.2).

5.1 Haut

Es wurden 10 Studien mit Bezug auf die Prüfung des Einflusses der Luftfeuchte auf die Haut erfasst. Fünf davon sind Interventionsstudien - drei mit Menschen in Klimakammern und eine mit Hautproben (In vitro) - sowie zwei Studien auf Basis empirischer Modellstudien. Zudem wurden die Ergebnisse von vier aktuellen Literaturstudien einbezogen. Maßstab für die Einschätzung des Einflusses von trockener Raumluft ist der Wassergehalt der Haut. Die Wasserspeicherung der Haut (Gehalt ca. 10 bis 40 %) erfolgt in den äußersten Zellschichten (Stratum corneum, Hornschicht). Die Diffusion von Wasser in die Umgebungsluft wird als transepidermaler Wasserverlust (TEWL) bzw. auch Abdunstung oder Verdunstungsrate bezeichnet. Der Zustand im Stratum corneum kann mit der Höhe des TEWL-Wertes charakterisiert werden. Der Wassergehalt der Haut (Hautfeuchte) kann nur indirekt als relative Größe gemessen werden (kapazitiv, Corneometer-Einheiten). In den Studien werden oft diese Größen verwendet. Dabei deuten steigende Werte des transepidermalen Wasserverlusts und sinkende Corneometer-Einheiten auf eine Austrocknung der Haut hin.

5.1.1 Literaturstudien

Bezüglich der Wirkung von trockener Luft auf die Haut scheinen im betrachteten Zeitraum nur relativ wenige aussagefähige Studien ausgeführt worden zu sein. So wurden in der 2016 veröffentlichten Literaturstudie von (Derby et al. 2016) (Derby et al. 2017) lediglich zwei Laborstudien (2006) mit messtechnischer Erfassung der Hautreaktion bei unterschiedlichen Feuchten erfasst. Leichte Hautbeschwerden (Juckreiz, Rauigkeit, trockene, spröde und rissige Haut) wurden bei gesunden Probanden bei $RH < 30\%$ beobachtet. Zudem lässt sich aus den Laborversuchen auf Grund der kurzen Expositionszeiten (ca. 2-3 Stunden) nicht ableiten, wie sich der Körper mit der Zeit an eine niedrige Luftfeuchte anpasst. Eine Feldstudie in einer Batteriefabrik in Japan deutet darauf hin, dass sich die Haut im Laufe der Zeit an trockenere Bedingungen anpassen kann. Dabei wurden über den Zeitraum der Beschäftigung bis zu 10 Monate und länger Beschäftigte ($n = 49$) bei extrem niedriger Luftfeuchte ($RH = 1,5\%$ bei $t_a = 23,6\text{ °C}$) im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ($n = 12$, $RH = 60\%$ bei $t_a = 25\text{ °C}$) bzgl. Änderung des transepidermalen Wasserverlusts und der Hautfeuchte untersucht. Nur in den ersten zwei Wochen gab es signifikante Unterschiede bei der Hautfeuchte. Da-

gegen war der transepidermale Wasserverlust über die gesamte Zeit bei niedrigen relativen Luftfeuchten signifikant geringer, wobei bei 0,5 bis 1 Jahr ein Minimum beobachtet wurde, dann wieder anstieg und konstant blieb. Aus diesen Beobachtungen wurde geschlussfolgert, dass sich die Haut mit längerer Exposition gegen die Austrocknung anpassen und langsam erholen kann. Das weicht von den Ergebnissen bei kurzzeitiger Exposition von wenigen Stunden im Labor und theoretischen Modellrechnungen ab, in denen bei abnehmender Luftfeuchte der transepidermale Wasserverlust zunächst anstieg (Sunwoo et al. 2006b; Takada and Matsushita 2013). Weitere Effekte erfasste (Pfluger et al. 2013a) in seiner Literaturstudie. So müssen zur Beurteilung der Auswirkungen niedriger Luftfeuchten auf die Physiologie der Haut auch genetische Faktoren und chronische Hautstörungen (z. B. atopische Dermatitis und Psoriasis) beachtet werden, welche die individuelle Disposition und Reaktion auf trockene Luft bestimmen. Unabhängig vom Alter scheint die Haut ab Luftfeuchten unter 30 % spürbar trockener zu werden. Die mit abnehmender Luftfeuchte ansteigende Partialdruckdifferenz wird durch die Erhöhung des Diffusionswiderstandes der Haut teilweise kompensiert. Daraus erklärt sich der Effekt, dass im Bereich von etwa $RH = 30\%$ der transepidermale Wasserverlust ein Maximum erreicht. Insofern wird allgemein eine relative Luftfeuchte über 30 % empfohlen. Trotz aller Erkenntnisse empfehlen beide Literaturstudien weitere Forschung, um valide Erkenntnisse ableiten zu können.

5.1.2 Interventionsstudien

(Sunwoo et al. 2006b) führte eine Laborstudie in einer Klimakammer in Japan im Zeitraum Februar bis März mit 16 männlichen gesunden Studenten (Nichtraucher) aus. Neben der Haut wurden auch Reaktionen von Nasenschleimhaut, Kreislauf und Augen erfasst (vgl. jeweiliger Abschnitt). Dabei erfolgte nach 50 Minuten Konditionierung bei $t_a = 25\text{ °C}$ und $RH = 50\%$ eine Exposition bei $t_a = 25\text{ °C}$ und $RH = 10\%$, 30% und 50% über jeweils 120 Minuten auf einem Stuhl sitzend. Es wurden Feuchte, transepidermaler Wasserverlust und Talgdrüsenaktivität (Lipide) der Haut gemessen. Ergänzend wurde subjektiv mit einer 7teiligen Skala (-3 bis +3) das thermische Empfinden, Trockenheitsgefühl und Behaglichkeit erfasst. In der Studie zeigte sich kein Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Talgdrüsenaktivität der Haut. Niedrige Werte der relativen Luftfeuchte beeinflussten aber das Stratum corneum der Haut, zudem wurde eine Abnahme der mittleren Hauttemperatur beobachtet. Die Messung des transepidermalen Wasserverlusts zeigte mit Exposition gegenüber trockener Luft einen Anstieg und stabilisierte sich nach ca. 30 Minuten. Die Studie empfiehlt zur Vermeidung von Austrocknung der Haut eine relative Luftfeuchte von mehr als 30 %

Auf Grund der geringen Anzahl und auf junge Männer beschränkten Probandengruppe sowie der im Vergleich zur realen Exposition wie z. B. in einem Büro geringen Versuchszeit von 120 Minuten kann daraus noch keine allgemeingültige Aussage abgeleitet werden.

(Cravello and Ferri 2008) führten in einer Klimakammer in Italien mit $n = 6$ Frauen (25-35 Jahre) Laborversuche aus. Die Expositionen erfolgten bei $t_a = 20, 25$ und 30 °C in allen Kombinationen mit relativen Luftfeuchten von 25 %, 45 %, 65 % und 85 % in Intervallen über jeweils 30 Minuten in sitzender Position. Dabei wurden transepidermaler Wasserverlust, Hautfeuchtigkeit und mittlere Hauttemperatur am rechten Unterarm (Oberseite, Stelle nicht näher bestimmt) auf einer 2×2 cm großen Hautfläche immer zur gleichen Tageszeit zur Vermeidung circadianer Effekte gemessen. Aus den

Versuchen wurden Regressionsgleichungen für Korrelationen zwischen der relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur und den gemessenen Hautparametern abgeleitet. Demnach nimmt der transepidermale Wasserverlust mit steigender Lufttemperatur zu. Mit steigender relativer Luftfeuchte nimmt dagegen der transepidermale Wasserverlust ab. Die Korrelation mit der Lufttemperatur war dabei deutlich stärker. Die Hautfeuchte stieg mit ansteigenden Werten der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur an.

Die geringe Anzahl und nur aus jungen Frauen bestehende Probandengruppe schränkt die Ableitung allgemeingültiger Aussagen ein. Auch lassen sich keine Aussagen zu anzustrebenden Raumklimabedingungen ableiten.

(Vyumvuhore et al. 2013) führten Laborversuche mit In-vitro-Proben menschlicher Haut von 5 Frauen (40 – 50 Jahre) in einer Klimakammer aus. Bei 20 °C und relativen Luftfeuchten von 4 %, 28 %, 44 %, 60 % und 75 % erfolgte eine Messung des Gehalts an ungebundenem und gebundenem Wasser im Stratum Corneum mit der Raman-Spektroskopie (Frequenzanalyse eines gestreuten Laserstrahls). Damit wird die Wirkung von verschiedenen Werten der relativen Luftfeuchte auf die Proteinstruktur analysiert. Demnach führen mittlere Werte der relativen Luftfeuchte (etwa 60 %) zu einer besser organisierten Lipidbarriere im Stratum Corneum. Vollständig gebundenes Wasser variierte in den Versuchen nicht mit der relativen Luftfeuchte, während teilweise gebundenes Wasser damit variierte. Der Gehalt an nicht gebundenem Wasser nahm dann stark zu, wenn alle Bereiche für gebundenes Wasser gesättigt waren. Die Lipidorganisation sowie die Proteinbereitstellung waren bei mittleren Werten der relativen Luftfeuchte (etwa 60 %) optimal, was dem Maximum der Wasserbindungskapazität im Stratum Corneum entspricht. Erst ab ca. RH = 40 % zeigten die Versuche diese Effekte.

Insofern zeigt die Studie, dass mittlere Werte der relativen Luftfeuchte eine besser organisierte Lipidbarriere bieten, was als gute Barriere vor Umwelteinflüssen interpretiert wird. Bei RH = 60 % zeigt sich ein Optimum, bei größeren (hier bei RH = 75 %) und niedrigeren Werten (hier bei RH = 45 %) sind die geprüften Marker geringer. Insofern wären sehr hohe relative Luftfeuchten im Bereich von 60 % nötig, um damit wirkungsvoll die Barrierefunktion der Haut zu verbessern. Allerdings steht der Nachweis auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Menschen noch aus.

Auf einen multifaktoriellen Zusammenhang für die bei trockener Luft beobachtete Hautaustrocknung deutet die Studie von (Kozak et al. 2014) hin. Es wurde in einer Klimakammer die Verdunstungsrate an Probekörpern mit künstlicher Haut bei unterschiedlichen Lufttemperaturen, relativen Luftfeuchten, Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgraden der Luft untersucht. Demnach hat die Luftführung einen signifikanten Einfluss. Lokal erhöhte Luftgeschwindigkeiten (Zugluft) und Turbulenzen, wie sie z. B. bei Mischlüftung vermehrt auftreten, führten zu einer zusätzlichen Verdunstung auf der Haut. Eine Schlussfolgerung aus Simulationsrechnungen ergab, dass Geschwindigkeit und Turbulenzgrad der Luft einen Einfluss auf die Verdunstungsrate haben, der etwa 30 % des Einflusses von Lufttemperatur und Luftfeuchte entspricht. Demnach ist ein flächenhafter Lufteintrag (Quelllüftung) oder Fußbodenheizung gegenüber Wandheizkörpern oder Mischlüftung von Vorteil, um eine turbulenzarme Raumluftströmung mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten zu erzeugen.

In einem zweiten Teil wurde diese Studie mit Probanden ($n = 66$, 31 - 61 Jahre, Frauen und Männer etwa gleichverteilt, Bekleidung ca. 0,8 clo frei wählbar) in einer Klimakammer (5 x 5 x 4 m) ergänzt (Felsmann et al 2020). Bei den in der kalten Jahreszeit ausgeführten Versuchen wurde der transepidermale Wasserverlust, die Hautfeuchtigkeit und die Hauttemperatur auf Handrücken, Stirn und Schläfe für verschiedene Variationen der Klimaparameter ($t_a = 20$ und 24 °C, RH = 20 und 40 %, zwei Lüftungsarten: Mischlüftung 0,12 m/s und Quelllüftung 0,04 m/s) erfasst. Zudem wurde das Klimaempfinden und das körperliche Empfinden (in Bezug auf den Hautzustand) abgefragt. Im Ergebnis zeigte sich, dass das Klimaempfinden und das Empfinden von Zugluft im Luftfeuchtebereich von RH = 20 % und 40 % nahezu identisch ist. Das Empfinden von Reizung von Nase und Augen sowie trockene Nase, Hals und Haut zeigte beim Vergleich der Lüftungsarten mit erhöhten (Mischlüftung) und geringen (Quelllüftung) Luftgeschwindigkeiten größere Unterschiede als bei der Änderung der relativen Luftfeuchte von 20 % auf 40 %. Die Kombinationswirkung von Lufttemperatur und Luftgeschwindigkeit zeigte im Mittel für das Klimaempfinden und körperliche Empfindungen einen deutlicheren Einfluss als eine reine Variation der relativen Luftfeuchte von 20 % auf 40 %. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass der transepidermale Wasserverlust bei Quelllüftung signifikant niedriger als bei Mischlüftung, am Handrücken signifikant niedriger als an der Stirn/Schläfe, sowie bei 20 °C signifikant niedriger als bei 24 °C ist. Bei einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 20 auf 40 % konnte in Auswertung der Messungen kein signifikanter Einfluss auf den transepidermalen Wasserverlust festgestellt werden, was sich auch aus der Studie von (Pfluger et al. 2013a) schlussfolgern lässt. Hier wurde im Bereich von etwa RH = 30 % für den transepidermalen Wasserverlust ein Maximum festgestellt, d. h. bei höheren Luftfeuchten stellen sich zunächst ähnliche Werte für den transepidermalen Wasserverlust ein wie bei niedrigeren Luftfeuchten – das müsste bei einer aktiven Luftbefeuchtung beachtet werden, wenn damit eine Reduzierung des transepidermalen Wasserverlusts zum Schutz der Haut vor Austrocknung bewirkt werden soll. In Bezug auf die Hauttemperatur konnte festgestellt werden, dass sich am Handrücken bei Mischlüftung niedrigere Werte als bei Quelllüftung einstellen, an der Stirn waren die Ergebnisse indifferent. Erwartungsgemäß waren bei $t_a = 20$ °C die Hauttemperaturen bei fast allen Varianten signifikant niedriger als bei 24 °C, außer an der Stirn bei Quelllüftung wo sie nahezu gleich waren. Bei gleicher Lufttemperatur und gleicher Lüftungsart konnte kein signifikanter Unterschied der Hauttemperaturen bei RH = 20 und 40 % festgestellt werden.

Aus dieser Laborstudie kann abgeleitet werden, dass sich in Bezug auf den transepidermalen Wasserverlust sowie das subjektive Empfinden und Bewerten des Raumklimas der Einfluss der Luftgeschwindigkeit ausgeprägter darstellt als die Variation der relativen Luftfeuchte. Dabei hat die Lüftungsart einen signifikanten Einfluss auf das Klimaempfinden und die Abdunstung der Haut hat. Die Quelllüftung mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten wird von Probanden besser bewertet und verursacht in der Tendenz einen geringeren transepidermalen Wasserverlust. Insofern kann hierbei die Intervention mit geringerer Strömungsgeschwindigkeiten wirkungsvoller als eine Erhöhung der Luftfeuchte sein.

5.1.3 Empirische Modellstudien

Mit einem numerischen, thermischen Modell des menschlichen Körpers (Stolwijk-Modell) führten (Takada and Matsushita 2013) Berechnungen zur Vorhersage der Feuchtigkeitsverdunstung der Hautoberfläche, Augen und Atemwege aus. Die Studie zeigt

die grundsätzliche Möglichkeit, die Verdunstungsrate der menschlichen Haut, Augen und Atemwegen herabzusetzen, indem nicht nur die relative Luftfeuchte erhöht, sondern zudem die Lufttemperatur des Raums verringert wird. Dieser Effekt wirkt nur bis ca. 23 - 24 °C, d. h. z. B. mit einer Verringerung der Lufttemperatur von 23 °C auf 20 °C sinkt bei konstanter absoluter Luftfeuchte (AH) auch die Verdunstungsrate. Bei darüber liegenden Lufttemperaturen verringert sich zwar auch wieder die Verdunstungsrate, es würde aber ein unbehaglich warmes Klima herrschen. Insofern sollten in der Heizperiode in Aufenthaltsräumen möglichst deutlich unter ca. 23 - 24 °C liegende Lufttemperaturen eingestellt werden.

Mit der Annahme, dass mit einer Verringerung der Verdunstungsrate auch eine geringere Beanspruchung der Haut verbunden ist zeigt die Studie, dass die Lufttemperatur möglichst niedrig eingestellt werden sollte.

5.2 Augen

In Bezug auf den Einfluss trockener Luft auf die Gesundheit der Augen wurden insgesamt 15 Studien erfasst. Dabei handelt es um vier Literatur-, sieben Interventions- und drei Querschnittsstudien sowie eine Längsschnittstudie. Viele Studien beziehen sich auf die Untersuchung der Keratokonjunktivitis sicca, einem häufig auftretenden Krankheitsbild in der Augenheilkunde, das auch als Syndrom des trockenen Auges bezeichnet wird bzw. unter den Begriff Sicca-Syndrom fällt, bei dem zusätzlich noch Mundtrockenheit auftritt. Zu den Symptomen zählen Augenbrennen, Fremdkörpergefühl sowie Sehstörungen. Als Ursachen werden neben erkrankungsbedingten Störungen der Tränenproduktion, Hormon- und Stoffwechselstörungen sowie Medikamenteneinnahme auch trockene Luft angeführt. Zur Beurteilung der Augengesundheit werden unterschiedliche Parameter herangezogen. Die Stabilität des Tränenfilms wird mit Hilfe der Tränenfilm-Aufreißzeit untersucht. Wenn die Zeit, die nach einem Lidschlag bis zum Zerreißen des Tränenfilms vergeht, kürzer als 10 Sekunden ist, so wird dies als pathologisch angesehen. Die Dicke und damit auch die Stabilität der Lipidschicht kann mit speziellen Interferometern ermittelt werden. Der so genannte Schirmer-Test dient zur Untersuchung der Tränenproduktion, die bei einem trockenen Auge vermindert ist. Mithilfe spezieller Augenbrillen kann die Tränenfilmverdunstung ermittelt werden. Nimmt die Verdunstung zu, erhöht sich gleichzeitig der Salzgehalt im Tränenfilm.

5.2.1 Literaturstudien

Nach (Pfluger et al. 2013a) nimmt die Diagnose "Syndrom des trockenen Auges" in der Augenheilkunde immer weiter zu. Sie führen dies auf eine trockene Umgebung zurück und berufen sich auf Studien von vor 2006, nach denen die Verdunstungsrate des Tränenfilms eindeutig von der Luftfeuchte abhinge. Gleichzeitig schränken (Pfluger et al. 2013a) ein, dass es korrelierende Effekte durch Zugluft am Arbeitsplatz sowie durch die durch Bildschirmarbeit erniedrigte Lidschlagfrequenz gibt.

Nach (Derby et al. 2016) liegen neuere aussagekräftige Studien zum Einfluss niedriger Luftfeuchte auf die Augengesundheit nur bedingt vor. So untersuchten viele Studien Probanden, die unter dem Syndrom des trockenen Auges leiden, d. h. bei denen die Bildung von Tränenflüssigkeit krankheitsbedingt gestört ist. In anderen Studien wurden spezielle Augenbrillen zur Untersuchung des Einflusses der Luftfeuchte auf die Augen eingesetzt. Bei kontrollierten Tests in einer Klimakammer wurden nach

60 Minuten bei einer relativen Luftfeuchte von 5 % wesentlich höhere Tränenverdunstungsraten und Augenbeschwerden festgestellt als bei einer relativen Luftfeuchte von 40 %. Dabei waren die Ergebnisse von gesunden Probanden vergleichbar mit denen von Probanden, die am Syndrom des trockenen Auges leiden. Zusammen mit älteren betrachteten Studien kommen (Derby et al. 2016) zu dem Schluss, dass in einem Bereich unterhalb 20 bis 30 % relativer Luftfeuchte die Tränenfilmverdunstung ebenso wie die Lidschlagfrequenz bei gesunden Augen zunimmt.

Im Rahmen der hier betrachteten Studien konnten keine Informationen über Langzeiteffekte niedriger Luftfeuchte auf das Sehvermögen, den Augenkomfort oder die Augengesundheit erhalten werden. Bei den Studien unter Einsatz spezieller Augenbrillen ist unklar, inwiefern die während der Untersuchung gewählten Randbedingungen (Untersuchungsprozedere der Augen, Konditionierung der Brille durch einen Luftstrom) nicht selber Reaktionen an den Augen hervorrufen. Lediglich eine zitierte Studie entspricht den von uns anfangs aufgestellten Randbedingungen.

Auch (Wolkoff 2018) kommt im Rahmen der neuesten vorliegenden Literaturstudie zu dem Schluss, dass der Tränenfilm des menschlichen Auges anfällig für niedrige Luftfeuchte ist. Dabei zitiert er u. a. mehrere Tierstudien. Eine neuere Interventionsstudie am Menschen konnte zeigen, dass sich die Tränenfilmstabilität durch eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 45 % auf 50 % verbessern ließ. (Wolkoff 2018) merkt abschließend an, dass weitere Studien erforderlich sind, um das Zusammenspiel zwischen niedriger Luftfeuchte, Tränenfilmstabilität und der Exposition gegenüber aggressiven Luftschadstoffen in Innenräumen zu untersuchen.

Die Tierversuchsstudien erscheinen uns in ihrer Aussagefähigkeit eingeschränkt, da bei den Untersuchungen neben einer geringen Luftfeuchte auch eine relativ hohe Luftgeschwindigkeit von bis zu 2 m/s in den Untersuchungskammern herrschte.

Bereits ein Jahr zuvor erschien die Literaturstudie (Wolkoff 2017), in der die Literatur der Jahre 2012 bis Juni 2016 bezüglich Beschwerden über trockene Augen im Zusammenhang mit büroähnlichen Umgebungen durchsucht wurde. Im Rahmen dieser Studie wurden als die beiden vorherrschenden Risiken für die Entwicklung trockener Augen die Bildschirmarbeit sowie niedrige relative Luftfeuchte auf Basis von epidemiologischen Studien eruiert. Als weitere Risikofaktoren für trockene Augen in der Büroumgebung werden z. B. Alter, Kontaktlinsen, Kosmetika, Ernährung, Zugluft, Geschlecht, hohe Lufttemperatur, Medikamente und persönliche psychologische Faktoren genannt. Bemerkenswert ist die Beobachtung, dass sich die Eigenschaften des Tränenfilms in Abhängigkeit von der Klimaregion verändern. Widersprüchliche Aussagen gibt es zum Einsatz von Luftbefeuchtern. So zeigen einige Studien den positiven Effekt von Luftbefeuchtern auf die Augengesundheit, während andere Studien beim Einsatz von Luftbefeuchtern eine Zunahme von Augenbeschwerden verzeichnen. (Wolkoff 2017) schiebt diesen Effekt auf eine möglicherweise unzureichende Wartung oder übermäßige Verwendung von Desinfektionsmitteln im Wasser.

5.2.2 Interventionsstudien

(Abusharha and Pearce 2013) führten in einer Klimakammer in Schottland mit 10 Männern und 2 Frauen (27 - 33 Jahre) Laborversuche durch. Die Probanden litten nicht unter dem Syndrom des trockenen Auges. Die Expositionen erfolgten bei $t_a = 21 \text{ °C}$

mit Werten der relativen Luftfeuchte von 5 % und 40 % über jeweils eine Stunde. Zur Beurteilung des Einflusses der trockenen Umgebung auf die Augen wurden die Tränenverdunstungsrate, der Salzgehalt des Tränenfilms, die Dicke der Lipidschicht, die Tränenproduktion (Schirmer-Test), die Tränenfilmstabilität sowie die Augenoberflächentemperatur unter beiden Klimabedingungen gemessen und miteinander verglichen. Während sich die Tränenverdunstungsrate, die Dicke der Lipidschicht, die Tränenproduktion sowie die Tränenfilmstabilität signifikant unter trockenen Umgebungsbedingungen veränderten, konnte bezüglich des Salzgehalts des Tränenfilms kein Effekt festgestellt werden.

Auf Grund der geringen Anzahl an Probanden sowie der im Vergleich zur realen Exposition wie z. B. in einem Büro sehr geringen Luftfeuchte und Expositionszeit kann daraus noch keine verallgemeinerungsfähige Aussage bezüglich einer unteren Grenze für die Luftfeuchte abgeleitet werden.

(González-García et al. 2007) untersuchten den Einfluss einer zweistündigen Exposition bei 19 % relativer Luftfeuchte und 22 °C Lufttemperatur in einer Klimakammer auf die Augen von 10 gesunden Kontaktlinsträgerinnen und -trägern (3 Frauen, 7 Männer; 22 - 34 Jahre alt) gegenüber Normalbedingungen von 35 % relativer Luftfeuchte bei 24 °C in Spanien. Zwischen den beiden Versuchen lagen 4 Wochen. Während der Versuche lasen die Probanden. Es war keine Zugluft vorhanden. Jeder Versuch wurde einmal mit und einmal ohne Kontaktlinsen durchlaufen. U. a. wurden Veränderungen in der Tränenfilmstabilität und Tränenproduktion bewertet. In der trockenen Umgebung zeigten sich Veränderungen der untersuchten Parameter stärker, wenn keine Kontaktlinsen getragen wurden. Die Autoren gehen davon aus, dass die Unterschiede in den gemessenen Variablen mit längerer Einwirkungszeit und/oder niedrigerer Luftfeuchte zunehmen. Dazu sind weitere Studien notwendig.

(Lan et al. 2011) untersuchten u. a. die Tränenfilmqualität von 12 Probanden (je 6 Männer und Frauen) bei 22 % relativer Luftfeuchte bei 22 °C und bei 30 °C im Vergleich. Die Probanden waren den Klimata jeweils für je 4,5 Stunden ausgesetzt. Die Versuche wurden in einem klimatisierten Büro in Dänemark durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Tränenfilmqualität bei einer Temperatur von 30 °C signifikant schlechter war als bei einer Temperatur von 22 °C. Die Autoren erklären sich dies damit, dass bei der höheren Lufttemperatur auch die Augenoberflächentemperatur erhöht ist und dadurch die Tränenverdunstung an der Augenoberfläche zunimmt.

(Madden, Tomlinson and Simmons 2013) führten in Klimakammern Untersuchungen der Tränenverdunstungsrate in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte (RH = 5, 40 und 70 %; $t_a = 22$ C) durch. Dabei verglichen sie die Reaktion von 10 gesunden Probanden mit derjenigen von 10 vom Syndrom des trockenen Auges Betroffenen, wobei es sich pro Gruppe um 5 männliche und 5 weibliche Probanden handelte. Die Untersuchungen fanden in Glasgow statt. Sowohl bei 5 % als auch bei 40 % relativer Luftfeuchte stieg die Tränenverdunstungsrate auf ein Maximum nach 5 Minuten, fiel dann wieder ab und erreichte nach etwa 10 Minuten einen Endwert, der sowohl für gesunde als auch erkrankte Probanden oberhalb der Basislinie lag. Probanden mit Anzeichen und Symptomen eines leichten bis mittelschweren Syndroms des trockenen Auges wiesen dabei grundsätzlich höhere Verdunstungsraten als normale Probanden auf. Bei einer relativen Feuchte von 70 % reduzierte sich bei beiden Probandengruppen die Tränenverdunstungsrate auf annähernd 0. Eine Behandlung mit Augentropfen auf

Emulsionsbasis konnte die Verdunstungsrate, insbesondere bei Patienten mit dem Syndrom des trockenen Auges, effektiv senken.

Insgesamt deuten die Daten darauf hin, dass die Gabe von geeigneten Augentropfen eine gleichwertige positive Wirkung wie eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte um 30 % haben kann, basierend auf der Veränderung der Verdunstungsrate, die nach der Therapie beobachtet wurde.

(Sunwoo et al. 2006b) führten eine Laborstudie in einer Klimakammer in Japan im Zeitraum Februar bis März mit 16 männlichen gesunden Studenten (Nichtraucher) durch. Dabei erfolgte nach 50 Minuten Konditionierung bei $t_a = 25\text{ °C}$ und $RH = 50\%$ eine Exposition bei $t_a = 25\text{ °C}$ und Werten der relativen Luftfeuchte von 10 %, 30 % und 50 % über jeweils 120 Minuten auf einem Stuhl sitzend. Während der Konditionierungsphase wurde ebenso wie nach 90 Minuten Exposition die Lidschlagfrequenz der Augen erfasst. Bei einer relativen Luftfeuchte von 30 % respektive 10 % war die Lidschlagfrequenz der Augen signifikant höher als diejenige, die während der zugehörigen Konditionierungsphase gemessen wurde. Die Studie empfiehlt zur Vermeidung von Austrocknung der Augen und Haut eine relative Feuchte von mehr als 30 %.

Auf Grund der geringen Anzahl und auf junge Männer beschränkten Probandengruppe sowie der im Vergleich zur realen Exposition wie z. B. in einem Büro geringen Versuchszeit von 120 Minuten kann daraus noch keine verallgemeinerungsfähige Aussage abgeleitet werden.

In einer weiteren Studie verglichen (Sunwoo et al. 2006a) die physiologischen und subjektiven Reaktionen auf die niedrige relative Luftfeuchte älterer und junger Männer. Dazu wurden acht nicht rauchende gesunde männliche Studenten ($21,7 \pm 0,8$ Jahre) und acht nicht rauchende gesunde ältere Männer ($71,1 \pm 4,1$ Jahre) ausgewählt. Die Versuchszeit wurde auf 180 Minuten ausgeweitet. Auch hier nahm die Lidschlagfrequenz bei allen Probanden in Umgebungen mit einer relativen Luftfeuchte von 10 % und 30 % signifikant zu. Ein Unterschied aufgrund des Alters konnte nicht festgestellt werden.

(Wang et al. 2017) untersuchten in Neuseeland den Einfluss eines Desktop-Luftbefeuchters auf die Tränenfilmstabilität von 44 Computernutzern (24 Frauen, 20 Männer; im Durchschnitt 21 Jahre alt). Die durch den Luftbefeuchter erreichte Differenz der Luftfeuchte betrug 5 % ($RH = 45\%$ ohne vs. $RH = 50\%$ mit Luftbefeuchter) bei einer Lufttemperatur von 22 °C . Nach einstündiger Computernutzung zeigte sich eine Abnahme der Tränenfilm-Aufreißzeit bei einer unbefeuchteten Umgebung, während sich der gleiche Parameter unter Benutzung des Befeuchters signifikant verbesserte.

5.2.3 Feldstudien

(Borchman et al. 2012) untersuchten die Zusammensetzung der Lipidschicht des Tränenfilms (Meibom-Lipid) von 43 gesunden Probanden im Alter von 1 bis 88 Jahren mit Hilfe eines NMR-Spektrometers. Das Meibom-Lipid bei Säuglingen enthielt weniger CH_3 - und $\text{C}=\text{C}$ -Gruppen, wies aber einen höheren Proteingehalt auf. Die Lipid-Lipid-Wechselwirkungen sind somit stabiler, weshalb der Tränenfilm stabiler gegenüber Verdunstung ist.

(Galor et al. 2011) untersuchten die Prävalenz des Syndroms des trockenen Auges in einer Population von 16.862 Veteranen in den Vereinigten Staaten. Bei 12 % der männlichen sowie bei 22 % der weiblichen Probanden konnte die Diagnose "Syndrom des trockenen Auges" gestellt werden. Als Risikofaktoren konnten posttraumatische Belastungsstörungen, Schilddrüsenerkrankungen und Schlafapnoe ausgemacht werden. Auch die Verwendung systemischer Medikamente, einschließlich Antidepressiva und Medikamente gegen gutartige Prostatahyperplasie können demnach das Risiko für die Entstehung des Syndroms des trockenen Auges erhöhen.

(Um et al. 2014) untersuchten 16.431 Südkoreaner über 30 Jahre auf die Prävalenz des Syndroms des trockenen Auges und setzten die Ergebnisse in Korrelation zum Lebensumfeld der Personen. Bereinigt um Geschlecht, Alter und Erhebungsjahr hatten Menschen, die in städtischen Gebieten lebten, ein höheres Risiko, an einem Syndrom des trockenen Auges zu leiden. Niedrigere Luftfeuchte und längere Sonnenscheindauer waren signifikant mit dem Syndrom des trockenen Auges verbunden. Unter den Luftschadstoffen stellte sich Schwefeldioxid im Gegensatz zu Stickstoffdioxid, Ozon, Kohlenmonoxid und PM10 (Feinstaubfraktion) als Risikofaktor heraus.

(Tesón et al. 2015) untersuchten zwei vergleichbare Beobachtungsgruppen mit je 14 Teilnehmern; eine Gruppe aus Valladolid (Kontinentalklima, Spanien) und eine Gruppe aus Braga (Atlantikklima, Portugal). Das Durchschnittsalter lag bei ca. 60 Jahren. Unter anderem wurden die Tränenfilm-Aufreißzeit sowie die Tränenproduktion anhand des Schirmer-Tests bei drei verschiedenen aufeinanderfolgenden Besuchen jeweils in der gleichen Saison (Frühjahr) von zwei aufeinanderfolgenden Jahren bewertet. Diese Pilotstudie liefert erste Belege dafür, dass die Ergebnisse von Augenuntersuchungen bezüglich des Syndroms des trockenen Auges vom Klima abhängig sind. Darüber hinaus liegt eine mangelnde Konsistenz bei diagnostischen klinischen Tests für das Syndrom des trockenen Auges vor.

5.3 Schleimhäute der Atemwege

Untersuchungen zum Einfluss trockener Luft auf die Schleimhäute der Atemwege wurden in 7 Studien gefunden. Dabei handelt es um drei Literatur- und vier Querschnittsstudien. Im Zusammenhang mit trockener Luft wird insbesondere eine Beeinträchtigung der mukoziliären Clearance betrachtet. Die mukoziliäre Clearance der Atemwege spielt eine wichtige Rolle bei der Entfernung von eingeatmeten Fremdkörpern. Die eingeatmeten Teilchen werden dabei durch die Absonderung von Schleim gebunden und anschließend über die Bewegung von Flimmerhärchen (Zilien) aus den Atemwegen entfernt. Wenn dieser Mechanismus gestört ist, steigt die Wahrscheinlichkeit von Atemwegsinfektionen. Zur Beurteilung der Funktion der mukoziliären Clearance wird ein Saccharin-Clearance-Test durchgeführt. Dazu wird den Probanden Saccharin in den Nasengang verabreicht und die Zeit gemessen, die vergeht bis ein süßlicher Geschmack im Rachenraum feststellbar ist. Eine Zunahme der Clearancezeit deutet auf eine Abnahme der Aktivität der mukoziliären Funktion hin.

In den Datenbanken tauchen sehr viele Studien zum Einfluss der Luftfeuchte auf die Schleimhäute auf, die die Behandlung des Schlafapnoesyndroms mithilfe einer nächtlichen nasalen Überdrucktherapie (continuous positive airway pressure - CPAP) betrachten. Da hierbei die Austrocknung der Nasenschleimhäute auf den

künstlich erzeugten Luftstrom zurückzuführen ist, wurden diese Studien nicht mit in die Literaturstudie einbezogen.

5.3.1. Literaturstudien

Nach (Pfluger et al. 2013a) ist der Mensch bei reiner Nasenatmung in der Lage, ein breites Spektrum von Luftbedingungen von der Umgebungsluft bis zum alveolären Zustand ($t_a = 37\text{ °C}$, $RH = 100\%$) zu erwärmen und zu befeuchten. Jüngste Erkenntnisse aus klinischen Studien deuten jedoch auf einen Zusammenhang mit dem Alter hin. Dementsprechend wurde festgestellt, dass die Verringerung der Geschwindigkeit der mukoziliären Clearance bei niedriger Luftfeuchte für die Gruppe der älteren Personen signifikant ist. Weitere Untersuchungen sind erforderlich. Trockenheit im Mund- und Rachenraum kann darüber hinaus durch Mundatmung bei niedriger relativer Luftfeuchte verursacht werden, da Wärme und Wasser aus der Atemluft durch den Mund weniger effektiv zurückgewonnen werden als durch die Nase.

(Hildenbrand et al. 2011) nennen als mögliche Ursachen für eine trockene Nase eine Vielzahl von Krankheiten, äußere und innere Faktoren und Umweltbedingungen. Im Alter führen anatomische Veränderungen und eine Rückbildung der Schleimhaut zu einer Zunahme von Beschwerden wie Beeinträchtigung der Nasenatmung und trockener Nase. Neben der strikten Vermeidung lokaler Manipulationen sollte die Nase befeuchtet, zäher Schleim gespült und verflüssigt werden; zu diesem Zweck bietet der Markt eine breite Palette von Salben, Ölen, Sprays und Nasenspülungen an. Entzündungsinduzierende und -fördernde Substanzen sollten vermieden werden.

Nach der neuesten Literaturstudie von (Wolkoff 2018) zeigt der Saccharin-Clearance-Test u. a. eine Abhängigkeit der Zilienfunktion vom Alter. So ist bei älteren Probanden die Saccharin-Clearance-Zeit länger als bei jungen Probanden, was auf eine zunehmende Einschränkung der Funktionalität mit dem Alter hindeutet. Bei unter 30 % relativer Luftfeuchte zeigten auch junge Probanden eine verlängerte Clearance-Zeit. Neuere Studien mit Mäusen deuten darauf hin, dass asthmatische Mäuse unabhängig von der relativen Luftfeuchte weniger sensibel auf eine Belastung mit Formaldehyd reagieren, als normale Mäuse. Dies kann auf eine übermäßige Schleimproduktion bei den asthmatischen Tieren zurückzuführen sein. (Wolkoff 2018) merkt abschließend an, dass weitere Studien erforderlich sind, um das Zusammenspiel zwischen niedriger Luftfeuchte, Saccharin-Clearance-Zeit und der Exposition gegenüber Luftschadstoffen in Innenräumen zu untersuchen.

5.3.2 Interventionsstudien

(Lindemann et al. 2008) führten Messungen der intranasalen Lufttemperatur und Luftfeuchte bei 40 über 60-jährigen Probanden im Vergleich zu 40 20- bis 40-jährigen Probanden durch. Dabei war der Anteil von Männern und Frauen ausgeglichen. Die Umgebungsbedingungen betragen 23 °C bei 29 % relativer Luftfeuchte. Es zeigte sich, dass bei den bei älteren Probanden deutlich niedrigere intranasale Lufttemperatur- und Luftfeuchtwerte auftraten. (Lindemann et al. 2008) führten dies auf eine Vergrößerung der Nasenhöhle mit zunehmendem Alter zurück. Altersbedingte Veränderungen der inneren und äußeren Nase scheinen einen wesentlichen Einfluss auf das intranasale Klima zu haben.

(Sunwoo et al. 2006b) führten eine Laborstudie in einer Klimakammer in Japan im Zeitraum Februar bis März mit 16 männlichen gesunden Studenten (Nichtraucher) durch. Dabei erfolgte nach 50 Minuten Konditionierung bei $t_a = 25\text{ °C}$ und $RH = 50\%$ eine Exposition bei $t_a = 25\text{ °C}$ und relativen Luftfeuchten von 10% , 30% und 50% über jeweils 120 Minuten auf einem Stuhl sitzend. Während der Konditionierungsphase wurde ebenso wie nach 90 Minuten Exposition ein Saccharin-Clearance-Test durchgeführt. In dieser Studie stieg die Clearancezeit unter der Umgebung von $RH = 10\%$ signifikant an, was darauf hindeutet, dass $RH = 10\%$ eine Abnahme der Ziliaraktivität der Nasenschleimhaut verursacht. Bei einer relativen Luftfeuchte von 30% war kein derartiger Effekt nachweisbar. Die Studie empfiehlt zur Vermeidung von Trockenheit der Nasenschleimhaut eine relative Luftfeuchte von mehr als 10% .

Auf Grund der geringen Anzahl und auf junge Männer beschränkten Probandengruppe sowie der im Vergleich zur realen Exposition wie z. B. in einem Büro geringen Versuchszeit von 120 Minuten kann daraus noch keine verallgemeinerungsfähige Aussage abgeleitet werden.

In einer weiteren Studie verglichen (Sunwoo et al. 2006a) die physiologischen und subjektiven Reaktionen auf die niedrige relative Luftfeuchte älterer und junger Männer. Dazu wurden acht nicht rauchende gesunde männliche Studenten ($21,7 \pm 0,8$ Jahre) und acht nicht rauchende gesunde ältere Männer ($71,1 \pm 4,1$ Jahre) ausgewählt. Die Versuchszeit wurde auf 180 Minuten ausgeweitet. In dieser Studie stieg die Clearancezeit der älteren Altersgruppe signifikant im Vergleich zu den jüngeren Probanden in der Umgebung von $RH = 10\%$ an, was darauf hindeutet, dass die Funktion der mukoziliären Aktivität mit dem Alter nachlässt. Da es für ältere Menschen schwierig ist, den Trockenheitsgrad selbst zu spüren, insbesondere für geschwächte ältere Menschen, sollte in beheizten Innenräumen in der Wintersaison nicht nur die Temperatur, sondern auch die Luftfeuchte messtechnisch überprüft werden. Besonders wichtig erscheint es, Temperatur und Luftfeuchte in Krankenhäusern oder Senioreneinrichtungen sorgfältig zu berücksichtigen.

(Zhao et al. 2011) ließen 44 Probanden Luft unterschiedlicher Temperatur und Feuchte einatmen (normale Bedingungen = 24 °C bei $RH = 49\%$; trockene Bedingungen bei 25 °C und $RH = 27\%$, kalte Bedingungen bei 12 °C und $RH = 59\%$) und die Auswirkungen auf den Luftwiderstand der nasalen Atemwege beschreiben. Es zeigte sich, dass sich der nasale Atemwegswiderstand mit abnehmender relativer Luftfeuchte erhöhte. Der größte Effekt wurde durch eine niedrige Lufttemperatur ($t_a = 12\text{ °C}$, $RH = 59\%$) erreicht, wobei die absolute Luftfeuchte derjenigen bei den trockenen Luftbedingungen ($t_a = 25\text{ °C}$, $RH = 27\%$) entsprach.

Die Aussagen der Studienergebnisse sind dahingehend eingeschränkt, da lediglich das subjektive Empfinden bewertet wurde und die Probanden den jeweiligen Bedingungen nur für drei Atemzüge ausgesetzt waren.

5.4 Übertragung krankheitserregender Keime

Aus den Literaturstudien der „Quellen 2006 -2019“ waren 11 Studien mit Bezug auf die Prüfung des Einflusses der Luftfeuchte auf die Übertragung von krankheitserregenden

Keimen enthalten. Drei davon waren Literaturstudien, eine Interventionsstudie mit Tieren und zwei mit Viren (In-vitro in Zellkulturen), zwei Feldstudien mit Soldaten im Außeneinsatz, eine Feldstudie in Schulen, sowie zwei Studien auf Basis empirischer Modellanalysen. Ziel der Laborstudien war es, Aussagen zu den Übertragungsmechanismen in der Luft, Aktivität und Infektiosität des Influenzavirus zu finden, eine Laborstudie betraf Noroviren. Die Übertragungsmechanismen der Viren in Bioaerosolen (luftgetragene Teilchen und Tröpfchen) in der Luft wurden mit verschiedenen physikalischen Methoden (z. B. bzgl. Schwebefähigkeit, Verdampfungsraten) untersucht und daraus Schlussfolgerungen zur potentiellen Gefahr einer möglichen Infektion mit einem Virus abgeleitet. Die Aktivität der Viren, Anteil Viren in den Bioaerosolen und Infektiosität wurde dabei mit verschiedenen mikrobiologischen Verfahren und In-Vitro-Methoden bestimmt. Das Auftreten einer Influenza (Grippe) mit dem direkten Nachweis, dass die Krankheit zum Ausbruch kommt, wurde nur in einer Labor-Tierstudie (Meerschweinchen) überprüft. In den Feldstudien wurde diesbezüglich die zeitliche Korrelation zwischen Umweltparametern (z. B. Luftfeuchte, Außenlufttemperatur) und dem Auftreten der Influenza analysiert. Lediglich eine Feldstudie zeigte diese Korrelation bei gleichzeitiger Intervention mit aktiver Befeuchtung der Raumluft. Auf Basis eines mathematischen Modelles prognostizierte eine Studie des Aerosolverhalten bis zur Inaktivierung eines Virus und das Modell einer Labor-Tierstudie nutzend wurden in einer anderen Studie mögliche Infektionsraten bei Intervention mit Luftbefeuchtung abgeschätzt.

Die meisten der erfassten Studien zielen auf der Basis von In-Vitro-Methoden, Tierversuchen oder Modellrechnungen auf den Nachweis ab, dass bei niedrigen Luftfeuchten die Übertragungsmechanismen der Bioaerosole in der Luft sowie die Aktivität und Infektiosität der darin enthaltenen Viren begünstigt werden, eine hohe Luftfeuchte diese Effekte dagegen hemmt. Insofern kann damit nur ein indirekter Nachweis bzgl. des Auftretens der Influenza erbracht werden. Für einen direkten Nachweis, aus dem sich auch die Notwendigkeit von Interventionsmaßnahmen mit einer Erhöhung der Luftfeuchte ableiten ließe, wären cluster-randomisierte kontrollierte Interventionsstudien unter realen Verhältnissen (Feldstudien) nötig.

5.4.1 Literaturstudien

(Shaman 2009) hat ca. 43 Quellen ab 1943 bis 2007 ausgewertet. Bei hoher absoluter Luftfeuchte (keine Angabe konkreter Werte) in warmer Umgebung (26 - 27 °C) verringern sich signifikant die Raten von Übertragung und von Aktivität von Influenzaviren. Dabei bezieht er sich insbesondere auf die Ergebnisse von (Lowen et al. 2007). Dieses potenzielle Ergebnis sowie alle Auswirkungen auf die Saisonalität müssten durch zusätzliche Labor- und Modellversuche noch untersucht werden, um eine valide Aussage ableiten zu können.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen (Lowen and Steel 2014). Sie haben ca. 20 Quellen ab 2002 bis 2013 und drei ältere Quellen (1960, 76 und 88) ausgewertet. Es werden mögliche Mechanismen abgeleitet, wie Temperatur und Luftfeuchte auf die Übertragung und Aktivität des Influenzavirus wirken. Diese Mechanismen sind aber in ihrer Komplexität noch unklar. Weitere Untersuchungen sind nötig, insbesondere Laborstudien unter definierten Bedingungen, um diese Mechanismen zu belegen. Lediglich Ergebnisse aus Labortests mit Meerschweinchen geben deutliche Hinweise, dass mit steigender Temperatur und höheren absoluten Luftfeuchten die Übertragung der

Influenzaviren zunehmend blockiert wird (Lowen et al. 2007). Konkrete Werte lassen sich aber nicht ableiten.

(Metz and Finn 2015) führten eine Literaturstudie in Auswertung von 23 Quellen ab 2001 bis 2015 durch, zudem wurden drei ältere Studien (1961-63) einbezogen. Allerdings wurden folgende Studien nicht miteinbezogen, die in der hier vorgenommenen Auswertung als relevant eingestuft wurden: (Noti et al 2013, Colas de la Noue et al. 2014, Jaakkola et al. 2014, Mäkinen et al. 2009, Minhaz Ud-Dean 2010, Myatt 2010). Laborexperimente zeigten z. B. eine Verringerung der Aktivität von Influenzaviren von 75 % auf 45 % bei einer Erhöhung der absoluten Luftfeuchte von ca. 1,6 g/kg (bei 22 °C, RH ~ 10 %) auf 6 g/kg (bei 22 °C, RH ~ 36 %). Viren sind demnach unter trockeneren Bedingungen (niedrige Werte der absoluten Luftfeuchte) länger aktiv. Das scheint ein wesentlicher ursächlicher Faktor für das winterliche Auftreten der Influenza (Grippe) in gemäßigten Klimazonen zu sein. Dies wird mit epidemiologischen Daten gestützt, da die Influenza-assoziierte Morbiditäts- und Mortalitätsspitzen ca. 2 - 3 Wochen nach dem Abfall der absoluten Luftfeuchte auftraten. Bis heute gibt es aber keine Studien, die den Einfluss der Luftfeuchte auf die Übertragungsrate von Influenzaviren beim Menschen direkt untersuchen. Dafür wären cluster-randomisierte kontrollierte Studien nötig, um zu beurteilen, ob z. B. die Befeuchtung in Schulen oder Altenheimen die Übertragungsrate von Influenzaviren verringert. Insofern lassen sich noch keine konkreten Empfehlungen von z. B. Mindestwerten für die absolute Luftfeuchte ableiten. Zudem sind bei Erhöhung der Luftfeuchte Sekundärprobleme zu beachten, wie ggf. Kondensat an den Wänden und dadurch verursachtes Wachstum von Schimmelpilzen.

In einer umfassenden Literaturstudie wurden verschiedene nichtpharmazeutische Maßnahmen im Bereich der öffentlichen Gesundheit zur Minderung des Risikos und der Auswirkungen von Influenza-Epidemien und -Pandemien bezüglich ihrer Evidenz und Anwendbarkeit für die Praxis untersucht (WHO 2019). Eine erhöhte Luftfeuchte wurde mit einer verminderten Influenzaübertragung in kalten und trockenen Klimazonen in Verbindung gebracht (Lowen and Steel 2014), (Reimann et al. 2018). Es wurde keine weitere Studie identifiziert, die die Wirksamkeit der Änderung der Luftfeuchte (als Intervention) bei der Reduzierung der Influenzaübertragung quantifizierte.

Insofern hat die WHO keine Hinweise darauf, dass eine Erhöhung der absoluten oder relativen Luftfeuchte in trockenen Klimazonen eine wirksame Maßnahme zur Minderung des Risikos und der Auswirkungen von Influenza-Epidemien darstellt. Dies wird hier auch aus Gründen der Kosten, Durchführbarkeit und Sicherheit nicht empfohlen.

5.4.2 Interventionsstudien

(Lowen et al. 2007) führten eine Laborstudie mit Meerschweinchen aus. Bei $t_a = 20$ °C und RH = 20, 35, 50, 65 und 80 % wurden 20 Wiederholungen mit je 8 Tieren vorgenommen. Je 4 Tiere wurden mit Influenzaviren infiziert, 4 Tiere wurden unter gleichen Bedingungen als Kontrollgruppe geführt. Die Analyse erfolgte mit Virustitrationen durch Plaque-Assay (eingefärbte Zellkultur verschiedener Verdünnungen). Bei 20 °C und relativen Luftfeuchten 20 - 35 % wurde eine hohe Übertragungsrate bzw. Infizierung beobachtet, ein Minimum trat bei RH = 50 % auf. Dann erfolgte wieder ein Anstieg bis 65 % und bei RH > 80 % wurden kaum noch eine Übertragung bzw. Infizierung

beobachtet. Hier zeigt sich ein ähnlicher Zusammenhang wie der zwischen der Stabilität des Influenzavirus in einem Aerosol und der relativen Luftfeuchte. Bei niedriger Luftfeuchte (RH ~ 20 - 35 %) werden durch Austrocknung der ausgeatmeten Aerosole relativ stabile Tröpfchenkeime (Virus-Partikel) erzeugt, in denen die Viren länger aktiv bleiben. Bei mittlerer relativer Feuchte (RH ~ 50 %) sind diese Virus-Partikel relativ instabil, d. h. die Aktivität der Viren wird weniger und somit ist ihre Übertragung und die mögliche Ansteckungsgefahr geringer. Bei höheren Luftfeuchten werden diese Virus-Partikel wieder stabiler (RH ~ 65 %). Bei noch höherer relativer Luftfeuchte (RH > 80 %) ist die Verdampfung aus den ausgeatmeten Aerosolen soweit begrenzt, dass sich die Aerosole aus der Luft absetzen und die Übertragung wieder blockiert wird. Daraus wurde ein Modell entwickelt, das in späteren Studien wiederholt zur Anwendung kam, z. B. in (Shaman 2009), (Minhaz Ud-Dean 2010), (Myatt 2010), (Koep 2013), (Lowen and Steel 2014), (Metz and Finn 2015). Die Studie wurde zwar gesichert für Meerschweinchen ausgeführt, der Nachweis, ob dies auf den Menschen übertragen werden kann, steht bislang noch aus.

(Noti et al. 2013) führten eine Laborstudie zur Übertragung von Influenzaviren aus. Sie installierten in einer Kammer (ca. 3 x 3 x 2,3 m³) ein Menschmodell, welches das Aus husten mit Verneblung von Influenzaviren bei Variation der Luftfeuchte (RH = 7 - 73 %) und konstanter Lufttemperatur ($t_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) simulierte. An 5 Stellen (2 quellenah, 3 im Raum) wurden zeitlich gestaffelt (alle 15 min bis 1 h mit 15 min Sammelzeit, nach 4 h eine Stunde Sammelzeit) Aerosolfraktionen (Bioaerosol-Probenehmer, kleiner 1 μm , 1 - 4 μm und größer 4 μm) gesammelt und dann auf Infektiosität getestet (Virus-Plaque-Assay -Zellkultur). Zudem wurde eine Literaturliteraturauswertung aus ca. 20 Studien ab 2000 und aus 4 alten Quellen ab 1950 ausgeführt. Die Gegenüberstellung der Messreihen bei RH = 20 % und 45 % zeigt deutlich die Abnahme der Infektiosität bei der höheren Feuchte. Ab RH = 40 - 45 % wird eine starke Reduzierung der Infektiosität nachgewiesen. So behielt die 60 Minuten gesammelte Probe bei einer relativen Luftfeuchte von RH \leq 23 % eine Infektiosität von 70,6 - 77,3 %, bei RH \geq 43 % war nur noch 14,6 - 22,2 % Infektiosität feststellbar. Die Analyse der einzelnen Aerosolfraktionen zeigte einen ähnlichen Verlust an Infektiosität unter den Fraktionen. Insofern hat die Größe der Aerosolpartikel einen geringen Einfluss, auch bei niedriger relativer Luftfeuchte führen somit größere Partikel nicht zu einer erhöhten Stabilität der Influenzaviren. Die Zeitintervallanalyse zeigte, dass der Verlust an Infektiosität innerhalb jeder Aerosolfraktion zum größten Teil in den ersten 15 Minuten nach dem Husten auftrat. Danach reduzierte sich die Infektiosität bis zu 5 Stunden nach dem Husten gleichmäßig, die Abnahmerate war unabhängig von der Aerosolfraktion, statistisch war dabei auch kein Unterschied zwischen 20 % und 45 % relativer Luftfeuchte.

Die Studie kann als fundiert und statistisch abgesichert eingeschätzt werden. Das Versuchsdesign ist praxisbezogen und es wurden aktuelle und relevante Quellen für die Gesamtaussage einbezogen. Die Studie gibt insgesamt eine fundierte Aussage, dass bei einer relativen Luftfeuchte von mehr als 40 % die Infektiosität von aerosolgetragenen Influenzaviren deutlich verringert wird.

(Colas et al. 2014) führten eine Laborstudie mit einem kultivierbaren Norovirus durch, da der auf Menschen übertragbare Norovirus nicht kultivierbar ist. In Kammern wurden Viren-Kulturen über Salzlösungen konstanten relativen Luftfeuchten von 10, 35, 55 und 85 % bei $t_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ verschiedenen Zeiten (1 bis 20 Stunden sowie über eine Woche) ausgesetzt und die Aktivität und Infektiosität mit verschiedenen mikrobiologischen

Methoden (Bindungsassays, Proteinanalyse) bestimmt. Bei z. B. RH = 10 % betrug die Aktivitätsrate 51 %, bei RH = 35 % nur noch 15 %. Zudem wurde die wesentliche Rolle der absoluten Luftfeuchte deutlich. Werte unter 7 g/kg haben eine stark konservierende Wirkung auf Viruspartikel, unabhängig von der Lufttemperatur. Bei absoluten Luftfeuchten von 7 bis 10 g/kg, $t_a = 10$ bis 25 °C und RH = 35 bis 85 % wird dagegen die Infektiosität und Aktivität von Noroviren deutlich beeinträchtigt. Insofern sind winterliche Bedingungen mit niedrigen absoluten Luftfeuchten unter 7 g/kg ideale Bedingungen für Norovirus-Infektionen, ob drinnen oder draußen. Die Autoren schlussfolgern zudem, dass die Luftfeuchte zum Abbau des Kapsids des Virus und damit zur Virusinaktivierung führt. Das Kapsid ist eine komplexe, regelmäßige Struktur aus Proteinen bei Viren, die der Verpackung des Virusgenoms und damit dessen Schutz vor der Umgebung dient. Zudem wurden die Ergebnisse der Studie durch Auswertung zahlreicher anderer alter (1943 - 1984) und vor allem neuerer Labor- und Feldstudien gestützt.

Die Studie gibt fundierte Hinweise auf eine erhöhte Infektiosität und Aktivität von Noroviren bei niedrigen absoluten Luftfeuchte unter 7 g/kg. Da die Studie unter Laborbedingungen mit einem kultivierbaren Norovirus (d. h. ein nicht im Menschen vorkommender Virustyp) ausgeführt wurde, kann noch keine evidente Schlussfolgerung zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Menschen abgeleitet werden.

5.4.3 Feldstudien

(Mäkinen et al. 2009) führte in Finnland eine Feldstudie mit Wehrpflichtigen im Außeneinsatz ($n = 892$, mittleres Alter 19,5 (17-29) Jahre) zur Untersuchung des Einflusses der Temperatur und der absoluten Luftfeuchte der Außenluft auf das Erscheinen von Infektionen der Atemwege durch. Dies wurde in Relation zu den Tages-Mittelwerten der Klimawerte bis zwei Wochen vor der Diagnose gesetzt. Schlussfolgerungen wurden dann aus einem Vergleich der Erhebungen im Juli 2004 und Januar 2005 gezogen. Infektionen der Atemwege traten demnach am häufigsten auf, wenn die Umgebungslufttemperatur bei oder unter 0 °C lag. Mit Abnahme der Temperatur erhöhte sich das Risiko insbesondere für Erkältungen und Pharyngitis (Entzündung der Rachenschleimhaut). Bei einer niedrigeren absoluten Luftfeuchte erhöhte sich das Risiko besonders für die oberen Atemwege und Pharyngitis. Die Korrelation zwischen Temperatur, Luftfeuchte und Erkrankung der unteren Atemwege war nicht linear. Die Außentemperatur und absolute Luftfeuchte sanken signifikant in den drei Tagen bis zwei Wochen vor Beginn einer Infektion der Atemwege.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass kalte Temperaturen und niedrige Luftfeuchten mit einem erhöhten Auftreten von Infektionen der Atemwege in Bezug auf das zeitliche Auftreten in Korrelation stehen. Allerdings wurden die Untersuchungen an einer speziellen Gruppe (junge gesunde Männer) und im Außeneinsatz vorgenommen, insofern ist die Übertragbarkeit auf Beschäftigte und den Innenraum nur bedingt möglich.

(Koep 2013) führte eine Feldstudie zur Möglichkeit der Luftfeuchterhöhung und Modellrechnungen zur Aktivität von Influenzaviren auf Basis der Ergebnisse von (Lowen et al. 2007) an zwei Schulen in den USA im Winter aus. Mit Erfassung von Klimawerten außen (meteorologische Daten) und innen (Messung) sowie einem Vergleich mit und

ohne aktiver Befeuchtung wurden die technischen Möglichkeiten zur Erhöhung der absoluten Luftfeuchte geprüft und als praktikabel eingeschätzt. Daraus wurde eine Abschätzung der Aktivität von Influenzaviren mit dem Modell nach (Lowen et al. 2007) vorgenommen. Wird z. B. in einem Raum die absolute Luftfeuchte um ca. 2,5 g/kg erhöht (z. B. bei 20 °C von RH = 10 % auf ca. 36 %) führt diese Modellrechnung zu einer Minderung der 1-stündigen Aktivität von Influenzaviren um 30 %.

Weitere Untersuchungen sind nötig, um z. B. zu klären, ob die Erhöhung der Luftfeuchte in Schulklassen ein praktikables und wirksames Mittel zur Minderung der Übertragung von Influenzaviren unter Schulkindern ist, da sich die Prognose auf ein Modell aus Tierversuchen stützt.

(Jaakkola et al. 2014) führte eine ähnliche Feldstudie wie (Mäkinen et al. 2009) aus. An einer Gruppe von Soldaten wurde die Korrelation von kaltem Außenklima in Bezug auf die Infektionsrate an einer Influenza beobachtet (n = 992 Soldaten, Alter ca. 19 Jahre, Finnland). Dazu wurden die Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur ($t_a + 5$ °C bis $- 6$ °C) und der absoluten Luftfeuchte ($AH < 3$ g/m³) von einer ca. 15 km entfernten meteorologische Station für jeweils 3 Tage vor einem Klinikbesuch erfasst und bzgl. Korrelation statistisch ausgewertet. Die Studie gibt einen deutlichen Hinweis zur Korrelation zwischen Rückgang Außenlufttemperatur ($t_a < 5$ °C) und der absoluten Luftfeuchte ($AH < 3$ g/m³) mit dem Auftreten von Influenza-Infektionen bei jungen, gesunden Männern während des Außeneinsatzes im Winter in einem subarktischen Klima.

Weitere Studien wären nötig, um diese Korrelation zu bestätigen und daraus empirische Schwellenwerte zwischen Temperatur, Luftfeuchte der Außenluft und Influenza-Infektionen abzuleiten, um letztlich hieraus Schlussfolgerungen für Schutzmaßnahmen für Beschäftigte ableiten zu können.

(Reimann et al. 2018) testeten mit einer Feldstudie 2015-16 während der Influenzasaison (Januar - März) in Gemeinschaftsschulen, Minnesota USA, die Wirkung nichtpharmazeutischer Interventionen (Non-Pharmaceutical Interventions, NPIs) durch Luftbefeuchtung zur Reduzierung von Influenzainfektionen. Es wurden Luftproben und Gegenstände mit dem PCR-Test ("Polymerase Chain Reaction") auf den Influenzavirus qualitativ und quantitativ getestet. In Zellkulturen wurden zudem mit dem PCR-Test die positiven Proben auf Infektiosität geprüft. Dies wurde im Vergleich aus Räumen mit künstlich erhöhter Luftfeuchte und Kontrollräumen ohne Befeuchtung ausgeführt. Dabei erfolgte eine Erhebung der absoluten Luftfeuchte in der Außenluft und in den Klassenräumen, sowie der dort aufgetretenen Influenza-ähnlichen Krankheitsfälle (influenza-like illnesses - ILI). Ein Anstieg der durchschnittlichen absoluten Luftfeuchte von 6,33 mbar (RH ~ 30 %) in Kontrollräumen auf 9,89 mbar in befeuchteten Räumen (RH ~ 42–45 %) war mit einer signifikanten Abnahme der Influenza-A-Virus-Präsenz auf Gegenständen und in Luftproben in befeuchteten Räumen im Vergleich zu Kontrollräumen verbunden. Zusätzlich zeigten PCR-positive Proben aus befeuchteten Räumen eine geringere Infektiosität als Proben aus Kontrollräumen. Zudem wurden 2,3-mal so viele Influenza-ähnliche -Krankheitsfälle in den Kontrollräumen im Vergleich zu den befeuchteten Räumen beobachtet, jedoch blieb unklar, ob hier ein Kausalzusammenhang besteht.

Es wird ein zukünftiges Potenzial in der künstlichen Befeuchtung in Schulräumen als mögliche Strategie zur Reduzierung von Influenza-Ausbrüchen in gemäßigten Klimazonen gesehen. Es sind aber zusätzliche Studien nötig um die Ergebnisse zu bestätigen, auch steht der Test bzgl. anderer Viren noch aus.

5.4.4 Empirische Modellstudien

(Minhaz Ud-Dean 2010) entwickelte mit einer theoretischen mathematischen Analyse ein Modell, mit dem Aktivität und Übertragung eines durchschnittlichen Virus vorausgesagt werden kann, d. h. die für die Inaktivierung eines Virus nötige Zeit bei verschiedenen Temperaturen und Luftfeuchten. Das Inaktivieren erfolgt dabei durch Austrocknung von Aerosolen. Dieses Modell liefert eine mechanistische Erklärung für die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit der Aktivität von umhüllten und nicht umhüllten Viren. Allerdings sind die biophysikalischen Daten zu virusspezifischen Parametern derzeit nicht verfügbar, was für die Validierung und Verbesserung dieses Modells nötig wäre. Zudem wurden viele weitere Parameter nicht miteingefasst (z. B. Inaktivierung durch Strahlung oder durch chemische, mechanische und thermische Einwirkungen). Insofern kann damit noch kein Nachweis für die Wirkung von Lufttemperatur und Luftfeuchte auf erhöhte saisonale Virus-Infektionen geliefert werden.

(Myatt 2010) entwickelte ein Innenraumlüftungsmodell zur Berechnung der Wirkung von Luftbefeuchtern und der Lüftungsart auf die Erhöhung der relativen und absoluten Luftfeuchte. Die Aktivität von Influenzaviren in Abhängigkeit von der relativen und absoluten Luftfeuchte wird auf der Basis des Modells von (Lowen et al. 2007) vorgenommen. Insofern zeigt die Studie zwar die praktischen Möglichkeiten zur Erhöhung der Luftfeuchte in Innenräumen im Winter, die Aussagen zur Aktivität von Viren basieren aber auf einer Studie mit Tieren. Für eine gesicherte Aussage zur Auswirkung von aktiver Luftbefeuchtung auf die Aktivität von Influenzaviren müsste dies aber mit kontrollierten Labor- und Feldstudien weiter untersucht werden.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

6.1 Haut

Aktuelle Literaturstudien (Derby et al. 2016) und (Pfluger et al. 2013a) kommen zum Ergebnis, dass leichte Hautbeschwerden (Juckreiz, Rauigkeit, Trockenheit) bei gesunden Patienten bei relativen Luftfeuchten $< 30\%$ beobachtet werden und dass sich die Haut bei längerer Exposition mit trockener Luft anpassen und langsam erholen kann. Zudem spielen genetische Faktoren und chronische Hautstörungen eine wesentliche Rolle bei der individuellen Disposition und Reaktion auf trockene Luft. Es wird zwar grundsätzlich eine Luftfeuchte von über 30% empfohlen, jedoch sind weitere Forschungen nötig, um das zu bestätigen.

Aus den Labor-Interventionsstudien kann folgendes als gesichert abgeleitet werden. Deutliche Effekte von Trockenheit im Stratum corneum der Haut sind ab relativen Luftfeuchten $< 30\%$ zu beobachten (Sunwoo et al. 2006b). Zudem ist ab diesen Werten eine Abnahme der mittleren Hauttemperatur zu beobachten. Mit aus Laborversuchen an Probanden (Cravello and Ferri 2008) abgeleiteten Regressionsgleichungen konnten Korrelationen zwischen relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur und den gemessenen Hautparametern abgeleitet werden. Demnach nimmt mit steigender Lufttemperatur der transepidermale Wasserverlust zu. Mit steigender relativen Luftfeuchte nimmt dagegen der transepidermale Wasserverlust ab. Die Korrelation mit der Lufttemperatur ist dabei deutlich stärker. Die Hautfeuchte steigt mit ansteigender relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur an. Werte für anzustrebende Raumklimabedingungen lassen sich hieraus aber nicht ableiten. Mit Laborversuchen an In-vitro-Proben menschlicher Haut konnten die Gehalte an ungebundenem und gebundenem Wasser im Stratum Corneum sowie die Lipidorganisation und Proteinbereitstellung als Maß für die Barrierefunktion der Haut bei verschiedenen Werten von relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur ermittelt werden (Vyumvuhore et al. 2013). Die Lipidorganisation sowie die Proteinbereitstellung sind bei mittleren relativen Luftfeuchten (etwa 60%) optimal, was dem Maximum der Wasserbindungskapazität im Stratum Corneum entspricht. Insofern wären relative Luftfeuchten in diesem Bereich nötig, um damit wirkungsvoll die Barrierefunktion der Haut zu verbessern. Bei Probandenversuchen in einer Klimakammer (Felsmann et al. 2020) konnte bei einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 20 auf 40% kein signifikanter Einfluss auf die Abdunstung der Haut (transepidermaler Wasserverlust) festgestellt werden, was sich mit anderen Studien deckt (Pfluger et al. 2013a) wo festgestellt wurde, dass im Bereich von etwa $RH = 30\%$ für den transepidermalen Wasserverlust ein Maximum auftritt. Bei Lüftungsarten mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten in den Aufenthaltsbereichen (z. B. Quelllüftung, $v_a \approx 0,04$ m/s) ist die Abdunstung signifikant niedriger als bei Lüftungsarten mit erhöhten Luftgeschwindigkeiten (z. B. Mischlüftung, $v_a \approx 0,12$ m/s), ebenso bei 20°C gegenüber 24°C (Felsmann et al. 2020). Insofern empfiehlt die Studie in Bezug auf die Verringerung der Abdunstung der Haut möglichst niedrige Lufttemperaturen und turbulenzarme Lüftungen mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten. Mit einer Erhöhung der Luftfeuchte wird hier nur ein geringer Effekt erzielt.

Mit einem numerischen Menschmodell zu den Einflüssen auf die Feuchtigkeitsverdunstung der Hautoberfläche, Augen und Atemwege (Takada and Matsushita 2013) kann gezeigt werden, dass z. B. mit einer Verringerung der Lufttemperatur von 24°C

auf 20 °C die gleiche Verminderung des transepidermalen Wasserverlusts der Haut erreicht wird, wie bei einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 20 % auf 40 %.

6.2 Augen

Aktuelle Literaturstudien ((Derby et al. 2016) und Wolkoff 2017 und 2018) kommen zum Ergebnis, dass Klagen über trockene Augen nicht unbedingt mit einer niedrigen Luftfeuchte zusammenhängen müssen, vielmehr handelt es sich um ein multifaktorielles Phänomen. Eine geringe Luftfeuchte stellt neben Lufttemperaturen über 22 °C, Zugluft und Schadstoffen in der Luft einen von vielen Risikofaktoren für Beschwerden über trockene Augen dar. Darüber hinaus haben das Geschlecht, eingenommene Medikamente, verwendete Kosmetika, die Ernährung sowie das Tragen von Kontaktlinsen Einfluss auf die Gesundheit der Augen. Es wird zwar grundsätzlich eine Luftfeuchte von über 20 bis 30 % empfohlen, jedoch sind weitere Forschungen nötig, um dies zu bestätigen.

In Labor-Interventionsstudien konnte gezeigt werden, dass die Lidschlagfrequenz signifikant ansteigt, wenn bei einer Lufttemperatur von 25 °C die relative Luftfeuchte von 50 % auf 30 % oder auf 10 % abgesenkt wird (Sunwoo et al. 2006b, Sunwoo et al. 2006a). Bei einer Absenkung der relativen Luftfeuchte von 40 % auf 5 % bei einer Lufttemperatur von 21 °C steigt die Tränenverdunstungsrate während die Dicke der Lipidschicht, die Tränenproduktion sowie die Tränenfilmstabilität sinken (Abusharha and Pearce 2013). Bereits bei einer Absenkung der Luftfeuchte von 35 % bei 24 °C auf 19 % bei 22 °C kann eine Verringerung der Tränenfilmstabilität beobachtet werden, die aber weniger deutlich ausfällt, als bei den Versuchen mit RH = 5 % (González-García et al. 2007). Die Expositionszeit scheint eine Rolle zu spielen, konnte aber aufgrund der geringen Versuchsdauer nicht näher quantifiziert werden. Bei gleichbleibender relativer Luftfeuchte von 22 % führt eine Erhöhung der Lufttemperatur von 22 °C auf 30 °C zu einer deutlichen Verschlechterung der Tränenfilmqualität, wie sie auch bei Patienten mit Syndrom des trockenen Auges gefunden werden (Lan et al. 2011). Auf Basis dieser Studie ist zu empfehlen, die Raumlufttemperatur im Bereich von 22 °C zu halten. Eine weitere Studie konnte zeigen, dass die Tränenverdunstungsrate bei einer Lufttemperatur von 22 °C sowohl bei relativen Luftfeuchten von 5 % als auch bei relativen Luftfeuchten von 40 % nach 5 Minuten auf ein Maximum steigt und sich nach etwa 10 Minuten Exposition auf einen Wert oberhalb der Basislinie einpendelt (Madden, Tomlinson and Simmons 2013). In der gleichen Studie wurde gezeigt, dass die Gabe von Augentropfen auf Emulsionsbasis die Tränenverdunstungsrate bei Patienten mit dem Syndrom des trockenen Auges um einen Betrag reduziert, der einer Erhöhung der Luftfeuchte um 30 % entspricht. Bei niedrigen relativen Luftfeuchten konnte die Tränenfilmstabilität sowohl bei gesunden Personen als auch bei Patienten mit dem Syndrom des trockenen Auges durch die Gabe von Augentropfen verbessert werden. Durch die Erhöhung der Luftfeuchte um 5 % bei einer Lufttemperatur von 22 °C in der Nähe der Augenoberfläche unter Zuhilfenahme eines Desktop Luftbefeuchters konnte die Tränenfilmstabilität bei der Bildschirmarbeit leicht verbessert werden. Ohne Luftbefeuchter verschlechterten sich die Werte nach einstündiger Bildschirmarbeit (Wang et al. 2017).

Aus Feldstudien geht hervor, dass sich die Zusammensetzung der Lipidschicht des Tränenfilms (Meibom-Lipid) mit zunehmendem Alter verändert, weswegen der Tränenfilm weniger stabil gegenüber Verdunstung ist (Borchman et al. 2012). So wird bei einem nicht geringen Teil der Bevölkerung das Syndrom des trockenen Auges angegriffen (Galor et al. 2011). Dabei hängt die Prävalenz u. a. auch vom Wohnort ab und ist für den städtischen Bereich deutlich größer als für den ländlichen Bereich (Um et al. 2014). Weiterhin scheint das Auftreten des Syndroms des trockenen Auges von den Klimaverhältnissen vor Ort abzuhängen (Tesón et al. 2015).

6.3 Schleimhäute der Atemwege

Aktuelle Literaturstudien ((Pfluger et al. 2013a), (Wolkoff 2018) und (Hildenbrand et al. 2011) kommen zum Ergebnis, dass der Mensch bei reiner Nasenatmung in der Lage ist, die eingeatmete Luft in ausreichendem Maße zu befeuchten. Trockenheit im Mund- und Rachenraum kann u. a. durch Mundatmung bei niedriger relativer Luftfeuchte verursacht werden, da dies zu einer mangelhaften Konditionierung der Einatemluft führt. Im Alter führen anatomische Veränderungen und eine Rückbildung der Schleimhaut zu einer Zunahme von Beschwerden wie Beeinträchtigung der Nasenatmung und trockener Nase.

Laborstudien (Sunwoo et al. 2006b) zeigen anhand des Saccharin-Clearance-Test eine Abnahme der Ziliertätigkeit erst unterhalb von $RH = 10\%$. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmendem Alter (Sunwoo et al. 2006a). Mit zunehmendem Alter zeigten Probanden darüber hinaus deutlich niedrigere intranasale Lufttemperatur- und Luftfeuchtwerte als unter vergleichbaren Bedingungen jüngere Personen (Lindemann et al. 2008). (Zhao et al. Jiang 2011) konnten in Laboruntersuchungen und subjektiver Bewertung des Empfindens zeigen, dass kalte Luft einen stärkeren Effekt auf den nasalsten Atemwegswiderstand hatte als trockene Luft alleine. Als Abhilfe bei Symptomen einer trockenen Nase werden eher bestimmte Arten an Nasensprays sowie die Anwendung von Nasenspülungen als eine Erhöhung der Luftfeuchte empfohlen.

6.4 Übertragung krankheitserregender Keime

Literaturstudien:

Sowohl die allgemeinen Übersichtsarbeiten zur Wirkung von trockener Luft ((von Hahn 2007), (Derby et al. 2017), (Wolkoff 2018)) als auch die speziell auf die Übertragung von krankheitserregenden Keimen ausgerichteten Literaturstudien (Shaman 2009), (Lowen and Steel 2014), (Metz and Finn 2015), (WHO 2019) kommen zu der Schlussfolgerung, dass niedrige Luftfeuchten die Aktivität und die Übertragung von insbesondere Inflenzaviren begünstigen und im Umkehrschluss mit einer Erhöhung der Luftfeuchte diese Prozesse gehemmt werden können. Die aktuelle Studien erfassende Auswertung von (Metz and Finn 2015) belegt, dass hierfür insbesondere die absolute Luftfeuchte eine deutliche Korrelation zeigt. Gestützt auf epidemiologischen Daten kann gezeigt werden, dass die Influenza-assoziierte Morbiditätsrate in Perioden mit niedriger absoluter Luftfeuchte signifikant ansteigt. Allerdings steht der direkte Nachweis des Einflusses der Luftfeuchte auf die Übertragungsrate von Inflenzaviren beim Menschen noch aus. Auch lassen sich aus den Literaturstudien noch keine konkreten Empfehlungen für Mindestwerte der relativen und absoluten Luftfeuchte ableiten, ab

denen sich Aktivität und Infektiosität wirkungsvoll mindern lassen und dass eine Erhöhung der Luftfeuchte eine wirksame Maßnahme zur Minderung der Influenzaübertragung darstellt (WHO 2019).

Interventionsstudien:

Mit kontrollierten Laborversuchen an Meerschweinchen bei 20 °C konnten (Lowen et al. 2007) nachweisen, dass bei einer relativen Luftfeuchte von 20 - 35 % eine hohe Infektiosität durch Influenzaviren auftritt, bei 50 % ein Minimum ist, bis 65 % erfolgte wieder ein Anstieg und über 80 % eine Blockierung. Dieser Verlauf korreliert mit dem Verlauf der Stabilität von Aerosolen (infolge der Dynamik aus Verdampfung und Deposition), in denen die Viren übertragen werden. Auf Grundlage eines daraus entwickelten Modells haben später verschiedene Autoren Untersuchungen und Prognosen zur Übertragung von Influenzaviren vorgenommen. Der Nachweis auf die Übertragbarkeit auf den Menschen steht aber noch aus. Mit statistisch abgesicherten Tests wurden von (Noti et al. 2013) in einer Klimakammer (20 °C) mit einem das Aushusten simulierenden Menschmodell in verschiedenen Aerosolfraktionen (kleiner 1 µm, 1 – 4 µm, größer 4 µm) über Zeitreihen (15 min - 5 Stunden) gesammelte Proben die Infektiosität von Influenzaviren bei 7 - 73 % relativer Luftfeuchte ermittelt. Bis 15 min war ein starker und dann ein gleichmäßiger geringerer Abfall und zwischen den Fraktionen kein großer Unterschied der Infektiosität festzustellen. Bei 40 - 45 % relativer Luftfeuchte zeigte sich gegenüber 20 % eine signifikante Abnahme der Infektiosität der untersuchten Proben (von ca. 75 % auf ca. 20 %). Mit kultivierbaren Noroviren untersuchten (Colas et al. 2014) bei konstanten relativen Luftfeuchten (10, 35, 55 und 85 %) und 25 °C in Zeitreihen (1 - 20 Stunden) die Aktivität und Infektiosität. So betrug z. B. die Aktivität bei RH = 10 % noch 51 %, während bei RH = 35 % nur noch 15 % feststellbar waren. Dabei wurde auch die starke Korrelation zur absoluten Luftfeuchte deutlich, bei unter 7 g/kg (entspricht bei 25 °C, RH ~ 35 %) konnte eine konservierende Wirkung auf Viruspartikel unabhängig von der Temperatur festgestellt werden. Höhere Luftfeuchten bewirken einen verstärkten Abbau des Virus-Kapsids und damit seiner Inaktivierung.

Aus den Interventionsstudien kann als gesichert abgeleitet werden, dass Influenzaviren in trockener Umgebung eine hohe Aktivität und Infektiosität haben und bei feuchteren Bedingungen diese Effekte gehemmt werden. Für Noro-Viren deuten sich diese Effekte aus In-vitro-Laborversuchen an. Der direkte Nachweis der Übertragbarkeit auf den Menschen steht allerdings noch aus, auch lassen sich die Bereiche der Luftfeuchte, ab denen die Effekte auftreten, nur grob abgrenzen, erst ab RH > 40 % bzw. AH > 7 g/kg gilt eine deutliche Minderung der Aktivität und Infektiosität von Influenzaviren im Laborversuch als gesichert.

Feldstudien:

Bei jungen Wehrpflichtigen im Außeneinsatz wurde von (Mäkinen et al. 2009) das Auftreten von Infektionen der Atemwege in Korrelation zu den Tages-Mittelwerten von Lufttemperatur und absoluter Luftfeuchte der 3 Tage bis 2 Wochen vor Diagnose im Vergleich von Erhebungen im Juli und Januar gesetzt. Demnach sanken sowohl die Temperatur als auch die Feuchte signifikant vor der Diagnose. Einer niedrigen absoluten Luftfeuchte stand insbesondere das Risiko für die Erkrankung der oberen Atemwege und Pharyngitis (Entzündung der Rachenschleimhaut) in Korrelation. Der Nachweis, dass diese Ergebnisse auf Beschäftigte in Innenräumen übertragen werden können, steht noch aus. (Koep 2013) prüfte die Möglichkeit der Erhöhung der absoluten

Luftfeuchte in Schulen im Winter und prognostiziert eine damit mögliche Verringerung der Aktivität von Influenzaviren auf Basis eines Modells aus Tierversuchen (Lowen et al. 2007). Auch hier fehlt noch der Nachweis zur Übertragbarkeit auf den Menschen. (Jaakkola et al. 2014) erfasste bei jungen Soldaten im Außeneinsatz die Tagesmittelwerte von Lufttemperatur und absoluter Luftfeuchte der 3 Tage vor Diagnose einer Influenza. Bei $t_a < 5 \text{ °C}$ und $AH < 3 \text{ g/kg}$ zeigte sich eine deutliche Korrelation. (Reimann et al. 2018) konnte auf Basis objektiver klinischer Tests eine signifikante Reduzierung von Auftreten und Infektiosität von Influenzaviren in Schulräumen bei Erhöhung der Luftfeuchte (von relativen Luftfeuchten ca. 30 auf über 40 %) beobachten. Auch wurden deutlich mehr Influenza-ähnliche Krankheitsfälle in den nicht befeuchteten Räumen beobachtet. Es wird grundsätzlich eine Raumluftbefeuchtung in Schulräumen zur Minderung des Risikos einer Influenza empfohlen.

Zur Ableitung von Schwellenwerten der Luftfeuchte und Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Laborstudien auf Beschäftigte in Innenräumen reicht die Datenlage noch nicht aus, da wesentliche Erkenntnisse aus Tierversuchen gewonnen wurden und der direkte Nachweis des vermehrten Auftretens von Influenza beim Menschen bei trockener Luft noch aussteht. Die Feldstudien geben einen deutlichen Hinweis, dass bei sinkenden Außenlufttemperaturen und absoluten Luftfeuchten das Auftreten von Infektionen der Atemwege und Influenza vermehrt zu beobachten ist, der Nachweis der Übertragbarkeit auf Beschäftigte in Innenräumen und die Ableitung von Schwellenwerten steht noch aus. Dafür wären Feldstudien nötig, die diese Effekte in Arbeitsstätten zeigen.

Empirische Modellstudien:

Mit einem Modell zur Verdampfung von Aerosolen prognostiziert (Minhaz Ud-Dean 2010) die Zeit zur Inaktivierung von Viren in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Luftfeuchte und beschreibt diese Mechanismen. Aufgrund des Fehlens von biophysikalischen Daten und, dass sonst noch wirkende Faktoren (z. B. Inaktivierung durch Strahlung oder chemische Einwirkungen) nicht berücksichtigt wurden, steht der Nachweis zur winterlichen Saisonalität von Virusinfektionen noch aus. (Myatt 2010) zeigt mit seinem Lüftungsmodell die Möglichkeiten zur Erhöhung der Luftfeuchte in Räumen im Winter und prognostiziert damit mit dem Modell von (Lowen et al. 2007) die Aktivität von Influenzaviren, jedoch fehlt auch hier der Nachweis (z. B. kontrollierte Labor- und Feldstudie) zur Übertragbarkeit auf den Menschen.

6.5 Schlussfolgerungen

Haut:

In den aktuellen Literaturstudien wurden nur wenige Studien auf Basis messtechnischer Untersuchungen gefunden und es konnten nur vereinfachte Zusammenhänge abgeleitet werden. Die meisten Laborversuche wurden mit relativ wenigen Probanden aus nicht repräsentativen Gruppen ausgeführt, bei Versuchsdauern über nur wenige Stunden. Die In-vitro Versuche zum Nachweis der Verbesserung der Barrierefunktion der Haut durch Erhöhung der Luftfeuchte können nur bedingt auf den lebenden Organismus übertragen werden. Numerische Modellrechnungen zeigen grundsätzliche Tendenzen, wie mit einer Änderung der Lufttemperatur ein ähnlicher Effekt zur Minderung der Feuchteabgabe der Haut erreicht werden kann wie mit einer Erhöhung der Luftfeuchte. Insofern lassen sich insgesamt aus den hinzugezogenen Studien keine

neuen Erkenntnisse ableiten, die aus dermatologischer Sicht konkrete Anforderungen an die Raumluftfeuchte stellen würden und aus denen sich konkrete Maßnahmen für den Arbeitsschutz ableiten ließen.

Augen:

Nach wie vor gibt es nur wenige aussagekräftige Studien, die den Einfluss von trockener Luft auf die Augen untersuchen. In einigen dieser Studien konnte eine Abnahme der Tränenfilmstabilität mit einer Abnahme der relativen Luftfeuchte unter 30 % in Verbindung gebracht werden. Eine vergleichbare Abnahme kann aber auch bei zunehmender Lufttemperatur über 22 °C beobachtet werden. Im Rahmen der Studien wurden keine Langzeiteffekte untersucht. Bei einem nicht geringen Teil der Bevölkerung wird das Syndrom des trockenen Auges angetroffen. Dabei hängt die Prävalenz u. a. vom Wohnort ab und ist für den städtischen Bereich deutlich größer als für den ländlichen Bereich. Weitere Einflussfaktoren sind neben vermehrter Bildschirmarbeit eingenommene Medikamente, verwendete Kosmetika, die Ernährung sowie das Tragen von Kontaktlinsen.

Schleimhäute der Atemwege:

Studien an gesunden Probanden zeigen nur einen geringen Einfluss der Luftfeuchte auf die Schleimhäute der Atemwege. Stattdessen kristallisiert sich ein deutlicher Einfluss des Alters auf die Trockenheit der Schleimhäute in den Atemwegen heraus. Auch kann eine vermehrte bzw. reine Mundatmung im Gegensatz zur Nasenatmung zu deutlich trockeneren Schleimhäuten im Bereich des Mundes und des Rachens führen. Als Abhilfe bei Symptomen einer trockenen Nase wird eher die Anwendung von Nasensprays und Nasenspülungen als eine Erhöhung der Luftfeuchte empfohlen. Eine längerfristige Verwendung von Nasensprays sollte allerdings in jedem Fall mit der Betriebsärztin bzw. dem Betriebsarzt abgeklärt werden.

Übertragung krankheitserregender Keime:

In Auswertung von Literaturstudien kann gezeigt werden, dass gestützt auf epidemiologische Daten die Influenza-assoziierte Morbiditätsrate in Perioden mit niedriger absoluter Luftfeuchte signifikant ansteigt. Daraus lassen sich aber noch keine konkreten Empfehlungen für Mindestwerte der relativen und absoluten Luftfeuchte in Innenräumen ableiten, ab denen sich Aktivität und Infektiosität von Influenzaviren wirkungsvoll mindern lassen. Aus Labor-Interventionsstudien kann aber als gesichert abgeleitet werden, dass Influenza-Viren in trockener Umgebung eine hohe Aktivität und Infektiosität haben und bei feuchteren Bedingungen diese Effekte deutlich gehemmt werden. Werte für die Luftfeuchte, ab denen diese Effekte auftreten, können nur grob abgegrenzt werden, erst ab $RH > 40\%$ bzw. $AH > 7\text{ g/kg}$ gilt eine deutliche Minderung der Infektiosität im Laborversuch als gesichert. Feldstudien geben zwar erste Hinweise, dass bei sinkenden Außenlufttemperaturen und absoluten Luftfeuchten das Auftreten von Infektionen der Atemwege und von Influenza vermehrt zu beobachten ist und bei Erhöhung der Luftfeuchte in Räumen dort weniger Infektionen auftraten, hier wie auch bei allen anderen ausgewerteten Studien steht aber der Nachweis der Übertragbarkeit auf Beschäftigte in Innenräumen und die Ableitung von Schwellenwerten noch aus. Insofern lassen sich in Bezug auf das Schutzziel „Minderung der Übertragung krankheitserregender Keime (insbesondere Influenzaviren) in Arbeitsstätten in der kalten Jahreszeit“ keine konkreten Maßnahmen in Bezug einer Intervention mit Erhöhung der Luftfeuchte in Innenräumen ableiten.

7 Fazit

Die Zielwerte für akzeptable niedrige relative Luftfeuchten in Gebäuden müssen im Kontext der Nutzung und des verfolgten Schutzzieles betrachtet werden. Da der Fokus dieser Studie auf Beschäftigte in produktionsbedingt nicht beeinflussten Klimaten wie Bürobereiche, bei jahreszeitlich bedingter trockener Luft (kalte Jahreszeit) und auf Länder mit gemäßigttem Klima lag, ist zu beachten, dass verschiedene weitere Faktoren wirken. Insbesondere auf Grund der im Vergleich zur Arbeitszeit deutlich längeren Aufenthaltsdauer an anderen Orten wie in der eigenen Wohnung, in öffentlichen Räumen (z. B. Kaufhäuser, Banken, Theater, Restaurants usw.), oder in Verkehrsmitteln, wo in der Regel keine Luftbefeuchtung erfolgt, muss abgewogen werden, ob in Abhängigkeit vom Ziel, das hinsichtlich der Gesundheit der Beschäftigten erreicht werden soll, eine Raumluftbefeuchtung eine wirkungsvolle Intervention darstellt. Für die hier betrachteten Aspekte des Einflusses von trockener Raumlufte auf die Gesundheit von Haut, Augen und Schleimhäute der Atemwege sowie auf die Übertragung krankheits-erregender Keime (hier bzgl. Influenza-Viren) zeigten sich keine bzw. keine gesicherten Effekte. Eine evidente Datenbasis, auf deren Basis geschlussfolgert werden kann, dass die Einhaltung eines Minimalwerts für die Luftfeuchte, nachhaltig die Gesundheit der Beschäftigten positiv beeinflussen kann, lässt sich in Auswertung der erfassten Studien nicht erbringen. Insofern kann kein Minimalwert der anzustrebenden Luftfeuchte in Innenräumen von Arbeitsstätten angegeben werden. Bei Klagen über trockene Raumlufte sollten im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung über die hier betrachteten Aspekte hinausgehende Gesichtspunkte wie die subjektive Wahrnehmung oder das Wohlbefinden beachtet werden. Auch sind weitere Faktoren einzubeziehen, die zu den gleichen Beschwerden führen können, wie beispielsweise Staub oder andere Verschmutzungen in der Raumlufte, zu hohe Lufttemperaturen oder Außenluftvolumenströme verbunden mit Zugluft, sowie mangelnde ergonomische Gestaltung der Bildschirmarbeit.

8 Nachtrag

Zu möglichen Maßnahmen zur Unterbrechung der Infektionskette durch SARS-CoV-2 liegt die Annahme nahe, dies ähnlich wie beim Influenzavirus mit einer Erhöhung von Luftfeuchte und Lufttemperatur zu erreichen. Eine erste diesbezügliche Recherche der (REHVA 2020) kam zu dem Ergebnis, dass Befeuchtung und Klimatisierung praktisch keine Wirkung haben. SARS-CoV-2 ist sehr widerstandsfähig gegen Umwelteinflüsse. Erst ab einer sehr hohen relativen Luftfeuchte von über 80 % und einer Lufttemperatur über 30 °C zeigt sich nach derzeitigen Erkenntnisstand ein Einfluss auf dessen Aktivität. Auch frühere Studien zeigten für diesen Virustyp (SARS Coronavirus) diesen Effekt (Chan et al. 2011). Erst bei höheren Lufttemperaturen und höherer relativer Luftfeuchte (z. B. $t_a = 38 \text{ °C}$ und $RH > 95 \%$) ging die Aktivität des Virus rasch zurück. In einer aktuellen Literaturstudie stellen (Dietz et al. 2020) Leitlinien zur Minimierung der Übertragung von Infektionskrankheiten insbesondere in Gebäuden in Bezug auf SARS-CoV-2 über umweltbedingte Wege zusammen. Zum Einfluss der Luftfeuchte lassen sich daraus keine anderen Erkenntnisse ableiten.

Literaturverzeichnis

Abusharha, A. A.; Pearce, E. I.: The effect of low humidity on the human tear film. In: Cornea Journal 32 (2013), H. 4, S. 429-34

Bischof, W.; Bullinger-Naber, M.; Kruppa, B.; Müller, B. H.; Schwab, R.: Expositionen und gesundheitliche Beeinträchtigungen in Bürogebäuden. Ergebnisse des ProKlimA-Projektes. / . Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2003

Borchman, Douglas; Foulks, Gary; Yappert, Marta; Milliner, Sarah: Changes in Human Meibum Lipid Composition with Age Using Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy. In: Investigative Ophthalmology & Visual Science 53 (2012), H. 1, S. 475-482

Bux, K.; Polte, C.: Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt - Klima In: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2016a), 54

Bux, Kersten; Polte, Carolin: Klima und psychische Gesundheit in der Arbeitswelt. In: 62. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses, Aachen 02.03.-04.03.2016: Arbeit in komplexen Systemen - Digital, vernetzt, human 28 (2016b), 6

Chan; MalikPeiris; Lam; M.Poon; Yuen; Seto: The Effects of Temperature and Relative Humidity on the Viability of the SARS Coronavirus. In: Advances in Virology Volume 2011 (2011), 7

Colas de la Noue, Alexandre; Estienney, Marie; Aho, Serge; Perrier-Cornet, Jean-Marie; de Rougemont, Alexis; Pothier, Pierre; Gervais, Patrick; Belliot, Gaël: Absolute Humidity Influences the Seasonal Persistence and Infectivity of Human Norovirus. In: Applied and Environmental Microbiology 80 (2014), H. 23, S. 7196-7205

condair-systems: Luftfeuchte ist mehr als ein Wohlfühlfaktor In: HLH Klima-/Lufttechnik 68 (2017), H. 12

Cravello, B.; Ferri, A.: Relationships between skin properties and environmental parameters. In: Skin Research Technology 14 (2008), H. 2, S. 180-6

de Kluizenaar, Yvonne; Roda, Céline; Dijkstra, Nienke Elske; Fossati, Serena; Mandin, Corinne; Mihucz, Victor; Hänninen, Otto; de Oliveira Fernandes, Eduardo; Silva, Gabriela; Carrer, Paolo; Bartzis, John; Bluysen, Philomena: Office characteristics and dry eye complaints in European workers - The OFFICAIR study. In: Building and Environment 102 (2016), S. 54-63

Derby; Eckels; Shulan: Update the Scientific Evidence for Specifying Lower Limit Relative Humidity Levels for Comfort, Health and IEQ in Occupied Spaces. In: ASHRAE Research Project Report 1630-RP (2016),

Derby M., Pasch R. : Effects of Low Humidity On Health, Comfort & IEQ. In: ASHRAE Journal 44 (2017), H. September, 4

DGUV-I- 215-520: Klima im Büro - Antworten auf die häufigsten Fragen. / . Hamburg 2007

DGUV: Positionspapier Trockene Luft 2008. Trockene Luft im Büro – ein Problem?. Position des Arbeitskreis „Klima“ im „Fachausschuss Einwirkungen und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren (FA WIRK). Fachausschuss Einwirkungen und arbeitsbedingte Gesundheitsgefahren (FA WIRK), 2008

Dietz, Horve, Coil, Fretz, Eisen, Kevin, Wymelenberg: Novel Coronavirus (COVID-19) Pandemic: Built Environment Considerations To Reduce Transmission. In: American socitey for microbiology 5 (04/2020)

Felsman, C., Gebhardt, H., Gritzki, R., Hensel, B., Kabitzsch, K., Keuchel, M., Kozak, W., Rösler, M.: Intelligente Regelung von Klimaanlageanlagen - Modell- und Laboruntersuchungen zur Wirkung des Raumklimas auf die Haut. In: baua Bericht F2299-2. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (2020)

Galor, Anat; Feuer, William; Lee, David; Florenz, Hermes; Carter, David; Pouyeh, Bozorgmehr; Prunty, William; Perez, Victor: Prevalence and Risk Factors of Dry Eye Syndrome in a United States Veterans Affairs Population. In: American Journal of Ophthalmology 152 (2011), H. 3, S. 377-384

González-García, María; González-Sáiz, Arancha; de la Fuente, Beatriz; Morilla-Grasa, Antonio; Mayo-Iscar, Agustin; San-José, Julio; Feijó, Jesus; Stern, Michael; Calonge, Margarita: Exposure to a Controlled Adverse Environment Impairs the Ocular Surface of Subjects with Minimally Symptomatic Dry Eye. In: Investigative Ophthalmology & Visual Science 48 (2007), S. 4026-4032

Hildenbrand, Tanja; Weber, Rainer K.; Brehmer, Detlef: Rhinitis sicca, dry nose and atrophic rhinitis: a review of the literature. In: European Archives of oto-rhinolaryngology 268 (2011), H. 1, S. 17-26

Jaakkola, Kari; Saukkoriipi, Annika; Jokelainen, Jari; Juvonen, Raija; Kauppila, Jaana; Vainio, Olli; Ziegler, Thedi; Renkk, Esa; Jaakkola, Jouni; Ikheimo, Tiina: Decline in temperature and humidity increases the occurrence of influenza in cold climate. In: Environmental Health: A Global Access Science Source 13 (2014), H. 1, S. 22-22

Koep, T.H., Enders, F.T., Pierret, C., Ekker, S.C., Krageschmidt, D., Neff, K.L., Lipsitch, M., Shaman, J., Huskins, W.C. : Predictors of indoor absolute humidity and estimated effects on influenza virus survival in grade schools. In: BMC Infect. Dis. 13 (2013), 71

Kozak, W.; Stein, D.; Felsmann, C.; Hensel, B.; Kabitzsch, K.; Rieckho, F.; Rösler, M.: Möglichkeiten und Grenzen einer Aml-basierten Regelung raumluftechnischer Anlagen und beispielhafte Anwendung auf das Phänomen „Trockene Luft“. Zusammenfassung zum Forschungsprojekt F2299. . Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2014

Lan, Li; Wargocki, P.; Wyon, D. P.; Lian, Z.: Effects of thermal discomfort in an office on perceived air quality, SBS symptoms, physiological responses, and human performance. In: *Indoor Air* 21 (2011), H. 5, S. 376-390

Lindemann, Joerg; Sannwald, Diana; Wiesmiller, Kerstin: Age-Related Changes in Intranasal Air Conditioning in the Elderly In: *The Laryngoscope* 118 (2008), H. 8, S. 1472-1475

Lowen, A. C.; Steel, J.: Roles of humidity and temperature in shaping influenza seasonality. In: *J Virol* 88 (2014), H. 14, 7692-5

Lowen, A.C.; Mubareka, S.; Steel, J.; Palese, P. : Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. In: *PLoS Pathog.* 3 (2007), 151

Madden, Louise; Tomlinson, Alan; Simmons, Peter: Effect of humidity variations in a controlled environment chamber on tear evaporation after dry eye therapy. In: *Eye Contact Lens* 39 (2013), H. 2, S. 169-174

Mäkinen, T. M.; Juvonen, R.; Jokelainen, J.; Harju, T. H.; Peitso, A.; Bloigu, A.; Silvennoinen-Kassinen, S.; Leinonen, M.; Hassi, J.: Cold temperature and low humidity are associated with increased occurrence of respiratory tract infections In: *Respir Med* 103 (2009), H. 3, 456-62

Metz, Jane A.; Finn, Adam: Influenza and humidity – Why a bit more damp may be good for you! In: *Journal of Infection* 71 (2015), H. 1, Number 1 Supplement 1, S. 54-58

Minhaz Ud-Dean, S. M.: Structural explanation for the effect of humidity on persistence of airborne virus: Seasonality of influenza. In: *Journal of Theoretical Biology* 264 (2010), H. 3, S. 822-829

Myatt, T.A., Kaufman, M.H., Allen, J.G., Macintosh, D.L., Fabian, M.P., McDevitt, J.J.: Modeling the airborne survival of influenza in a residential setting: the impacts of home humidification. In: *Environ. Health* 9 (2010), 55

Noti, J. D.; Blachere, F. M.; McMillen, C. M.; Lindsley, W. G.; Kashon, M. L.; Slaughter, D. R.; Beezhold, D. H.: High humidity leads to loss of infectious influenza virus from simulated coughs. In: *PLoS One* 8 (2013), H. 2, e57485

Pfluger, R.; Feist, W.; Tietjen, A.; Neher, A.: Physiological impairments of individuals at low indoor air humidity. In: *Passipedia* /. 2013a

Pfluger, R.; Feist, W.; Tietjen, A.; Neher, A.: Physiologische Auswirkungen geringer Raumluftfeuchte In: *Gefahrstoffe Reinhaltung Der Luft* 73 (2013b), H. 3, S. 107-108

REHVA: How to operate and use building services in order to prevent the spread of the coronavirus disease (COVID-19) virus (SARS-CoV-2) in workplaces. In: REHVA COVID-19 guidance document Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Association 03. April (2020) <https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance>

- Reimann: Humidity as a non-pharmaceutical intervention for influenza A. In: PLoS One 25 (2018), 15
- Rief, Stefan; Jurecic, Mitja: Luftfeuchtigkeit am Büroarbeitsplatz - Studie zur Bedeutung der Luftfeuchtigkeit im Büro. In: Fraunhofer IAO (2014)
- Shaman, J., Kohn, M.: Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality. In: PNAS 106 (2009), S. 3243–3248
- Sunwoo, Y., Chou, C., Takeshita, J., Murakami, M., Tochihara, Y.: Physiological and subjective responses to low relative humidity in young and elderly men. In: J. Physiol. Anthropol. 25 (3) (2006a), S. 229-238
- Sunwoo, Y., Chou, C., Takeshita, J., Murakami, M., Tochihara, Y.: Physiological and subjective Responses to low relative humidity. . In: J. Physiol Anthropol. 25 (1) (2006b), S. 7 - 14
- Takada, S.; Matsushita, T.: Modeling of moisture evaporation from the skin, eyes, and airway to evaluate sensations of dryness in low-humidity environments. In: Journal of Building Physics 36 (2013), H. 4, S. 422-437
- Tesón, Marisa; López-Miguel, Alberto; Neves, Helena; Calonge, Margarita; González-García, María; González-Méijome, José: Influence of Climate on Clinical Diagnostic Dry Eye Tests: Pilot Study. In: Optometry an Vision Science 92 (2015), H. 9, S. 284-289
- Um, Sun-Bi; Kim, Na Hyun; Lee, Hyung Keun; Song, Jong Suk; Kim, Hyeon Chang: Spatial epidemiology of dry eye disease: findings from South Korea. In: International Journal of Health Geographics 13 (2014), S. 1-9
- von Hahn, N.: „Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 67 (2007), H. 3, S. 103-107
- Vyumvuhore, R.; T fayli, A.; Duplan, H.; Delalleau, A.; Manfait, M.; Baillet-Guffroy, A.: Effects of atmospheric relative humidity on Stratum Corneum structure at the molecular level: ex vivo Raman spectroscopy analysis. In: Analyst 138 (2013), H. 14, 4103-11
- Wang, M.T.M., Chan, E., Ea, L., Kam, C., Lu, Y., Misra, S.L., Craig, J.P.: Randomized trial of desktop humidifier for dry eye relief in computer users. . In: Optom. Vis. Sci. 94 (2017), S. 1052–1057
- WHO: Non-pharmaceutical public health measures for mitigating the risk and impact of epidemic and pandemic influenza. In: World Health Organization G L O B A L I N F L U E N Z A P R O G R A M M E (2019), 91
- Wolkoff, Peder: External eye symptoms in indoor environments. In: Indoor Air 27 (2017), S. 246-260

Wolkoff, Peder: Indoor air humidity, air quality, and health – An overview. In: International Journal of Hygiene and Environmental Health (2018)

Zhao, Kai; Blacker, Kara; Luo, Yuehao; Bryant, Bruce; Jiang, Jianbo: Perceiving Nasal Patency through Mucosal Cooling Rather than Air Temperature or Nasal Resistance. In: PLoS One 6 (2011), H. 10, S. 1-8

Formelzeichen

Formelzeichen	Maßeinheit	Bezeichnung
t_a	°C	Lufttemperatur
v_a	m/s	Luftgeschwindigkeit
RH	%	relative Luftfeuchte
AH	g/kg	absolute Luftfeuchte in g Wasser pro kg trockene Luft (z. T. auch mit [mbar] angegeben)
TEWL	in g/m ² h	transepidermaler Wasserverlust der Haut

Tabellenverzeichnis

Nr.	Bezeichnung	Seite
Tab. 4.1	Quantitative Übersicht Quellen zur Wirkung trockener Luft	12
Tab. 4.2	Auswahl von Quellen aus Reviews „trockene Luft“ seit 2006	13
Tab. 4.3	Weitere Themen aus Reviews „trockene Luft“ seit 2006, nicht einbezogen bzw. nicht Gegenstand dieser Studie	13
Tab. 4.4	Übersicht der Quellen, die in die Auswertung einbezogen wurden	14