Vorstudie zur Optimierung von Lüftungsstrategien für Nichtwohngebäude im Hinblick auf Gesundheit und Energieaufwand

Verfasser:
Forschungsgesellschaft
Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart mbH

Universität Stuttgart
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung

Jonathan Koch, B.Sc.
Lukas Siebler, M.Sc.
Dipl.-Ing. Armin Ruppert

Forschungsvorhaben 2023-02
gefördert vom
Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V.

Verein der Förderer
der Forschung im Bereich
Heizung • Lüftung • Klimatechnik
Stuttgart e.V.

HLK
STUTTGART

Dezember 2023

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns herzlich beim Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung-Lüftung-Klimatechnik Stuttgart e.V. für die großzügige Unterstützung und Förderung dieses Forschungsprojekts bedanken.

Kurzfassung

Während der COVID-19-Pandemie führten Maßnahmen zur Eindämmung der Neuinfektionen zu erheblichen wirtschaftlichen Verlusten. Angesichts der steigenden Wahrscheinlichkeit künftiger Pandemien werden in dieser Vorstudie Lüftungsstrategien zur Infektionsprävention untersucht. Ziel ist die Minimierung des monetären Aufwands durch krankheitsbedingte Arbeitsunfähigkeit und Energieverbrauch des Gebäudes.

Im Rahmen dieser Vorstudie wird ein Simulationsmodell einer Büroetage mit maschineller, CO_2-bedarfsgeregelter Lüftung in Matlab/Simulink weiterentwickelt. Anhand von automatisiert erstellten Bewegungsprofilen werden individuelle Infektionsrisiken durch aerogene Virustransmission berechnet und daraus die jährlichen Arbeitsunfähigkeitskosten abgeleitet. Als Energiekosten werden Heizung, Kühlung, Lufttransport und Befeuchtung berücksichtigt.

Anhand von Parametervariationen wird für einen Jahreszeitraum das wirtschaftliche Optimum für verschiedene CO_2-Sollwerte ermittelt. Mit niedrigen CO_2-Sollwerten kann das Infektionsgeschehen reduziert und andere Schutzmaßnahmen ersetzt werden. Hierfür sind jedoch CO_2-Sollwerte unterhalb der Pettenkoferzahl von 1.000 ppm notwendig. Zudem wird eine Lüftungsregelung mit tagesinzidenzabhängigen CO_2-Sollwerten und der Einfluss der Infektiosität des Krankheitserregers untersucht.

Abstract

During the COVID-19 pandemic, measures to contain virus spread led to significant economic losses. Given the increasing likelihood of future pandemics, this study investigates ventilation strategies for infection prevention. The objective is to minimize monetary costs due to illness-related absenteeism and energy consumption of buildings.

Within this study, a simulation model of an office floor equipped with mechanical, CO_2 demand-controlled ventilation is further developed using Matlab/Simulink. Automatically generated movement profiles serve as the basis to calculate individual infection risks from airborne virus transmission, subsequently deriving costs associated with absenteeism. Energy costs including heating, cooling, air transport, and humidification are considered.

Through parameter variations over an annual period, the economic optimum for various CO_2 target values is determined. Lower CO_2 target values can reduce infection rates and potentially replace other protective measures. However, achieving this requires CO_2 target values below the Pettenkofer number of 1000 ppm. Additionally, a ventilation control system with CO_2 target values dependent on daily incidence rates and the influence of pathogen infectivity is investigated.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I
Abkürzungen III
Formelzeichen IV
1 Einleitung 1
1.1 Hintergrund 1
1.2 Stand der Wissenschaft 2
1.3 Ziel dieser Vorstudie 3
2 Grundlagen 5
2.1 Wärmebilanz 5
2.1.1 Wärmedurchgang 5
2.1.2 Solarstrahlung 8
2.1.3 Innere Wärmequellen 12
2.1.4 Fußbodenheizung 12
2.2 Maschinelle Lüftung 13
2.2.1 Funktionsweise 13
2.2.2 Energieaufwand 14
2.2.3 Luftfeuchte 16
2.3 Infektionsgeschehen 17
2.3.1 Transmission 17
2.3.2 Infektionsschutz 19
2.3.3 Luftfeuchte 21
2.3.4 Arbeitsunfähigkeitskosten 21
3 Simulationsmodell 23
3.1 Thermische Modellierung 23
3.1.1 Bürogebäude 23
3.1.2 Interne Wärmequellen 26
3.1.3 Lüftung 28
3.1.4 Energiekosten 31
3.2 Infektionsmodell 32
3.2.1 Bewegungsprofile 32
3.2.2 Virustransmission 34
3.2.3 Arbeitsunfähigkeitskosten 40
4 Auswertung 41
4.1 Plausibilisierung des Simulationsmodells 41

4.1.1 Thermisches Modell 41
4.1.2 Infektionsmodell 44
4.2 Parametervariationen 47
4.2.1 Konstante CO_2-Sollwerte 47
4.2.2 Inzidenzabhängige CO_2-Sollwerte 50
4.2.3 Quantaemissionsrate 53
5 Fazit und Ausblick 56
6 Literaturverzeichnis 58
7 Anhang 65
7.1 Aufbau der Wandschichten 65
7.2 Einzelwiderstände des Lüftungssystems 66
7.3 Ergebnisse der Parametervariation der inzidenzabhängigen CO_2-Sollwerte 67

Abkürzungen

Symbol	Beschreibung
AHA-Regeln	Abstand-Handhygiene-Alltagsmaske
ASR	Arbeitsschutzrichtlinie
AU	Arbeitsunfähigkeit
BIP	Bruttoinlandsprodukt
CO_2	Kohlenstoffdioxid
COP	Coefficient of Performance
COVID-19	Coronavirus disease 2019
DWD	Deutscher Wetterdienst
EER	Energy Efficiency Ratio
EnEV	Energieeinsparverordnung
FFP2	Filtering face piece (Schutzklasse 2)
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
I-Anteil	Integralanteil
IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
KVS	Konstant-Volumenstrom-System
LED	Leuchtdiode
P-Anteil	Proportionalanteil
P-Regler	Proportionalregler
PIRA	Predicted Infection Risk via Aerosols
SARS-CoV-2	Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2
U-Wert	Gesamtwärmedurchgangskoeffizient
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Vj	Vierteljahr
VVS	Variabel-Volumenstrom-System
WRG	Wärmerückgewinnung

Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Faktor für inzidenzabhängige CO_2-Sollwerte	ppm
A	Wärmeübertragende Fläche	m²
b	Faktor für inzidenzabhängige CO_2-Sollwerte	-
$c_{CO2,AU}$	CO_2-Konzentration der Außenluft	ppm
$c_{CO2,RA}$	CO_2-Konzentration der Raumluft	ppm
c_p	Spezifische Wärmekapazität	J/(kg·K)
$c_{Quanta,R}$	Quanta-Konzentration der Raumluft	ppm
d	Dicke der Wandschichten	m
d_i	Innerer Rohrdurchmesser	m
$E_{dif,F}$	Diffuse Solarstrahlung auf senkrechte Flächen	W/m²
$E_{dif,H}$	Diffuse Solarstrahlung auf horizontale Flächen	W/m²
$E_{dir,F}$	Direkte Solarstrahlung auf senkrechte Flächen	W/m²
$E_{dir,H}$	Direkte Solarstrahlung auf horizontale Flächen	W/m²
$E_{dir,Sonnenstrahl}$	Direkte Solarstrahlung in Sonnenstrahlrichtung	W/m²
h	Sonnenhöhenwinkel	°
Δh	Verdampfungsenthalpie	J/kg
Inz	Tagesinzidenz	-
k	Mittlere Rauheitshöhe eines Rohrs	m
l	Rohrlänge	m
m	Masse	kg
$m_{feuchte}$	Risikomodifikator aufgrund der Luftfeuchte	-
m_{Inf}	Risikomodifikator aufgrund von Impfungen und vorherigen Infektionen	-
m_l	Masse Luft	kg
m_{maske}	Risikomodifikator aufgrund von Masken	-
m_w	Masse Wasser	kg
$\dot{m}_{zu}$	Zuluftmassenstrom	kg/s
M_l	Molare Masse Luft	kg/mol
M_w	Molare Masse Wasser	kg/mol
$\dot{n}_{CO2,Pers}$	CO_2-Produktionsrate pro Person	ppm·m³/h

n_{Pers}	Anzahl Personen	-
p	Druck	Pa
Pet	Pettenkoferzahl	ppm
$PIRA$	Infektionsrisiko einer Person	-
p_{sw}	Sättigungsdampfdruck	Pa
P_{vent}	Leistung für den Lufttransport	W
Δp_E	Druckverlust aufgrund von Einzelwiderständen	Pa
Δp_{ges}	Gesamtdruckverlust des Lüftungssystems	Pa
Δp_R	Druckverlust aufgrund von Rohrreibung	Pa
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	W/m²
Q_{Quanta}	Inhalierte Quantamenge	-
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$Q_{Enthalpie}$	Wärmeenergie eines Raumes	J
$\dot{Q}_{innen}$	Wärmestrom aufgrund innerer Wärmequellen	W
$\dot{Q}_{LV}$	Wärmestrom aufgrund Lüftungswärmeverluste	W
$\dot{Q}_{solar}$	Wärmestrom aufgrund solarer Einstrahlung	W
$\dot{Q}_{trans}$	Transmissionswärmestrom	W
Re	Reynoldszahl	-
$R_{Büro,res}$	Resultierendes Infektionsrisiko im Büro	-
$R_{extern,inz}$	Externes Infektionsrisiko aufgrund der Inzidenz	-
$R_{extern,res}$	Resultierendes externes Infektionsrisiko	-
R_{Quanta}	Infektionsrisiko im Büro aufgrund der Quantamenge	-
SW_{CO2}	CO_2-Sollwert	ppm
t	Zeit	s
T	Temperatur	K
U_{Wand}	Gesamtwärmedurchgangskoeffizient der Wand	W/(m²·K)
V_R	Raumluftvolumen	m³
$\dot{V}_{Inh}$	Inhalationsvolumenstrom pro Person	m³/s
$\dot{V}_{zu}$	Zuluftvolumenstrom	m³/s
x	x-Koordinate	m
x_w	Wassergehalt der Luft	-
α_{konv}	Wärmeübergangskoeffizient aufgrund von Konvektion	W/(m²·K)

α_{str}	Wärmeübergangskoeffizient aufgrund von Strahlung	W/(m²·K)
β	Neigungswinkel der Fläche	°
γ	Azimutwinkel	°
ζ	Druckverlustbeiwert	-
η	Wirkungsgrad	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
λ_{rohr}	Rohrreibungszahl	-
ν	Kinematische Viskosität	m²/s
ρ	Dichte	kg/m³
φ	Relative Luftfeuchte	%
ϕ	Rückwärmzahl	-

1 Einleitung

Die Übertragung von aerogenen Infektionskrankheiten wird maßgeblich durch den Aufenthalt in Innenräumen beeinflusst. Insbesondere bei der COVID-19-Pandemie sind die meisten Ausbrüche auf menschliche Kontakte in Gebäuden zurückzuführen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Lüftungsstrategien als Maßnahme zur Infektionsprävention hinsichtlich des monetären Aufwands untersucht.

1.1 Hintergrund

Die weltweite Verbreitung des Coronavirus SARS-CoV-2 hatte erhebliche Auswirkungen auf die globale Gesellschaft und Wirtschaft. Um die Ausbreitung des Virus einzudämmen, wurden umfangreiche Maßnahmen ergriffen, darunter Lockdowns, soziale Distanzierung, Maskenpflicht und Quarantäne. Diese Maßnahmen führten nicht nur zu erheblichen Einschränkungen des täglichen Lebens, sondern auch zu beträchtlichen wirtschaftlichen Verlusten. Der Einfluss auf die deutsche Wirtschaft wird anhand des Bruttoinlandsprodukts (BIP) in den Jahren 2020 und 2021 deutlich. In Bild 1-1 sind die Einbußen des realen BIPs im Vergleich zu dem prognostizierten Verlauf ohne Pandemie dargestellt. Allein in diesem Zeitraum resultierte durch die COVID-19-Pandemie ein Wertschöpfungsverlust von ca. 350 Milliarden Euro. [26]

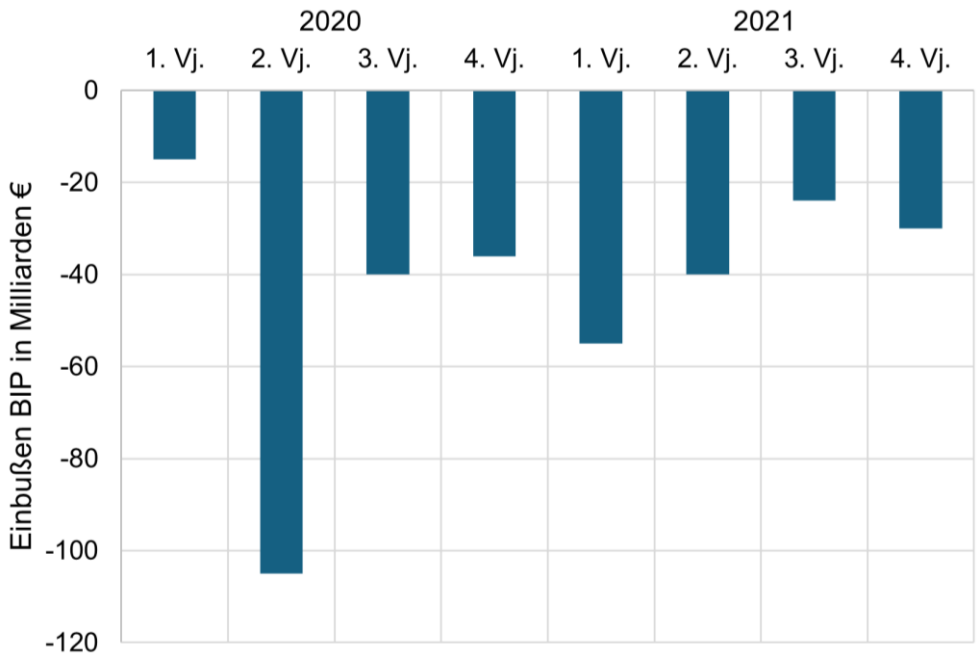

Bild 1-1: Vierteljährliche Einbußen des deutschen BIPs in Milliarden Euro im Vergleich zum prognostizierten Verlauf ohne Pandemie, verändert nach [26]

Nach aktuellen Prognosen steigt die Wahrscheinlichkeit für den Ausbruch von Pandemien in Zukunft weiter an. Als treibende Faktoren für den Anstieg werden unter anderem Klimawandel, Bevölkerungswachstum und ein zunehmender Kontakt zwischen Menschen und krankheitsübertragenden Tieren vermutet. Der Ausbruch einer Pandemie mit vergleichbaren Auswirkungen wie bei COVID-19 wird auf eine Wahrscheinlichkeit von ca. 2% pro Jahr geschätzt, wobei die Wahrscheinlichkeit von weniger drastischen Ausbrüchen größer ist. Daraus resultiert die Notwendigkeit, die bisherigen Maßnahmen der COVID-19-Pandemie zu evaluieren und Strategien für zukünftige Ausbrüche zu entwickeln. [37, 45]

Die Transmission von aerogenen Infektionskrankheiten hängt maßgeblich von dem Raumklima in Innenräumen ab, in denen immer mehr Menschen einen Großteil ihrer Zeit verbringen. Mit einer Verbesserung der Raumluftqualität sinkt das Infektionsrisiko, da mit einem erhöhten Luftaustausch die Viruskonzentration in der Luft reduziert wird. Somit werden weniger Viren inhaliert und die Gesundheit der Menschen geschützt. Für Unternehmen bieten geeignete Lüftungsstrategien mit erhöhten Luftvolumenströmen nicht nur einen verbesserten Arbeitsschutz, sondern ebenfalls ein wirtschaftliches Potenzial. Indem Erkrankungen des Personals vermieden werden, können Unternehmen langfristig Kosten durch krankheitsbedingten Arbeitsausfall einsparen. [36]

Dem gegenüber stellt die Klimakrise eine der größten globalen Herausforderungen dar. Um die schwerwiegendsten Folgen zu begrenzen, ist eine energieeffiziente Ressourcennutzung unerlässlich. Damit werden CO_2-Emissionen reduziert, welche die Hauptursache für die Klimakrise darstellen. Eine Erhöhung des Luftvolumenstroms zur Eindämmung von Infektionsgeschehen geht mit einem Anstieg des Energiebedarfs und zusätzlichen CO_2-Emissionen einher. Somit entsteht ein ethischer Zielkonflikt zwischen dem Schutz der Menschen vor Infektionen und erhöhten CO_2-Emissionen. [1, 36]

1.2 Stand der Wissenschaft

Der Zusammenhang zwischen Raumluftqualität und menschlichem Wohlbefinden wurde in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht. Höhere Luftwechsel mit einer vermehrten Zufuhr von Außenluft führen zu weniger Schadstoffen in der Raumluft. In Studien wurden positive Auswirkungen von höherer Raumluftqualität auf die Konzentrationsfähigkeit, kognitive Leistungsfähigkeit und Produktivität gezeigt. Insbesondere in Arbeitsumgebungen ist dies für die Effizienz des Personals von großer Bedeutung. [62, 69]

Darüber hinaus hat die Raumluftqualität einen wesentlichen Einfluss auf die Transmission von aerogenen Krankheiten. Eine gute Belüftung kann dazu beitragen, das Risiko einer Infektion in geschlossenen Räumen zu verringern, indem infektiöse Aerosole abgeführt werden und somit die Konzentration von Krankheitserregern in der Luft reduziert wird. Um das Infektionsrisiko durch aerosolgebundene Krankheitserreger abschätzen zu können, wurde die Wells-Riley Gleichung entwickelt und vielfach bei der Analyse von Belüftungsstrategien in Gesundheitseinrichtungen genutzt [50]. Die Gleichung basiert auf einer hypothetischen Größe, einem sogenannten „Quantum“, welche das Infektionsrisiko einer Person aufgrund der aufgenommen Virenmenge beschreibt. [62, 64]

Während der COVID-19-Pandmie gab es einen deutlichen Anstieg von Veröffentlichungen zu Lüftungsstrategien zur Reduzierung von Infektionsrisiken in Gesundheitseinrichtungen. Dabei wurde die entscheidende Rolle von Aerosolen bei aerogenen Krankheiten bestätigt. Vor allem bei der Transmission über größere Distanzen wurde ein hoher Einfluss der verschiedenen Lüftungsstrategien deutlich. Der Forschungsfokus lag vor allem auf der Entwicklung fortgeschrittener Lüftungskonzepte, bei denen unter anderem lokale Lüftungssysteme integriert wurden. [31]

Außerhalb des Gesundheitswesens wurde festgestellt, dass die vorhandene Lüftungsinfrastruktur für eine effektive Infektionskontrolle oft unzureichend ist. Die meisten Lüftungsanlagen sind auf die Gewährleistung des menschlichen Behaglichkeitsbereichs ausgelegt. Um jedoch das Infektionsgeschehen eines hochansteckenden Krankheitserregers maßgeblich zu reduzieren, sind oft höhere Luftvolumenströme notwendig. Aus Studien resultierten Empfehlungen zu hohen Luftwechseln, welche im aktuellen Gebäudebestand meist mit hohen Betriebskosten einhergehen würden oder gar nicht erreicht werden können. [4]

Li et al. haben eine CO_2-bedarfskontrollierte Lüftungsstrategie zur Infektionsprävention von COVID-19 vorgeschlagen [35]. Dabei wurde der Zusammenhang der von Menschen ausgeatmeten Menge an CO_2 und der Viruskonzentration beschrieben. Die CO_2-Konzentration kann mit kostengünstigen Messgeräten überwacht werden, um die Lüftung bedarfsabhängig zu regeln. Der Fokus der Studie lag auf der Reduzierung der lokalen Reproduktionszahl des Virus in öffentlichen Gebäuden auf unter eins, wobei auch hier hohe Luftwechsel empfohlen wurden. Für zukünftige Planungen der Raumkonditionierung sollten daher Maßnahmen zur Infektionsprävention wie erhöhte Luftvolumenströme, effektive Luftfilterung sowie die Kontrolle von Luftfeuchte und Temperatur berücksichtigt werden [39].

In vorangegangenen Arbeiten am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) wurde der Energieaufwand in Bezug auf das Infektionsrisiko analysiert. Dabei wurden verschiedene Lüftungskonzepte und -strategien hinsichtlich eines Optimums untersucht. Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeit einer effektiven und energieeffizienten Reduzierung des Infektionsrisikos auf. [34, 47]

1.3 Ziel dieser Vorstudie

Im Rahmen dieser Vorstudie werden Lüftungsstrategien als Maßnahme zur Infektionsprävention evaluiert und die wirtschaftlichen Auswirkungen quantifiziert. Dabei werden sowohl die durch Lüftung verursachten Energiekosten als auch die indirekten Kosten durch krankheitsbedingte Arbeitsunfähigkeit berücksichtigt. Die Vorstudie bietet Unternehmen eine Entscheidungshilfe bei der Wahl zwischen verschiedenen Lüftungsstrategien. Die Ergebnisse können zudem in die Planung von Lüftungsanlagen einfließen. Der ethische Zielkonflikt zwischen Gesundheitsschutz und erhöhten CO_2-Emissionen wird in dieser Vorstudie nicht gelöst.

Für die Untersuchungen verschiedener Lüftungsstrategien wird ein Simulationsmodell in Matlab/Simulink erstellt. Aufbauend auf die Arbeit von *Pinzhoffer* wird die Etage eines Bürogebäudes thermisch modelliert [47]. Damit können die Energiekosten von Heizung, Kühlung, Lüftung und Befeuchtung berechnet und zwischen verschiedenen Lüftungsstrategien verglichen werden. Die Simulation wird für jede Lüftungsstrategie über einen Zeitraum von einem Jahr durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Jahreszeiten zu berücksichtigen. Als Wetterdatenbasis dient ein Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes mit einem typischen Witterungsverlauf [23].

Arbeitsausfälle aufgrund von Neuinfektionen innerhalb des Bürogebäudes werden als vermeidbar betrachtet, da sie durch geeignete Lüftungsmaßnahmen verhindert werden können. Im Simulationsmodell wird die Viruskonzentration in der Raumluft und das daraus resultierende individuelle Infektionsrisiko des Personals berechnet. Das Infektionsgeschehen wird mit Monte-Carlo-Methoden modelliert, wobei das Infektionsrisiko der Wahrscheinlichkeit für eine Neuinfektion entspricht. Die Bewegungsprofile des Personals basieren ebenfalls auf Wahrscheinlichkeiten, um Bewegungsmuster und Teamdynamiken realitätsnah abzubilden. Im Simulationsmodell können zusätzliche Schutzmaßnahmen wie Masken, Impfungen und Quarantäne von Kontaktpersonen berücksichtigt werden. Durch die Betrachtung eines Jahreszeitraums werden Infektionsketten innerhalb der Belegschaft miteinbezogen. Als Datengrundlage werden das Virus SARS-CoV-2 sowie die Inzidenzdaten des Jahres 2022 herangezogen. Das Modell ist für andere aerogene Infektionskrankheiten anwendbar. Die Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis über den typischen Krankheitsverlauf und die Transmissionsdaten.

Mit dem Simulationsmodell wird somit die Untersuchung von verschiedenen Szenarien und Maßnahmen ermöglicht. Die Regelung der Luftvolumenströme kann daraufhin auf ein wirtschaftliches Optimum ausgelegt werden.

In dem vorliegenden Abschlussbericht wird zunächst in Kapitel 2 auf die technischen Grundlagen für das Simulationsmodell eingegangen. In Kapitel 3 wird die Umsetzung des Simulationsmodells in Matlab/Simulink beschrieben. Im Anschluss folgt in Kapitel 4 die Auswertung der Ergebnisse. Zunächst werden die Modellierung der Gebäudethermik sowie des Infektionsgeschehen anhand von Referenzszenarien plausibilisiert. Anschließend wird in Parametervariationen untersucht, inwieweit geeignete Lüftungsstrategien andere Maßnahmen in einem Pandemieszenario ersetzen können und welches wirtschaftliche Optimum sich dabei einstellt. In einer weiteren Parametervariation wird der Einfluss der Infektiosität des Krankheitserregers analysiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 5 die Zusammenfassung und ein Ausblick.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die verwendeten Ansätze für die Entwicklung des Simulationsmodells ausgeführt. Es werden die Grundlagen der thermischen Modellierung, einschließlich Wärmebilanzierung und maschineller Lüftung, erläutert. Bei den Grundlagen des Infektionsgeschehens wird auf die Übertragungsmechanismen, Krankheitsverläufe und wirtschaftlichen Folgen von Infektionen eigegangen.

2.1 Wärmebilanz

Mit Hilfe der thermischen Modellierung des Gebäudes werden Parameter des Raumklimas berechnet. Die Raumtemperatur wird gemäß dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik durch die Wärmebilanz in Gleichung 2-1 bestimmt. Dabei gehen die Transmissionswärmeströme durch die Außenwände $\dot{Q}_{trans}$ als auch die solaren Einträge auf Fenster und Wände $\dot{Q}_{solar}$ in die Bilanz ein. Zudem werden interne Wärmequellen und -senken $\dot{Q}_{innen}$ wie Heizung, Kühlung, Beleuchtung, Personen und technische Geräte sowie die Lüftungswärmeverluste $\dot{Q}_{LV}$ berücksichtigt. Die Vorzeichen der Wärmeströme geben dabei deren Richtung an. Aus der Enthalpie eines Raumes H_{Raum} resultiert die jeweilige Raumtemperatur. In den folgenden Unterkapitel und in Kapitel 2.2 werden die Berechnungen der einzelnen Wärmeströme im Detail erläutert. [11]

$$\frac{d(H_{Raum})}{dt} = \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{solar} + \dot{Q}_{innen} + \dot{Q}_{LV} \tag{2-1}$$

H_{Raum}	Enthalpie eines Raumes in J
t	Zeit in s
$\dot{Q}_{trans}$	Transmissionswärmestrom in W
$\dot{Q}_{solar}$	Wärmestrom durch solare Einträge in W
$\dot{Q}_{innen}$	Wärmestrom durch interne Wärmequellen und -senken in W
$\dot{Q}_{LV}$	Wärmestrom durch Lüftungswärmeverluste in W

2.1.1 Wärmedurchgang

Der Wärmedurchgang durch Wände und Fenster eines Gebäudes resultiert aus den Temperaturunterschieden zwischen der Raum- und Außenluft. Gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik erfolgt der Energietransport vom wärmeren zum kälteren Bereich. Der Wärmedurchgang basiert auf verschiedenen Mechanismen der Wärmeübertragung: konduktiver Wärmedurchgang, konvektiver Wärmeübergang und Wärmeaustausch durch Strahlung. [29, 60]

In Bild 2-1 ist der Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine ebene, homogene Wand qualitativ dargestellt. Auf der linken Seite ist die Fluidtemperatur höher. In der Wand nimmt die Temperatur über die Wanddicke linear ab. Innerhalb des Festkörpers findet ein konduktiver Wärmedurchgang statt. An den Grenzschichten der Wand dominieren der konvektive Wärmeübergang und die Wärmestrahlung. [60]

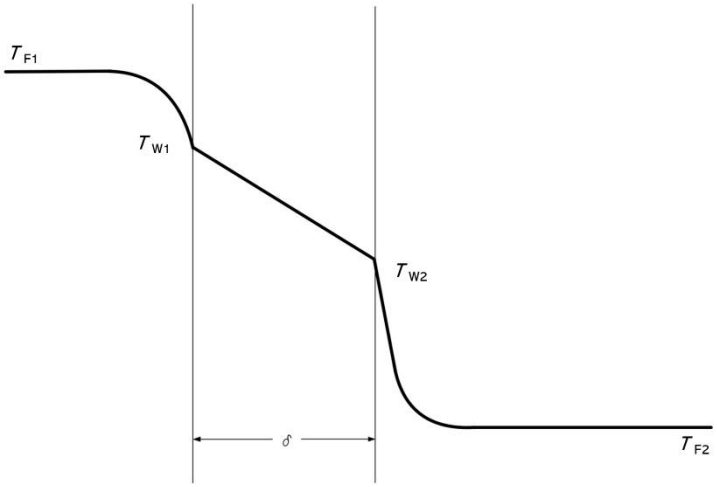

Bild 2-1: Temperaturverlauf beim Wärmedurchgang durch eine ebene Wand – in Anlehnung an [60]

Der Wärmedurchgang kann im stationären Zustand mit Gleichung 2-2 beschrieben werden. Der Gesamtwärmedurchgangskoeffizient, auch U-Wert genannt, ist ein Kennwert für den Wärmedurchgang von Gebäudehüllen. Dieser ist von Material und Dicke der einzelnen Wandschichten abhängig. Zudem werden weitere Größen, wie Wärmebrücken sowie innere und äußere Wärmeübergänge berücksichtigt. Bei einem höheren Gebäudedämmstandard ist der U-Wert niedriger, wodurch der Wärmestrom durch die Wand proportional abnimmt. Damit sinken im Winter die Wärmeverluste und der Heizenergiebedarf. [60]

$$\dot{\mathrm{Q}}_{trans} = \mathrm{U}_{trans} \cdot \mathrm{A} \cdot \Delta\mathrm{T} \tag{2-2}$$

$\dot{\mathrm{Q}}_{trans}$	Transmissionswärmestrom in W
U_{trans}	Gesamtwärmedurchgangskoeffizient in W/(m²·K)
A	Wärmeübertragende Fläche in m²
$\Delta\mathrm{T}$	Temperaturdifferenz in K

Konduktiver Wärmedurchgang

Der konduktive Wärmedurchgang erfolgt durch Interaktionen zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen eines Stoffes aufgrund molekularer Diffusions- und Kollisionsvorgänge. Dieser Prozess tritt bei Festkörpern und Fluiden auf und geschieht ohne makroskopischen Materialstrom. Das Fourier-Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der Wärmestromdichte $\dot{\mathrm{q}}$ und dem Temperaturgradienten $\mathrm{dT/dx}$. Für den eindimensionalen Fall einer ebenen Wand resultiert Gleichung 2-3. Der Wärmestrom $\dot{\mathrm{Q}}$ folgt gemäß Gleichung 2-4 aus dem Produkt der Wärmestromdichte $\dot{\mathrm{q}}$ und der wärmeübertragenden Fläche A. [29, 60]

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \tag{2-3}$$

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot A \tag{2-4}$$

$\dot{q}$	Wärmestromdichte in W/m²
λ	Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)
T	Temperatur in K
x	x-Koordinate in m
$\dot{Q}$	Wärmestrom in W

Für den stationären Fall eines homogenen Bauteils ist der Wärmestrom zeitlich konstant und die Berechnung vereinfacht sich zu Gleichung 2-5. [60]

$$\dot{Q}_{kond} = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot \Delta T \tag{2-5}$$

$\dot{Q}_{kond}$	Wärmestrom aufgrund von Konduktion in W
d	Bauteildicke in m
ΔT	Temperaturdifferenz in K

Im instationären Fall ist der Wärmestrom eine Funktion der Zeit. Um die thermische Gebäudeenergetik präzise zu modellieren, ist eine Berücksichtigung der Wärmekapazitäten einzelner Wand- und Fensterschichten erforderlich. Die Wärmeströme durch die Gebäudewand führen zur Erwärmung bzw. Abkühlung der Schichten. Für eine Wandschicht resultiert unter der Berücksichtigung aller Wärmeströme und der Wärmekapazitäten Gleichung 2-6. [60]

$$\Sigma\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \tag{2-6}$$

m	Masse der Schicht in kg
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Schicht in J/(kg·K)
T	Temperatur der Schicht in K
t	Zeit in s

Die Gebäudewand ist ein thermischer Energiespeicher. Dadurch werden rasche Temperaturschwankungen ausgeglichen und eine schnelle Abkühlung oder Erwärmung des Gebäudes verhindert. Im Sommer nimmt die Wand tagsüber thermische Energie auf, wodurch der Anstieg der Raumtemperatur verringert und der Kühlenergiebedarf des Gebäudes reduziert wird. In der Nacht kann die thermische Energie wieder abgegeben werden, wodurch die Wand abkühlt.

Konvektiver Wärmeübergang

Bei der konvektiven Wärmeübertragung wird die Energie über makroskopische Materialströme in Fluiden transportiert. Eine Strömung aufgrund temperaturbedingter Dichteunterschiede wird als freie Konvektion bezeichnet. Bei der erzwungenen Konvektion entsteht die Strömung durch eine äußere Kraft, wie sie bei einem Gebläse oder Wind durch Druckverluste vorliegt. Im Allgemeinen wird bei Gebäudehüllen davon ausgegangen, dass an der Innenseite freie Konvektion herrscht, während an der Außenseite erzwungene Konvektion vorliegt. Der konvektive Wärmestrom $\dot{Q}_{konv}$ ist gemäß Gleichung 2-7 proportional vom Wärmeübergangskoeffizienten α_{konv} abhängig. Dieser wird in der Praxis anhand von empirisch oder halbempirisch ermittelten Korrelationen bestimmt, wobei die Geometrie der wärmeübertragenden Fläche sowie die Strömungsform und -geschwindigkeit berücksichtigt werden. [29, 60]

$$\dot{Q}_{konv} = \alpha_{konv} \cdot A \cdot \Delta T \tag{2-7}$$

$\dot{Q}_{konv}$	Wärmestrom aufgrund von Konvektion in W
α_{konv}	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in W/(m²·K)

Wärmestrahlung

Der Energietransport bei der Wärmestrahlung erfolgt mittels elektromagnetischer Wellen in Festkörpern, Fluiden und Vakuum [29]. Analog zur konvektiven Wärmeübertragung kann ein Wärmeübertragungskoeffizient bestimmt werden und es resultiert Gleichung 2-8. Beim Strahlungsaustausch ist der Wärmeübergangskoeffizient α_{rad} von den Temperaturen der beteiligten Körper und der sogenannten „Strahlungsaustauschzahl“ abhängig. In der Praxis werden die Wärmeübergangskoeffizienten von Konvektion und Strahlung häufig zu einem einzelnen Wert zusammengefasst [7]. [60]

$$\dot{Q}_{rad} = \alpha_{rad} \cdot A \cdot \Delta T \tag{2-8}$$

$\dot{Q}_{rad}$	Wärmestrom aufgrund von Strahlung in W
α_{rad}	Strahlungswärmeübergangskoeffizient in W/(m²·K)

2.1.2 Solarstrahlung

Die solare Einstrahlung auf die Gebäudehülle inklusive der Fenster führt zu einem Wärmeeintrag ins Gebäude. Dies reduziert im Winter den Heizenergiebedarf, wohingegen sich im Sommer der Kühlenergiebedarf erhöht. Die Sonneneinstrahlung setzt sich aus direkter und diffuser Strahlung zusammen. Der diffuse Strahlungsanteil wird in der Erdatmosphäre gestreut und besitzt im Gegensatz zum direkten Anteil keine feste Richtung. [7, 25]

In den vorliegenden Wetterdatensätzen wird die direkte Sonneneinstrahlung auf eine horizontale Fläche bezogen. Anhand des Sonnenstands und der Ausrichtung der Fläche lassen sich die Einstrahlungswerte für geneigte Flächen über die in Bild 2-2 dargestellten Winkelverhältnisse berechnen. Mit dem Azimutwinkel γ wird die horizontale Abweichung von der Südausrichtung beschrieben. Der Einfallswinkel ζ auf eine geneigte Fläche kann mittels der Azimutwinkeldifferenz $\Delta\gamma$ von Sonne und Fläche, des Sonnenhöhenwinkels h und des Neigungswinkels β der Fläche anhand von Gleichung 2-9 berechnet werden. Für eine senkrechte Fläche beträgt der Neigungswinkel $\beta = 90°$. [25]

$$\cos(\zeta) = \cos(h) \cdot \cos\left(|\gamma_s - \gamma|\right) \cdot \sin(\beta) + \sin(h) \cdot \cos(\beta) \tag{2-9}$$

ζ	Einfallswinkel der Solarstrahlung auf senkrechte Fläche in °
h	Höhenwinkel der Sonne in °
γ_s	Azimutwinkel der Sonne in °
γ	Azimutwinkel der Fläche in °
β	Neigungswinkel der Fläche in °

Mit dem Einfallswinkel kann gemäß Gleichung 2-10 die direkte Solarstrahlung auf die geneigte Fläche berechnet werden. Der Quotient aus der gemessenen horizontalen Solarstrahlung $E_{dir,H}$ und dem Sinus des Höhenwinkels h entspricht dabei der Solarstrahlung in Sonnenstrahlrichtung $E_{dir,Sonnenstrahl}$. [25]

$$E_{dir,F} = E_{dir,Sonnenstrahl} \cdot \cos(\zeta) = \frac{E_{dir,H}}{\sin(h)} \cdot \cos(\zeta) \tag{2-10}$$

$E_{dir,F}$	Direkte Solarstrahlung auf senkrechte Fläche in W/m²
$E_{dir,Sonnenstrahl}$	Direkte Solarstrahlung in Sonnenstrahlrichtung in W/m²
$E_{dir,H}$	Direkte Solarstrahlung auf horizontale Fläche in W/m²

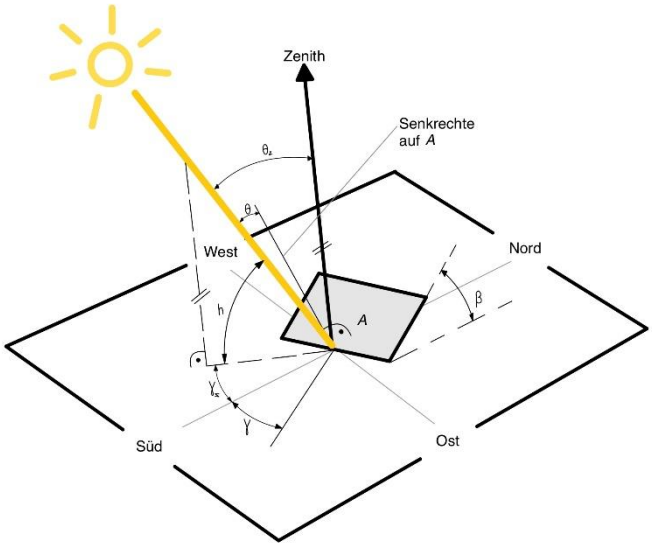

Bild 2-2: Winkelverhältnisse von Sonne zur geneigten Fläche – in Anlehnung an [61]

Die diffuse Solarstrahlung auf eine geneigte Fläche kann vereinfacht gemäß Gleichung 2-11 berechnet werden. Für eine senkrechte Fläche entspricht dies der Hälfte der diffusen Solarstrahlung auf die horizontale Fläche. [25]

$$E_{dif,F} = E_{dir,H} \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (2\text{-}11)$$

$E_{dif,F}$	Diffuse Solarstrahlung auf geneigte Fläche in W/m²
$E_{dif,H}$	Diffuse Solarstrahlung auf horizontale Fläche in W/m²
β	Neigungswinkel der Fläche in °

Die Solarstrahlung wird beim Auftreffen auf einen festen Körper absorbiert, transmittiert oder reflektiert. Bei den Wänden kann der aufgenommene Energieanteil über den Absorptionsgrad berechnet werden. Die Erwärmung der Außenwand führt vor allem bei kalten Umgebungstemperaturen zu einer Verringerung der Transmissionswärmeverluste. [41]

Ein Großteil der Strahlung auf die Fenster wird transmittiert. Mit dem Gesamtenergiedurchlassgrad g wird der Energieanteil, welcher ins Gebäude gelangt, angegeben. Der Einfallswinkel der Solarstrahlung beeinflusst maßgeblich den reflektierten Anteil, weshalb der Gesamtenergiedurchlassgrad gemäß Bild 2-3 mit einem Faktor modifiziert wird. Für die diffuse Solarstrahlung beträgt der Modifikationsfaktor 0,87. Ein Teil der Sonneneinstrahlung in den Raum gelangt über die Fenster wieder nach außen, was zu einem raumabhängigen Minderungsfaktor führt. [41]

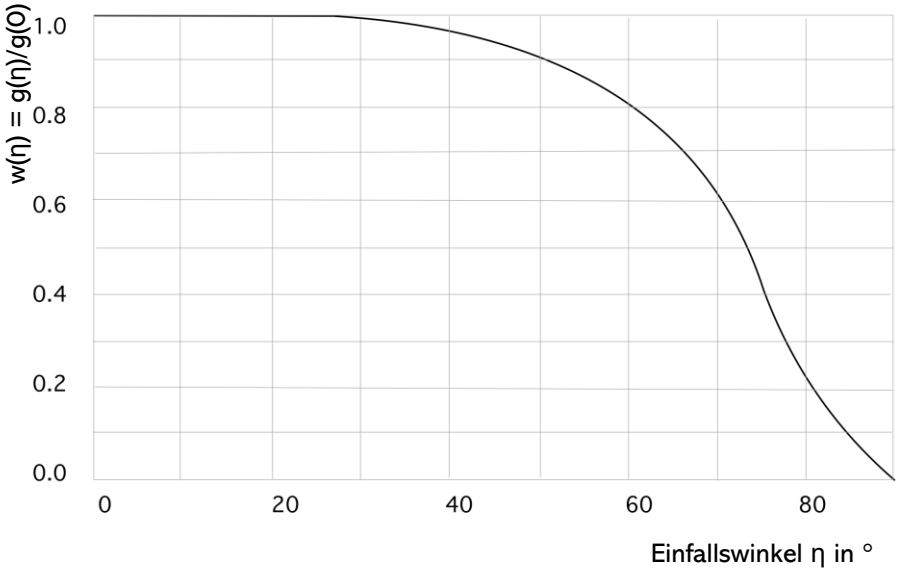

Bild 2-3: Modifikator des Gesamtenergiedurchlassgrads in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Solarstrahlung – in Anlehnung an [41]

In Bürogebäuden ist entsprechend der Arbeitsschutzrichtlinie (ASR) A3.4 sicherzustellen, dass eine störende Blendung des Personals vermieden bzw. reduziert wird. Hierfür können Sonnenschutzvorrichtungen wie Jalousien, Rollos oder lichtlenkende Bauelemente eingesetzt werden. Nach der ASR A3.5 muss zudem eine übermäßige Gebäudeaufheizung durch Sonneneinstrahlung vermieden werden, wofür sich außen liegende Sonnenschutzvorrichtungen als besonders wirksam erweisen. [21]

2.1.3 Innere Wärmequellen

Während der Personenbelegung in einem Bürogebäude entstehen zusätzliche interne Wärmeeinträge. Die Wärmeabgabe von Menschen hängt maßgeblich von der ausgeführten Tätigkeit ab. Mit steigender körperlicher Anstrengung erhöht sich die abgegebene Körperwärme. Darüber hinaus verursachen technische Geräte wie Computer und Beleuchtung Abwärme, welche in die Wärmebilanz eingehen. [40]

2.1.4 Fußbodenheizung

Für das Wohlbefinden von Personen in Bürogebäuden müssen bestimmte Raumtemperaturen gemäß ASR A3.5 eingehalten werden. Die Mindesttemperatur beträgt 20°C, weshalb bei niedrigen Außentemperaturen eine Beheizung erforderlich ist. Ebenso wird aufgrund der maximal zulässigen Raumtemperatur von 26°C in den meisten Fällen eine maschinelle Kühlung benötigt. Für die Wärmezufuhr und -abfuhr existieren verschiedene Bauformen. [70]

In Bild 2-4 ist eine Fußbodenheizung bzw. -kühlung schematisch dargestellt. Die Heizelemente dieser Bauform sind im Estrich eingebettet und werden von heißem bzw. kaltem Wasser durchströmt. Die Wärmeübertragung zur Raumluft erfolgt über den Estrich. Der Wärmestrom von Heizung und Kühlung ist dabei proportional zur wärmeübertragenden Fläche und zur Temperaturdifferenz (siehe Gleichung 2-7 und 2-8). Aufgrund der großen Fußbodenfläche reicht eine geringe Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Wasser für eine effektive Wärmeleistung aus. Aufgrund der geringen Strahlungsasymmetrien wird eine Fußbodenheizung allgemein als besonders behaglich empfunden. Zudem sind geringere Vorlauftemperaturen notwendig, was den effizienten Betrieb einer Wärmepumpe ermöglicht. Bei einer Wärmepumpe wird größtenteils Umgebungswärme zur Bereitstellung der Energie genutzt. Die Effizienz wird im Heizbetrieb mit dem „Coefficient of Performance“ (COP) und für den Kühlbetrieb mit der „Energy Efficiency Ratio“ (EER) angegeben [24, 54].

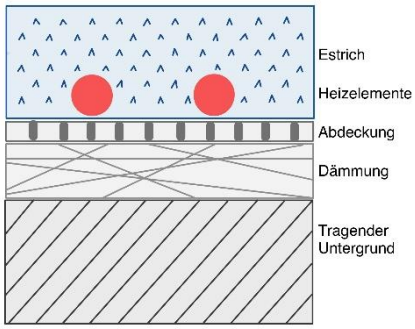

Bild 2-4: Schematischer Aufbau der Fußbodenheizung – in Anlehnung an [28]

2.2 Maschinelle Lüftung

Die Bereitstellung von frischer Außenluft und die Entfernung von schadstoffbelasteter Luft ist essenziell für das menschliche Wohlbefinden und eine Hauptaufgabe des Lüftungssystems. Dabei wird zwischen freier Lüftung ohne zusätzlichen Energieaufwand für den Lufttransport und maschineller Lüftung, die mittels Strömungsmaschinen betrieben wird, unterschieden. In vorangegangenen Arbeiten hat sich die maschinelle Lüftung für die Infektionsprävention als geeigneter erwiesen [39, 47].

2.2.1 Funktionsweise

Der schematische Aufbau einer Lüftungsanlage ist in Bild 2-5 dargestellt. An der Zu- und Abluftseite sind jeweils eine Absperrklappe, ein Luftfilter, ein Schalldämpfer und ein Ventilator für den Lufttransport verbaut. Wenn die Außenluft eine von der Raumluft abweichende Temperatur aufweist, kann die Zuluft mit einer Wärmerückgewinnung (WRG) vorkonditioniert werden. Sind Außen- und Raumlufttemperatur ähnlich, ist das Durchströmen des Wärmeübertragers aufgrund des zusätzlichen Druckverlustes nicht wirtschaftlich [20]. Zudem kann in bestimmten Fällen eine höhere Temperaturdifferenz vorteilhaft sein, um die thermischen Aufwände zu reduzieren. In diesen Fällen kann die WRG auf der Zuluftseite durch einen Bypass umgangen werden [27].

Die Zuluft kann anschließend weiter konditioniert werden. Mit Heiz- und Kühlregistern ist eine präzise Temperierung der Zuluft möglich. Ebenso kann eine Be- und Entfeuchtung der Zuluft erfolgen. Im Gegensatz zu dezentralen Lüftungssystemen, bei denen jeder Raum unabhängig voneinander betrieben wird, wird die Luft bei einem zentralen Lüftungssystem nach der Luftkonditionierung über ein Kanalnetz auf die einzelnen Räume verteilt.

Bei Konstant-Volumenstrom-Systemen (KVS) sind Verhältnisse der Luftvolumenströme zu den einzelnen Gebäudezonen konstant. Bei Variabel-Volumenstrom-Systemen (VVS) werden die einzelnen Luftströme hingegen nach Bedarf geregelt. Hierfür sind zusätzliche Bauteile erforderlich, darunter Drosselklappen für die Leitungsstränge sowie Ventilatoren mit variabler Drehzahl für den Lufttransport. [77]

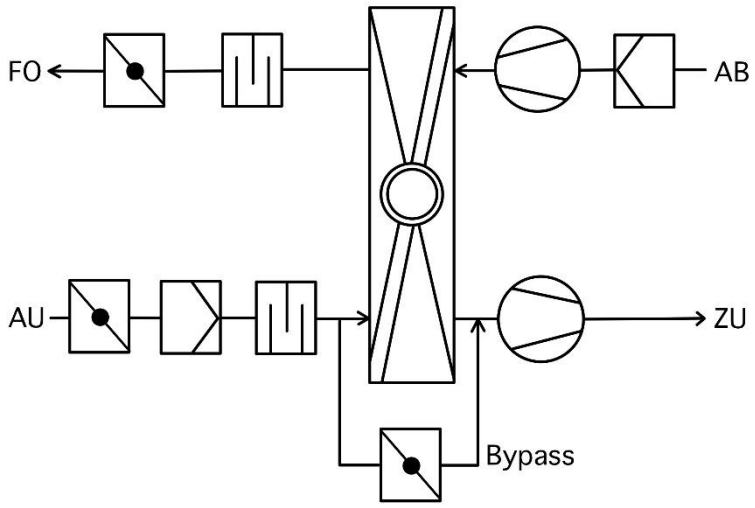

Bild 2-5: Schematischer Aufbau einer Lüftungsanlage – in Anlehnung an [47]

In der Praxis wird für eine Regelung des Luftvolumenstroms meist die CO_2-Konzentration in der Abluft herangezogen. Diese ist ein geeignetes Maß für die Raumluftqualität, da CO_2 beim menschlichen Stoffwechsel freigesetzt wird. Es besteht eine Korrelation zwischen der CO_2-Konzentration und ausgestoßenen Schadstoffen von Menschen wie Geruchsstoffen, Staubpartikeln und Mikroorganismen. Als Richtwert für eine gute Raumluftqualität wird oft die Pettenkoferzahl von 1.000 ppm verwendet. Gemäß ASR 6 gilt eine CO_2-Konzentration unterhalb der Pettenkoferzahl als hygienisch unbedenklich [71]. Zwischen der CO_2- und der Virenkonzentration in der Luft besteht ebenfalls eine Korrelation. Daher eignet sich die Messung der CO_2-Konzentration zur Infektionsprävention, um den Luftstrom entsprechend zu regeln. [35, 67]

Die CO_2-Konzentration wird aus der CO_2-Bilanz für einen Raum abgeleitet, welche durch die Differentialgleichung 2-12 beschrieben ist. Durch Personen im Raum wird CO_2 zugeführt. Mit dem Luftvolumenstrom wird CO_2 in Abhängigkeit von der Konzentrationsdifferenz zwischen Außen- und Raumluft entfernt. [18]

$$V_R \frac{dc_{CO2,RA}}{dt} = \dot{V}_{AU} \cdot \left[c_{CO2,A} - c_{CO2,R}(t)\right] + n_{Pers} \cdot \dot{n}_{CO2,Pers}(t) \tag{2-12}$$

V_R	Raumluftvolumen in m³
$c_{CO2,RA}$	CO_2-Konzentration der Raumluft in ppm
$\dot{V}_{AU}$	Außenluftvolumenstrom in m³/h
$c_{CO2,AU}$	CO_2-Konzentration der Außenluft in ppm
n_{Pers}	Anzahl anwesender Personen
$\dot{n}_{CO2,Pers}$	CO_2-Produktionsrate pro Person in ppm·m³/h

2.2.2 Energieaufwand

Der Energieaufwand für den Lufttransport hängt maßgeblich von der Antriebsleistung der Zu- und Abluftventilatoren ab. Der Energieaufwand anderer verbauter Geräte, wie der Regelungstechnik, wird in dieser Vorstudie vernachlässigt. Mit dem Ventilator muss der Druckverlust im Leitungssystem überwunden werden, welcher durch Rohrreibung und Einzelwiderstände verursacht wird. In geraden Rohren können die Rohrreibungsdruckverluste Δp_R gemäß der VDI-Richtlinie 2087 anhand von Gleichung 2-13 berechnet werden [77].

$$\Delta p_R = \lambda_{rohr} \cdot \frac{l}{d_i} \cdot \bar{v}^2 \cdot \frac{\rho}{2} \tag{2-13}$$

Δp_R	Rohrreibungsdruckverluste in Pa
λ_{rohr}	Rohrreibungszahl
l	Rohrleitungslänge in m
d_i	Rohrinnendurchmesser in m
$\bar{v}$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in m/s
ρ	Dichte des Förderstroms in kg/m³

Für die Berechnung der Rohrreibungszahl λ ist die Kenntnis der vorliegenden Strömungsform notwendig, welche über die dimensionslose Reynoldszahl Re beschrieben wird. Diese gibt das Verhältnis zwischen Trägheits- und Reibungskraft an und folgt aus Gleichung 2-14. Die charakteristische Länge L entspricht bei Rohren dem Rohrinnendurchmesser $\mathrm{d_i}$. [77]

$$\mathrm{Re} = \frac{\bar{v} \cdot \mathrm{L}}{\nu} \tag{2-14}$$

L	Charakteristische Länge in m
ν	Kinematische Viskosität in m²/s

Die Rohrreibungszahl λ_{rohr} wird über empirisch ermittelte Korrelationen bestimmt. Anhand der Reynoldszahl kann eine geeignete Korrelation ausgewählt werden. Für das in dieser Vorstudie betrachtete Rohrleitungssystem werden hydraulisch raue Rohre angenommen. Für den Bereich $65 < \mathrm{Re} \cdot \mathrm{k/d} < 1300$ kann die Korrelation nach Colebrook gemäß Gleichung 2-15 verwendet werden, um die Rohrreibungszahl iterativ zu berechnen. [77]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_{rohr}}} = -2 \cdot \log\left(\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda_{rohr}}} + \frac{\mathrm{k/d_i}}{3{,}72}\right) \tag{2-15}$$

k	Mittlere Rauheitshöhe des Rohrs in mm

Die Druckverluste durch Einzelwiderstände $\Delta \mathrm{p_E}$ werden von Bauteilen zur Luftaufbereitung und Strömungsführung verursacht. Die Berechnung erfolgt gemäß Gleichung 2-16, wobei der dimensionslose Druckverlustbeiwert ζ der Bauteile meist experimentell ermittelt wird. [77]

$$\Delta \mathrm{p_E} = \zeta \cdot \mathrm{v}^2 \cdot \frac{\rho}{2} \tag{2-16}$$

ζ	Druckverlustbeiwert

Die Antriebsleistung des Ventilators $\mathrm{P_{vent}}$ resultiert gemäß Gleichung 2-17 aus dem Produkt des zu überwindenden Gesamtdruckverlustes $\Delta \mathrm{p_{ges}}$ und des Luftvolumenstroms $\dot{\mathrm{V}}$. Zudem muss der Wirkungsgrad η_{vent} des Ventilators berücksichtigt werden. Wie aus den Gleichungen 2-13 und 2-16 ersichtlich, skalieren die Druckverluste quadratisch mit der Luftgeschwindigkeit bzw. dem Luftvolumenstrom. Somit ist die Antriebsleistung kubisch vom Luftvolumenstrom abhängig. [32]

$$\mathrm{P_{vent}} = \frac{\Delta \mathrm{p_{ges}} \cdot \dot{\mathrm{V}}}{\eta_{\mathrm{vent}}} \tag{2-17}$$

$\mathrm{P_{vent}}$	Leistung des Ventilators in W
$\Delta \mathrm{p_{ges}}$	Gesamtdruckverlust des Lüftungssystems in Pa
η_{vent}	Wirkungsgrad des Ventilators

Neben dem Energieaufwand für den Lufttransport entstehen durch den Luftaustausch Lüftungswärmeverluste $\dot{Q}_{LV}$, die einen zusätzlichen Heiz- bzw. Kühlenergieaufwand verursachen. Der Unterschied zwischen Außen- und Raumlufttemperatur wird durch die WRG verringert, wodurch die Lüftungswärmeverluste reduziert werden. Die Berechnung der Lüftungswärmeverluste erfolgt gemäß Gleichung 2-18. [11]

$$\dot{Q}_{LV} = (1 - \phi) \cdot \dot{m}_{zu} \cdot c_p \cdot \Delta T \tag{2-18}$$

ϕ	Rückwärmzahl der Wärmerückgewinnung
$\dot{m}_{zu}$	Zuluftmassenstrom in kg/s
c_p	Spezifische Wärmekapazität der Luft in J/(kg·K)
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Raumluft in K

2.2.3 Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte im Raum beeinflusst das menschliche Wohlbefinden, wobei im Allgemeinen ein Bereich zwischen 40 und 60% empfohlen wird [68]. In Deutschland weist die Außenluft im Winter meist einen niedrigen Wassergehalt auf, was in Innenräumen zu niedrigen relativen Luftfeuchten unterhalb von 40% führt [23]. Der Wassergehalt x_w der Luft wird durch Gleichung 2-19 definiert [11].

$$x_w = \frac{m_w}{m_l} \tag{2-19}$$

m_w	Masse Wasser in kg
m_l	Masse Luft in kg

Um die relative Luftfeuchte zu erhöhen, kann im Zuluftstrang des Lüftungssystems ein Befeuchter eingesetzt werden. Mit einem Befeuchter wird der Zuluft Wasserdampf zugeführt, bis der gewünschte Wassergehalt der Luft erreicht ist. Der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt der Luft und der relativen Luftfeuchte φ wird durch Gleichung 2-20 beschrieben [11].

$$x_w = \frac{M_w}{M_l} \cdot \frac{p_{sw}}{\frac{p}{\varphi} - p_{sw}} \tag{2-20}$$

M_w	Molare Masse von Wasser in kg/mol
M_l	Molare Masse Luft in kg/mol
p_{sw}	Sättigungsdampfdruck in Pa
p	Druck in Pa

Anhand der Gleichungen 2-19 und 2-20 kann die relative Luftfeuchte in den verschiedenen Räumen des Simulationsmodells berechnet werden. Daraus resultiert der Wassermassenstrom, welcher der Luft durch den Befeuchter zugeführt werden muss, um die Sollvorgaben einzuhalten. Der Einfluss der Luftfeuchte auf das Infektionsgeschehen bei der Transmission über Aerosole wird in Kapitel 2.3.3 erläutert.

2.3 Infektionsgeschehen

Im Rahmen dieser Vorstudie wird untersucht, wie die Transmission von aerogenen Krankheitserregern durch Lüftungsmaßnahmen beeinflusst werden kann. Der Fokus liegt auf hochinfektiösen Krankheitserregern innerhalb eines Pandemieszenarios, weshalb die Forschungen zu dem Virus SARS-CoV-2 als Datengrundlage für das Simulationsmodell dienen. Dabei wird insbesondere das Jahr 2022 und die Virusvariante Omikron betrachtet.

2.3.1 Transmission

Viren wie SARS-CoV-2 können ohne direkten Körperkontakt über Kontaktflächen, Tröpfchen und Aerosole übertragen werden. Während mit Lüftungsanlagen die Transmission über Kontaktflächen und Tröpfchen nicht beeinflusst werden kann, sind hier einfache Maßnahmen wie Handhygiene, regelmäßiges Reinigen relevanter Oberflächen und das Einhalten von Mindestabständen wirksame Mittel zur Infektionsprävention. [52]

Bei SARS-CoV-2 hat sich die Übertragung über Aerosole als kritischer Übertragungsweg herausgestellt. Aerosole sind Gemische aus sehr kleinen Partikeln und der Luft, von der sie umgeben sind, welche unter anderem bei der menschlichen Atmung entstehen. In Innenräumen wird die Konzentration von Aerosolen und damit das Infektionsrisiko durch die Raumlüftung beeinflusst. In dieser Vorstudie wird ausschließlich der Übertragungsweg über Aerosole betrachtet. [52]

Die Modellierung der Virustransmission erfolgt gemäß dem Wells-Riley-Modell. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der eine infektiöse Person andere Personen über Aerosole ansteckt. Die rechnerische Größe „Quanta“ gibt dabei die Virenmenge an, die mit einer krankheitserregerabhängigen Rate ausgeatmet wird. Analog zur CO_2-Konzentration wird die Quantakonzentration im Raum gemäß Gleichung 2-21 berechnet. [47, 50]

$$V_R \frac{dc_{Quanta,R}(t)}{dt} = n_{Inf} \cdot \dot{n}_{Quanta,Pers} - \dot{V}_{zu} \cdot c_{Quanta,R}(t) \quad (2\text{-}21)$$

V_R	Raumluftvolumen in m³
$c_{Quanta,R}$	Quantakonzentration des Raumes in quanta/m³
n_{Inf}	Anzahl anwesender infektiöser Personen
$\dot{n}_{Quanta,Pers}$	Quantaemissionsrate pro Person in quanta /h
$\dot{V}_{zu}$	Zuluftvolumenstrom in m³/h

Die inhalierte Quantadosis Q_{Quanta} ist vom Inhalationsvolumenstrom der jeweiligen Person sowie der Quantakonzentration im Raum abhängig und wird gemäß Gleichung 2-22 berechnet. [47]

$$Q_{Quanta}(t) = \int_0^t c_{Quanta,R}(t) \cdot \dot{V}_{Inh} dt \quad (2\text{-}22)$$

Q_{Quanta}	Inhalierte Quantadosis
$\dot{V}_{Inh}$	Inhalationsvolumenstrom einer Person in m³/h

Durch die aufgenommene Quantadosis wird gemäß Gleichung 2-23 das Infektionsrisiko *PIRA* einer Person berechnet. Dabei besteht ein exponentieller Zusammenhang: Das prozentuale Infektionsrisiko steigt bei geringer aufgenommener Quantadosis deutlich an und nähert sich asymptotisch einem Infektionsrisiko von 100%. [50]

$$\mathrm{PIRA} = 1 - \mathrm{e}^{-Q_{Quanta}(\mathrm{t})} \tag{2-23}$$

PIRA Infektionswahrscheinlichkeit (Predicted Infection Risk via Aerosols)

Infektionsketten

Infektionsketten beschreiben die Abfolge von Virusübertragungen von infizierten Personen zu gesunden Personen. Die zeitlichen Verläufe innerhalb einer Infektionskette sind in Bild 2-6 visualisiert. Zu Beginn ist Person 1 infiziert, welche das Virus zu verschiedenen Zeitpunkten auf eine weitere Person überträgt. Die Inkubationszeit definiert die Zeitspanne zwischen der Infektion und dem Auftreten der ersten Symptome. Die Latenzzeit beschreibt die Zeitspanne zwischen Infektion und dem Zeitpunkt, ab dem die betroffene Person infektiös ist. Inkubationszeit und Latenzzeit können sich hierbei unterscheiden. Bei der SARS-CoV-2 Variante Omikron beträgt die mittlere Latenzzeit ca. einen Tag und ist damit kürzer als die mittlere Inkubationszeit von ca. drei Tagen [19, 53]. Somit ist eine Transmission vor dem Auftreten der Krankheitssymptome möglich. [51]

Daraus ergeben sich die beiden Fälle in Bild 2-6. Person 2 wird infiziert, bevor bei der ersten Person Symptome auftreten. Dieser Fall ist besonders kritisch für die Ausbreitung des Virus, da Person 1 infektiös ist, ohne dies selbst zu bemerken und somit keine entsprechenden Maßnahmen ergreifen kann. Zu Person 3 findet die Übertragung nach dem Auftreten der Symptome statt. Maßnahmen wie Kontaktreduktion und Quarantäne können hierbei zielgerichtet zur Eindämmung der Virusverbreitung beitragen.

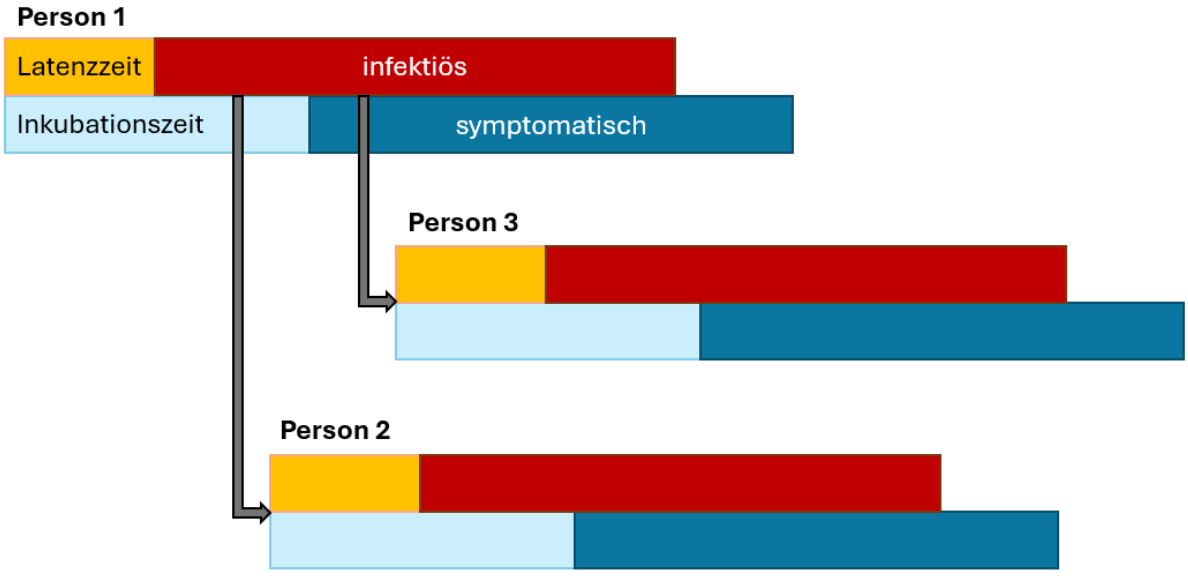

Bild 2-6: Zeitliche Verläufe innerhalb einer Infektionskette

Innerhalb einer Personengruppe, die untereinander in regelmäßigem Kontakt steht, ist das Infektionsrisiko durch eine infizierte Person deutlich erhöht. Dieser Effekt wird durch die sekundäre Befallsrate beschrieben, die die Quote der Neuinfektionen im Verhältnis zur Kontaktanzahl angibt. Bei der SARS-CoV-2 Variante Omikron wurden in Haushalten durch eine infizierte Person über 30% der übrigen Haushaltsmitglieder angesteckt. Das Personal eines Bürogebäudes bildet ebenfalls eine solche Personengruppe, weshalb innerhalb der Belegschaft von einem deutlich erhöhten Infektionsrisiko auszugehen ist. [51]

Treten Neuinfektionen zeitlich oder räumlich gehäuft auf, wird dies als Infektionscluster bezeichnet. So kann beispielsweise eine einzelne infektiöse Person mehrere andere Personen infizieren, wie in Bild 2-7 dargestellt. Innerhalb einer Bürobelegschaft ist dies besonders ungünstig, da sich mehrere Personen infizieren und zu einem späteren Zeitpunkt zeitgleich infektiös im Büro anwesend sein können. Damit steigen die sekundäre Befallsrate und somit das Infektionsrisiko der restlichen Belegschaft weiter an. [51]

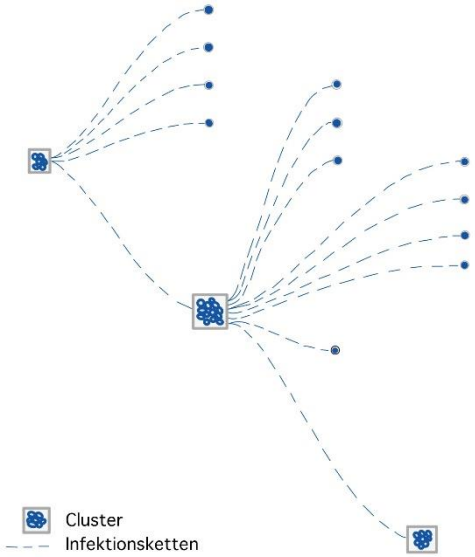

Bild 2-7: Einfluss von Clustern auf Infektionsketten – in Anlehnung an [12]

2.3.2 Infektionsschutz

Während der COVID-19-Pandemie wurden zahlreiche Maßnahmen für den Gesundheitsschutz einzelner Personen und zur Eindämmung der Virenausbreitung ergriffen. Eine effektive Maßnahme stellt die Kontaktreduktion im privaten und beruflichen Rahmen dar. In Deutschland wurden zweifach bundesweite Lockdowns mit erheblichen Einschränkungen des öffentlichen Lebens festgelegt. Als weitere Einschränkungen wurde eine mehrtägige Quarantäne von infizierten Personen und deren Kontaktpersonen zeitweise verpflichtend. Im beruflichen Umfeld bestand ein hoher Fokus auf dem Arbeiten aus dem Homeoffice, wobei die Quote vom jeweiligen Wirtschaftsbereich abhängig war. Für das Jahr 2022 schwankte die Homeoffice-Quote für Büroarbeit zwischen 35 und 76% [58]. Die Folgen der Kontaktreduktion, insbesondere die der Lockdowns, waren sowohl hohe individuelle Einschränkungen als auch erhebliche wirtschaftliche Verluste von Unternehmen [26]. [17]

Als Schutzmaßnahmen im Alltag wurden die sogenannten „AHA-Regeln“ eingeführt, was für „Abstand-Handhygiene-Alltagsmaske“ steht. Abstand und Handhygiene sind wirksame Maßnahmen zur Reduktion von Übertragungen durch Tröpfchen oder Kontaktflächen. Masken für Nase und Mund haben sich im Laufe der Pandemie gegenüber Aerosolen als wirksamer Infektionsschutz erwiesen. Die Art der Maske und die Anwendung ist dabei für die Effektivität entscheidend. Tragen infektiöse Personen und ansteckungsgefährdete Personen eine passende medizinische Maske, sinkt das Infektionsrisiko unter konservativen Annahmen auf ca. 10% des ursprünglichen Risikos. Mit FFP2-Masken reduziert sich das Risiko auf unter 5% bei schlechter Abdichtung der Masken, bzw. auf unter 1% bei guter Abdichtung [38]. [8]

Durch Impfungen und vorangegangene Infektionen entwickelt der Mensch Antikörper gegenüber Viren. Dies senkt das Risiko für Neuinfektionen und führt statistisch zu milderen Krankheitsverläufen. Der prozentuale Infektionsschutz beschreibt die Reduktion des Infektionsrisikos im Vergleich zu Personen ohne zusätzlichen Infektionsschutz. In Bild 2-8 ist der zeitliche Verlauf des prozentualen Infektionsschutzes gegenüber der Omikron-Variante dargestellt. Dabei wird zwischen der Grundimmunisierung und der Boosterimpfung unterschieden, wobei letztere im Vergleich einen erheblich höheren Infektionsschutz bietet. Bei beiden Impfungen ist jedoch im zeitlichen Verlauf eine Abnahme des Impfschutzes zu beobachten. Bei der Grundimmunisierung ist ein asymptotischer Verlauf gegen null erkennbar. Personen, die eine Infektion durchlaufen haben, besitzen einen vergleichbaren Infektionsschutz wie nach einer Boosterimpfung. Obwohl einzelne Personen nach einer Erkrankung oder Impfung vorübergehend eine vollständige Immunität aufweisen können, ist dies im Allgemeinen nicht der Fall. [66]

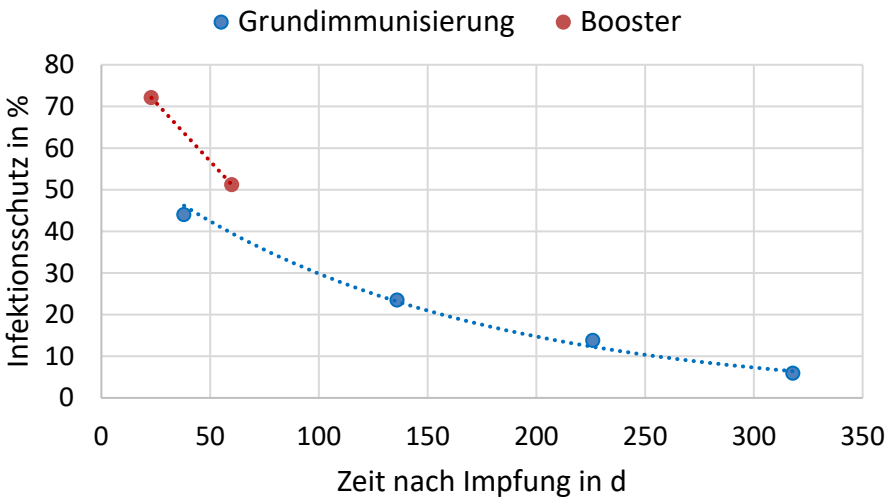

Bild 2-8: Zeitlicher Verlauf des prozentualen Infektionsschutzes gegenüber Omikron aufgrund von Impfungen, visualisiert gemäß *Tseng* et al. [66]

2.3.3 Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte in Innenräumen weist einen Einfluss auf das Infektionsrisiko durch infektiöse Aerosole auf. Besonders bei relativen Luftfeuchten von unter 40% steigt dieses Risiko erheblich, weshalb bei SARS-CoV-2 ein Bereich zwischen 40 und 60% empfohlen wurde. [16]

Bei niedriger relativer Luftfeuchte sind die Nasenschleimhäute trockener und durchlässiger für Viren, was das Infektionsrisiko erhöht. Des Weiteren wird die Virustransmission beeinflusst: Die von infektiösen Personen ausgestoßenen Tröpfchen verdunsten schneller. Dadurch sinken weniger Tröpfchen zu Boden und mehr virushaltige Partikel verbleiben in der Luft. [3, 16]

Die Überlebensfähigkeit von Viren in den Tröpfchen ist ebenfalls abhängig von der Konzentration anderer gelöster Stoffe, wie beispielsweise Salze, welche über die Zeit schädlich auf die Viren wirken. Bei geringen relativen Luftfeuchten kommt es zwar zur Verdunstung und damit zu hohen Konzentrationen der gelösten Stoffe, jedoch trocknen die Tröpfchen schnell aus. Dadurch haben die anderen Stoffe nicht lange einen schädlichen Einfluss auf die Viren, weshalb sich deren Überlebensfähigkeit erhöht. [3, 16]

In Deutschland treten vor allem im Winter niedrige relative Luftfeuchten in Innenräumen auf. Hier kann eine Befeuchtung der Raumluft dazu beitragen, das Infektionsrisiko zu senken. *Park* et al. kamen anhand statistischer Methoden zu dem Ergebnis, dass eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte von 1% mit einer Reduktion des Infektionsrisikos von 0,71% korreliert. Wird die relative Luftfeuchte im Winter beispielsweise von 20 auf 40% erhöht, sinkt das Infektionsrisiko um 14,2%. [44]

2.3.4 Arbeitsunfähigkeitskosten

Arbeitsunfähigkeit (AU) beschreibt den Zustand, in dem eine Person aufgrund gesundheitlicher Erkrankungen ihre beruflichen Aufgaben nicht erfüllen kann. Fehlzeiten des Personals führen zu erheblichen wirtschaftlichen Einbußen für Unternehmen. Im Jahr 2022 betrug der Verlust durch Arbeitsunfähigkeit ca. 5,1% des Bruttonationaleinkommens in Deutschland. Der größte Anteil dieser Verluste ist auf Erkrankungen des Atemwegssystems zurückzuführen, die durch die COVID-19-Pandemie deutlich angestiegen sind. Nach den Lockerungen der Maßnahmen im Jahr 2022 erhöhte sich der Krankenstand von 4,0 auf 5,2% [65]. [15]

Die entstehenden Kosten für Unternehmen setzen sich aus einer Vielzahl von Faktoren zusammen. Eine Entgeltfortzahlung im Krankheitsfall ist nach § 3 EntgFG für eine Dauer von bis zu sechs Wochen verpflichtend. Während dieser Zeit werden Lohnkosten für die erkrankte Person gezahlt. Diese Entgeltfortzahlung ohne Gegenleistung stellt einen wirtschaftlichen Verlust dar und bietet die Möglichkeit, die Produktionsausfallkosten vereinfacht abzuschätzen. [15]

Darüber hinaus beeinträchtigt der Ausfall einer Person die allgemeine Wertschöpfung des Unternehmens. Häufig muss der Arbeitsausfall von den verbleibenden Mitarbeitern kompensiert werden, was deren eigene Arbeit negativ beeinflusst und zu Überlastungen und Überstunden führen kann. Zudem müssen gegebenenfalls Arbeitspläne angepasst und Termine verschoben werden, was weitere Kosten verursacht. In schwerwiegenden Fällen können Produktionsausfälle und Lieferschwierigkeiten auftreten, was zu Konventionalstrafen und Schadensersatzzahlungen führen kann. Generell verursachen Fehlzeiten Opportunitätskosten, da Unternehmen Gewinne entgehen, die ansonsten möglich gewesen wären. [30]

Die expliziten Kosten von Arbeitsunfähigkeit sind maßgeblich von der Unternehmensstruktur abhängig. In Tabelle 2-1 sind die durchschnittlichen Arbeitsunfähigkeitskosten für verschiedene Wirtschaftsbereiche dargestellt. Diese basieren auf Daten der gesetzlichen Krankenversicherung und Schätzungen des statistischen Bundesamtes. Die Produktionsausfallkosten beziehen sich auf die Entgeltfortzahlungen, während der Ausfall an Bruttowertschöpfung die weiteren Folgen der Arbeitsunfähigkeit miteinbezieht. [15]

Tabelle 2-1: Kosten aufgrund von Arbeitsunfähigkeit in verschiedenen Wirtschaftszweigen [15]

Wirtschaftszweige	Produktionsausfallkosten pro Arbeitsunfähigkeitstag	Ausfall an Bruttowertschöpfung pro Arbeitsunfähigkeitstag
Produzierendes Gewerbe (ohne Bergbau und Baugewerbe)	168 €	285 €
Information und Kommunikation	224 €	318 €
Finanz- und Versicherungsdienstleister	220 €	335 €

3 Simulationsmodell

Im Rahmen dieser Vorstudie wird ein Simulationsmodell mit der Software Matlab/Simulink entwickelt. In Simulink werden Blockdiagramme erstellt, deren Rechenblöcke während der Simulation auf die Lösungsalgorithmen von Matlab zugreifen. Die Lüftungsstrategien beeinflussen die Energiekosten für Heizung, Kühlung, Lüftung sowie Befeuchtung, was durch die thermische Modellierung des Gebäudes erfasst wird. Zusätzlich wird das Infektionsgeschehen modelliert, um risikobasiert Neuinfektionen im Bürogebäude zu berechnen und die Kosten der daraus resultierenden Arbeitsunfähigkeit abzuleiten.

Das Simulationsmodell ist als Monte-Carlo-Simulation ausgeführt, um am Ende eines Arbeitstages wahrscheinlichkeitsbasiert zu bestimmen, ob ein Infektionsrisiko eine Infektion zur Folge hat. Die Simulationszeitspanne beträgt ein Jahr mit einer konstanten Schrittweite von 2 Minuten. Dieser lange und zusammenhängende Zeitraum ist notwendig, um die Dynamiken des Infektionsgeschehens in der Belegschaft präzise abzubilden.

Mit der Jahressimulation werden zudem die Einflüsse verschiedener Jahreszeiten auf die Energiekosten erfasst. Lüftungswärmeverluste sind von den Außenlufttemperaturen abhängig. Krankheitsbedingte Fehlzeiten reduzieren den internen Wärmeenergieeintrag durch Menschen und technische Geräte im Büro, was den Heiz- bzw. Kühlenergieaufwand beeinflusst. Das Risiko einer infektiösen Person im Büro schwankt ebenfalls im Jahresverlauf und ist in kälteren Jahreszeiten typischerweise höher [46]. Für die Simulation werden Datensätze für Temperatur, Luftfeuchte und solare Einstrahlung aus dem Testreferenzjahr 2015 des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für den Standort Stuttgart verwendet [23]. Da in Deutschland die Temperaturen im Sommer aufgrund des Klimawandels zunehmen, wird das Szenario „heißer Sommer“ des Testreferenzjahrs verwendet [22].

3.1 Thermische Modellierung

Bei der thermischen Modellierung wird die Wärmebilanz gemäß Gleichung 2-1 für jeden Zeitschritt gelöst, um die Raumtemperaturen zu bestimmen. Im Modell sind Regelkreise für Heizung, Kühlung und Lüftung implementiert, um spezielle Sollwerte einzuhalten und damit den Energieaufwand sowie die daraus resultierenden Kosten zu berechnen. Zudem wird die relative Luftfeuchte in den Räumen unter der Berücksichtigung der Befeuchtung berechnet, um den Einfluss auf das Infektionsgeschehen abzubilden.

3.1.1 Bürogebäude

In der Arbeit von *Pinzhoffer* wurde die Etage eines Bürogebäudes für eine Belegschaft von 41 Personen modelliert [47]. Der Grundriss der Büroetage stammt ursprünglich aus der Datenbank des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen e.V. und ist in Bild 3-1 dargestellt [33]. Dieser Grundriss umfasst das Großraumbüro, ein Einzelbüro für die Büroleitung, sowie zwei Besprechungsräume und stellt die Grundlage der thermischen Modellierung dar. Dabei wird von der mittleren Etage eines mehrstöckigen Gebäudes ausgegangen. Auf der Ostseite des Großraumbüros befindet sich der Zugang zu sanitären Anlagen und Flurflächen, welche aus Komplexitätsgründen nicht modelliert werden. Die Raumhöhe, abzüglich der technischen Ausstattung wie der Beleuchtung, beträgt 3,25 m.

Die Wände und Fenster sind gemäß den Vorgaben der EnEV mit einem hohen Dämmstandard ausgelegt [76]. Für die Wände resultiert ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0,26 W/(m²K), für die Fenster 1,0 W/(m²K) [47]. Damit liegt der Dämmstandard zwischen dem eines Niedrigenergiebüros und dem eines Passivhauses, was laut dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie dem Stand der Technik für Neubauten entspricht [9, 10]. Für Decke und Boden wird angenommen, dass die angrenzenden Etagen einen identischen Aufbau besitzen, wodurch der Wärmedurchgang zu diesen Etagen vernachlässigt werden kann.

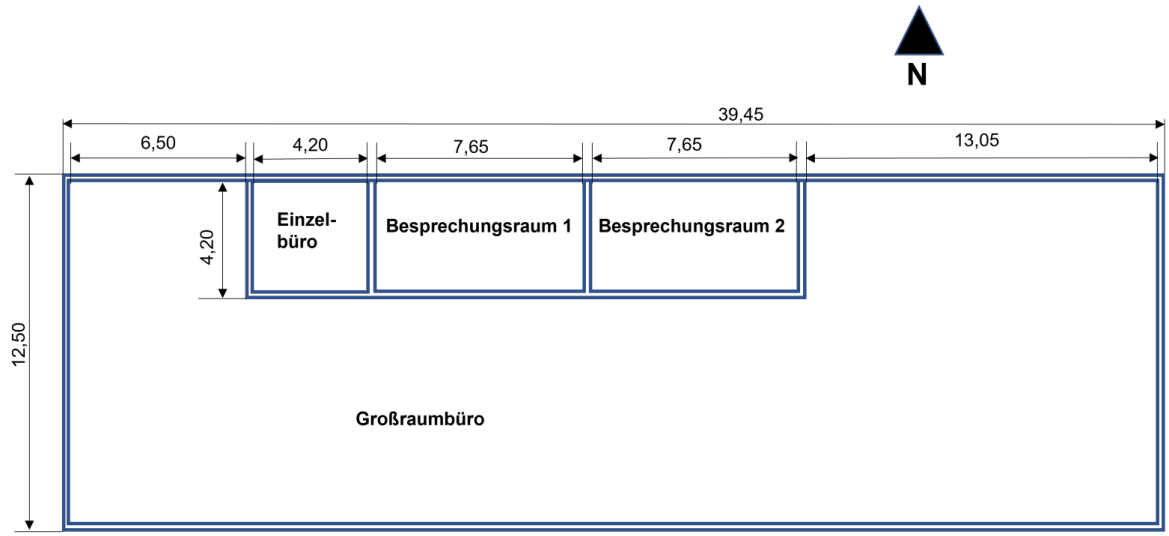

Bild 3-1: Grundriss der modellierten Büroetage [47]

Die Wärmedurchgänge des Gebäudes sowie die thermischen Speichermassen von Wänden und Raumluft sind mit Simscape modelliert. Simscape ist eine Bibliothek aus Rechenblöcken, die auf physikalische Systeme optimiert ist und anhand physikalischer Einheiten rechnet. Die einzelnen Schichten einer Wand sind in einem Blockschaltbild miteinander verknüpft, wie in Bild 3-2 beispielhaft für eine Außenwand dargestellt. Der konduktive Wärmedurchgang in den Wandschichten erfolgt gemäß dem Fourier-Gesetz (Gleichung 2-3), wobei die thermische Speicherfähigkeit jeder Schicht berücksichtigt wird. An der Innen- und Außenseite der Wand findet ein konvektiver Wärmeübergang zur angrenzenden Luft sowie Wärmestrahlung Berücksichtigung. Die Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion und Wärmestrahlung (Gleichung 2-7 und 2-8) werden dabei zusammengefasst. Für die Innenwand wird ein Wärmeübergangskoeffizient von 7,7 W/(m²·K) und für die Außenwand von 20 W/(m²·K) angenommen [47]. Der Wärmedurchgang der Fenster wird analog zu Bild 3-2 für die Glasschichten und die Glasfüllung modelliert. Die Dicken und Materialdaten der einzelnen Schichten sind in Tabelle 7-1 in Kapitel 7.1 dargestellt.

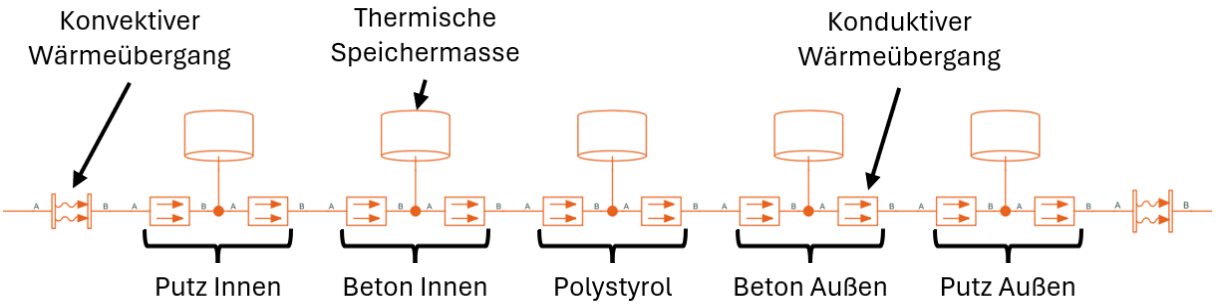

Bild 3-2: Aufbau einer Außenwand mit Simscape

Im Rahmen dieser Vorstudie wird das thermische Modell weiterentwickelt. Der Modellaufbau der Büroetage ist in Bild 3-3 zu erkennen, wobei die grauen Blöcke Subsysteme repräsentieren, in denen die Blockdiagramme der Teilsysteme zusammengefasst sind. Für jeden Raum wird der Wärmedurchgang durch die entsprechenden Außenwände berücksichtigt. Die thermische Modellierung ist um die westliche und östliche Außenwand erweitert, die zuvor als adiabat angenommen wurden und keine Wechselwirkung mit der Umgebung hatten. Diese Erweiterung ermöglicht eine genauere Erfassung der Wärmeverluste und -gewinne des Gebäudes über die Wände. Für die Berücksichtigung von Wärmebrücken ist die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung angepasst, wodurch sich der Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwände um 0,05 W/(m²K) erhöht [74, 76]. Der Fensterflächenanteil wird nach den Empfehlungen des bayrischen Landesamts für Umwelt für eine effiziente Energienutzung bei Bürogebäuden bei allen Außenwänden auf 30% festgelegt [10].

Die Zwischenwände werden in dieser Vorstudie vereinfacht als einzelne thermische Speichermassen modelliert. Die Räume sind über die jeweilige Wandfläche mit der gesamten thermischen Masse verbunden. Der Wärmedurchgang zwischen den einzelnen Räumen wird nicht berücksichtigt, da die Unterschiede der Raumtemperaturen und somit die Wärmeströme zwischen den Räumen vernachlässigbar sind. Mit dieser Vereinfachung wird die Rechenzeit der Simulation reduziert.

Des Weiteren werden die Böden und Decken der Räume als thermische Speichermassen berücksichtigt. Diese haben einen erheblichen Einfluss auf die Erwärmung und Abkühlung der Räume und verhindern eine schnelle Auskühlung des Gebäudes während der Nachtabsenkung, wenn die Heizung außerhalb der Betriebszeit nicht eingeschaltet ist. Im Sommer reduzieren die thermischen Speichermassen den Anstieg der Raumtemperaturen und verringern den Kühlenergieaufwand [10]. In den Böden der jeweiligen Räume ist eine Fußbodenheizung integriert, deren Modellierung in Kapitel 3.1.2 genauer beschrieben wird.

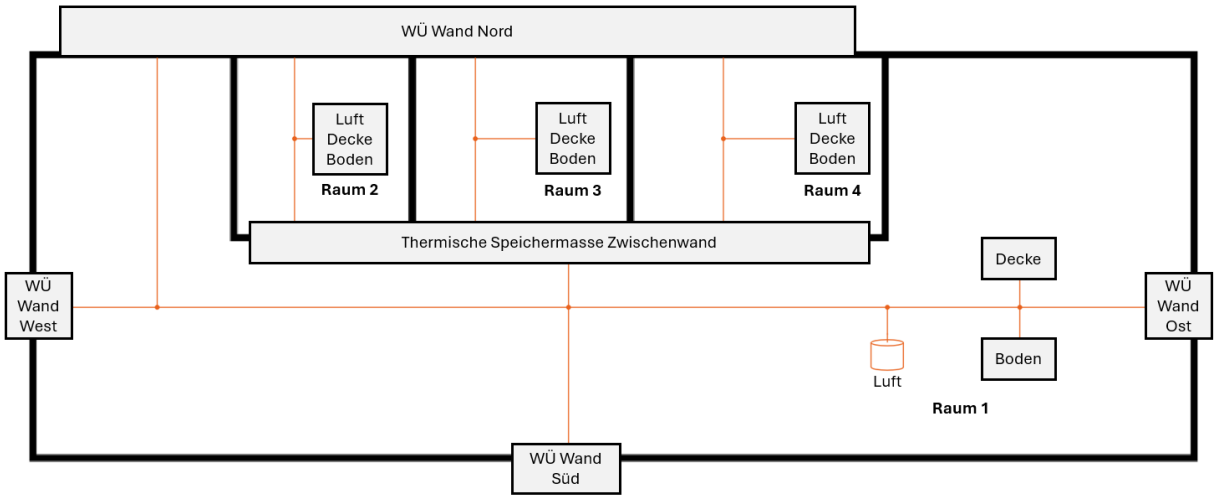

Bild 3-3: Überblick des thermischen Modells der Büroetage

3.1.2 Interne Wärmequellen

Die Solarstrahlung bewirkt eine Wärmezufuhr sowohl durch die Fenster ins Gebäudeinnere als auch auf die Außenwandoberfläche. Da die solare Einstrahlung auf der Nordseite aufgrund der Ausrichtung gering ist, wird diese im Simulationsmodell vernachlässigt. Dadurch entfällt die Solarstrahlung im Einzelbüro und in den Besprechungsräumen vollständig, was den Berechnungsaufwand der Simulation reduziert.

Der Algorithmus zur Berechnung der Wärmezufuhr durch die Fenster ist schematisch in Bild 3-4 dargestellt. Anhand eines Datensatzes mit Sonnenstandswinkeln werden die Einfallswinkel auf der Ost-, Süd- und Westseite berechnet [63]. Mit diesen Einfallswinkeln kann die gemessene horizontale Direktstrahlung gemäß Gleichung 2-10 auf die senkrechten Oberflächen umgerechnet werden. Für den maximalen Gesamtenergiedurchlassgrad der Fenster wird ein g-Wert von 0,6 angenommen [76]. Die Modifikation des Gesamtenergiedurchlassgrads in Abhängigkeit des Einfallswinkels gemäß Bild 2-3 wird über eine Look-Up-Table realisiert. Daraus resultiert der Anteil der Direktstrahlung, welcher als Wärmezufuhr in den Raum gelangt.

Die Berechnung der Diffusstrahlung durch die Fenster vereinfacht sich, da konstante Umrechnungsfaktoren von 0,5 für die senkrechte Oberfläche und 0,503 für den Gesamtenergiedurchlassgrad angenommen werden können. Die Summe aus Direkt- und Diffusstrahlung durch die Fenster ergibt die Gesamtstrahlung. Ein Teil dieser Gesamtstrahlung gelangt von innen über die Fenster wieder nach außen, was für einen Fensterflächenanteil von 30% mit einem Minderungsfaktor von 0,87 berücksichtigt wird [41]. Die verbleibende Gesamtstrahlung wird als Wärmezufuhr auf die Raumflächen in die Wärmebilanz einbezogen, wobei die zugeführte Wärme auf die Oberflächen der Zwischenwände und den Fußboden des Großraumbüros aufgeteilt wird.

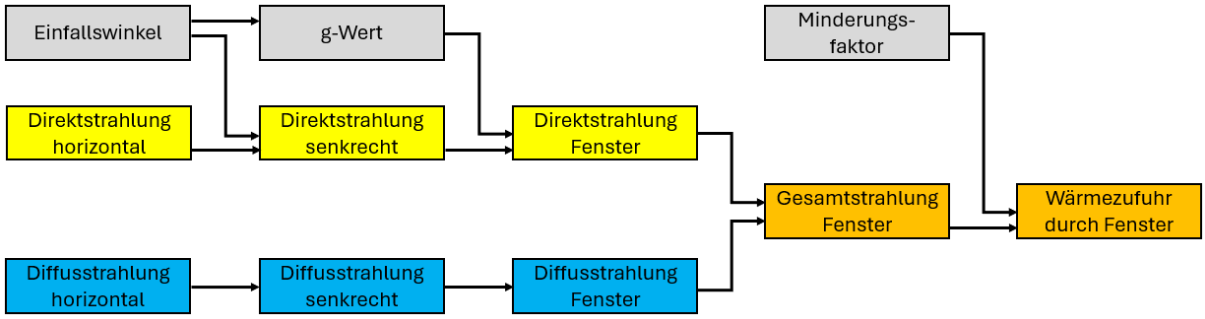

Bild 3-4: Schematische Darstellung des Algorithmus zur Strahlungsberechnung durch die Fenster

Die Solarstrahlung auf die Außenwandoberfläche wird direkt auf den Putz übertragen, was die Berechnung vereinfacht. Der Anteil der absorbierten Energie wird durch den Absorptionsgrad bestimmt, welcher für die Außenwand auf 0,6 festgelegt ist [49].

Beleuchtung

Während der Arbeitszeiten muss eine ausreichende Beleuchtung am Arbeitsplatz sichergestellt sein. Im Simulationsmodell wird gemäß der Arbeitsschutzrichtlinie ASR A3.4 eine Mindestbeleuchtungsstärke von 500 lx für Büros mit Tätigkeiten wie Schreiben, Lesen und Datenverarbeitung angesetzt [72]. Die Abwärme und das Licht durch den Betrieb eines Beleuchtungssystems fließen als Wärmeströme in die Wärmebilanz des Raumes ein. Die Effizienz der Beleuchtung wird durch die Lichtausbeute beschrieben, welche durch das Verhältnis von abgegebener Lichtmenge zu aufgenommener elektrischer Leistung definiert ist. Für die Büroetage wird ein LED-System mit einer Lichtausbeute von 90 lm/W gewählt [78]. Aus dem Produkt der Grundfläche der Räume, der Mindestbeleuchtungsstärke und der Lichtausbeute resultiert eine Wärmezufuhr von ca. 3000 W durch die Beleuchtung.

Das durch die Fenster einfallende Tageslicht trägt ebenfalls zur Beleuchtung des Arbeitsplatzes bei und ist nach der ASR A3.4 der künstlichen Beleuchtung vorzuziehen [72]. Im Simulationsmodell werden die Wärmezufuhr durch solare Einstrahlung und durch das Beleuchtungssystem daher gekoppelt betrachtet. Das Tageslicht hat eine vergleichbare Lichtausbeute wie das LED-System [75]. Während der Arbeitszeit im Büro bedeutet eine Wärmezufuhr von 3000 W somit eine ausreichende Beleuchtung, welche durch eine Kombination aus natürlichem und künstlichem Licht gedeckt werden kann. Ist die durch Fenster wirksame solare Wärmezufuhr geringer als 3000 W, liefert das Beleuchtungssystem die Differenz an Licht bzw. Wärmezufuhr.

Ein Sonnenschutz der Fenster ist erforderlich, um ab einer bestimmten Solarstrahlungsintensität Blendung zu vermeiden [72]. Als Maßnahme gegen Blendung wird ein außenliegender Sonnenschutz mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von 0,1 gewählt, welcher bei einer Intensität von 250 W/m² auf die Fensteraußenoberfläche aktiviert wird [10]. Im Sommer wird der Sonnenschutz bereits bei einer Intensität von 50 W/m² aktiviert, um die Erwärmung des Gebäudes zu reduzieren.

Belegschaft

Menschen geben je nach ihrer Tätigkeit Wärme ab und nutzen technische Geräte, die ebenfalls Abwärme verursachen. Die angenommenen Wärmeströme einer Person und der zugehörigen technischen Geräte für Bürotätigkeiten sind neben den stofflichen Emissionsraten in Tabelle 3-1 dargestellt. Diese Wärmeströme werden in die Wärmebilanz des Raumes miteinbezogen, in dem sich die jeweilige Person aufhält.

Tabelle 3-1: Personenbezogene Daten für das thermische Modell

Parameter	Wert
Wärmestrom pro Person	100 W [41]
Wärmestrom pro technisches Gerät	50 W [47]
CO_2-Emissionsrate pro Person	20 l/h [47]
Wasseremissionsrate pro Person	50 g/h [47]

Heizung und Kühlung

Um den menschlichen Behaglichkeitsbereich zwischen 20°C und 26°C sicherzustellen, ist eine Heizung und Kühlung der Büroetage erforderlich. Für die Wärmezufuhr bzw. -abfuhr wird eine Fußbodenheizung im Estrich modelliert, wie schematisch in Bild 3-5 dargestellt. Die Wärme wird flächendeckend unmittelbar oberhalb der Heizelemente zu- bzw. abgeführt. Ein konvektiver Wärmeübergang findet zwischen Raum und Estrich statt, während ein Teil der solaren Einstrahlung von der Fußbodenoberfläche absorbiert wird. Aufgrund der thermischen Speichermasse des Estrichs kommt es zu einem realitätsnahen zeitlichen Versatz zwischen den Wärmeströmen der Heizelemente und der Raumtemperierung. Die Temperierung des Wassers in den Heizelementen erfolgt mit Hilfe einer Wärmepumpe, was in die Berechnung der Energiekosten in Kapitel 3.1.4 einfließt.

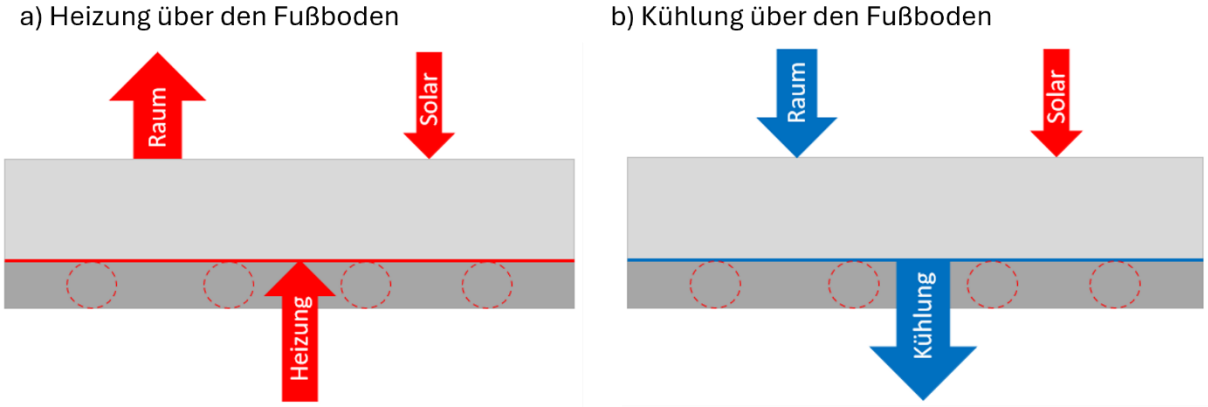

Bild 3-5: Schematische Darstellung des Modellaufbaus der Fußbodenheizung

Für die Regelung der Raumtemperatur werden zwei Regelkreise mit Proportionalanteil (P-Anteil) verwendet. Mit den P-Reglern wird der Heiz- bzw. Kühlbedarf eines Raumes proportional zur Abweichung der Solltemperatur bestimmt. Diese einfache Regelstrategie ermöglicht die Einhaltung des Temperaturbands mit geringer Rechenzeit des Simulationsmodells. Bei der Verwendung von P-Reglern bleibt eine Regelabweichung bestehen, weshalb die Sollwerte des Temperaturbands für die Regelung angepasst werden. Für die Heizung wird ein Regelsollwert von 20,7°C und für die Kühlung ein Regelsollwert von 25,3°C verwendet.

Außerhalb der Arbeitszeiten in der Nacht und am Wochenende werden das Heiz- und Kühlsystem nicht eingeschaltet. Im Winter führt dies zu einer Abkühlung des Gebäudes, welche maßgeblich von den thermischen Speichermassen der Baustruktur abhängt. Durch die geringeren Temperaturen reduzieren sich die Wärmeverluste an die Umgebung. Da die Wärmeströme der Fußbodenheizung aufgrund des Estrichs zeitlich verzögert die Raumtemperatur beeinflussen, wird die Heizung vier Stunden vor Arbeitsbeginn eingeschaltet, um das Gebäude zu Betriebsbeginn wieder ausreichend aufzuheizen. Ebenso wird die Fußbodenheizung bereits vier Stunden vor Arbeitsende ausgeschaltet.

3.1.3 Lüftung

Bei der Belüftung mit variablen Volumenströmen wird den Räumen Zuluft zugeführt und unter der Annahme einer idealen Mischlüftung Raumluft abtransportiert. Der Lüftungsbedarf wird durch den CO_2-Gehalt der Raumluft geregelt, welcher für jeden Raum gemäß Gleichung 2-12 berechnet wird. Es wird angenommen, dass die Außenluft einen konstanten CO_2-Gehalt von

400 ppm hat [67]. Für jeden Raum ist ein Regelkreis mit Proportionalanteil und Integralanteil implementiert. Der I-Anteil kompensiert über die Zeit die bleibende Regelabweichung.

Die Luftvolumenströme sind von der Anzahl der sich im Raum befindenden Personen abhängig, da diese durch ihre Atmung CO_2 emittieren (siehe Tabelle 3-1). Je mehr Personen sich in einem Raum aufhalten, desto höher muss der Luftvolumenstrom sein, um das CO_2-Niveau zu regulieren. Die minimalen und maximalen Luftvolumenströme werden durch die entsprechenden Luftwechsel festgelegt, welche die Häufigkeit des Raumluftaustauschs pro Stunde angeben. Aus hygienischen Gründen wird ein minimaler Luftwechsel von 0,3 1/h angenommen, während ein maximaler Luftwechsel von 10 1/h für die Einhaltung des menschlichen Behaglichkeitsbereichs gewählt wird [76]. Das Lüftungssystem der Büroetage wurde in vorangegangenen Arbeiten am IGTE anhand der Norm DIN EN 16798-1 und der VDI-Richtlinie 2087 dimensioniert [32, 47]. In Bild 3-6 ist das Rohrleitungssystem der Zuluft blau und das Rohrleitungssystem der Abluft rot dargestellt.

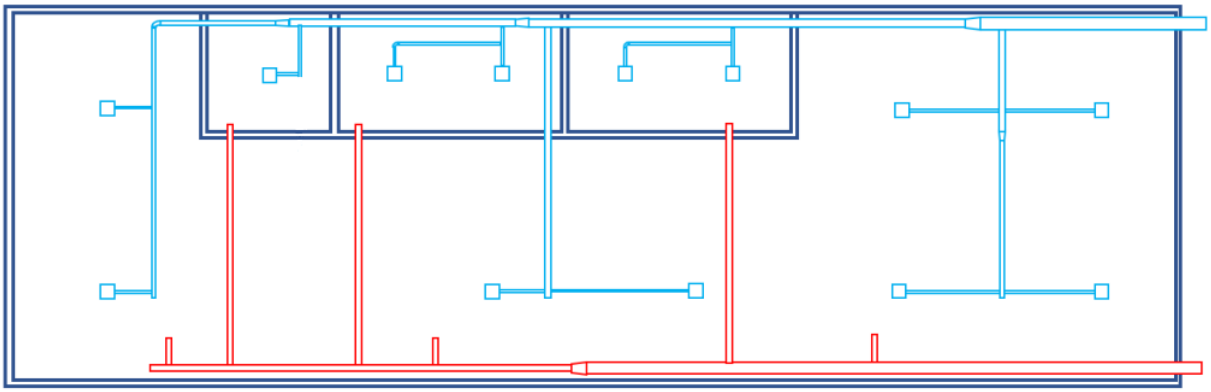

Bild 3-6: Kanalnetz von Zu- und Abluft [47]

Die Berechnung der Ventilatorenergie für einen Luftvolumenstrom gemäß Gleichung 2-17 erfordert zunächst die Erfassung der Druckverluste im Lüftungssystem. Diese Verluste werden durch die Luftvolumenströme beeinflusst. In einem VVS-System werden die Volumenströme zu den einzelnen Räumen über Drosselklappen reguliert. Es resultiert für vorgegebene Luftvolumenströme ein Leitungsstrang mit dem höchsten Druckverlust, bei dem die Drosselklappe vollständig geöffnet bleibt. Die Drosselklappen der anderen Leitungsstränge werden so angepasst, dass für die gewünschte Volumenstromaufteilung im Kanalnetz überall derselbe Druckverlust herrscht. Im Simulationsmodell wird somit zu jedem Zeitschritt der Leistungsstrang mit dem höchsten Druckverlust ohne Drosselklappe ermittelt, welcher für alle weiteren Stränge des gesamten Kanalnetzes repräsentativ ist.

Die Druckverluste in den Rohrleitungen werden anhand von Gleichung 2-13 berechnet. Da die Berechnung der Rohrreibungszahl gemäß Gleichung 2-15 iterativ erfolgt, wird zur Reduktion des Rechenaufwands ein konstanter Wert verwendet. Typische Luftvolumenströme führen zu Rohrreibungszahlen im Bereich von 0,2 bis 0,26, weshalb im Modell eine mittlere Rohrreibungszahl von 0,23 angenommen wird. Die Einzelwiderstände der Leitungselemente sind gemäß der VDI-Richtlinie 2087 berechnet.

Zusätzlich kommen die Druckverluste der zentralen Rohrleitungen sowie den Einzelwiderständen der Luftkonditionierung hinzu. Als Einzelwiderstände werden Gitter, Filter, Schalldämpfer, Befeuchter, Einbauverluste, Klappen und die WRG berücksichtigt, die in Kapitel 7.2 in Tabelle 7-2 dargestellt sind.

Wärmerückgewinnung und Bypass

Eine WRG reduziert die Lüftungswärmeverluste des Gebäudes erheblich, was insbesondere bei hohen Luftvolumenströmen einen signifikanten Einfluss auf den Heizenergieaufwand hat. Im Simulationsmodell wird eine Rückwärmzahl von 0,75 festgelegt [27]. In bestimmten Szenarien ist es jedoch vorteilhaft, die Zuluft nicht über die WRG zu führen, sondern diese per Bypass zu umgehen. In Bild 3-7 wird für verschiedene Temperaturverhältnisse zwischen Raum und Umgebung aufgezeigt, ob die WRG oder der Bypass genutzt wird. Die gestrichelten roten Linien markieren die minimal bzw. maximal zulässige Raumtemperatur. Die Schwelltemperatur dient als Kriterium für die Entscheidung zwischen Winter- oder Sommerbetrieb. Ist die Raumtemperatur geringer als die Schwelltemperatur, liegt der Winterfall vor.

In Fall 1 ist die WRG aktiv, wenn die Außentemperatur niedriger ist als die Mindestraumtemperatur. Liegt die Außentemperatur in Fall 2 über der Mindestraumtemperatur, ist keine Temperierung der Zuluft erforderlich. Da die WRG einen beträchtlichen strömungsseitigen Einzelwiderstand darstellt, kann durch einen Bypass eine Reduzierung der Druckverluste und somit des Lufttransportenergiebedarfs erreicht werden [20]. In Fall 3 erfolgt die Erwärmung der Räume durch die Zuluft. Die Fälle 2 und 3 treten typischerweise während der Übergangsphasen zwischen Winter und Sommer auf.

Fall 4 tritt im Sommer auf, wenn die Außentemperatur niedrig ist, was zu bestimmten Tageszeiten häufig vorkommt. Hier wird durch den Bypass das Gebäude gekühlt und der Kühlenergieaufwand reduziert. Analog zu Fall 2 werden durch einen Bypass in Fall 5 die Druckverluste im Zuluftsystem minimiert. In Fall 6, wenn die Außenlufttemperatur höher ist als die Raumlufttemperatur, erfolgt eine Vorkühlung der Zuluft durch die WRG.

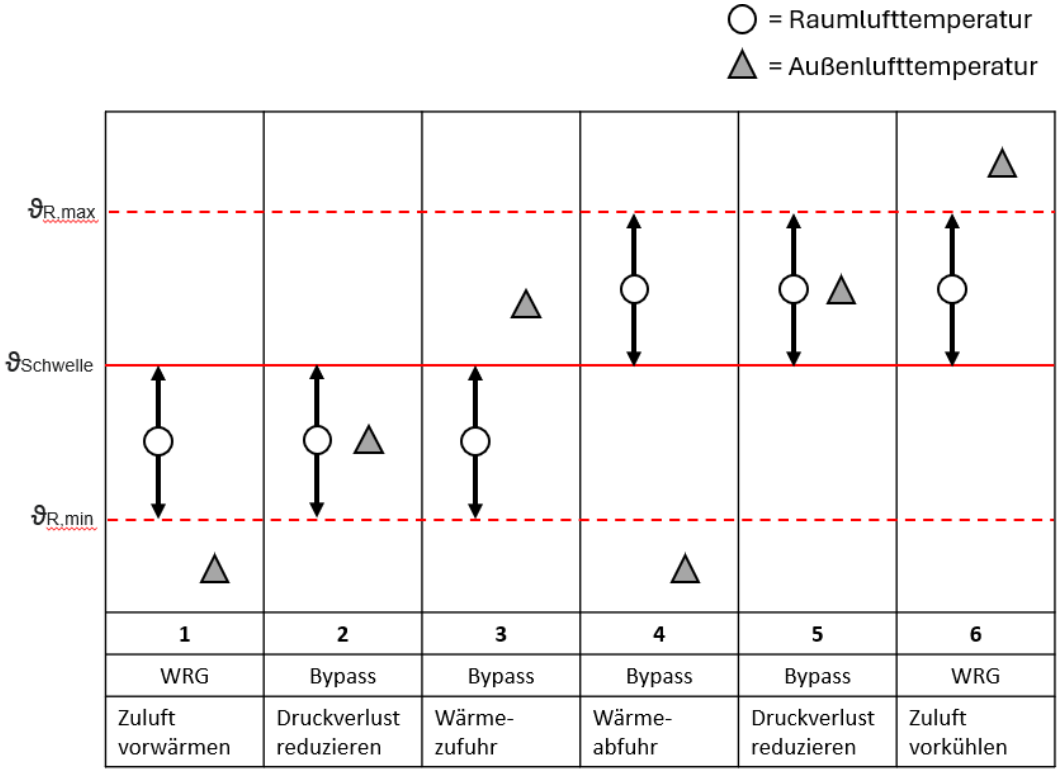

Bild 3-7: Fallunterscheidung für die Wärmerückgewinnung und den Bypass

Befeuchtung

Die relative Luftfeuchte beeinflusst das Infektionsgeschehen und wird für die einzelnen Räume gemäß Gleichung 2-20 aus dem Wassergehalt der Raumluft bestimmt. Im Simulationsmodell wird berechnet, wie viel zusätzliches Wasser in die Zuluft eingebracht werden muss, um die vorgegebene Luftfeuchte zu erreichen. Dabei wird vereinfacht von einem stationären Zustand ausgegangen, da eine detailliertere Betrachtung bei einer Simulationsschrittweite von 2 Minuten zu Divergenzproblemen führen kann. Im stationären Zustand muss mit der Befeuchtung die Differenz zwischen der erforderlichen Wassermenge in der Luft und dem zugeführten Wasser durch Zuluft und Menschen (siehe Tabelle 3-1) ausgeglichen werden. Wenn durch nicht befeuchtete Zuluft und Menschen bereits eine höhere Luftfeuchte als vorgegeben entsteht, findet keine zusätzliche Befeuchtung statt.

Das zugeführte Wasser wird im Befeuchter verdunstet. Die dafür benötigte Energie wird anhand der Verdampfungsenthalpie von Wasser $\Delta h = 2500\,\mathrm{kJ/kg}$ abgeschätzt und vom Befeuchter bereitgestellt. Die zusätzliche Energie für den Wassertransport und die Erwärmung des flüssigen Wassers ist verhältnismäßig gering und wird daher vernachlässigt.

3.1.4 Energiekosten

Im Simulationsmodell werden die Energiekosten basierend auf dem Energieaufwand für Heizung, Kühlung, Lüftung und Befeuchtung berechnet. Der dafür angenommene Strompreis betrug im Jahr 2022 durchschnittlich 0,267 €/kWh für Nicht-Haushalte mit einem Energieverbrauch von unter 20 MWh [59].

Die Wärmebereitstellung erfolgt über eine elektrisch betriebene Luft-Wasser-Wärmepumpe, die den Großteil der Nutzenergie aus der Umgebungsluft aufnimmt. Elektrische Energie wird hauptsächlich für die Verdichtung des Kältemittels benötigt. Das Verhältnis der nutzbaren Energie für die Heizung zu der aufgebrachten elektrischen Energie hängt vom Betriebspunkt ab und wird durch den „Coefficient of Performance“ (COP) angegeben. In Bild 3-8 wird der COP einer für die Büroetage ausgewählten Wärmepumpe bei verschiedenen Außentemperaturen gezeigt, wobei die Vorlauftemperatur der Heizung konstant 35°C beträgt [13]. Dieser Verlauf ist in der Simulation als Look-Up-Table für die Berechnung der elektrischen Energie hinterlegt.

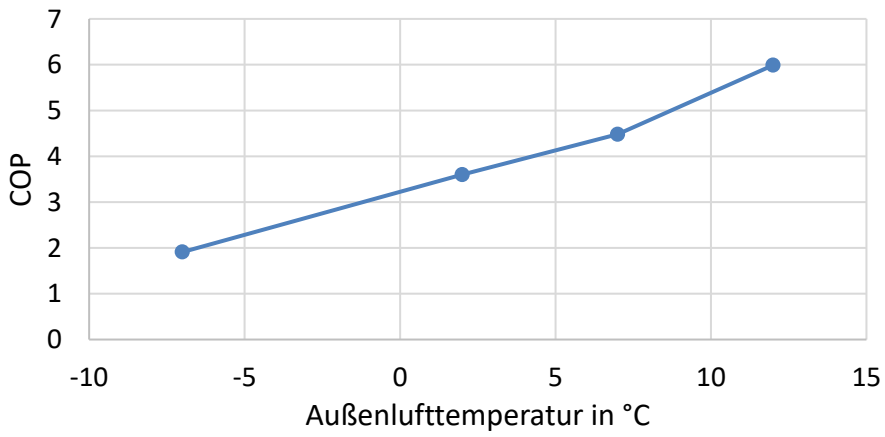

Bild 3-8: COP-Verlauf der Wärmepumpe für eine Heizugsvorlauftemperatur von 35°C [13]

Dieselbe Wärmepumpe kann im Sommer zur Kühlung verwendet werden, indem der Prozess umgekehrt wird. Das Verhältnis von genutzter Kühlleistung zu aufgebrachter elektrischer Energie wird durch die „Energy Efficiency Ratio“ (EER) angegeben. Für die Gebäudekühlung wird eine Vorlauftemperatur von 18°C und ein konstanter EER-Wert von 2,6 angenommen [13].

Für den Antrieb der Ventilatoren von Zuluft und Abluft wird elektrische Energie benötigt. Die Energiemenge resultiert gemäß Gleichung 2-17 aus dem Produkt der Druckverluste und dem Gesamtvolumenstrom aller Räume. Es wird ein konstanter elektrischer Wirkungsgrad der Ventilatoren von 60% angenommen [32].

Bei der Befeuchtung wird von einem elektrischen Erwärmer für die Verdunstung des Wassers ausgegangen. Da die weiteren Komponenten der Befeuchtung vernachlässigt werden, resultieren die Energiekosten aus der aufgebrachten Verdampfungsenthalpie und dem Strompreis.

3.2 Infektionsmodell

Bei der Modellierung des Infektionsgeschehens werden die individuellen Infektionsrisiken der Belegschaft berechnet, wenn eine infektiöse Person im Büro anwesend ist. Zusätzlich zu den Infektionsketten im Büro können sich Personen extern mit einem bestimmten Risiko anstecken. Alle Neuinfektionen werden über die Monte-Carlo-Methode bestimmt. Hierfür wird ein Wertebereich gemäß des Infektionsrisikos in zwei Intervalle unterteilt. Eine gleichverteilte Zufallszahl aus diesem Wertebereich bestimmt dann das eintretende Ereignis: Liegt die Zufallszahl im ersten Intervall, kommt es zu einer Neuinfektion, andernfalls nicht.

3.2.1 Bewegungsprofile

Zur Berechnung der Infektionsrisiken im Büro wird die Raumzuordnung der jeweiligen Person benötigt. In dieser Vorstudie wird eine ideale Mischlüftung angenommen, weshalb die Position, an der sich die jeweilige Person im Raum befindet, irrelevant ist. Aufgrund datenschutzrechtlicher Beschränkungen stehen im Rahmen dieser Vorstudie keine realen Bewegungsdaten zur Verfügung. Daher wird der Ansatz von *Pinzhoffer* weiterentwickelt, bei der die Bewegungsprofile von 41 Personen in vier Teams für einen einzelnen Tag manuell erstellt werden [47].

In dieser Vorstudie wird ein Zeitraum von einem Jahr betrachtet, weshalb eine manuelle Erstellung der Bewegungsprofile nicht praktikabel ist. Stattdessen erfolgt die Erstellung der Bewegungsprofile wahrscheinlichkeitsbasiert mittels eines Matlab-Skripts. Somit folgen die Bewegungen teamabhängigen Mustern, wobei die Bewegungsdaten für jeden Tag über die Monte-Carlo-Methode individuell ausfallen. Die berücksichtigten Faktoren bei der Profilerstellung sind in Bild 3-9 dargestellt. Ein Raumwechsel von Personen ist alle 30 min möglich.

Jedes Team besteht aus einer Teamleitung und neun Teammitgliedern, deren Arbeitsplätze sich im Großraumbüro befinden. Im Einzelbüro in Raum 2 befindet sich der Arbeitsplatz der Büroleitung. Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Belegschaft können von der regulären Arbeitszeit zwischen 8 und 17 Uhr abweichen. Bei der vollständigen Abwesenheit werden Urlaubstage, statistisch auftretende Arbeitsunfähigkeit und Arbeitsunfähigkeit durch Infektionen im Büro berücksichtigt.

In den Räumen 3 und 4 des Bürogebäudes finden Besprechungen statt. Einzelne Teams besprechen sich in Teamtreffen, während bei Teamleitungstreffen die verschiedenen Teamleitungen zusammenkommen. Die Anwesenheit der Teilnehmenden ist wahrscheinlichkeitsbasiert, sodass nicht alle möglichen Personen anwesend sein müssen. Bei teamübergreifenden Treffen werden die Teilnehmenden zufällig aus der Belegschaft ausgewählt. Die Büroleitung nimmt mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ebenfalls an Besprechungen in Raum 3 und 4 teil. Im Einzelbüro kann es zu einem Treffen von einzelnen Personen mit der Büroleitung kommen, wobei die Anzahl auf drei gleichzeitig anwesende Personen begrenzt ist. Zusätzlich kann sich die Büroleitung ebenfalls im Großraumbüro aufhalten.

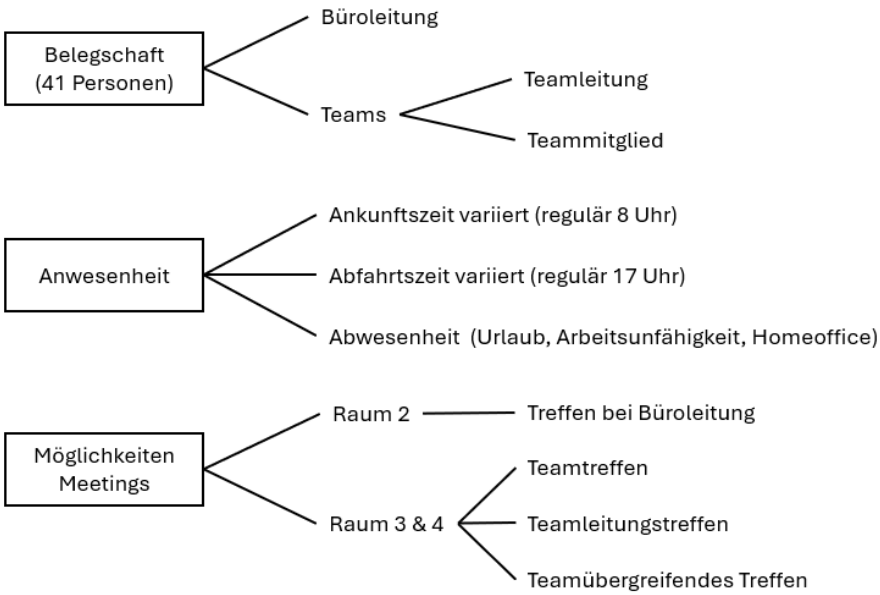

Bild 3-9: Berücksichtigte Faktoren bei der Erstellung der Bewegungsprofile

Die Bewegungsabfolgen werden in Bild 3-10 anhand eines Beispiels veranschaulicht. Hierbei wird die Raumbelegung eines Teammitgliedes und einer Teamleitung, sowie der Büroleitung, im zeitlichen Verlauf eines Tages dargestellt. Raum 0 entspricht dabei einer Abwesenheit. Die Teamleitung kommt morgens bereits um 7:30 Uhr im Büro an, während das Teammitglied und die Büroleitung ab 8 Uhr anwesend sind. Zwischen 8:30 Uhr und 10 Uhr findet ein Treffen von Team 1 in Raum 3 statt, wobei das Teammitglied und die Teamleitung die gesamte Zeit anwesend sind. Das Teammitglied verbleibt ab diesem Zeitpunkt, abgesehen von der Mittagspause, bis 17 Uhr im Großraumbüro. Die Teamleitung hat um 10:30 Uhr ein weiteres Teamleitungstreffen in Raum 4 und um 14:30 Uhr ein Treffen bei der Büroleitung im Einzelbüro.

Die Büroleitung befindet sich den Vormittag über im Einzelbüro. Am Nachmittag nimmt sie an einem Meeting in Raum 3 und einem Meeting in Raum 4 teil. Um 14:30 Uhr ist die Büroleitung für das Treffen mit der Teamleitung im Einzelbüro anwesend. Vor der Mittagspause und dem Arbeitsende befindet sich die Teamleitung jeweils für eine halbe Stunde im Großraumbüro.

Solche Bewegungsprofile werden für jedes Mitglied der Belegschaft für jeden Tag des simulierten Zeitraums automatisiert erstellt.

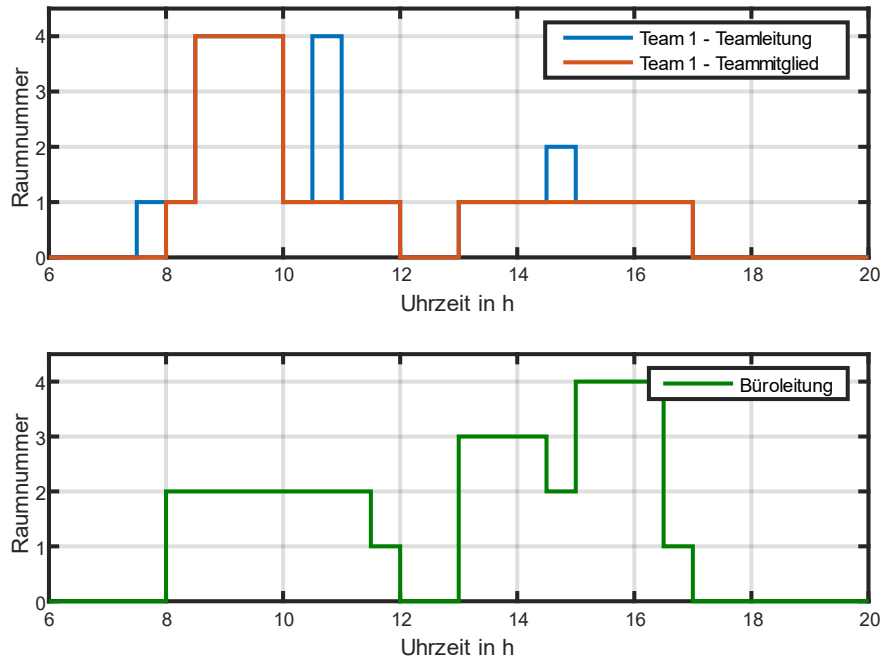

Bild 3-10: Exemplarischer Auszug aus den Bewegungsprofilen der Belegschaft

3.2.2 Virustransmission

Der Gesundheitsstatus der Belegschaft in Bezug auf den modellierten Krankheitserreger wird während der Simulation fortlaufend aktualisiert. Zum Tageswechsel wird über die Monte-Carlo-Methode für eine Person berechnet, ob diese eine Infektion entwickelt. Der zeitliche Krankheitsverlauf orientiert sich an den Daten der SARS-CoV-2 Variante Omikron im Jahr 2022 und ist in Bild 3-11 dargestellt. Tag 0 entspricht dabei dem Zeitpunkt der Infektion Zu Beginn des Infektionszyklus ist die Person noch nicht infektiös und stößt keine Quanta aus.

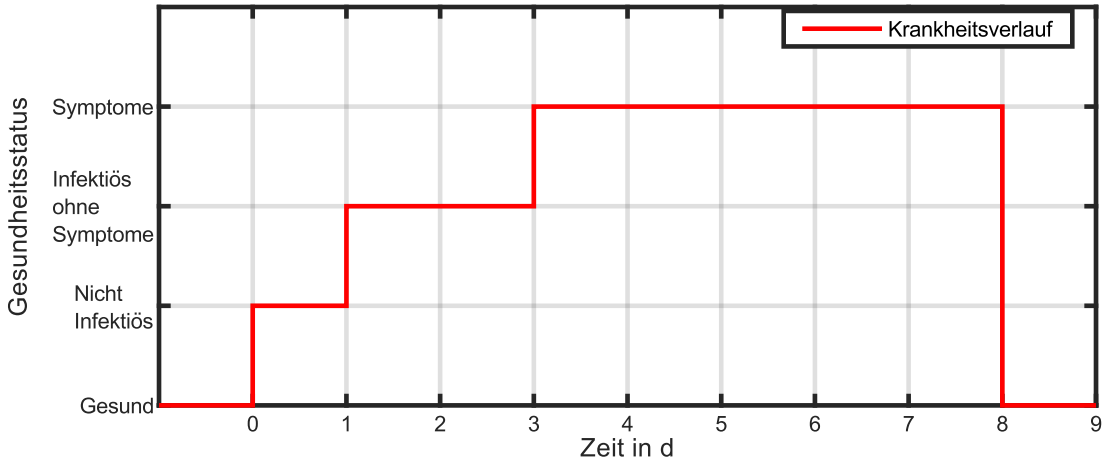

Bild 3-11: Gesundheitsstatus einer Person im zeitlichen Verlauf einer Infektion

Nach der Latenzzeit von einem Tag ist die Person infektiös, entwickelt aber noch keine Symptome. Dieser Zeitpunkt ist besonders kritisch, da sich die Person wie gewohnt im Büro aufhält. Anhand der Bewegungsprofile von Kapitel 3.2.1 wird bestimmt, wo sich die infektiöse Person befindet und in den entsprechenden Räumen resultiert die Quantakonzentration gemäß Gleichung 2-21. Die gesunden Personen in der Büroetage atmen die Raumluft ein und nehmen abhängig von der Konzentration Quanta auf, was nach Gleichung 2-23 zu einem Infektionsrisiko führt. Die im Simulationsmodell hinterlegten Personenparameter für das Infektionsgeschehen sind in Tabelle 3-2 aufgeführt.

Tabelle 3-2: Personenbezogene Daten für das Infektionsmodell

Parameter	Wert
Inhalationsvolumenstrom	0,54 m³/h [47]
Quantaemissionsrate einer infektiösen Person	114,5 quanta/h [2, 55]

In Bild 3-12 sind die Quantakonzentrationen der Luft einzelner Räume im oberen Diagramm und die individuellen Infektionsrisiken der Belegschaft im unteren Diagramm für einen beispielhaften Tagesverlauf dargestellt. In diesem Beispiel ist eine Person der Belegschaft infektiös. Die Quantakonzentration steigt in dem Raum, wo sich die infektiöse Person aufhält. Die Konzentration nähert sich einem Gleichgewicht an, bei dem durch den Luftwechsel der Lüftung genauso viele Quanta pro Zeiteinheit abtransportiert werden, wie zugeführt werden. Verlässt die infektiöse Person den Raum, sinkt die Quantakonzentration, wobei der abführende Luftstrom von der nachfolgenden Personenbelegung abhängt.

Da die gesunden Personen je nach Raum eine unterschiedliche Menge an Quanta inhalieren, variiert das individuelle Infektionsrisiko. In den Räumen, in denen sich die infektiöse Person aufhält oder sich kürzlich aufgehalten hat, nimmt die restliche Belegschaft eine besonders hohe infektiöse Quantadosis auf. In diesem Beispiel beträgt das höchste individuelle Infektionsrisiko einer Person für eine Neuinfektion ca. 27%.

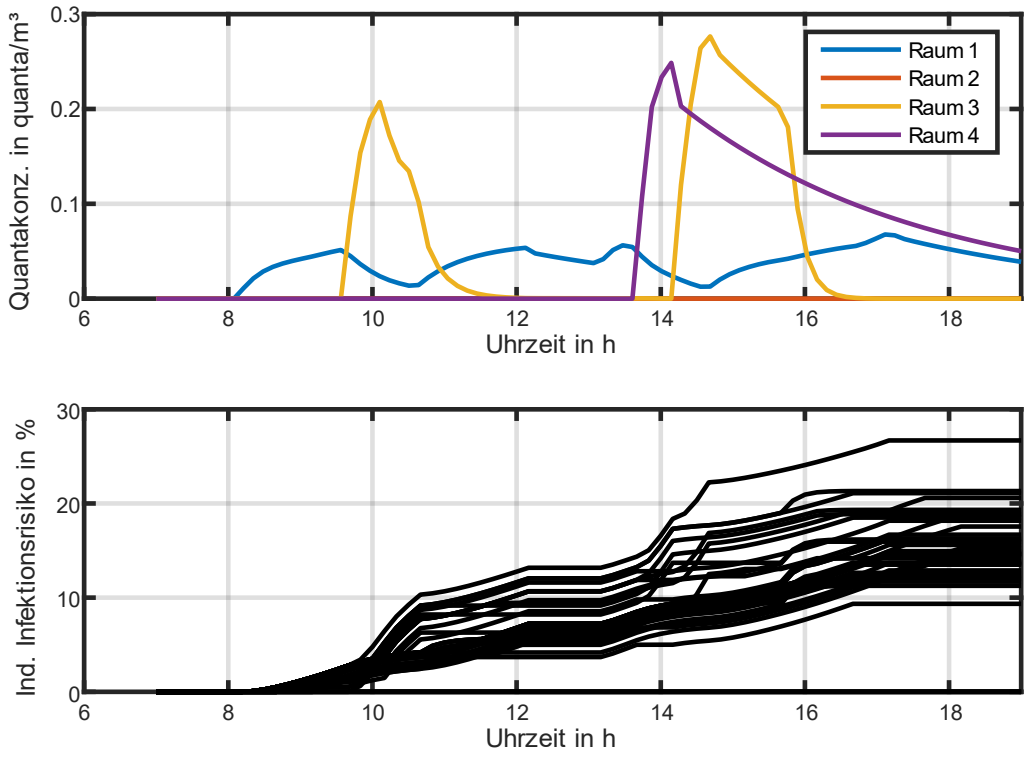

Bild 3-12: Quantakonzentrationen in der Luft einzelner Räume (oben) und individuelle Infektionsrisiken (unten), jeweils im Tagesverlauf bei einer infektiösen Person im Büro

Nach der Inkubationszeit treten am dritten Tag Symptome auf. Es wird davon ausgegangen, dass sich die erkrankte Person am dritten Tag krankmeldet und in Quarantäne begibt. Im Jahr 2022 betrug die gesetzlich vorgeschriebene Quarantänezeit mindestens 5 Tage, die im Simulationsmodell als durchschnittliche krankheitsbedingte Abwesenheit definiert wird [17]. Nach der Quarantäne wird die Person als genesen betrachtet.

Asymptomatische Verläufe werden in dieser Vorstudie nicht modelliert. Diese Vereinfachung basiert darauf, dass symptomatische und asymptomatische Verläufe eine vergleichbare Infektiosität aufweisen. Bei asymptomatischen Verläufen wird die Infektion oft nicht festgestellt, weshalb die betroffenen möglicherweise nicht in Quarantäne gehen und über den gesamten infektiösen Zeitraum im Büro anwesend sein können. Allerdings haben asymptomatische Personen eine geringere Quantaemissionsrate. Diese Effekte gleichen sich im zeitlichen Infektionsverlauf näherungsweise aus. [14]

Im Simulationsmodell ist zudem die Möglichkeit gegeben, eine Quarantäne für Kontaktpersonen einzustellen, wie sie bis zum 06.04.2022 vom deutschen Gesundheitsministerium vorgeschrieben war [17]. Vereinfachend werden Personen mit einem Infektionsrisiko > 0% im Modell als Kontaktperson definiert. Wenn die infektiöse Person nach der Inkubationszeit in Quarantäne geht, werden in diesem Fall auch die Kontaktpersonen zur Quarantäne verpflichtet. Die Quarantäne für Kontaktpersonen ist ein wirksames Mittel, um Infektionsketten im Büro zu unterbrechen. Allerdings hat die Abwesenheit der Belegschaft negative Auswirkungen auf die Bruttowertschöpfung.

Externe Infektionen

Die Belegschaft kann sich auch außerhalb des Bürogebäudes infizieren. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist vom externen Infektionsgeschehen abhängig und wird anhand der Inzidenz des Jahres 2022 berücksichtigt. Die Tagesinzidenz beschreibt die Rate, wie viele Personen sich pro 100.000 Einwohner täglich mit dem Virus neu infizieren und weist somit die Charakteristik einer Wahrscheinlichkeit auf.

In der retroperspektivischen Betrachtung der COVID-19-Pandemie werden bereinigte Tagesinzidenzen des Robert-Koch-Instituts (RKI) verwendet. Dabei sind Diagnose-, Melde- und Übermittlungsverzögerungen berücksichtigt und fehlende Informationen mit zusätzlichen Annahmen ergänzt. Aus den bereinigten Tagesinzidenzen resultiert das durchschnittliche tägliche Risiko einer Einzelperson an COVID-19 zu erkranken, was in Bild 3-13 für das Jahr 2022 in Deutschland dargestellt ist. Im März 2022 waren die Fallzahlen am höchsten, was für eine Einzelperson einem maximalen Tagesrisiko von über 3‰ entspricht. [5, 6]

Während der Hauptphase der Pandemie wurde die Dunkelziffer vom RKI auf den Faktor 2 geschätzt [42]. In dieser Vorstudie wird angenommen, dass Infektionen zur Hälfte außerhalb und zur Hälfte am Arbeitsplatz geschehen. Daher wird die Dunkelziffer nicht als zusätzlicher Faktor für das externe Ansteckungsrisiko einbezogen. Die Fallzahlen im Büro sollten dieser Annahme zufolge eine ähnliche Größenordnung wie die externen Fälle aufweisen, was im Referenzszenario des Infektionsmodells in Kapitel 4.1.2 untersucht wird.

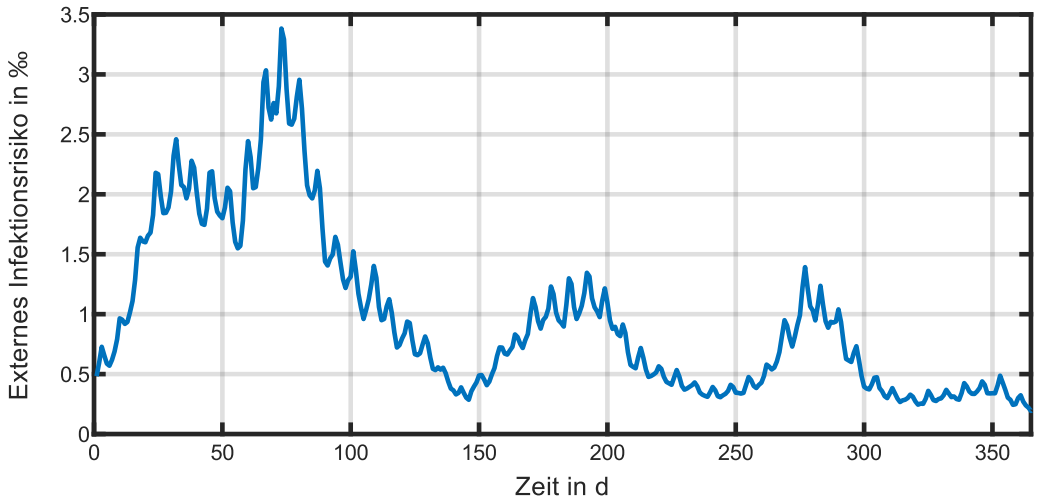

Bild 3-13: Tägliches individuelles externes Infektionsrisiko aufgrund der Inzidenz [5]

Infektionsschutz

Der Infektionsschutz beeinflusst das Risiko einer Person sich zu infizieren. Der Schutz gegenüber Omikron ist bei der Grundimmunisierung und Boosterimpfung zu Beginn unterschiedlich hoch. Danach nimmt die Schutzwirkung bei allen Impfungen ab und verläuft asymptotisch gegen null. Die Verläufe des Infektionsschutzes durch Grundimmunisierung und Boosterimpfung sind in Bild 3-14 dargestellt. Gemäß *Tseng* et al. liegen für die Boosterimpfung ausschließlich Datenpunkte für die ersten 60 Tage vor. Daher wird der weitere Verlauf der Schutzwirkung mit den Daten der Grundimmunisierung modelliert. Eine vorangegangene Infektion bietet einen vergleichbaren Schutz wie die Boosterimpfung und wird dementsprechend im Modell gleichgesetzt.

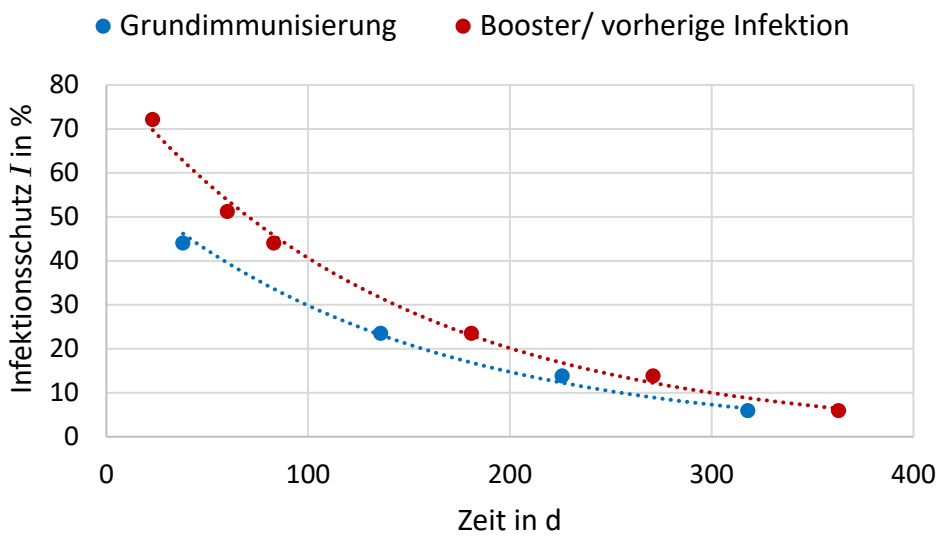

Bild 3-14: Infektionsschutz durch Impfungen oder vorangegangene Infektionen

Im Simulationsmodell wird der in Bild 3-14 visualisierte Infektionsschutz durch die Gleichungen 3-1 und 3-2 modelliert und täglich aktualisiert. Wird einer Person eine Grundimmunisierung zugewiesen, beträgt der Infektionsschutz zu Beginn 60%. Mit einer Boosterimpfung oder vorangegangenen Infektion wird hingegen einen Infektionsschutz von 82% erreicht. Zu Beginn der Simulation wird eine zwischen 0 und 6 Monaten zurückliegende Grundimmunisierung der Belegschaft angenommen, wobei eine Gleichverteilung zugrunde gelegt wird [56].

$$I_{Grundimm} = 0{,}5977 \cdot e^{-0{,}007 \cdot t} \quad (3\text{-}1)$$

$$I_{Booster/Inf} = 0{,}8195 \cdot e^{-0{,}007 \cdot t} \quad (3\text{-}2)$$

$I_{Grundimm}$	Infektionsschutz durch Grundimmunisierung
$I_{Booster/Inf}$	Infektionsschutz durch Boosterimpfungen / vorherige Infektionen
t	Zeit in d

Die Fallzahlen sind in der Gesamtbevölkerung nicht gleichmäßig verteilt, sondern bei den Personen mit einem geringeren Infektionsschutz höher. Das externe Infektionsrisiko einer Person wird daher durch den Quotienten des mittleren Infektionsschutzes der Gesamtbevölkerung und den Infektionsschutz dieser Person gemäß Gleichung 3-3 modifiziert. Wenn die Schutzwirkung einer Person geringer als im Bevölkerungsmittel ist, steigt das externe Infektionsrisiko. Um unrealistische Infektionsrisiken zu vermeiden, wird angenommen, dass sich das Infektionsrisiko einer Person dabei maximal verdoppeln kann. Für die Gesamtbevölkerung wird angenommen, dass die letzte Boosterimpfung oder vorangegangene Infektion 3 Monate zurückliegt, was einem Infektionsschutz von 44% entspricht [56].

$$R_{extern,res} = R_{extern,inz} \cdot \frac{I_{Bev}}{I_{Person}} \quad (3\text{-}3)$$

$R_{extern,res}$	Resultierendes externes Infektionsrisiko
$R_{extern,inz}$	Externes Infektionsrisiko aufgrund der Tagesinzidenz
I_{Bev}	Mittlerer Infektionsschutz der Gesamtbevölkerung in Deutschland durch Impfungen und vorherige Infektionen
I_{Person}	Infektionsschutz einer Einzelperson des Büropersonals durch Impfungen und vorherige Infektionen

Im Bürogebäude sinkt das Infektionsrisiko einer Person mit zunehmendem Infektionsschutz. Hierfür wird ein Risikomodifikator gemäß Gleichung 3-4 berechnet.

$$m_{Inf} = 1 - I_{Person} \quad (3\text{-}4)$$

m_{Inf}	Risikomodifikator aufgrund von Impfungen und vorherigen Infektionen

Zudem wird das Infektionsrisiko im Büro durch die Luftfeuchte im Büro beeinflusst. Gemäß *Park* et al. wird ein linearer Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und dem Infektionsrisiko angenommen, wie in Bild 3-15 dargestellt [44]. Ab einer relativen Luftfeuchte von 50% wird der Faktor nicht weiter reduziert, da bei hohen relativen Luftfeuchten keine zusätzliche Verbesserung des Infektionsgeschehens zu erwarten ist. Ohne Luftbefeuchtung resultiert bei den Bürotemperaturen über das Jahr hinweg eine mittlere relative Luftfeuchte von 36% [23]. Dieser Mittelwert dient als Ausgangspunkt für die Risikomodifikation, wobei der Faktor dort auf den Wert 1 festgelegt wird.

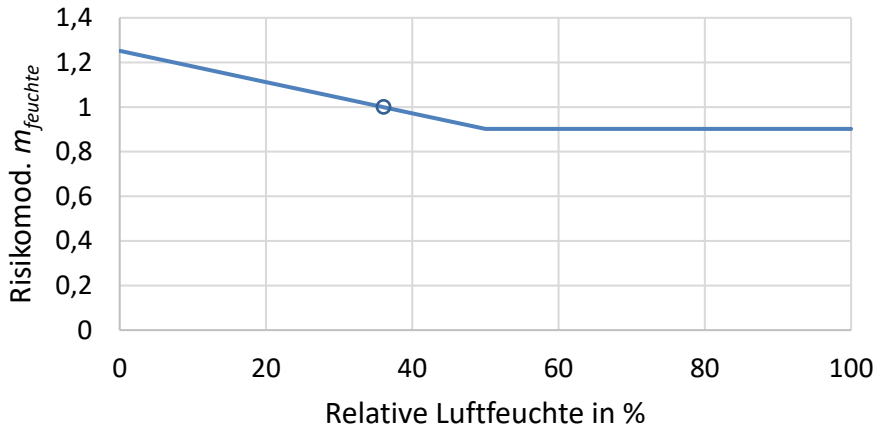

Bild 3-15: Risikomodifikator in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte

Die tatsächliche relative Luftfeuchte in den Räumen wird über einen Tag gemittelt. Aus der mittleren relativen Luftfeuchte wird der Risikomodifikator für diesen Tag abgeleitet. Das Infektionsrisiko wird zusätzlich durch den aktuellen Infektionsschutz der jeweiligen Person sowie durch das Tragen einer Maske an diesem Tag modifiziert. Dies führt zur folgenden Gleichung 3-5:

$$R_{Büro,res} = R_{Quanta} \cdot m_{Inf} \cdot m_{feuchte} \cdot m_{maske} \quad (3\text{-}5)$$

$R_{Büro,res}$	Resultierendes Infektionsrisiko im Bürogebäude
R_{Quanta}	Infektionsrisiko im Bürogebäude aufgrund der Quantainhalation
$m_{feuchte}$	Risikomodifikator aufgrund der relativen Luftfeuchte
m_{maske}	Risikomodifikator aufgrund der Masken

3.2.3 Arbeitsunfähigkeitskosten

Für die Wertschöpfung im Bürogebäude wird in dieser Vorstudie der Wirtschaftszweig „Information und Kommunikation“ herangezogen, zu dem beispielsweise IT-Dienstleistungsunternehmen gehören [15]. Im Simulationsmodell wird pro Arbeitsunfähigkeitstag einer Person mit einem Bruttowertschöpfungsverlust von 318 € gerechnet. Bei einer durchschnittlichen Arbeitsunfähigkeit von 5 Tagen ergeben sich somit Kosten von 1590 € pro Infektion.

4 Auswertung

In diesem Kapitel wird das Simulationsmodell zunächst anhand von zwei Referenzszenarien plausibilisiert. Anschließend werden die Parameter der Lüftungsregelung und des Infektionsgeschehens systematisch variiert. Dabei werden die Kosten für den Energieaufwand und des Infektionsgeschehens gegenübergestellt, um das wirtschaftliche Optimum zu ermitteln. Daraus lassen sich für diese Randbedingungen spezifische Handlungsempfehlungen für Lüftungsstrategien zur Infektionsprävention und die spezifische Planung der Lüftungsanlagen ableiten.

4.1 Plausibilisierung des Simulationsmodells

Das thermische Modell und das Infektionsmodell des Bürogebäudes werden jeweils anhand von Jahressimulationen plausibilisiert. Der Energieaufwand des Büros wird für ein Jahr im Normalbetrieb mit dem realen Energieaufwand von Bürogebäuden verglichen. Zur Plausibilisierung des Infektionsmodells werden die Fallzahlen aus dem Jahr 2022 während der COVID-19-Pandemie herangezogen. Hierbei werden die im Büro unter den gegebenen Inzidenzen und Maßnahmen ermittelten Fallzahlen mit den tatsächlichen Fallzahlen in Deutschland verglichen. Außerdem wird die erforderliche Anzahl der Simulationsdurchläufe bestimmt, um verlässliche Durchschnittswerte zu erhalten.

4.1.1 Thermisches Modell

Die thermische Modellierung des Gebäudes wird in den folgenden Unterkapiteln anhand der Wetterdaten des Testreferenzjahres vom DWD plausibilisiert [23].

Solarstrahlung

In dieser Vorstudie wird der Datensatz des Testreferenzjahres um Sonnenstandsdaten erweitert, um die solare Einstrahlung auf die Wände und Fenster des Gebäudes zu berechnen [63]. In Bild 4-1 sind links die simulativ ermittelten Verläufe der Strahlungsintensität auf senkrechte Oberflächen mit südlicher, östlicher und westlicher Ausrichtung für einen wolkenlosen Winter- und Sommertag dargestellt. Im Simulationsmodell wird angenommen, dass die direkte Sonnenstrahlung das Gebäude erst ab einem Sonnenhöhenwinkel von 5° erreicht, was zu sprunghaften Änderungen der Kurvenverläufe am Tagesanfang und -ende führt. Die Knicke in den Kurvenverläufen sind auf die lineare Interpolation stündlicher Strahlungswerte zurückzuführen. Die meisten Sonnenstunden liegen im Sommer vor.

Bei der südlichen Ausrichtung wird die maximale Strahlungsintensität im Winter erreicht, obwohl die Solarstrahlung auf horizontale Flächen in dieser Jahreszeit am geringsten ist. Dies liegt am niedrigen Sonnenhöhenwinkel zur Mittagszeit, wodurch die Sonnenstrahlen einen günstigen Einfallswinkel aufweisen. Bei den östlichen und westlichen Ausrichtungen gibt es zu Tagesbeginn und -ende über das gesamte Jahr hinweg günstige Einfallswinkel. Hier werden die maximalen Strahlungsintensitäten im Sommer erreicht.

Als Referenz für die Verläufe der Strahlungsintensität des wolkenlosen Winter- bzw. Sommertags sind rechts in Bild 4-1 Richtwerte aus der Norm DIN 4710 in stündlicher Auflösung dargestellt [73]. Bei östlicher und westlicher Ausrichtung ist eine hohe Übereinstimmung zwischen den Verläufen von Simulationsergebnissen und Richtwerten erkennbar. Bei südlicher Ausrichtung liegt gemäß der Norm zur Mittagszeit hingegen ein höheres Maximum der Strahlungsintensität vor.

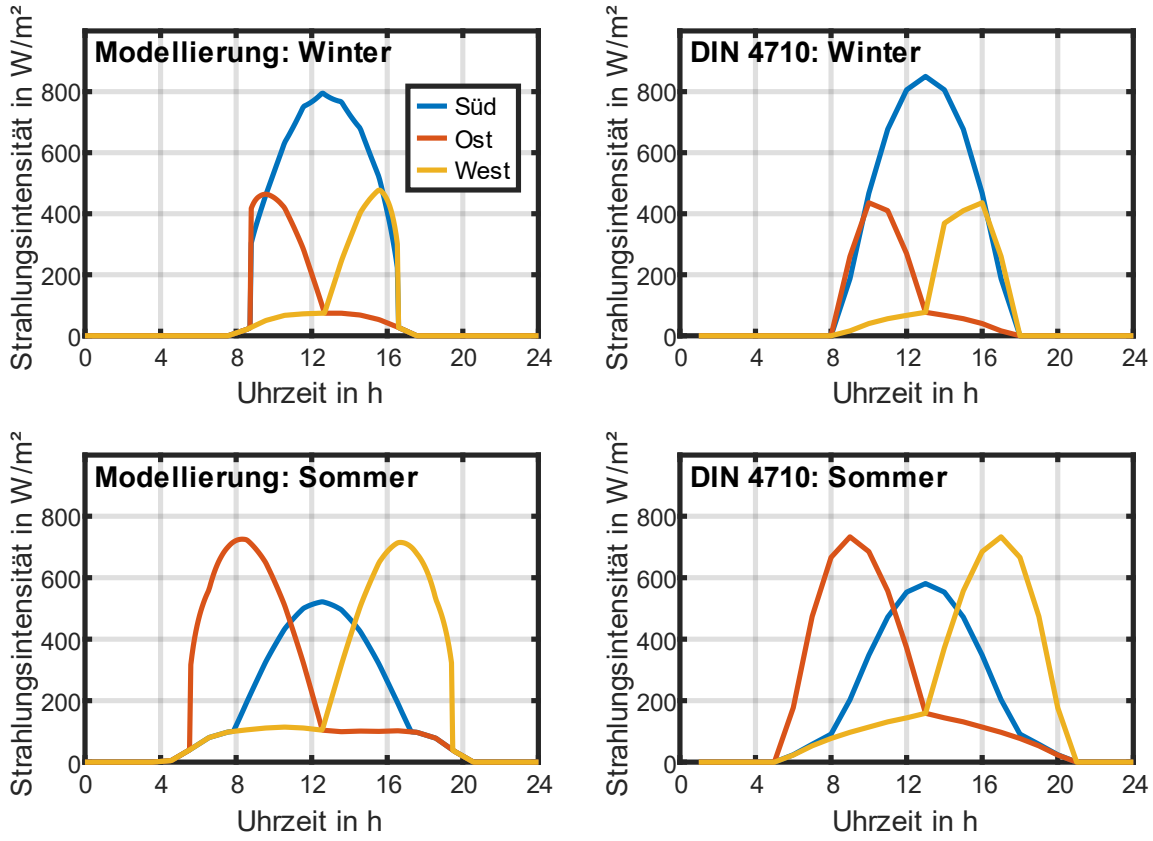

Bild 4-1: Vergleich exemplarischer, simulativ ermittelter Solarstrahlungsverläufe auf senkrechte Oberflächen für wolkenlose Tage im Winter und Sommer (links) mit Richtwerten aus der Norm DIN 4710 (rechts)[1] [73]

Referenzszenario des Energieaufwands eines Jahres mit Normalbetrieb

Für das thermische Referenzszenario wird ein Betriebsjahr ohne Homeoffice betrachtet und die Belegungsprofile werden auf eine durchschnittliche Abwesenheit von 10% angepasst. Damit werden Urlaubstage und regulär auftretende Krankheitstage berücksichtigt. Der CO_2-Sollwert der Lüftungsregelung wird für eine gute Raumluftqualität auf die Pettenkoferzahl von 1.000 ppm festgelegt. Durch die Befeuchtung der Zuluft wird eine relative Luftfeuchte von mindestens 40% sichergestellt.

In Bild 4-2 sind die Verläufe des Energieaufwands für Heizung, Kühlung, Lüftung und Befeuchtung im Jahresverlauf dargestellt. Bei der Heizung resultiert der höchste Energieaufwand bei geringen Außentemperaturen im Winter. In den Übergangzeiten zwischen Winter und Sommer ist der Aufwand geringer, wohingegen im Sommer nicht geheizt werden muss. Für das Jahr resultiert ein Gesamtenergieaufwand für das Heizen von 6.519 kWh/a, was, auf die Nettogrundfläche bezogen, einem Heizenergieaufwand von 15,2 kWh/(m²·a) entspricht.

[1] Aus der Norm DIN 4710 wird für den nördlichen Breitengrad von 48° als Wintertag der 23.01. und als Sommertag der 23.07. betrachtet. Im verwendeten Wetterdatensatz sind diese Tage bewölkt, weshalb stattdessen als Wintertag der 29.01. und als Sommertag der 16.07. für den Vergleich herangezogen werden.

Die Büroetage muss im Sommer gekühlt werden und für das Jahr resultiert ein Kühlenergieaufwand von 3.214 kWh/a. Der resultierende flächenbezogene Aufwand für die Kühlung beträgt damit 7,47 kWh/(m²·a).

Der Energieaufwand für den Lufttransport bleibt über das gesamte Jahr näherungsweise gleich. Aus dem Jahresenergieaufwand von 808,5 kWh/a resultiert für die Lüftung ein flächenbezogener Aufwand von 1,88 kWh/(m²·a). Eine Befeuchtung der Luft ist im Winter und der Übergangszeit bei der typischerweise niedrigen Luftfeuchte notwendig. Für die Befeuchtung der Zuluft resultiert anhand der Abschätzung über die Verdampfungsenthalpie ein Energieaufwand von 2.136 kWh/a bzw. von 5,0 kWh/(m²·a).

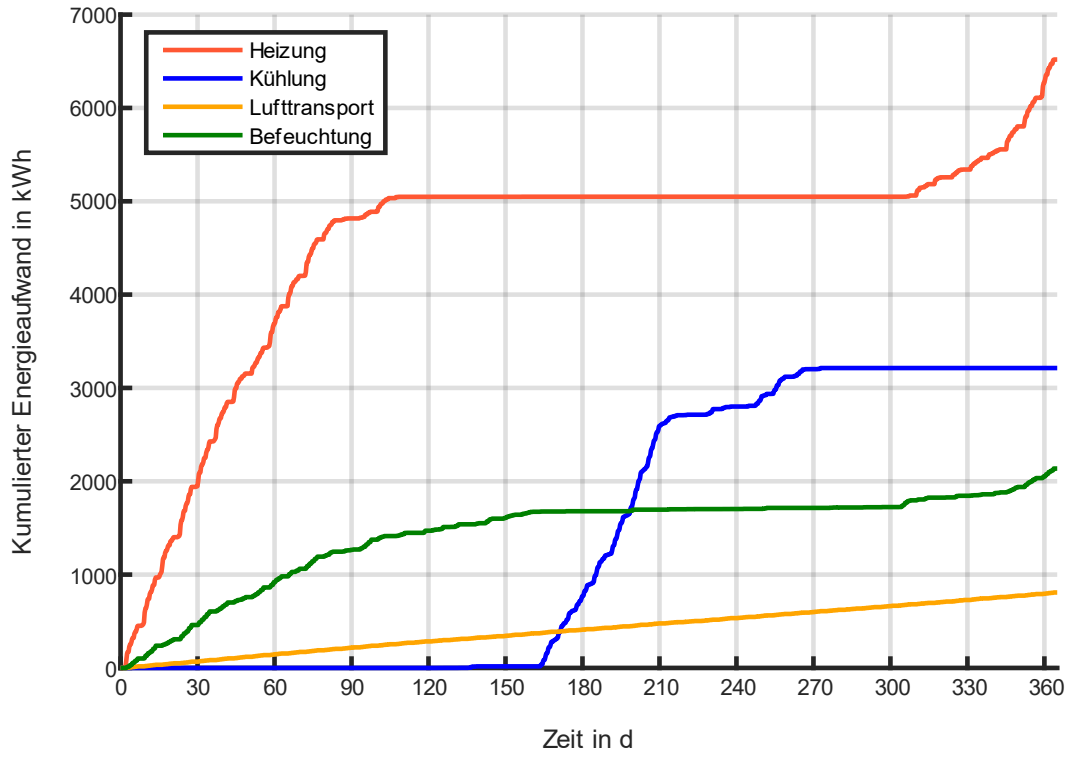

Bild 4-2: Energieaufwand der Büroetage im Jahresverlauf gegliedert nach verschiedenen Aufgaben

Diskussion des thermischen Modells

Bei den Verläufen der Strahlungsintensitäten auf senkrechte Oberflächen ist eine hohe Übereinstimmung mit den Richtwerten aus der Norm DIN 4710 ersichtlich. Unterschiede in den Verläufen sind maßgeblich auf die vereinfachte Modellierung der Diffusstrahlung gemäß Gleichung 2-11 zurückzuführen. Zur Mittagszeit liegt bei den Richtwerten eine höhere Diffusstrahlung und damit eine höhere Gesamtstrahlung, als im Simulationsmodell berechnet, vor.

Der Jahresenergieaufwand der simulierten Büroetage lässt sich mit Kenndaten von Bürogebäuden vergleichen. Mit einer modellierten Gebäudedämmung zwischen dem Passivhausstandard und den Mindestanforderungen an ein Niedrigenergiebüro wird ein Heizenergieaufwand von 15…45 kWh/(m²·a) erwartet [9, 10]. Das Simulationsergebnis mit 15,2 kWh/(m²·a) liegt dementsprechend am unteren Grenzwert. Der geringe Energieaufwand kann maßgeblich auf die Annahme einer mittleren Büroetage zurückgeführt werden, in der

Wärmeverluste über Boden und Decke vernachlässigt werden. Im Simulationsmodell werden aus Komplexitätsgründen zudem die sanitären Anlagen und Flurflächen der Etage vernachlässigt, weshalb auf die Bürofläche bezogen eine hohe Dichte an internen Wärmequellen vorliegt.

Der Kühlenergieaufwand von 7,47 kWh/(m²·a) liegt im zu erwartenden Bereich zwischen 3 kWh/(m²·a) für optimierte Bürogebäude und 10 kWh/(m²·a) für Niedrigenergiebüros [43]. Neben einer guten Gebäudedämmung erfüllt die modellierte Büroetage viele Merkmale für einen niedrigen Kühlenergieaufwand, wie einen außenliegenden Sonnenschutz, eine maschinelle Lüftung mit Wärmerückgewinnung und große thermische Speichermassen [10].

Der Energieaufwand für den Lufttransport hängt maßgeblich von den anwesenden Personen im Büro ab. Da die Belegungsdichte im Jahresverlauf näherungsweise konstant modelliert wird, steigt der Energieaufwand für den Lufttransport über das Jahr hinweg gleichmäßig an. Der Energieaufwand von 1,88 kWh/(m²·a) entspricht näherungsweise dem Vergleichskennwert eines Niedrigenergiebüros von 2 kWh/(m²·a) [48].

4.1.2 Infektionsmodell

Da Menschen aus ethischen Gründen nicht einem bewussten Infektionsrisiko ausgesetzt werden können, stehen keine experimentellen Daten zur Validierung des Infektionsmodells zur Verfügung. Im Rahmen dieser Vorstudie werden deshalb die Fallzahlen eines Referenzszenarios mit den COVID-19 Statistiken verglichen. Anhand des Größenordnungsvergleichs der Fallzahlen wird das Infektionsmodell plausibilisiert. Aufgrund der zugrunde liegenden Annahmen für komplexe Faktoren des Infektionsgeschehens ist dieser Vergleich jedoch nicht als vollständige Validierung zu betrachten.

Als Referenzszenario wird retroperspektivisch das Jahr 2022 während der COVID-19-Pandemie betrachtet. Aus den Fallzahlen des RKI resultiert das individuelle Tagesrisiko für Infektionen außerhalb des Bürogebäudes gemäß Bild 3-13. Im Jahr 2022 war die SARS-CoV-2 Variante Omikron dominant, deren Transmissionsdaten und Krankheitsverläufe im Simulationsmodell verwendet werden [57]. Die Infektionsschutzmaßnahmen werden entsprechend den gesetzlichen Vorgaben eingestellt: Bis zum 03.04.2022 wird von einer FFP2-Maskenpflicht ausgegangen [17]. Ab diesem Zeitpunkt bestand in Unternehmen keine Maskenpflicht mehr, sondern lediglich eine Maskenempfehlung. Für diese wird in der Belegschaft eine Maskenquote von 30% bei FFP2-Masken und von 30% bei medizinischen Masken angenommen. Bis zum 06.04.2022 wird eine fünftägige Quarantäne für Kontaktpersonen modelliert. Als CO_2-Sollwert der Lüftungsregelung wird die Pettenkoferzahl von 1.000 ppm angenommen. Die konditionierte Luft wird nicht befeuchtet.

In Bild 4-3 sind die Ergebnisse einzelner Simulationsdurchläufe dargestellt. Die Fallzahlen innerhalb des Bürogebäudes weisen hohe Schwankungen zwischen den Simulationsdurchläufen auf, wobei nach 50 Simulationen im Schnitt 14,5 Neuinfektionen resultieren.

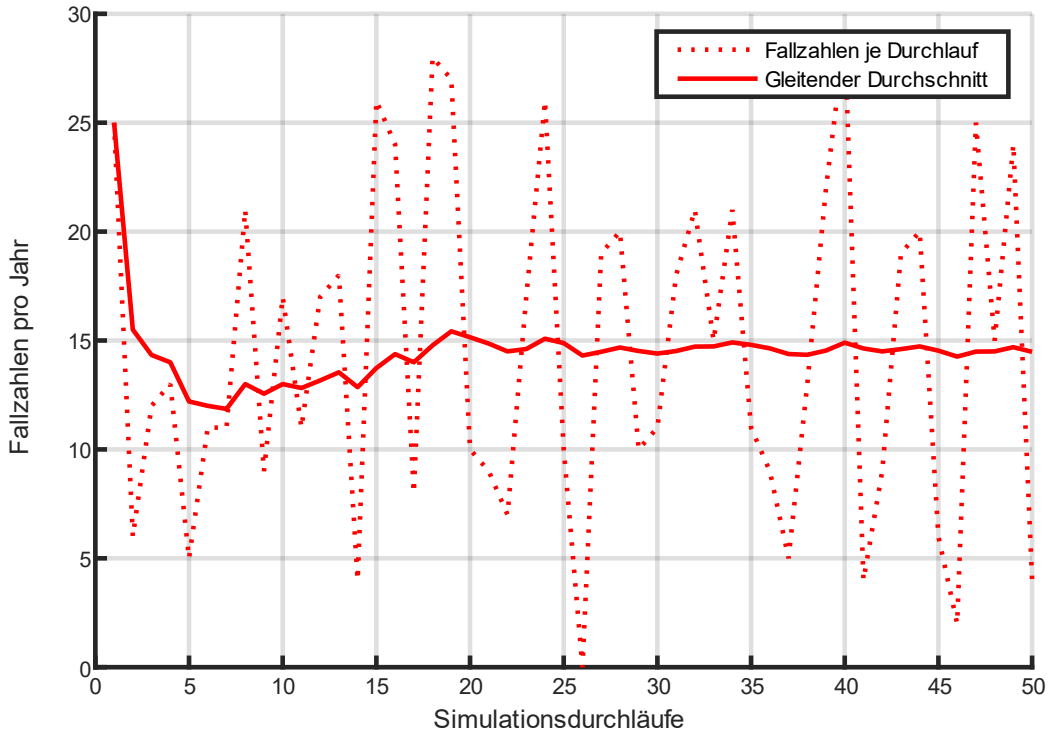

Bild 4-3: Bürointerne Fallzahlen von Jahressimulationen des Referenzszenarios

Diskussion des Infektionsmodells

Aus den Fallzahlen für das Jahr 2022 vom RKI geht für eine Einzelperson ein durchschnittliches Tagesrisiko von ca. 0,001 für eine COVID-19-Infektion hervor. Für die Bürobelegschaft von 41 Personen führt dies durchschnittlich zu 15 externen Coronafällen pro Jahr. Nach 50 Simulationsdurchläufen resultieren im Büro durchschnittlich 14,48 Fällen pro Jahr, was in guter Übereinstimmung zur angenommenen Dunkelziffer von 2 steht.

Die hohe Variation der Ergebnisse einzelner Simulationsdurchläufe ist auf die Möglichkeit von kritischen Infektionsketten zurückzuführen. Bilden sich keine Infektionsketten, sind die Fallzahlen innerhalb des Büros sehr gering. Infektionsketten in der Belegschaft können jedoch in einem kurzen Zeitraum zu besonders hohen Fallzahlen führen.

In Bild 4-4 ist ein Beispiel einer Infektionskette dargestellt. Bei den Neuinfektionen wird erfasst, an welchem Tag sich eine Person der Belegschaft ansteckt. Diese Person ist nach Ablauf der Latenzzeit im Büro infektiös, bis Symptome und Quarantäne einsetzen. Dieser Zeitraum stellt für die restliche Belegschaft eine Infektionsgefahr dar und ist durch orangene Felder markiert.

Im Beispiel wird am ersten Montag eine Person infiziert. Am folgenden Mittwoch und Donnerstag kommt es zu einem Infektionscluster, bei dem drei weitere Personen infiziert werden. Dies stellt ein kritisches Szenario dar, da sich ab diesem Zeitraum mehrere infektiöse Personen im Büro aufhalten und somit das Infektionsrisiko für die restliche Belegschaft weiter erhöht ist. Während des Wochenendes befinden sich keine Personen im Büro, sodass keine internen Neuinfektionen auftreten können und das Infektionsgeschehen verlangsamt wird. Nach dem Wochenende können sich jedoch weiterhin infektiöse Personen dieser Infektionskette im Büro aufhalten. Im dargestellten Beispiel endet die Infektionskette nach einer weiteren Neuinfektion nach dem Wochenende.

Die durchschnittlichen Neuinfektionen eines Szenarios werden aufgrund der Variation der Ergebnisse über mehrere Simulationsdurchläufe gemittelt. Wie in Bild 4-3 dargestellt, treten bei 50 Simulationsdurchläufen nur noch geringe Schwankungen des gleitenden Durchschnitts auf. Für ein hohes Konfidenzintervall bei einer kleinen Fehlergrenze wären deutlich mehr Simulationsdurchläufe erforderlich, was jedoch mit einer linear proportionalen Erhöhung der Rechenzeit einhergehen würde.

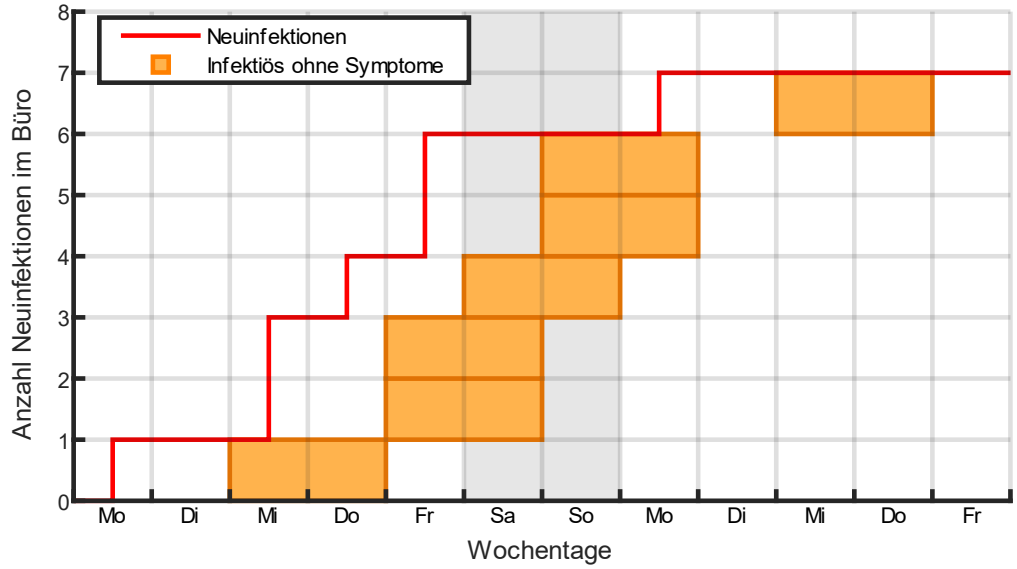

Bild 4-4: Neuinfektionen im Bürogebäude während einer beispielhaften Infektionskette[2]

[2] Im Simulationsmodell werden die Neuinfektionen am Tagesende berechnet. Für eine übersichtlichere Darstellung werden die Neuinfektionen im Bild um einen halben Tag versetzt dargestellt.

4.2 Parametervariationen

Anhand von Parametervariationen werden die wirtschaftlichen Auswirkungen verschiedener Lüftungsstrategien systematisch in Jahressimulationen untersucht. Um gesellschaftliche und saisonale Pandemiedynamiken zu berücksichtigen, wird retroperspektivisch das externe Infektionsrisiko des Jahres 2022 modelliert.

In den folgenden Parametervariationen wird ein Szenario betrachtet, bei welchem einschränkende Schutzmaßnahmen des Personals zur Infektionsprävention im Bürogebäude reduziert werden. Damit wird der Einfluss von Lüftungsstrategien in einem Pandemieszenario bei einem möglichst unveränderten Arbeitsumfeld untersucht.

Dementsprechend wird in diesem Kapitel keine Arbeit im Homeoffice modelliert und für die Belegschaft eine durchschnittliche Abwesenheit von 10% für Urlaub und reguläre Krankheitstage angenommen. Eine Quarantäne von Kontaktpersonen ist ebenfalls nicht vorgesehen. Als verbleibende Schutzmaßnahmen wird anstatt einer Maskenpflicht von einer Maskenempfehlung ausgegangen, wofür eine Maskenquote von 60% medizinischer Masken angenommen wird. Für infizierte Personen wird ab Symptombeginn eine fünftägige Abwesenheit während der Krankheitstage modelliert. Durch die Befeuchtung der Zuluft wird eine relative Luftfeuchte von mindestens 40% gewährleistet, was das Infektionsrisiko im Winter reduziert.

Das Kanalnetz des Lüftungssystem wird in den Parametervariationen nicht angepasst, da ein solcher Umbau in der Realität aufwändig und kostspielig ist. Der Luftvolumenstrom wird als frei variabel angenommen. Luftvolumenströme oberhalb des Auslegungsvolumenstroms der Lüftungsanlage können durch den Tausch der Ventilatoren oder eine Parallelschaltung zusätzlicher Ventilatoren realisiert werden. Der festgelegte maximale Luftwechsel von 10 1/h stellt die obere Grenze der Luftvolumenströme innerhalb der einzelnen Räume dar.

Das Gesamtmodell inklusive thermischem Modell und Infektionsmodell wird für jeden Parametersatz insgesamt dreimal simuliert. Für die resultierenden Energiekosten aus dem thermischen Modell wird daraufhin der Mittelwert gebildet, da diese Ergebnisse eine geringe Schwankungsbreite aufweisen. Für aussagekräftige Mittelwerte der Fallzahlen wird das Infektionsmodell zusätzlich separat simuliert, um den Durchschnitt aus insgesamt 50 Simulationsdurchläufen zu bilden (siehe Kapitel 4.1.2). Durch die separate Simulation des Infektionsmodells wird die Simulationszeit um ca. 70% reduziert.

4.2.1 Konstante CO_2-Sollwerte

Durch die Anpassung der CO_2-Sollwerte für die Lüftungsregelung verändert sich die Differenz zwischen Ist- und Sollwerten, was wiederum die Luftvolumenströme in den einzelnen Räumen beeinflusst. Eine Verringerung der CO_2-Sollwerte führt zu einer überproportionalen Erhöhung der Luftvolumenströme. Bei CO_2-Sollwerten von über 600 ppm wird eine Schrittweite von 100 ppm gewählt. Bei niedrigeren CO_2-Sollwerten wird die Schrittweite auf bis zu 12,5 ppm verringert, um die Genauigkeit bei hohen Änderungen der Energiekosten zu erhöhen.

In Bild 4-5 sind die Kosten von Energie, Arbeitsunfähigkeit sowie die daraus resultierenden Gesamtkosten dargestellt. Die Energiekosten umfassen die relevanten Kosten für die Lüftungsstrategien: Heizung, Kühlung, Lufttransport und Befeuchtung. Die Energiekosten steigen bei niedrigen CO_2-Sollwerten bzw. hohen Luftvolumenströmen überproportional an. Aufgrund der Begrenzung der Luftvolumenströme durch den maximalen Luftwechsel steigen

die Energiekosten nicht unbegrenzt an. Die gestrichelten Linien markieren den Parametersatz, bei dem in den jeweiligen Räumen der maximale Luftwechsel erstmals erreicht wird.

Die Arbeitsunfähigkeitskosten beziehen sich ausschließlich auf Neuinfektionen innerhalb der Büroetage, da nur diese durch die Lüftung am Arbeitsplatz beeinflusst werden. Bei hohen CO_2-Sollwerten liegen niedrige Luftvolumenströme vor und es resultieren hohe Arbeitsunfähigkeitskosten, welche asymptotisch einem oberen Grenzwert zulaufen. Niedrigere CO_2-Sollwerte führen zu deutlich geringeren Arbeitsunfähigkeitskosten.

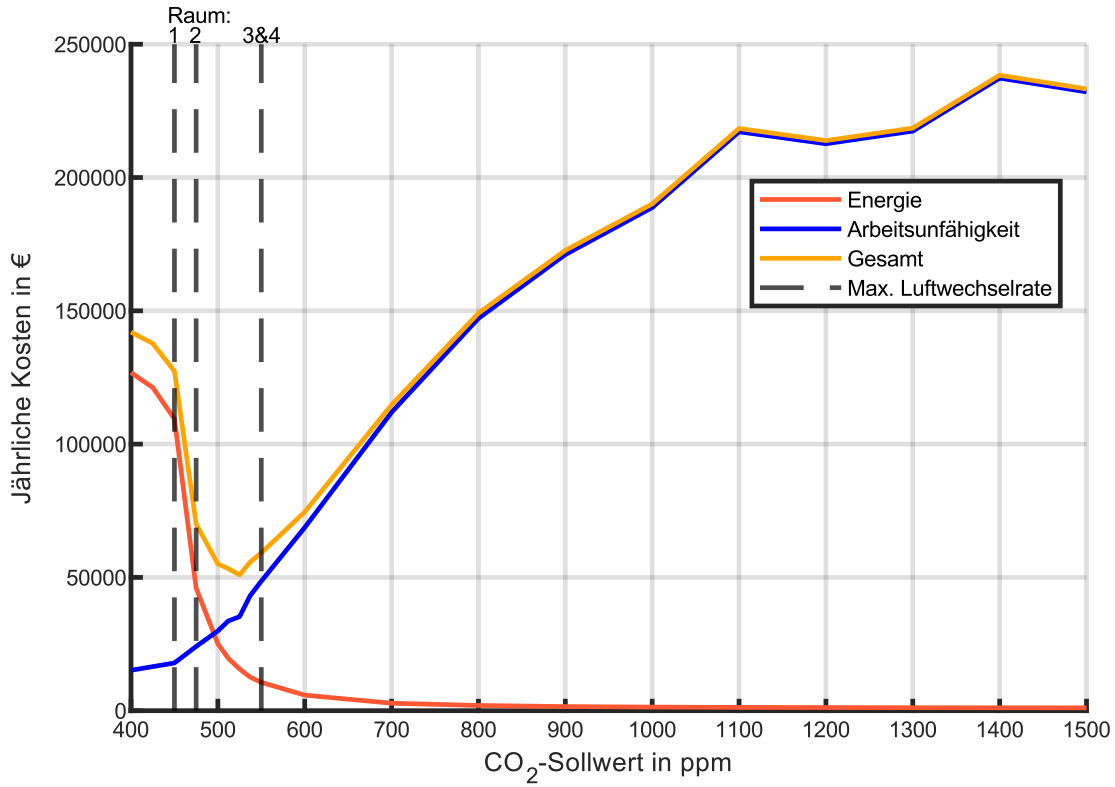

Bild 4-5: Energie-, Arbeitsunfähikeits- und Gesamtkosten bei der Parametervariation des CO_2-Sollwerts[3]

Diskussion der CO_2-Sollwertvariation

Im simulierten Szenario mit einer Maskenempfehlung führt der Normalbetrieb mit der Pettenkoferzahl von 1.000 ppm zu einer hohen Anzahl an Neuinfektionen und damit zu hohen Arbeitsunfähigkeitskosten. Mit diesem gängigen Richtwert für eine hohe Raumluftqualität wird das Infektionsgeschehen nur geringfügig beeinflusst, wodurch sich Infektionsketten im Büro leicht ausbilden können. Für einen hochinfektiösen Krankheitserreger wie Omikron sind bei einem CO_2-Sollwert von 1.000 ppm zusätzliche Schutzmaßnahmen und Einschränkungen notwendig, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen.

[3] Die maximale Luftwechselrate von 10 1/h wird in den Besprechungsräumen 3 und 4 erstmals bei 550 ppm erreicht, im Einzelbüro bei 475 ppm und im Großraumbüro bei 450 ppm.

Eine Verringerung der CO_2-Sollwerte kann die Arbeitsunfähigkeitskosten deutlich reduzieren. Wird der CO_2-Sollwert auf die Außenluftkonzentration von 400 ppm gesetzt, werden die Räume nahezu durchgehend mit einem Luftwechsel von 10 1/h belüftet, jedoch der Sollwert ab einer minimalen Belegung nicht mehr erreicht. Dabei resultieren Arbeitsunfähigkeitskosten von 15.170 €, was jährlich 9,5 Neuinfektionen entspricht. Somit ist es ohne erhebliche Einschränkungen des Personals möglich, durch angepasste Luftvolumenströme weniger Neuinfektionen als im Referenzfall mit jährlich 14,5 Fällen (siehe Kapitel 4.1.2) zu erreichen.

Niedrige CO_2-Sollwerte und damit einhergehende Arbeitsunfähigkeitskosten führen allerdings aufgrund des kubischen Zusammenhangs von Ventilatorleistung und Luftvolumenstrom zu steigenden Energiekosten. Für das betrachtete Szenario resultiert ein wirtschaftliches Optimum mit jährlichen Gesamtkosten von 50.935 € bei einem CO_2-Sollwert von 525 ppm. Das Kanalnetz der Lüftungsanlage beeinflusst maßgeblich die Steigung der Energiekostenkurve. Durch die Auslegung der Anlage nach der Norm DIN EN 16798 entstehen bei niedrigen CO_2-Sollwerten hohe Energiekosten und ein auf Infektionsprävention optimierter Betrieb ist wirtschaftlich nicht möglich. Die Berücksichtigung einer Leistungsreserve bei der Auslegung von Lüftungsanlagen für die Infektionsprävention könnte einen wirtschaftlichen Betrieb bei niedrigen CO_2-Sollwerten ermöglichen.

Die einzelnen Kostenträger der Energie sind in Bild 4-6 dargestellt. Im oberen Diagramm sind die Verläufe von Heiz- und Kühlenergiekosten zu erkennen. Durch den hohen Dämmstandard der Büroetage und die Verwendung einer Luft-Wasserwärmepumpe fallen sowohl für Heizung als auch Kühlung geringe Betriebskosten an.

Bei niedrigen CO_2-Sollwerten steigen die Heizkosten proportional zu den Luftvolumenströmen. Diese Erhöhung ist auf die erhöhten Lüftungswärmeverluste zurückzuführen, welche durch die Erwärmung von kalter Zuluft entstehen. Die Kühlenergiekosten sinken bei niedrigen CO_2-Sollwerten. Obwohl im Sommer bei einer Zuluft von über 26°C ein zusätzlicher Kühlbedarf besteht, treten diese Fälle meist nur zur Mittagszeit auf. Auch im Sommer liegt die Außenlufttemperatur die meiste Zeit unterhalb der Kühlgrenztemperatur. Ein höherer Luftvolumenstrom führt dementsprechend überwiegend zu einer Abkühlung der Raumtemperaturen und der thermischen Speichermassen. Im betrachteten Szenario ist keine Nachtlüftung modelliert. Eine Belüftung der Räume mit kühler Nachtluft würde, trotz des zusätzlichen Energieaufwands für den Lufttransport, zu einer weiteren Kostenreduktion für die Kühlung führen.

Im unteren Diagramm von Bild 4-6 sind die Kosten für den Lufttransport und die Befeuchtung dargestellt, welche bei hohen CO_2-Sollwerten im niedrigen dreistelligen Bereich liegen. Bei niedrigen CO_2-Sollwerten steigen die Kosten für die Befeuchtung proportional zu den Luftvolumenströmen an (siehe Gleichung 2-17). Bei niedrigen CO_2-Sollwerten sind die hohen Energiekosten maßgeblich auf den Lufttransport zurückzuführen.

Ein direkter Zusammenhang von Fehlzeiten durch das Infektionsgeschehen auf die Energiekosten ist hingegen nicht festzustellen. In zukünftigen Simulationsmodellen könnte daher eine Berechnung der Energiekosten für den Lufttransport, die Befeuchtung der Zuluft und die Lüftungswärmeverluste für einen Vergleich von Parametersätzen ausreichen. Insbesondere eine Vernachlässigung des Wärmedurchgangs der Gebäudehülle würde zu einer erheblichen Reduktion der Simulationszeit führen.

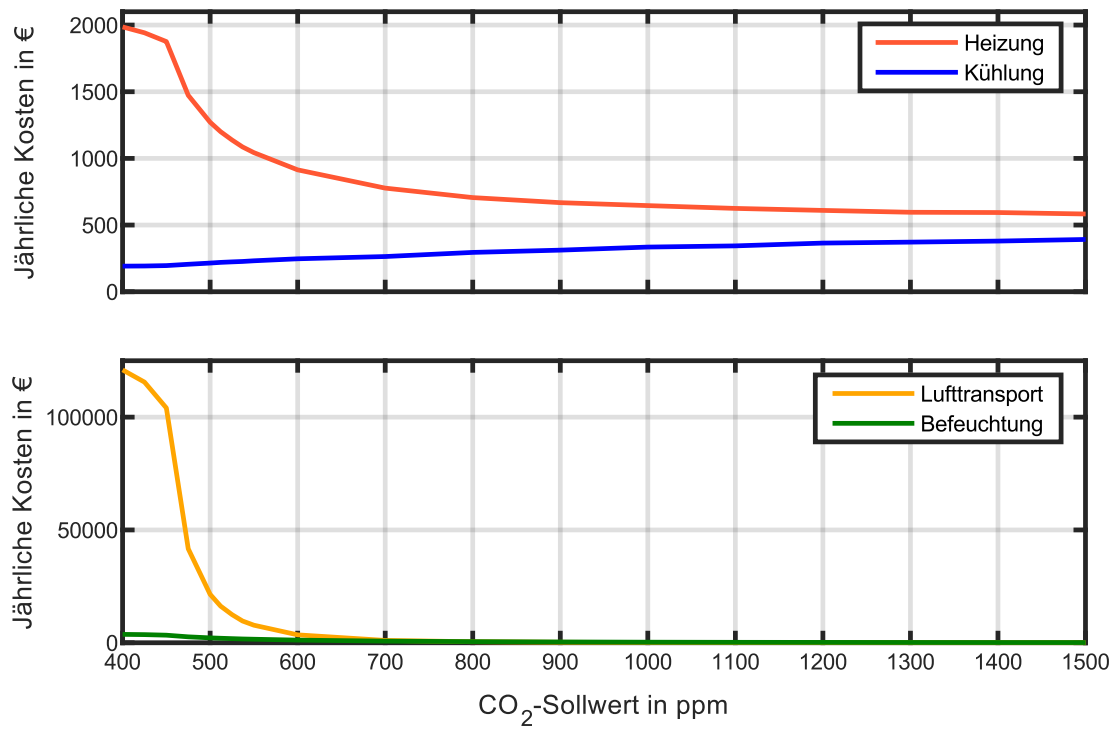

Bild 4-6: Energiekosten für Heizung, Kühlung, Lufttransport und Befeuchtung für die Parametervariation des CO_2-Sollwerts

4.2.2 Inzidenzabhängige CO_2-Sollwerte

Ein Ansatz zur Verringerung des Energieaufwands besteht darin, die CO_2-Sollwerte nicht konstant über das gesamte Jahr vorzugeben, sondern diese abhängig von der Inzidenzrate anzupassen. Die Inzidenzrate beeinflusst das Risiko, dass sich eine Person außerhalb des Bürogebäudes infiziert und anschließend infektiös im Büro erscheint. Bei höheren Inzidenzen ist statistisch gesehen die Notwendigkeit höherer Luftvolumenströme zur Infektionsprävention größer.

In dieser Parametervariation werden die CO_2-Sollwerte über Funktionen an die Tagesinzidenz gekoppelt. Der Ausgangspunkt der Funktion bei einer Inzidenz von 0 ist die Pettenkoferzahl. Bei einem geringen Infektionsrisiko wird somit eine gute Raumluftqualität sichergestellt, wobei unwirtschaftlich hohe Luftwechsel vermieden werden. Die Tagesinzidenzen basieren auf den Fallzahlen des RKIs und liegen für das Jahr 2022 zwischen 50 und 300 [5, 6]. Die CO_2-Sollwerte werden in Abhängigkeit von der Tagesinzidenz gemäß Gleichung 4-1 durch eine Wurzelfunktion definiert. Der Faktor b bestimmt den grundsätzlichen Verlauf der Funktion. Im Rahmen dieser Parametervariation werden die Faktoren a und b untersucht. Die detaillierten Ergebnisse sind in Tabelle 7-3 in Kapitel 7.3 dargestellt.

$$SW_{CO2} = a \cdot Inz^{b} + Pet \qquad (4\text{-}1)$$

SW_{CO2}	CO_2-Sollwert in ppm
Inz	Tagesinzidenz
a	Anpassungsfaktor in ppm
b	Anpassungsfaktor
Pet	Pettenkoferzahl in ppm

In Bild 4-7 sind beispielhaft zwei untersuchte Kurvenscharen dargestellt, wobei jeweils ein unterschiedlicher Faktor b konstant gehalten und der Faktor a variiert wird. Im Diagramm 1 ist die Steigung der Kurvenschar im relevanten Bereich der Tagesinzidenz von 50 bis 300 deutlich geringer als bei der Kurvenschar in Diagramm 2.

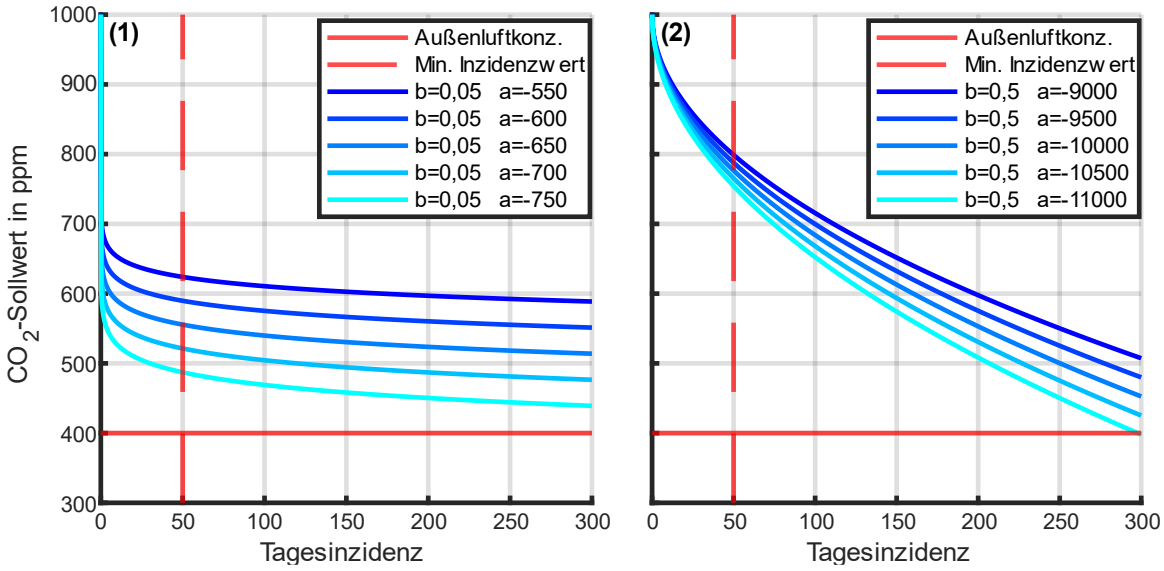

Bild 4-7: Auszug der untersuchten Kurvenscharen für inzidenzabhängige CO_2-Sollwerte

In Bild 4-8 werden die wirtschaftlichen Optima der inzidenzabhängigen Regelung gemäß Diagramm 1 und 2 den Ergebnissen der CO_2-Sollwertvariation aus Kapitel 4.2.1 gegenübergestellt. Dabei werden jeweils die jährlichen Gesamtkosten für Energie und Arbeitsunfähigkeit betrachtet. Die Kosten der inzidenzabhängigen Regelungen sind als Horizontale im Diagramm eingetragen, da hier kein spezifischer Sollwert zugeordnet werden kann.

Mit inzidenzabhängigen CO_2-Sollwerten gemäß Diagramm 1 wird eine Reduktion der jährlichen Gesamtkosten im Vergleich zur konstanten CO_2-Sollwertvorgabe erreicht. Das wirtschaftliche Optimum resultiert mit den Faktoren $b = 0{,}05$ und $a = -650$, was jährliche Gesamtkosten von 49.288 € ergibt. Dies ist ca. 3,2% geringer als bei konstanten CO_2-Sollwerten und entspricht der höchsten Einsparung, welche im Rahmen der Parametervariation erreicht wird (siehe Tabelle 7-3 in Kapitel 7.3). Bei abweichenden Faktoren a und b erhöhen sich Energie- oder Arbeitsunfähigkeitskosten signifikant, wodurch insgesamt höhere Gesamtkosten entstehen.

Inzidenzabhängige CO_2-Sollwerte gemäß Diagramm 2 führen aus energetischer Sicht zu einer ineffizienten Beeinflussung des Infektionsgeschehens. Selbst bei hohem Energieaufwand

resultieren im Jahresverlauf hohe Arbeitsunfähigkeitskosten. Für den Faktor $b = 0{,}5$ resultieren die geringsten jährlichen Gesamtkosten von 100.531 € bei Faktor $a = -10.500$.

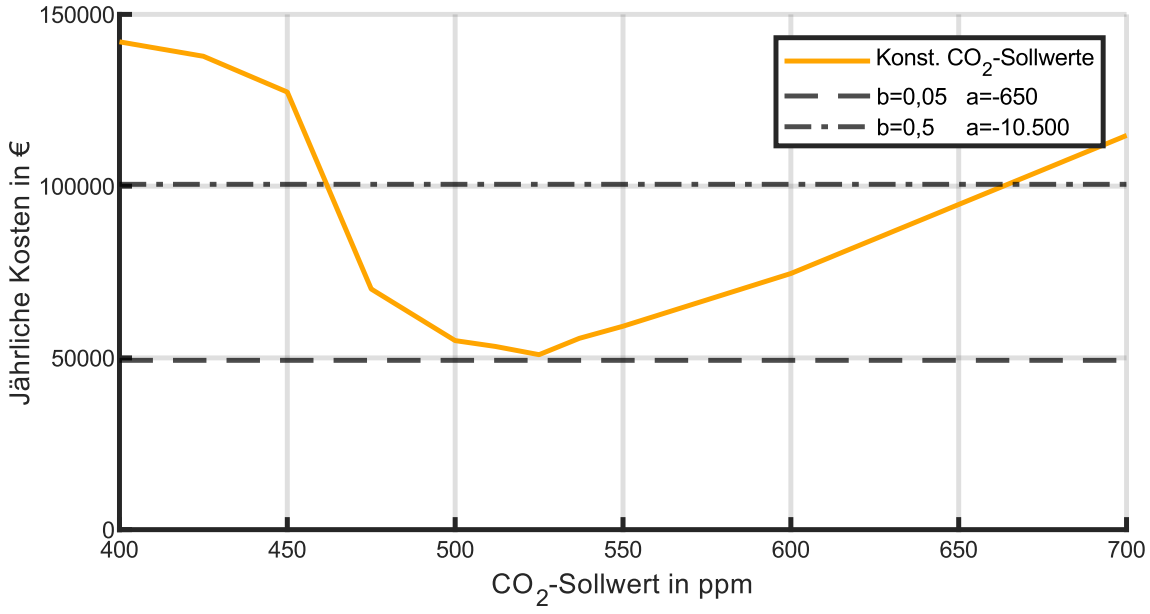

Bild 4-8: Vergleich der jährlichen Gesamtkosten von inzidenzabhängigen CO_2-Sollwerten mit der konstanten CO_2-Sollwertvariation

Diskussion

Durch die dynamische Anpassung der CO_2-Sollwerte mittels inzidenzabhängiger Funktionen kann das tagesabhängige Infektionsrisiko durch Personen, welche sich außerhalb des Büros infiziert haben, berücksichtigt werden. Bei niedrigen Tagesinzidenzen werden die Luftvolumenströme verringert und somit die Energiekosten reduziert. Dadurch wird das Infektionsgeschehen im Jahresmittel bei inzidenzabhängigen CO_2-Sollwerten gemäß Diagramm 1 von Bild 4-7 energieeffizienter beeinflusst als mit einer konstanten CO_2-Sollwertvorgabe. Das Optimierungspotenzial bleibt jedoch begrenzt, da die CO_2-Sollwerte im Bereich der vorliegenden Tagesinzidenzen nur geringfügig variieren.

Eine zu hohe Anpassung der CO_2-Sollwerte anhand der Tagesinzidenzen hat hingegen negative Auswirkungen auf das Infektionsgeschehen. Befindet sich bei geringen Tagesinzidenzen dennoch eine extern infizierte Person im Büro, erhöht sich bei hohen CO_2-Sollwerten das Risiko für die Bildung von Infektionsketten. Die sensiblen Infektionsdynamiken im Büro können zu signifikant höheren Fallzahlen führen. Im betrachteten Szenario, bei dem die minimalen Tagesinzidenzen bei 50 liegen, sind daher nur geringe Variationen der CO_2-Sollwerte zielführend. Bei höheren Variationen überwiegt das Risiko der Bildung von Infektionsketten im Büro.

Der Ansatz von inzidenzabhängigen CO_2-Sollwerten weist insbesondere bei saisonalen Erkrankungen ein hohes Optimierungspotenzial auf, wenn die Inzidenzen über lange Zeiträume gegen null gehen. In diesen Zeiträumen ist ein Normalbetrieb der Lüftung angebracht, was über eine inzidenzabhängige Funktion realisiert werden kann. Im betrachteten Pandemieszenario sind die Tagesinzidenzen jedoch durchgehend zu hoch, um mit diesem Ansatz signifikant Kosten einzusparen.

4.2.3 Quantaemissionsrate

Die Dynamik des Infektionsgeschehens in Bürogebäuden hängt maßgeblich von der Infektiosität des Krankheitserregers ab. In den vorherigen Parametervariation wird ausschließlich die SARS-CoV-2-Variante Omikron betrachtet. Um den Einfluss der Infektiosität des Erregers auf die Wirtschaftlichkeit zu analysieren, wird in der nachfolgenden Parametervariation die Quantaemissionsrate variiert. Eine geringere Quantaemissionsrate führt proportional zu einer geringeren Viruskonzentration in der Luft und entsprechend zu einer Reduktion der Infektiosität.

In Bild 4-9 sind die Ergebnisse der Parametervariation der untersuchten Quantaemissionsraten für CO_2-Sollwerte zwischen 400 ppm und 1.500 ppm dargestellt. Eine Quantaemissionsrate von 114 quanta/h entspricht der Omikron-Variante. Das Infektionsgeschehen hat keinen signifikanten Einfluss auf die Energiekosten, weshalb die Kurve der Energiekosten für alle Quantaemissionsraten gilt. Zwischen den Quantaemissionsraten und den Arbeitsunfähigkeitskosten ist näherungsweise ein linear proportionaler Zusammenhang erkennbar.

Die Gesamtkosten von Energie und Arbeitsunfähigkeit sind für die verschiedenen Quantaemissionsraten in Bild 4-10 dargestellt, wobei das jeweilige wirtschaftliche Optimum markiert ist. Für abnehmende Quantaemissionsraten ist ein Trend zu höheren CO_2-Sollwerten und geringeren Luftvolumenströmen erkennbar. Die Gesamtkosten des Optimums sind dabei ebenfalls geringer. Nach einer zusätzlichen Parametervariation resultiert mit einer Quantaemissionsrate von 3 quanta/h das wirtschaftliche Optimum bei der Pettenkoferzahl.

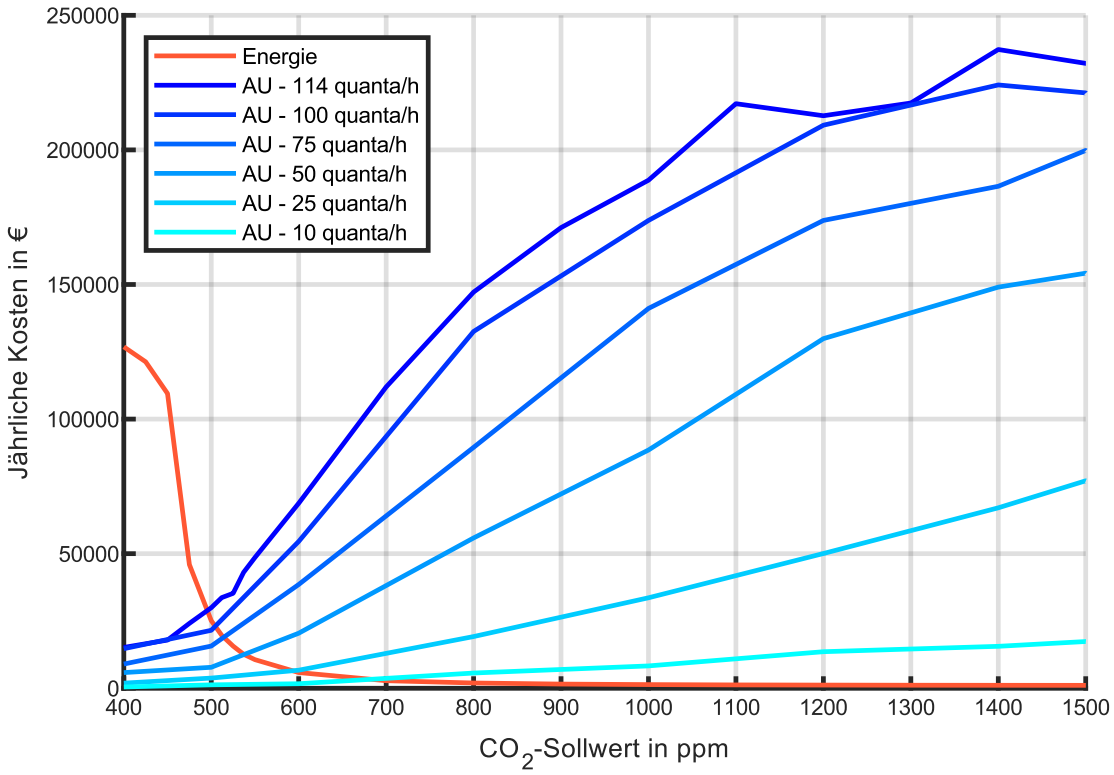

Bild 4-9: Energie- und Arbeitsunfähigkeitskosten für die Parametervariation des CO_2-Sollwerts bei unterschiedlichen Quantaemissionsraten

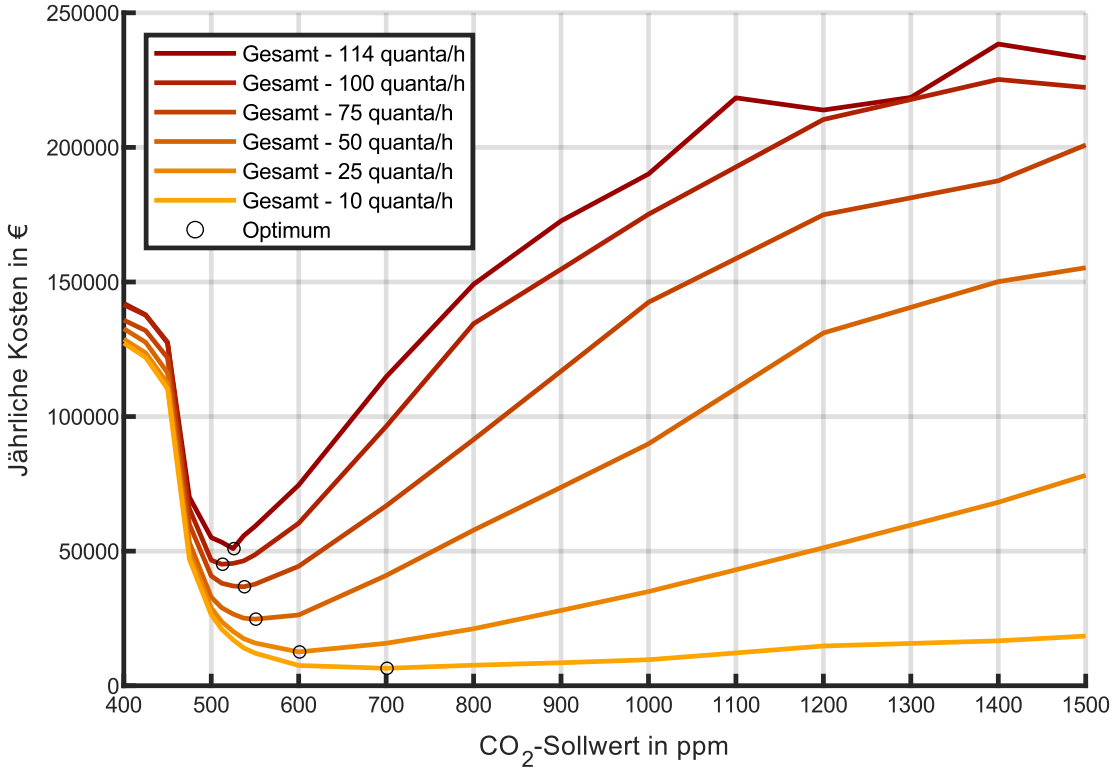

Bild 4-10: Gesamtkosten und wirtschaftliches Optimum für die Parametervariation des CO_2-Sollwerts bei unterschiedlichen Quantaemissionsraten

Diskussion

Die Quantaemissionsrate beeinflusst maßgeblich das Infektionsgeschehen und die daraus resultierenden Neuinfektionen im Bürogebäude. Für weniger infektiöse Krankheitserreger reduzieren sich bei denselben Rahmenbedingungen die Kosten der Arbeitsunfähigkeit erheblich. Dadurch kann das jeweilige wirtschaftliche Optimum mit geringeren Anforderungen an die Lüftungsmaßnahmen erreicht werden, was zu insgesamt geringeren Gesamtkosten führt. Das wirtschaftliche Optimum bei der Pettenkoferzahl wird jedoch erst nach einer Reduktion der Quantaemissionsrate von Omikron um ca. 97% erreicht. Somit erweist sich die Pettenkoferzahl im betrachteten Szenario auch bei reduzierten Quantaemissionsraten nicht als geeigneter Richtwert zur Infektionsprävention.

Während der COVID-19-Pandemie waren die ersten Varianten des Virus deutlich weniger infektiös als die später auftretenden Mutationen [53]. Diese Unterschiede lassen sich auf die genetischen Veränderungen des Virus zurückführen. In einem Pandemieszenario könnten Lüftungsmaßnahmen insbesondere bei frühen Virusvarianten zur Infektionsprävention beitragen. Landesweit und international betrachtet bietet ein zusätzlicher Infektionsschutz durch Lüftungsmaßnahmen das Potenzial für eine frühzeitige Eindämmung einer Pandemie. Dies könnte ebenfalls das Risiko von Mutation des Krankheitserregers zu infektiöseren Varianten verringern.

In zukünftigen Simulationsmodellen könnte mit der Quantaemissionsrate die Infektiosität von Virusvarianten verglichen werden. Es besteht näherungsweise ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Quantaemissionsrate und den resultierenden jährlichen Arbeitsunfähigkeitskosten. Dies könnte auf die prozentuale Angabe der Infektiosität verschiedener Virusvarianten übertragen werden, die bei ausreichender wissenschaftlicher Datenlage angegeben wird. Dadurch könnten andere Varianten über die Anpassung der Quantaemissionsrate modelliert werden. Eine Modellierung anderer Varianten über Einzelfaktoren wie Virustransmission, Effektivität des Infektionsschutzes und Krankheitsverläufen ist im Vergleich dazu deutlich aufwändiger. Weitere Untersuchungen sind jedoch erforderlich, um zu bestätigen, ob die Anpassung der Quantaemissionsrate für einen solchen Vergleich ausreichend ist.

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Vorstudie werden Lüftungsmaßnahmen zur Infektionsprävention im Kontext der COVID-19-Pandemie wirtschaftlich analysiert. Hierfür wird ein bestehendes Simulationsmodell in Matlab/Simulink weiterentwickelt, welches die thermische Modellierung einer repräsentativen Büroetage sowie die Modellierung des aerosolgetragenen Infektionsgeschehens umfasst. Das Modell wird als Monte-Carlo-Simulation ausgeführt, um wahrscheinlichkeitsbasiert Neuinfektionen aus individuellen Infektionsrisiken zu berechnen. Für jeden Parametersatz wird ein Betrachtungszeitraum von einem Jahr festgelegt, wobei retroperspektivisch die Daten der Inzidenz, Virustransmission und Krankheitsverläufe des Jahres 2022 verwendet werden. Für den Vergleich verschiedener Szenarien werden bei den Energiekosten Heizung, Kühlung, Lufttransport und Luftbefeuchtung miteinbezogen und aus den Fallzahlen im Büro die Arbeitsunfähigkeitskosten berechnet. Das Simulationsmodell wird anhand von Referenzszenarien plausibilisiert.

Aus den Ergebnissen der Simulation resultiert, dass eine CO_2-geregelte maschinelle Lüftung zur Reduktion von Neuinfektionen als eine Alternative zu anderen Schutzmaßnahmen geeignet ist. Dabei wird in einer Parametervariation der CO_2-Sollwerte ein fiktives Szenario mit einer Maskenquote von 60% medizinischer Masken untersucht, welches keine Einschränkungen wie Homeoffice oder Quarantäne von Kontaktpersonen beinhaltet. Durch konstant niedrige CO_2-Sollwerte über den Betrachtungszeitraum lassen sich die Fallzahlen und Arbeitsunfähigkeitskosten signifikant reduzieren. Das wirtschaftliche Optimum liegt bei einem CO_2-Sollwert von 525 ppm und damit deutlich unterhalb der Pettenkoferzahl von 1.000 ppm. Um die erforderlichen Luftvolumenströme bereitzustellen, müssten bei realen Anlagen die Ventilatoren ausgetauscht oder weitere Ventilatoren zugeschaltet werden. Im Lüftungssystem resultierten zudem hohe Druckverluste und damit hohe Energiekosten. In zukünftigen Lüftungsanlagen könnte dies durch die Einplanung einer Leistungsreserve vermieden werden, um im Pandemiefall erhebliche Gesamtkosteneinsparungen zu erzielen.

In einer Parametervariation der CO_2-Sollwerte in Abhängigkeit von den Tagesinzidenzen werden für die Daten des Jahres 2022 nur geringfügige Verbesserungen im Vergleich zu konstanten CO_2-Sollwerten erzielt. Das statistische Risiko einer infektiösen Person im Büro war in diesem Betrachtungszeitraum durchgehend zu hoch, um die Luftvolumenströme wesentlich zu reduzieren. Dieser Ansatz erscheint jedoch für aerogene Krankheitserreger mit deutlich schwankenden Inzidenzen vielversprechend, wie etwa bei saisonalen Erkrankungen.

Der Einfluss der Infektiosität eines Krankheitserregers wird in einer weiteren Parametervariation anhand der Quantaemissionsrate von infektiösen Personen untersucht. Dabei resultiert näherungsweise ein linear proportionaler Zusammenhang der Quantaemissionsrate mit den Neuinfektionen im Büro. Die Ausbreitung von weniger infektiösen Krankheitserregern wird demnach effizienter durch Lüftungsmaßnahmen eingedämmt. Der Richtwert der Pettenkoferzahl ist jedoch nur bei geringen Quantaemissionsraten zur Infektionsprävention geeignet. Im betrachteten Szenario müsste die Quantaemissionsrate im Vergleich zur Omikronvariante um ca. 97% geringer sein, sodass sich das wirtschaftliche Optimum bei einem CO_2-Sollwert von 1.000 ppm einstellt.

Ausblick

In dieser Vorstudie werden vereinfachende Annahmen für die Modellierung getroffen, die in zukünftigen Untersuchungen detaillierter ausgearbeitet werden könnten. Um die Virustransmission präziser abzubilden, sollten die bisher vernachlässigten Übertragungswege der Tröpfchen- und Schmierinfektionen berücksichtigt werden. Des Weiteren wird bei der Übertragung über Aerosole die Annahme einer idealen Mischlüftung getroffen, welche sich in realen Gebäuden nicht einstellt. Anhand eines Modells mit örtlicher Diskretisierung könnte die Abweichungen dieser Idealisierung quantifiziert werden, was zu einer genaueren Einschätzung der Infektionsrisiken führen würde. Eine realitätsnahe Modellierung des Infektionsgeschehens könnte zudem durch die Verwendung von realen Bewegungsdaten der Belegschaft erreicht werden.

Mit dem erstellten Simulationsmodell könnten Szenarien mit geänderten Rahmenbedingungen, wie anderen Gebäuden oder Schutzmaßnahmen, untersucht werden. Mit dem heutigen Stand der Technik von Lüftungsanlagen könnte, basierend auf den bisherigen Simulationsergebnissen, ein Bürobetrieb ohne hohe Homeoffice-Quote oder Quarantänepflicht wirtschaftlich realisierbar sein. Das vollständige Entfallen von Schutzmaßnahmen scheint jedoch nicht plausibel.

Bei der wirtschaftlichen Analyse könnten die indirekten Kosten bestehender Schutzmaßnahmen miteinbezogen werden. Dadurch würde ein direkter Kostenvergleich zwischen Lüftungsstrategien und anderen Maßnahmen ermöglicht werden. Dies könnte zu einer fundierten Entscheidungsgrundlage zwischen verschiedenen Maßnahmen im Pandemiefall beitragen.

Im Jahresmittel sind die Unterschiede der Energiekosten für verschiedene Parametersätze maßgeblich auf den Lufttransport, die Lüftungswärmeverluste und die Befeuchtung zurückzuführen. Ein Einfluss von personellen Fehlzeiten durch das Infektionsgeschehen auf den Heiz- und Kühlenergieaufwand wird in den Simulationsergebnissen nicht festgestellt. In zukünftigen Simulationsmodellen könnte ein Vergleich der einflussreichen Kostenträger ausreichen, was die Simulationszeit erheblich reduzieren würde. Da das in dieser Vorstudie modellierte Gebäude einen sehr hohen Dämmstandart aufweist, sollte dieser Ansatz für Gebäude mit anderen Baualtersklassen überprüft werden.

Für eine Reduktion der Simulationszeit könnte zudem der Betrachtungszeitraum des Infektionsmodells von einem Jahr verkürzt werden. Für die Abschätzung der Fallzahlen im Büro ist insbesondere relevant, ob sich Infektionsketten ausbilden. Der Betrachtungszeitraum sollte demnach mindestens einige Wochen betragen, um das Infektionsgeschehen vollständig zu erfassen. Die Ergebnisse dieses Betrachtungszeitraums könnten dann statistisch auf ein entsprechendes Jahresszenario übertragen werden.

Für eine Abschätzung der gesundheitsökonomischen Folgen könnte das Simulationsmodell hochskaliert werden. Die Modellierung einer gesamten Gesellschaft inklusive deren Freizeitbeschäftigungen würde eine detaillierte Berechnung der Infektionsrisiken außerhalb des Büros ermöglichen. Durch eine umfassende Modellierung von Firmengebäuden, Privathäusern und Freizeitmöglichkeiten könnten die Auswirkungen einzelner Maßnahmen auf die Gesamtbevölkerung ermittelt und angemessene Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

6 Literaturverzeichnis

[1] ABBASS, K., M.Z. QASIM, H. SONG, M. MURSHED, H. MAHMOOD und I. YOUNIS. A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures [online]. *Environmental science and pollution research international,* 2022, **29**(28), 42539-42559. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11356-022-19718-6

[2] AGANOVIC, A., Y. BI, G. CAO, F. DRANGSHOLT, J. KURNITSKI und P. WARGOCKI. Estimating the impact of indoor relative humidity on SARS-CoV-2 airborne transmission risk using a new modification of the Wells-Riley model [online]. *Building and Environment,* 2021, **205**, 108278. ISSN 03601323. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.buildenv.2021.108278

[3] AHLAWAT, A., A. WIEDENSOHLER und S.K. MISHRA. An Overview on the Role of Relative Humidity in Airborne Transmission of SARS-CoV-2 in Indoor Environments [online]. *Aerosol and Air Quality Research,* 2020, **20**(9), 1856-1861. ISSN 16808584. Verfügbar unter: doi:10.4209/aaqr.2020.06.0302

[4] ALLEN, J.G. und A.M. IBRAHIM. Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-CoV-2 Transmission [online]. *JAMA,* 2021, (325), 2112-2113. Verfügbar unter: https://jamanetwork.com/journals/jama/article-abstract/2779062

[5] AN DER HEIDEN M. SARS-CoV-2-Nowcasting und -R-Schaetzung [online], 2023. Verfügbar unter: 10.5281/zenodo.8062328

[6] AN DER HEIDEN M. und O. HAMOUDA. Schätzung der aktuel- len Entwicklung der SARS-CoV-2-Epidemie in Deutschland – Nowcasting. *Epidemiologisches Bulletin,* 2020, (17).

[7] BAEHR, H.D. und K. STEPHAN. *Wärme- und Stoffübertragung.* 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-87688-5.

[8] BAGHERI, G., B. THIEDE, B. HEJAZI, O. SCHLENCZEK und E. BODENSCHATZ. An upper bound on one-to-one exposure to infectious human respiratory particles [online]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 2021, **118**(49). Verfügbar unter: doi:10.1073/pnas.2110117118

[9] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT. *ENERGETISCHE SANIERUNG UND NEUBAU* [online] [Zugriff am: 30. Mai 2024]. Verfügbar unter: https://www.energieatlas.bayern.de/kommunen/energiemanagement/gebaeude

[10] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT. *Effiziente Energienutzung in Bürogebäuden. Planungsleitfaden.* 2008. Auflage. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008. ISBN 9783940009784.

[11] BÖCKH, P. und M. STRIPF. *Technische Thermodynamik.* 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2015. Lehrbuch. ISBN 3662468891.

[12] BÖHM, E., J. ALBRECHT und M. BIEKEHÖR. *Corona-Cluster und Infetionsketten* [online], 2020 [Zugriff am: 23. Mai 2024]. Verfügbar unter: https://zdfheute-stories-scroll.zdf.de/Corona_Cluster/index.html

[13] BOSCH THERMOTECHNIK GMBH. *Compress 6800i AW* [online], 2024. Verfügbar unter: https://www.bosch-homecomfort.com/de/de/ocs/wohngebaeude/compress-6800i-aw-19312695-p/

[14] BUITRAGO-GARCIA, D., A.M. IPEKCI, L. HERON, H. IMERI, L. ARAUJO-CHAVERON, I. AREVALO-RODRIGUEZ, A. CIAPPONI, M. CEVIK, A. HAUSER, M.I. ALAM, K. MEILI, E.A. MEYEROWITZ, N. PRAJAPATI, X. QIU, A. RICHTERMAN, W.G. ROBLES-RODRIGUEZ, S. THAPA, I. ZHELYAZKOV, G. SALANTI und N. LOW. Occurrence and transmission potential of asymptomatic and presymptomatic SARS-CoV-2 infections: Update of a living systematic review and meta-analysis [online]. *PLoS medicine,* 2022, **19**(5), e1003987. Verfügbar unter: doi:10.1371/journal.pmed.1003987

[15] BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN. Volkswirtschaftliche Kosten durch Arbeitsunfähigkeit 2022, 2023.

[16] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG. *Forschung zu Aerosolen in Innenräumen* [online]. *"Coronaviren breiten sich bei niedriger Luftfeuchtigkeit stärker aus",* 2021. 12 Januar 2021 [Zugriff am: 23. Mai 2024]. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/bmbf/de/home/_documents/coronaviren-breiten-sich-bei-n--luftfeuchtigkeit-staerker-aus.html

[17] BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT. *Coronavirus-Pandemie: Was geschah wann?* [online], 2023 [Zugriff am: 23. Mai 2024]. Verfügbar unter: https://www.bundesgesundheitsministerium.de/coronavirus/chronik-coronavirus

[18] BURGHOLZ, T.M., D. DERWEIN, K. REWITZ und D. MÜLLER. *Bewertung der Luftqualität in Messehallen mit örtlich aufgelöstenCO2-Konzentrationsmessungen.* Aachen: RWTH Aachen University, 2022.

[19] CHEN, S.L.-S., G.H.-H. JEN, C.-Y. HSU, A.M.-F. YEN, C.-C. LAI, Y.-P. YEH und T.H.-H. CHEN. A new approach to modeling pre-symptomatic incidence and transmission time of imported COVID-19 cases evolving with SARS-CoV-2 variants [online]. *Stochastic environmental research and risk assessment : research journal,* 2023, **37**(1), 441-452. ISSN 1436-3240. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00477-022-02305-z

[20] CHO, K., D. CHO und T. KIM. Effect of Bypass Control and Room Control Modes on Fan Energy Savings in a Heat Recovery Ventilation System [online]. *Energies,* 2020, **13**(7), 1815. Verfügbar unter: doi:10.3390/en13071815

[21] DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG. DGUV Information 215-210 „Natürliche und künstliche Beleuchtung von Arbeitsstätten“.

[22] DEUTSCHER WETTERDIENST. Aus extrem wurde normal: Sommer in Deutschland, der Schweiz und Österreich immer heißer [online], 2020. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20200702_dach_news.html

[23] DEUTSCHER WETTERDIENST und BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDUNG. Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Ein Gemeinsames Projekt im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD), 2017.

[24] DOHMANN, J. *Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-49109-6.

[25] GASSEL, A. Beiträge zur Berechnung solarthermischer und exergieeffizienter Energiesysteme (Dissertation), 1997.

[26] GRÖMLING, M. Wirtschaftliche Auswirkungen der Krisen in Deutschland. IW-Report 11/2024. *Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V.,* 2024.

[27] HEUGLE, P. Expertengespräch Siegle+Epple GmbH&Co.KG, 2024.

[28] IBT DEUTSCHLAND GMBH. Technisches Merkblatt - IBT aerius LZE324, 2020.

[29] INSTITUT DÜR AUTOMATISIERUNGS- UND REGELUNGSTECHNIK und A. KUGI. Vorlesung und Übung Modellbildung - 3 Wärmeübertragung, 2016.

[30] KARLE, M. Fehlzeitenmanagement / 5 Gesundheitsbericht erstellen [online], 2023. Verfügbar unter: https://www.haufe.de/personal/haufe-personal-office-platin/fehlzeitenmanagement-5-gesundheitsbericht-erstellen_idesk_PI42323_HI582958.html

[31] KEK, H.Y., S.B. MOHD SAUPI, H. TAN, M.H. DZARFAN OTHMAN, B.B. NYAKUMA, P.S. GOH, W.A. HAMOOD ALTOWAYTI, A. QAID, N.H. ABDUL WAHAB, C.H. LEE, A. LUBIS, S.L. WONG und K.Y. WONG. Ventilation strategies for mitigating airborne infection in healthcare facilities: A review and bibliometric analysis (1993–2022) [online]. *Energy and Buildings,* 2023, **295**, 113323. ISSN 03787788. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.enbuild.2023.113323

[32] KIMMICH, J. Untersuchung des Energieaufwands in Luftverteilsystemen für charakteristische Lastsituationen (Masterarbeit IGTE), 2020.

[33] KLAUß, S. Entwicklung einer Datenbank mit Modellgebäuden für energiebezogene Untersuchungen, insbesondere der Wirtschaftlichkeit, 2010.

[34] KLUG, S. Optimierung von Lüftungsmaßnahen in Klassenräumen hinsichtlich des Infektionsschutzes und des Energieaufwands (Masterarbeit IGTE), 2022.

[35] LI, B. und W. CAI. A novel CO2-based demand-controlled ventilation strategy to limit the spread of COVID-19 in the indoor environment [online]. *Building and Environment,* 2022, **219**, 109232. ISSN 03601323. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.buildenv.2022.109232

[36] MAKRIS, R., C. KOPIC, L. SCHUMANN und M. KRIEGEL. A Comprehensive Index for Evaluating the Effectiveness of Ventilation-Related Infection Prevention Measures with Energy Considerations: Development and Application Perspectives [online]. *Indoor air,* 2024, **2024**, 1-16. Verfügbar unter: doi:10.1155/2024/9819794

[37] MARANI, M., G.G. KATUL, W.K. PAN und A.J. PAROLARI. Intensity and frequency of extreme novel epidemics [online]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* 2021, **118**(35). Verfügbar unter: doi:10.1073/pnas.2105482118

[38] MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTEN E.V. *So gut schützen Masken* [online], 2021 [Zugriff am: 23. Mai 2024]. Verfügbar unter: https://www.mpg.de/17915640/corona-risiko-maske-schutz

[39] MEGAHED, N.A. und E.M. GHONEIM. Indoor Air Quality: Rethinking rules of building design strategies in post-pandemic architecture [online]. *Environmental research,* 2021, **193**, 110471. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.envres.2020.110471

[40] NADLER, N. Zur Personenwärme bei der Kühllastberechnung nach VDI 2078. *HLH. Z. f. Heiz. Lueft. Klimatech. Haustech.,* 2005, (7), 36-40.

[41] NADLER, N. Thermische Belastung durch Sonneneinstrahlung in Glasbauten. *Bauphsik,* 2006, **28**(6), 356-359.

[42] NEUHAUSER, H., N. BUTTMANN-SCHWEIGER, U. ELLERT, J. FIEBIG, C. HÖVENER, R. OFFERGELD, F. PRÜTZ, G. SARGANAS, L. SCHAADE, A. SCHAFFRATH ROSARIO, R. THAMM, M. ZIMMERMANN und C. POETHKO-MÜLLER. Seroepidemio-logische Studien zu SARS-CoV-2 in Stichproben der Allgemeinbevölkerung und bei Blutspenderinnen und Blutspendern in Deutschland – Ergebnisse bis August 2021. *Epidemiologisches Bulletin,* 2021, (37).

[43] ÖSTERREICHISCHE GESELLSCHAFT FÜR UMWELT UND TECHNIK. Kennzahlen zum Energieverbrauch in Dienstleistungsgebäuden. Eine Studie im Auftrag des Klima- und Energiefonds im Rahmen des Programms „Neue Energien 2020“, 2011.

[44] PARK, H.J., S.-G. LEE, J.S. OH, M. NAM, S. BARRETT, S. LEE und W. HWANG. The effects of indoor temperature and humidity on local transmission of COVID-19 and how it relates to global trends [online]. *PloS one,* 2022, **17**(8), e0271760. Verfügbar unter: doi:10.1371/journal.pone.0271760

[45] PENN, M. *Statistics Say Large Pandemics Are More Likely Than We Thought* [online], 2021 [Zugriff am: 8. Mai 2024]. Verfügbar unter: https://globalhealth.duke.edu/news/statistics-say-large-pandemics-are-more-likely-we-thought

[46] PFÄNDER, S. Respiratorische Virusinfektionen: Mechanismen der saisonalen Ausbreitung [online]. *Deutsches Ärzteblatt Online,* 2020. Verfügbar unter: doi:10.3238/PersInfek.2020.09.11.05

[47] PINZHOFFER, J. Optimierung von Lüftungsmaßnahmen in Bürogebäuden hinsichtlich des Infektionsschutzes und des Energieaufwands (Masterarbeit IGTE), 2023.

[48] RATH, U., R. HELLMANN, G. BROSE, M. LAIDIG und J. ZELLER. Stromsparkonzept Heidelberg Bahnstadt. Sektor Büro. *Stadt Heidelberg - Amt für Umweltschutz, Gewerbeaufsicht und Energie,* 2017.

[49] REKOVA, O. Reflektierende Beschichtungen als Lösungsansatz für das Problem sommerlicher Überwärmung von Gebäuden sowie ihre Auswirkung auf den Energiebedarf (Diplomarbeit TU Wien). *Technische Universität Wien (TU Wien),* 2019.

[50] RILEY, E.C., G. MURPHY und RILEY R.L. AIRBORNE SPREAD OF MEASLES IN A SUBURBAN ELEMENTARY SCHOOL. *American Journal of Epidemiology,* 1978, **107**(5), 421-432.

[51] ROBERT KOCH-INSTITUT, Hg. *Infektionsschutz und Infektionsepidemiologie. Fachwörter - Definitionen - Interpretationen.* Berlin: RKI, 2015. ISBN 9783896062581.

[52] ROBERT KOCH-INSTITUT. *Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19* [online], 2021. Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html

[53] ROBERT KOCH-INSTITUT. *SARS-CoV-2: Virologische Basisdaten sowie Virusvarianten im Zeitraum von 2020 - 2022* [online], 2023. Verfügbar unter: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Virologische_Basisdaten.html?nn=13490888

[54] SCHMIDT, D., C. GOETSCHKES und C. POLLERBERG. KÄLTETECHNIK IN DEUTSCHLAND. Steckbriefe zu Kältetechnologien. *Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.),* 2020.

[55] SIEBLER, L., T. RATHJE, M. CALANDRI, K. STERGIAROPOULOS, T. DONKER, B. RICHTER, C. SPAHN und M. NUSSECK. A coupled experimental and statistical approach for an assessment of SARS-CoV-2 infection risk at indoor event locations [online]. *BMC public health,* 2023, **23**(1), 1394. Verfügbar unter: doi:10.1186/s12889-023-16154-0

[56] STATISTA GMBH. *Gesamtzahl der Impfungen gegen das Coronavirus (COVID-19) in Deutschland seit Beginn der Impfkampagne im Dezember 2020* [online], 2022. 20 Juli 2022 [Zugriff am: 22. Juni 2024]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1195116/umfrage/impfungen-gegen-das-coronavirus-in-deutschland-seit-beginn-der-impfkampagne/

[57] STATISTA GMBH. *Verteilung besorgniserregender Coronavirusvarianten (VOC) in Deutschland seit Februar 2022* [online]. 8 Mai 2023 [Zugriff am: 22. Juni 2024]. Verfügbar unter: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1308508/umfrage/verteilung-von-corona-mutationen-in-deutschland/

[58] STATISTISCHES BUNDESAMT. *Knapp ein Viertel aller Erwerbstätigen arbeitete 2022 im Homeoffice* [online], 2023. 11 Juli 2023 [Zugriff am: 23. Mai 2024]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2023/PD23_28_p002.html

[59] STATISTISCHES BUNDESAMT. *KORREKTUR: Gaspreise für Haushalte im 2. Halbjahr 2022 um 16,2 % gestiegen* [online], 2023 [Zugriff am: 3. Juni 2024]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/04/PD23_151_61243

[60] STEPHAN, P. Grundlagen der Berechnungsmethoden für Wärmeleitung, konvektiven Wärmeübergang und Wärmestrahlung. In: K. JOUSTEN, Hg. *Handbuch Vakuumtechnik.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 1-14. ISBN 978-3-658-13403-7.

[61] STIEGLITZ, R. und V. HEINZEL. *Thermische Solarenergie. Grundlagen, Technologie, Anwendungen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, 2012. ISBN 978-3-642-29475-4.

[62] SUNDELL, J., H. LEVIN, W.W. NAZAROFF, W.S. CAIN, W.J. FISK, D.T. GRIMSRUD, F. GYNTELBERG, Y. LI, A.K. PERSILY, A.C. PICKERING, J.M. SAMET, J.D. SPENGLER, S.T. TAYLOR und C.J. WESCHLER. Ventilation rates and health:

multidisciplinary review of the scientific literature [online]. *Indoor air,* 2011, **21**(3), 191-204. Verfügbar unter: doi:10.1111/j.1600-0668.2010.00703.x

[63] SUNEARTHTOOLS. SunEarthTools AnnualSunPath 2022 [online], 2024. Verfügbar unter: https://www.sunearthtools.com/

[64] SZE TO, G.N. und C.Y.H. CHAO. Review and comparison between the Wells-Riley and dose-response approaches to risk assessment of infectious respiratory diseases [online]. *Indoor air,* 2010, **20**(1), 2-16. Verfügbar unter: doi:10.1111/j.1600-0668.2009.00621.x

[65] TECHNIKER KRANKENKASSE. Gesundheitsreport 2023 Arbeitsunfähigkeiten, 2023.

[66] TSENG, H.F., B.K. ACKERSON, Y. LUO, L.S. SY, C.A. TALARICO, Y. TIAN, K.J. BRUXVOORT, J.E. TUBERT, A. FLOREA, J.H. KU, G.S. LEE, S.K. CHOI, H.S. TAKHAR, M. ARAGONES und L. QIAN. Effectiveness of mRNA-1273 against SARS-CoV-2 Omicron and Delta variants [online]. *Nature medicine,* 2022, **28**(5), 1063-1071. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41591-022-01753-y

[67] UMWELTBUNDESAMT. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft [online]. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz,* 2008, **51**(11), 1358-1369. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00103-008-0707-2

[68] WOLKOFF, P. Indoor air humidity revisited: Impact on acute symptoms, work productivity, and risk of influenza and COVID-19 infection [online]. *International journal of hygiene and environmental health,* 2023, **256**, 114313. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijheh.2023.114313

[69] WYON, D. The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Indoor air,* 2004.

Gesetze, Verordnungen, Richtlinien, Normen

[70] BAuA, *ASR A3.5: Technische Regeln für Arbeitsstätten: Raumtemperatur: 2022*.

[71] BAuA, *ASR A3.6: Lüftung: 2018*.

[72] BAuA, *ASR A3.4: Technische Regeln für Arbeitsstätten: Beleuchtung und Sichtverbindung: 2023*.

[73] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), *DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland: 2003*.

[74] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), *DIN V 18599-2: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen: 2018*.

[75] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), *DIN 5034-2: Tageslicht in Innenräumen - Teil 2 Grundlagen: 2021*.

[76] Energieeinsparverordnung - EnEV, *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden: 2015*.

[77] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 2087: Luftleitungssysteme Bemessungsgrundlagen: 2016*.

[78] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI 6011: Lichttechnik Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung: Grundlagen und allgemeine Anforderungen: 2016*.

7 Anhang

In diesem Kapitel sind ergänzende Informationen für die Daten des Simulationsmodells aufgeführt. Zudem werden detaillierte Ergebnisse der Auswertung dargestellt.

7.1 Aufbau der Wandschichten

In Tabelle 7-1 sind die Materialdaten der einzelnen Schichten der modellierten Außenwände und Fenster der Büroetage dargestellt. Die Daten stammen aus der Arbeit von *Pinzhoffer* [47].

Tabelle 7-1: Aufbau der Wandschichten

Außenwand

Material	d in m	ρ in kg/m³	λ in W/(m·K)	c_p in J/(kg·K)
Putz	0,013	1.600	0,7	1.000
Beton	0,05	2.400	2,5	1.000
Polystyrol	0,1	20	0,05	2.100
Beton	0,05	2.400	2,5	1.000
Putz	0,013	1.600	0,7	1.000

Fenster

Material	d in m	ρ in kg/m³	λ in W/(m·K)	c_p in J/(kg·K)
Glas	0,003	2.500	0,8	720
Krypton	0,007	3,749	0,00949	248
Glas	0,003	2.500	0,8	720

7.2 Einzelwiderstände des Lüftungssystems

In Tabelle 7-2 sind die Druckverlustbeiwerte der Einzelwiderstände von Bauteilen zur Luftkonditionierung dargestellt. Im Zuluftstrang kann der Wärmeübertrager zur Wärmerückgewinnung durch einen Bypass umgangen werden (siehe Kapitel 3.1.3). Ein Bypass der Wärmerückgewinnung im Abluftstrang ist in der Modellierung nicht vorgesehen, da dies in der Praxis aufgrund der erhöhten technischen Komplexität meist nicht umgesetzt wird [27].

Tabelle 7-2: Einzelwiderstände von Bauteilen zur Lutkonditionierung im Lüftungssystem [32]

Bauteil	Druckverlustbeiwerte der Einzelwiderstände ζ	
	Zuluft	Abluft
Wetterschutzgitter	0,52	0,52
Filter	13,4	13,4
Schalldämpfer	3,09	3,09
Befeuchter	0,16	-
Einbauverluste	1,55	1,55
Wärmerückgewinnung	15,5	15,5
Bypass	0,52	-
Klappe	0,52	0,52

7.3 Ergebnisse der Parametervariation der inzidenzabhängigen CO_2-Sollwerte

In Tabelle 7-3 sind die Ergebnisse der Parametervariation von inzidenzabhängigen CO_2-Sollwerten dargestellt. Die Funktionen der CO_2-Sollwerten gemäß Gleichung 4-1 in Kapitel 4.2.2 beziehen sich auf die Tagesinzidenz, um ein besseres Verständnis zu ermöglichen. In der Parametervariation werden die Funktionen gemäß Gleichung 7-1 auf das tatsächliche Risiko einer extern infizierten Person umgerechnet. Da die Tagesinzidenz auf 100.000 Personen bezogen ist, resultiert das Risiko aus dem Quotienten von Tagesinzidenz und dem Faktor 100.000.

$$\mathrm{SW_{CO2}} = \mathrm{a} \cdot (\mathrm{Inz}/100.000)^{\mathrm{b}} + \mathrm{Pet} \tag{7-1}$$

$\mathrm{SW_{CO2}}$	CO_2-Sollwert in ppm
Inz	Tagesinzidenz
a	Anpassungsfaktor in ppm
b	Anpassungsfaktor
Pet	Pettenkoferzahl in ppm

In der Parametervariation werden Funktionen mit verschiedenen Verläufen betrachtet, welche mitunter durch den Faktor b festgelegt werden. In Bild 4-7 sind beispielhaft im linken Diagramm Kurvenverläufe mit Faktor $\mathrm{b} = 0{,}05$ und im rechten Diagramm Kurvenverläufe mit Faktor $\mathrm{b} = 0{,}5$ dargestellt. Die entsprechenden Faktoren a werden so festgelegt, dass die CO_2-Sollwerte bei den maximal auftretenden Tagesinzidenzen im Bereich von 400 und 700 ppm liegen.

Tabelle 7-3: Ergebnisse der Arbeitsunfähigkeits- und Energiekosten der Parametervariation mit inzidenzabhängigen CO_2-Sollwerten

Faktor b	0,5						
Faktor a	9000	9500	10000	10500	11000		
Arbeitsunfähigkeit in €	112060	98389	94955	89072	86719		
Energie in €	4369	5503	7923	11459	13949		
Gesamt in €	116429	103892	102878	100531	100668		
Faktor b	0,25						
Faktor a	2000	2100	2200	2300	2500		
Arbeitsunfähigkeit in €	86178	78896	66748	56636	43534		
Energie in €	5107	6200	7879	10872	22610		
Gesamt in €	91285	85096	74627	67508	66144		

Faktor b	0,15						
Faktor a	1000	1100	1200	1300	1400		
Arbeitsunfähigkeit in €	91425	71073	51929	45697	24104		
Energie in €	4523	6113	9388	17391	37866		
Gesamt in €	95948	77186	61317	63088	61970		
Faktor b	0,1						
Faktor a	800	850	900	950	975	1000	1025
Arbeitsunfähigkeit in €	63250	50880	42389	35362	30369	25154	20543
Energie in €	6504	8425	11824	18466	23914	33708	44276
Gesamt in €	69754	59305	54213	53828	54283	58862	64819
Faktor b	0,05						
Faktor a	550	600	650	700	725	750	800
Arbeitsunfähigkeit in €	71296	56095	36551	33931	29129	24295	18953
Energie in €	5714	8137	12737	16872	23721	35538	58690
Gesamt in €	77010	64232	49288	50803	52850	59833	77643
Faktor b	0,01						
Faktor a	400	450	500	550	600		
Arbeitsunfähigkeit in €	79468	54187	37047	24550	14969		
Energie in €	4989	7781	14224	34266	121590		
Gesamt in €	84457	61968	51271	58816	136559		