

RWTH-EBC 2021-001

---

## Einfluss der Luftfeuchte auf den Menschen und seine Gesundheit

Felix Nienaber<sup>1</sup>, Kai Rewitz<sup>1</sup>, Paul Seiwert<sup>1</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen

---



This work is licensed under a  
[Creative Commons Attribution 3.0 Germany License](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/).

Please cite this article as:

F. Nienaber, K. Rewitz, P. Seiwert, D. Müller, *Einfluss der Luftfeuchte auf den Menschen und seine Gesundheit*, White Paper  
RWTH-EBC 2021-001, Aachen, 2021, DOI: [10.18154/RWTH-2021-01238](https://doi.org/10.18154/RWTH-2021-01238)

RWTH Aachen University  
E.ON Energy Research Center  
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)  
Mathieustr. 10, 52074 Aachen

T +49 241 80-49760, F +49 241 80-49769

[ebc-office@eonerc.rwth-aachen.de](mailto:ebc-office@eonerc.rwth-aachen.de), [www.eonerc.rwth-aachen.de/ebc](http://www.eonerc.rwth-aachen.de/ebc)

# Einfluss der Luftfeuchte auf den Menschen und seine Gesundheit

Felix Nienaber<sup>1</sup>, Kai Rewitz<sup>1</sup>, Paul Seiwert<sup>1</sup>, Univ.-Prof Dr.-Ing. Dirk Müller<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen

## Kurzzusammenfassung

In der wissenschaftlichen Literatur, in Normen und in Richtlinien werden unterschiedliche Empfehlungen für untere und obere Grenzwerte der relativen Luftfeuchte für Innenräume genannt, um Beeinträchtigungen der Menschen und deren Gesundheit zu verringern. Diese Grenzen sind allerdings nicht einheitlich und in manchen Quellen wird nur eine untere oder obere Grenze angegeben. Oftmals wird in wissenschaftlichen Veröffentlichungen ein für den Menschen optimaler Bereich der relativen Luftfeuchte zwischen 40 % und 60 % genannt. In dieser Arbeit werden anhand der Bewertungskriterien Komfort, Gesundheit sowie Einfluss auf Krankheitserreger und Schadstoffe die Ergebnisse der betrachteten Quellen analysiert und die Empfehlungen in einen Gesamtkontext gesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Einflüsse der relativen Luftfeuchte für jedes Kriterium individuell betrachtet werden sollten und dass die Forderung nach einem konkreten Zielbereich immer einen Kompromiss darstellt. So können niedrige relative Luftfeuchten zu einer höheren Akzeptanz der empfundenen Luftqualität und zu einer Reduktion der Vermehrung von Staubmilben und den entsprechenden Gesundheitsbeeinträchtigungen führen. Das Einhalten von mittleren relativen Luftfeuchten kann gesundheitliche Beeinträchtigungen der Augen, Haut und Atemwege und damit verbundene Fehlzeiten signifikant verringern. In Bezug auf Krankheitserreger kann je nach Virustyp durch die relative Luftfeuchte deren Inaktivierung beeinflusst werden. So werden Polioviren bei niedrigen, Influenzaviren bei mittleren und Coronaviren bei mittleren bis hohen relativen Luftfeuchten zu einem maximalen Grad inaktiviert. Hohe relative Luftfeuchten verringern die Suspensionszeit von Partikeln und Aerosolen, sollten jedoch aufgrund der Gefahr von mikrobiellem Wachstum und Schimmelbildung vermieden werden. Insgesamt zeigen sich somit für den Kompromiss eines mittleren Bereichs der relativen Luftfeuchte die wenigsten Beeinträchtigungen in Bezug auf den Menschen und seine Gesundheit.

## Schlagwörter

Relative Luftfeuchte — Komfort — Gesundheit — Krankheitserreger — Schadstoffe — Optimaler Feuchtebereich — IEQ

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einfluss auf den Menschen</b>	<b>2</b>
2.1	Komfort .....	2
2.2	Gesundheit .....	4
<b>3</b>	<b>Einfluss auf Krankheitserreger und Schadstoffe</b>	<b>9</b>
3.1	Schimmel und Staubmilben .....	9
3.2	Partikel, Aerosole und Viren .....	10
<b>4</b>	<b>Feuchtegrenzen in Normen und Richtlinien</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>23</b>
	Danksagung	24
<b>A</b>	<b>Diagramme mit englischer Beschriftung</b>	<b>30</b>

## 1. Einleitung

In der Literatur wird für die relative Luftfeuchte in Innenräumen oftmals der Bereich von 40–60 % empfohlen, um Beeinträchtigungen des

Menschen und seiner Gesundheit zu verringern [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Teilweise variieren je nach Quelle und Betrachtungsaspekt diese Grenzwerte jedoch um mehr als 10 %. So wird beispielsweise in der DIN EN 15251 eine untere Grenze von 30 % angegeben [7]. In der vorliegenden Veröffentlichung wird anhand einer umfangreichen Literaturstudie analysiert, auf welchen Untersuchungen die jeweiligen abgeleiteten Grenzwerte beruhen. Die Untersuchungsaspekte werden hierbei in die direkten Einflüsse auf den Menschen unterschieden, unterteilt in dessen Gesundheit und Komfort, und die Einflüsse auf Krankheitserreger und Schadstoffe. Dabei werden die Einflüsse auf Viren insbesondere am Beispiel von Influenza- und Coronaviren beschrieben. Die Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen werden anschließend in den Kontext der empfohlenen Feuchtegrenzen in Normen und Richtlinien gesetzt und diskutiert.

## 2. Einfluss auf den Menschen

Die relative Luftfeuchte hat Einfluss auf eine Vielzahl von Parametern, welche direkte oder indirekte Auswirkungen auf den Menschen haben. Im folgenden Abschnitt werden die Einflüsse auf den Komfort und die Gesundheit des Menschen beschrieben. Dabei lassen sich die Einflüsse auf den Komfort hinsichtlich des thermischen Empfindens und der empfundenen Luftqualität unterteilen. Die Einflüsse auf die Gesundheit werden in Bezug auf Augen, Haut, Atemwege und Schlaf sowie die Produktivität unterschieden.

### 2.1. Komfort

In verschiedenen Untersuchungen zum Komfortempfinden des Menschen wird gezeigt, dass sowohl die empfundene Luftqualität als auch das thermische Empfinden von der relativen Luftfeuchte abhängig sind.

In einer Literaturstudie von Wolkoff wird ein Überblick über die Einflüsse von feuchter Luft auf verschiedene Aspekte der Gesundheit und des Komforts gegeben. So wird herausgestellt, dass sensorische Reizstoffe wie flüchtige organische Verbindungen (engl.: Volatile Organic Compounds – VOC) und Irritationen der Schleimhäute sehr wahrscheinlich die Ursache für eine als trocken empfundene Luft sind. Ebenso trägt die relative Luftfeuchte zur Wahrnehmung von Gerüchen bei, da beispielsweise feuchte Luft von Menschen als stickiger wahrgenommen wird. Eine wichtige Erkenntnis ist in diesem Zusammenhang, dass der Mensch kein Sinnesorgan zur direkten Wahrnehmung von relativer Luftfeuchte besitzt, sodass es zu einer Überschneidung zwischen dem Empfinden trockener Luft und der Wahrnehmung von Gerüchen, Partikeln und anderen Umwelteinflüssen kommt [8].

Berglund und Cain zeigen, dass die empfundene Luftqualität mit steigender relativer Luftfeuchte als weniger akzeptabel bewertet wird [9, 10]. In Abbildung 1 sind die Ergebnisse einer Probandenstudie mit 20 Teilnehmern zu sehen. Die Er-

gebnisse zeigen, dass eine relative Luftfeuchte von 22 % bei 24 °C und einer metabolischen Rate von 1 met von 95 % der Probanden als akzeptabel empfunden werden. 55 % relative Luftfeuchte werden dahingegen nur noch von 85 % der Probanden akzeptiert. Die empfundene Luftqualität wird bei 78 % relativer Luftfeuchte lediglich von 65 % der Probanden als akzeptabel eingestuft. Durch weitere Untersuchungen bei 20 und 27 °C wurde gezeigt, dass die Einflüsse der relativen Luftfeuchte auf das thermische Empfinden bei höheren Temperaturen weiter zunehmen [9].

In einer Studie von Lindgren et al. wird der Einfluss der Befeuchtung in Flugzeugkabinen untersucht, in welchen ohne Befeuchtung relative Luftfeuchten im Bereich von 6–15 % und mit Befeuchtung im Bereich von 9–25 % gemessen werden. Während der Flüge wird das thermische Empfinden und die empfundene Luftqualität durch Befragungen des Kabinenpersonals erhoben. Durch die Anhebung der relativen Luftfeuchte um wenige Prozentpunkte (3–10) wird die Zufriedenheit des Kabinenpersonals hinsichtlich der Luftqualität um 4–14 % gesteigert [11]. Aufgrund der hohen Anzahl von Versuchspersonen (N = 71), der mehrfachen Wiederholung der Versuche und des Designs der Studie als randomisierte Doppelblind-Versuche kann dieser Untersuchung eine hohe Aussagekraft zugewiesen werden.

Durch Laviana et al. wird in ihrer Literaturstudie herausgestellt, dass die Wahrnehmung von Gerüchen durch die relative Luftfeuchte beeinflusst werden kann [12]. Bei niedrigen relativen Luftfeuchten wird die Nasenschleimhaut ausgetrocknet, was zur vermehrten Irritation durch Schadstoffe führen kann. Gleichzeitig können geringe relative Luftfeuchten dazu führen, dass Gerüche wie beispielsweise Zigarettenrauch intensiver wahrgenommen werden [13].

Weiterhin wird durch Laviana et al. eine Studie von Rohles beschrieben, in welcher der thermische Komfort von 1600 Probanden in einem breiten Spektrum von relativen Luftfeuchten untersucht wird. Dazu wird der Anteil der Zufriedenen anhand der Bewertungen des thermischen Emp-

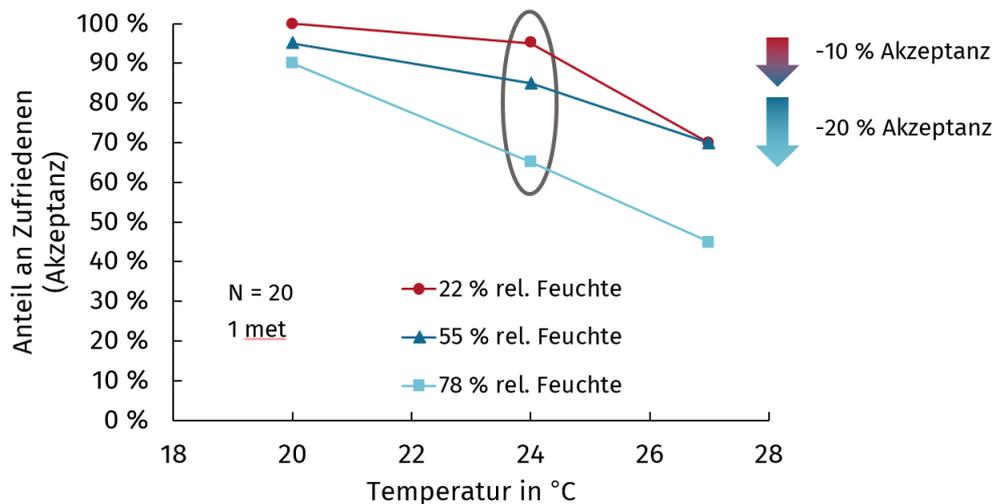


Abbildung 1 – Empfundene Luftqualität in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit, eigene Darstellung nach [9].

findens, welches die Antwortmöglichkeiten „etwas kühl“ (-1), „neutral“ (0) und „etwas warm“ (1) umfasst, über die Temperatur aufgetragen [14]. Die Visualisierung dieser Daten in Abbildung 2 zeigt, dass bei warmen Umgebungen durch eine Verringerung der relativen Luftfeuchte die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung im Durchschnitt höher bewertet wird bzw. sich die Verteilung der zufriedenen Bewertungen zu höheren Temperaturen verschiebt. Durch Rohles wird zusätzlich herausgestellt, dass bei Männern ein siebenmal und bei Frauen ein neunmal so großer Einfluss der Temperatur auf das thermische Empfinden gemessen werden kann wie durch die relative Luftfeuchte [15].

In weiteren Untersuchungen weist Berglund nach, dass das thermische Empfinden durch eine Senkung der relativen Luftfeuchte von 50 % auf 20 % im selben Ausmaß wie durch eine Temperatursenkung von 1 K beeinflusst wird [10]. Somit liegt hier eine Übereinstimmung mit den Aussagen von Rohles vor, dass im Komfortbereich eine Erhöhung der Temperatur um etwa 0,5 K und eine Absenkung der relativen Luftfeuchte um 15 % zu einem gleichen Temperaturempfinden führt [16]. Weiterhin wird ein starker Zusammenhang vom Komfort und Hautfeuchte beschrieben. So wird Kleidung bei einer Hautfeuchte unterhalb von 25 % als angenehmer und geschmeidiger emp-

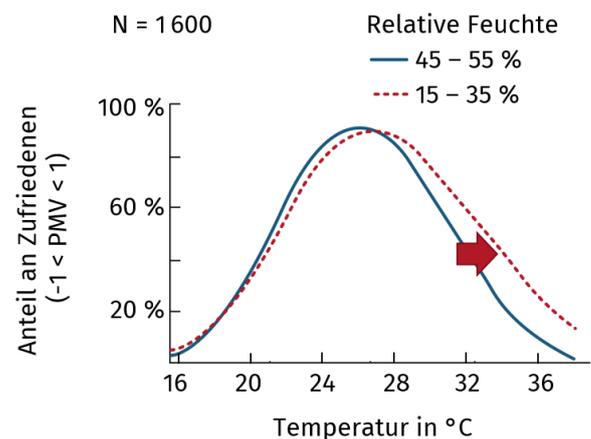


Abbildung 2 – Anteil an Zufriedenen hinsichtlich der thermischen Umgebung in Abhängigkeit der Temperatur und relativen Luftfeuchte, eigene Darstellung nach [12] anhand der Daten von [15].

funden, da oberhalb von 25 % die Reibung zwischen Haut und Kleidung signifikant zunimmt [10].

Anhand der vorgestellten Veröffentlichungen wird gezeigt, dass die relative Luftfeuchte der Umgebung einen nicht zu vernachlässigbaren Einfluss auf das Komfortempfinden von Menschen hat. Dabei führen niedrige relative Luftfeuchten zu einer akzeptableren Bewertung der empfundenen Luftqualität. Zudem führt eine Er-

höhung der relativen Luftfeuchte zu einem wärmeren thermischen Empfinden.

## 2.2. Gesundheit

Durch die relative Luftfeuchte werden verschiedene für die Gesundheit von Menschen relevante Aspekte beeinflusst. Wolkoff gibt einen weitreichenden Überblick über die einzelnen Aspekte dieser Einflüsse und wie diese zusammenhängen können [8]. In Anlehnung an Wolkoff werden in diesem Kapitel die Einflüsse der relativen Luftfeuchte auf Augen, Haut, Atemwege sowie Produktivität, Schlaf und Stress beschrieben.

### 2.2.1. Augen

Wolkoff gibt in mehreren Arbeiten einen Überblick über die Einflüsse der relativen Luftfeuchte auf verschiedene Aspekte der Gesundheit und des Komforts, wobei auch Einflüsse auf die Augen beschrieben werden. Insgesamt werden negative Einflüsse von sehr niedrigen und niedrigen relativen Luftfeuchten auf die Augen herausgestellt [8, 17, 18, 19].

Barabino et al. analysieren die Einflüsse der relativen Luftfeuchte auf die Augen anhand von Untersuchungen mit Mäusen [20]. In ihrem Beitrag wird die Tränenproduktion bei ca. 18 % relativer Luftfeuchte gegenüber einem Luftfeuchtebereich von 50 – 80 % verglichen. In ihren Untersuchungen wird gezeigt, dass die Zelldichte der Becherzellen in der oberen Bindehaut der Mäuse, welche in der trockenen Umgebung gehalten werden, stark zurückgeht. In den Becherzellen der Bindehaut wird Schleim produziert und somit ein wichtiger Teil des Tränenfilms gebildet. Dies führt zu einer verringerten Tränenfilmproduktion in der Umgebung mit geringerer Luftfeuchte.

Durch Sunwoo et al. wird ebenfalls nachgewiesen, dass die relative Luftfeuchte einen Einfluss auf die Augen hat [21]. In Abbildung 3 sind die Ergebnisse aus einer Untersuchung mit 16 Probanden dargestellt, bei denen die Lidschlagfrequenz bei unterschiedlichen Luftfeuchten erfasst

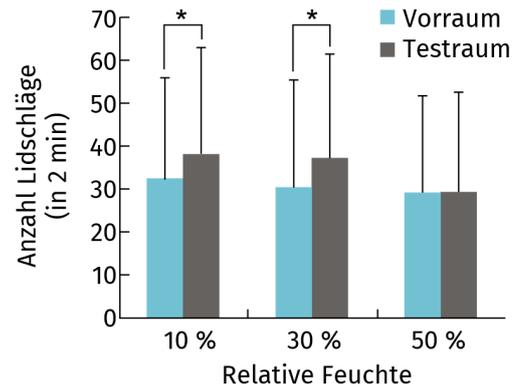


Abbildung 3 – Anzahl der Lidschläge in 2 Minuten in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte, eigene Darstellung nach [21].

wurde. Dabei befanden sich die Probanden zunächst in einem Vorraum mit 50 % relativer Luftfeuchte und wechselten dann in einen Raum mit 10 %, 30 % oder 50 %. Die Temperatur wurde über die Versuchsdauer konstant auf 25 °C geregelt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Aufenthalt bei 10 % und 30 % relativer Luftfeuchte zu einer statistisch signifikant erhöhten Lidschlagfrequenz führen.

Diese Aussage wird durch die Untersuchungen von Wyon et al. bestätigt, in welchen die Auswirkungen verschiedener relativer Luftfeuchten (5 %, 15 %, 25 % und 35 %) auf die Augen von 30 Probanden untersucht wurden [22]. Dort wird eine erhöhte Lidschlagfrequenz und ein erhöhter subjektiver Diskomfort bei 5 % relativer Luftfeuchte im Vergleich zu 35 % beschrieben. Ebenso wird eine verringerte Tränenfilmqualität bei 5 % und 15 % relativer Luftfeuchte gemessen.

### 2.2.2. Haut

Sunwoo et al. analysieren im Rahmen des bereits in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Experiments den transepidermalen Wasserverlust (TEWL) und den Hydrierungszustand der Haut der Probanden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Versuchsreihen bei relativen Luftfeuchten unterhalb von 50 % weisen einen signifikanten Anstieg des transepidermalen Was-

serverlustes nach 30 Minuten auf, welcher dann über die restliche Versuchsdauer annähernd konstant bleibt. Gleichzeitig führt dieser Anstieg zu einer signifikanten Abnahme des Hydrierungszustandes der Haut - angegeben in arbiträren Einheiten (a.E.) - nach ebenfalls 30 Minuten, welcher auch für die restliche Versuchsdauer deutlich unter dem Initialzustand bleibt. Weiterhin wird eine signifikante Absenkung der mittleren Hauttemperatur um 0,4K kurz nach dem Betreten des Raumes mit 10 % relativer Luftfeuchte festgestellt, die jedoch zum Ende des Versuches mit ca. 0,2K auf gleichem Niveau liegt wie bei den anderen Versuchen. Sunwoo et al. kommen zu dem Schluss, dass für die untersuchten Luftfeuchten unterhalb von 50 % signifikante Beeinträchtigungen für die Haut auftreten [21].

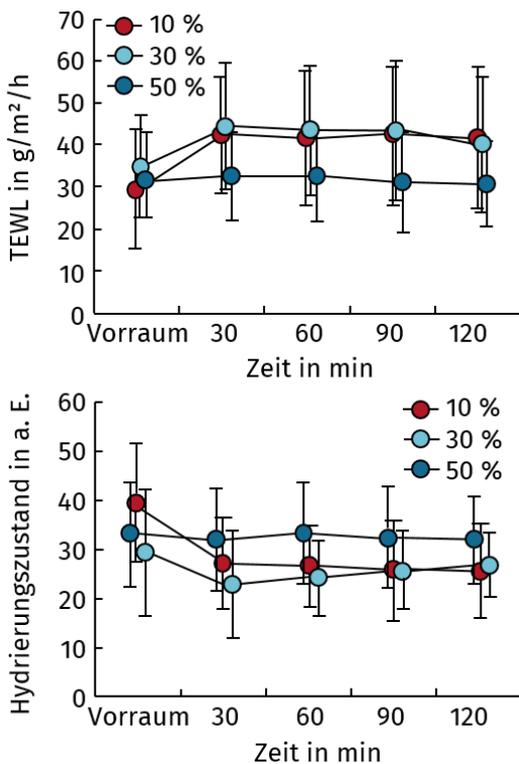


Abbildung 4 – Transepidermaler Wasserverlust (TEWL) und Hydrierungszustand der Haut in Abhängigkeit der Zeit und der relativen Luftfeuchte im Versuchsraum, eigene Darstellung nach [21].

In einer Longitudinalstudie von Norbäck et al. wird der Einfluss einer Anhebung der relativen Luftfeuchte von 35 % (Kontrollgruppe, N = 12) auf

43 % (Versuchsgruppe, N = 14) auf Mitarbeiter von zwei Stationen eines Krankenhauses untersucht [23]. Die Probanden wurden zwei mal im Abstand von 6 Wochen untersucht und auf das Vorhandensein von Krankheitssymptomen an den Augen, der Nase, des Rachens und der Haut sowie auf weitere generelle Symptome geprüft. Dadurch kann gezeigt werden, dass die Anzahl von auftretenden Symptomen bezüglich der Haut in der Versuchsgruppe statistisch signifikant zurückgeht (Reduktion von 10 nach 9), während es in der Kontrollgruppe ansteigt (Zunahme von 6 auf 8). Bei den anderen untersuchten Symptomen wurden keine statistisch signifikanten Zusammenhänge festgestellt.

### 2.2.3. Atemwege

Im Alltag nimmt der Mensch eine Vielzahl an Partikeln und Schwebstoffen über die Atmung auf. Darunter sind ca.  $10^{11}$  Nanopartikel in einer Größe von 10–1000 nm. Im Vergleich dazu haben Viren eine Größe von 20–300 nm und Bakterien von 1000–10.000 nm [24]. In Abbildung 5 sind die wesentlichen Transportvorgänge von Partikeln in den Atemwegen des Menschen dargestellt. Der menschliche Organismus verfügt über unterschiedliche Mechanismen, um inhalierte Partikel wieder abzuscheiden. Größere Staubpartikel werden dabei bereits in der Nase absorbiert und durch das Nasensekret abtransportiert. Gelangen Partikel durch die Luftrohre weiter in den Bronchialbereich, können diese über die sogenannte mukoziliare Clearance abtransportiert werden. Dabei lagern sich die Partikel zunächst in einer schützenden Schleimschicht ab, die kontinuierlich über eine Bewegung der Flimmerhärchen zum Rachenraum abtransportiert wird. Dadurch können vorhandene Fremdkörper, wie beispielsweise eingeatmeter Staub, Pollen, Viren und Bakterien aus den Atemwegen heraus befördert werden. Falls ein Abtransport nicht möglich ist, kann der Körper mit Immunantworten, Abwehrreaktionen, Zersetzungsprozessen und Weitertransport in andere Organe reagieren. Geringe relative Luftfeuchten

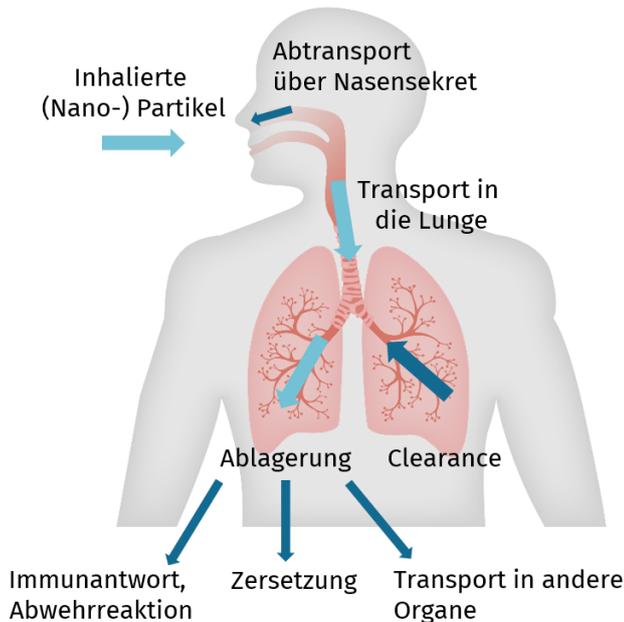


Abbildung 5 – Transportmechanismen inhalierter Partikel in den Atemwegen, eigene Darstellung nach [24].

können zu Beeinträchtigungen der körpereigenen Reinigungsfunktionen der Schleimhäute und der Abwehrmechanismen des Körpers führen [5, 12, 25], welche wiederum eine höhere Anfälligkeit für Infektionen verursachen können. So kann es zum Beispiel zu einem Austrocknen der Schleimhäute kommen, sodass die schützende Schleimschicht durchlässiger wird und somit leichter von Krankheitserregern durchdrungen werden kann. Eine Verringerung der mukoziliaren Transportgeschwindigkeit bietet Krankheitserregern zudem einen längeren Zeitraum, um durch die schützende Schleimschicht zu dringen, bevor diese abtransportiert werden kann. Weiterhin kann bei geringen Luftfeuchten eine verringerte Zellreparatur der Lungenzellen und bei zusätzlich niedrigeren Temperaturen eine geringere Interferon-Ausschüttung festgestellt werden, welche wiederum zu einer verringerten Immunantwort des Körpers führen kann [5]. Moriyama et al. geben bei Empfehlungen zur Infektionsprävention im Winter unter anderem einen Zielwert der relativen Luftfeuchte von 40–60% an. Zudem verweisen sie darauf, dass sich das Tragen von Masken bei geringen Luftfeuchten vorteilhaft auf die

Schleimhäute auswirkt, da sich ein feuchtes Mikroklima zwischen Gesicht und Maske einstellt.

In Untersuchungen von Salah et al. zum Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den Nasensekret-Transport anhand der Messung der nasalen Saccharin-Transitzeit mit 11 Probanden wird belegt, dass durch das Einatmen von extrem trockener Luft der mukoziliare Transport negativ beeinflusst werden kann [26]. Abbildung 6 zeigt, dass sich die nasale Saccharin-Transitzeit bei relativen Luftfeuchten von 0,1% im Vergleich zu den ebenfalls getesteten 40–43% um 55% erhöht. In dieser Versuchsreihe wird ein Extremfall, welcher im Alltag nicht vorkommt, mit einer mittleren relativen Luftfeuchte verglichen. Zwar werden somit grundlegende Zusammenhänge deutlich, allerdings ist ein quantifizierbarer Einfluss für Luftfeuchten zwischen den untersuchten Grenzwerten nicht möglich.

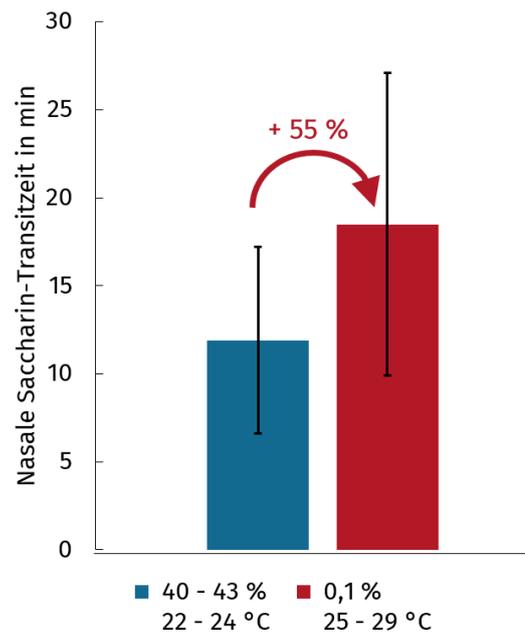


Abbildung 6 – Nasale Saccharin-Transitzeit in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte und Temperatur, eigene Darstellung nach [26].

In ihren Untersuchungen wird durch Sunwoo et al. ebenfalls nachgewiesen, dass die Nasenschleimhaut bei relativen Luftfeuchten von 10% im Vergleich zu 30% und 50% einen langsameren mukoziliaren Transport aufweist [21]. Zusätzlich wird gezeigt, dass der mukoziliare Trans-

port bei alten Menschen (durchschnittliches Alter 71 Jahre) stärker von einer niedrigen relativen Luftfeuchte beeinflusst wird als bei jungen Menschen. Bei 30 % und 50 % relativer Luftfeuchte wird kein signifikanter Unterschied in den Untersuchungen der Nasenschleimhaut nachgewiesen.

Eine frühe Studie zu der Saison-Abhängigkeit von Atemwegsinfektionen wurde bereits 1924 durch Young durchgeführt [27]. In dieser wurden die Sterblichkeitsraten von Kindern im Alter von 0 bis 5 Jahren durch Pneumonie und Influenza aus fünf verschiedenen Städten für einen Zeitraum von jeweils 44 bis 54 Jahren ausgewertet. Durch die Untersuchung dieser Daten in Abhängigkeit des Wetters wurde gezeigt, dass sich die Mortalität durch Atemwegserkrankungen durch hohe relative Luftfeuchten in Verbindung mit niedrigen Temperaturen erhöht.

Von Arundel et al. werden in einer Literaturstudie 99 Quellen zu den Einflüssen der relativen Luftfeuchte auf den Menschen analysiert [2]. In dem Abschnitt zu Atemwegsinfektionen werden verschiedene Studien beschrieben, in welchen ein Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Häufigkeiten von Infektionen und die Abwesenheitsraten gezeigt wird. So werden in einer Studie zu Atemwegsinfektionen in Militärbaracken mit einer Befeuchtungsanlage, durch welche Luft mit 40 % relativer Luftfeuchte zur Verfügung gestellt wird, 8 bis 18 % weniger Atemwegsinfektionen gemessen als im Vergleich zu Baracken, in den 20 % relative Luftfeuchte vorherrschen. In einer weiteren Studie zu dem Einfluss von relativer Luftfeuchte auf krankheitsbedingtes Fehlen von Schulkindern wird gezeigt, dass Kinder, in deren Schule und Zuhause keine Befeuchtungsanlagen verbaut sind, eine Abwesenheitsrate von 7,1 % aufweisen. Kinder, in deren Zuhause und Schule Befeuchtungsanlagen installiert sind, zeigen lediglich eine Abwesenheitsrate von 1,3 % auf. Insgesamt wird von Arundel et al. empfohlen, einen Bereich der relativen Luftfeuchte zwischen 40 – 60 % einzuhalten, um das Optimum aller vorgestellten Aspekte hinsichtlich der Gesundheit des Menschen zu erreichen. Auf diese Ergebnisse

wird in vielen anderen wissenschaftlichen Publikationen und technischen Richtlinien Bezug genommen, sodass sich als empfohlener Bereich der relativen Luftfeuchte 40 – 60 % etabliert hat. In Kapitel 5 wird näher auf die Zusammenhänge zwischen den historischen Empfehlungen der Luftfeuchtegrenzen eingegangen.

In einer weiteren Literaturstudie von Wolkoff wird ebenfalls gezeigt, dass niedrige Luftfeuchten (5 – 30 % relative Luftfeuchte) mit Beschwerden über trockene und stickige Luft und Irritationen der oberen Atemwege zusammenhängen und dass durch Anheben der relativen Luftfeuchte diese Beschwerden und Irritationen vermindert werden [8].

Durch Taylor und Tasi werden Zusammenhänge zwischen verschiedenen möglichen Vorfällen und Infektionen in einer betreuten Wohneinrichtung und der jeweiligen durchschnittlichen relativen Luftfeuchte des Monats dargestellt [3]. Zur Erfassung der relativen Luftfeuchte wurden die Werte einer Wetterstation eines 10 Meilen entfernten Flughafens übernommen und zu einer effektiven relativen Luftfeuchte innerhalb der Wohneinrichtung verrechnet. In der Studie von Nguyen und Dockery wird gezeigt, dass dies ein valider Ansatz ist, solange die Umrechnung anhand der absoluten Luftfeuchte geschieht [28]. In den Untersuchungen wird gezeigt, dass weniger Atemwegsinfektionen und Magen-Darm-Infektionen in Monaten mit durchschnittlichen Luftfeuchten zwischen 40 – 60 % gemessen werden als in Monaten außerhalb dieser Grenzen. Gleiches wird für Vorfälle gezeigt, bei denen Bewohner gestürzt sind. Die relative Luftfeuchte wird von Taylor und Tasi über den gesamten Monat gemittelt und mit den Fallzahlen des Monats korreliert. Die tatsächlich vorliegende relative Luftfeuchte in den Tagen vor Einsetzen und während der Infektion und der durchschnittlichen monatlichen relativen Luftfeuchte können aufgrund starker Wetterumschwünge innerhalb eines Monats weit auseinander liegen. Ebenso ist die Anzahl der insgesamt vorgefallenen Infektionen mit 90 Magen-Darm-Infektionen und 83 Atemwegsinfektionen in dem Untersuchungs-

zeitraum von 4 Jahren eher gering, insbesondere um aussagekräftige statistische Untersuchungen für einzelne Monate durchzuführen.

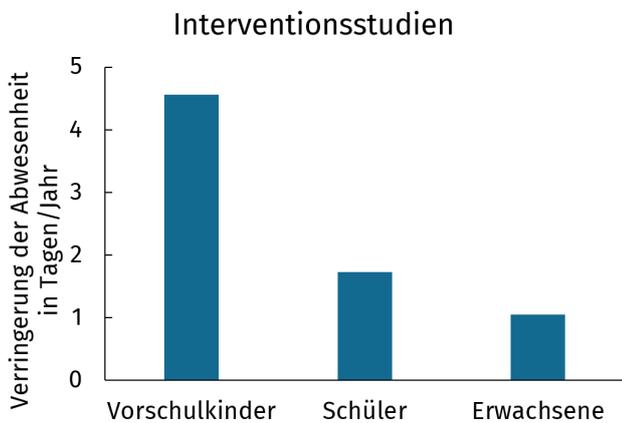


Abbildung 7 – Mittlere Verringerung der Abwesenheiten durch Luftbefeuchtung basierend auf verschiedenen Interventionsstudien, eigene Darstellung basierend auf Daten von [29, 30, 31, 32].

Um den Einfluss von technischen Systemen zur Regelung der relativen Luftfeuchte auf Erkrankungen beziehungsweise auf Fehltagen zu quantifizieren, wurden bereits vielzählige Interventionsstudien durchgeführt [29, 30, 31, 32]. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse von verschiedenen Interventionsstudien zusammengefasst und hinsichtlich der Altersgruppen Vorschulkinder, Schüler und Erwachsene ausgewertet. Die Berechnung der Verringerung der Abwesenheit in Tagen pro Jahr wurde mit der Annahme von 190 Schultagen und 220 Arbeitstagen pro Jahr durchgeführt. Aus den Daten wird ersichtlich, dass der Einfluss mit dem Alter abnimmt. So wird die durchschnittliche Abwesenheit pro Jahr für Vorschulkinder um ca. 4,5 Tage, für Schüler um ca. 1,5 Tage und für Erwachsene um 1 Tag gesenkt.

### 2.2.4. Produktivität

Bei der Selbsteinschätzung der Produktivität sind nach Wiik psychosoziale und Umweltfaktoren von gleicher Bedeutung [33]. Wolkoff weist darauf hin, dass die Luftfeuchte ein wichtiger Umweltfaktor zur Sicherstellung der Arbeitsleistung ist [19].

Weiterhin korreliert eine Reduktion der Produktivität mit dem subjektiven Empfinden von trockener Luft. Wyon et al. untersuchen den Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Arbeitsleistung anhand typischer Bürotätigkeiten wie Schreiben, Korrekturlesen und Addieren [22].

In Abbildung 8 sind die Ergebnisse als prozentuale Arbeitsleistung mit einer Normierung auf die Arbeitsleistung bei 5 % relativer Luftfeuchte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zu der sehr trockenen Umgebung die Arbeitsleistung mit Erhöhung der relativen Luftfeuchte auf 15 – 35 % um 2 – 6 % leicht ansteigt.

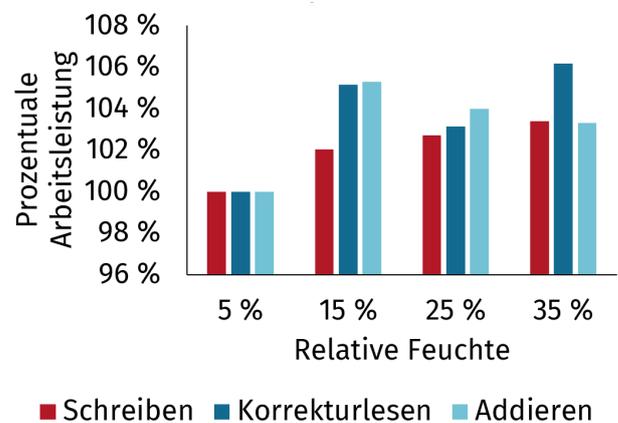


Abbildung 8 – Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Arbeitsleistung beim Schreiben, Korrekturlesen und Addieren, eigene Darstellung nach [22].

### 2.2.5. Schlaf und Stress

In den Untersuchungen zum Einfluss von Änderungen der relativen Luftfeuchte und Temperatur auf den Schlaf konnte durch Okamoto-Mizuno et al. gezeigt werden, dass es zu vermehrten Schlafunterbrechungen und verringerter Schlafqualität kommt, wenn Temperatur und relative Luftfeuchte erhöht werden [34]. In Auswertungen der NASA wird gezeigt, dass der für Schlaf optimale Bereich zwischen 50 – 60 % und für die allgemeine Gesundheit zwischen 40 – 60 % relativer Luftfeuchte liegt [35].

Insbesondere bei Personen mit obstruktiver Schlafapnoe wird bei einer Befeuchtung der nächtlich via CPAP-Beatmungsgerät zugeführten Atemluft eine Verbesserung sowohl von Symptomen als auch Schläfrigkeit und Lebensqualität gemessen [36].

In einer Studie zu den Auswirkungen der relativen Luftfeuchte auf den Stress von Büroarbeitenden werden 134 Personen von Rajouyan et al. mit Herzfrequenzmessgeräten ausgestattet, um ihre Stressreaktionen zu erfassen [37]. Die Probanden werden nach Ende der Untersuchungen in Gruppen eingeteilt, basierend auf dem Anteil der von ihnen in einer Umgebung mit relativen Luftfeuchten zwischen 30–60 % oder außerhalb dieser Grenzen verbrachten Zeit. Bei Personen in dem mittleren Bereich der relativen Luftfeuchte wurden 25 % weniger Stresssymptome erfasst als bei Personen in trockeneren Bedingungen. In der Auswertung wird gezeigt, dass die optimalen Bedingungen bei ca. 45 % relativer Luftfeuchte vorliegen.

### 3. Einfluss auf Krankheitserreger und Schadstoffe

Die relative Luftfeuchte hat nicht nur einen direkten Einfluss auf den Menschen, sondern wirkt sich auch auf Krankheitserreger und Schadstoffe aus, welche wiederum die Gesundheit des Menschen beeinträchtigen können. Neben der Beeinflussung der Suspensionszeit von Aerosolen, die zum einen in Form von kleinen Partikeln direkte Beeinträchtigungen der Atemwege verursachen und zum anderen als Träger von Viren dienen können, wirkt sich die relative Luftfeuchte auch direkt auf Krankheitserreger hinsichtlich deren Aktivitätszeit und Vermehrung aus. Im Folgenden werden die Einflüsse auf Schimmelpilzbefall und Staubmilben, auf Aerosole im Allgemeinen und auf die Inaktivierung verschiedener Viren beschrieben.

#### 3.1. Schimmel und Staubmilben

Schimmelpilzbefall in Innenräumen erhöht das Risiko für Husten, Infektionen der oberen Atemwege und Atopie, was wiederum zu allergischem Asthma führen kann [38]. Insbesondere bei Kindern kann der Aufenthalt in Räumen mit feuchten Oberflächen und Schimmelpilzbefall auch unabhängig von einer spezifischen Empfindlichkeit zu einer Verschlimmerung von Asthma führen. Auslöser für Pilzwachstum in Gebäuden können Wasserschäden sein, die zu einer starken Erhöhung der Feuchte an den Oberflächen führen. Aber auch über die Kondensation von Raumluft an kalten Oberflächen besteht ein indirekter Einfluss der relativen Luftfeuchte auf das Pilzwachstum und damit die Sporenkontamination der Raumluft. Nach Baughman und Arens tritt unterhalb von 70 bis 80 % relativer Luftfeuchte ohne weitere Auslöser kein Pilzwachstum auf [39]. Diese Erkenntnisse werden durch die Ergebnisse in den von Arundel et al. vorgestellten Veröffentlichungen bestätigt [2].

Mendell und Kumagai leiten anhand einer Meta-Studie eine dreistufige Risikoindizierung für Gesundheitsschäden durch feuchte Oberflächen und Schimmelpilzbefall in Gebäuden her, welche in Tabelle 1 zusammengefasst ist. Hierfür werden unter anderem die Häufigkeiten von Husten und Nasenentzündungen bei Kindern verglichen. Sobald einer der Indikatoren aus Stufe 1 vorliegt, kann von einem geringen Risiko ausgegangen werden. So wird anhand der Untersuchungen gezeigt, dass bereits durch ein geringes Vorhandensein von Feuchtigkeit, zum Beispiel in Form von aktuellen oder historischen Wasserschäden, Schimmelflächen unter  $0,2 \text{ m}^2$  oder Schimmelerüche das Risiko von Husten und Nasenentzündungen um 10 bis 100 % erhöht werden kann. Werden die Grenzwerte aus Stufe 3 für einen Indikator überschritten, so kann von einem hohen Gesundheitsrisiko ausgegangen werden. Sowohl durch größere Wasserschäden in Verbindung mit Schimmel als auch durch größere Schimmelflächen werden die Risiken um 70 bis 4150 % erhöht [40].

Tabelle 1 – Risikoindizierung für Gesundheitsschäden durch Schimmelpilzbefall über drei Stufen nach [40]

Stufe 1: Kein Risiko	Stufe 2: Geringes Risiko	Stufe 3: Hohes Risiko
Keiner der Indikatoren: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserschaden</li> <li>• Sichtbarer Schimmel</li> <li>• Schimmelgeruch</li> <li>• Historische Schimmelspuren</li> <li>• Historische Wasserschäden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mindestens 1 Indikator aus Stufe 1</li> <li>• Grenzwerte sind kleiner als in Stufe 3</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sichtbarer Schimmel auf &gt; 0,2 m<sup>2</sup> in einem Raum ODER</li> <li>• Sichtbarer Schimmel und Wasserschaden &gt; 0,2 m<sup>2</sup> auf einer Fläche</li> </ul>

Ein weiteres Gesundheitsrisiko in Gebäuden stellen Hausstaubmilben dar. Diese kommen typischerweise in Innenräumen vor und ernähren sich von menschlichen Hautschuppen. Deren Exkremente können Auslöser für Allergien wie zum Beispiel allergisches Asthma oder Rhinitis (Nasenschleimhautentzündung) sein [39]. Baughman und Arens zeigen anhand einer Meta-Studie, dass die Staubmilbenkontamination in direktem Zusammenhang mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung steht. Die optimalen Bedingungen liegen zwischen 70 und 80 % relativer Luftfeuchte vor, wobei die Luftfeuchte im Mikrohabitat, also der direkten Umgebung der Staubmilben, ausschlaggebend ist und unter Umständen deutlich höher sein kann als die mittlere Luftfeuchte der Raumluft. Arlian et al. zeigen in diesem Kontext, dass beim Einhalten einer maximalen Luftfeuchte von unter 50 % die Vermehrung von Staubmilben signifikant gesenkt werden kann [41].

### 3.2. Partikel, Aerosole und Viren

Die relative Luftfeuchte beeinflusst sowohl die Suspensionszeit von Aerosolen als auch die Dauer bis zur Inaktivierung von Viren, welche oftmals auch als „Lebensdauer“ bezeichnet wird. In Abhängigkeit der Sprechaktivität und der körperlichen Aktivität von Personen variiert die Menge an emittierten Tröpfchen und Aerosolen. Diese können im Falle einer Infektion der Person mit Viren beladen sein, was wiederum Einfluss auf das Infektionsrisiko in Innenräumen haben kann [42]. Aerosole bestehen aus kleinen Flüssig-

sigkeitströpfchen, die in der Flüssigkeit gelöste Salze und nicht gelöste Aerosolpartikel enthalten können. Die tendenziellen Einflüsse von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf virusbeladene Aerosole werden durch Hosseini in einem Review-Paper beschrieben, die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt [43].

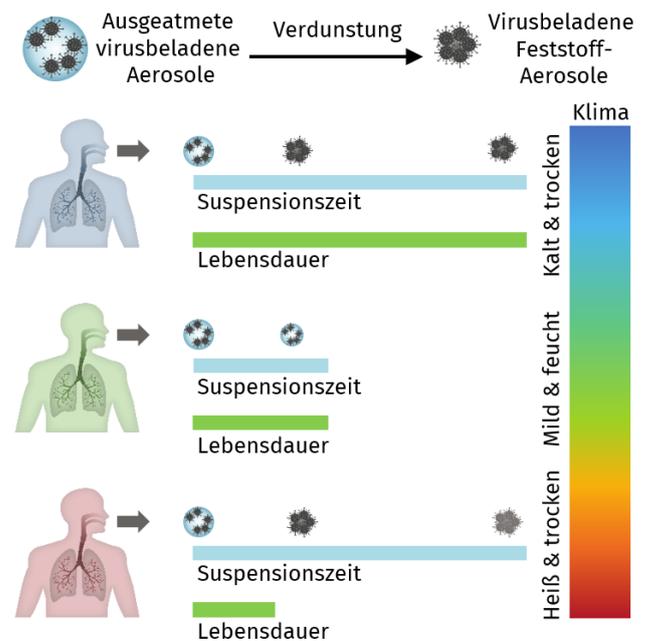


Abbildung 9 – Einfluss des Umgebungsclimas auf die Suspensionszeit von Aerosolen und die Lebensdauer der darin enthaltenen Viren, eigene Darstellung nach [43].

Darin wird beschrieben, warum die Suspensionszeit, also die Verweildauer in der Luft vor einem Absetzen auf Oberflächen, in trockenen Umgebungen länger ist als in feuchten Umgebungen. Dies ist auf die unter trockenen Bedingungen schnellere Verdunstung des Flüssigkeitsan-

teils zurückzuführen, welche dazu führt, dass der Durchmesser der Aerosole sinkt und die auskristallisierten Salze, Partikel und Viren als virusbeladene Feststoffaerosole übrig bleiben. Dieser Prozess hat ebenso wie die Temperatur einen Einfluss auf die Lebensdauer von Viren. Findet die Verdunstung und damit die Aufkonzentration der Salzlösung bei feuchten Umgebungen vergleichsweise langsam statt, so führt die hohe Salzkonzentration in dem Flüssigkeitströpfchen zu einer schnellen Inaktivierung der Viren, die sich darin befinden. Findet dieser Prozess bei trockenen Umgebungen sehr schnell statt, so reicht die Zeit, in welcher die Viren der hohen Salzkonzentration ausgesetzt sind, nicht aus, um eine Inaktivierung zu verursachen. In dieser Veröffentlichung werden unter anderem die Untersuchungen von Yang et al. [44] dargelegt, welche im Kapitel 3.2.1 ausführlich beschrieben werden.

Es gilt jedoch zu beachten, dass je nach Virus der Einfluss der relativen Luftfeuchte unterschiedlich ausgeprägt ist. In Abbildung 10 sind die Ergebnisse einer Metastudie von Moriyama et al. dargestellt [5]. Die grauen Punkte sind die untersuchten Bereiche der relativen Luftfeuchte und die roten Markierungen sind die Bereiche mit hoher Stabilität für das jeweilige Virus. Aus der Abbildung wird deutlich, dass behüllte und unbehüllte Viren in unterschiedlichen Bereichen der relativen Luftfeuchte eine hohe Stabilität aufweisen. Während die dargestellten unbehüllten Viren die höchste Stabilität bei 80 % relativer Luftfeuchte aufweisen, variiert dieser Bereich bei den behüllten Viren. Für den Influenzavirus wird je nach Quelle beispielsweise sowohl ein niedriger als auch ein hoher Bereich der relativen Luftfeuchte angegeben, bei welcher das Virus eine hohe Stabilität aufweist.

In ihren Untersuchungen werden von Ijaz et al. Versuche mit Poliomyelitisviren durchgeführt, durch welches Kinderlähmung ausgelöst werden kann [45]. Dort wird ermittelt, welche Zusammenhänge zwischen der Überlebensdauer von Viren in Aerosoltröpfchen und der Temperatur und relativen Luftfeuchte der Umgebung bestehen. Bei mittleren Temperaturen (20 °C) und hohen relati-

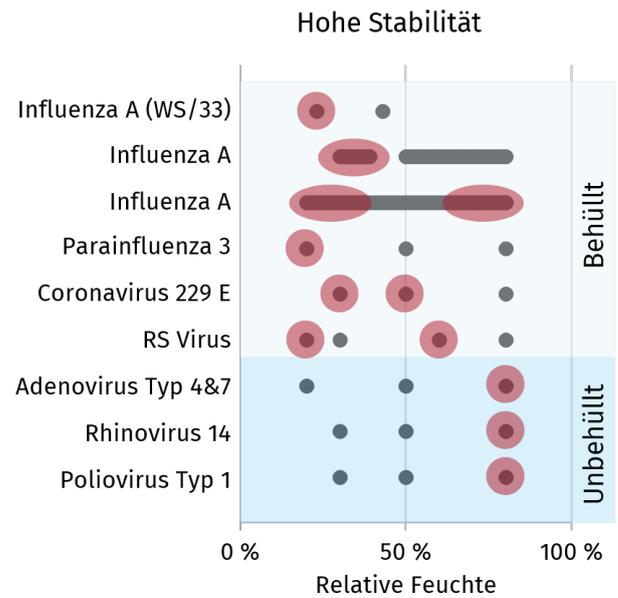


Abbildung 10 – Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Stabilität unterschiedlicher Viren basierend auf einer Datenanalyse von [5].

ven Luftfeuchten ( $80 \pm 5\%$ ) werden für Poliomyelitis die längsten Überlebensdauern nachgewiesen. Unter niedrigen ( $30 \pm 5\%$ ) und mittleren relativen Luftfeuchten ( $50 \pm 5\%$ ) wird die Überlebensdauer so sehr verkürzt, dass diese mit der angewandten Methodik nicht bestimmt werden können. Die Tendenzen dieser Untersuchungen werden von den Ergebnissen von Hemmes et al. bestätigt, welche in Abschnitt 3.2.1 ausführlich beschrieben werden.

In einer Übersichtsarbeit wird von Arundel et al. unter anderem zusammengefasst, welche Einflüsse die relative Luftfeuchte auf Viren und Bakterien hat bzw. bei welchen relativen Luftfeuchten diese eine möglichst geringe Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit verursachen [2]. Für Viren werden die geringsten Beeinträchtigungen in einem Bereich zwischen 50 und 70 % relativer Luftfeuchte angegeben. Für Bakterien wird ein ähnliches Verhalten beschrieben und ein Minimum zwischen 30 und 60 % dargestellt.

Lai et al. beschreiben im Buch „Aerosol Science“ mögliche Risiken von Bioaerosolen in Krankenhäusern und wie diese beeinflusst werden [46]. Dort werden die Ergebnisse einer WHO-

Untersuchung präsentiert, laut derer zwischen 5,7 und 19,1 % aller Patienten von therapieassoziierten Infektionen betroffen sind, wobei in einzelnen Notaufnahmen Werte bis zu 88,9 % festgestellt werden [47]. Durch solche Infektionen werden vor allem Patienten, die an Beatmungsgeräte angeschlossen sind gefährdet. Weiterhin wird ein Überblick über Filter- und Deaktivierungsmöglichkeiten von Bioaerosolen gegeben. Sie beschreiben zudem mit Bezug auf das Buch von Hinds, dass die relative Luftfeuchte einen entscheidenden Einfluss auf die Verdunstungsrate des Flüssigkeitsanteils in von Menschen emittierten Aerosolen hat, was wiederum Einfluss auf deren aerodynamischen Durchmesser und Suspensionszeit hat [48].

Der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Suspensionszeit wird von Lindgren et al. beschrieben [11]. Sie zeigen am Beispiel einer Flugzeugkabine, dass durch die Anhebung der relativen Luftfeuchte um wenige Prozentpunkte (3–10 %) in sehr trockenen Umgebungen (bspw. Flugzeugkabine) die Konzentration lungengängiger Partikel von 6 auf  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gesenkt werden kann.

### 3.2.1. Influenzaviren

In den Untersuchungen von Hemmes et al. zu Viren in Aerosolen wird gezeigt, dass Influenza- und Polioviren unterschiedlich von der umgebenden relativen Luftfeuchte beeinflusst werden [49]. Die Inaktivierung von Viren wird - für typische Innenraumbedingungen - von der relativen Luftfeuchte stärker beeinflusst als durch eine Variation der Temperatur. In Abbildung 11 wird gezeigt, dass Influenzaviren bei relativen Luftfeuchten von 50–90 % schneller und im Bereich von 15–40 % langsamer inaktiviert werden. Im Übergang zwischen diesen beiden Bereichen wird ein starker Anstieg aufgezeigt. In parallelen Untersuchungen bezüglich des Poliomyelitisvirus wird gezeigt, dass ein umgekehrtes Verhalten vorliegt. Für das Poliomyelitisvirus liegt oberhalb von 50 % eine langsame Inaktivierung vor. Unterhalb von 45 % relativer Luftfeuchte konnten

nach 30 Sekunden keine Viren mehr nachgewiesen werden. Ein Unterschied zwischen den beiden Viren besteht darin, dass es sich bei dem Influenzavirus um ein behülltes Virus handelt, wohingegen das Poliomyelitisvirus keine Hülle aufweist.

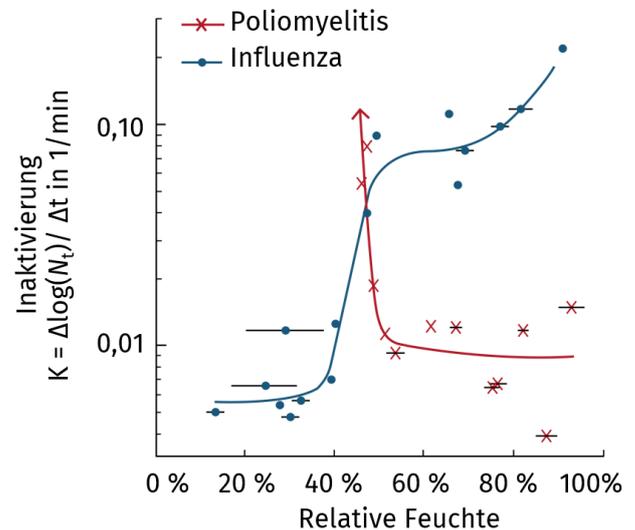


Abbildung 11 – Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Inaktivierung von Poliomyelitis- und Influenzaviren, eigene Darstellung nach [49].

In Untersuchungen von Schaffer et al. wird gezeigt, dass für Influenzaviren bei 50 % relativer Luftfeuchte die höchste Inaktivierung auftritt [50]. Die Ergebnisse sind als Rückgewinnungsrate über die relative Luftfeuchte in Abbildung 12 aufgetragen. Darin wird der Einfluss der Zeit auf die Rückgewinnungsrate deutlich, da der Unterschied zwischen den Rückgewinnungsraten verschiedener relativer Luftfeuchten mit längerer Versuchsdauer immer ausgeprägter wird. Das Minimum der Rückgewinnungsrate wird bei 50 % gemessen.

Durch Noti et al. wird die Infektiosität von Influenzaviren bei verschiedenen relativen Luftfeuchten der Umgebungsluft untersucht [51]. Dabei werden virusbeladene Aerosole über einen Analog-Kopf mit einem künstlichen Hust-Vorgang in einen Versuchsraum emittiert (Emittent) und ein zweiter Kopf mit künstlichem Atemvorgang verwendet, um die Aerosole wieder einzuatmen (Rezipient). Der Versuchsaufbau

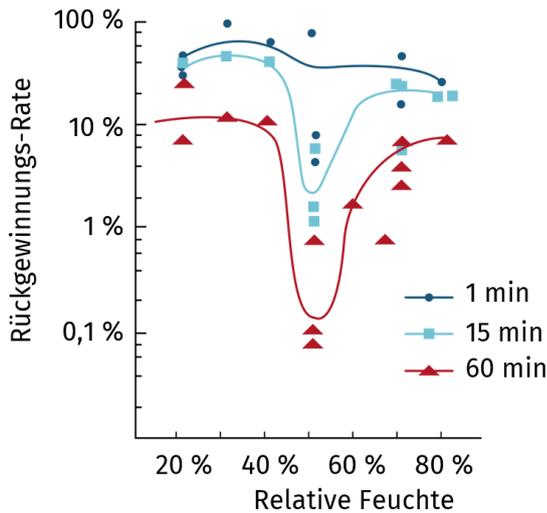


Abbildung 12 – Einfluss der relativen Luftfeuchte und der Zeit auf die Rückgewinnungsrate, welche die Prozentzahl der aktiven Influenzaviren widerspiegelt, eigene Darstellung nach [50].

ist vereinfacht in Abbildung 13 dargestellt. Die Auswertung der Infektiosität in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte wird für das gesamte untersuchte Größenspektrum in Abbildung 14 dargestellt. Dort wird ersichtlich, dass bei relativen Luftfeuchten von 7–23% ca. fünfmal mehr infektiöse Viren nach einer Stunde messbar sind als bei 43%. Oberhalb von 43% wird ein leichter Anstieg der Infektiosität gemessen, welcher allerdings weit unterhalb der maximal gemessenen Werte bleibt.

In einer Simulationsstudie von Yang und Marr wird betrachtet, wie sich die Luftwechselrate und die relative Luftfeuchte auf die Inaktivierung und Absetzung von Viren in emittierten Hustentropfen auswirken können. Hierbei wird gezeigt, dass mit steigender relativer Luftfeuchte die Absetzungsrate von Aerosolen und die Inaktivierungsrate der Viren erhöht werden. Die Absetzungsrate von Aerosolen innerhalb von 10 Minuten nach der Emission wird von 86% bei 10% relativer Luftfeuchte auf 91% bei 90% relativer Luftfeuchte gesteigert, während 0% der Viren bei 10% relativer Luftfeuchte und 28% bei 90% relativer Luftfeuchte nach 10 Minuten inaktiviert werden. Dabei werden für die Modellierung der Inakti-

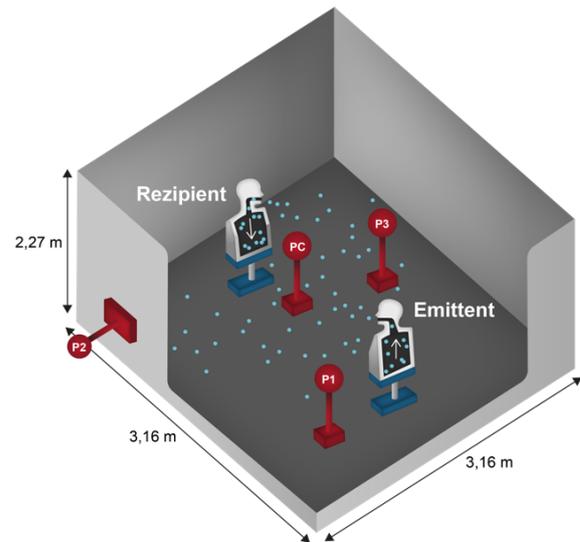


Abbildung 13 – Von Noti et al. verwendeter Versuchsaufbau, eigene Darstellung nach [51].

vierung die Ergebnisse von Harper genutzt [52]. Der Verdunstungsprozess wird durch niedrige relative Luftfeuchten beschleunigt, sodass größere Tröpfchen schneller schrumpfen und aufgrund von Auftriebseffekten länger in der Luft schweben können. Die beim Husten vermehrt ausgeschiedenen größeren Tröpfchen setzen sich bei höheren relativen Feuchten schneller ab, während sie bei niedrigen relativen Luftfeuchten schrumpfen und länger in der Luft verbleiben. Durch die Erhöhung der Luftwechselrate wird auch die Anzahl der kleineren Tröpfchen in der Raumluft reduziert, welche sich sonst aufgrund von Auftriebseffekten nicht absetzen. Durch die Kombination aller Effekte wird bei einer hohen relativen Luftfeuchte zusammen mit einer hohen Luftwechselrate die Anzahl der Viren in der Luft am schnellsten reduziert [53]. In dieser Veröffentlichung wird ein sehr detaillierter Einblick in die Simulation dieser Effekte gegeben, allerdings werden die direkten Einflüsse auf Viren, welche in Tröpfchen während der Verdunstung auftreten können, nicht berücksichtigt.

In einer zweiten Veröffentlichung werden diese Effekte von Yang et al. betrachtet, indem sie Versuche mit Influenzaviren in verschiedenen Aerosolen durchführen [44]. Hierbei werden die Auswirkungen in Tröpfchen aus Salzlösungen mit de-

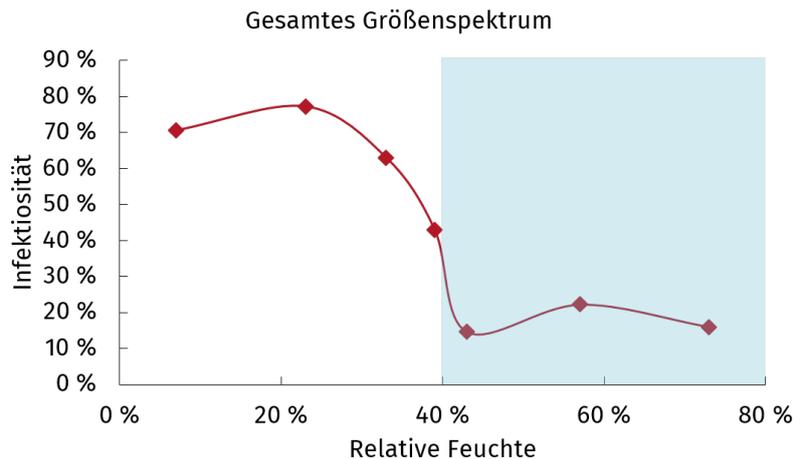


Abbildung 14 – Abhängigkeit der Infektiosität von der relativen Luftfeuchte, eigene Darstellung nach [51].

nen aus einer dem Speichel ähnlichen Lösung verglichen. Die Tröpfchen können bei hoher Salzkonzentration und geringer relativer Luftfeuchte vollständig verdunsten und auskristallisieren, was im Vergleich zu hochkonzentrierten Salzlösungen zu höheren Überlebenswahrscheinlichkeiten der Viren führt. Die geringsten Überlebenswahrscheinlichkeiten für Viren wurden unter Bedingungen gemessen, bei denen die Tröpfchen schnell verdunsten, aber nicht kristallisieren. Darüber hinaus werden die Viren in Aerosolen aus der speichelähnlichen Flüssigkeit durch das Vorhandensein von Proteinen positiv beeinflusst. Durch die Verdunstung bei niedrigeren relativen Luftfeuchten wird die Proteinkonzentration der Tröpfchen erhöht, was sich wiederum positiv auf die Viren auswirkt und die Inaktivierung reduziert. Bei hohen relativen Luftfeuchten werden für Viren in den speichelähnlichen Aerosoltröpfchen höhere Inaktivierungsraten gemessen, da die Tröpfchen Wasser aus der Luft aufnehmen und so die Konzentration der Proteine in der Flüssigkeit sinkt. Die Zusammensetzung der Trägerflüssigkeit eines virusbeladenen Aerosols hat somit einen zusätzlichen Einfluss auf die durch die relative Luftfeuchtigkeit bedingte Inaktivierung von Viren.

In der Veröffentlichung von Kudo et al. wird der Krankheitsverlauf von mit Influenza infizierten Mäusen untersucht, welche entweder bei 50 % relativer Luftfeuchte oder bei 10–20 % relati-

ver Luftfeuchte gehalten wurden [54]. Bei den Mäusen in der trockenen Umgebung werden deutlich schwerere Krankheitsverläufe festgestellt. Zudem wird die Zellheilung ihrer Lungenepithelzellen reduziert und die Aktivität von Interferon-aktivierten Genen, welche einen wichtigen Teil der körpereigenen Abwehrmechanismen darstellen, gedämpft. Dies führt zu einer schnelleren Virusausbreitung in den Körpern der Mäuse. Von den untersuchten Mäusen überlebte keines der Versuchstiere die Umgebung mit 20 % relativer Luftfeuchte, während in der Umgebung mit 50 % relativer Luftfeuchte 40 % der Mäuse die Infektion überlebten.

Lowen et al. zeigen, dass die aerosolgebundene Übertragung von Influenzaviren in Versuchen mit Meerschweinchen starke Abhängigkeiten von der relativen Luftfeuchte und der Temperatur aufweisen, siehe Abbildung 15. In ihren Versuchen wird die Übertragungsrate der Influenzaviren in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte bei moderaten (20 °C, rote Linie) und niedrigen (5 °C, blaue Linie) Temperaturen verglichen. In Abbildung 15 wird gezeigt, dass niedrige Temperaturen die Übertragung in weiten Bereichen der relativen Luftfeuchte begünstigen [55]. Dabei ist anzumerken, dass im Rahmen der Untersuchungen bei 20 °C fünf und bei 5 °C vier verschiedene diskrete relative Luftfeuchten untersucht worden sind und für jede Kombination aus relativer Luftfeuchte und Temperatur acht

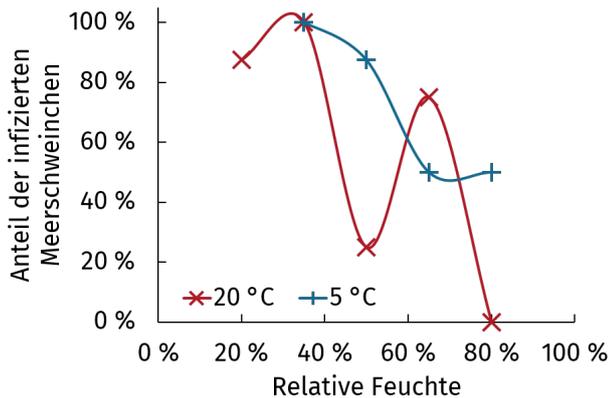


Abbildung 15 – Abhängigkeit der Infektionsrate der untersuchten Meerschweinchen in Abhängigkeit der umgebenden relativen Luftfeuchte und Temperatur, eigene Darstellung nach [55].

Meerschweinchen-Pärchen als Versuchstiere zur Verfügung standen. In Abbildung 15 wird eine Darstellung der in der Veröffentlichung aufgelisteten Messungen abgebildet. Die Kreuze der roten Linie zeigen die Messpunkte bei 20 °C, während die Pluszeichen der blauen Linie die Messungen bei 5 °C darstellen. Jeder Punkt im Diagramm zeigt somit, wie viele der jeweils acht untersuchten Meerschweinchen infiziert worden sind. Trotz der geringen Anzahl untersuchter Datenpunkte wird diese Veröffentlichung von 799 anderen Veröffentlichungen zitiert [56].

### 3.2.2. Coronaviren

Aufgrund der globalen Covid19-Pandemie 2020 und 2021 haben Coronaviren und deren Potential zur Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit durch das Auslösen des schweren akuten respiratorischen Syndroms (SARS) auch in der breiten Öffentlichkeit stark an Bedeutung gewonnen. Zudem unterscheiden sich die Einflüsse der relativen Luftfeuchte auf Coronaviren von denen auf Influenzaviren. Daher werden die Einflüsse auf Coronaviren im Folgenden separat betrachtet. Da die Ergebnisse aus der Literatur unterschiedliche Trends aufweisen, wird zwischen den Einflüs-

sen auf aerosolgebundene Viren und auf Oberflächen abgesetzte Viren unterschieden. Zudem werden im Kontext der Covid19-Pandemie die Wetterabhängigkeit von Infektionen und übergreifende Literaturstudien zu Coronaviren beschrieben. Im Allgemeinen muss bei der Auswertung zwischen Untersuchungen unterschieden werden, welche die jeweils konkret zu bewertenden Coronaviren verwenden und jenen, die für Menschen unschädliche Ersatzviren wie transmissiblen Gastroenteritisviren (TGEV) oder Maus Hepatitis Viren (MHV) einsetzen.

**Aerosole** Durch Ijaz et al. werden die Einflüsse der relativen Luftfeuchte ( $30 \pm 5\%$ ,  $50 \pm 5\%$ ,  $80 \pm 5\%$ ) und der Temperatur ( $6\text{ °C}$ ,  $20\text{ °C}$ ) auf das Coronavirus HCoV-229E untersucht. Bei einer mittleren relativen Luftfeuchte von  $50 \pm 5\%$  wird sowohl bei  $20\text{ °C}$  als auch bei  $6\text{ °C}$  die längste Überlebensdauer gemessen. Sowohl bei hohen ( $80 \pm 5\%$ ) als auch niedrigen ( $30 \pm 5\%$ ) relativen Luftfeuchten wird diese verkürzt. Bei moderaten Temperaturen ( $20\text{ °C}$ ) wird im Vergleich zu niedrigen Temperaturen ( $6\text{ °C}$ ) bei allen untersuchten relativen Luftfeuchten eine geringere Überlebensdauer gemessen. Die insgesamt niedrigste Überlebensdauer wird bei der Kombination von einer hohen relativen Luftfeuchte ( $80 \pm 5\%$ ) und einer moderaten Temperatur ( $20\text{ °C}$ ) gemessen [45].

Um die Einflüsse der relativen Luftfeuchte auf das Coronavirus SARS-CoV-2 zu ermitteln, wird von Smither et al. eine Studie durchgeführt, bei der die Überlebensdauer der Viren in Aerosolen basierend auf einer Gewebekultur-Nährlösung und basierend auf einer Lösung mit künstlichem Speichel untersucht wird. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Inaktivierung für die Gewebekultur-Nährlösung bei hohen relativen Luftfeuchten ( $68\text{--}88\%$ ) höher ist als bei mittleren relativen Luftfeuchten ( $40\text{--}60\%$ ). Bei künstlichem Speichel ist dieser Zusammenhang umgekehrt [57]. Ein mögliche Unsicherheit in dieser Studie besteht in den vergleichsweise breiten Untersuchungsbereichen der relativen Luftfeuchte, innerhalb derer zusätzliche Effekte auf-

treten können, wie für die Influenzaviren in den Untersuchungen von Hemmes et al. und Noti et al. gezeigt wurde [49, 51].

Durch Schuit et al. wird untersucht, welchen Einfluss die relative Luftfeuchte und künstliches Sonnenlicht auf SARS-CoV-2 in Aerosolen sowohl basierend auf Gewebekultur-Nährlösung als auch mit künstlichem Speichel haben. Die relative Luftfeuchte wird dabei in einem Bereich von 20–70 % variiert. Die zwei untersuchten Intensitäten des künstlichen Sonnenlichts entsprechen der natürlichen Sonnenstrahlung Mitte Juni und Anfang März bzw. Oktober mittags bei 40 Grad nördlicher Breite, wie zum Beispiel in Spanien oder Italien. Die Temperatur wird in dieser Versuchsreihe bei 20 °C konstant gehalten. Durch diese Untersuchung wird gezeigt, dass die solare Einstrahlung einen höheren Einfluss auf die Inaktivierungsrate von aerosolgebundenen SARS-CoV-2-Erregern hat als die relative Luftfeuchte. Ohne künstliche solare Einstrahlung werden Inaktivierungsraten von durchschnittlich 0,8 % pro Minute gemessen, während eine hohe künstliche solare Einstrahlung zu Inaktivierungsraten von durchschnittlich 26,1 % pro Minute führen. Ein Einfluss der relativen Luftfeuchte auf die Inaktivierungsrate kann in dieser Untersuchung nicht statistisch nachgewiesen werden [58].

In einer Folgestudie werden von Dabisch et al. neben den Einflüssen von relativer Luftfeuchte und künstlicher solarer Einstrahlung zusätzlich die Einflüsse der Temperatur auf SARS-CoV-2 in Aerosolen untersucht [59]. Dabei werden Teile des Versuchsaufbaus von Schuit et al. verwendet. Mit den Untersuchungen wird wie von Schuit et al. gezeigt, dass die künstliche solare Einstrahlung den größten Einfluss auf die Inaktivierungsrate von SARS-CoV-2 in Aerosolen hat. Zusätzlich wird sowohl für die Temperatur als auch für die relative Luftfeuchte ein statistisch signifikanter Einfluss auf die Inaktivierungsrate nachgewiesen. Die relative Luftfeuchte hat den geringsten Einfluss. So wird bei 20 °C und ohne solare Einstrahlung bei 20 % relativer Luftfeuchte eine Inaktivierungsrate von durchschnittlich 0,6 %

pro Minute und bei 70 % relativer Luftfeuchte von 1,5 % pro Minute nachgewiesen.

**Oberflächen** Neben der Übertragung durch Aerosole kann eine Viren-Infektion auch durch die Berührung von kontaminierten Oberflächen erfolgen, wenn eine Person nach dem Oberflächenkontakt anschließend beispielsweise über ihre Hände die Viren in den Bereich der eigenen Binde- oder Schleimhäute transportiert [60, 61].

Um die Überlebensdauer von Coronaviren auf Oberflächen zu bestimmen, wird von Casanova et al. eine Studie durchgeführt, bei der Temperaturen von 4, 20 und 40 °C und relative Luftfeuchten von 20, 50 und 80 % in allen Kombinationen eingestellt und die Überlebensdauer von Ersatzviren (TGEV und MHV), welche für Menschen ungefährlich sind, gemessen werden [62]. Die Versuche werden jeweils dreimal wiederholt. In den Ergebnissen wird eine Abhängigkeit der Inaktivierung von der Temperatur herausgestellt. Durch steigende Temperaturen werden die Viren schneller inaktiviert. Die schnellste Inaktivierung für beide verwendeten Ersatzviren wird bei 40 °C und 80 % relativer Luftfeuchte gemessen. Für 20 °C wird die höchste Inaktivierung auf Oberflächen bei 50 % relativer Luftfeuchte gemessen.

Durch Chan et al. werden Versuchsreihen zu den Überlebensdauern von Coronaviren auf Oberflächen durchgeführt [63]. In ihrer Studie werden die Bedingungen von klimatisierten Gebäuden (22 – 25 °C, 40 – 50 % relative Luftfeuchte) mit tropischen Bedingungen (38 °C, >95 % relative Luftfeuchte) verglichen. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die tropischen Umgebungsbedingungen zu kürzeren Überlebensdauern führen.

In den Literaturstudien von Otter et al. und Kampf et al. wird ein Überblick über aktuelle Studien zu den Überlebensdauern von Coronaviren auf Oberflächen gegeben. So wird durch Otter et al. zusammengefasst, dass Coronaviren deutlich längere Überlebensdauern auf trockenen Oberflächen aufweisen als Influenzaviren. Zudem sind die Überlebensdauern bei nied-

rigen Temperaturen gegenüber hohen Temperaturen länger [61]. In der Veröffentlichung von Kampf et al. wird ebenfalls geschlussfolgert, dass höhere Temperaturen die Überlebensdauer der Viren auf Oberflächen verkürzen. Bei Zimmertemperaturen werden Überlebensdauern der Viren in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit zwischen 2 Stunden auf Aluminium und 9 Tagen auf Plastik nachgewiesen. Bei einer Erhöhung der Temperatur werden in den dort genannten Veröffentlichungen kürzere Überlebensdauern gemessen [64].

Auf Basis der hier vorgestellten Studien kann übereinstimmend geschlussfolgert werden, dass höhere Temperaturen zu kürzeren Lebensdauern auf Oberflächen führen. In vereinzelt Untersuchungen zum Einfluss der relativen Luftfeuchte wird zudem gezeigt, dass niedrige relative Luftfeuchten zu geringeren Inaktivierungsraten führen.

**Wetterabhängigkeit** Die Einflüsse von relativer Luftfeuchte und Temperatur auf die Ausbreitung von Viren kann anhand historischer Krankheitsausbrüche analysiert werden, was bereits 1924 von Young für Influenzaviren gezeigt wurde [27]. Durch die aktuelle weltweite Pandemie werden vermehrt Studien zur Ausbreitung von SARS-CoV-2 anhand der Wetterlagen in Ausbruchgebieten durchgeführt. So werden die Daten mit Stand 10. März 2020 von 8 Städten mit hohen Infektionszahlen und mehr als 10 Todesfällen im betroffenen Land von Sajadi et al. ausgewertet und mit Städten mit geringen oder ohne Infektionsfälle verglichen. In den Ergebnissen wird gezeigt, dass Temperaturen zwischen 5 und 11 °C in Kombination mit geringen absoluten Luftfeuchten mit Ausbrüchen korrelieren [65]. Da die weltweite Datenlage am 10. März noch sehr gering war, müssen diese Ergebnisse im Kontext der folgenden, zu späteren Zeitpunkten durchgeführten, Studien betrachtet werden.

Durch Evangelista werden die Einflüsse der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchte in Innenräumen auf die Infektionszahlen in einem Kinderkrankenhaus in Philadelphia über einen

Zeitraum von 8 Jahren untersucht. Für Viren, welche mit dem SARS-CoV-2 vergleichbar sind, werden in den Monaten von Juni bis September Infektionszahlen nahe 0 oder eine Reduktion der Infektionszahlen um >99 % nachgewiesen [66]. Die Zusammenhänge zwischen relativer Luftfeuchte und den Infektionszahlen werden zwar im Text beschrieben, allerdings nicht statistisch nachgewiesen. Die Datenanalyse ist jedoch aufgrund ihres mehrjährigen Betrachtungszeitraumes interessant.

Durch Wang et al. wird die Abhängigkeit der Reproduktionsrate vom 6-Tages-Durchschnitt der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchte vor und während Ausbrüchen von SARS-CoV-2 in 100 chinesischen Städten im Januar und Februar 2020 und 1005 US-Landkreisen im März und April 2020 mit Hilfe von statistischen Methoden untersucht. Aus ihren Ergebnissen wird deutlich, dass ein 30 K Temperaturanstieg die Reproduktionszahl des Virus um 0,69 verringert. Bei einer um 25 % erhöhten relativen Luftfeuchte wird die Reproduktionszahl um 0,2 reduziert. Die Basisreproduktionszahl von SARS-CoV-2 beträgt in etwa 2,5 – 3 [67].

Ähnliche Zusammenhänge werden in der statistischen Analyse von Qi et al. zum Zusammenhang der Neuinfektionen von COVID-19 und der Außentemperatur sowie der relativen Luftfeuchte in China im Januar und Februar 2020 beschrieben. Dabei werden sowohl die Provinz Hubei, in welcher der Ursprung der Virusausbreitung nachgewiesen wurde, als auch 29 weitere Provinzen betrachtet. Mit den Ergebnissen wird gezeigt, dass ein Temperaturanstieg von 1 °C im Bereich der relativen Luftfeuchte von 67 – 85,5 % die Neuinfektionsanzahl um 36 – 57 % verringert. Weiterhin verringerte sich die Neuinfektionsanzahl durch einen Anstieg der relativen Luftfeuchte um 1 % im Temperaturbereich von 5 – 8,2 °C um 11 – 22 % [68]. In der Veröffentlichung werden jedoch auch Einschränkungen bezüglich der Ergebnisinterpretation genannt. So wurden weitere Einflussgrößen wie der sozial-ökonomische Status der Bevölkerung nicht berücksichtigt. Weiterhin ist der Betrachtungszeitraum kurz, sodass

der Einfluss von Kovariaten möglicherweise nicht korrekt erfasst werden konnte. Darüber hinaus wurden die Einflüsse von Interventionsmaßnahmen der Behörden, welche in Provinzen außerhalb von Hubei eingeleitet wurden, nicht in das Modell integriert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass wärmere und feuchtere Wetterbedingungen zu geringeren Infektionszahlen führen können. Insbesondere die quantitativen Ergebnisse und die abgeleiteten Zusammenhänge auf Basis von linearen Regressionen müssen jedoch hinsichtlich einer sicheren Belastbarkeit zusätzlich im Kontext von weiteren Einflussfaktoren wie politischen Maßnahmen und einem geänderten Verhalten der Bevölkerung betrachtet werden.

**Übergreifende Literaturstudien** Im Kontext der aktuellen COVID-19-Pandemie sind im Jahr 2020 eine Reihe an Literaturstudien erschienen, in welchen die Erkenntnisse aus früheren Studien und aktuellen Veröffentlichungen zusammen getragen worden sind. So wird in der bereits im März 2020 erschienenen Veröffentlichung von Moriyama et al. explizit auf eine Grenze von 40–60 % relativer Luftfeuchte hingewiesen, da beispielsweise Viren, die Atemwegsinfektionen auslösen können, in diesem Bereich stärker inaktiviert und die Atemwege bzw. Schleimhäute weniger belastet werden als bei trockenen Umgebungen [5]. Weiterhin sind die Krankheitsverläufe von infizierten Personen bei mittleren relativen Luftfeuchten milder. In der Veröffentlichung werden diverse Abwehrmechanismen des Körpers aufgelistet und es wird ein Überblick über die verschiedenen Einflüsse der relativen Luftfeuchte auf den Menschen gegeben.

In der Literaturstudie von Dietz et al. steht vor allem die Ausbreitung von SARS-CoV-2 in Gebäuden im Fokus. So wird gezeigt, dass die Verweilzeiten von Tröpfchen in der Luft durch höhere relative Luftfeuchten verkürzt und behüllte Viren direkt negativ beeinflusst werden können. Zudem werden auch zusätzliche ausbreitungshemmende Maßnahmen wie social-distancing und

die Einflüsse von direkter Sonneneinstrahlung auf Viren genannt [6].

In einer weiteren Literaturstudie zu den Einflüssen der relativen Luftfeuchte auf die Transportvorgänge von SARS-CoV-2 in Innenräumen wird von Ahlawat et al. herausgestellt, dass die Krankheitsverläufe bei relativen Luftfeuchten oberhalb von 40 % milder sind. Auf Basis der Literaturauswertung wird zur Verringerung der SARS-CoV-2-Ausbreitung eine Empfehlung für eine untere Grenze der relativen Luftfeuchte von 40 % in Innenräumen (insbesondere für Krankenhäuser, Büros und öffentlichen Transportmitteln) abgeleitet [69].

#### 4. Feuchtegrenzen in Normen und Richtlinien

In einer Veröffentlichung zum Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den thermischen Komfort wird von Berglund unter anderem auf die historische Entwicklung der geforderten Luftfeuchtegrenzen in der Norm ASHRAE Standard 55 eingegangen. Dort wird ersichtlich, dass im Laufe der Jahre die Vorgaben sowohl hinsichtlich der konkreten Grenzwerte als auch der Art der Definition anhand der relativen bzw. der absoluten Luftfeuchte variiert wurden. In der Norm ASHRAE Standard 55-1981 „Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy“ wird die Taupunkttemperatur von 17 °C, also eine absolute Luftfeuchte, als obere Grenze vorgegeben, während in der Auflage von 1992 die obere Grenze anhand einer festen relativen Luftfeuchte von 60 % festgelegt wird. Die oberen Grenzwerte wurden vor allem aufgrund der Vermeidung von Schimmelproblemen gewählt. In dem Addendum 55a von 1994 werden wiederum eine Feuchtkugeltemperatur von 18 °C im Winter und 20 °C im Sommer vorgegeben. Diese werden erstmalig im Kontext des menschlichen thermischen Komfortbereichs angepasst und sind gleichzeitig weniger restriktiv hinsichtlich des Betriebs der eingesetzten Klimageräte. Die untere Grenze wird in allen Versionen anhand einer Taupunkttemperatur von 3 °C

festgelegt [10]. In der aktuellen Auflage der Norm ASHRAE Standard 55 von 2013 wird die obere Grenze wiederum identisch zu der Version von 1981 mit einer Taupunkttemperatur von 17 °C vorgegeben, allerdings entfällt die untere Grenze in dieser Version vollständig [70]. Ergänzend dazu wird im ASHRAE Handbook - „HVAC Systems and Equipment“ ein Bereich der relativen Luftfeuchte von 30 – 60 % empfohlen [71].

In der Norm ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017 „Ventilation of Health Care Facilities“ werden für Krankenhäuser, Pflegeeinrichtungen und ambulante Gesundheitseinrichtungen unterschiedliche Auslegungswerte hinsichtlich der relativen Feuchte in Abhängigkeit der Funktion des betrachteten Raums genannt [72]. Falls untere Grenzen genannt werden, variieren diese zwischen 20 und 40 %. Die oberen Grenzen variieren zwischen 60 und 65 %. Von Mousavi et al. wird basierend auf den Arbeiten von Khodakarami et al., Wang et al. und Ascione et al. die Wichtigkeit des thermischen Komforts inklusive des Einflusses der relativen Luftfeuchte sowohl für die Gesundheit und das Wohlbefinden der Patienten als auch für die Sicherstellung der Arbeitsleistung der Angestellten beschrieben [73, 74, 75, 76].

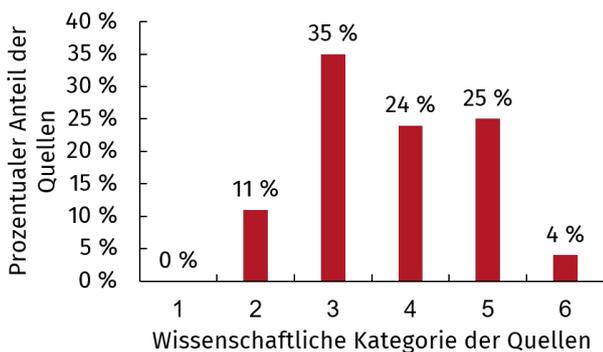


Abbildung 16 – Anzahl der Häufigkeit der wissenschaftlichen Kategorien der durch die Norm ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2013 verwendeten Quellen, eigene Darstellung nach [76].

Die wissenschaftliche Qualität der Quellen, welche in der Norm ANSI/ASHRAE/ASHE Standard

170-2013 „Ventilation of Health Care Facilities“ angegeben werden, wird durch Mousavi et al. geprüft und beschrieben [76, 77]. Die Qualität der Quellen wird in unterschiedliche Kategorien eingeteilt, welche in Tabelle 2 beispielhaft aufgelistet sind. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Abbildung 16 visualisiert und zeigen, dass keine der Quellen der wissenschaftlich hochwertigsten Kategorie 1 zugeordnet werden können. 11 % bzw. 35 % der Veröffentlichungen entsprechen den Kategorien 2 und 3, während 24 % andere Normen und Richtlinien (Kategorie 4), 25 % Expertenmeinungen und Fallstudien (Kategorie 5) und 4 % Empfehlungen von Herstellern (Kategorie 6) darstellen [76].

In der DIN EN 15251 werden die empfohlenen Grenzwerte der relativen Luftfeuchte bei installierten Be- oder Entfeuchtungsanlagen in vier Kategorien eingeteilt, siehe Tabelle 3. Für Neubau und Sanierungen wird mindestens Kategorie II als Basis zur Auslegung empfohlen, für die eine untere Grenze von 25 % und eine obere Grenze von 60 % angegeben wird. Darüber hinaus wird im Allgemeinen für die Bedingungen in Innenräumen ein oberer Grenzwert der absoluten Luftfeuchte von 11,5–12 g/kg empfohlen, oberhalb derer es zu Kondensation, Schimmelbildung und mikrobiellem Wachstum kommen kann. In Abbildung 17 sind die Abhängigkeiten von Wasserbeladung, Temperatur und relativer Luftfeuchte und deren Einflüsse auf die menschliche Gesundheit und den Komfort dargestellt. Allgemein wird ein Bereich der relativen Luftfeuchte von 30–65 % und ein Temperaturbereich von 20–26 °C als Komfortzone empfohlen. Bei relativen Luftfeuchten unterhalb von 30 % können Schleimhäute ausgetrocknet und statische Aufladungen der Kleidung und des Körpers auftreten. Unterhalb von 20 % können zudem Trockenheit und Reizungen der Augen und der Luftwege auftreten. [7].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zwischen den verschiedenen Normen und auch innerhalb der Normen unterschiedliche Grenzwerte für die relative Luftfeuchte empfohlen werden. Die Angaben für die untere Grenze va-

Tabelle 2 – Einordnung der in der Norm ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2013 verwendeten Quellen anhand ihrer wissenschaftlichen Qualität [76].

Kategorie der Quelle	Beispiel
Kategorie 1	Review von systematischen, randomisierten Doppelblindstudien
Kategorie 2	Gut designtes einzelnes Experiment
Kategorie 3	Qualitative Studie
Kategorie 4	Normen und Richtlinien
Kategorie 5	Expertenmeinungen und Fallstudien
Kategorie 6	Empfehlungen von Herstellern

Tabelle 3 – Empfohlene Be- und Entfeuchtungsgrenzen der Raumklimakategorien bei installierten Be- und Entfeuchtungsanlagen in der DIN EN 15251 [7].

Kategorie	Auslegungswert Befeuchtung	Auslegungswert Entfeuchtung
I	30 %	50 %
II	25 %	60 %
III	20 %	70 %
IV	<20 %	>70 %

riieren dabei zwischen 20 und 40 % und für die obere Grenze zwischen 50 und 70 %.

## 5. Diskussion

Aus den vorherigen Abschnitten 2, 3 und 4 geht hervor, dass die relative Luftfeuchte sich unterschiedlich auf den Komfort, die Gesundheit und auf Krankheitserreger und Schadstoffe auswirkt und je nach Betrachtungskriterium unterschiedliche Grenzwerte oder Zielwerte einzuhalten sind. Diese Variabilität hinsichtlich der Grenzwerte findet sich unter Berücksichtigung der entsprechenden Anforderungen an technische Anlagen und deren Umsetzung auch in den genannten Normen und Richtlinien wieder.

Dennoch wird oftmals auch ein allgemeiner optimaler Bereich der relativen Luftfeuchte von 40–60 % genannt. Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen dieser Angabe und den dieser zugrundeliegenden Untersuchungen beschrieben. In den in dieser Veröffentlichung verwendeten Quellen wird die Grenze von 40–60 % zuerst 1985 von Sterling et al. und 1986 von Arundel et al. genannt, welche ein zusammenhängendes Forscherteam bilden und deren For-

schungsergebnisse zuerst in ASHRAE Transactions und im folgenden Jahr erneut in Environmental Health Perspectives veröffentlicht wurden [1, 2]. In Abbildung 18 werden die Ergebnisse für unterschiedliche Einflussgrößen wie Bakterien, Viren, Schimmel aber auch auf Infektionsverläufe der Atemorgane vereinfacht visualisiert. Ein ansteigender roter Balken verdeutlicht eine zunehmende Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit. In dem Diagramm wird ersichtlich, dass der für den Menschen optimale Bereich in etwa zwischen 40–60 % relativer Luftfeuchte liegt (dunkelblauer Bereich). Im Vergleich mit dem empfohlenen Grenzbereich im ASHRAE Handbook - „HVAC Systems and Equipment“ von 30–60 % (hellblauer und dunkelblauer Bereich) wird hier zugunsten der einfacheren technischen Realisierbarkeit der empfohlene untere Grenzwert um 10 % geringer gewählt, wengleich als Grundlage für den angeführten Grenzbereich die Ergebnisse von Arundel et al. angegeben werden [71].

Die beiden genannten Veröffentlichungen von Sterling et al. und Arundel et al. stellen in einer Vielzahl an wissenschaftlichen Publikationen die Grundlage für die Forderung nach einem Zielbereich der relativen Luftfeuchte von 40–60 %

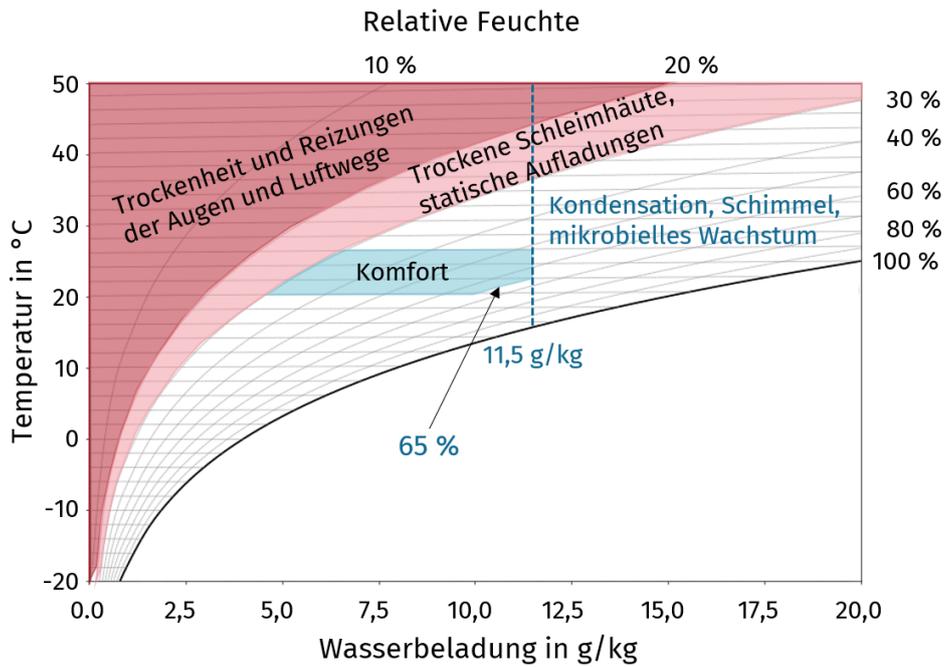


Abbildung 17 – Nach DIN 15251 empfohlene Grenzwerte für Innenräume hinsichtlich Temperatur, relativer und absoluter Luftfeuchte, eigene Darstellung nach [7].

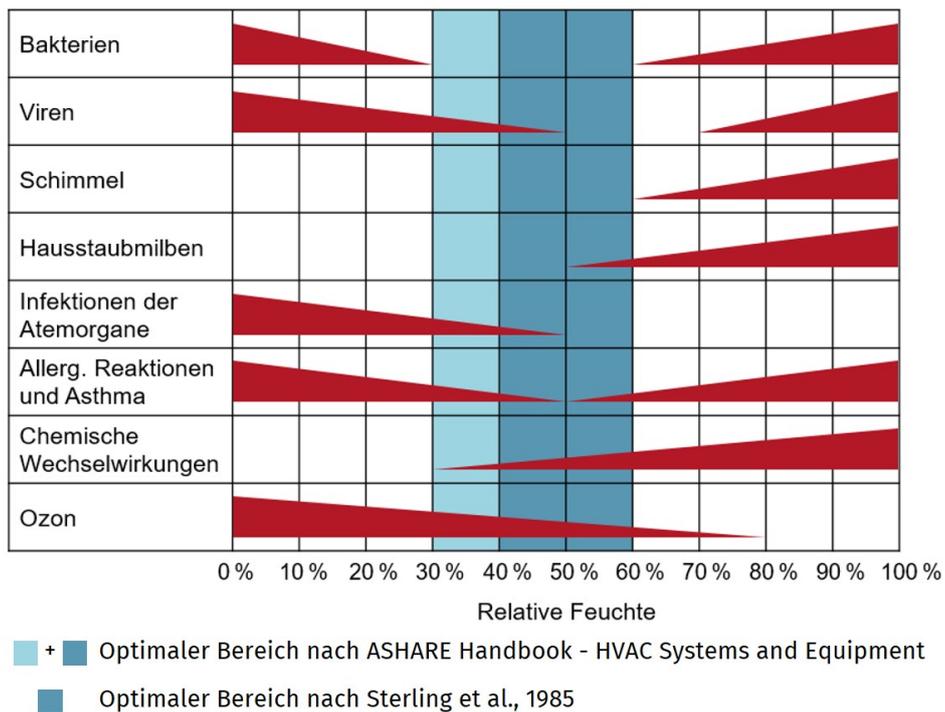


Abbildung 18 – Optimaler Bereich der relativen Luftfeuchte zur Verringerung von Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit, eigene Darstellung nach [2] und [71].

dar. So wird beispielsweise in den Review-Papern von Baughman und Arens, Tang, Derby und Pash, Wolkoff und Moriyama et al. direkt auf Sterling und Arundel Bezug genommen und die Forde-

rung dieses Feuchtebereichs explizit genannt [5, 8, 39, 78, 79]. In diesen Review-Papern werden jedoch auch neuere Quellen zitiert, die prinzipiell die Erkenntnisse von Sterling et al. und Arundel

et al. bestätigen und ergänzen. Dietz et al. nennen in ihrem Review zudem die gleichen Grenzen von 40–60 % ohne direkt auf Arundel und Sterling zu referenzieren [6]. Dabei werden von Dietz et al. vor allem neuere Quellen zitiert, die insbesondere im Kontext mit dem SARS-CoV-2-Erreger stehen und auch in der hier vorliegenden Veröffentlichung in den Abschnitten 2 und 3 beschrieben werden. Derby et al. weisen zudem darauf hin, dass in einer Vielzahl an Studien oftmals nur wenige konkrete Feuchtwerte untersucht worden sind und benennen den Bedarf für weitere Untersuchungen insbesondere mit größeren Stichproben in realen Umgebungen wie zum Beispiel in Feldtests [79, 80].

Um einen besseren Überblick über die Studien zu erhalten, in denen eigenständige experimentelle Untersuchungen durchgeführt und die insbesondere nach der Veröffentlichung von Arundel et al. publiziert worden sind, werden die Ergebnisse systematisch in Abbildung 19 zusammengetragen. Dort sind die jeweils untersuchten Bereiche oder Werte der relativen Luftfeuchte aus den zuvor zusammengefassten Veröffentlichungen dargestellt. Die grauen Punkte markieren die jeweils in der Veröffentlichung konkret angegebenen Werte der untersuchten relativen Luftfeuchte. Falls anstatt von konkreten Einzelwerten ein Bereich der untersuchten relativen Luftfeuchte angegeben wird, erfolgt die Darstellung anhand von schwarzen Balken. Mit den blauen Kreisen und Ellipsen werden die für den Menschen besten Werte oder Bereiche der jeweiligen Untersuchung hervorgehoben. Dabei gilt es zu beachten, dass die blauen Markierungen immer nur das Optimum für den Menschen in Bezug auf die jeweils untersuchten Feuchtwerte und nicht immer ein für den gesamten Bereich zwischen 0–100 % geltendes globales Optimum darstellen. Um die Übersichtlichkeit zu verbessern, werden die Untersuchungen hinsichtlich der Kriterien Komfort, Augen, Gesundheit sowie der Einflüsse auf Influenzaviren und Coronaviren unterschieden.

Für das Kriterium Komfort existiert für die Untersuchung von Rohles keine Optimum-Markierung,

da sich der in Abschnitt 2.1 beschriebene Einfluss auf das thermische Empfinden nicht allgemein als positiv oder negativ bewerten lässt und immer im Gesamtkontext der vorherrschenden thermischen Umgebung betrachtet werden muss. Zudem wird ersichtlich, dass bezogen auf die empfundene Luftqualität niedrige Feuchten von Vorteil sind.

Für das Kriterium Augen zeigen die Ergebnisse, dass die jeweils höchsten Feuchten aus den Untersuchungen zu den geringsten Beschwerden führen. Für das Kriterium Gesundheit wird deutlich, dass der untersuchte Feuchtebereich sich nur von geringen bis zu mit ca. 60 % mittleren Feuchten erstreckt. Hier stellen übereinstimmend die mittleren Feuchten die besten Bedingungen für den Menschen dar, um ein Austrocknen der Haut und der Schleimhäute und eine damit einhergehende Anfälligkeit für Infektionen zu verringern.

Hinsichtlich der Untersuchungen zu Influenza- und Coronaviren wird deutlich, dass oftmals über den gesamten Feuchtebereich Untersuchungen durchgeführt worden sind. Die jeweils optimalen Werte der relativen Luftfeuchte liegen im Bereich zwischen 40 und 100 %. Dass die Markierungen für das Optimum teils im Bereich um 50 % und teils bei 80 % und mehr liegen, ist auf den jeweiligen Fokus der Untersuchung zurückzuführen. So werden bei Yang et al. durch Modellierung und Simulation das Absetzungsverhalten von Aerosolen in der Luft und die Inaktivierung von Influenzaviren untersucht, welche beide modellbedingt ein Maximum bei der höchsten relativen Luftfeuchte aufweisen. Hinsichtlich der Inaktivierung von Influenzaviren weisen die früheren Ergebnisse von Hemmes et al. und Harper et al. ein Maximum bei hohen Luftfeuchten auf, wohingegen die Untersuchungen von Schaffer et al., Yang et al. und Noti et al. ein Maximum bei ca. 50 % beschreiben.

Für Coronaviren gilt, dass sich je nach Virus und weiterer Randbedingungen wie Temperatur und Trägermedium die Einflüsse der relativen Luftfeuchte unterscheiden können. Ijaz et al. zeigen für das Coronavirus 229E, dass bei der höchsten

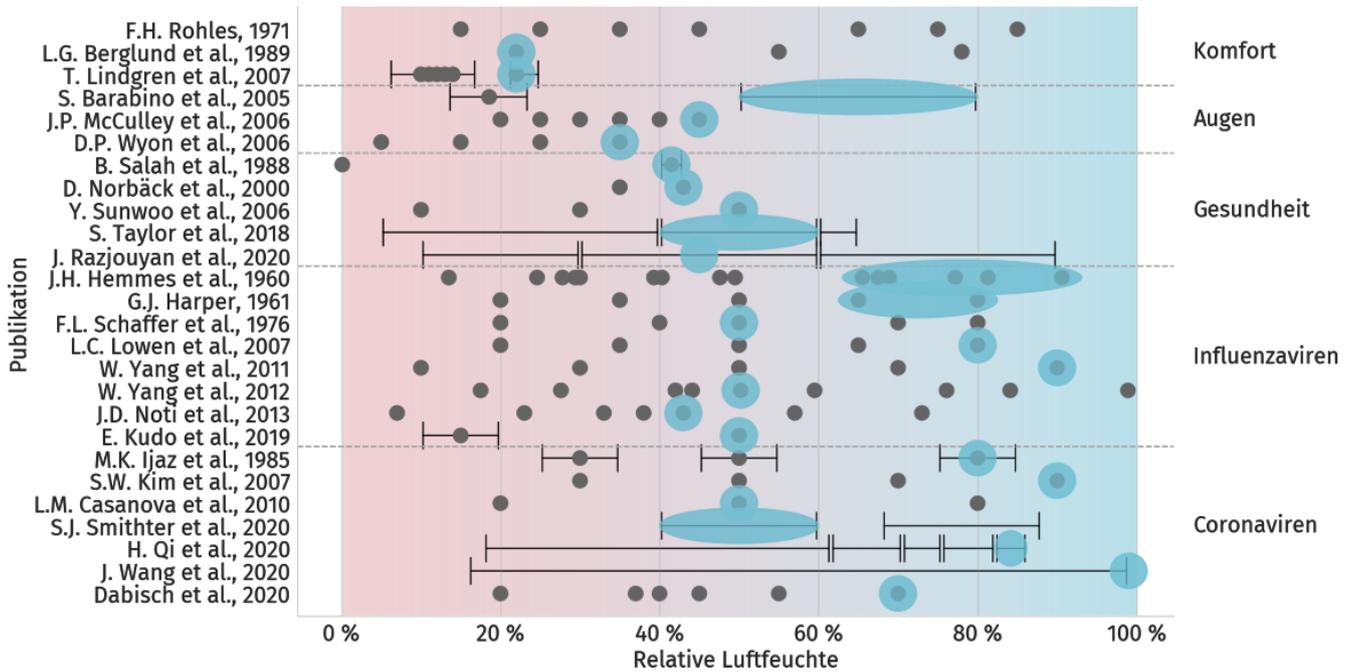


Abbildung 19 – Darstellung der experimentell untersuchten relativen Luftfeuchten der vorgestellten Publikationen. Hervorhebung der Werte und Bereiche, welche für den Menschen die jeweils geringsten gesundheitlichen Beeinträchtigungen bedeuten.

untersuchten relativen Luftfeuchte bei ca. 80 % die höchste Inaktivierung erreicht werden konnte. Kim et al. beschreiben bei 90 % eine maximale Inaktivierung von transmissiblen Gastroenteritisviren (TGEV) von Schweinen, welche als Ersatzviren für SARS-Viren eingesetzt wurden. Sie weisen jedoch darauf hin, dass die Effekte für SARS-Coronaviren voraussichtlich ähnlich sind, dies aber noch zu bestätigen ist. Casanova et al. zeigen, dass die Inaktivierung der Ersatzviren TGEV und MHV (Maus Hepatitis Virus) auf Oberflächen insbesondere bei einer für Innenräume typischen Temperatur von 20 °C bei 50 % relativer Luftfeuchte höher ist als bei 20 % und 80 %. Im Gegensatz dazu wird bei 40 °C die höchste Inaktivierung bei 80 % erreicht.

Insbesondere für den aktuellen SARS-CoV-2-Erreger deuten die Ergebnisse neuerer Studien darauf hin, dass mit steigender relativer Luftfeuchte die Inaktivierung des Virus erhöht wird. Dies wird sowohl von Laboruntersuchungen von Darbish et al. als auch durch Analysen des Infektionsgeschehens in Abhängigkeit des Wetters von Qi et al. und Wang et al. nachgewiesen. Die

Ergebnisse von Smither et al. zeigen zudem, dass die Inaktivierung des Virus in Aerosolen abhängig von der Trägerflüssigkeit ist. Für künstlichen Speichel ist die Inaktivierung bei mittlerer relativer Luftfeuchte höher ist als bei hoher relativer Luftfeuchte. Im Gegensatz dazu ist für eine auf Gewebekulturen bestehenden Nährlösung die Inaktivierung bei hoher relativer Luftfeuchte höher als bei mittlerer relativer Luftfeuchte.

## 6. Zusammenfassung

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Einflüsse der relativen Luftfeuchte für jedes Kriterium individuell betrachtet werden sollten. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Einflüsse auf die Inaktivierung von Krankheitserregern, siehe Abbildung 11, 12, 14 und 19. Insgesamt überwiegen jedoch bei mittleren relativen Luftfeuchten die Vorteile für den Menschen. Wird in Abbildung 19 zusätzlich die obere Grenze von etwa 70 % zur Vermeidung von mikrobiellem Wachstum und Schimmelbildung berücksichtigt, so ergibt sich in

guter Übereinstimmung mit den Empfehlungen von Arundel et al. ein optimaler Bereich der relativen Luftfeuchte von 40 – 60 % bzw. 40 – 70 %. Diese Erkenntnisse lassen sich auch größtenteils in den Forderungen der Normung wiederfinden. Dass in der Normung die empfohlenen oberen Grenzwerte mit 65 % bzw. 11,5 – 12 g/kg tendenziell etwas konservativer angesetzt werden als die empfohlenen unteren Grenzwerte mit 30 % ist vermutlich auf die nur mit großem Aufwand flächendeckende technische Realisierbarkeit zurückzuführen.

Auch wenn die direkten und indirekten Einflüsse der relativen Luftfeuchte in Innenräumen auf die menschliche Gesundheit mittlerweile prinzipiell erkannt sind, so sind dennoch weitere Studien notwendig, um einzelne und kombinierte Effekte insbesondere in realen Umgebungen noch genauer verstehen und quantifizieren zu können. Weiterhin werden Studien benötigt, um den energetischen und wirtschaftlichen Aufwand von technischen Lösungen zur Sicherstellung der abgeleiteten Innenraumbedingungen in den Kontext der verringerten Beeinträchtigungen der menschlichen Gesundheit und Produktivität zu setzen.

## Danksagung

Wir danken dem Fachverband Gebäude-Klima e.V. für die finanzielle Unterstützung!

## Literatur

- [1] Sterling, E. M., Arundel, A., Sterling, T. D. Criteria for human exposure to humidity in occupied buildings. *ASHRAE transactions* 91.1, pages 611–622, 1985.
- [2] A. V. Arundel, E. M. Sterling, J. H. Biggin, and T. D. Sterling. Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental Health Perspectives*, 65:351–361, 1986.
- [3] Stephanie Taylor and Michael C. Tasi. Low indoor-air humidity in an assisted living facility is correlated with increased patient illness and cognitive decline. In ISIAQ, editor, *2018 Indoor Air Proceedings*. 2018.
- [4] ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols, 14.04.2020.
- [5] Miyu Moriyama, Walter J. Hugentobler, and Akiko Iwasaki. Seasonality of Respiratory Viral Infections. *Annual review of virology*, 2020.
- [6] Leslie Dietz, Patrick F. Horve, David A. Coil, Mark Fretz, Jonathan A. Eisen, and Kevin van den Wymelenberg. 2019 Novel Coronavirus (COVID-19) Pandemic: Built Environment Considerations To Reduce Transmission. *mSystems*, 5(2), 2020.
- [7] DIN. DIN EN 15251:2012-12: Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung, 2012.
- [8] Peder Wolkoff. Indoor air humidity, air quality, and health - An overview. *International journal of hygiene and environmental health*, 221(3):376–390, 2018.
- [9] L. G. Berglund and W. S. Cain. Perceived air quality and the thermal environment. In ASHRAE, editor, *Proceedings of ASHRAE/SOEH Conference IAQ*, pages 93–99, 1989.
- [10] L. G. Berglund. Comfort and Humidity. *ASHRAE Journal*, (August):35–41, 1998.
- [11] T. Lindgren, D. Norbäck, and G. Wieslander. Perception of cabin air quality in airline crew related to air humidification, on intercontinental flights. *Indoor air*, 17(3):204–210, 2007.
- [12] Joseph E. Laviana, Frederick H. Rohles, and Linda I. Hoffberg. Dry Environments: The Influence of Low Humidity on Comfort and Health. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 31(10):1101–1104, 1987.
- [13] W. F. Kerka and C. M. Humphreys. Temperature and Humidity Effect on Odor Perception.

- tion: ASHRAE Research Report No. 1587. In ASHRAE, editor, *ASHRAE Transactions (Vol. 62)*, page 531. 1956.
- [14] ISO. Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005, 2005-11.
- [15] F. H. Rohles. Thermal sensations of sedentary man in moderate temperatures. *Human factors*, 13(6):553–560, 1971.
- [16] Frederick H. Rohles Jr. Humidity, human factors, and the energy shortage. *ASHRAE Trans.; (United States)*, 81, 1975.
- [17] P. Wolkoff. External eye symptoms in indoor environments. *Indoor air*, 27(2):246–260, 2017.
- [18] Peder Wolkoff. The mystery of dry indoor air - An overview. *Environment international*, 121(Pt 2):1058–1065, 2018.
- [19] Peder Wolkoff. Dry eye symptoms in offices and deteriorated work performance – A perspective. *Building and Environment*, 172:106704, 2020.
- [20] Stefano Barabino, Linling Shen, Lu Chen, Saadia Rashid, Maurizio Rolando, and M. Reza Dana. The controlled-environment chamber: a new mouse model of dry eye. *Investigative ophthalmology & visual science*, 46(8):2766–2771, 2005.
- [21] Yujin Sunwoo, Chinmei Chou, Junko Takeshita, Motoko Murakami, and Yutaka Tochihara. Physiological and subjective responses to low relative humidity in young and elderly men. *Journal of physiological anthropology*, 25(3):229–238, 2006.
- [22] David Wyon, Lei Fang, Love Lagercrantz, and P. Ole Fanger. Experimental Determination of the Limiting Criteria for Human Exposure to Low Winter Humidity Indoors (RP-1160). *HVAC&R Research*, 12(2):201–213, 2006.
- [23] Dan Norbäck, Gunilla Wieslander, Klas Nordström, Robert Wålinder, and Per Venge. The Effect of Air Humidification on Symptoms and Nasal Patency, Tear Film Stability, and Biomarkers in Nasal Lavage: A 6 Weeks' Longitudinal Study. *Indoor and Built Environment*, 9(1):28–34, 2000.
- [24] Helmholtz Zentrum München. Partikel im Körper: Transportvorgänge von Partikeln in der Lunge.
- [25] A. N. Freed and M. S. Davis. Hyperventilation with dry air increases airway surface fluid osmolality in canine peripheral airways. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 159(4 Pt 1):1101–1107, 1999.
- [26] Boujemâa Ben Salah, A. T. Dinh Xuan, J. L. Fouilladieu, Alain Lockhart, and Jacques Regnard. Nasal mucociliary transport in healthy subjects is slower when breathing dry air. *The European respiratory journal*, 1988.
- [27] Matthew Young. The influence of weather conditions on the mortality from bronchitis and pneumonia in children. *Epidemiology & Infection*, 23(2):151–175, 1924.
- [28] Jennifer L. Nguyen and Douglas W. Dockery. Daily indoor-to-outdoor temperature and humidity relationships: a sample across seasons and diverse climatic regions. *International journal of biometeorology*, 60(2):221–229, 2016.
- [29] Günther Ritzel. Sozialmedizinische Erhebungen zur Pathogenese und Prophylaxe von Erkältungskrankheiten. *Zeitschrift für Präventivmedizin - Revue de Médecine Préventive*, 11(1):9–16, 1966.
- [30] C. S. Sale. Humidification to reduce respiratory illnesses in nursery school children. *Southern medical journal*, 65(7):882–885, 1972.
- [31] G. H. Green. The Effect of Indoor Relative Humidity on Absenteeism and Colds in Schools. *ASRAE JOURNAL*, 1975.

- [32] G. H. Green. Indoor relative humidities in winter and the related absenteeism. In ASHRAE, editor, *ASHRAE Transactions (Vol. 91) (1)*. 1985.
- [33] R. Wiik. Indoor productivity measured by common response patterns to physical and psychosocial stimuli. *Indoor air*, 21(4):328–340, 2011.
- [34] Kazue Okamoto-Mizuno, Kazuyo Tsuzuki, Koh Mizuno, and Tatsuya Iwaki. Effects of partial humid heat exposure during different segments of sleep on human sleep stages and body temperature. *Physiology & behavior*, 83(5):759–765, 2005.
- [35] Zachary A. Caddick, Kevin Gregory, and Erin E. Flynn-Evans. Sleep Environment Recommendations for Future Spaceflight Vehicles. In Neville Stanton, Steven Landry, Giuseppe Di Bucchianico, and Andrea Vallicelli, editors, *Advances in human aspects of transportation*, volume 484 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pages 923–933. Springer, Cham, 2017.
- [36] Georg Nilius, Karl J. Franke, Ulrike Domanski, Maik Schroeder, and Karl H. Ruhle. Effect of APAP and heated humidification with a heated breathing tube on adherence, quality of life, and nasopharyngeal complaints. *Sleep & breathing = Schlaf & Atmung*, 20(1):43–49, 2016.
- [37] Javad Razjouyan, Hyoki Lee, Brian Gilligan, Casey Lindberg, Hung Nguyen, Kelli Canada, Alex Burton, Amir Sharafkhaneh, Karthik Srinivasan, Faiz Currim, Sudha Ram, Matthias R. Mehl, Nicole Goebel, Melisa Lunden, Seema Bhangar, Judith Heerwagen, Kevin Kampschroer, Esther M. Sternberg, and Bijan Najafi. Wellbuilt for wellbeing: Controlling relative humidity in the workplace matters for our health. *Indoor air*, 30(1):167–179, 2020.
- [38] Watcharoot Kanchongkittiphon, Mark J. Mendell, Jonathan M. Gaffin, Grace Wang, and Wanda Phipatanakul. Indoor environmental exposures and exacerbation of asthma: an update to the 2000 review by the Institute of Medicine. *Environmental Health Perspectives*, 123(1):6–20, 2015.
- [39] Anne V. Baughman and Edward A. Arens. Indoor humidity and human health - Part I: Literature review of health effects of humidity-influenced indoor pollutants. *ASHRAE Transactions*, (102-1):193–211, 1996.
- [40] M. J. Mendell and K. Kumagai. Observation-based metrics for residential dampness and mold with dose-response relationships to health: A review. *Indoor air*, 27(3):506–517, 2017.
- [41] L. G. Arlian, J. S. Neal, M. S. Morgan, D. L. Vyszynski-Moher, C. M. Rapp, and A. K. Alexander. Reducing relative humidity is a practical way to control dust mites and their allergens in homes in temperate climates. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 107(1):99–104, 2001.
- [42] Dirk Müller, Kai Rewitz, Dennis Derwein, Tobias Maria Burgholz, Marcel Schweiker, Janine Bardey, and Peter Tappler. Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen.
- [43] Vahid Hosseini. SARS-CoV-2 Virulence: Interplay of Floating Virus-Laden Particles, Climate, and Humans. *Advanced biosystems*, 4(7):e2000105, 2020.
- [44] Wan Yang, Subbiah Elankumaran, and Lindsey C. Marr. Relationship between humidity and influenza A viability in droplets and implications for influenza’s seasonality. *PloS one*, 7(10), 2012.
- [45] M. K. Ijaz, A. H. Brunner, S. A. Sattar, R. C. Nair, and C. M. Johnson-Lussenburg. Survival characteristics of airborne human coronavirus 229E. *The Journal of general virology*, 66 ( Pt 12):2743–2748, 1985.
- [46] Ka man Lai, Zaheer Ahmad Nasir, and Jonathon Taylor. Bioaerosols and Hospital Infections. In Ian Colbeck, editor, *Aerosol Science*, pages 271–289. Wiley, s.l., 2014.

- [47] World Health Organization. *Report on the burden of endemic health care-associated infection worldwide*. World Health Organization, 2011.
- [48] William C. Hinds. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. A Wiley-Interscience publication. Wiley-Interscience, s.l., 2. Aufl. edition, 1999.
- [49] J. H. Hemmes, K. C. Winkler, and S. M. Kool. Virus survival as a seasonal factor in influenza and poliomyelitis. *Nature*, 188(4748):430–431, 1960.
- [50] F. L. Schaffer, M. E. Soergel, and D. C. Straube. Survival of airborne influenza virus: effects of propagating host, relative humidity, and composition of spray fluids. *Archives of virology*, 51(4):263–273, 1976.
- [51] John D. Noti, Francoise M. Blachere, Cynthia M. McMillen, William G. Lindsley, Michael L. Kashon, Denzil R. Slaughter, and Donald H. Beezhold. High humidity leads to loss of infectious influenza virus from simulated coughs. *PloS one*, 8(2):e57485, 2013.
- [52] G. J. HARPER. Airborne micro-organisms: survival tests with four viruses. *The Journal of Hygiene*, 59:479–486, 1961.
- [53] Wan Yang and Linsey C. Marr. Dynamics of airborne influenza A viruses indoors and dependence on humidity. *PloS one*, 6(6):e21481, 2011.
- [54] Eriko Kudo, Eric Song, Laura J. Yockey, Tasfia Rakib, Patrick W. Wong, Robert J. Homer, and Akiko Iwasaki. Low ambient humidity impairs barrier function and innate resistance against influenza infection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(22):10905–10910, 2019.
- [55] Anice C. Lowen, Samira Mubareka, John Steel, and Peter Palese. Influenza virus transmission is dependent on relative humidity and temperature. *PLoS pathogens*, 3(10):1470–1476, 2007.
- [56] PLOS. Influenza Virus Transmission Is Dependent on Relative Humidity and Temperature: Zuletzt am 03.02.2021 abgerufen unter <https://journals.plos.org/plospathogens/article?id=10.1371/journal.ppat.0030151>, 2021.
- [57] Sophie J. Smither, Lin S. Eastaugh, James S. Findlay, and Mark S. Lever. Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity. *Emerging microbes & infections*, 9(1):1415–1417, 2020.
- [58] Michael Schuit, Shanna Ratnesar-Shumate, Jason Yolitz, Gregory Williams, Wade Weaver, Brian Green, David Miller, Melissa Krause, Katie Beck, Stewart Wood, Brian Holland, Jordan Bohannon, Denise Freeburger, Idris Hooper, Jennifer Biryukov, Louis A. Altamura, Victoria Wahl, Michael Hevey, and Paul Dabisch. Airborne SARS-CoV-2 Is Rapidly Inactivated by Simulated Sunlight. *The Journal of infectious diseases*, 222(4):564–571, 2020.
- [59] Paul Dabisch, Michael Schuit, Artemas Herzog, Katie Beck, Stewart Wood, Melissa Krause, David Miller, Wade Weaver, Denise Freeburger, Idris Hooper, Brian Green, Gregory Williams, Brian Holland, Jordan Bohannon, Victoria Wahl, Jason Yolitz, Michael Hevey, and Shanna Ratnesar-Shumate. The influence of temperature, humidity, and simulated sunlight on the infectivity of SARS-CoV-2 in aerosols. *Aerosol Science and Technology*, pages 1–12, 2020.
- [60] World Health Organization. *Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care health care: WHO Guidelines*. Pandemic and Epidemic Diseases, World Health Organization, Geneva, 2014.
- [61] J. A. Otter, C. Donskey, S. Yezli, S. Douthwaite, S. D. Goldenberg, and D. J. Weber. Transmission of SARS and MERS coronaviruses and influenza virus in healthcare settings: the possible role of dry surface contamination.

- The Journal of hospital infection*, 92(3):235–250, 2016.
- [62] Lisa M. Casanova, Soyoung Jeon, William A. Rutala, David J. Weber, and Mark D. Sobsey. Effects of air temperature and relative humidity on coronavirus survival on surfaces. *Applied and environmental microbiology*, 76(9):2712–2717, 2010.
- [63] K. H. Chan, J. S. Malik Peiris, S. Y. Lam, L. L. M. Poon, K. Y. Yuen, and W. H. Seto. The Effects of Temperature and Relative Humidity on the Viability of the SARS Coronavirus. *Advances in virology*, 2011, 2011.
- [64] G. Kampf, D. Todt, S. Pfaender, and E. Steinmann. Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *The Journal of hospital infection*, 104(3):246–251, 2020.
- [65] Mohammad M. Sajadi, Parham Habibzadeh, Augustin Vintzileos, Shervin Shokouhi, Fernando Miralles-Wilhelm, and Anthony Amoroso. Temperature, Humidity, and Latitude Analysis to Estimate Potential Spread and Seasonality of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *JAMA network open*, 3(6):e2011834, 2020.
- [66] Alan T. Evangelista. *The Seasonal End of Human Coronavirus Hospital Admissions with Implications for SARS-CoV-2*. 2020.
- [67] Jingyuan Wang, Ke Tang, Kai Feng, and Weifeng Lv. High Temperature and High Humidity Reduce the Transmission of COVID-19. *SSRN Electronic Journal*, 2020.
- [68] Hongchao Qi, Shuang Xiao, Runye Shi, Michael P. Ward, Yue Chen, Wei Tu, Qing Su, Wenge Wang, Xinyi Wang, and Zhijie Zhang. COVID-19 transmission in Mainland China is associated with temperature and humidity: A time-series analysis. *The Science of the total environment*, 728:138778, 2020.
- [69] Ajit Ahlawat, Alfred Wiedensohler, and Sumit Kumar Mishra. An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(9):1856–1861, 2020.
- [70] ANSI/ASHRAE. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, 2013.
- [71] ASHRAE, editor. *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment*. 2016.
- [72] ASHRAE. *ANSI/ASHRAE/ASHE - Ventilation of Health Care Facilities*.
- [73] Jamal Khodakarami and Nazanin Nasrollahi. Thermal comfort in hospitals – A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6):4071–4077, 2012.
- [74] Fujen Wang, Mengchih Lee, Tsungjung Cheng, and Yuquan Law. Field evaluation of thermal comfort and indoor environment quality for a hospital in a hot and humid climate. *HVAC&R Research*, 18(4):671–680, 2012.
- [75] Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Rosa Francesca de Masi, and Giuseppe Peter Vanoli. Rehabilitation of the building envelope of hospitals: Achievable energy savings and microclimatic control on varying the HVAC systems in Mediterranean climates. *Energy and Buildings*, 60:125–138, 2013.
- [76] Ehsan Mousavi, Fred Betz, and Roger Lutz. *Academic Research to Support Facility Guidelines Institute & ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2013*. 2019.
- [77] ASHRAE. *ANSI/ASHRAE/ASHE - Ventilation of Health Care Facilities*.
- [78] Julian W. Tang. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *Journal of the Royal Society, Interface*, 6 Suppl 6:S737–46, 2009.
- [79] Melanie M. Derby, Maryam Hamehkasi, Steven Eckels, Grace M. Hwang, Byron Jones, Ronaldo Maghirang, and David Shulan. Update of the scientific evidence for specifying lower limit relative humidity levels for comfort, health, and indoor environmental quality in occupied spaces (RP-1630). *Science and Technology for the Built Environment*, 23(1):30–45, 2017.

[80] Melanie M. Derby and Roger M. Pasch. Effects of Low Humidity On Health , Comfort & IEQ. *ASHRAE Journal*, 59(9):44–51, 2017.

## A. Diagramme mit englischer Beschriftung

# Anhang

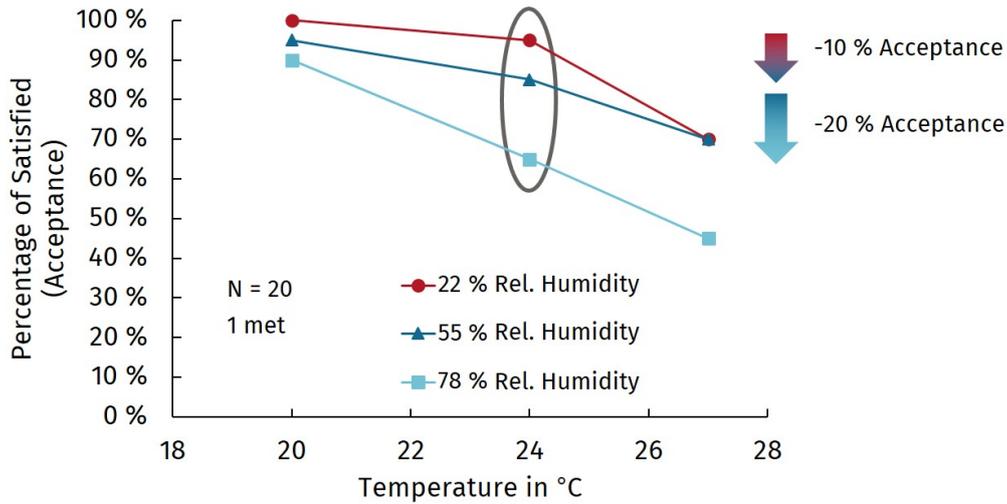


Abbildung 20 – Perceived air quality as a function of temperature and humidity, own illustration based on [9].

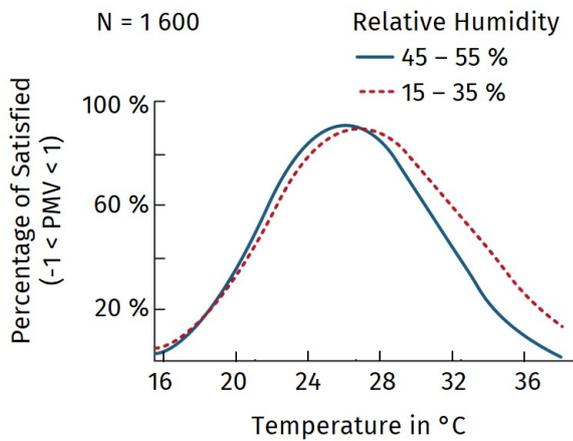


Abbildung 21 – Percentage of satisfied people with regard to the thermal environment as a function of temperature and relative humidity, own illustration based on [12] based on the data from [15].

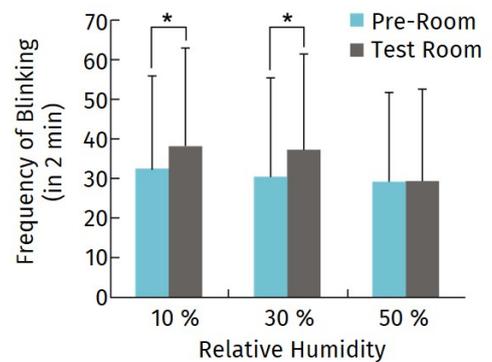


Abbildung 22 – Number of eyelid blinks in 2 minutes as a function of relative humidity, own illustration based on [21].

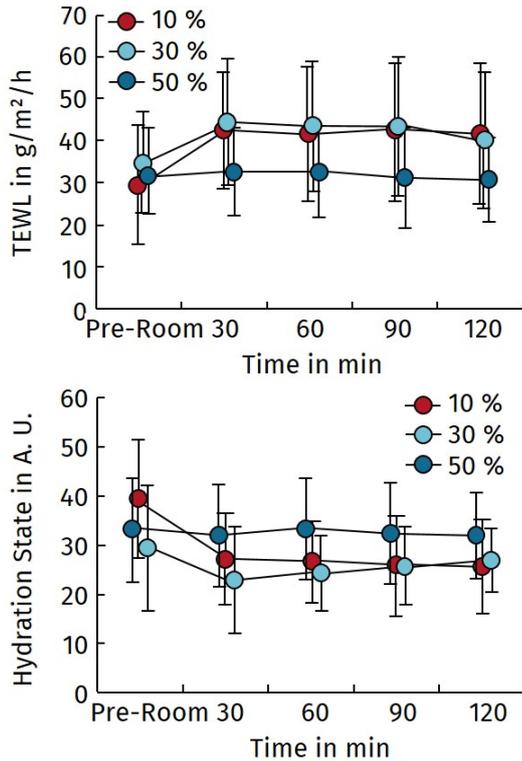


Abbildung 23 – Transepidermal water loss (TEWL) and hydration state of the skin as a function of time and the relative humidity of the test room, own illustration based on [21].

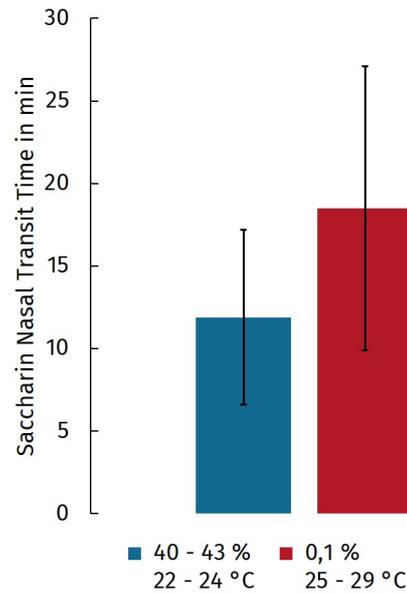


Abbildung 25 – Saccharin nasal transit time as a function of relative humidity and temperature, own illustration based on [26]).

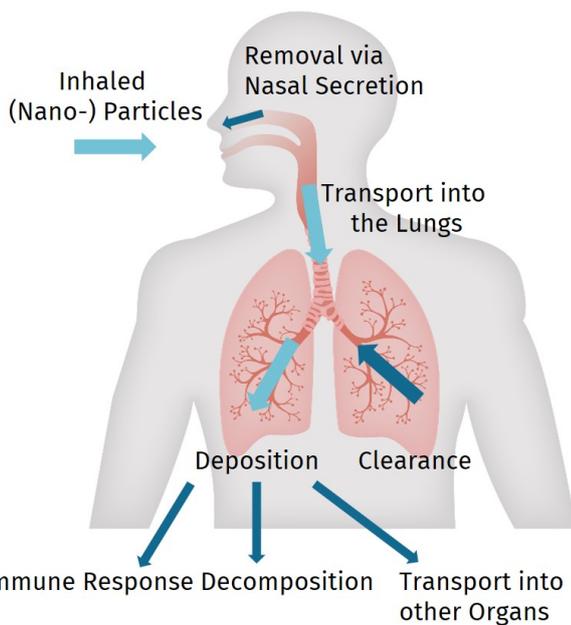


Abbildung 24 – Transport mechanisms of inhaled particles in the respiratory tract, own illustration based on [24].

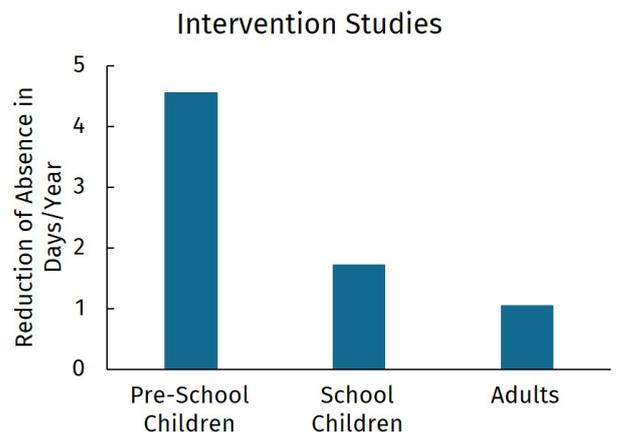


Abbildung 26 – Mean reduction of absences due to humidification of different intervention studies, own illustration based on data from [29, 30, 31, 32].

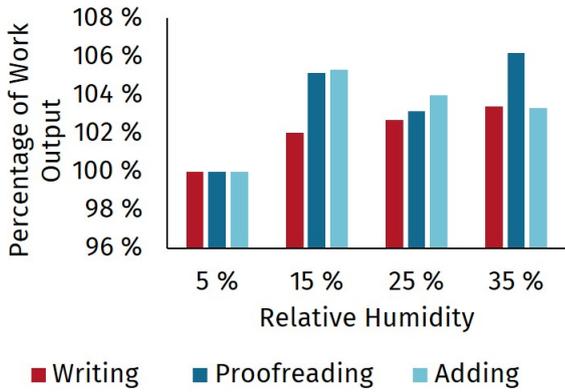


Abbildung 27 – Influence of relative humidity on work output for writing, proofreading and adding, own illustration based on [22].

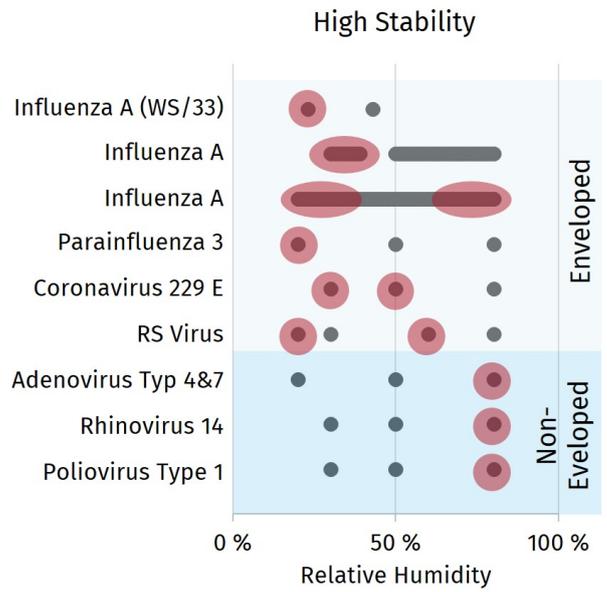


Abbildung 29 – Influence of relative humidity on the stability of different viruses based on a data analysis of [5].

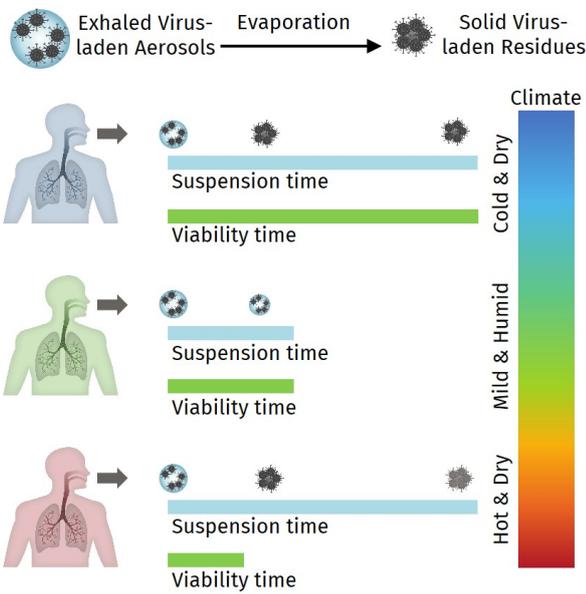


Abbildung 28 – Influence of the ambient climate on the suspension time of aerosols and the lifetime of the viruses they contain, own illustration based on [43].

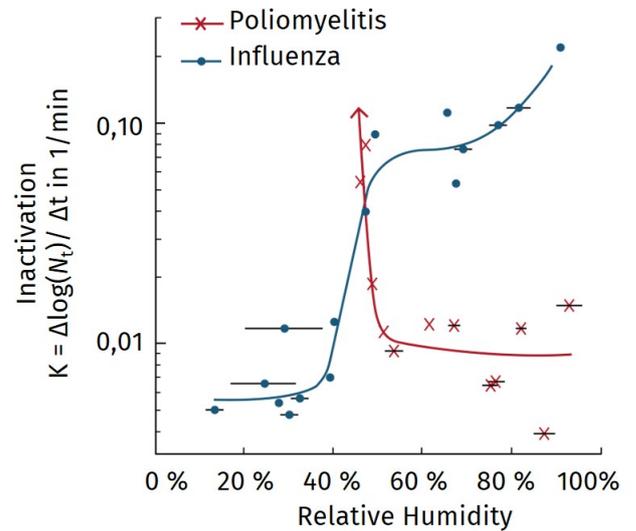


Abbildung 30 – Influence of relative humidity on the inactivation of poliomyelitis and influenza viruses, own illustration based on [49].

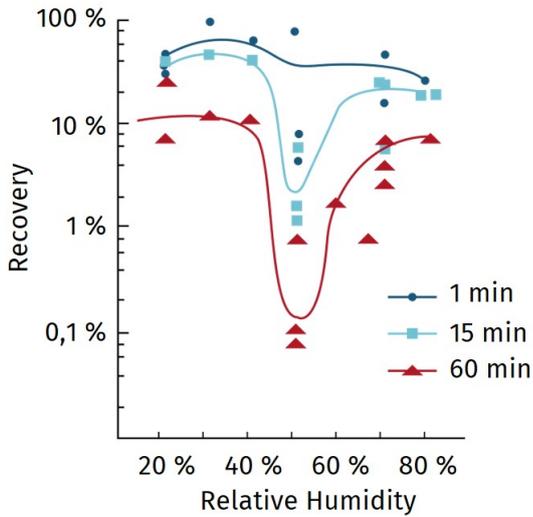


Abbildung 31 – Influence of relative humidity and time on the recovery rate, which reflects the percentage of active influenza viruses, own illustration based on [50].

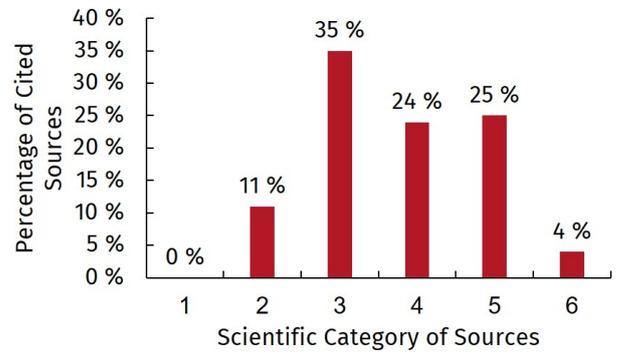


Abbildung 33 – Number of frequencies of the scientific categories of sources used by ANSI/ASHRAE/ASHE, own illustration based on [76].

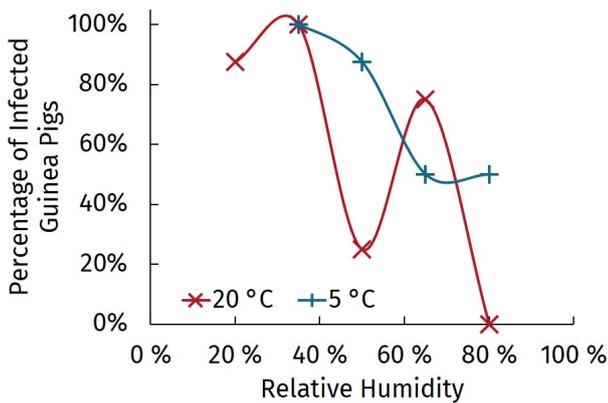


Abbildung 32 – Dependence of the infection rate of the examined guinea pigs as a function of the ambient relative humidity and temperature, own illustration based on [55].

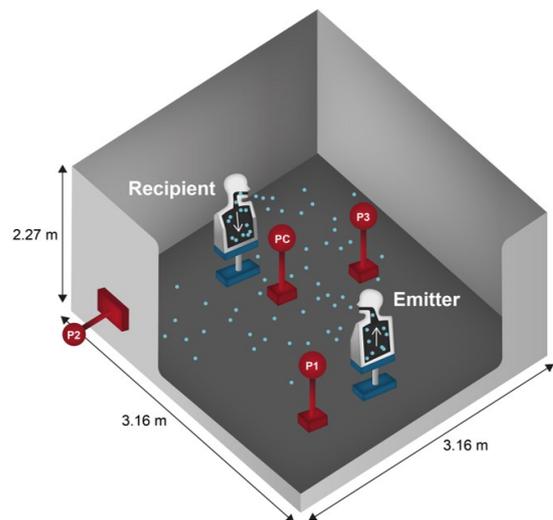


Abbildung 34 – Experimental set-up used by Noti et al., own illustration based on [51].

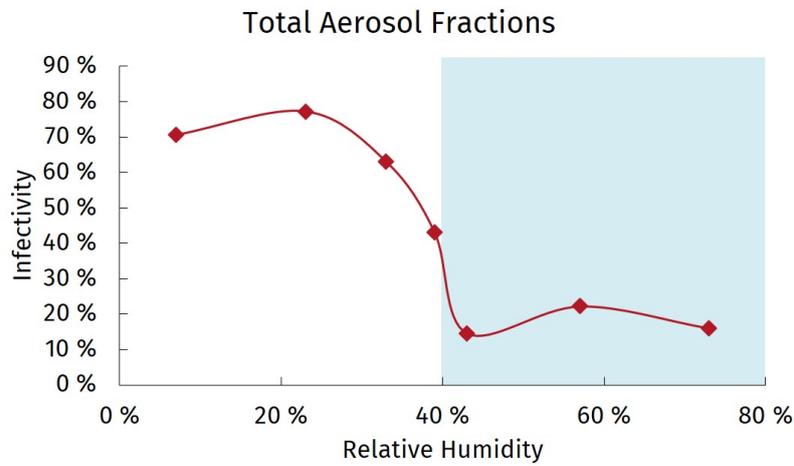


Abbildung 35 – Dependence of infectivity on the relative humidity, own illustration based on [51].

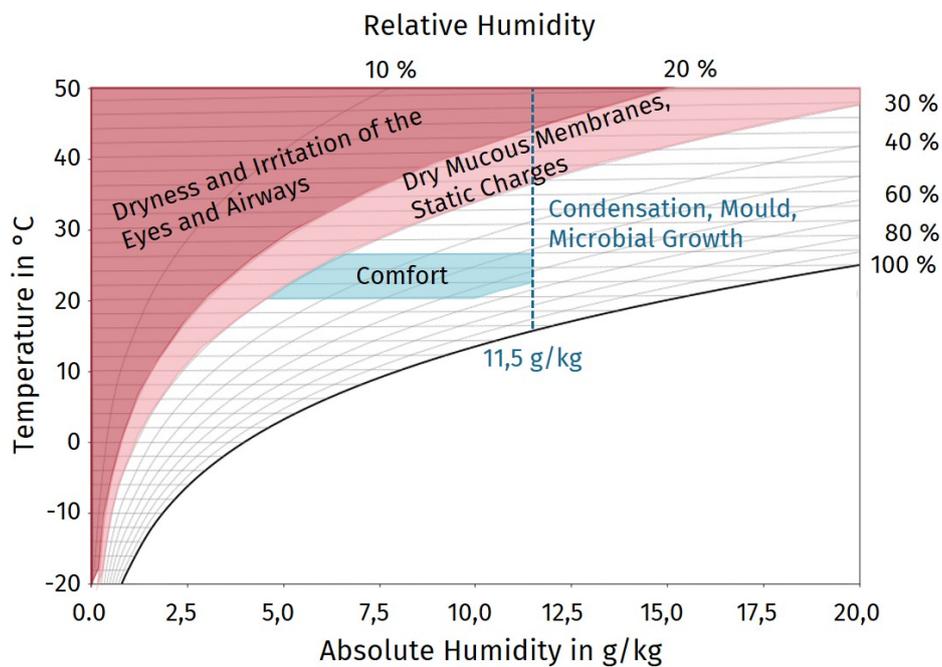


Abbildung 36 – Recommended indoor thresholds for temperature, relative and absolute humidity according to the DIN 15251, own illustration based on [7].

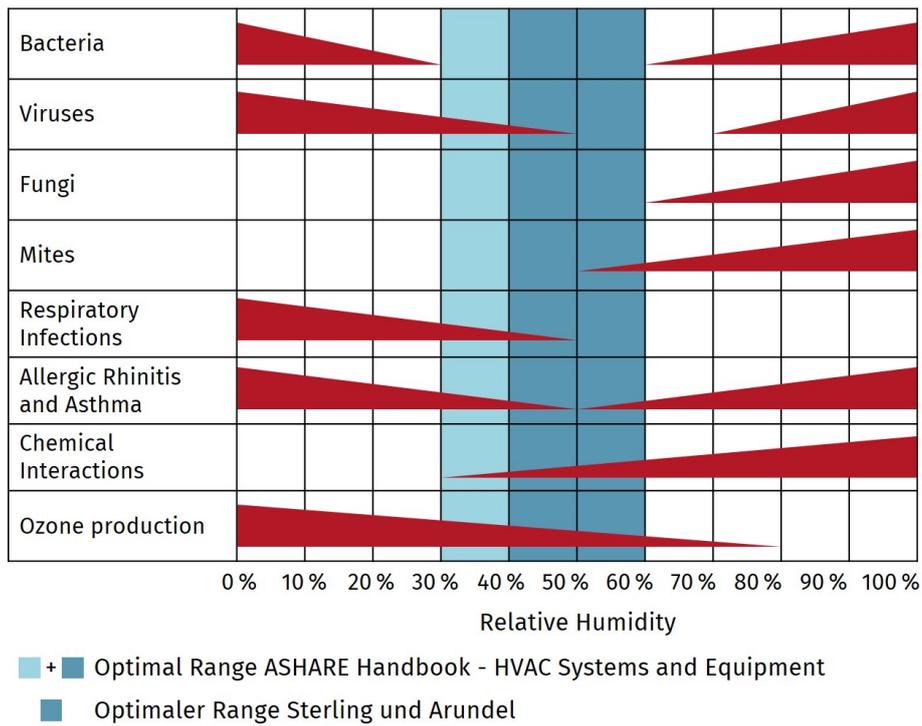


Abbildung 37 – Optimal range of relative humidity to reduce adverse effects on human health, own illustration based on [2] and [71].

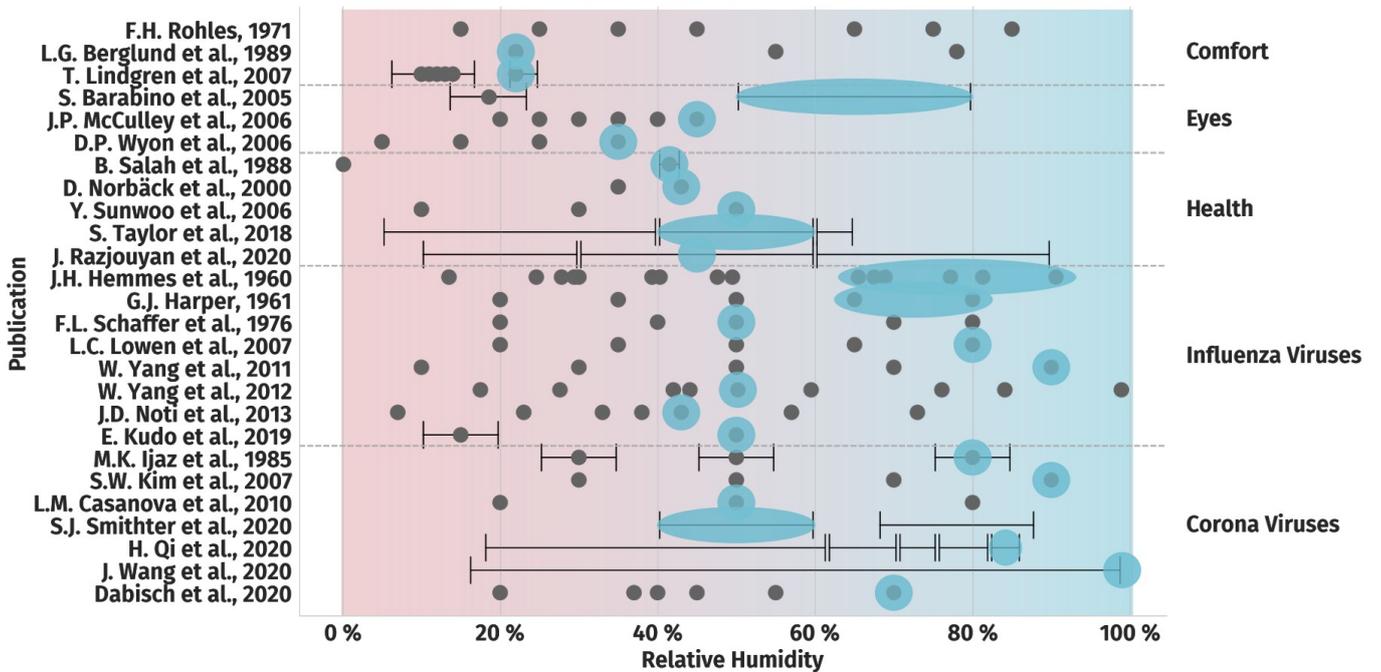


Abbildung 38 – Illustration of the experimentally investigated relative humidity of the presented publications. Emphasis on the values and ranges, which mean the least amount of health problems for humans.