Fraunhofer
IBP

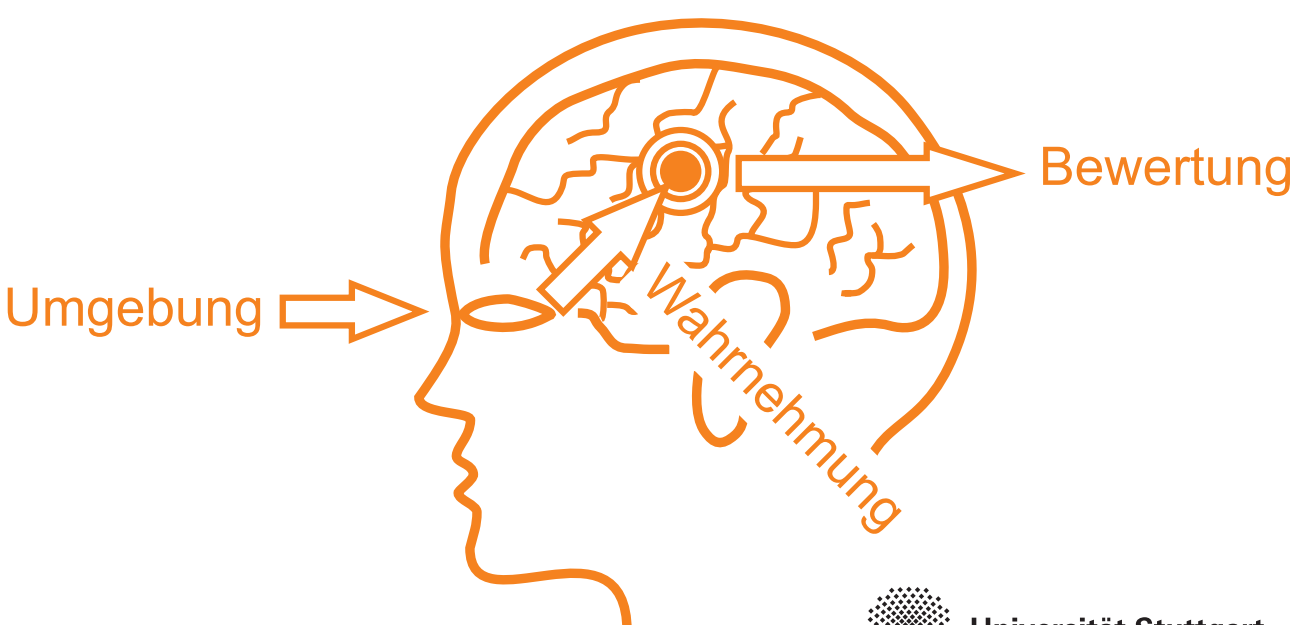
FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Gunnar Grün

Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas am Beispiel der Passagierflugzeugkabine

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK BAND 1

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer
Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser



Universität Stuttgart
Lehrstuhl für Bauphysik

Technische Universität München
Lehrstuhl für Bauphysik

FRAUNHOFER VERLAG

Fraunhofer IBP

Universität Stuttgart
Lehrstuhl für Bauphysik

Technische Universität München

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK **BAND 1**
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer
Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Gunnar Grün

Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas am Beispiel der Passagierflugzeugkabine

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00
Telefax 0711 970-3395
E-Mail info@ibp.fraunhofer.de
URL www.ibp.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
ISBN: 978-3-8396-0008-5

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ.-Diss., 2008

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by FRAUNHOFER VERLAG, 2009
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL http://verlag.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas am Beispiel der Passagierflug-zeugkabine

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Gunnar Grün

aus Essen

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Bjarne W. Olesen
	Prof. Ing.Dr. Michael Trimmel
Tag der mündlichen Prüfung:	18. Dezember 2008

Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart

2009

Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entstanden. Für die Förderung durch ein Promotionsstipendium möchte ich mich an dieser Stelle bei der Studienstiftung des deutschen Volkes bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Professor Klaus Sedlbauer für die Ermöglichung dieser Arbeit, die inspirierenden fachlichen Diskussionen und die Unterstützung bei der Umsetzung. Für die Übernahme des Koreferats danke ich Professor Bjarne Olesen, insbesondere für die Möglichkeit eines Forschungsaufenthaltes an seinem Institut an der Dänischen Technischen Universität und die fruchtbaren Diskussionen. Ebenso danke ich Professor Michael Trimmel für sein Koreferat. Ohne die erfolgreiche Zusammenarbeit mit ihm und dem Zentrum für Public Health der medizinischen Universität Wien wäre die exzellente Datenbasis aus Probandenbefragungen nicht möglich gewesen.

Diese Daten entstanden in dem durch die EU geförderten Forschungsprojekt Ideal Cabin Environment (ICE) mit der Vertragsnummer AST4-CT-2005-516131. Für die gute Zusammenarbeit insbesondere in der Versuchsvorbereitung und -durchführung in der Flight Test Facility gilt dem Konsortium unter Leitung des Building Research Establishment mein spezieller Dank. Viele Kollegen waren an der gelungenen Bearbeitung der Untersuchungen beteiligt, ihnen allen danke ich herzlich für die gute Stimmung und Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle: Dr. Runa Hellwig für die intensiven, langen und fruchtbaren fachlichen Diskussionen und Hinweise; Dr. Andreas Holm für den fachlichen Rückhalt und die vertrauensvolle Zusammenarbeit; Dr. Erhard Mayer, dessen visionäre Tatkraft die Umsetzung der Flight Test Facility und damit diese Arbeit ermöglicht hat; meinen „Piloten" Gerhard Riedl, Hans Gottschling und Martin Lebschy für sichere „Flüge" in der Niederdruckkammer und eine hervorragende Messwerterfassung; meiner „Flugbegleiter"-Kollegin Anna Renzl für die vielen gemeinsam betreuten Probandenversuche sowie allen Kollegen, die uns dabei – unter anderem durch mannigfaltige warme Mahlzeiten – unterstützt haben.

Bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern für ihren Rückhalt und das in mich gesetzte Vertrauen. Im Besonderen danke ich Nora Hägele für ihre Geduld, Unterstützung und Motivation.

München, im Dezember 2008 *Gunnar Grün*

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis **9**

Abstract **13**

Zusammenfassung **17**

1 Motivation und Ziel der Arbeit **21**

2 Methodische Vorgehensweise **23**

3 Grundlagen **29**

3.1 Raumklima & Komfort 29

3.1.1 Der Begriff Raumklima 30

3.1.2 Komfort im Sprachgebrauch 33

3.1.3 Komfort in der Wissenschaft 38

3.2 Wahrnehmung des Raumklimas 48

3.2.1 Wahrnehmung der (hygro-)thermischen Umgebung 48

3.2.2 Wahrnehmung der olfaktorischen Umgebung 51

3.2.3 Wahrnehmung der vibro-akustischen Umgebung 54

3.3 Bewertung des Raumklimas 58

3.3.1 (Hygro-)Thermisches Raumklima 58

3.3.2 Vibro-Akustisches Raumklima 67

3.3.3 Luftqualität 75

3.3.4 Einflüsse kombinierter Raumklimaparameter 79

3.4 Statistische Grundlagen 85

3.4.1 Beschreibende Statistik 86

3.4.2 Schließende Statistik 93

3.4.3 Hauptkomponentenanalyse 97

3.5 Grundlagen der Strukturgleichungsmodellierung 100
3.5.1 Notation und Pfaddiagramme 100
3.5.2 Schätzverfahren und Stichprobengrößen 103
3.5.3 Polychorische Korrelation 105
3.5.4 Modelle für nicht-lineare bzw. Interaktionseffekte 107
3.5.5 Modelle für mehrere Stichproben 109
3.5.6 Modelle mit Mittelwerten ungleich Null 110
3.5.7 MIMIC-Modelle 111
3.5.8 Kriterien zur Überprüfung und Bewertung 111

3.6 Resümee des Stands des Wissens 116

4 Versuchsdesign 121

4.1 Konzeption der Versuchsumgebung 121

4.2 Probandenstudie 125

5 Modellierung 131

5.1 Modellhypothesen 131

5.2 Analyse der Fragebogendaten 136
5.2.1 Verwendete Items 136
5.2.2 Umkodierung der Variablen 141
5.2.3 Bereinigung der Fragebogendaten anhand von Bekleidungsitems 145
5.2.4 Beschreibende Statistiken der verwendeten Items 147
5.2.5 Analyse der zeitlichen Konstanz 150
5.2.6 Auswahl von Items für die Messmodelle 152

5.3 Analyse der Messdaten 157
5.3.1 Bereinigung anhand eines bewegten Medians 157
5.3.2 Überprüfung der physikalischen Randbedingungen 158
5.3.3 Beschreibende Statistiken der physikalischen Randbedingungen 158

5.3.4 Wahl der exogenen Variablen 160
5.3.5 Umrechnung von Messdaten 162
5.4 Modellfindung 164
5.4.1 Modell *MCv*: Bewertung ausgehend von Messgrößen 167
5.4.2 Modell *MSC*: Wahrnehmung und Bewertung ausgehend von Messgrößen 170
5.4.3 Modell *ICv*: Bewertung ausgehend von Indizes 172
5.4.4 Modell *ISC*: Wahrnehmung und Bewertung ausgehend von Indizes 175

6 Evaluierung 179

6.1 Validierung der Modelle 179
6.1.1 Validierung des Modells *MCv* 180
6.1.2 Validierung des Modells *MSC* 182
6.1.3 Validierung des Modells *ICv* 184
6.1.4 Validierung des Modells *ISC* 186
6.2 Überprüfung von Teilmodellen 188
6.2.1 Überprüfung der Messmodelle 189
6.2.2 Überprüfung des Modellteils für Komfortaspekte 190
6.3 Vergleich der Modelle 193

7 Parameterstudie für das Modell *ICv* 197

7.1 Betrachtung der Variable des thermischen Komforts im Modell *ICv* 198
7.2 Betrachtung der Variable der empfundenen Luftqualität im Modell *ICv* 200
7.3 Betrachtung der Variable des akustischen Komforts im Modell *ICv* 202
7.4 Betrachtung der Variable des Gesamtkomforts im Modell *ICv* 204

8 Schlussfolgerungen und Ausblick 207

8.1 Wissenschaftliche Reflektion und potenzielle Weiterentwicklungen 207

8.2 Praktische Anwendungsmöglichkeiten 211

Literaturverzeichnis **213**

Anhang A Fiktives erläuterndes Beispiel **227**

Anhang B Konstruktion von Box-Whisker-Plots **231**

Anhang C Luftgeschwindigkeiten **233**

Anhang D Turbulenzgrade **236**

Anhang E Schalldruckpegel **239**

Anhang F Vibrationspegel **240**

Anhang G Leuchtdichten **241**

Anhang H Parametermatrizen des Modells *MCv* **242**

Anhang I Parametermatrizen des Modells *MSC* **245**

Anhang J Parametermatrizen des Modells *ICv* **250**

Anhang K Parametermatrizen des Modells *ISC* **254**

Glossar **259**

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance (engl.: Varianzanalyse)
AV	Air Velocity (engl.: Luftgeschwindigkeit)
CO_2	Kohlendioxid
ComfAll	latente Variable des Gesamtkomforts
ComfAQ	latente Variable der empfundenen Luftqualität
ComfN	latente Variable des akustischen Komforts
ComfTc	latente Variable des kühlen thermischen Komforts
ComfTw	latente Variable des warmen thermischen Komforts
CvCcomf4	manifeste Variable für die Bewertung des Komforts der Gesamtbedingungen
CvCpleas	manifeste Variable für die Bewertung der Annehmlichkeit der Gesamtbedingungen
CvNpax	manifeste Variable für die Bewertung der Lästigkeit von Geräuschen
CvOdour	manifeste Variable für die Geruchsbewertung
CvRH	manifeste Variable für die Trockenheitsbewertung
CvSPL	manifeste Variable für die Bewertung der Lautstärke
CvT01c	manifeste Variable für die kühle Temperaturbewertung im Fußbereich
CvT01w	manifeste Variable für die warme Temperaturbewertung im Fußbereich
CvT11c	manifeste Variable für die kühle Temperaturbewertung im Kopfbereich
CvT11w	manifeste Variable für die warme Temperaturbewertung im Kopfbereich
CvTc	manifeste Variable für die kühle Temperaturbewertung
CvTw	manifeste Variable für die warme Temperaturbewertung
CvVent	manifeste Variable für die Bewertung der Stickigkeit
CvVibra	manifeste Variable für die Vibrationsbewertung
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EPSEM	equal probability sampling mechanism (engl.: Mechanismus für Stichprobenziehung bei gleicher Wahrscheinlichkeit)
err	error (engl.: Fehler)
EU	European Union
FAA	Federal Aviation Administration

FTF	Flight Test Facility
GFI	Goodness of Fit Index (engl.: Anpassungsmaß)
HEPA	High Efficiency Particulate Airfilter (engl.: hocheffektiver Partikelfilter)
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning (engl. Heizung, Lüftung und Klimatisierung)
ICE	Ideal Cabin Environment
ICv	Modellbezeichnung für die Architektur „Komfortbewertung basierend auf Indizes“
IQ	Intelligenzquotient
ISC	Modellbezeichnung für die Architektur „Wahrnehmung und Komfortbewertung basierend auf Indizes
ISO	International Organization for Standardization
MCv	Modellbezeichnung für die Architektur „Komfortbewertung basierend auf Messgrößen“
MIMIC	Multiple Indicators Multiple Causes (engl.: mehrere Indikatoren mehrere Gründe)
ML	Maximum Likelihood (engl.: maximale Wahrscheinlichkeit)
MSC	Modellbezeichnung für die Architektur „Wahrnehmung und Komfortbewertung basierend auf Messgrößen“
NC	Noise Criterium (engl.: Lärmkriterium)
NCB	Balanced Noise Criterium (engl.: ausgeglichenes Lärmkriterium)
O_3	Ozon
P	Pressure (engl.: Druck)
PC	Personalcomputer
PDA	Personal Digital Assistant (engl.: persönlicher digitaler Assistent)
PM_{10}	Staubpartikel mit 10 µm Durchmesser
PM_2	Staubpartikel mit 2 µm Durchmesser
PMV	Predicted Mean Vote (engl.: vorhergesagtes mittleres Votum)
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied (engl.: vorhergesagter Prozentsatz Unzufriedener)
prEN	Entwurf einer Europäischen Norm
QAI	Quality Assessment Index (engl.: Qualitätsbewertungsindex)
RH	Relative Humidity (engl.: realive Luftfeuchte)
RMR	Root Mean Squared Residual (engl.: Residuum des quadratischen Mittelwerts)
SAE AIR	Society of Automotive Engineers Aerospace Information Report
SensAQ	latente Variable der olfaktorischen Wahrnehmung
SensN	latente Variable der akustischen Wahrnehmung
SensTc	latente Variable der kühlen thermischen Wahrnehmung
SensTw	latente Variable der warmen thermischen Wahrnehmung
SPL	Sound Pressure Level (engl.: Schalldruckpegel)

SvNpax	manifeste Variable für die Wahrnehmung von Geräuschen anderer Passagiere
SVOC	Semi-volatile organic compounds (engl.: halb-flüchtige organische Verbindungen)
SvOdour	manifeste Variable für die Geruchswahrnehmung
SvRH	manifeste Variable für die Trockenheitswahrnehmung
SvSPL	manifeste Variable für die Wahrnehmung der Lautstärke
SvT01c	manifeste Variable für die kühle Temperaturwahrnehmung im Fußbereich
SvT01w	manifeste Variable für die warme Temperaturwahrnehmung im Fußbereich
SvT11c	manifeste Variable für die kühle Temperaturwahrnehmung im Kopfbereich
SvT11w	manifeste Variable für die warme Temperaturwahrnehmung im Kopfbereich
SvTc	manifeste Variable für die kühle Temperaturwahrnehmung
SvTw	manifeste Variable für die warme Temperaturwahrnehmung
SvVent	manifeste Variable für die Wahrnehmung der Stickigkeit
SvVibra	manifeste Variable für die Vibrationswahrnehmung
TA	Air Temperature (engl.: Lufttemperatur)
TVOC	Total Volatile Organic Compounds (engl.: gesamte flüchtige organische Verbindungen)
VOC	Volatile Organic Compounds (engl.: flüchtige organische Verbindungen)
WLS	Weighted Least Squares (engl.: gewichtete kleinste Quadrate)

Abstract

In this dissertation the methodology of modelling a comfort index in the context of the indoor environment is investigated. The indoor environment is understood as the entity of (hygro-)thermal, olfactory, vibro-acoustic and visual environmental aspects. For this investigation the example of the cabin environment in commercial aircraft has been chosen. On the one hand this specific indoor environment is controlled to ensure survivable conditions, on the other there is a fundamental interest of airframers and airlines to achieve a high level of customer retention through comfortable flights. Against that background extensive test campaigns have been carried out at the Flight Test Facility operated by the Fraunhofer Institute for Building Physics. Data of such subject tests are essential when aiming at deriving comfort models. The models formulated in this dissertation are based on data collected during the EC-funded project Ideal Cabin Environment (ICE). This project focuses on the combined effects of air pressure, humidity, temperature and background noise levels on passengers' comfort and well-being.

Subsequent to a detailed analysis of the term comfort in ordinary and scientific language the following definition of comfort has been chosen:

Comfort is a subjective psychological construct. It can be operationalised and is the result of a person's perception and the assessment according to her/his experiences and expectations. Comfort is a convenient state of physiological, psychological and physical harmony between a person and the different aspects of her/his environment. Discomfort arises in case of disturbing this harmony. Comfort and discomfort may occur at the same time with respect to different aspects. In context with the indoor environment it is aimed at the creation of an environment, which does not discomfort people through stimulation by any physical condition. These environmental conditions do not act independently.

Thus the decisive criterion for a good indoor environment is determined by the achievement of a state which entails no discomfort. Occupants of indoor environments, such as aircraft passengers, do not feel disturbed by the physical conditions while experiencing an optimal indoor environment.

Since huge samples and extensively controlled test conditions are needed for a holistic examination of indoor environmental comfort and the associated deduction of reliable models appropriate studies are rare. Thus there are currently

no generally accepted systematic approaches for a formulation of such comfort models.

Structural equation modelling is an established approach to model constructs in to social and economic sciences. They consider constructs, such as comfort, as latent variables, which are expressed by tangible expressions, e.g. subject votes. Thus this approach is applied to the modelling of indoor environmental comfort. Because of the definition of comfort as a subjective psychological construct the models derived in this dissertation are based on questionnaire surveys in a most realistic environment. Contrary to common data in the field of building physics questionnaire data is assigned to another scale of measurement – the ordinal scale. In general structural equation models refer to normally distributed – and thus continuous – data. As a possible approximation to map the ordinal questionnaire data onto underlying normally distributed variables polychoric correlations are used.

For each indoor environmental aspect the physiological perceptions as well as the assessment of environmental conditions are described extensively in literature. In general environmental comfort ratings are assumed to be driven by environmental conditions. Aside from individual factors, such as experience or control, physical parameters are used as model parameters. Both indoor environmental measurements and indices calculated from these measurements are used as parameters. Through these factors environmental perception and the specific comfort assessment can be described adequately and finally an overall assessment could be deducted. When considering this causal chain the environmental perception plays the role of an intervening variable. This is a result of the common understanding of our senses as interfaces between human and environment. However the complexity and efforts of estimation increase significantly when considering this intermediate step. Because samples sizes usually are limited the omission of these intervening variables is examined.

Thus different architectures for possible structural equation models are compared in this dissertation. On the one hand they differ in using measurements or indices, on the other they vary in the consideration of intervening variables of perception. The target variable of each of the models is the overall comfort which should be explained through the specific environmental comfort rates. In summary the following model architectures are investigated:

Measurements → comfort aspects → overall comfort

Measurements → perception → comfort aspects → overall comfort

Indices → comfort aspects → overall comfort

Indices → perception → comfort aspects → overall comfort

A suitable test campaign to develop such models – with a large sample size and controlled environmental conditions – has been carried out at the Fraunhofer Institute for Building Physics in the Flight Test Facility. Within the EC-funded project Ideal Cabin Environment (ICE) several hundred subjects have been surveyed under different indoor environmental conditions in a simulated aircraft cabin environment. In this study the indoor environmental parameters pressure, humidity, temperature and noise level have been varied. The gained data set has been cleaned, described and finally splitted to allow for a validation of the derived models.

To be enabled to select appropriate comfort aspects and the associated variables a principle component analysis is performed with relevant questionnaire items. Through this analysis factors for the thermal and the acoustical indoor environment as well as the perceived air quality are identified. No suggestive association is found for items related to perceived dryness and vibrations.

The parameter estimates are valid for each of the four model architectures. The hypothesised relations within the models are plausible and can be approved. The model implying the least complexity (Model *ICv*: indices → comfort aspects → overall comfort) emerges as superior among the others. This may be mainly due to the lower number of variables in the model and thus a more robust estimation of model parameters. The number of variables is reduced though both omission of intervening variables of perception and summarising measurements by environmental indices. Thus the uncertainty through the estimation processes is alleviated. Furthermore the premise holds for indices that they are representing the rating of certain environmental aspects and thus entail a better model fit.

Finally a parameter study is performed using the advantageous Model *ICv*. The known interrelations of warm and cold indoor environments and higher discomfort as well as uncomfortable loud environments and more badly perceived air quality are reproduced by the model. Furthermore the interrelations between thermal assessment and acoustic environments are confirmed. The perceived air quality shows the trend of higher discomforts in louder and thermally more uncomfortable environments, while no systematic relation to the duration of exposure can be identified. While there seems to be no influence of exposure time on acoustic assessment there is an effect of time on the assessment of thermal conditions in loud environments. The overall discomfort generally increases in cold and warm environments. The same holds for loud environments whereas this effect increases with longer exposure.

Finally the selected approach of structural equation modelling for modelling a comfort index for indoor environments can be judged as successful. The developed models are valid, acceptable and yield qualitatively plausible results. Thus a satisfactory model-data consistency is reached and beyond that a reasonable model-reality consistency can be assigned in comparison with different studies. Accordingly the described modelling method could be suitable to optimise the indoor environment in future aircraft cabin environments.

Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit dem Raumklima als physikalische Beschreibung der (hygro-)thermischen, olfaktorischen, vibro-akustischen und visuellen Umgebung wird in dieser Arbeit die Methodik für die Modellierung eines Komfortindex untersucht. Hierbei wird als Beispiel das Raumklima an Bord von Passagierflugzeugen gewählt, da zum Einen das Klima dort kontrolliert ist um überlebensnotwendige Bedingungen zu schaffen und zum Anderen ein Interesse der Flugzeugbetreiber besteht durch möglichst komfortable Bedingungen eine hohe Kundenbindung zu erreichen. Vor diesem Hintergrund konnten in der Flight Test Facility am Fraunhofer-Institut für Bauphysik umfangreiche Untersuchungen mit Probanden durchgeführt werden, welche für die Ableitung von Komfortmodellen erforderlich sind. Die in dieser Arbeit verwendeten Daten stammen aus dem EU-Forschungsprojekt Ideal Cabin Environment (ICE), dessen Fokus auf den Einflüssen und Interaktionen von Luftdruck, Luftfeuchte, Temperatur und Hintergrundlautstärke bezüglich des Komforts liegt.

Im Anschluss an eine ausführliche Analyse des Begriffs Komfort im gewöhnlichen und wissenschaftlichen Sprachgebrauch wird folgende Definition dieses Begriffst gewählt:

Komfort ist ein subjektives psychologisches Konstrukt. Es bietet die Möglichkeit der Operationalisierung und ist das Ergebnis der Wahrnehmung von Personen und der Bewertung anhand ihrer Erfahrung und Erwartung. Komfort ist ein angenehmer Zustand physiologischer, psychologischer und physikalischer Harmonie zwischen der Person und den verschiedenen Aspekten ihrer Umgebung. Diskomfort tritt ein, wenn diese Harmonie verletzt ist. Komfort und Diskomfort können bezüglich unterschiedlicher Aspekte zugleich auftreten. Im Kontext des Raumklimas wird die Schaffung einer Umgebung angestrebt, in welcher eine Person keinen Diskomfort aufgrund einer Stimulation durch die Umgebungsbedingungen erfährt. Diese wirken nicht unabhängig voneinander.

Es wird also das Erreichen eines Zustands, in welchem kein Diskomfort herrscht, als maßgebendes Kriterium für ein gutes Raumklima betrachtet. Nutzer eines Raumes, z.B. Insassen einer Flugzeugkabine, fühlen sich bei optimalen Raumklimabedingungen durch deren Gesamtheit nicht gestört.

Da für eine holistische Betrachtung des Raumklimakomforts und der damit verbundenen Entwicklung von zuverlässigen Modellen jedoch sehr große Stich-

proben bei aufwändig kontrollierten Versuchsbedingungen notwendig sind, sind Studien zu diesem Thema selten. Dementsprechend existieren derzeit auch keine allgemein akzeptierten systematischen Ansätze für die Formulierung von solchen Komfortmodellen.

Eine in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften etablierte Form der Modellierung von Konstrukten ist die Strukturgleichungsmodellierung, welche diese als latente Variable berücksichtigt. Dieser Modellansatz wird auf die Komfortanalyse hinsichtlich des Raumklimas übertragen und anhand einiger alternativer Modelle untersucht. Nachdem Komfort als subjektives psychologisches Konstrukt verstanden wird, basieren die entwickelten Modelle auf subjektiven Daten, welche in möglichst realitätsnaher Umgebung anhand von Fragebögen erhoben wurden. Im Gegensatz zu üblichen bauphysikalischen Messdaten sind Fragebogendaten jedoch häufig einem anderen Skalenniveau – dem ordinalen – zugeordnet. Strukturgleichungsmodelle setzen im Allgemeinen jedoch normalverteilte – und damit auch kontinuierliche – Daten voraus. Als mögliches Näherungsverfahren zur Abbildung ordinaler Daten auf normalverteilte Variablen wird daher die polychorische Korrelation verwendet.

Für die einzelnen Raumklimaaspekte sind sowohl die Vorgänge der physiologischen Wahrnehmung als auch deren Bewertung umfassend in der Literatur beschrieben. Im Allgemeinen wird die Komfortbewertung hinsichtlich des Raumklimas als durch die Umgebung verursacht aufgefasst. Neben den individuellen Faktoren wie beispielsweise die Erfahrung oder Einflussnahmemöglichkeit finden die physikalischen Eigenschaften des Raumklimas als Parameter für die Modelle Anwendung. Hierbei werden zum Einen raumklimatische Messgrößen herangezogen, zum Anderen aus den Messgrößen berechnete Klimasummenmaße betrachtet. Mit ihnen können die Phänomene der Wahrnehmung gut beschrieben werden, durch welche aufgrund einer spezifischen Komfortbewertung der Raumklimaaspekte eine Gesamtbewertung des Komfortzustandes abgeleitet wird. In dieser angenommenen kausalen Kette des raumklimatischen Komforts nehmen die Wahrnehmungen der Umgebungsparameter die Rolle zwischengeschalteter Variablen ein. Sie resultieren aus dem Verständnis der Sinnesorgane als Schnittstelle zwischen Umgebung und Person. Allerdings erhöhen sie die Komplexität der Modelle und damit auch die zu schätzenden Modellparameter erheblich, so dass vor dem Hintergrund einer beschränkten Stichprobe eine Auslassung dieser Zwischenschritte betrachtet wird.

Demzufolge werden in dieser Arbeit verschiedene Architekturen für mögliche Strukturgleichungsmodelle verglichen, die sich zum Einen in der Verwendung von Messgrößen oder Klimasummengrößen und zum Anderen in der Berücksichtigung intervenierender Variablen der Wahrnehmung unterscheiden. Ziel-

größe jedes dieser Modelle ist der Gesamtkomfort, welcher anhand der spezifischen raumklimatischen Komfortaspekte erklärt werden soll. Es werden also folgende Modellarchitekturen untersucht:

Messgrößen		→ Komfortaspekte	→ Gesamtkomfort
Messgrößen	→ Wahrnehmung	→ Komfortaspekte	→ Gesamtkomfort
Indizes		→ Komfortaspekte	→ Gesamtkomfort
Indizes	→ Wahrnehmung	→ Komfortaspekte	→ Gesamtkomfort

Eine für die Entwicklung solcher Modelle taugliche Untersuchungsreihe mit einer großen Stichprobe und einem kontrollierten Raumklima wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in der Flight Test Facility durchgeführt. Im Rahmen des EU-Projekts Ideal Cabin Environment (ICE) wurden mehrere hundert Probanden bei verschiedenen raumklimatischen Bedingungen in einer simulierten Flugzeugumgebung befragt. In dieser Studie wurden die Raumklimaparameter Luftdruck, -feuchte und -temperatur sowie die Hintergrundlautstärke an Bord variiert. Der hierbei gewonnene Datensatz wird bereinigt, und schließlich geteilt, um eine Validierung der abgeleiteten Modelle zu ermöglichen.

Um eine sinnvolle und interpretierbare Auswahl von Komfortaspekten und ihrer beschreibenden Variablen treffen zu können, wird eine Hauptkomponentenanalyse mit relevanten Fragebogenitems durchgeführt. Hierbei werden Faktoren für das thermische und akustische Raumklima sowie die empfundene Luftqualität identifiziert. Keine sinnvolle Assoziation wird für die Items bezüglich Trockenheit und Vibrationen gefunden.

Für alle vier Modellarchitekturen können valide Parameterschätzungen vorgenommen werden. Die aufgestellten Zusammenhänge in den Modellen sind plausibel und können bestätigt werden. Das Modell mit der geringsten Komplexität (Modell *ICv*: Indizes → Komfortaspekte → Gesamtkomfort) stellt sich als den übrigen Modellen überlegen heraus. Zu großen Teilen wird dies der geringeren Anzahl an Variablen im Modell und damit einer robusteren Schätzung dieser zuzuschreiben sein. Zum Einen wird die Anzahl der Modellparameter durch die Auslassung der intervenierenden Variablen der Wahrnehmung reduziert. Zum Anderen fassen auch Indizes die einzelnen Messgrößen als Summengröße zusammen und verringern damit die durch eine Schätzung verbundene Unsicherheit. Darüber hinaus gilt für raumklimaspezifische Indizes die Prämisse, dass diese die Bewertung des Raumklimas für bestimmte Aspekte repräsentieren, womit eine günstigere Anpassung in einem solchen Modell zu erwarten ist.

Abschließend wird an dem diese Vorteile beinhaltenden Modell *ICv* eine Parameterstudie durchgeführt. Die bekannten Zusammenhänge von wärmerem und kühlerem Raumklima und erhöhtem Diskomfort, unkomfortableren lauten Umgebungen und schlechter empfundener Luftqualität bei höherer Enthalpie werden durch das Modell abgebildet. Zudem werden die Interrelationen zwischen der thermischen Bewertung und der akustischen Umgebung bestätigt. Auch die empfundene Luftqualität zeigt einen Trend eines höheren Diskomforts in lauten sowie thermisch unkomfortableren Umgebungen, wobei keine Systematik hinsichtlich der Expositionsdauer erkenntlich ist. Während bei der akustischen Bewertung die zeitliche Komponente keinen Einfluss zu haben scheint, wird die thermische Umgebung bei gleichzeitig höherem Lautstärkepegel mit der Zeit etwas schlechter bewertet. Der Gesamtdiskomfort wird tendenziell bei kühleren oder wärmeren Umgebungen größer berechnet. Gleiches gilt für lautere Umgebungen, wobei sich bei diesen die Dauer der Exposition verstärkend auf den Diskomfort auswirkt.

Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz für die Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas kann abschließend als brauchbar bewertet werden. Die entwickelten Modelle sind valide sowie akzeptabel und führen zu qualitativ plausiblen Ergebnissen. Damit kann nicht nur die Modell-Daten Konsistenz positiv beurteilt werden, sondern im Vergleich mit anderen Untersuchungen auch eine glaubwürdige Abbildung der Realität, so dass sie in die Optimierung des Raumklimas in Passagierflugzeugkabinen einfließen können.

1 Motivation und Ziel der Arbeit

Ein zentrales Anliegen von Menschen in Innenräumen ist es, ein nicht nur lebensfreundliches, sondern auch angenehmes Klima zu erleben. Dies gilt ebenfalls für Räume, in welchen der Mensch reist, wie beispielsweise Flugzeugkabinen. Außerhalb eines Flugzeugs herrschen lebensfeindliche Bedingungen, wie extreme Kälte und niederer Luftdruck, während der Fluggast gemeinhin eine komfortable Reise erwartet.

Nach einer Entwicklung der kommerziellen Luftfahrt vom Luxusgut zur Massenware zeichnen sich seit Mitte der 90er Jahre zwei verschiedene Marktsegmente ab: „Low cost" und „Premium" (siehe Abbildung 1.1). Während es für die Kunden ersterer Fluglinien primär wichtig ist kostengünstig von A nach B zu reisen, legen Passagiere letzterer Airlines zudem Wert auf ein komfortables Reisen. Neu entwickelte Flugzeuge müssen dieser Entwicklung Rechnung tragen und können bei einem optimierten Entwurf beide Segmente bedienen.

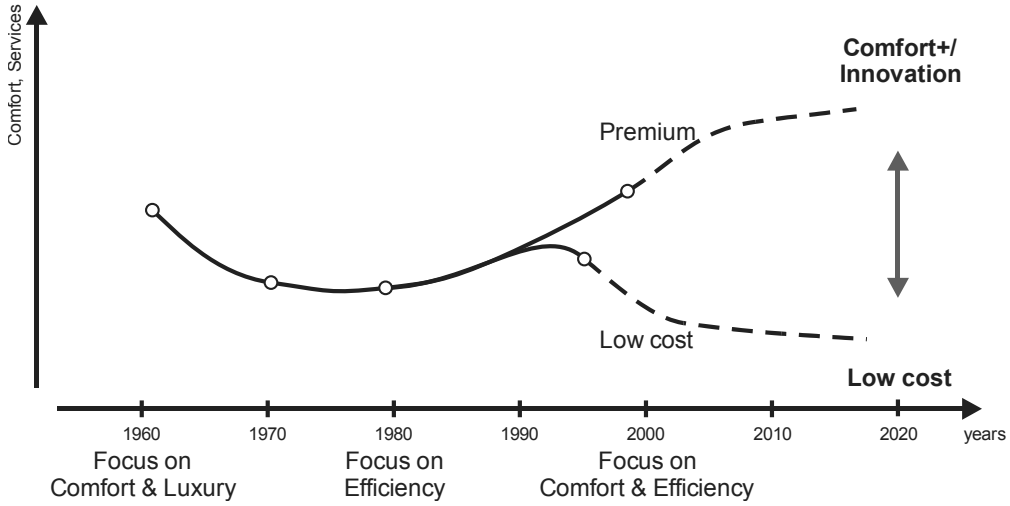


Abbildung 1.1: Entstehung der zwei Marktsegmente „Low Cost" und „Premium" in der kommerziellen Luftfahrt nach Rueckwald (2006). Nach einem anfänglichen Luxusgut entwickelte sich das Fliegen bei einem Fokus auf Effizienz zur Massenware aus welcher seit den 90er Jahren die beiden genannten Segmente hervorgehen.

Komfort und Innovation sind somit entscheidende Merkmale einer Fluglinie im Wettbewerb um Passagiere und Kundenbindung. Um dieses Unterscheidungsmerkmal berücksichtigen zu können bedarf es neben fundierten Kenntnissen über das menschliche Komfortempfinden Bewertungswerkzeugen, welche in der Planung neuer und innovativer Flugzeugkabinen eingesetzt werden kön-

nen. Mit Hilfe dieser sollen ökonomisch sinnvolle Lösungen gefunden werden können, welche nicht nach kurzer Zeit aufgrund von Nutzungsschwierigkeiten wieder revidiert werden müssen. Hierfür müssen objektive, reproduzierbare und messbare Größen gefunden, entwickelt oder übertragen werden, um diese schließlich in ein ganzheitliches Modell zu integrieren, welches zur Bewertung möglicher raumklimatischer Szenarien im Planungsprozess oder auch bei der Begutachtung vorliegender Bedingungen herangezogen werden kann.

Mit Komfortindizes werden Beurteilungsgrößen des Raumklimas diskutiert, welche die wesentlichen Einflussparameter verständlich zusammenfassen und für eine Diskussion im Rahmen des Planungsprozesses, an welchem hauptsächlich „raumklimatische Laien" beteiligt sind, geeignet sind. Solche Indizes wurden bislang hauptsächlich für einzelne raumklimatische Aspekte in Gebäuden entwickelt, größtenteils für den thermischen Komfort. In ihnen werden die maßgeblichen Einflussgrößen für den jeweiligen Komfortaspekt in einer Summengröße zusammengefasst, anhand derer eine Bewertung des Raumklimas einfach vollzogen werden kann. Eine Übertragung solcher Indizes auf andere Bereiche muss sorgfältig geprüft werden, eine methodische Vorgehensweise für integrale Indizes ist bislang erst in Ansätzen diskutiert worden. Unklar ist, ob in ganzheitlichen Summengrößen die jeweilig maßgeblichen Einflussgrößen erneut zusammengefasst werden, oder ob ein solcher Ansatz sich beispielsweise auf schon vorhandene Indizes stützen sollte.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit der Fokus auf die methodische Ableitung eines solchen Komfortindex gelegt. Basierend auf dem speziellen Fall des Raumklimas in Passagierflugzeugen wird das Verfahren der Strukturgleichungsmodellierung, welches hauptsächlich in der Soziologie und Wirtschaftswissenschaft verwendet wird, auf die Modellierung eines Komfortindex für das Raumklima übertragen. Hierfür werden Daten aus umfangreichen Probandenstudien in einer simulierten und kontrollierten Umgebung einer Flugzeugkabine aufbereitet und zur Modellierung herangezogen. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die unterschiedliche Ausprägung der Daten – einerseits bauphysikalische Messwerte, andererseits ordinal skalierte Fragebogenantworten – gelegt, um eine konsistente Ableitung der Strukturgleichungsmodelle zu garantieren. Aus verschiedenen alternativen Modellarchitekturen soll schließlich ein valides und plausibles Verfahren gewählt werden, welches die Formulierung eines holistischen Komfortindex für das Raumklima ermöglicht, der für die Optimierung des Raumklimas geeignet ist.

2 Methodische Vorgehensweise

Um ein geeignetes Verfahren für die Modellierung eines Komfortindex für das Raumklima auszuwählen wird bei einer Fokussierung auf das Raumklima zunächst der Begriff Komfort analysiert. Aufgrund der aus dieser Analyse resultierenden Auffassung von Komfort als subjektives operationalisierbares Konstrukt wird in Anlehnung an die Modellierung von Zusammenhängen in der Soziologie und Verhaltensforschung die Methode der Strukturgleichungsmodellierung für die Entwicklung eines Komfortindex gewählt. Im Folgenden werden kurz einige für die gewählte methodische Vorgehensweise fundamentale Formulierungen erläutert.

Unter theoretischen Konstrukten werden Begriffe verstanden, "die sich nicht direkt auf beobachtbare Sachverhalte zurückführen lassen, die jedoch geeignet sind, Beobachtungen aufeinander zu beziehen" (Wienold (1994)). Konstrukte sind also gedanklicher (auch: latenter) Natur und werden aus anderen Sachverhalten erschlossen. Diese Erschließung wird auch als Operationalisierung bezeichnet, welche als „Präzisierung, Standardisierung von Begriffen (…) durch Angabe der messbaren Ereignisse, die das Vorliegen dieses Sachverhaltes anzeigen (Indikatoren)" definiert werden kann (Rönsch (1994)). Da gerade in der Soziologie vielen Modellen Konstrukte zugrunde liegen, wurde hier das Verfahren der Strukturgleichungsmodellierung entwickelt, welches latente Variablen miteinander verknüpfen kann, die durch messbare Indikatoren (auch: manifeste Variablen) sichtbar werden. Diese Form der Modellierung ist eine Verallgemeinerung der geläufigen Regression, bei welcher lediglich zwei (oder mehrere) manifeste Variablen in Beziehung gesetzt werden (Bollen (1989)).

Ein gängiges Beispiel für eine latente Variable ist die Intelligenz. Sie ist nicht direkt beobachtbar, kann aber über manifeste Indikatoren, wie z.B. den Wert des Intelligenzquotienten (IQ), gemessen werden. In der Notation von Pfaddiagrammen (siehe Kapitel 3.5.1) würde sich diese Beziehung wie in Abbildung 2.1 darstellen lassen. Hierbei deutet der Pfeil die Richtung der kausalen Beziehung an: ein hoher IQ resultiert aus einer hohen Intelligenz – nicht umgekehrt (intelligent sei jemand, der einen hohen IQ hat).

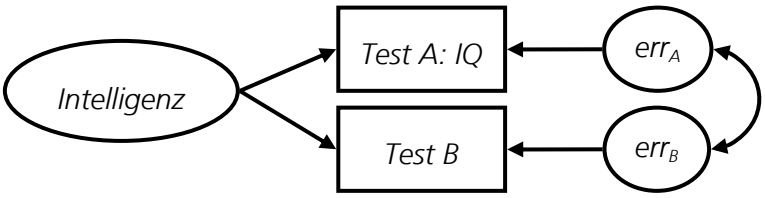


Abbildung 2.1: Beispielhaftes Modell für das Konstrukt *Intelligenz*, operationalisiert durch zwei Tests als Indikatoren, welche kovariierende Fehler tragen. Latente Variablen sind durch Ellipsen, manifeste Variablen durch Rechtecke gekennzeichnet. Die Pfeile geben die kausalen Zusammenhänge und ihre Richtung an.

Bei jeder Messung und in jedem Modell sind Fehler impliziert. Strukturgleichungsmodelle berücksichtigen dies anhand von Fehlervariablen, welche unter Umständen auch miteinander kovariieren können. Im hier genannten Beispiel der Intelligenz könnte auch ein zweiter Test zur Operationalisierung des Konstrukts herangezogen werden. In dessen Ergebnis fließt ebenfalls ein Fehler ein. Dieser könnte z.B. durch die unterschiedliche Motivation der Probanden begründet sein, was wahrscheinlich auch auf den IQ-Test zutreffen würde, weshalb die Einführung einer Kovarianz zwischen diesen Fehlern sinnvoll wäre.

In Konkurrenz zu Strukturgleichungsmodellen stehen beispielsweise Verfahren der Fuzzy-Statistik, unter anderem auch künstliche neuronale Netze, welche die Varianz subjektiver Beurteilungen, durch ihre implementierte Unschärfe berücksichtigen können. Hier wird nicht scharf zwischen zwei möglichen Gruppen, z.B. Personen die Komfort oder die Diskomfort empfinden, unterschieden, sondern die Gruppenzugehörigkeit kann anhand eines Zugehörigkeitsgrades formuliert werden. Dieser kann von vielen Aspekten abhängen, im Falle des raumklimatischen Komforts wäre es beispielsweise denkbar, dass eine Person thermisch komfortabel fühlt, es jedoch viel zu laut ist. Damit empfindet sie sowohl Komfort, als auch Diskomfort zu einem gewissen Grad. Allerdings wird in solchen Modellen nicht die Natur des Komforts als Konstrukt in Form einer latenten Variablen direkt, sondern über eine geeignet zu wählende Modellarchitektur beachtet. In dieser sind die Bewertungen nicht Resultat einer nicht messbaren, latenten Größe, sondern direkte Zielgrößen des Modells. Für die Wahl geeigneter Modellarchitekturen ist jedoch der aktuelle Stand des Wissens bezüglich holistischer Komfortmodelle nicht ausreichend und damit fehleranfällig. Daher wird hier der Ansatz der Strukturgleichungsmodellierung verfolgt.

Da in dieser Arbeit die raumklimatischen Aspekte des Komforts betrachtet werden, bereiten Kapitel 3.2 und 3.3 den Stand des Wissens bezüglich der Wahrnehmung und der Bewertung des Raumklimas auf. Die anschließenden Kapitel sind einigen Grundlagen für die statistische Auswertung von Befragungen und der Strukturgleichungsmodellierung sowie ihrer Notation gewidmet. Hier wird insbesondere auf die Behandlung subjektiver Antworten in Form von Fragebo-

gendaten eingegangen, welche als Indikatoren in der verwendeten Strukturgleichungsmodellierung ein entscheidender Bestandteil dieser Arbeit sind.

Basierend auf dem Stand des Wissens werden Kapitel 5.1 verschiedene Modellarchitekturen als Pfaddiagramme abgeleitet und die zu prüfenden Modellhypothesen aufgestellt. Um die für die Parameterschätzungen der Modelle benötigten Daten zu gewinnen, wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik eine geeignete realitätsnahe Versuchseinrichtung – die Flight Test Facility (FTF) – in Betrieb genommen. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes „Ideal Cabin Environment" (ICE) fand die für diese Arbeit notwendige umfangreiche Probandenstudie statt. Um interaktive Effekte des Flugzeugkabinenklimas analysieren zu können wurde dort ein entsprechendes Versuchsdesign vorgenommen, dessen für diese Arbeit wesentliche Aspekte in Kapitel 4 beschrieben sind. Hierzu gehört zum Einen eine an die Erfordernisse einer Probandenstudie angepasste Konzeption des Fluglabors, insbesondere der möglichst unauffälligen Erfassung der raumklimatischen Messwerte, und zum Anderen die Planung der Studiendurchführung. Dies beinhaltet neben der Akquise geeigneter Probanden, deren Tätigkeit, die Erstellung von Fragebögen und den zeitlichen Ablauf, sowie die Einstellung der zu kontrollierenden raumklimatischen Randbedingungen.

Die anschließende Analyse der gewonnen Fragebogendaten und deren Aufbereitung für die Modellierung sind in Kapitel 5.2 erläutert. Nach einer Beschreibung der verwendeten Fragebogenitems und ihrer zugeordneten numerischen Werte (Kodierung) werden diese entsprechend der Erfordernisse für die Modellierung umkodiert und bereinigt. Der anschließenden beschreibenden Statistik folgt eine Analyse der Antworten auf zeitliche Konstanz: nachdem das Versuchsdesign eine wiederholte Befragung der Probanden vorsah, wird untersucht, ob sich die Bewertungen des konstanten Raumklimas zu verschiedenen Zeitpunkten unterscheiden. Aus den umkodierten Items werden abschließend anhand einer Hauptkomponentenanalyse relevante Variablen für die Modellierung ausgewählt. An die Untersuchung der Fragebogendaten schließt sich in Kapitel 5.3 die Analyse der Messwerte an. Zunächst werden die Messdaten bereinigt und Versuchsphasen ausgeschlossen, in welchen die zu kontrollierenden Raumklimabedingungen nicht erreicht wurden. Die verbleibenden tatsächlich eingestellten Werte der Raumklimaparameter werden berechnet sowie ebenfalls die einiger gemessener Hintergrundparameter, wie beispielsweise die Kohlendioxidkonzentration. Für die Modellierung werden schließlich geeignete Eingangsparameter gewählt und die Messgrößen in ausgesuchte Summengrößen umgerechnet. In Kapitel 0 werden letztlich die zuvor abgeleiteten Modelle konstruiert und die zugehörige Parameterschätzung vorgenommen. Einen schematischen Ablauf der verwendeten Datenerhebung und Modellfindung zeigt

Abbildung 2.2. Das Vorgehen wird in Anhang A anhand eines fiktiven Beispiels erläutert.

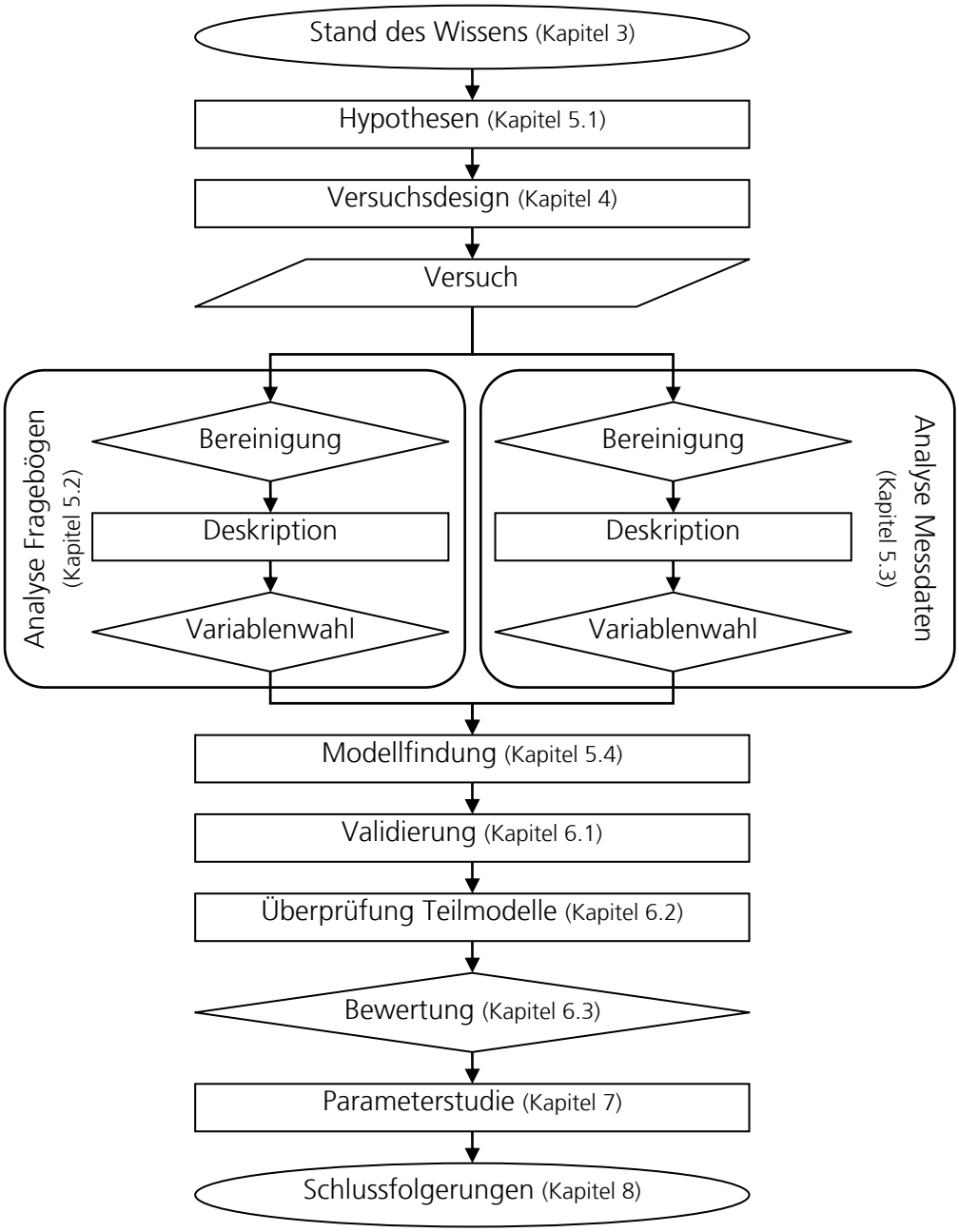


Abbildung 2.2: Schematischer Ablauf des Vorgehens dieser Arbeit. Ausgehend von Hypothesen werden Daten erhoben mit welchen schließlich die Modellierung eines Komfortindex erfolgt. Die gefundenen Modelle werden validiert, überprüft und bewertet. Abschließend wird eine Parameterstudie durchgeführt.

Die Validität der gefundenen Strukturgleichungsmodelle wird in Kapitel 6 diskutiert. Anhand von Teilmodellen werden einige der eingangs aufgestellten Modellhypothesen überprüft. Die verbleibenden Annahmen werden im Rah-

men einer vergleichenden Bewertung durch Anpassungsmaße der Modelle an die zugrundeliegenden Daten diskutiert. Basierend darauf erfolgt in Kapitel 7 eine Parameterstudie für das als überlegen bewertete Modell. Anhand dieser werden die Plausibilität und Qualität des Modellansatzes besprochen.

In der Folge werden in Kapitel 8 Schlussfolgerungen aus der durchgeführten Modellierung eines Komfortindex gezogen und ein Ausblick auf Anwendungsmöglichkeiten und offene Fragen gegeben.

3 Grundlagen

Dieses Kapitel gliedert sich in fünf Unterkapitel und eine abschließende Diskussion. Zunächst werden ein allgemeines Verständnis des Raumklimas aus bauphysikalischer Sicht und seine spezielle Ausprägung in der Flugzeugkabine abgeleitet. Anschließend wird ausführlich der Begriff des Komforts analysiert, welcher grundlegend für die Modellierung ist, jedoch nur selten definiert wird. Nachdem die meisten Modelle – so auch in dieser Arbeit – annehmen, dass das Raumklima wahrgenommen und anschließend bewertet wird, geben die folgenden beiden Unterkapitel einen Überblick über den Stand des Wissens in den hier relevanten Bereichen des thermischen, vibro-akustischen und olfaktorischen Raumklimas. Die in diesen Abschnitten beschriebenen Erkenntnisse – und auch die in dieser Arbeit durchgeführte Modellierung – beruhen auf Befragungen von und Beobachtungen an Probanden. Da sich die Statistik der dabei oft auftretenden ordinal skalierten Daten von der Behandlung üblicher bauphysikalischer Messdaten unterscheidet und Studien in diesem Bereich häufig Mängel aufweisen werden folgend einige Grundlagen erläutert. Daran schließt sich ein Kapitel über die Grundlagen der hier verwendeten Strukturgleichungsmodellierung, möglicher Behandlung ordinaler Daten und der Bewertung ihrer Modelle an. Abschließend werden die beschriebenen Grundlagen kurz resümiert und wesentliche Punkte für die in Kapitel 5 durchgeführte Modellierung zusammengefasst.

3.1 Raumklima & Komfort

Um raumklimatische Bedingungen zu bewerten, wird häufig das Kriterium des Komforts herangezogen. Dieser Begriff wird regelmäßig in der wissenschaftlichen Literatur verwendet und ist häufig in Literaturdatenbanken verschlagwortet (siehe Tabelle 3.1). Eine Diskussion seiner Natur oder eine Definition – auch nur bezogen auf raumklimatische Aspekte – ist jedoch kaum zu identifizieren. Daher wird zunächst das Gebiet Raumklima – insbesondere am Beispiel der Flugzeugkabine – erörtert.

Tabelle 3.1: Analyse der Suche nach *comfort* im ISI Web of Knowledge (http://isiknowledge.com/, Stand 6.10.2008). Gelistet sind die zehn häufigsten assoziierten Fachgebiete (Mehrfachzuordnung möglich).

Fachgebiet	Anzahl	% von 65892
engineering	29597	44,9 %
instruments & instrumentation	28928	43,9 %
transportation	13938	21,2 %
chemistry	10048	15,2 %
general & internal medicine	8368	12,7 %
polymer science	6943	10,5 %
materials science	6608	10,0 %
behavioral sciences	6295	9,6 %
computer science	6231	9,5 %
psychology	5146	7,8 %
(137 weitere assoziierte Fachgebiete nicht dargestellt.)		

Da ein definiertes Verständnis von Komfort für eine adäquate Modellierung jedoch Grundvoraussetzung ist, sich aber gerade in den hier relevanten und stark assoziierten Fachbereichen Ingenieur- und Transportwesen nur wenige definierte Interpretationen finden, wird der Gebrauch dieses Begriffs anschließend im allgemeinen und im wissenschaftlichen Sprachgebrauch eingehend analysiert.

3.1.1 Der Begriff Raumklima

Das Raumklima wird durch die physikalischen Eigenschaften eines Raumes charakterisiert. Hierzu gehören:

- (Hygro-)Thermische Eigenschaften:
  Luft- und Oberflächentemperaturen, Luftbewegungen sowie Luftfeuchte.

- Eigenschaften hinsichtlich Luftqualität:
  organische und anorganische Bestandteile der Raumluft aus Gasen, Dämpfen und Partikeln.

- Vibro-akustische Eigenschaften:
  Schallfeld, d.h. Intensität und Zusammensetzung diverser Frequenzen, und Hörsamkeit. Diese können charakterisiert werden durch Art der Quelle, Lautstärke, Nachhallzeit, Vibrationen, etc.

- Visuelle Eigenschaften:
  Intensität und Zusammensetzung diverser Frequenzen. Diese können cha-

rakterisiert werden durch Art der Quelle, Beleuchtungsstärke, Leuchtdichte, Farbtemperatur, etc.

Die Komponenten des Raumklimas müssen bekannt sein, um dieses umfassend beurteilen und die Problematiken unterschiedlicher Raumtypen ergründen zu können. Ein Großraumbüro erfordert mit Sicherheit eine andere Herangehensweise als ein Zugabteil. Die Bewertung des Raumklimas wird in dieser Arbeit am Beispiel des Flugzeugkabinenklimas untersucht. Die Besonderheiten dieses speziellen Raumklimas werden im folgenden Abschnitt behandelt.

Kabinenklima in Passagierflugzeugen

Flüge in großen Höhen mit Passagierflugzeugen werden regelmäßig erst seit den 1970er Jahren durchgeführt. Übliche Flughöhen betragen etwa 12 km (ca. 39.000 ft) in denen extreme Klimaverhältnisse herrschen, unter welchen der menschliche Organismus nicht überleben würde. Je nach Breitengraden wird dementsprechend die obere Troposphäre oder die Tropopause durchflogen. Hier liegen die Außentemperaturen bei -50°C oder tiefer, die relative Feuchte beträgt meist zwischen 20 % und 100 % über Eis (Vaughan et al. (2005)). Der Luftdruck beträgt etwa 195 hPa, was ohne zusätzlichen Sauerstoff eine Sauerstoffsättigung des Blutes unter 10 % und umgehende Bewusstlosigkeit zur Folge hätte (Hinkelbein und Dambier (2007)). Dementsprechend wird der Luftdruck innerhalb der Kabine oberhalb von 753 hPa gehalten, was einer äquivalenten Kabinendruckhöhe von 8000 ft (2438 m) entspricht (Federal Aviation Administration (1996)). Bei einer reinen Außenluftzufuhr erhält man bei einer Aufwärmung der Luft auf 22°C in der Kabine relative Feuchten zwischen 0 % und 2 %. In den 80er Jahren wurde in Flugzeugen ein neues Lüftungssystem eingeführt, in welchem die eingeblasene Luft nicht ausschließlich aus der Außenluft besteht, sondern ein Teil der abgeführten Luft gefiltert und wieder verwendet wird (National Research Council (1986)). Durch die Quellen in der Flugzeugkabine (Personen, Getränke, etc.) werden bei einer Rezirkulationsrate von üblicherweise 40 % zwischen 5 % (First Class) und 15 % (Economy Class) relative Feuchte erreicht (Lee et al. (2000b)). Eine vergleichende Übersicht über die Klimabedingungen außen und in der Flugzeugkabine gibt Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Klimabedingungen auf üblichen Flughöhen von ca. 12 km und innerhalb von Flugzeugkabinen.

Parameter	Außenklima	Kabinenklima
(äquivalente) Höhe	12.000 m	(2438 m)
Luftdruck	195 hPa	753 hPa
Lufttemperatur	< -50°C	22°C
Luftfeuchte	20 % - 100 %	5 % - 15 %

Eine Zusammenfassung der Untersuchungen bezüglich der niedrigen Luftfeuchte und der Luftqualität in Flugzeugkabinen findet man auch bei Nagda und Hodgson (2001). Die Ergebnisse von wesentlichen Studien bezüglich der Luftqualität in Flugzeugkabinen wurden in Nagda et al. (2000) zusammengetragen. Sie kommen zu dem Schluss, dass

- die Beanspruchung durch Bakterien und Pilze generell niedriger ist als sie in Gebäuden berichtet wird,
- das Level der Kohlenmonoxidbelastung sich durchweg unterhalb der gegebenen Grenzwerte befindet,
- die Belastung durch Kohlendioxid sich über derjenigen in Gebäuden befindet, jedoch vergleichbar mit derjenigen in anderen Verkehrsmitteln ist; der Richtwert von 1000 ppm zur Bewertung der Akzeptanz in Gebäuden wird oft überschritten,
- die Daten bezüglich Aldehyden, die auch bei geringen Konzentrationen ein großes Irritationspotenzial haben, unzureichend sind; es zeichnet sich ein Trend zu sehr geringen Werten ab,
- die Werte der Staubbelastung sich wesentlich zwischen Raucher und Nicht-Raucherflügen unterscheiden, bei letzteren übliche Grenzwerte jedoch eingehalten werden,
- Ozonwerte generell hoch, aber meist noch im zulässigen Bereich liegen,
- die Konzentrationen von VOCs niedrig sind, vor allem wenn Ethanol aus der Statistik herausgenommen wird, SVOCs wurden in den vorliegenden Studien nicht untersucht.

Nagda und Rector (2003) kommen in ihrer Zusammenfassung von Messergebnissen organischer Verbindungen in der Kabinenluft abschließend zu der Aussage, dass die Kabinenluft bezüglich der organischen Verbindungen der Luft in Gebäuden ähnlich ist, mit den Ausnahmen einer höheren Konzentration an Ethanol und Aceton sowie an chlorierten Hydrokarbonaten und Treibstoffkontaminanten.

Die wesentliche vibro-akustische Größe in Flugzeugkabinen ist der Schalldruckpegel. Motoren- und Strömungsgeräusche sowie die Leichtbauweise führen zu hohen Pegeln in der Kabine. Je nach Flugzeugtyp und Ort in der Kabine betra-

gen die Schalldruckpegel während des Fluges zwischen 74 dB(A) und 78 dB(A) (Lindgren et al. (2000)).

Die Beleuchtung während des Fluges unterscheidet sich wenig von der eines üblichen Arbeitsplatzes. Je nach Airline kann die Farbgebung oder je nach Tageszeit das Lichtangebot etwas variieren. Die minimale Beleuchtungsstärke wird in SAE AIR 512 (2007) mit 21,53 lux empfohlen (Nachtszenario am Sitz).

3.1.2 Komfort im Sprachgebrauch

Im Allgemeinen leitet sich das Wort *Komfort* von dem lateinischen Verb *confortare* ab, was im Deutschen mit *stärken, lindern* übersetzt werden kann.

Da ein Großteil der wissenschaftlichen Literatur und auch der Diskussion sich der englischen Sprache bedient, muss bei der Betrachtung des Begriffes *Komfort* dessen weiter verbreiteten und gefassten Nutzung im Englischen Rechnung getragen werden. Demzufolge wird nach einer Betrachtung des deutschen Sprachgebrauchs auch die Bedeutung des Komplementärs im Englischen untersucht.

Komfort im deutschen Sprachgebrauch

Im Deutschen findet der Begriff *Komfort* in den Wortarten Substantiv, Adjektiv und Adverb Verwendung. Während für letztere die Gegenwörter unkomfortabel existieren, ist für den substantivistischen Gebrauch kein Antonym üblich (vergleiche Tabelle 3.3). Vereinzelt wird hierfür der Begriff *Diskomfort* verwendet, welcher auch in dieser Arbeit Anwendung findet.

Tabelle 3.3: Wortarten des Begriffs *Komfort* und zugehörige Gegenworte im deutschen Sprachgebrauch.

Wortart	Wort	Gegenwort
Substantiv	Komfort	- (hier: Diskomfort)
Verb	-	-
Adjektiv	komfortabel	unkomfortabel
Adverb	komfortabel	unkomfortabel

In gängigen Wörterbüchern (Brockhaus (2006), Duden (2008), Wahrig (2006), Bertelsmann Wörterbuch (2008), Meyers Lexikon (2008)) wird *Komfort* mit den verwandten Begriffen *Annehmlichkeit*, *Behaglichkeit* und/oder *Bequemlichkeit* beschrieben. Als Assoziationen werden hier *behagliche, bequeme, praktische Einrichtung* und/oder *luxuriöse Ausstattung* genannt. Im Duden (2008) wird

zudem auf die ursprüngliche Bedeutung *Trost, Stärkung; Zufriedenheit* hingewiesen.

In der Raumklimaforschung und den entsprechenden Branchen, z.B. der Heizungs- und Klimatechnik, wird häufig alternativ der Begriff *Behaglichkeit* verwendet. Hiermit wird allerdings gemeinhin lediglich die thermische Behaglichkeit sowie vereinzelt auch die Luftqualitätsbewertung adressiert, wobei Behaglichkeit den Zustand beschreibt, in welchem sich der Mensch am wohlsten fühlt (Recknagel et al. (2007)).

Bei einer Betrachtung der Kookkurrenzen (gemeinsames Auftreten zweier lexikalischer Einheiten, z.B. Wörter, in einer übergeordneten Einheit, z.B. Satz) für *Komfort* und *Behaglichkeit* wird die Breite und Unschärfe der Verwendungen dieser Begriffe erneut deutlich (siehe Abbildung 3.1 sowie Tabelle 3.4). Hauptsächlich werden sie verwendet, um Umgebungen oder Produkte zu beschreiben und werden meist in einem positiven Kontext verwendet.

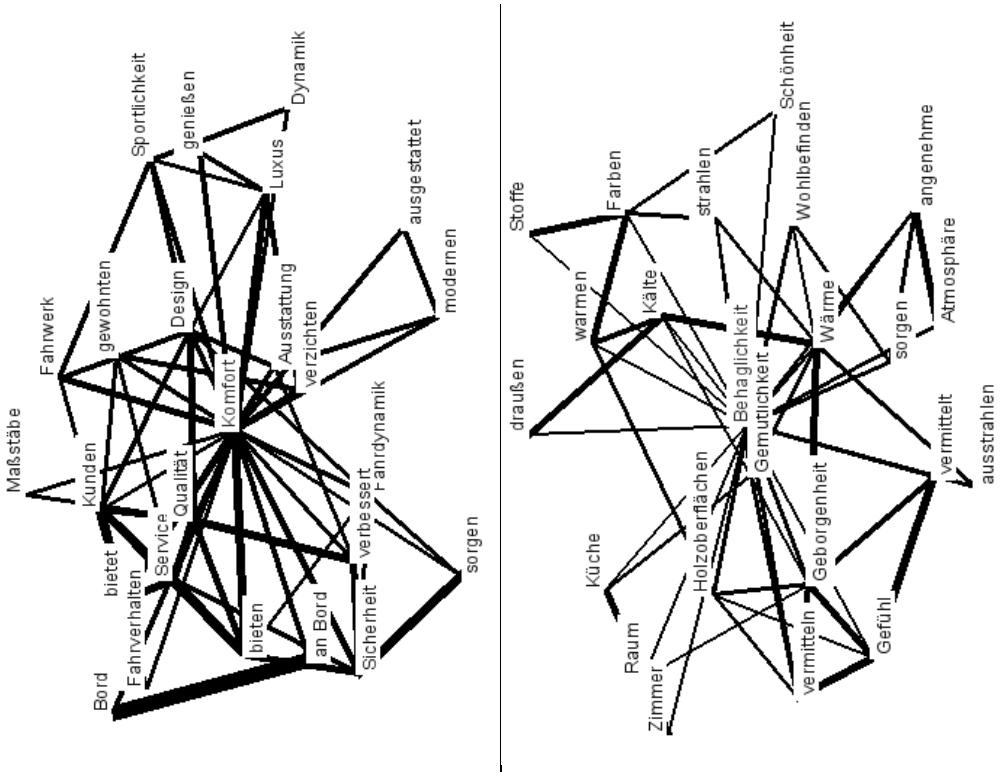


Abbildung 3.1: Graph der Kookkurrenzen für *Komfort* (links) und *Behaglichkeit* (rechts) nach http://wortschatz.uni-leipzig.de (Stand: 17.09.2008).

Tabelle 3.4: Die zwanzig häufigsten (Häufigkeitsangabe in Klammern) Substantive der signifikanten Kookkurrenzen für *Komfort* und *Behaglichkeit* nach http://**wortschatz**.uni-leipzig.de (Stand: 17.09.2008).

Rang	Komfort	Behaglichkeit
1	Sicherheit (361)	Hygge (41)
2	Fahrwerk (224)	Holzoberflächen (39)
3	Luxus (164)	Wärme (36)
4	Service (144)	Wohnlichkeit (34)
5	Design (102)	Atmosphäre (27)
6	Bord (83)	Gemütlichkeit (23)
7	Sportlichkeit (80)	Geborgenheit (22)
8	Fahrdynamik (69)	Wohlbefinden (21)
9	Ausstattung (57)	Stoffe (15)
10	Qualität (53)	Gefühl (15)
11	Kunden (51)	Schönheit (14)
12	Maßstäbe (48)	Kälte (13)
13	Fahrverhalten (46)	Villa (13)
14	Stadion (46)	Raum (13)
15	Dynamik (45)	Maß (12)
16	Auto (41)	Farben (12)
17	Klimaanlage (41)	Mischung (12)
18	Federung (40)	Küche (12)
19	Reisen (40)	Zimmer (11)
20	Platz (40)	Provinz (9)

Comfort/discomfort im englischen Sprachgebrauch

Im Gegensatz zum Deutschen gibt es im Englischen eine Verbform des Begriffs *Komfort* sowie die jeweiligen Gegenwörter (siehe Tabelle 3.5).

Tabelle 3.5: Wortarten des Begriffs *comfort* und zugehörige Gegenworte im englischen Sprachgebrauch.

Wortart	Wort	Gegenwort
Substantiv	comfort	discomfort
Verb	to comfort	to discomfort
Adjektiv	comfortable	uncomfortable
Adverb	comfortable	uncomfortable

Die Verwendung des Begriffs ist dementsprechend breiter, zumal es keine Synonyme vergleichbar mit der spezifischen Verbreitung des deutschen Begriffs *Behaglichkeit* gibt. Die Übersetzung der in den Wörterbüchern

(1) Roget's II Thesaurus (1995)
(2) American Heritage Dictionary (2000)
(3) Merriam-Webster Online Dictionary (2005)
(4) Oxford wordpower dictionary (1994)
(5) Visual Thesaurus (2008)

aufgelisteten Bedeutungen der Begriffe *comfort* und *discomfort* lässt die Bandbreite der Bedeutungen erkennen (Quellen in Klammern):

comfort

- Zustand/Gefühl der angenehmen Behaglichkeit, Wohlbefinden und Zufriedenheit (2, 3, 4)
- Zustand der Entspannung ohne Gefühl von Schmerz (4, 5)
- Kapazität physische Behaglichkeit und Wohlbefinden zu erhöhen/geben (1, 2)
- Etwas, was Komfort gibt oder bringt (2, 3, 4)
- Hilfe, Unterstützung, Beistand, Stärkung (2, 3, 4)
- Trost in Zeiten des Kummers, Schmerzes, Angst oder Sorge; Erleichterung in Bedrängnis (1, 2, 3, 4, 5)
- Gefühl der Erleichterung und Ermunterung / der Freiheit von Sorgen und Enttäuschungen (3, 5)
- Zufriedenstellende oder erfreuliche Erfahrung (3)
- Stetiger Reichtum oder finanzielle Sicherheit/Freiheit (1, 5)

discomfort

- Etwas, das den Komfort stört, das Beschwerden, Ärger oder Mangel an Behaglichkeit verursacht, eine Belästigung (1, 2, 3, 4)
- Zustand/Qualität der Unbequemlichkeit (1)
- Reizung, Schmerzhaftigkeit oder unkomfortables Gefühl eines Körperteils (4, 5)
- mentales oder körperliches Unbehagen, Elend, Verlegenheit (2, 3, 4)
- Zustand der Anspannung und Gefühl des Schmerzes (5)
- veraltet: Bedrängnis, Kummer (3)

Bei einer Betrachtung der Kookkurenzen für *comfort* und *discomfort* wird auch hier die Breite und Unschärfe der Verwendungen dieser Begriffe deutlich (siehe Abbildung 3.2 sowie Tabelle 3.6). Während mit *comfort* assoziierte Substantive größtenteils physikalische Bedingungen und Situationen beschreiben, bezieht sich der Begriff *discomfort* mehr auf körperlichen Schmerz und physiologisches Unbehagen.

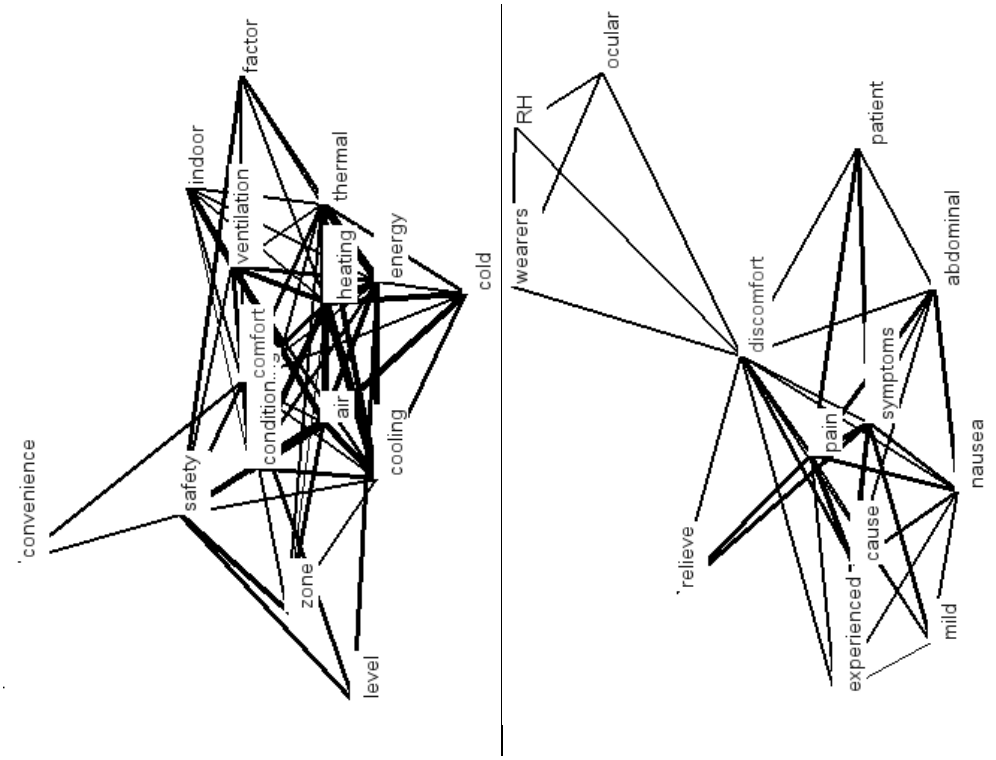


Abbildung 3.2: Graph der Kookkurrenzen (nur Substantive) für *comfort* (links) und *discomfort* (rechts) nach http://corpora.informatik.uni-leipzig.de (Stand: 17.09.2008).

Tabelle 3.6: Die zwanzig häufigsten (Häufigkeitsangabe in Klammern) Substantive der signifikanten Kookkurrenzen für *comfort* und *discomfort* nach http://corpora.informatik.uni-leipzig.de (Stand: 17.09.2008).

Rang	comfort	discomfort
1	level (32)	pain (35)
2	safety (26)	cause (21)
3	convenience (26)	patient (13)
4	fact (24)	wearers (12)
5	heating (23)	symptoms (12)
6	energy (18)	nausea (9)
7	air (17)	RH (7)
8	zone (16)	prostate (6)
9	indoor (14)	lens (6)
10	cooling (13)	women (5)
11	conditioning (13)	stress (5)
12	ventilation (11)	patients (5)
13	factor (11)	fever (5)
14	investors (9)	eye (5)
15	space (8)	examination (5)
16	occupant (8)	fascitis (4)
17	room (7)	experience (4)
18	ride (7)	
19	heat (7)	
20	family (7)	

3.1.3 Komfort in der Wissenschaft

In der wissenschaftlichen Literatur sind nur wenige Diskussionen und Definitionen des Begriffs Komfort zu finden. Verwendung findet er vor allem in der Ergonomie, z.B. der Sitz-, Fahrzeug- oder Werkzeugergonomie, in Untersuchungen zum Raumklima, welches auch als Untergruppe der Ergonomie betrachtet werden kann, und der Krankenpflege. Die thematische Breite der jeweiligen Nutzung und/oder Definition ist in den genannten Bereichen jedoch sehr unterschiedlich: von einer globalen Betrachtung in der Krankenpflege wird in den folgenden Abschnitten der Begriff Komfort über die Ergonomie auf das Spezialgebiet des Raumklimas reduziert.

Komfort im Kontext der Krankenpflege

Insbesondere im anglo-amerikanischen Raum wird der Begriff *comfort* im Kontext der Krankenpflege benutzt: Komfort ist Ziel und Ergebnis guter Krankenpflege. Die umfassendste Analyse des Konstrukts *Komfort* wurde bei Kolcaba und Kolcaba (1991) gefunden. Sie identifizieren sechs verschiedene Bedeutungen des Begriffs *comfort* im gewöhnlichen Sprachgebrauch:

1.1. Ein Grund für die Erleichterung von Diskomfort.
Beispiel: „Mary fühlte sich komfortabel, nachdem der Splitter entfernt war."
1.2. Ein Grund für den Komfortzustand.
Beispiel: „Wenn ich in meinem Zimmer bin fühle ich mich komfortabel."
2. Der Zustand von Behaglichkeit und friedlicher Zufriedenheit.
Beispiel: „Nachdem ich ein Bad genommen habe fühle ich mich komfortabel."
3. Die Linderung von Schmerz, geistiger Pein oder anderem Diskomfort.
Beispiel: „Ich fühle mich jetzt komfortabel, da mir nicht mehr kalt ist."
4. Was auch immer das Leben behaglich und angenehm macht.
Beispiel: „Ich habe genug Geld, um komfortabel zu leben."
5. Stärkung, Förderung, Unterstützung.
aus Oxford English Dictionary – überholt im gewöhnlichen Sprachgebrauch
6. Physische Erholung oder Entlastung
aus Oxford English Dictionary – überholt im gewöhnlichen Sprachgebrauch

Aus diesen leiten sie drei für die Krankenpflege relevante Bedeutungen ab:

1. Zustands-Bedeutung: ein beständiger Zustand von Behaglichkeit und friedlicher Zufriedenheit
2. Linderungs-Bedeutung: Linderung von Diskomfort
3. Erneuerungs-Bedeutung: Stärkung und Belebung

Kolcaba (1991) entwickelt diese weiter zu einer Klassifikation Komfort in zwei Dimensionen: den technischen Bedeutungen und dem Kontext.

Dimension A: Technische Bedeutungen

- Behaglichkeit: ein Zustand der Ruhe oder Zufriedenheit
- Linderung: die Erfahrung eines Patienten, für welchen einem spezifischen Bedarf abgeholfen wurde
- Erhabenheit: der Zustand, in welchem man über Probleme und Schmerz hinauswächst

Dimension B: Kontexte

- Physisch: sich beziehend auf körperliche Empfindungen
- Sozial: sich beziehend auf zwischenmenschliche, familiäre und gesellschaftliche Beziehungen
- Psychospirituell: sich beziehend auf das innere Bewusstsein des Selbst, einschließlich Achtung, Auffassung, Sexualität und Sinn in seinem Leben; dies kann auch eine Beziehung zu einer höheren Ordnung oder Wesen umfassen
- Umgebend: sich beziehend auf den externen Hintergrund des menschlichen Erlebens; umfasst Licht, Lärm, Ambiente, Farbe, Temperatur und natürliche im Vergleich zu synthetischen Elementen

Diese Elemente der beiden Dimensionen sind unabhängig voneinander und können in Matrixform kombiniert werden.

		Kontext			
		Physisch	Sozial	Psycho-spirituell	Umgebend
Bedeutung	Behaglichkeit				
	Linderung				
	Erhabenheit				

Abbildung 3.3: Matrix der Komfortdimensionen *Bedeutung* und *Kontext* nach Kolcaba (1991). Im Rahmen der Ableitung einer für diese Arbeit relevanten Formulierung für *Komfort* wird diese Matrix zur Verortung der jeweiligen Definition durch graue Füllung der Felder verwendet.

Aufbauend auf dieser Klassifizierung kommt sie zu folgender theoretischer Definition:

Komfort ist der Zustand, in welchem den grundlegenden menschlichen Bedürfnissen nach Behaglichkeit, Linderung und Erhabenheit entsprochen wurde.

Im Sinne der Krankenpflege kann diese Klassifizierung genutzt werden, um die Bedürfnisse des Patienten einschätzen zu können und Maßnahmen abzuleiten. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung ist Komfort vielfältiger als viele einzelne Maße, da er die Interaktionen zwischen verschiedenen Komfortaspekten berücksichtigt (Kolcaba (1994)).

Komfort im Kontext der Ergonomie

Innerhalb ihrer Klassifizierung ordnet Kolcaba (1992) das Konzept von Komfort in der Ergonomie als Zustand der Behaglichkeit und Zufriedenheit ein, wobei dieser

- beständig ist,
- physisch und mental erlebt wird,
- eine positive Ausprägung hat und mehr ist, als die Abwesenheit von Diskomfort,
- keinen vorhergehenden Diskomfort impliziert, von welchem Linderung erlangt wurde,
- das Verhältnis von Person zur Umwelt widerspiegelt und mit Merkmalen der Umwelt korreliert werden kann,
- eine positive Beziehung zur Leistungsfähigkeit hat,
- routinemäßige Leistungen erleichtert und
- wichtig ist, um eine routinemäßige Leistung abzuschließen.

		Kontext			
		Physisch	Sozial	Psycho-spirituell	Umgebend
Bedeutung	Behaglichkeit				
	Linderung				
	Erhabenheit				

Abbildung 3.4: Matrix der Komfortdimensionen *Bedeutung* und *Kontext* nach Kolcaba (1991). Grau markiert sind die Felder, welche nach einer Einschränkung des Begriffs *Komfort* in der Ergonomie relevant sind.

Eine ähnliche Auffassung von Komfort findet man bei Slater (1985) im Zusammenhang mit der Bekleidungsergonomie:

Komfort ist ein angenehmer Zustand physiologischer, psychologischer und physikalischer Harmonie zwischen dem Menschen und seiner Umwelt.

Für Vink (2004) ist die Ergonomie eine Disziplin, welche die Adaption der Umwelt untersucht, mit welcher eine optimale menschliche Leistung erreicht werden kann. Ein Ergebnis ergonomischer Entwürfe ist Komfort oder eine Reduktion von Diskomfort. Sie identifizieren folgende Probleme bezüglich Komfort, welche in der Ergonomie bewältigt werden müssen:

- Die genaue Ursache für Diskomfort oder Komfort ist unbekannt. Es existiert kein Modell, welches diese Ursache beschreibt.
- Jedes Individuum hat eine eigene Vorstellung von Komfort. Komfort ist ein subjektives Phänomen.
- Generelle Entwurfsprozesse bezüglich Komfort sowie entsprechende Ansätze sind unbekannt.

Kuijt-Evers et al. (2004) kommen in ihrer Analyse des Komfortbegriffs bezüglich der Werkzeugergonomie zu dem Schluss, dass trotz einer fehlenden Definition von Komfort in der Ergonomie über folgende Punkte Einigkeit herrscht:

- Komfort ist ein Konstrukt, welches von subjektiv definierter persönlicher Natur ist.
- Komfort ist durch Faktoren verschiedenster Art beeinflusst (physikalisch, physiologisch, psychologisch)
- Komfort ist eine Reaktion auf die Umwelt.

Vor diesem Hintergrund definieren Vink et al. (2004) Komfort als

Annehmlichkeit, welche der Endverbraucher während oder unmittelbar nach der Arbeit mit einem Produkt erfährt.

In ihrem Modell hat Komfort drei Ausprägungen:

- Komfort,
- kein Diskomfort,
- Diskomfort,

welche zum einen durch externe Reize und zum anderen durch die Erfahrung und den Zustand der jeweiligen Person determiniert sind (siehe Abbildung 3.5). Da nicht bekannt ist, wie die Elemente des Modells untereinander in Beziehung stehen und was ihr Anteil am Gesamteindruck ist, schlagen sie vor, dass im Produktentwurf sämtliche Sinnesmodalitäten in einer möglichst realitätsnahen Umgebung berücksichtigt werden sollten.

Branton (1969) hingegen kann sich nicht vorstellen, dass mit Hilfe der Ergonomie von Stühlen extreme Gefühle des Wohlbefindens erzielt werden können und erachtet lediglich ein Kontinuum von extremem Diskomfort bis hin zur Indifferenz für relevant. Abwesenheit von Diskomfort bedeutet hierbei jedoch nicht, dass ein positives Gefühl, wie beispielsweise Vergnügen, eintritt.

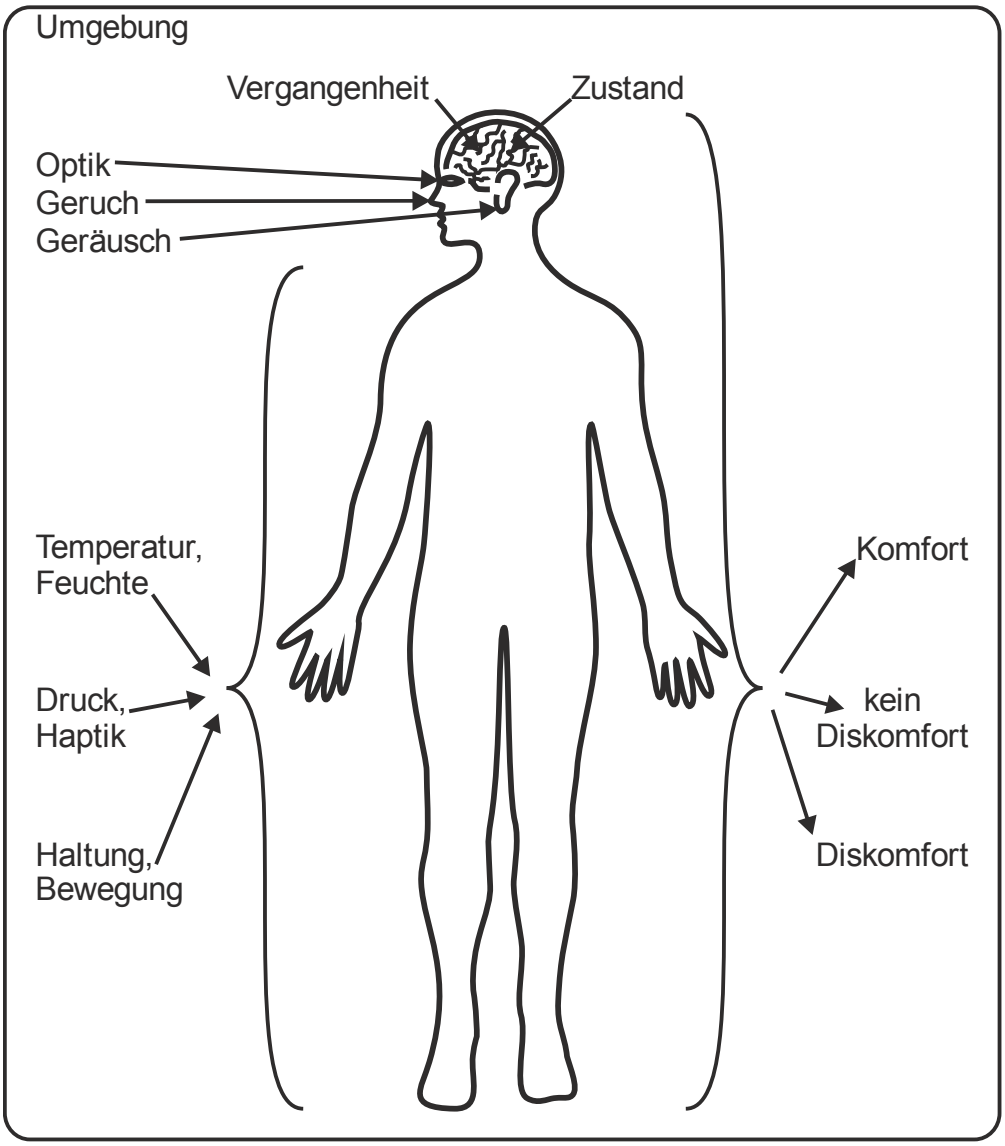


Abbildung 3.5: Komfortmodell nach Vink et al. (2004) mit den Ausprägungen Komfort, kein Diskomfort und Diskomfort.

Zhang et al. (1996) fassen Komfort als ein facettenreiches Konstrukt auf, welches ebenfalls nicht einfach das Gegenteil von Diskomfort ist, sondern ein separates Gebilde. Ihrer Meinung nach kann Diskomfort durch Verbesserung der physikalischen Randbedingungen verringert werden, was jedoch nicht notwendigerweise Komfort erzeugt. Dementsprechend führt auch die Abwesenheit von mit Komfort assoziierten Gefühlen, wie Entspannung oder Wohlbefinden, nicht unbedingt zu Diskomfort, wenn beispielsweise ungünstige biomechanische Umstände beim Sitzen nicht eintreten. Dieses hypothetische Modell von den zwei Dimensionen Komfort und Diskomfort ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

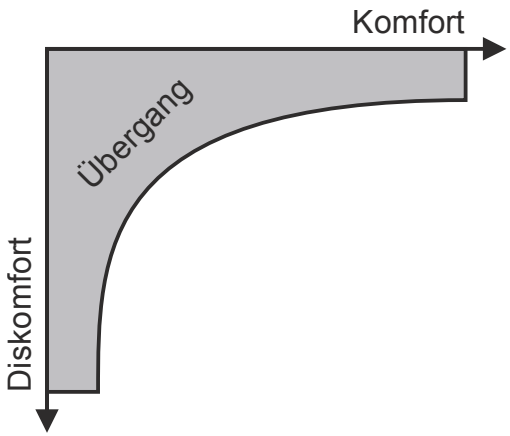


Abbildung 3.6: Hypothetisches Modell über Komfort und Diskomfort nach Zhang et al. (1996).

Nimmt in diesem Modell Diskomfort zu (z.B. im Laufe der Zeit), so führt dies zu einer Abnahme von Komfort. Widrige physikalische Umstände können hier die Aufmerksamkeit vom Komfortempfinden auf den Diskomfort lenken.

Goontilleke (1998) nimmt diesen Gedanken auf und stellt ihn in Zusammenhang mit der für den Entwurf von Stühlen maßgebenden Wahrnehmung: auch wenn es unsicher ist, ob Empfinden mit Komfort gleichgesetzt werden kann, negatives Empfinden interpretiert er als Diskomfort.

Im Hinblick auf den Passagier in der Fahrzeugergonomie definiert Richards (1980) den Komfort als ein Konstrukt:

Komfort ist ein subjektiver psychologischer Zustand, eine affektive Reaktion einer Person hinsichtlich der Umwelt oder einer Situation, wobei die Umwelt durch physikalische, eine Situation hingegen durch soziale Bedingungen charakterisiert ist.

Komfort ist dabei ein multidimensionales Merkmal, welches resultierend aus der gemeinsamen Präsenz physikalischer und sozialer Bedingungen das nachfolgende Verhalten beeinflusst. Diese Reaktionen sind nach seiner Theorie auf drei Klassen von Ausgangsvariablen zurückzuführen:

- Umweltfaktoren
- Situationsbedingte und soziale Faktoren
- persönliche Charakteristika (individuelle Unterschiede)

Insbesondere letztere Klasse stellt Pineau (1982) in seiner Befragung in verschiedenen Wohngegenden heraus. Für ihn ist Komfort kein universales Konzept, welches für jedes Individuum die gleiche Bedeutung hat, sondern vielmehr eingebettet in individuelle Maßstäbe. Komfort hat damit einen psychologischen Inhalt, über dessen Elemente teilweise weit verbreitete Einigkeit

herrscht (unter Anderem: Personalisierung, Handlungsfreiheit, Platz und Wärme).

In der Fahrzeugergonomie hingegen sind erstere Faktoren die bestimmenden, welche Richards (1980) in drei Gruppen unterteilt:

- dynamische Faktoren (z.B. Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, Erschütterungen, Geräusche, etc.)
- Umgebungsfaktoren (z.B. Luftdruck, Temperatur, Feuchte, Lüftung, Rauch, Gerüche, Luftqualität, Lärm)
- räumliche Faktoren (z.B. Arbeitsraum, Sitzbreite, Beinfreiheit, Sitzverstellung, Sitzform, etc.)

Diese fallen in der Matrix nach Kolcaba (1992) in folgende Rubriken:

		Kontext			
		Physisch	Sozial	Psycho-spirituell	Umgebend
Bedeutung	Behaglichkeit				
	Linderung				
	Erhabenheit				

Abbildung 3.7: Matrix der Komfortdimensionen *Bedeutung* und *Kontext* nach Kolcaba (1991). Grau markiert sind die Felder, welche nach einer Einschränkung des Begriffs *Komfort* in der Fahrzeugergonomie relevant sind.

Als moderierende Variablen identifiziert Richards (1980) die beiden letzten Klassen: persönliche Charakteristika (wie Motivation und Erfahrung) und soziale Faktoren. Zu letzteren gehören Interaktion mit Personen vor und während der Reise (Ticketschalter, Begleitpersonal, andere Passagiere), Bekanntschaft von Mitreisenden, Passagierdichte und Ähnliches. Der Einfluss solcher Faktoren auf das Wohlbefinden und die wahrgenommene Qualität von Flugreisen wurde detailliert auch von Konieczny (2001) untersucht. Er versteht Komfort als

„Stimulus für die allgemeine Zufriedenheit und das subjektive Wohlbefinden des Passagiers während einer Flugreise (…) Komfort stellt ein subjektiv wirkendes und empfundenes Konstrukt dar. Es bietet die Möglichkeit der Operationalisierung und Bewertung. Es ist das Ergebnis der Wahrnehmung der Passagiere und des Vergleichs mit ihren eigenen Vorstellungen und Erwartungen."

Er definiert hierbei Zufriedenheit als ein bipolares Kontinuum mit den Ankerpunkten Zufriedenheit und Unzufriedenheit. Zufriedenheit entspricht einer

emotionalen Reaktion auf das Ergebnis eines kognitiven Vergleichs der wahrgenommenen Leistung mit den Wertvorstellungen der Kunden. Wohlbefinden identifiziert er als „positive Seite einer Attitüdenskala gegenüber dem Selbst einer Person". Diese sehr weit gefasste Auffassung hat mit der Theorie von Richards gemein, dass Komfort als bipolare Größe betrachtet wird, welche kontinuierlich von „sehr komfortabel" bis „sehr unkomfortabel" variieren kann. Richards geht hierbei davon aus, dass ein Übergangsbereich existiert, welcher als „weder komfortabel, noch unkomfortabel, sondern neutral" bezeichnet werden kann. Diese Betrachtung von Komfort als intuitive eindimensionale kontinuierliche Skala steht in Konkurrenz zu anderen Formulierungen, welche Komfort und Diskomfort entweder als zwei unterschiedliche Zustände oder auch zwei separate Ausprägungen verschiedener Faktoren betrachten, siehe z.B. Zhang et al. (1996) und Vink et al. (2004).

Unabhängig davon, ob Komfort nun durch die Minimierung von Diskomfort oder aber das Herbeiführen von positiven Gefühlen erreicht wird, identifiziert Oborne (1978) das beiden Auffassungen gemeinsame Ziel der Schaffung eines optimalen Zustands. Er schlägt vor, dass in der Fahrzeugergonomie folgendes Konzept zutrifft:

Komfort wird erreicht durch die Schaffung einer Umgebung, welche in ihrer Gesamtheit nicht in das Bewusstsein des Passagiers eindringt. Hierbei sollte berücksichtigt werden, dass verschiedene Aspekte der Umgebung nicht unabhängig voneinander wirken.

Dieses Konzept entspricht dem Modell von Vink et al. (2004), sofern man die Ausprägung „kein Diskomfort" ebenfalls dem Komfort zuordnet. Allerdings sind hier Komfort und Diskomfort im Gegensatz zu Zhang et al. (1996) keine unterschiedlichen Dimensionen. Vielmehr ist es Aufgabe der Fahrzeugergonomie, ähnlich wie bei Branton (1969), keinen Diskomfort zu erzeugen. Letzterer sieht es als erstrebenswert an, optimale Bedingungen für den jeweiligen Gebrauch zu erlangen, so dass eine Beeinträchtigung der vorrangigen Aktivitäten vermieden wird.

Komfort im Kontext des Raumklimas

Das Raumklima kann als eine Untergruppe der Ergonomie aufgefasst werden. Während sich beispielsweise die Sitzergonomie hauptsächlich auf physische und die Arbeitsplatzergonomie auch auf soziale Kontexte bezieht, werden hier die Umgebungsbedingungen betrachtet. Somit lässt sich der in dieser Arbeit untersuchte Komfort in der Matrix nach Kolcaba (1992) in der oberen rechten Ecke lokalisieren:

Bedeutung	Kontext: Physisch	Sozial	Psycho-spirituell	Umgebend
Behaglichkeit				
Linderung				
Erhabenheit				

Abbildung 3.8: Matrix der Komfortdimensionen *Bedeutung* und *Kontext* nach Kolcaba (1991). Grau markiert ist das Feld, welches nach einer Einschränkung des Begriffs *Komfort* im Kontext des Raumklimas relevant ist.

Im Kontext des Raumklimas wurden bislang kaum Definitionen des Begriffs Komfort vorgenommen. Weit verbreitet ist dessen Verwendung im Zusammenhang mit thermischem Komfort / thermischer Behaglichkeit. Nach ASHRAE 55 (2004) ist thermischer Komfort der Gemütszustand, welcher Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausdrückt. Da thermischer Komfort mit einer solchen Definition nur schwer objektiv fassbar ist, hat Benzinger (1979) basierend auf seinen Untersuchungen der menschlichen Thermorezeptoren eine sensorische Formulierung gefunden. Nach ihm ist idealer thermischer Komfort objektiv definiert als die Abwesenheit von strafenden Impulsen von den Rezeptorfeldern der Kaltrezeptoren der Haut und des wärme-empfindlichen Organs im Hypothalamus.

In seiner Besprechung des Konstrukts Komfort kritisiert Cain (2002) die weit verbreitete intuitive Definition von Komfort, wie sie für den thermischen Komfort in ASHRAE 55 (2004) getroffen wird; vor allem, da Unterschiede zwischen Individuen oder anderen Faktoren nicht berücksichtigt werden. Obwohl grundsätzlich das Erreichen von Komfort das Ziel ist, versucht er eine Definition von Diskomfort zu formulieren, da bei letzterem Handlungsbedarf besteht. Für ihn ist sensorischer Diskomfort ein Zustand, welchen eine Person einer unerwünschten sensorischen Stimulation zuschreibt und welcher bei einer angemessenen Anpassung in der Größe oder Qualität der Stimulation rasch abklingt. Im Gegensatz zu den Formulierungen nach ASHRAE 55 (2004) und Benzinger (1979) kann dieser Ansatz auf das gesamte Feld des Raumklimas angewendet werden.

Basierend auf den vorangehenden Definitionen von Komfort wird für diese Arbeit folgende Formulierung gewählt:

Komfort ist ein subjektives psychologisches Konstrukt. Es bietet die Möglichkeit der Operationalisierung und ist das Ergebnis der Wahr-

nehmung von Personen und der Bewertung anhand ihrer Erfahrung und Erwartung. Komfort ist ein angenehmer Zustand physiologischer, psychologischer und physikalischer Harmonie zwischen der Person und den verschiedenen Aspekten ihrer Umgebung. Diskomfort tritt ein, wenn diese Harmonie verletzt ist. Komfort und Diskomfort können bezüglich unterschiedlicher Aspekte zugleich auftreten. Im Kontext des Raumklimas wird die Schaffung einer Umgebung angestrebt, in welcher eine Person keinen Diskomfort aufgrund einer Stimulation durch die Umgebungsbedingungen erfährt. Diese wirken nicht unabhängig voneinander.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit das Erreichen eines Zustands in welchem kein Diskomfort herrscht als maßgebendes Kriterium für ein gutes Raumklima betrachtet. Nutzer eines Raumes, z.B. Insassen einer Flugzeugkabine, fühlen sich bei optimalen Raumklimabedingungen durch deren Gesamtheit nicht gestört.

3.2 Wahrnehmung des Raumklimas

Um beurteilen zu können, welches Raumklima herrscht verfügt der Mensch über differenzierte Systeme zur Wahrnehmung. Nach Goldstein (2002) „dient die Wahrnehmung dazu, uns über die Eigenschaften der Umwelt zu informieren, die für unser Leben wichtig sind."

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über die menschlichen Wahrnehmungssysteme – die Sensoren – geben, welche für die Wahrnehmung des Raumklimas als einer Komponente unserer Umwelt wichtig sind. Hierbei werden nur die für diese Arbeit relevanten Sinnesorgane für die Wahrnehmung der thermischen, olfaktorischen und vibro-akustischen Umgebung beschrieben. Mit der Bewertung der bereitgestellten Informationen über das Raumklima befasst sich anschließend Kapitel 3.3.

3.2.1 Wahrnehmung der (hygro-)thermischen Umgebung

Umgebungstemperaturen werden primär von Warm- und Kaltrezeptoren in der Haut wahrgenommen. Daneben hat die thermische Umgebung auch eine indirekte Auswirkung auf das homoiotherme (gleichwarme) Lebewesen Mensch. Um die Körpertemperatur auch bei sich ändernden Außenbedingungen konstant halten zu können hat der Mensch ein Thermoregulationssystem. Zunächst

wird im Folgenden ein Überblick über die Warm- und Kaltrezeptoren der Haut nach Bear et al. (2001) und Schmidt et al. (2005) gegeben, woran sich eine Beschreibung der Thermorezeptoren und Thermoregulation basierend auf Nomoto et al. (2004) anschließt.

Zur Wahrnehmung der Umgebungstemperaturen hat der Mensch Thermorezeptoren in der Haut. Diese sind ausschließlich sensitiv für warme oder kalte Temperaturen. Sie bestehen aus freien Nervenendigungen und sind ungleichmäßig als Kalt- und Warmpunkte über den Körper verteilt: während sich beispielsweise an Händen und Füßen kaum Kaltpunkte finden, ist ihre Dichte am Hals und anderen köperkernnahen Stellen sehr hoch.

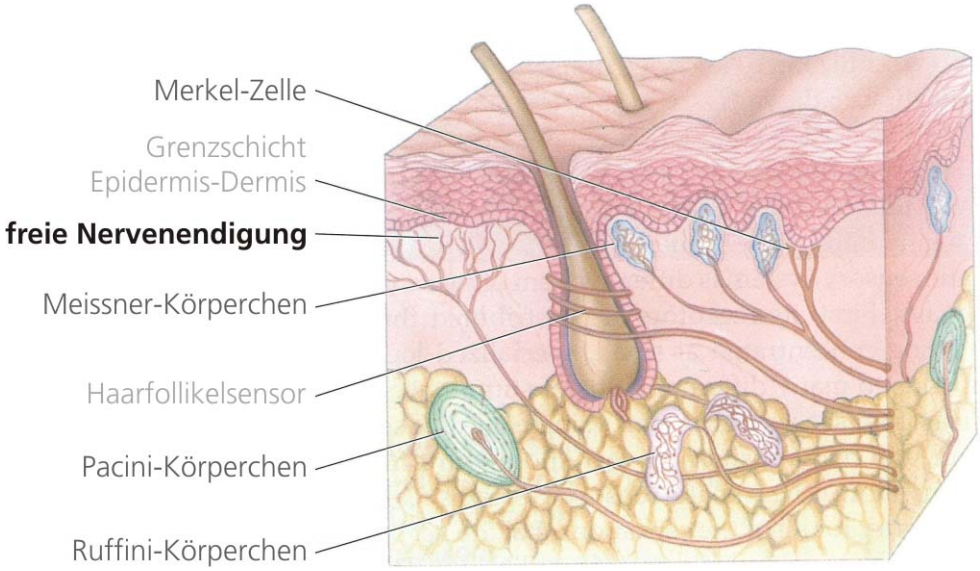


Abbildung 3.9: Sensoren der Haut, aus Bear et al. (2001). Freie Nervenendigungen (gefettet) fungieren als Thermorezeptoren.

Die Signale der Thermorezeptoren werden über die Spinalnerven in das Rückenmark geleitet. Hier führen die Nervenfasern des Vorderseitenstrangs diese weiter in das verlängerte Mark des Hirnstamms. Dieses gibt die Information seitenvertauscht an den Thalamus weiter, welcher diese hauptsächlich auf den Inselcortex, das Cingulum und den somatosensorischen Cortex projiziert. Der Inselcortex spielt durch seine Nähe zum Hypothalamus, dem Mandelkern, dem Cingulum und dem Frontallappen eine zentrale Rolle in der Temperaturwahrnehmung. Von ihm gehen Signale zur Thermoregulation aus, während das Cingulum eher das entsprechende Verhalten des Menschen veranlasst.

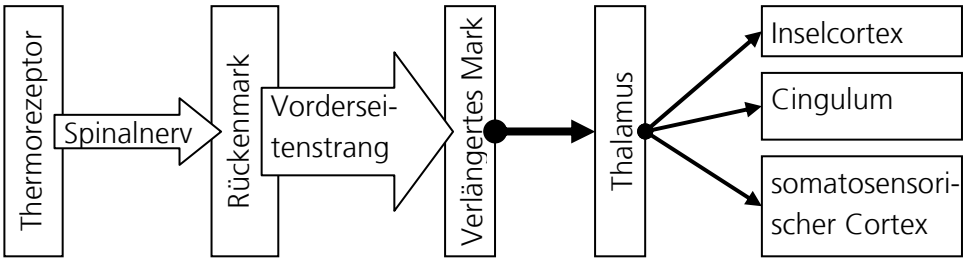


Abbildung 3.10: Sensorische Bahn vom Rezeptor bis in die Großhirnrinde (Cortex) für die Temperaturwahrnehmung nach Nomoto et al. (2004).

Die Thermorezeptoren der Haut können Temperaturänderungen von etwa 0,01 K detektieren und werden durch unterschiedliche Temperaturen maximal gereizt. Kaltrezeptoren reagieren etwa zwischen 10°C und 41°C mit einem Maximum bei 25°C. Die Warmrezeptoren hingegen werden zwischen ca. 20°C und 47°C angeregt mit einem Maximum bei 38°C. Während oberhalb von 43°C bzw. unterhalb von 12°C Schmerz empfunden wird, liegt ein Optimum, bei etwa 34°C, bei welchem die Reaktion der Kalt- und Warmrezeptoren von äquivalenter Stärke ist (siehe Abbildung 3.11).

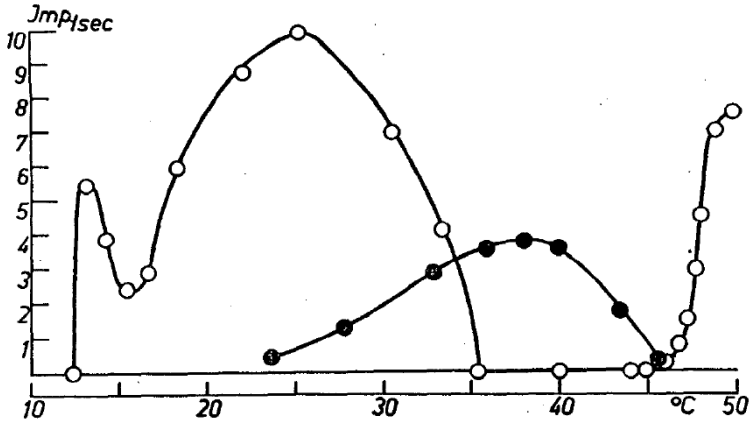


Abbildung 3.11: Entladungsfrequenzen eines einzelnen Kaltrezeptors (offenes Kreissymbol) bzw. eines einzelnen Warmrezeptors (geschlossenes Kreissymbol) während einer Exposition bei konstanten Temperaturen zwischen 10°C und 50°C (aus Zotterman (1953)).

Ein Großteil der Kaltrezeptoren ist in der Haut, die Warmrezeptoren hingegen sind hauptsächlich im Körperinneren zu finden. Deren Lokalisierung ist nicht abschließend geklärt, eine wichtige Rolle scheint hier der Hypothalamus zu spielen, wobei auch andere Gehirnregionen über Warmrezeptoren zu verfügen scheinen. Auf die Signale dieser Thermorezeptoren greift menschliche Thermoregulation zurück, welche über verschiedene Mechanismen die Wärmeabgabe und -produktion des Körpers so beeinflusst, dass die Körperkerntemperatur konstant um die 37°C liegt.

Ein wichtiges Instrument der Thermoregulation ist das Kreislaufsystem. Es transportiert mit dem Blut Wärme vom Körperkern in die Peripherie. In warmen Umgebungen wird dieser Vorgang durch eine Erweiterung der Blutgefäße (Vasodilatation) unterstützt, während in kalten Umgebungen die Wärmedämmung durch eine Verengung dieser (Vasokonstriktion) erhöht und somit die Wärme im Körperkern gehalten wird. Neben der Wärmeabgabe über das Kreislaufsystem kann der Mechanismus des Schwitzens initiiert werden, bei welchem über die Verdunstung von Schweiß Wärme abgegeben wird. Grundsätzlich hängt die abzugebende Wärme von der körpereigenen Wärmeproduktion ab – der metabolischen Rate. Diese beträgt im entspannten Sitzen ca. 105 W beim zügigen Gehen etwa 360 W. Durch den Mechanismus des Zitterns werden in kalten Umgebungen diese metabolische Rate und damit auch die interne Wärmeproduktion erhöht.

Neben diesen physiologischen Reaktionen führt Parsons (2003) auch die verhaltensgesteuerten Mechanismen auf: Änderung der Aktivität, Anpassung der Bekleidung als wärmedämmende Schicht, Angleichung der Körperhaltung zur Optimierung der Wärmeabgabe über die Körperoberfläche.

Die Wärmeabgabe des Körpers wird nicht nur über die Temperatur der Umgebung beeinflusst, sondern auch über Feuchte und die Geschwindigkeit der umgebenden Luft sowie Gewinne oder Verluste aufgrund Austauschs von Wärmestrahlung. Während hohe Luftfeuchten die Wärmeabgabe durch Schwitzen erschweren, wird dies durch höhere Luftgeschwindigkeiten erleichtert. Bei diesen wird über Konvektion ebenfalls eine größere Wärmeabgabe erreicht, was in kalten Umgebungen wiederum problematisch sein kann. Große Wärmegewinne werden häufig durch solare Wärmestrahlung erreicht, in der Nähe kalter Oberflächen hingegen gibt der Körper durch Wärmestrahlung Energie an die Umgebung ab.

3.2.2 Wahrnehmung der olfaktorischen Umgebung

Die olfaktorische Umgebung besteht aus Duftstoffen, welche über die eingeatmete Luft vom Geruchssinn wahrgenommen werden. Dieser wird im Folgenden nach Schmidt et al. (2005) und Bear et al. (2001) skizziert.

Der Ausgangspunkt des Geruchssinns ist im obersten Teil der Nasenhöhle angeordnet und wird als Riechepithel bezeichnet. Dieses ist eine etwa 10 cm² große Schleimhaut, in welcher ca. 30 Millionen Riechzellen sitzen. Aus diesen Zellen ragen kleine Sinneshaare (Zilien) in den Schleim der Schleimhaut, wo sie die Moleküle aus der Umgebungsluft detektieren können. Diese Riechzellen leiten ihre Information direkt weiter an den Riechkolben, einen vorgelagerten Teil

des Gehirns, welcher über dem Riechepithel lokalisiert ist. In diesem findet in den Glomeruli eine erste Informationsreduktion aus den vielen Riechzellen statt (siehe Abbildung 3.12).

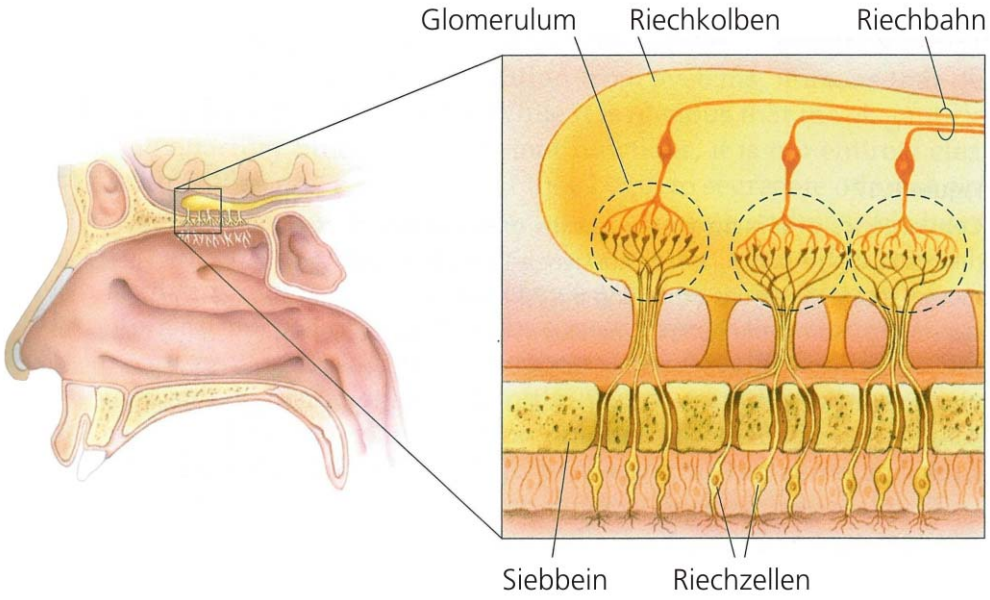


Abbildung 3.12: Ort und Aufbau des Riechepithels und des Riechkolbens, aus Bear et al. (2001).

Anschließend werden die Signale über die Riechbahn und die sogenannte Riechrinde weiter in das Gehirn geleitet. Hier werden verschiedene Regionen angesprochen, zum Einen über den Thalamus der olfaktorische Cortex, zum Anderen das Limbische System (Mandelkern, Hippocampus), von welchem der vegetative Kern des Hypothalamus erreicht wird. Während ersterer Teil das Denken und Bewusstsein beeinflusst, werden mit dem zweiten Teil Regionen der Emotionen, Erinnerungen und auch der Hormonsteuerung angesprochen.

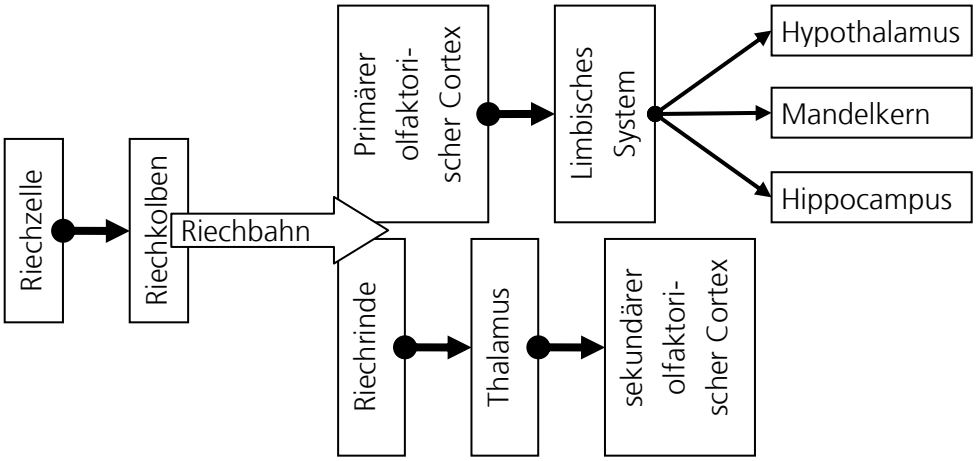


Abbildung 3.13: Sensorische Bahn vom Rezeptor bis in die Großhirnrinde (Cortex) für die Geruchswahrnehmung nach Bear et al. (2001).

Der menschliche Geruchssinn kann um die 10.000 verschiedene Düfte differenzieren. Dabei unterscheidet man zwei Schwellen: die Wahrnehmungs- und die Erkennungsschwelle. Letztere wird bei ungefähr 10fach höheren Konzentrationen des Duftstoffes erreicht, als die reine Wahrnehmung eines Duftes überhaupt. Daneben wird auch noch eine Unterschiedsschwelle definiert, welche angibt, bei welchem Konzentrationsunterschied zwei Proben als unterschiedlich identifiziert werden. Dieser Unterschied muss in etwa 25 % betragen. Neben der Duftstoffkonzentration ist der Geruchssinn von der Adaption an die Umgebung, von den Raumklimaparametern Temperatur und Feuchte und auch von hormonellen Einflüssen abhängig.

Für die Beschreibung von Düften gibt Ohloff (1990) zwei Verfahren an: die Referenzmethode, bei welcher die chemischen Bestandteile eines Geruchsmusters mit Referenzverbindungen direkt verglichen werden, und die semantische Methode, bei welcher der Duft anhand eines Katalogs von Begriffen beschrieben werden. Für diese Methode existieren verschiedene Kataloge, welche sich in ihrem Umfang erheblich unterscheiden. Aus diesen wurden verschiedene Klassifikationen extrahiert, deren bekannteste nach Amoore (1962) sieben Primärgerüche enthält: kampferartig, moschusartig, blumig, minzig, ätherisch, schweißig, faulig. Zarzo und Stanton (2006) kommen nach einer Hauptkomponentenanalyse von Deskriptoren in verfügbaren Geruchsdatenbanken jedoch zu dem Schluss, dass mindestens zehn Geruchsklassen notwendig sind, womit einige gängige einfache Klassifizierungen nicht empfohlen werden können.

3.2.3 Wahrnehmung der vibro-akustischen Umgebung

Entsprechend ihrer zugrundeliegenden Wahrnehmung wird die vibro-akustische Umgebung in zwei Teilbereichen betrachtet: der akustischen und vibratorischen Umgebung. Die Wahrnehmung beider beruht auf der Übertragung von sich ändernden (Luft-)Drücken. Da die wahrgenommenen Frequenzbereiche dieser Änderungen sich überlappen müssen in Untersuchungen oft beide Systeme betrachtet werden. Im Folgenden werden diese nach Schmidt et al. (2005) und Bear et al. (2001) kurz beschrieben.

Wahrnehmung der akustischen Umgebung

Die akustische Umgebung wird über das auditive System wahrgenommen, welches zu wesentlichen Teilen im Ohr lokalisiert ist. Hauptanregung des auditiven Systems ist der Luftschall, das Innenohr kann jedoch auch durch Körperschall über Schwingungen der Schädelknochen angeregt werden.

Als Luftschall bezeichnet man Druckschwankungen der Luft, deren Frequenz unterschiedlich wahrgenommen werden: große Frequenzen werden als hohe, kleine als tiefe Töne interpretiert. Durch das Ohr können Frequenzen zwischen ca. 20 Hz und 16.000 Hz wahrgenommen werden. Die Intensität des Luftschalls, d.h. die Größe (oder Amplitude) der Druckschwankungen wird bei großen Amplituden als laut, bei kleinen als leise empfunden.

Der Luftschall wird von der Ohrmuschel reflektiert über den Gehörgang zu Trommelfell geleitet. Nach diesem als äußeres Ohr bezeichneten Teil werden durch Anregung des Trommelfells die Bestandteile des mittleren Ohrs angeregt: die Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel. Diese Knöchelchen bewirken, dass bei der Schallübertragung durch Druckerhöhung eine Anpassung an das flüssige Medium im Innenohr erreicht wird. Dieses wird vom Steigbügel über das ovale Fenster angeregt und befindet sich in der Hörschnecke (Kochlea) im inneren Ohr. Die Kochlea besteht im Wesentlichen aus drei aufgewickelten Schläuchen – den Skalen.

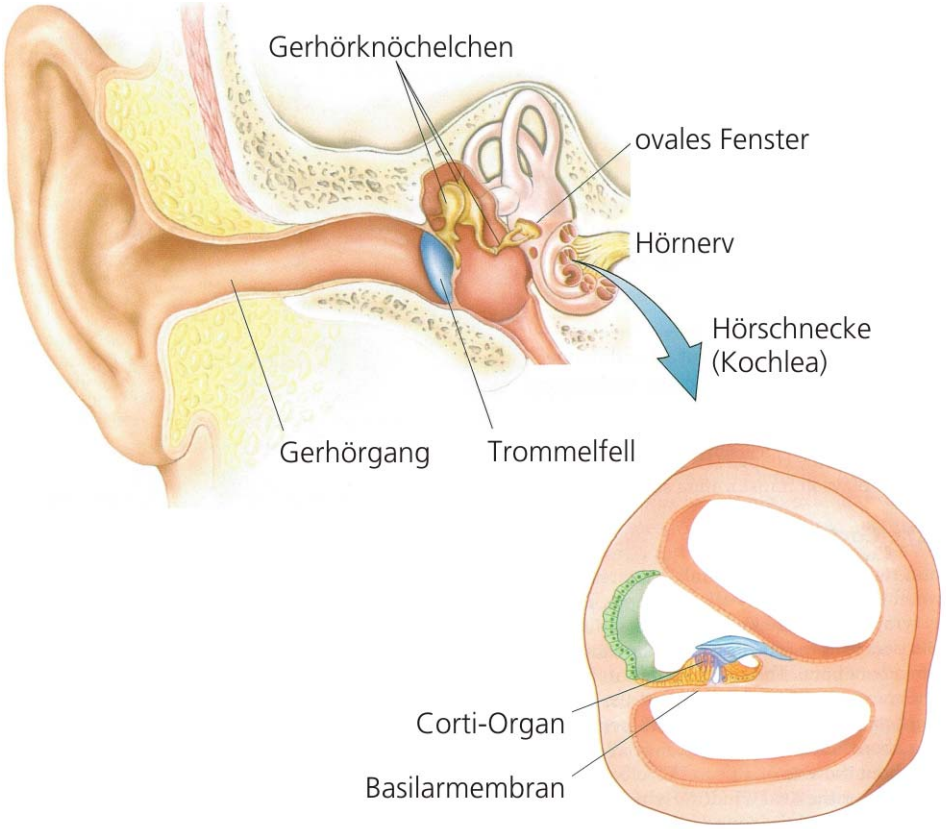


Abbildung 3.14: Aufbau des Ohrs und der Kochlea, zusammengesetzt aus Bear et al. (2001).

Durch die Anregung über das ovale Fenster läuft eine Druckwelle entlang der größeren beiden Skalen und erzeugt eine Schwingung der Basilarmembran, je nach Frequenz an einer anderen Stelle. Über diese wird das Corti-Organ in der mittleren Skala angeregt, in welchem ein System von Haarzellen sitzt, die den Hörnerv entsprechend aktivieren. Dieser leitet das Signal in die kochlearen Nuklei des Stammhirns, von welchen über die beiden oberen Oliven die seitliche Schleifenbahn aktiviert wird. Diese spricht über das Mittelhirn und den Thalamus sowohl die rechte, als auch linke Hörrinde (primärer auditiver Cortex) an.

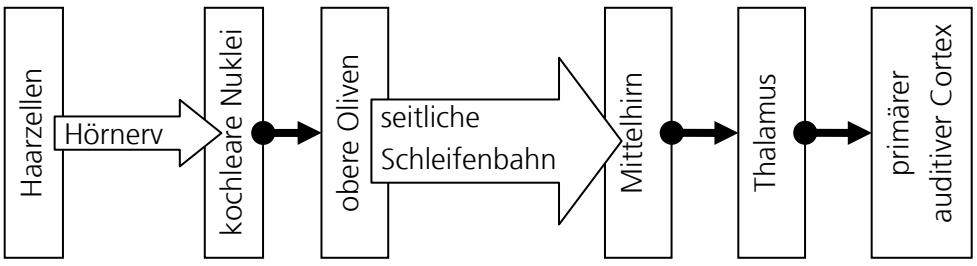


Abbildung 3.15: Sensorische Bahn vom Rezeptor bis in die Großhirnrinde (Cortex) für die akustische Wahrnehmung nach Bear et al. (2001).

Die Wahrnehmungsschwelle des Luftschalls ist je nach Frequenz unterschiedlich, bei 1000 Hz beträgt sie $3{,}2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Für die Beschreibung der Intensität wird meist der Schalldruckpegel L verwendet, welcher in decibel (dB SPL) gemessen wird. Dieser ist das 20fache logarithmische Verhältnis des aktuellen Schalldrucks p zu dem Bezugswert p_0 von $2 \cdot 10^{-5}$ Pa:

$$L = 20 \log\left(\frac{p}{p_0}\right). \tag{3.1}$$

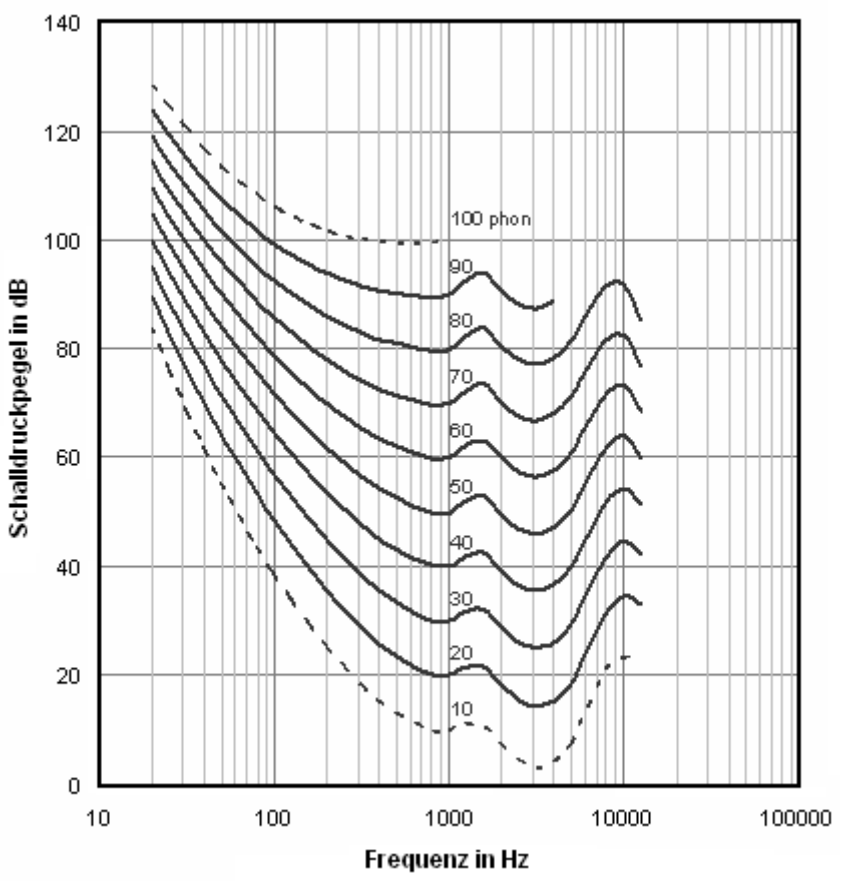


Abbildung 3.16: Kurven gleicher Lautstärke nach ISO 226 (2003).

Die Sensitivität bezüglich des Schalldruckpegels ist jedoch je Frequenz unterschiedlich. So wird der gleiche Schalldruckpegel bei mittleren Frequenzen (2000 Hz bis 5000 Hz) wesentlich lauter wahrgenommen. Daher wurden empirisch Kurven gleicher Lautstärke für die verschiedenen Frequenzen gefunden (siehe Abbildung 3.16). Diese werden in phon angegeben und sind bei 1000 Hz identisch mit dem Schalldruckpegel.

Wahrnehmung der vibratorischen Umgebung

Vibrationen werden hauptsächlich durch Mechanorezeptoren wahrgenommen. Diese unterteilen sich in vier verschiedene Arten von Rezeptoren und sind größtenteils in der Haut, teilweise aber auch in Gelenken und Organen lokalisiert. Im Folgenden werden sie mit Ihrer Funktion nach Goldstein (2002) und Bear et al. (2001) zusammenfassend erläutert.

Die Mechanorezeptoren sind verschieden ausgebildete Nervenendigungen, welche sich durch ihre Struktur, ihr Adaptionsverhalten (schnell / langsam), die Größe ihres rezeptiven Feldes und den optimalen Reiz für eine Reaktion unterscheiden. Bei lokalem Druck auf die Haut sprechen die sogenannten Merkel-Zellen an, deren optimale Frequenz zwischen 0,3 Hz und 3 Hz liegt. Frequenzen zwischen 3 Hz und 40 Hz werden häufig als Zittern bezeichnet und von den Meissner-Körperchen wahrgenommen. Die Ruffini-Körperchen reagieren auf Frequenzen im Bereich von 15 Hz bis 400 Hz und detektieren über die Dehnung des Gewebes Berührungen. Für die Wahrnehmung von Vibrationen optimiert sind die Pacini-Körperchen. Sie haben sprechen im Frequenzbereich zwischen >10 Hz und 500 Hz optimal an und registrieren den für Vibrationen typischen Wechsel zwischen Stillstand und Bewegung.

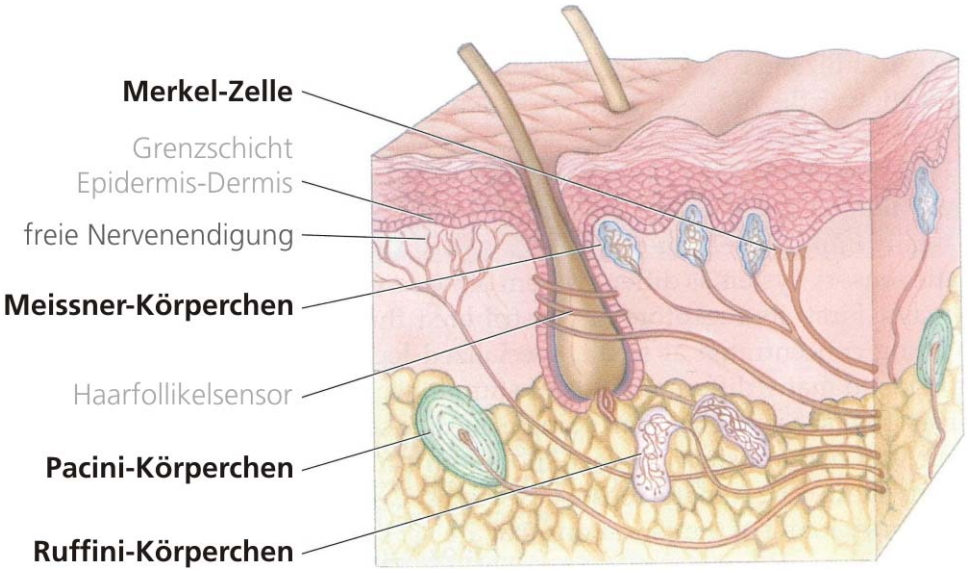


Abbildung 3.17: Sensoren der Haut, aus Bear et al. (2001). Die besprochenen Mechanorezeptoren sind fett markiert.

Ähnlich zu den Thermorezeptoren werden die Signale der Mechanorezeptoren über die Spinalnerven durch die Hinterwurzeln in das Rückenmark geleitet. Die Nervenfasern des Hinterstrangs führen diese weiter in das verlängerte Mark des Hirnstamms. Von hier wird die Information seitenvertauscht an den Thalamus

weitergegeben, welcher diese hauptsächlich auf den primären somatosensorischen Cortex projiziert.

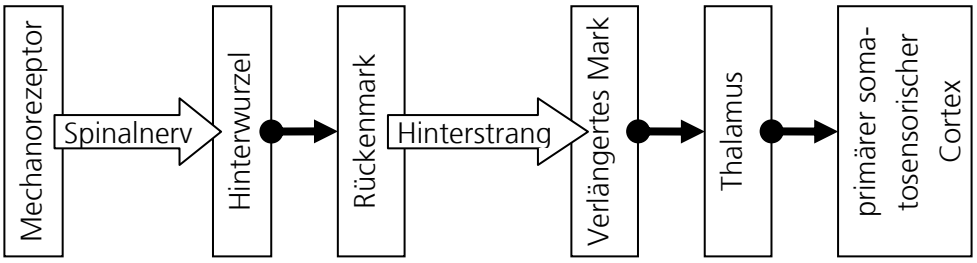


Abbildung 3.18: Sensorische Bahn vom Rezeptor bis in die Großhirnrinde (Cortex) für die Wahrnehmung mechanischer Reize nach Bear et al. (2001).

Die Schwellen der verschiedenen Mechanorezeptoren sowie ihre Abnahme je Oktave bei niederen Frequenzen sind in Tabelle 3.7 nach Tan (1996) zusammengefasst. Sämtliche Mechanorezeptoren sind auch thermosensitiv.

Tabelle 3.7: Zusammenfassung der Schwellen der verschiedenen Mechanorezeptoren sowie ihrer Abnahme je Oktave bei niederen Frequenzen nach Tan (1996).

Rezeptorstruktur	Schwelle	Steigung bei niederen Frequenzen
Merkel-Zellen	28 dB bei 0,4 Hz	annähernd keine
Meissner-Körperchen	28 dB bei 3 Hz	-5 dB/Oktave
Ruffini-Körperchen	10 dB bei 300 Hz	-6 dB/Oktave
Pacini-Körperchen	< -20 dB bei 300 Hz	-12 dB/Oktave

3.3 Bewertung des Raumklimas

Aufbauend auf der Wahrnehmung der Umgebung wird angenommen, dass der Mensch sich ein Urteil über diese bildet und eine Wertung äußert. Dies kann bezüglich eines einzelnen Aspekts geschehen, jedoch auch im Allgemeinen. Im Folgenden werden die Erkenntnisse über die Bewertung des thermischen, vibro-akustischen und olfaktorischen Raumklimas zusammengefasst. Anschließend wird ein Überblick über mögliche kombinierte Effekte gegeben.

3.3.1 (Hygro-)Thermisches Raumklima

Die Bewertung des thermischen Raumklimas stützt sich größtenteils auf die sechs Größen, welche auch für die Thermoregulation des Menschen maßge-

bend sind: die Umgebungsparameter Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, relative Feuchte und Luftgeschwindigkeit sowie die individuellen Größen der Aktivität in met und des Bekleidungsdämmwertes in der Einheit clo. Neben einigen Klimasummengrößen, welche versuchen die wesentlichen Parameter in einer Größe zusammenzufassen, werden im Folgenden auch Ansätze zur Bewertung von lokalen Bewertungen aufgrund von ungleichmäßigen Umgebungsbedingungen aufgezeigt.

Summengrößen

Eine erste beschreibende Größe zur Bewertung des thermischen Raumklimas hat Yaglou (1927) mit der Effektivtemperatur eingeführt. Diese stellt eine fiktive Lufttemperatur dar, die gegenüber anderen Kombinationen aus Lufttemperatur, Feuchte und Luftbewegung das gleiche Gefühl thermischer Behaglichkeit hervorruft. Diese Temperatur wird anhand aufwändiger Versuche mit Testpersonen gewonnen, welche das Klima in zwei verschieden konditionierten Klimakammern vergleichen. Auch mit Hilfe von modifizierten Methoden zur Ermittlung der Effektivtemperatur, werden Einflüsse aus der Strahlungstemperatur nur unzureichend, Einflüsse aus dem Turbulenzgrad von Luftbewegungen überhaupt nicht berücksichtigt.

Von Gagge (1940) wurde der Begriff der operativen Temperatur eingeführt, welche auch in der aktuellen Normung verankert ist (DIN EN ISO 7730 (2006)). Diese Temperatur spiegelt die Innenoberflächentemperatur eines gedachten Raumes wieder, mit welchem ein Körper bei gleicher Innenoberflächen- und Lufttemperatur dieselbe Menge durch Strahlung und Konvektion austauscht, wie mit dem realen Raum. Allerdings müssen die Luftbewegungen beider Räume gleich groß sein. Mit der Lufttemperatur t_a, der mittleren Strahlungstemperatur $\bar{t}_r$ und dem konvektiven sowie strahlungsbezogenen Wärmeübergangskoeffizienten h_c und h_r ist sie definiert zu:

$$t_o = \frac{h_r \bar{t}_r + h_c t_a}{h_r + h_c}, \tag{3.2}$$

und kann nach ASHRAE 55 (2004) je nach Luftgeschwindigkeit v_a wie folgt abgeschätzt werden:

$$t_o = a\, t_a + (1-a)\,\bar{t}_r \qquad \text{mit} \begin{cases} a = 0{,}5 & \text{, falls } v_a < 0{,}2 \text{ m/s} \\ a = 0{,}6 & \text{, falls } 0{,}2 \text{ m/s} \le v_a < 0{,}6 \text{ m/s} \\ a = 0{,}7 & \text{, falls } 0{,}6 \text{ m/s} \le v_a < 1{,}0 \text{ m/s} \end{cases}. \tag{3.3}$$

Um den Einfluss der Luftbewegung mit zu berücksichtigen wurde die Äquivalenttemperatur eingeführt. Diese hat im Laufe der Zeit mehrere Definitionen erhalten und wurde in den 1990er Jahren hauptsächlich vor dem Hintergrund der Bewertung der thermischen Umgebung in Automobilen festgelegt. Aktuell ist die Äquivalenttemperatur t_{eq} in ISO 14505-2 (2004) definiert als die gleichmäßige Temperatur einer imaginären Umgebung mit einer Luftgeschwindigkeit gleich Null, mit welcher eine Person die gleiche trockene Wärmemenge durch Konvektion und Strahlung austauscht, wie in der aktuellen nicht-gleichförmigen Umgebung. Damit kann sie wie folgt ermittelt werden:

$$t_{eq} = (1 - F_{cl} f_{cl}) t_s + F_{cl} f_{cl} t_o \,, \tag{3.4}$$

wobei F_{cl} ein Reduktionskoeffizient für den sensiblen Wärmeaustausch durch das Tragen von Bekleidung ist und f_{cl} der Anteil der durch Kleidung bedeckten Körperoberfläche ist. Letzterer kann mit der Größe in cm und Masse in kg aus der DuBois-Fläche $A_D = 0{,}007184\ h_{cm}^{0{,}725}\ m_{kg}^{0{,}425}$ zu $f_{cl} = A_{cl} / A_D$ berechnet werden. In Nilsson und Holmer (2002) finden sich neben weiteren Definitionen für die richtungsbezogene sowie omnidirektionale Äquivalenttemperatur und mögliche Messprinzipien folgende abschätzende empirische Gleichungen:

$$t_{eq} = \begin{cases} t_o & \text{, falls } v_a < 0{,}1\,\text{m/s} \\ 0{,}55\, t_a + 0{,}45\, \bar{t}_r + \dfrac{0{,}24 - 0{,}75\sqrt{v_a}}{1 + I_{cl}} (36{,}5 - t_a) & \text{, falls } v_a \geq 0{,}1\,\text{m/s} \end{cases} \tag{3.5}$$

Thermoregulatorische Modelle

Von Fanger (1970) wurde die bislang einflussreichste und weit verbreitete Klimasummengröße, die Predicted Mean Vote (PMV), eingeführt, welche auch in der DIN EN ISO 7730 (2006) verankert ist. Diese basiert auf einem iterativen Gleichungsapparat, welcher die passive Thermoregulation des menschlichen Körpers als Ganzes anhand der sechs thermischen Basisgrößen Lufttemperatur t_a, Strahlungstemperatur t_r, Wasserdampfdruck p_a, Luftgeschwindigkeit v_a, metabolischer Rate M (und körperlicher Arbeit W) sowie dem Bekleidungsdämmwert I_{cl} bei einem bedeckten Körperflächenanteil von f_{cl} abbildet. Seine grundsätzliche Annahme ist, dass sich der Mensch komfortabel fühlt, wenn der Körper im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung steht. Somit gilt folgende Bilanz zwischen einerseits strahlungsbezogenem und konvektivem Wärmeaustausch R und C und andererseits der internen Wärmeproduktion H bei Wärmeverlusten durch trockene und feuchte Atmung L und E_{res}, Diffusion E_d und Schwitzen E_{sw}:

$$R + C = H - L - E_{res} - E_d - E_{sw} \,. \tag{3.6}$$

Weiterhin werden Hauttemperatur t_s und Schweißrate E_{sw} innerhalb der erforderlichen Grenzen angenommen, in welchen thermisches Gleichgewicht herrscht. Für diese verwendet er folgende Gleichungen nach Rohles und Nevins (1971):

$$t_{sk,req} = 35{,}7 - 0{,}0275(M - W), \tag{3.7}$$

$$E_{rsw,req} = 0{,}42(M - W - 58{,}15). \tag{3.8}$$

Basierend auf umfangreichen Befragungen unter verschiedenen Umgebungsbedingungen wurde ein Gleichungsapparat abgeleitet, welcher das thermische Gleichgewicht des Körpers unter gegebenen Umgebungsbedingungen auf das folgende Fragebogenitem mit entsprechender Kodierung bezieht:

Wie fühlen Sie sich jetzt?

kalt	kühl	leicht kühl	neutral	leicht warm	warm	heiß
-3	-2	-1	0	1	2	3

Damit kann mit einer iterativen Berechnung die Predicted Mean Vote (*PMV*) bestimmt werden:

$$\begin{aligned} PMV = {} & \left(0{,}303\, e^{-0{,}036M} + 0{,}028\right)\left((M - W)\right. \\ & - 3{,}05\, 10^{-3}(5733 - 6{,}99(M - W) - p_a) - 0{,}42((M - W) - 58{,}15) \\ & - 1{,}7\, 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0{,}0014M(34 - t_a) \\ & \left. - 3{,}96\, 10^{-8} f_{cl}\left((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\right) - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\right) \end{aligned}, \tag{3.9}$$

mit einer Oberflächentemperatur auf der Bekleidung von

$$\begin{aligned} t_{cl} = {} & 35{,}7 - 0{,}028(M - W) \\ & - 0{,}155\, I_{cl}\left(3{,}96\, 10^{-8} f_{cl}\left((t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4\right) + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\right) \end{aligned}. \tag{3.10}$$

Aus diesem vorhergesagten mittleren Votum leitete Fanger (1970) schließlich den Predicted Percentage Dissatisfied (*PPD*) ab:

$$PPD = 100 - 95\, e^{\left(-0{,}03353\, PMV^4 - 0{,}2179\, PMV^2\right)}. \tag{3.11}$$

Hierbei wurde angenommen, dass bei jeder Konfiguration des thermischen Raumklimas mindestens fünf Prozent der Personen unzufrieden sind und Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung herrscht, solange auf der Fragebogenskala Antworten zwischen -1 und +1 vorhergesagt werden. Diese Annahmen wurden häufig kritisiert und durch verschiedene Studien unterschiedlich

widerlegt. Einen Überblick über die Kritik an Fangers *PMV-PPD*-Modell und über alternative Beziehungen zwischen *PMV* und *PPD* gibt van Hoof (2008) – ein Beispiel für eine solche abweichende Formulierung ist die von Mayer (1997) angegebene Gleichung, welche nur Antworten zwischen 0 und +1 als thermisch komfortabel berücksichtigt:

$$PPD_{Mayer} = 100 - 84{,}3\, e^{\left(0{,}01(PMV-0{,}4)^4 - 0{,}5479(PMV-0{,}4)^2\right)}. \tag{3.12}$$

Eine weitere Summengröße, die auf dem thermischen Gleichgewicht des Körpers mit der Umgebung basiert, wurde von Gagge et al. (1971) entwickelt. Sie wird als Effektivtemperatur *ET** bezeichnet und berücksichtigt neben dem passiven Wärmeaustausch über die Haut auch aktive Komponenten, wie Blutzirkulation, Schwitzen und Wärmeproduktion durch Zittern. Im Gegensatz zu Fangers *PMV-PPD*-Modell kann sie somit durch zwei, statt einem Berechnungsknoten dargestellt werden und auch extrem kalte bzw. warme Umgebungen berücksichtigen. Nach der Berechnung der Temperaturen der Haut und im Körperkern t_{sk} und t_{cr} sowie des Anteils der durch einen Schweißfilm bedeckten Haut *w* können die thermische Wahrnehmung (*TSENS*) und der thermische Diskomfort anhand empirischer Gleichungen bestimmt werden. Hierbei beziehen sich Gagge et al. (1986) auf folgende Antwortskalen:

TSENS		*DISC*
untolerierbar	5	untolerierbar
sehr heiß	4	begrenzt tolerierbar
heiß	3	sehr unkomfortabel
warm	2	unkomfortabel und unangenehm
leicht warm	1	leicht unkomfortabel aber akzeptabel
neutral	0	komfortabel und angenehm
leicht kühl	-1	leicht unkomfortabel aber akzeptabel
kühl	-2	unkomfortabel und unangenehm
kalt	-3	sehr unkomfortabel
sehr kalt	-4	begrenzt tolerierbar
untolerierbar	-5	untolerierbar

TSENS ist definiert als Abweichung der mittleren Körpertemperatur t_b von den oberen und untere Sollwerten der Thermoregulation $t_{b,h}$ und $t_{b,c}$:

$$TSENS = \begin{cases} 0{,}4685\left(t_b - t_{b,c}\right) & \text{, für } t_b < t_{b,c} \\ 3{,}995\left(t_b - t_{b,c}\right)/\left(t_{b,h} - t_{b,c}\right) & \text{, für } t_{b,c} \le t_b \le t_{b,h} \\ 3{,}995 + 0{,}4685\left(t_b - t_{b,h}\right) & \text{, für } t_b > t_{b,h} \end{cases}. \tag{3.13}$$

Mit der regulatorischen Schweißrate $E_{rsw,req}$ nach Gleichung (3.8) und den aus dem Berechnungsprozess bekannten E_d und E_{sw} kann schließlich *DISC* berechnet werden zu:

$$DISC = \begin{cases} 0{,}4685\left(t_b - t_{b,c}\right) & \text{, für } t_b < t_{b,c} \\ 4{,}7\left(E_{rsw} - E_{rsw,req}\right)/\left(w\,E_{sw} - E_{rsw,req} - E_d\right) & \text{, für } t_{b,c} \le t_b \end{cases}. \tag{3.14}$$

Nach ähnlichen Prinzipien, basierend auf thermoregulatorischen Vorgängen, wurden diverse höher aufgelöste Modelle entwickelt, welche die Temperaturen in einzelnen Körperteilen oder in deren verschiedenen Segmenten und Schichten berechnen. Die bekanntesten sind die Modelle nach Stolwijk und Hardy (1966), Smith (1991), Tanabe et al. (1995), Fiala (1998) und Huizenga et al. (1999). Nachdem eine Bewertung dieser lokal berechneten Temperaturen sich zunächst meist auf das für die Wärmebilanz des gesamten Körpers entwickelte *PMV-PPD*-Modell stützte, wurde von Zhang (2003) eine Vorgehensweise für die lokale thermische Bewertung entwickelt. Diese stützt sich auf einen umfangreichen empirischen Gleichungsapparat, welcher für die einzelnen Körperteile sowie den gesamten Körper die Wahrnehmung und Komfortbewertung nach der Modellarchitektur in Abbildung 3.19 ermittelt.

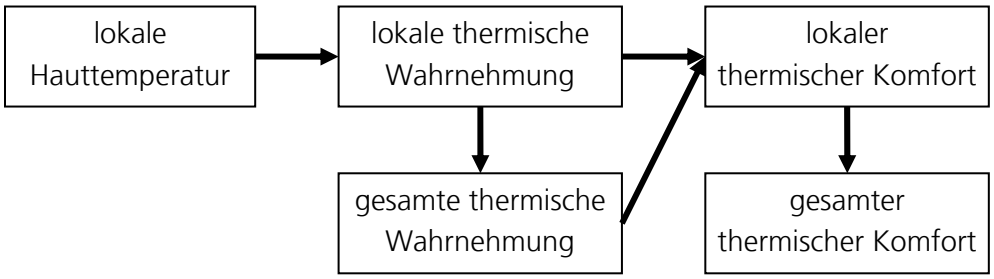


Abbildung 3.19: Modellarchitektur für die lokale und gesamte thermische Wahrnehmung und Komfortbewertung aus lokal ermittelten Hauttemperaturen nach Zhang (2003).

Adaptive Ansätze

Eine Kritik an den genannten thermoregulatorischen Modellen ist deren Ausblendung von Wetterschwankungen und der damit verbundenen thermischen Adaption. Zwei bekannte Modelle geben empirische Gleichungen für komfortable Innenraumtemperaturen in Abhängigkeit der Außentemperatur t_{out} an. Nach Humphreys und Nicol (1998) sind komfortable Temperaturen:

$$t_c = \begin{cases} 11{,}9 + 0{,}534\,t_{out} & \text{, frei belüftet} \\ 23{,}9 + 0{,}295\left(t_{out} - 22\right)\exp\left[-\left(\dfrac{t_{out} - 22}{24\sqrt{2}}\right)^2\right] & \text{, mechanisch belüftet} \end{cases} \tag{3.15}$$

de Dear et al. (1997) ermittelten für komfortable Operativtemperaturen t_{oc} in Gebäuden, in welchen weder gekühlt noch geheizt wird, die Beziehung

$$t_{oc} = \begin{cases} 18{,}9 + 0{,}255\ t_{out} & \text{, frei belüftet} \\ 21{,}5 + 0{,}110\ t_{out} & \text{, sonst} \end{cases}. \tag{3.16}$$

Asymmetrische Temperaturverteilung

Die bisher betrachteten Modelle beziehen sich, mit Ausnahme der lokal aufgelösten thermoregulatorischen Modelle, sämtlich auf ein uniformes thermisches Raumklima. Üblicherweise treten jedoch Temperaturschichtungen oder kältere bzw. wärmere Oberflächen, welche zu einem asymmetrischen Wärmeaustausch führen, auf. In DIN EN ISO 7730 (2006) werden hier drei Modelle referenziert, welche den Anteil Unzufriedener für bestimmte Szenarien ermitteln: für vertikale Lufttemperaturunterschiede, warme und kalte Fußböden und Asymmetrie der Strahlungstemperatur.

Die Bestimmung des Anteils Unzufriedener mit vertikalen Lufttemperaturunterschieden geht zurück auf Olesen et al. (1979). In ihren Untersuchungen wurden sitzende Personen in thermischer Neutralität verschiedenen Differenzen $\Delta t_{a,v}$ von 0°C bis zu 8°C zwischen Kopf und Knöcheln ausgesetzt. Hieraus wurde folgender Zusammenhang ermittelt:

$$PD_{vertical} = 100 / \left(1 + e^{\left(5{,}76 - 0{,}856\,\Delta t_{a,v}\right)}\right). \tag{3.17}$$

Für Personen mit leichtem Schuhwerk wurden von Olesen (1977) Zusammenhänge zwischen dem Anteil Unzufriedener und kalten bzw. warmen Fußböden aufgestellt. Für diese ist nicht das Material des Fußbodens, sondern seine Temperatur t_f maßgebend. Folgender Zusammenhang wurde aus den Bewertungen von Probanden bei unterschiedlichen Fußbodentemperaturen 5°C ≤ t_f ≤ 40°C auf verschiedenen Bodenmaterialien gewonnen:

$$PD_{floor} = 100 - 94\ e^{\left(-1{,}387 + 0{,}118\ t_f - 0{,}0025\ t_f^2\right)}. \tag{3.18}$$

Untersuchungen von Fanger et al. (1985) resultierten in Beziehungen zwischen dem Anteil Unzufriedener und verschieden temperierter Decken- und Wandflächen. Für leicht bekleidete (0,6 clo) sitzende Personen in thermischer Neutralität können folgende Zusammenhänge bei Differenzen in der Strahlungstemperatur der zwei Halbräume vor und hinter einer kleinen Platte Δt_{pr} herangezogen werden:

$$PD_{r,asym} = \begin{cases} 100/(1+e^{(2{,}84-0{,}174\,\Delta t_{pr})}) - 5{,}5 & \text{, warme Decke mit } \Delta t_{pr} < 23\text{°C} \\ 100/(1+e^{(9{,}93-0{,}500\,\Delta t_{pr})}) & \text{, kalte Decke mit } \Delta t_{pr} < 15\text{°C} \\ 100/(1+e^{(3{,}72-0{,}052\,\Delta t_{pr})}) - 3{,}5 & \text{, warme Wand mit } \Delta t_{pr} < 35\text{°C} \\ 100/(1+e^{(6{,}61-0{,}345\,\Delta t_{pr})}) & \text{, kalte Wand mit } \Delta t_{pr} < 15\text{°C} \end{cases} \quad (3.19)$$

Zugluft

Zugluft wird meist als ungewünschtes lokales Kühlen des Körpers durch Luftbewegung verstanden. Da Luftbewegungen mit einem hohen Turbulenzgrad bei gleicher Geschwindigkeit und Lufttemperatur mehr Beschwerden verursachen als solche mit niederem Turbulenzgrad, schlugen Fanger et al. (1988) ein Modell zur Ermittlung der Anzahl Unzufriedener bezüglich Zugluft vor. Dieses basiert neben der Lufttemperatur t_a und der mittleren Luftgeschwindigkeit v_a auch auf dem Turbulenzgrad *Tu* in Prozent:

$$PD_{draft} = \min[(3{,}143 + 0{,}3696\,\bar{v}_a\,Tu)(34 - t_a)(\bar{v}_a - 0{,}05)^{0{,}6223}\,;100]. \quad (3.20)$$

Dieses ist gültig für die Zugluftbewertung im Nacken einer bei leichter Tätigkeit sitzenden Person, wobei $v_a < 0{,}5$ m/s, 20°C ≤ t_a ≤ 26°C und 10 % ≤ *Tu* ≤ 60 % und ist auch in DIN EN ISO 7730 (2006) verankert.

Hygrisches Raumklima

Die Feuchtigkeit wird im Allgemeinen in Form der absoluten und relativen Feuchte angegeben. Die absolute Feuchte gibt die Masse des in einem Volumen enthaltenen Wasserdampfes an. Der maximale Gehalt ist jedoch von der Temperatur und dem Druck abhängig, weshalb häufig die relative Feuchte in Prozent des im aktuellen Zustand maximal möglichen Wasserdampfgehaltes verwendet wird. Diese fungiert oft auch als Indexgröße, so dass in Richtlinien z.B. eine maximale oder minimale relative Feuchte vorgegeben wird.

Der menschliche Körper hat jedoch keinen Sensor, um die Feuchtigkeit direkt wahrzunehmen. Damit kann das hygrische Raumklima lediglich indirekt bewertet werden, häufig über Beschwerden hinsichtlich zugehöriger Symptome. So wird beispielsweise trockenes Raumklima durch trockene oder gereizte Schleimhäute, Augen oder Haut beurteilt. Während die meisten Studien keinen oder nur schwache Unterschiede zwischen dem allgemeinen Trockenheitsempfinden bei niedrigen und mittleren Feuchten finden, werden signifikant trockenere Haut und Augen ab Feuchten unter 30 % sowie bei sehr niedrigen Feuchten um die 10 % auch Nasenschleimhäute berichtet (siehe z.B. Andersen et al. (1974), Wyon et al. (2002), Sunwoo et al. (2006), Tsutsumi et al. (2007)).

Bewertung des (hygro-)thermischen Raumklimas in Flugzeugkabinen

Während fast alle Studien des Kabinenklimas die Lufttemperatur und meist auch die Feuchte berichten, wird nur in vereinzelten Studien eine Bewertung anhand von Indizes oder Befragungen von Crew oder Passagieren durchgeführt.

Haghighat et al. (1999) haben aus ihren Messungen in 43 Flügen den PMV und PPD unter der Annahme einer durchschnittlichen metabolischen Rate von 1,2 met, eines Bekleidungsdämmwertes von 1,0 clo und einer mittleren Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s berechnet. Nach ihnen bewegt sich der PMV in einem Intervall von -0,31 bis -1,26 (also in einem neutralen bis kühlen Bereich) was in einem PPD von 7 % bis 38 % resultiert.

In der Studie von Lee et al. (2000a) wurden Crewmitglieder einer Airline bezüglich Komfort und Symptomen befragt. Während die Temperatur meist als „genau richtig" bewertet wurde, ist die Feuchte fast ausschließlich als trocken oder zu trocken bzw. größtenteils als (sehr) unkomfortabel beurteilt worden. Auch von den untersuchten subjektiven Symptomen wurden jene hinsichtlich trockener Nase, Augen, Haut und Rachen am schlechtesten bewertet und erreichten Beschwerderaten über moderate bis schwerwiegende Symptome zwischen 57 % und 74 %. Auch in der Studie von Rankin et al. (2000) finden sich bei einer Befragung von Passagieren die Symptome bezüglich Trockenheit unter den schlechter bewerteten. Auch bei der Befragung von Lindgren et al. (2000) gaben die meisten Flugbegleiter im Wochenrückblick an, dass Trockenheit ein Problem war (75 %), was bei einem Odds Ratio von 5,68 ein signifikant größerer Anteil war, als bei einer Vergleichsgruppe aus Büroangestellten (20 %). Mit Temperaturen und Zugluft waren hingegen nur 22 % bis 25 % der Flugbegleiter unzufrieden. In einer späteren Untersuchung berücksichtigten Lindgren und Norback (2005) die gesamte Crew im Vergleich zu Büroangestellten, wobei die Problematik der Beschwerden über trockene Luft mit 53 % gegenüber 26 % bei einem hoch signifikanten Odds Ratio von 5,38 bestätigt werden konnte.

Nagda und Hodgson (2001) berichten in ihrem Review des Problems der geringen Feuchte in Flugzeugkabinen, dass Probanden meist nicht in der Lage waren geringe Luftfeuchten oder Feuchteänderungen wahrzunehmen, wobei die Wahrnehmung der Luftfeuchte nicht während der Expositionen variierte. Geringe relative Feuchte führt jedoch zum Austrocknen von Haut und Schleimhäuten und verursacht Irritationen und Diskomfort der Augen, wobei diese Effekte mit der Zeit zunehmen. Somit kann geringe Luftfeuchte zu Sick-Building Syndromen beitragen, wie Irritation von Augen, Haut und oberen Atemwegen, aber auch Kopfschmerzen und Müdigkeit.

Vor diesem Hintergrund berichten Lindgren et al. (2007) über ihre Studie der Bewertung des Kabinenklimas durch die Crew auf je zwei Flügen mit und ohne zusätzlicher Befeuchtung. Temperatur- und Zugluftbewertung befanden sich meist im neutralen bzw. komfortablen Bereich und unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Bedingungen. Obwohl sich die Feuchten mit 12 % und 11 % gegenüber 22 % und 14 % nicht stark unterscheiden, berichten sie einen signifikanten Unterschied hinsichtlich ihrer Bewertung: nicht zusätzlich befeuchtete Flüge wurden trockener beurteilt. In einer Laborstudie in einer simulierten Flugzeugumgebung mit kontrollierten Zuluftmengen, die in mittlere Feuchten von 6,8 % bis 28,4 % resultierten, konnten Strom-Tejsen et al. (2006) diesen Unterschied nicht feststellen. Ein deutlicher Einfluss von geringer Feuchte zeigte sich jedoch auf die Trockenheit der Haut.

3.3.2 Vibro-Akustisches Raumklima

Für die Bewertung des vibro-akustischen Raumklimas existiert eine Vielzahl von Verfahren, welche ihre Schwerpunkte auf die vielen verschiedenen Charakteristika der sehr variablen zugrunde liegenden physikalischen Größen legen. Insbesondere für die Bewertung der Akustik gibt es diverse Summengrößen und Umrechnungsfunktionen. Diese werden zunächst beschrieben, bevor die wesentlichen Größen für die Bewertung von Vibrationen zusammengefasst werden.

Beurteilungsgrößen für das kombinierte vibro-akustische Raumklima konnten nicht identifiziert werden. Quehl (2001) hat für die Flugzeugumgebung von Jet- und Propellermaschinen erste kombinierte Untersuchungen durchgeführt. Sie kommt zu dem Schluss, dass beide Aspekte von Probanden nicht unabhängig voneinander beurteilt werden, wobei die Komfortbewertung durch die akustische Umgebung dominiert wird. In ihren Untersuchungen variierte der Hintergrundschall etwa zwischen 76 dB(A) und 82 dB(A) und das Vibrationslevel zwischen ca. 80 dB und 86 dB. Die affektive Bewertung der untersuchten Umgebungen wurde hauptsächlich mit den drei Dimensionen „Komfort“, „Veränderung“ und „Tonalität“ assoziiert. Komfort wurde dabei größtenteils durch die Adjektive „komfortabel“, „tragbar“ und „akzeptabel“, Diskomfort durch die Intensität der Wahrnehmung wie Lautheit, Rauhigkeit und Vibrationsattribute wie „vibrierend“ beschrieben.

Bewertung des akustischen Raumklimas

Die Hörempfindung ist, wie schon oben erwähnt, frequenzabhängig. Die Empfindung der Lautstärke ist bei Geräuschen mit gleichem Pegel, aber variierender Frequenzzusammensetzung unterschiedlich. Da Geräusche mit doppelter Laut-

stärke jedoch im Allgemeinen nicht als doppelt so laut bewertet werden, wird die Größe der Lautheit *N* mit der Einheit sone als lineare Beschreibung verwendet. Ein Sinuston der Frequenz 1000 Hz und der Lautstärke 40 dB hat per Definition eine Lautheit von 1 sone. Die Beziehung zwischen Lautheit *N* und Lautstärkepegel *L* kann nach DIN 45631 (1991) wie folgt ausgedrückt werden:

$$L = \begin{cases} 40 + 33{,}22 \lg(N) & \text{für } N \geq 1 \,\text{sone} \\ 40(N + 0{,}0005)^{0{,}35} & \text{für } N < 1 \,\text{sone} \end{cases} \tag{3.21}$$

Aufgrund der Beobachtung, dass Geräusche mit verschiedenen Frequenzkomponenten als verschieden laut wahrgenommen werden, je nachdem in welchem Frequenzband sich diese Komponenten befinden, führten Fletcher und Munson (1933) kritische Bandbreiten ein. Die Hörbarkeit eines Tones wird durch Komponenten innerhalb der kritischen Breite effektiv verschlechtert, d.h. innerhalb einer Frequenzgruppe beeinflussen sich die Komponenten gegenseitig. Insbesondere Basierend auf dieser Beobachtung leitete Zwicker (1961) die sogenannte kritische Bandrate *z* gemessen auf der Bark-Skala ab, welche die hörbaren Frequenzen *f* in 24 Frequenzgruppen mit der Größe von 1 Bark einteilt. Unterhalb von 500 Hz umfassen diese konstant ca. 100 Hz, oberhalb betragen diese Bandbreiten Δf_G etwa 20 % der Mittenfrequenz f_c. Näherungsweise können sie nach Fastl und Zwicker (2007) wie folgt berechnet werden:

$$z = 13 \arctan(0{,}00076\, f) + 3{,}5 \arctan(f / 7500)^2 , \tag{3.22}$$

$$\Delta f_G = 25 + 75 \left(1 + 1{,}4 \left(\frac{f_c}{1000} \right)^2 \right)^{0{,}69} . \tag{3.23}$$

Die kritische Bandbreite findet auch eine Interpretation im physiologischen Aufbau der Kochlea, für eine Diskussion dieser siehe auch Kauer (2003). Die spezifischen Lautheiten *N'* in den kritischen Frequenzbändern stehen schließlich nach Fastl und Zwicker (2007) mit der Lautheit *N* in Form einer Integration über alle Frequenzgruppen in Beziehung:

$$N = \int_{0\,\text{Bark}}^{24\,\text{Bark}} N' \, dz . \tag{3.24}$$

Eine weitere akustische Empfindungsgröße ist die sogenannte Schärfe *S*, gemessen in der Einheit acum, welche durch hochfrequente Anteile eines Geräuschs verursacht wird. Sie ist um so größer, je mehr hohe Frequenzen das Geräusch enthält. Per Definition hat ein Schmalbandrauschen (d.h. $\Delta f < \Delta f_G$) eines Sinustons von 1000 Hz und einem Lautstärkepegel von 60 dB eine Schärfe von

1 acum. Für die Berechnung der Schärfe existieren verschieden Modelle, Fastl und Zwicker (2007) schlagen folgende Formel vor:

$$S = 0{,}11 \frac{\int_{0\,\mathrm{Bark}}^{24\,\mathrm{Bark}} N' \, g(z) \, z \, dz}{\int_{0\,\mathrm{Bark}}^{24\,\mathrm{Bark}} N' \, dz}, \tag{3.25}$$

wobei *g(z)* ein frequenzbandabhängiger Faktor ist (siehe Fastl und Zwicker (2007), Seite 242). Neben diesen Größen definieren sie weitere zeitabhängige psychoakustisch relevante Größen:

- Schwankungsstärke *F*: diese wird in der Einheit vacil ausgedrückt und beschreibt die subjektive Empfindung der Lautstärkeschwankung.

- Rauhigkeit *R*: gemessen in der Einheit asper dient sie zur Bewertung von Klangbildern, welche ohne Veränderung der Lautheit als lästig empfunden werden. Dies sind beispielsweise Geräusche mit einem bestimmten Muster, welches das Gehör im Gegensatz zur Schwankung nicht mehr auflösen kann.

- Tonalität *T*: auch als Klanghaftigkeit bezeichnet, wird diese in der Einheit tu angegeben. Sie ist eine subjektive Beschreibung des Geräusches hinsichtlich eines klanglichen bzw. rauschartigen Charakters.

Basierend auf den obigen Größen formulieren Fastl und Zwicker (2007) die sensorische Angenehmheit *P*, die sich nur in einem relativen Zusammenhang darstellen lässt, welcher sich auf den Eindruck eines Sinustons bezieht. Sie geben diesen Zusammenhang wie folgt an:

$$\frac{P}{P_0} = e^{-0{,}7\,R/R_0} e^{-1{,}08\,S/S_0} \left(1{,}24 - e^{-2{,}43\,T/T_0}\right) e^{-(0{,}023\,N/N_0)^2}. \tag{3.26}$$

Die sensorische Angenehmheit hängt maßgeblich von der Schärfe ab, der Einfluss der Rauhigkeit ist etwas kleiner und in etwa gleich zu dem der Tonalität. Die Lautheit beeinflusst die Angenehmheit hauptsächlich für größere Werte ab ca. 20 sone.

Das bekannteste und meist verbreitete Bewertungsmaß für das akustische Raumklima ist der auf obiger Definition des Lautstärkepegels basierende A-bewertete Schalldruckpegel L_A, gemessen in dB(A). Angenähert an die Kurven gleicher Lautstärkewahrnehmung in Abbildung 3.16 wird bei diesem eine Korrektur der Lautstärken der einzelnen Frequenzen anhand einer A-Bewertungskurve vorgenommen. Für die entsprechende Berechnung siehe

Gleichung (5.32) und Tabelle 5.22. Der A-bewertete Schalldruckpegel korreliert gut mit der relativen menschlichen Lautstärkewahrnehmung, liefert jedoch keine spezifischen Informationen über den Einfluss der spektralen Verteilung der Frequenzen. Basierend auf dem A-bewerteten Schalldruckpegel von eingespielten Verkehrsgeräuschen ermittelten Clausen et al. (1993) einen Prozentsatz Unzufriedener mit dem spontanen Eindruck:

$$PD_{L_A} = 4{,}35 \int_{x=-\infty}^{L_A} \exp\left(-\left(\frac{x-58{,}6}{13{,}0}\right)^2\right), \tag{3.27}$$

wobei L_A im Intervall von 40 dB(A) bis 75 dB(A) variiert wurde. Mui und Wong (2006) geben eine Wahrscheinlichkeit der Zufriedenheit mit dem akustischen Raumklima in Bürogebäuden abhängig vom A-bewerteten Schalldruckpegel L_A an:

$$p_{\text{acceptable}} = \frac{e^{9{,}54-0{,}134\,L_A}}{1+e^{9{,}54-0{,}134\,L_A}}\,. \tag{3.28}$$

Diese Gleichung wurde aus Daten von 422 subjektiven Bewertungen in Büroräumen mit Hintergrundgeräuschen von 45 dB(A) bis 70 dB(A) gewonnen, welche in Wahrscheinlichkeiten der Zufriedenheit zwischen 97 % und 54 % resultieren.

Als alternativen Index zum bewerteten Schalldruckpegel führte Beranek (1957) die Noise Criteria (NC) Methode ein, um das Schallspektrum in einem Bereich von 63 Hz bis 8000 Hz zu erfassen. Bei dieser werden die Oktavbänder des aktuellen Spektrums mit den NC-Kurven verglichen, der vergebene Index bezieht sich sodann auf die kleinste nicht überschrittene Kurve. Dieser Index hat jedoch den Nachteil, dass Spektren, welche von einer bestimmten Frequenz dominiert werden, durch diese einen relativ schlechten Index zugewiesen bekommen, obwohl das Geräusch ansonsten recht leise erscheint. Des Weiteren werden tiefe Frequenzen nicht berücksichtigt. Mit der Balanced Noise Criteria Method (NCB) revidierte Beranek (1989) die NC Methode was vor allem in einer Erweiterung der Spektren bis zu 16 Hz resultierte. Auch werden Geräusche durch Sprechen stärker berücksichtigt und somit die Kurven vor allem im Bereich von 500 Hz bis 2000 Hz modifiziert. Damit ist die NCB Methode besser in der Lage ein nicht ausbalanciertes Spektrum zu bewerten.

Um die „Klangqualität“ mit in einen Index einfließen zu lassen führte Blazier (1981) das Room Criterion (RC) ein, welches auf umfangreiche Versuchen zu Schallpegel, spektraler Balance, tonalem Inhalt und Fluktuationen basiert. Dieser Index erlaubt es das Ausmaß der spektralen Balance mit zu berechnen. Als

Weiterentwicklung veröffentlichte Blazier (1997) die RC Mark II Rating Methode. Diese basiert auf der RC Methode mit einer Anpassung der Kurven vor allem im niederfrequenten Bereich. Eine zweite wesentliche Veränderung besteht im Berechnungsverfahren der qualitativen Klangcharakteristika, welches den quality assessment index (QAI) heranzieht, welcher eine Abschätzung der möglichen Reaktion eines Nutzers liefert.

Während die meisten Definitionen von Beurteilungskriterien für Räume in Gebäuden, insbesondere vor dem Hintergrund von installierter Anlagentechnik, entwickelt wurden, muss bei der akustischen Umgebung der Flugzeugkabine auf ihre spezifischen Charakteristika geachtet werden. Grundsätzlich ist dort eine relativ laute Umgebung vorzufinden. Ende 50er Jahre lag der Schalldruckpegel um die 95 dB (Kryter (1959)) und konnte auf aktuell etwa 74 dB(A) gesenkt werden (Bellmann et al. (2005)). Das Hintergrundgeräusch während eines Fluges ist relativ konstant mit einem großen Beitrag im Frequenzspektrum 31,5 Hz bis 500 Hz (Mellert et al. (2004)). Die hohen Geräuschpegel werden übereinstimmend in mehreren Studien als unangenehm laut identifiziert (siehe z.B. Spicer et al. (2004), Lindgren et al. (2000)). Letztere finden eine Beschwerderate der Crew über die Lautstärke in der Flugzeugkabine zwischen 41 % und 69 %, während sie bei Büroangestellten in dieser Studie bei lediglich 4 % lag. Daraus ermitteln Lindgren et al. (2000) ein Chancenverhältnis von gut 30, mit welchem sich Crewmitglieder im Vergleich zu Büroangestellten über die Lautstärke beschweren. Damit einher geht eine hohe Assoziation dieser Beschwerde mit einer empfundenen Belastung durch Arbeitsstress (Odds Ratio = 6,36). In dieser Studie bezieht sich die Befragung des Flugpersonals rückblickend auf die vergangene Woche. Trimmel et al. (2005) untersuchten Flugbegleiter während mehrerer Langstreckenflüge und berichten ebenfalls einen Zusammenhang von hohen Lautstärkepegeln und empfundener Arbeitsbelastung. Dies konnten sie jedoch nicht in simulierten Flügen bestätigen, was auf eine nicht vergleichbare Arbeitsumgebung für Flugbegleiter hindeutet – z.B. begründet durch eine Testdauer von lediglich drei Stunden. In dieser Studie finden Mellert et al. (2008) einen signifikanten Einfluss des Lautstärkepegels auf einige Symptome (wie Kopfschmerzen oder Müdigkeit), Gesamtzufriedenheit sowie Grad der Störung und Belästigung.

Um sowohl zwischen der Crew als auch den Passagieren Gespräche zu ermöglichen wird hier verstärkt auf die Ermöglichung der Sprachverständigung geachtet. Hierfür wurde von Beranek (1947) das Speech Interference Level (SIL) eingeführt, welches zunächst die Schalldruckpegel der drei Oktavbänder um 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz mittelt. Dies wird daher auch als SIL_3 bezeichnet, da Schultz (1968) ihn um den Pegel des Oktavbands um 500 Hz zum SIL_4 erweiterte. Webster (1969) verwendete für seine Version, den Preferred Speech

Interference Level (PSIL), lediglich die drei Oktavbänder um 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz. Alle drei Maße haben gemein, dass sie für die Sprachverständigung wesentliche Frequenzbänder integrieren, um ein Maß zu finden, bei welchem diese durch Maskierungseffekte der Hintergrundgeräusche beeinträchtigt wird. In den Richtlinien der FAA (Newman und Beattie (1985)) sind diese Lautstärkelevel in Beziehung zum Abstand zweier Personen im Flugzeug dargestellt (Abbildung 3.20), bei welchem eine Kommunikation mit normaler Stimme, Schreien oder nur noch unterstützt möglich ist.

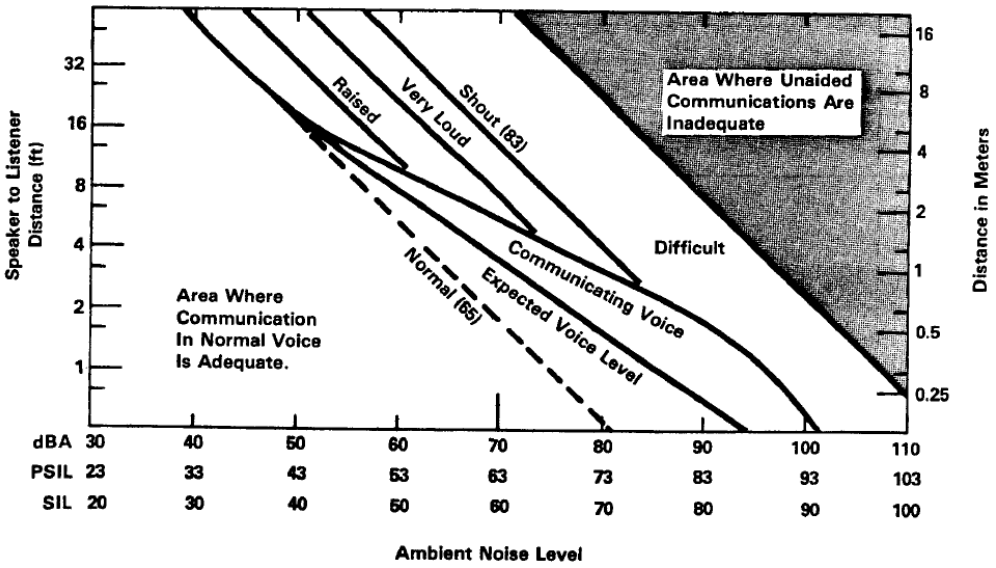


Abbildung 3.20: Zulässiger Abstand zwischen einem Sprecher und Hörern für die angegebenen Sprechstärken und Umgebungslautstärken, aus Newman und Beattie (1985).

Bewertung von Vibrationen

Um die Auswirkungen von Ganzkörpervibrationen bewerten zu können, werden üblicherweise die zwei Kriterien nach ISO 2631-1 (1997) herangezogen: die root-mean-squared (*RMS*) Methode oder der vibration dose value (*VDV*). Die Verfahren basieren auf verschiedenen Wichtung der Amplituden der unterschiedlichen Frequenzen, unterschätzen jedoch beide den Einfluss vorübergehender Schocks. Diese werden in der Methode nach ISO 2631-5 (2004) berücksichtigt, welche die äquivalente statische kompressible Schockdosis S_{ed} für eine aufrecht sitzende Person ermittelt.

Während der *RMS*-Wert a_w der frequenzabhängigen gewichteten Beschleunigungen $a_w(t)$ keine Dosis darstellt, da er die zeitliche Komponente durch Integrieren entfernt,

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2(t)\,dt}\,, \tag{3.29}$$

ist der *VDV* eine Dosis, die speziell für die Analyse von Ganzkörpervibrationen aufgestellt wurde:

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4(t)\,dt}\,. \tag{3.30}$$

Die Wichtungsfaktoren für die Beschleunigungen $a_w(t)$ können der Norm entnommen werden. Treten Vibrationen in mehr als einer Achsrichtung auf, so werden die RMS-Werte der unabhängigen Komponenten a_{wi} gewichtet mit den Faktoren k_i zur Resultierenden a_v verrechnet:

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2}\,. \tag{3.31}$$

Die unterschiedlichen Wichtungsfaktoren werden von Bellmann et al. (2002) vor dem Hintergrund einer psychophysischen Interpretation diskutiert. Für die *VDV*-Dosis wird keine Vorschrift zur Berechnung einer Resultierenden gegeben. Für Sitze gibt die britische Norm BS 6841 (1987) unter Einbeziehung einer Dosis für die Rückenlehne (VDV_{xb}) an:

$$VDV_{total} = \sqrt[4]{VDV_{xs}^4 + VDV_{ys}^4 + VDV_{zs}^4 + VDV_{xb}^4}\,. \tag{3.32}$$

Für die Komfort-Bewertung wird in ISO 2631-1 (1997) die in Tabelle 3.8 dargestellte Skala für den durch Vibrationen erzeugten Diskomfort in Abhängigkeit von dem *RMS*-Wert vorgeschlagen. Maeda (2005) gibt einen Überblick über andere Angaben von a_w in der Literatur.

Tabelle 3.8: Skala für den durch Vibrationen erzeugten Diskomfort nach ISO 2631-1 (1997) und Maeda et al. (2008).

a_w in m/s² ISO 2631-1 (1997)	Diskomfort-Wertung	VG_t in „vib" Maeda et al. (2008)
< 0,315	nicht unkomfortabel	< 0,56
0,315 – 0,63	etwas unkomfortabel	0,56 – 0,87
0,5 – 1,0	ziemlich unkomfortabel	0,87 – 1,26
0,8 – 1,6	unkomfortabel	1,26 – 1,96
1,25 – 2,5	sehr unkomfortabel	> 1,96
> 2,0	extrem unkomfortabel	

Diese Skala wird von Maeda et al. (2008) für Ganzkörpervibrationen verschiedener Frequenzzusammensetzung verglichen mit einer alternativen Methode nach Miwa (1968). Bei dieser wird eine total vibration greatness VG_t berechnet. Diese basiert auf dem vibration acceleration level *VAL* mit der Einheit dB, welches sich, äquivalent zur Definition der Lautheit, auf eine Referenzbeschleunigung von $a_0 = 9{,}81 \cdot 10^{-3}$ m/s² bezieht:

$$VAL = 20 \lg\left(\frac{a}{a_0}\right). \tag{3.33}$$

Um verschiedene Schwingungen vergleichen zu können führt er den vibration greatness level *VGL* ein, welcher dem *VAL* bei 20 Hz entspricht. Für die Zusammensetzung der Vibration aus *n* Komponenten wird zunächst für jede Komponente die vibration greatness VG_i anhand der empirischen Formel

$$\lg VG_i = \begin{cases} 0{,}030\, VGL & \text{für } VG_i \le 1 \\ 0{,}023\, VGL & \text{für } VG_i > 1 \end{cases} \tag{3.34}$$

berechnet, womit sich mit der maximalen vibration greatness $VG_M = \max(VG_i)$ die total vibration greatness ergibt:

$$VG_t = VG_M + 0{,}3\left(\sum_{i=1}^{n} VG_i - VG_M\right), \tag{3.35}$$

welcher eine äquivalente Einheit zu den sone der Lautheit hat, die jedoch nicht näher benannt und hier als „vib" bezeichnet wird. Maeda et al. (2008) kommt zu dem Schluss, dass sich dieses Maß besser für die Komfortbewertung von Vibrationen eignet, als der *RMS*-Wert nach ISO 2631-1 (1997).

3.3.3 Luftqualität

Im Allgemeinen werden drei Haupteinflussgrößen auf die Luftqualität in Räumen benannt: die eingebrachte Luft, die Bioeffluenten der im Raum befindlichen Lebewesen sowie die Ausgasungen der vorliegenden Materialien, welche größtenteils über die flüchtigen organischen Substanzen (volatile organic compounds, VOCs) beschrieben werden können. Daneben haben auch sekundäre Größen wie Temperatur und Feuchte (und damit auch die Enthalpie) der untersuchten Luft einen Einfluss auf die Bewertung (siehe beispielsweise Fanger (2006)).

Um die Empfindung der Luftqualität durch Nutzer beurteilen zu können sind humanolfaktometrische Messungen üblich, in welchen durch Probanden Gasgemische bewertet werden. Dies geschieht meist anhand von bipolaren Fragebogenitems bezüglich der hedonischen Geruchswirkung (angenehm - unangenehm), empfundenen Luftqualität (akzeptabel - nicht akzeptabel), Geruchsintensität (stark – nicht wahrnehmbar) und/oder Erträglichkeit (unerträglich – nicht wahrnehmbar).

Hierfür wurden verschiedene Verfahren entwickelt, von denen im Folgenden einige aufgezeigt werden. Sie unterscheiden sich größtenteils in ihrer Herangehensweise durch eine Hinzuziehung einer vergleichenden Referenz, Dynamik des Verfahrens (d.h. die Art der Verdünnung der Geruchsprobe durch Neutralluft), die Auswahl der Probanden (trainierte oder untrainierte) und der Stichprobengröße. Da insbesondere letztere einen großen Kostenfaktor in der Untersuchung darstellen, wurde ihre Präzision in Mair et al. (2006) betrachtet. Sie kommen zu dem Schluss, dass für Beurteilungen der empfundenen Luftqualität oder der hedonischen Geruchswirkung 25 bis 30, für die der Geruchsintensität oder der Erträglichkeit sechs bis acht naive Probanden notwendig sind, um eine Standardabweichung kleiner 10 % innerhalb des Panels zu erreichen. Je nach Auswahl und Training der Probanden und der Verwendung eines Referenzgemisches weicht deren Bewertung und deren Standardabweichung erheblich ab (siehe Mair et al. (2006)).

Eine weit verbreitete Methode zur Bestimmung der Luftqualität wurde von Fanger (1988) mit den Einheiten olf und decipol eingeführt. Bei diesem bewerten Probanden die Qualität der dargebotenen Luft und es wird schlussendlich ein Prozentsatz Unzufriedener bestimmt. Die olfaktorische Emission wird hierbei in olf gemessen, wobei 1 olf der Emission durch eine Standardperson (ein sitzender Erwachsener, der 0,7 Bäder pro Tag nimmt, bei thermisch komfortabler Bürotätigkeit) entspricht. Die Konzentration C dieser Emission in der untersuchten Luft wird in decipol angegeben, wobei sich 1 decipol durch die Emission

von 1 olf bei einer Lüftungsrate von 10 l/s ergibt. Anhand einer großen Stichprobe wurde der Zusammenhang zwischen der Lüftungsrate *q* je olfaktorischer Belastung und dem Anteil Unzufriedener *PD* in Prozent ermittelt:

$$PD_{olf} = \begin{cases} 395\, e^{-1{,}83\sqrt[4]{q}} & \text{für } q \geq 0{,}32 \text{ l/s/olf} \\ 100 & \text{für } q < 0{,}32 \text{ l/s/olf} \end{cases}. \tag{3.36}$$

Für den Anteil Unzufriedener in Abhängigkeit der Konzentration *C* in decipol ergab sich:

$$PD_{decipol} = \begin{cases} 395\, e^{-3{,}25\sqrt[4]{C}} & \text{für } C \leq 31{,}3 \text{ decipol} \\ 100 & \text{für } C > 31{,}3 \text{ decipol} \end{cases}. \tag{3.37}$$

Da für die Bewertung durch ein naives Panel eine große Anzahl Probanden benötigt wird, wurde von Bluyssen (1990) ein Verfahren mit anhand eines Acetongasgemisches als Referenz trainierten Personen, welche die empfundene Luftqualität direkt in decipol angeben können, entwickelt.

Eine Kritik an diesem Verfahren ist, dass sämtliche Geruchsstoffe in der Maßeinheit olf gleichgestellt sind und dieses somit stoffunabhängig ist. Müller et al. (2004) ermittelten die Geruchsschwellen in GE von verschiedenen Geruchsproben und verglichen diese mit der empfundenen Luftqualität in decipol. Die Geruchseinheit GE nach DIN EN 13725 (2003) ist ebenfalls unabhängig von der stofflichen Zusammensetzung des Geruchs und ist jene Stoffmenge, die - verteilt in 1 m³ Neutralluft - gerade die Geruchsempfindung auslöst. An der Geruchsschwelle beträgt die Geruchsstoffkonzentration also definitionsgemäß 1 GE/m³. Abhängig von den Bestandteilen der untersuchten Gasgemische wichen die Geruchsschwellen bei gleicher empfundener Luftqualität erheblich voneinander ab. Daher schlagen sie ein zweistufiges Bewertungsverfahren von, in welchem zunächst die empfundene Geruchsintensität Π ermittelt wird und anschließend anhand einer Übertragungsfunktion daraus die empfundene Luftqualität ermittelt wird. Während der zweite Schritt noch unbekannt ist, geben sie für ersteren die logarithmischen Kennlinien abhängig vom substanzspezifischen Parameter *a* an

$$\Pi = a \lg\left(C / C_0\right), \tag{3.38}$$

wobei C_0 die Konzentration der Substanz an der Geruchsschwelle ist. Zur Ermittlung dieser Kennlinien müssen also mindestens zwei Versuche je Substanz bei unterschiedlichen Konzentrationen durchgeführt werden. *n* Geruchsintensitäten können somit wie folgt addiert werden:

$$\Pi_{ges} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i \lg\left(\sum_{i=1}^{n} 10^{\Pi_i / a_i}\right). \tag{3.39}$$

Basierend auf dem gleichen Prinzip schlägt Jokl (2000) Geruchslevel L_{odour} in den Einheiten dCd (decicarbdiox) und dTv (decibel TVOC) vor, welche die Geruchsintensität der Raumluft durch Konzentrationen von Kohldendioxid $\rho_{i\,CO_2}$ in mg/m³ und total volatile organic compounds (TVOC) $\rho_{i\,TVOC}$ in µg/m³ angeben:

$$L_{odour(CO_2)} = 90 \lg\left(\frac{\rho_{i\,CO_2}}{875}\right) \text{ und } L_{odour(TVOC)} = 50 \lg\left(\frac{\rho_{i\,CO_2}}{50}\right). \tag{3.40}$$

Da das Konzept der logarithmischen Kennlinien für die Geruchsintensitäten die Aufklärung sämtlicher in der zu beurteilenden Luft vorhandenen Substanzen erfordert, ist es für eine schnelle Beurteilung der Luftqualität nur bedingt geeignet. Der von Sofuoglu und Moschandreas (2003) vorgeschlagenen Indoor Air Pollution Index (*IAPI*) verwendet daher lediglich acht der bekannten wesentlichen Indikatoren für die Innenraumluftqualität: Formaldehyd (HCHO), TVOC, Kohlenmonoxid, Radon, Staubpartikel bis 2,5 µm und 10 µm Durchmesser, Pilze und Bakterien – andere und mehr Indikatoren sind denkbar. Diese werden anhand von gemessenen Konzentration (max = 95 %-Perzentil, min = 5 %-Perzentil, obs = Mittelwert) sowie Grenzwerten (dmc) gewichtet und nach einer geschachtelten Gleichung durch Bildung von Subindizes aufsummiert:

$$IAPI = \frac{1}{I}\sum_{i=1}^{I}\frac{1}{J}\sum_{j=1}^{J}\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K} 10\left(1 - \frac{C_{i,j,k}^{\max} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{\max} - C_{i,j,k}^{\min}} \frac{C_{i,j,k}^{dmc} - C_{i,j,k}^{obs}}{C_{i,j,k}^{dmc}}\right). \tag{3.41}$$

Hierbei bilden die K=8 Indikatoren J=4 Subsubindizes, die zu I=2 Subindizes zusammengefasst werden, welche schlussendlich den *IAPI* bilden.

Einen alternativen Index haben Sekhar et al. (2003) entwickelt, den Indoor Pollutant Standard Index (*IPSI*). Bei diesem werden die Indikatoren zunächst anhand einer Kennlinie auf ein Index im Intervall [0;10] normiert, welche durch stückweise lineare Funktionen approximiert wird. Dabei wird das *j*-te Teilstück gewählt, in dessen zugehörigem Konzentrationsintervall $[C_{i,j};C_{i,j+1}]$ die Konzentration C_i des betrachteten *i*-ten Indikators liegt:

$$I_i = \frac{I_{i,j+1} - I_{i,j}}{C_{i,j+1} - C_{i,j}}\left(C_i - C_{i,j}\right) + I_{i,j}, \tag{3.42}$$

wobei $I_{i,j}$ die zugehörigen Abschnitte im Intervall [0;10] sind. Der *IPSI* ist schließlich das Maximum aus den gewählten *n* Indikatoren:

$$IPSI = \max(I_1,...,I_n). \tag{3.43}$$

Sekhar et al. (2003) schlagen als Indikatoren Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Formaldehyd, TVOC, Bakterien-, Pilz- und Staubbelastung sowie den Index *PPD* für thermischen Komfort vor. Damit berücksichtigen sie im Grunde einen weiteren Parameter zur Beurteilung des Raumklimas, welcher wohl aufgrund des Einflusses der sekundären Effekte Temperatur und Feuchte (und somit der Enthalpie) mit der Beurteilung der Luftqualität interagiert.

Dieser Einfluss der Enthalpie wurde umfangreich von Fang et al. (1998a) untersucht. Sie kommen in ihren Untersuchungen zu dem Schluss, dass die Akzeptanz von Innenraumluft linear mit der Enthalpie zusammenhängt und mit steigender Temperatur und Feuchte absinkt. Unabhängig von den jeweiligen Konditionen unterschied sich die Akzeptanz der Luft in den Prüfräumen nach zwanzig Minuten nicht signifikant vom ersten Eindruck nach einer sprunghaften Änderung von Temperatur und Feuchte. Die Geruchsintensität hingegen war nicht von Temperatur und Feuchte abhängig. Die gleichen Resultate erhielten Fang et al. (1998b) bei der Untersuchung von Geruchsemissionen in einer Prüfkammer. Bei steigender Geruchsbelastung sank hier der Einfluss von Temperatur und Feuchte auf die empfundene Luftqualität, während bei steigender Temperatur und Feuchte der Einfluss der Geruchsbelastung sank. Nach der Ermittlung der Akzeptanz Acc_0 eines Gasgemisches bei Referenzbedingungen von 23°C und 50 % relativer Feuchte (d.h. bei Normaldruck einer Enthalpie von h_0 = 45,39 kJ/kg) geben sie den folgenden Zusammenhang zwischen Enthalpie *h* und Akzeptanz *Acc* an:

$$Acc = Acc_0 - 0{,}0247(h - h_0) - 0{,}0416\ Acc_0\ (h - h_0). \tag{3.44}$$

Zu vergleichbaren Ergebnissen kommt Böttcher (2003) für untrainierte Probanden. Trainierte Probanden hingegen scheinen weniger den Gesamteindruck der Luft zu bewerten, sondern sich eher auf eine Beurteilung der Intensität zu konzentrieren. Auch auf diese haben Temperatur und Feuchte einen Einfluss, welcher sich jedoch nicht einfach durch einen linearen Zusammenhang mit der Enthalpie formulieren lässt.

Nachdem gerade in dicht belegten Flugzeugkabinen mit einer geringen Kontrolle der Nutzer über die zur Verfügung gestellte Luftmenge und ihren Frischluftanteil häufig die Luftqualität Gegenstand von Beschwerden ist, wurden zahlreiche Studien zu ihrer Beurteilung durchgeführt, einen Überblick gibt z.B.

Nagda (2000). Aus einigen von ihnen resultierte die Empfehlung des National Research Council (1986) eines grundsätzlichen Rauchverbots an Bord von Flugzeugen. Dieses wurde schrittweise eingeführt – 1988 auf Flügen mit einer Dauer weniger 2 h, 1989 wurde es ausgedehnt auf Flüge mit einer Dauer weniger 6 h (siehe National Research Council (2002)), was mittlerweile zu fast vollständigen Rauchverboten an Bord von Flugzeugen geführt hat. Viele der Studien bezüglich Luftqualität wurden im Rahmen dieser Umsetzung durchgeführt, beispielsweise Lindgren (2003). Ein Großteil der Studien konzentrierte sich auf die Messung von Substanzen als Indikatoren. Mehrere erhoben auch anhand von Fragebögen die empfundenen Symptome von Passagieren – hauptsächlich der Crew – von denen einige ebenfalls nach der empfundenen Luftqualität fragten. Prinzipielle Zusammenhänge wurden aus diesen Studien nicht abgeleitet. Die empfundene Luftqualität spielt nach Rankin et al. (2000) eine dominierende Rolle in der Bewertung des Gesamtkomforts, die Untersuchungen von Pierce et al. (1999) hingegen identifizieren Items der Luftqualität als weniger wichtig im Vergleich zum Sitzplatz und der Trockenheit. Nagda und Hodgson (2001) kommen in ihrem Review zu dem Schluss, dass die empfundene Intensität stickiger Luft mit zunehmender relativer Feuchte steigt, während die Akzeptanz der Luft sinkt. Dieser Trend wird auch durch die Untersuchung von Lindgren et al. (2007) unterstützt.

3.3.4 Einflüsse kombinierter Raumklimaparameter

Zu Einflüssen kombinierter Raumklimaparameter konnten nur vereinzelte Untersuchungen gefunden werden. Obwohl das Raumklima ausschließlich in seiner Gesamtheit bewertet wird, wurde dieses komplexe Thema vor dem Hintergrund der Entwicklung von Beurteilungsgrößen für dominierende Einzelfaktoren nur wenig untersucht. Eine allgemein diskutierte und akzeptierte Systematik existiert nicht. Im Folgenden wird ein Überblick über gefundene Zusammenhänge zwischen den Raumklimaparametern Temperatur, Schall, Luftqualität und Licht gegeben.

Temperatur und Schall

Eine der ersten systematischen Untersuchungen, um Interaktionseffekte zwischen Raumklimaparametern festzustellen, wurde von Dean und McGlothlen (1965) durchgeführt. Um die Arbeitsbedingungen von Piloten bewerten zu können wurden diese in einer Testumgebung bei simulierten Tätigkeiten und verschiedenen Temperaturen und Schalldruckpegeln untersucht. Während die Komfortbewertung der Testpersonen signifikant sowohl von der Temperatur als auch vom Schalldruckpegel abhing, konnte kein Interaktionseffekt festgestellt

werden. Auch Grether et al. (1971) konnten keine Interaktionseffekte bei der Untersuchung von Piloten in einer Testumgebung mit den Stressfaktoren Hitze, Lärm und Vibration gegenüber üblichen Bedingungen feststellen. Entgegen der Erwartung fanden sie einen Trend zu antagonistischen Interaktionen, welcher sich in einer zweiten Untersuchungsreihe bestätigte (Grether et al. (1972)), d.h. bei einer Erhöhung zweier Faktoren fallen die Einzelbewertungen schwächer aus als die entsprechenden bei der Erhöhung nur eines einzelnen. Bei ihren Untersuchungen zum Einfluss von Schall auf die thermische Wahrnehmung kamen Fanger et al. (1977) zu dem Ergebnis, dass Probanden keine verschiedenen Temperaturen für thermische Neutralität bei Schalldruckpegeln von 40 dB(A) oder 85 dB(A) bevorzugen. In ihrem Review der kombinierten Effekte von Hitze und Lärm kommen Hancock und Pierce (1985) hingegen zu dem Schluss, dass beide Raumklimaparameter größtenteils unabhängig agieren, jedoch ein synergistischer Effekt in Betracht gezogen werden sollte. Für den spontanen Eindruck in verschiedenen Umgebungen ermittelten Clausen et al. (1993), dass der Anteil Unzufriedener sich bei einer Änderung der operativen Temperatur um 1°C äquivalent zu einer Änderung des Lautstärkepegels um 3,9 dB verhält. Ein fast identisches Ergebnis erhielten Alm et al. (1999) mit 3,8 dB. Witterseh et al. (2002) berichten einen additiven Effekt von Temperatur und Lärm auf die Akzeptanz des allgemeinen Raumklimas, die Bewertung des thermischen Raumklimas hingegen war lediglich von der Temperatur determiniert. Pellerin und Candas (2004) hingegen fanden einen Effekt des Lautstärkepegels auf die thermische Komfortbewertung, wobei kein Effekt auf die thermische Wahrnehmung und Präferenz festzustellen war. Die Temperatur hatte auch auf die Bewertung des akustischen Raumklimas einen Effekt. Auch Hellwig et al. (2006) fanden in den Antworten aus Befragungen in Bürogebäuden eine höhere Wahrscheinlichkeit unkomfortabel warmer Bewertungen bei lauten und störenden Umgebungen. Den kombinierten Einfluss beider Raumklimaparameter, sowohl auf die thermische, als auch auf die akustische Komfortbewertung fanden ebenso Nagano und Horikoshi (2005). Anhand ihrer Resultate schlagen sie Äquikomfortlinien für die Komfortbewertungen in Abhängigkeit der operativen Temperatur und des A-bewerteten Schalldruckpegels vor.

In ihrer Untersuchung von Flugbegleitern finden Trimmel et al. (2005) mit Hilfe eines Modells eine Abhängigkeit der Motivation von Temperatur und Schallpegel. In simulierten Flügen wird die Motivation unabhängig von der Temperatur bei hohen Schallpegeln (> 72 dB(A)) als gering gefunden, bei niederen Schallpegeln hat sie jedoch einen Einfluss. In realen Flügen hingegen ist die Motivation generell relativ hoch, nimmt jedoch bei hohen Schallpegeln kombiniert mit niedrigen Temperaturen (< 22°C) ab.

Temperatur und Luftqualität

Ein Zusammenhang zwischen der Bewertung des thermischen Raumklimas und der Luftqualität ist aufgrund der Abhängigkeit der Beurteilung der Luftqualität von der Enthalpie der dargebotenen Luft (siehe Kapitel 3.3.3) offensichtlich. Clausen et al. (1993) finden eine Äquivalenz auf den Anteil Unzufriedener von der Änderung der Temperatur um 1°C und einer Änderung der Luftbelastung um 2,4 decipol. Ein Effekt von Temperatur auf die empfundene Luftqualität wurde auch von Alm et al. (1999) aufgezeigt, indem bei verschiedenen Temperaturen die Luft mit Ausgasungen verschiedener Materialien belastet wurde. Sie kommen im Gegensatz zu der vorgenannten Studie auf eine Äquivalenz von Änderungen um 1°C und 7 decipol (bei 26°C). Auch Balazova et al. (2007) berichten über einen Einfluss der Temperatur auf die empfundene Luftqualität. Ein umgekehrter Effekt war nicht zu erkennen. Die Gesamtakzeptanz sank bei warmen Konditionen oder schlechterer Luftqualität gegenüber der Referenzsituation. Wurden beide Parameter geändert nahm sie stärker ab. In ihrer Studie finden Sekhar et al. (2000) ebenfalls einen signifikanten Zusammenhang zwischen empfundener Luftqualität und thermischem Komfort: bei sinkender thermischer Zufriedenheit nimmt die empfundene Luftqualität ab.

Temperatur und Licht/Farbe

Für farblich extrem unterschiedlich beleuchtete Räume – rot und blau – haben Fanger et al. (1977) einen Einfluss der Lichtfärbung auf die thermische Wahrnehmung bei thermischer Neutralität gefunden: bei rotem Licht bevorzugten Probanden eine um 0,4°C niedere Temperatur als bei blauem Licht. Nachdem diese Konditionen jedoch unrealistisch extrem sind, kommen sie zu dem Schluss, dass der Effekt vernachlässigbar klein ist. Laurentin et al. (2000) fanden ebenfalls eine Tendenz der Farbtemperatur die visuelle und thermische Komfortbewertung zu beeinflussen. In ihrer Studie variierte die gemessene Farbtemperatur zwischen etwa 6000 K und 8500 K. Die thermischen Konditionen (ca. 20,5°C und 27,5°C bei Bekleidungsdämmwerten von 0,5 clo und 0,8 clo) hatten jedoch keinen Einfluss auf den visuellen Komfort.

Schall und Luftqualität

In ihrer Studie ermittelten Clausen et al. (1993) ebenfalls eine Äquivalenz der Änderung von 1 decipol mit der Änderung des Lautstärkepegels um 1,2 dB, für Luftbelastungen kleiner 10 decipol. Witterseh et al. (1999) berichten über einen Interaktionseffekt von Lautstärkepegel und Luftbelastung durch einen alten Teppich bezüglich Sick-Building-Symptomen (SBS). Sie finden jedoch keine Beeinflussung der empfundenen Luftqualität durch Lärm bzw. der akustischen

Komfortbewertung durch die Luftqualität. Auch Alm et al. (1999) finden keine gegenseitige Abhängigkeit der Bewertungen. Ein Ergebnis der Untersuchungen von Balazova et al. (2007) hingegen zeigt, dass höhere Lautstärkepegel einen signifikanten Einfluss auf die Akzeptanz der Luftqualität haben, wenn erhöhte Temperaturen und Luftbelastung vorliegen. Auf die Bewertung des akustischen Raumklimas scheint die Luftqualität hingegen keinen Einfluss zu haben.

Schall und Farbe

Die Lautheit von Vorbeifahrgeräuschen von Fahrzeugen wird nach Studien von Fastl (2004) durch den visuellen Reiz ihrer Farbe beeinflusst, Geräusche wurden bei der Betrachtung roter Züge lauter beurteilt als bei hellgrünen oder blauen. Weitere Untersuchungen von Menzel (2007) bestätigen diesen Effekt, wobei sie ihn neben der Präsentation von roten auch bei dunkelgrünen Sportwagen im Vergleich zu hellgrünen oder blauen fanden. Im Schnitt wurden dunkelgrüne und rote Autos um 1 dB lauter bewertet, wobei Differenzen bis zu 3 dB auftraten. Sollten Probanden jedoch die Schallpegel bei der Betrachtung verschieden gefärbter Sportwagen gleich laut wie bei Präsentation eines Referenzschalls bei einem anders gefärbten Auto einstellen, konnte kein Unterschied festgestellt werden. Menzel et al. (2008) stellen vor diesem Hintergrund die Hypothese auf, dass die Farbgebung einen Einfluss auf die Beurteilung des Schalls, jedoch nicht auf seine Wahrnehmung haben könnte.

Temperatur, Schall und Luftqualität

Über das gemeinsame Wirken der Raumklimaparameter Temperatur, Schall und Luftqualität machen Clausen et al. (1993) in ihrer Analyse keine Aussage. Auch Alm et al. (1999) stellen lediglich Schlussfolgerungen für die einzelne Wirkung auf und ermitteln mit Hilfe logistischer Regression den Anteil Unzufriedener zu

$$PD(t_o, L_A, C) = 100 / \left(1 + e^{22{,}1 - 0{,}57\, t_o - 0{,}15\, L_A - 0{,}29 \ln(C)}\right), \tag{3.45}$$

welche für 26°C ≤ t_o ≤ 29,6°C und 45 dB(A) ≤ L_A ≤ 51 dB(A) sowie 1 decipol ≤ C ≤ 4,5 decipol gültig ist. Basierend auf den aus der Literatur bekannten Beziehungen für die thermische, akustische und olfaktorische Bewertung des Raumklimas – *PPD* (Gleichung (3.11)), PD_{L_A} (Gleichung (3.27)) und $PD_{decipol}$ (Gleichung (3.37)) – schlagen Shi und Tao (1996) den Comprehensive Comfort Evaluation Index CPD vor:

$$CPD = 0{,}6738\, PPD + 0{,}1007\, PD_{L_A} + 0{,}2255\, PD_{decipol}\,, \tag{3.46}$$

welcher ebenfalls einen Anteil Unzufriedener angibt. Balazova et al. (2007) berichten, dass die Komfortbewertung signifikant schlechter als in einer guten Referenzkonfiguration ist, wenn die Lufttemperatur, Schalldruckpegel und/oder die Luftbelastung hoch eingestellt werden. Hierbei hat schlechte Luftqualität einen geringeren Einfluss als höhere Temperaturen oder Lautstärkepegel.

Temperatur, Schall und Licht

Eine Studie über die Einflüsse von Temperatur, Schall und Licht auf die wahrgenommene Arbeitsumgebung wurde von Yamazaki et al. (1998) durchgeführt. Sie änderten die Lufttemperatur zwischen 19°C und 29°C, die Beleuchtungsstärke auf dem Schreibtisch zwischen 75 lx und 1500 lx sowie den Schalldruckpegel der Aufnahme eines Ventilators zwischen 40 dB(A) und 60 dB(A). Sie befragten bei den verschiedenen Kombinationen acht bis 16 Probanden bezüglich Arbeitstauglichkeit der Umgebung, thermischem, visuellem und akustischem Komfort, während diese simulierte Bürotätigkeiten ausüben mussten. Mittels einer Kovarianzanalyse wurde der Einfluss der Umgebungsparameter auf die subjektive Arbeitstauglichkeit geschätzt, wobei Interaktionsterme berücksichtigt wurden. Für die Effekte der Terme Temperatur T, Licht L, Temperatur × Licht TL und Temperatur × Schall TS verwendeten sie je eine exponentielle Funktion der Form $k_1 \exp(- k_2 (x - k_3)^2)$, für die Effekte der Terme Schall S und Licht × Schall LS je lineare Funktionen der Form $k_1 x + k_2$. Mit diesen berechneten Modellparametern schlagen sie folgendes Modell für die subjektive Tauglichkeit Φ eines Arbeitsplatzes in Abhängigkeit der untersuchten Raumklimaparameter vor:

$$\Phi = -T - L - S + TL + TS + LS + 2{,}375\,. \tag{3.47}$$

Die Gleichungen für die einzelnen Terme sind in Yamazaki et al. (1998) angegeben.

Temperatur, Schall, Luftqualität und Licht

Basierend auf einer Befragung von knapp dreihundert Büroangestellten und parallel durchgeführter Messung der raumklimatischen Größen operative Temperatur t_o, CO_2-Konzentration c, Schalldruckpegel L_A und Beleuchtungsstärke E ermittelten Wong et al. (2008) ein Modell für die Akzeptanz des Innenraumklimas. Anhand dichotomer Skalen wurde die Akzeptanz mit dem Raumklima allgemein, der thermischen Umgebung, der Luftqualität, dem Lärmpegel und dem Beleuchtungslevel erhoben. Mittels multivariater logistischer Regression wurden Zusammenhänge mit gemessenen raumklimatischen Größen geschätzt und schließlich ein logistisches Regressionsmodell der Gesamtakzeptanz Θ ermittelt. Die Akzeptanzen Φ geben Wong et al. (2008) wie folgt an:

$$\Phi_{t_o} = 1 - \frac{PPD}{100} \text{ , für } 18°C \le t_o \le 25°C \text{ ,} \tag{3.48}$$

$$\Phi_c = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{1+e^{3,118-0,00215\,c}} - \frac{1}{1+e^{3,230-0,00117\,c}} \right) \text{ , für } 500 \text{ ppm} \le c \le 1800 \text{ ppm} \text{ ,} \tag{3.49}$$

$$\Phi_{L_A} = 1 - \frac{1}{1+e^{9,540-0,134\,L_A}} \text{ , für } 45 \text{ dB(A)} \le L_A \le 72 \text{ dB(A)} \text{ ,} \tag{3.50}$$

$$\Phi_E = 1 - \frac{1}{1+e^{-1,017+0,00558\,E}} \text{ , für } 200 \text{ lux} \le E \le 1600 \text{ lux} \text{ und} \tag{3.51}$$

$$\Theta = 1 - \frac{1}{1+e^{-15,02+6,09\,\Phi_{t_o}+4,88\,\Phi_c+4,74\,\Phi_{L_A}+3,70\,\Phi_E}} \text{ ,} \tag{3.52}$$

wobei der PPD nach Gleichung (3.11) ermittelt wird.

Überblick

Tabelle 3.9: Überblick über die wesentlichen gefundenen Literaturquellen, welche über Untersuchungen kombinierter Einflüsse der Raumklimaparameter Temperatur, Schall, Luftqualität und Licht/Farbe auf die Bewertung des Raumklimas berichten.

Raumklimaparameter				**Literaturquellen**
Temperatur	Schall	Luftqualität	Licht/Farbe	
x	x			Dean und McGlothlen (1965), Grether et al. (1971), Grether et al. (1972), Fanger et al. (1977), Hancock und Pierce (1985), Clausen et al. (1993), Alm et al. (1999), Witterseh et al. (2002), Pellerin und Candas (2004), Hellwig et al. (2006), Nagano und Horikoshi (2005)
x		x		Clausen et al. (1993), Alm et al. (1999), Balazova et al. (2007), Sekhar et al. (2000)
x			x	Fanger et al. (1977), Laurentin et al. (2000)
	x	x		Clausen et al. (1993), Witterseh et al. (1999), Alm et al. (1999), Balazova et al. (2007)
	x		x	Fastl (2004), Menzel (2007), Menzel et al. (2008)
		x	x	unbekannt
x	x	x		Clausen et al. (1993), Shi und Tao (1996), Alm et al. (1999), Balazova et al. (2007)
x	x		x	Yamazaki et al. (1998)
x		x	x	unbekannt
	x	x	x	unbekannt
x	x	x	x	Wong et al. (2008)

3.4 Statistische Grundlagen

Für die Bildung von Modellen der subjektiven Bewertung des Raumklimas müssen Personen nach eben dieser Bewertung befragt werden. Dies geschieht häufig anhand von Fragebögen, auf welchen Probanden Antwortmöglichkeiten präsentiert bekommen. Die für eine Auswertung notwendige Statistik unterscheidet sich hierbei aufgrund der häufig nicht zulässigen Annahme einer zugrundeliegenden Normalverteilung wesentlich von der Analyse bauphysika-

lisch üblicher Messdaten. Daher werden im Folgenden einige Grundlagen der Statistik, wie Begriffe der beschreibenden Statistik und die hier verwendeten nicht-parametrischen Hypothesentests sowie die Hauptkomponentenanalyse, beschrieben. Ebenfalls wird auf den Begriff der Kausalität eingegangen, welcher für die Modellbildung essenziell ist.

3.4.1 Beschreibende Statistik

Skalenniveau

Eine grundlegende Eigenschaft von Variablen in der Statistik ist das Skalenniveau. Variablen verschiedener Skalenniveaus beinhalten unterschiedlich umfangreiche Informationen, was direkte Auswirkungen auf zulässige logische und mathematische Operationen hat. Somit sind durch das Skalenniveau auch die anzuwendenden Analysemethoden bedingt, so dass die enthaltene Information nicht verändert wird, aber möglichst auch nicht verloren geht.

Grundsätzlich unterscheidet man in zwei große Klassen von Skalen: kategoriale Skalen, in welchen die Daten verschiedenen Kategorien zugewiesen werden, und kardinale Skalen, welche die Daten anhand einer Metrik sortieren.

Die kategorialen Skalen werden weiter unterteilt in:

- Nominalskala: qualitative Zuweisung von Kategorien. Es können Entscheidungen über Gleichheit und Ungleichheit getroffen werden.
  Beispiel: Gegenstand A ist blau, Gegenstand B ist grün und nicht blau.

- Ordinalskala: quantitative Zuweisung von Kategorien. Es können zusätzlich Aussagen über die Größe des Merkmals gemacht werden, über den Abstand zwischen zwei Merkmalausprägungen hingegen nicht. Zwei Merkmalausprägungen können also hinsichtlich ihrer Größe qualitativ verglichen werden.
  Beispiel: Raum A ist kalt, Raum B warm. Raum A ist also kälter als Raum B.

Um die Größe des Abstandes zwischen zwei Ausprägungen beurteilen zu können wird eine Metrik benötigt, je nach Qualität einer solchen Metrik unterscheidet man die kardinalen Skalen in:

- Intervallskala: Der Betrag des Abstands zwischen zwei Merkmalausprägungen kann bestimmt werden. Somit können zwei Merkmalausprägungen hinsichtlich ihrer Größe auch quantitativ verglichen werden.

Beispiel: Raum A hat eine Lufttemperatur von 21°C, Raum B von 25°C. In Raum B ist die Lufttemperatur folglich um 4°C wärmer.

- Ratioskala: Es existiert ein absoluter Nullpunkt. Es kann also zusätzlich das Verhältnis zwischen zwei Merkmalausprägungen bestimmt werden.
  Beispiel: Fluid A hat eine Temperatur von 200 K, Fluid B von 400 K. Fluid B ist doppelt so warm wie Fluid A.

Einen Überblick über die verschiedenen Skalen und ihre Unterschiede gibt Abbildung 3.21.

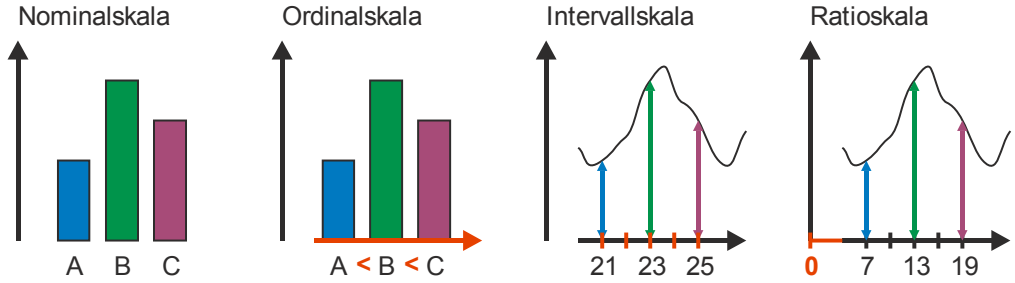


Abbildung 3.21: Darstellung der verschiedenen Skalen. Die jeweils hinzugekommenen Eigenschaften sind rot markiert: Ordinalskala: Rangfolge, Intervallskala: Abstände, Ratioskala: Nullpunkt.

Verteilung, Lage- und Streuungsparameter

Wurden auf einer Skala wiederholt Ausprägungen eines Merkmals gemessen, können diese anhand einer Häufigkeitsverteilung dargestellt werden. Möchte man über die Verteilung der Daten auf der Skala einen Überblick erhalten, bedient man sich Parametern der beschreibenden (deskriptiven) Statistik: den Lage- und Streuungsparametern. Während erstere die Lage der Daten auf der Skala mit Hilfe einer Mittelpunktsdefinition beschreiben, geben letztere eine Kennziffer der Verteilung um diesen Mittelpunkt an. Folgende Lageparameter werden üblicherweise verwendet:

- Modus (auch Modalwert): der häufigste Wert, Maximum einer Häufigkeitsverteilung. Verteilungen mit einem, zwei bzw. mehreren Maxima heißen unimodal, bimodal bzw. multimodal.

- Median (auch Zentralwert): der Wert, welcher die Merkmalausprägungen in zwei Hälften teilt. 50 % der Ausprägungen sind kleiner, 50 % sind größer als der Median. Er ist identisch mit dem 50 %-Perzentil.

- Arithmetisches Mittel (auch Durchschnittswert): das Mittel $\bar{x}$ aus einer Menge von n Werten nach der Gleichung

$$\bar{x}_{arithmetisch} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \ . \tag{3.53}$$

Gemeinhin wird unter dem Mittelwert das arithmetische Mittel verstanden. Auch in dieser Arbeit wird der Begriff Mittelwert als Synonym verwendet.

- Geometrisches Mittel: *n*-te Wurzel aus dem Produkt von *n* Werten nach der Gleichung

$$\bar{x}_{geometrisch} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} x_i} \ . \tag{3.54}$$

Im Gegensatz zu den Lageparametern sind Streuungsparameter erst ab einem Skalenniveau von ordinal skalierten Daten sinnvoll. Häufige Streuungsparameter sind:

- Spannweite: Distanz zwischen der minimalen und maximalen Ausprägung. Die Spannweite ist nicht robust gegenüber Ausreißern.

- Interquartilsabstand: Differenz zwischen dem oberen und unteren Quartil (75 %- und 25 %-Perzentil, d.h. diejenigen Werte, die größer als 75 % bzw. 25 % aller betrachteten Ausprägungen sind).

- Varianz: Durch die Anzahl der Messwerte geteilte Summe der quadrierten Abstände der Messwerte vom Mittelwert, berechnet nach

$$s^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \ . \tag{3.55}$$

Standardabweichung: die Quadratwurzel der Varianz,

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \ . \tag{3.56}$$

In Tabelle 3.10 sind die Skalenniveaus mit ihren möglichen logischen und mathematischen Operationen, sowie Lage- und Streuungsparametern zusammengefasst.

Tabelle 3.10: Vergleichende Zusammenstellung von Eigenschaften der verschiedenen Skalenniveaus.

Skalenniveau	mögliche Operationen	zusätzlicher Lage-parameter	zusätzlicher Streuungs-parameter	Beispiel
Nomialskala	=|≠	Modus		Farbe: A = blau, B = grün
Ordinalskala	=|≠ ; <|>	Median	Interquartils-abstand	Temperatur: A = kalt, B = warm
Intervallskala	=|≠ ; <|> ; +|–	Arithmeti-sches Mittel	Standard-abweichung	Temperatur: A = 21°C, B = 25°C
Ratioskala	=|≠ ; <|> ; +|– ; ×|÷	Geometri-sches Mittel		Temperatur: A = 200 K, B = 400 K

Je nach Größenordnung der Lageparameter kann auch die Schiefe einer Häufigkeitsverteilung charakterisiert werden:

- Links-schiefe Häufigkeitsverteilung: Mittelwert < Median < Modus
- Rechts-schiefe Häufigkeitsverteilung: Modus < Median < Mittelwert

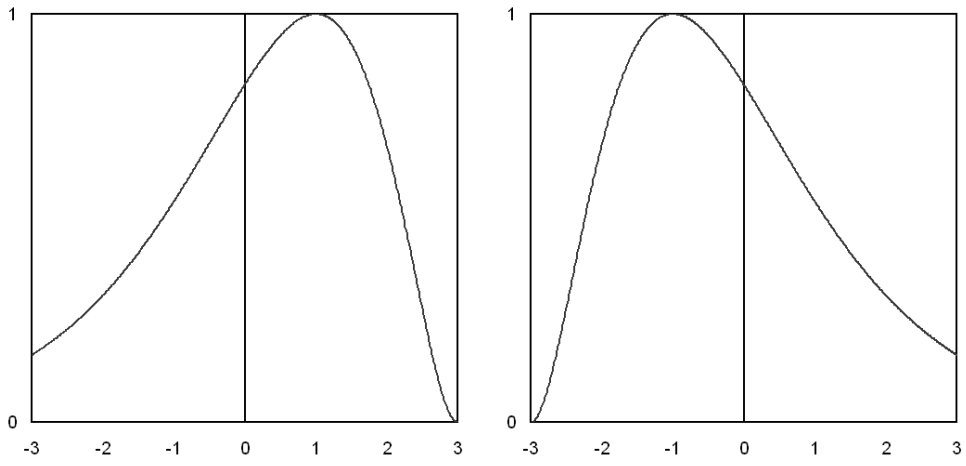


Abbildung 3.22: Links: links-schiefe Häufigkeitsverteilung. Rechts: rechts-schiefe Häufigkeitsverteilung.

Eine weit verbreitete Form der Darstellung von klassifizierten Daten ist der Box-Whisker-Plot auf der Grundlage der Definition nach Tukey (1977). Für eine Klasse werden über einem Zahlenstrahl ein Lageparameter, sowie Box und

Whisker für Streuungsparameter und separat milde und extreme Ausreißer eingezeichnet. Als Lageparameter wird meist der Median verwendet, die Box ist das durch unteres und oberes Quartil begrenzte Rechteck – es liegen also 50 % aller Daten innerhalb der Box. Die Whisker sind durch Linien gekennzeichnet, welche den minimalen bzw. maximalen Datenpunkt im Abstand des 1,5fachen Interquartilsabstands vom Median kennzeichnen. Datenpunkte im Abstand des 1,5fachen bis 3fachen Interquartilsabstands vom Median werden als milde Ausreißer bezeichnet und durch gefüllte Kreise gekennzeichnet. Datenpunkte, die weiter entfernt vom Median liegen, werden als extreme Ausreißer bezeichnet und durch leere Kreise symbolisiert. Ein Beispiel ist in Abbildung 3.23 dargestellt, eine ausführliche Beschreibung der Konstruktion findet sich in Anhang A.

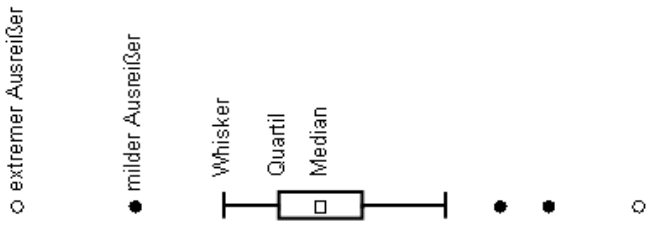


Abbildung 3.23: Darstellung eines Box-Whisker-Plots mit Ausreißern nach der Definition von Tukey (1977).

Kovarianz und Korrelation

Nachdem Daten jeweils durch ihre Verteilung, Lage- und Streuungsparameter beschrieben werden können, ist ein grundsätzliches Interesse der Untersuchung von Variablen, ob ihre Daten assoziiert sind bzw. in einem Zusammenhang stehen. Es sollen also Aussagen getroffen werden können, ob eine Veränderung der einen eine bestimmte Veränderung der anderen Variablen mit sich bringt – ob die Variablen kovariieren.

Eine wesentliche Maßzahl für einen solchen Zusammenhang wird dementsprechend Kovarianz genannt. Sie ist der Erwartungswert des Produkts der Abweichungen zweier Zufallszahlen X und Y von ihren Erwartungswerten:

$$\mathrm{COV}(X,Y) = \mathrm{E}((X - \mathrm{E}(X))(Y - \mathrm{E}(Y))). \tag{3.57}$$

Durch die Erhebung einer Stichprobe der Größe n kann die Kovarianz dieser Zufallszahlen aus den Werten x_i und y_i sowie ihren Mittelwerten mit der Stichprobenkovarianz geschätzt werden:

$$\mathrm{cov}(x,y) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}). \tag{3.58}$$

Nachteil der Kovarianz ist ihre Abhängigkeit von der Skalierung der Daten, weshalb sie keine Aussage über die Stärke des Zusammenhangs beinhalten kann. Daher wird sie meist in der standardisierten Form des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten verwendet. Dieser bezieht die Kovarianz auf die Standardabweichungen der Zufallsvariablen *X* und *Y*:

$$\rho(X,Y) = \frac{\mathrm{COV}(X,Y)}{\sqrt{\mathrm{VAR}(X,Y)}\sqrt{\mathrm{VAR}(X,Y)}}. \tag{3.59}$$

Dieser kann wiederum durch die Erhebung einer Stichprobe als empirischer Korrelationskoeffizient geschätzt werden:

$$r(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}. \tag{3.60}$$

Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei -1 einen perfekten negativen und 1 einen perfekten positiven Zusammenhang beschreibt. Ist $r(x,y) = 0$, so besteht kein Zusammenhang. Bei $|r(x,y)| > 0{,}1$ spricht man häufig von einem schwachen, bei $|r(x,y)| > 0{,}5$ von einem starken Zusammenhang (siehe z.B. Kenny (1987)).

Für den Korrelationskoeffizienten gelten die Annahmen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen *X* und *Y* existiert, wobei diese Zufallszahlen kontinuierlich und normalverteilt sind und voneinander unabhängig sind. Während nichtlinearen Zusammenhängen häufig mit einer entsprechenden Transformation der Variablen begegnet werden kann, sind die übrigen Annahmen fundamental. Die Ableitung eines Zusammenhangs ist grundsätzlich nur sinnvoll, wenn die Variablen unabhängig sind. Für den Fall einer Verletzung der verbleibenden Voraussetzungen der Kontinuität und der Normalverteilung hingegen konnten Verfahren entwickelt werden, die eine Schätzung der Korrelation ermöglichen. Diese polychorischen Korrelationen werden ausführlich in Kapitel 3.5.3 beschrieben.

Kausalität

Aus dem Vorhandensein einer Kovarianz oder Korrelation zweier Variablen kann jedoch keinesfalls auf einen kausalen Zusammenhang oder die Richtung

eines solchen geschlossen werden. Vielmehr kann *X* durch *Y* beeinflusst sein – aber auch umgekehrt. Oder es gibt eine oder mehrere Variablen, die zum Einen *X* und zum Anderen *Y* beeinflussen, so dass sie kovariieren.

Um eine Aussage treffen zu können, ob ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen *X* und *Y* besteht, muss eine Untersuchung dieser Beziehung von allen möglichen dritten Einflüssen isoliert werden. Eine vollständige Isolierung ist praktisch nicht erreichbar, jedoch wird häufig durch Kontrolle von Randbedingungen und Randomisierung der Untersuchungen versucht eine möglichst große Zahl von dritten Einflüssen auszuschließen. In statistischen Modellen werden die verbleibenden Einflüsse oft in Form von unbekannten, zu schätzenden Fehlervariablen berücksichtigt. Bei einer Schätzung dieser Fehlergrößen wird angenommen, dass sie nicht mit den erklärenden Variablen des Modells kovariieren (siehe Abbildung 3.24). Durch diese Annahme herrscht also im Modell eine Pseudo-Isolation, da die erklärenden Variablen unabhängig von dritten Einflüssen die zu erklärende Variable bestimmen.

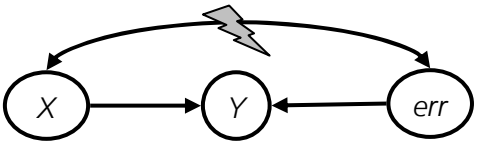


Abbildung 3.24: Psuedo-Isolation der Beziehung zwischen *X* und *Y* durch Einführung der mit *X* nicht kovariierenden Fehlergröße *err*.

Des weiteren muss hinterfragt werden, ob die Richtung des untersuchten kausalen Zusammenhangs korrekt angenommen wurde. Häufig lässt sich dies durch eine Plausibilitätsbetrachtung, beispielsweise über die zeitliche Abfolge der Variablen, überprüfen. Alternativ können auch randomisierte Tests verwendet werden: ändert sich *Y* bei zufällig eingestelltem *X*, so wäre es unplausibel, dass *Y* Ursache von Änderungen in *X* ist.

Gerade im Hinblick auf die in dieser Arbeit verwendeten Strukturgleichungsmodelle ist eine Beachtung der Problematik der Kausalität essenziell. Strukturgleichungsmodelle beruhen auf latenten Variabeln, für welche eine Assoziation mit den beobachtbaren Größen postuliert wird, die Isolation von dritten Einflüssen sowie die Richtung der Ursache-Wirkungs-Beziehung lässt sich jedoch kaum überprüfen. Eine ausführliche Diskussion dieser Problematik ist in Bollen (1989) und Kenny (2004) zu finden.

Zusammenfassend lässt sich Kausalität nur feststellen, wenn eine Zuordnung von Effekten vorgenommen, diese isoliert betrachtet und eine Wirkungsrichtung festgestellt werden kann. Modelle im Allgemeinen – also auch Struktur-

gleichungsmodelle – basieren auf der Annahme solcher kausalen Beziehungen, welche natürlich auch falsch sein können. Bollen (1989) betont daher, dass statistische Tests niemals Modelle oder die kausalen Beziehungen in ihnen auf Korrektheit prüfen können, sie können sie lediglich widerrufen.

3.4.2 Schließende Statistik

Hypothesen und Signifikanzniveau

Ein grundlegendes Konzept der schließenden Statistik ist das Testen von Datensätzen auf getroffene Hypothesen. Eine solche Hypothese kann sowohl die Verteilungsparameter einer einzelnen Grundgesamtheit betreffen oder auch Beziehungen zwischen mehreren Populationen. Eine statistische Hypothese besteht grundsätzlich aus zwei konkurrierenden Hypothesen: der Nullhypothese H_0 und einer Alternativhypothese H_1. Während erstere die Annahme von keinem Effekt (keinem Unterschied) repräsentiert, ist zweite gültig, falls ein Effekt (Unterschied) vorhanden ist. Typischerweise wird im Vorfeld einer Untersuchung davon ausgegangen einen Effekt festzustellen, es wird also erwartet, dass die Alternativhypothese gültig ist, die Nullhypothese hingegen verworfen werden muss. Tests der schließenden Statistik ermitteln vor diesem Hintergrund die Wahrscheinlichkeit p, mit welcher die Annahme der Alternativhypothese falsch ist. Daher spricht man häufig auch von der Irrtumswahrscheinlichkeit: „Wie wahrscheinlich ist es, dass ich mit der Behauptung, es läge ein Effekt (Unterschied) vor, irre." Hierbei können zwei Arten von Fehlern gemacht werden:

- Typ I-Fehler (α): H_0 wird verworfen, obwohl sie wahr ist. D.h. also, dass irrtümlicherweise geschlossen wird, dass ein Effekt (Unterschied) vorhanden ist.

- Typ II-Fehler (β): H_0 wird nicht verworfen, obwohl sie falsch ist. D.h. also, dass irrtümlicherweise geschlossen wird, dass kein Effekt (Unterschied) vorhanden ist.

Im Vorfeld eines schließenden Tests muss dementsprechend festgelegt werden, mit welcher Sicherheit die Annahme der Alternativhypothese wahr sein soll – das Signifikanzniveau, welches dem Typ I-Fehler entspricht und dementsprechend auch mit α bezeichnet wird. Je nach Konsequenzen eines Irrtums und der Mächtigkeit der zugrundeliegenden Daten kann dies mehr oder weniger klein gewählt werden. Während für einen Test auf die Wahrscheinlichkeit tödlicher Nebenwirkungen eines Medikaments nur eine sehr kleine Irrtumswahrscheinlichkeit sinnvoll ist (beispielsweise 0,001), müssen Fragen des Komforts

im Allgemeinen nicht in einer solchen Sicherheit beantwortet werden. Üblicherweise wählt man für diese Fragen ein Signifikanzniveau von $\boldsymbol{\alpha = 0{,}05}$ – welches auch in dieser Arbeit verwendet wird.

Parametrische vs. nicht-parametrische Tests

Das Prüfen von Hypothesen basiert auf dem Vergleich von Verteilungen. Beispielsweise können Schlüsse aus dem Vergleich der Verteilungen zweier Messreihen gezogen werden oder einer theoretischen und gemessenen Verteilung. Für diese Prüfung wurde eine Reihe von Tests entwickelt, welche sich in ihren Annahmen, Methodiken und/oder Eigenschaften unterscheiden. Eine verbreitete Klassifizierung dieser Tests unterscheidet die parametrischen und nicht-parametrischen Tests. Während erstere Annahmen bezüglich der Parameter der zugrunde liegenden Verteilungen treffen, setzen zweitere nicht voraus, dass die Daten aus einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung stammen. Prominente Beispiele der parametrischen Tests sind solche, die auf Prüfgrößen basieren die der Studentschen t-Verteilung (Student (1908)) folgen, wie beispielsweise Korrelationskoeffizienten oder Regressionsanalysen. Bei ihnen wird angenommen, dass die getesteten Daten jeweils aus normalverteilten Grundgesamtheiten stammen. Nicht-parametrische Tests kommen ohne eine solche Annahme aus und basieren häufig schlicht auf den Rangfolgen der Daten. Diesem Vorteil der Robustheit bezüglich Daten, deren Grundgesamtheiten nicht einer vorausgesetzten Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen, steht jedoch der Nachteil einer oft geringeren statistischen Aussagekraft (Power) gegenüber.

Besteht dementsprechend die begründete Annahme, dass die Daten aus einer Grundgesamtheit mit einer geeigneten Verteilung stammen, sind parametrische Tests vorzuziehen. Dies ist häufig der Fall bei Daten, welche auf einer kardinalen Skala zugeordnet werden können, bei Daten kategorialer Skalen, wie z.B. Fragebogendaten, hingegen ist eine Zuordnung zu Zahlenwerten oft beliebig und eine Konsistenz mit Verteilungsannahmen dementsprechend zweifelhaft.

Um diese Annahmen jedoch im Vorhinein zu prüfen, können mehrere Tests angewendet werden. Das beste Verfahren ist laut Hopkins und Weeks (1990) der Shapiro-Wilk-Test, welcher auf dem Verhältnis zweier Schätzungen der Populationsvarianz beruht. Der nach der Arbeit von Shapiro und Wilk (1965) benannte Test berechnet eine W-Statistik, welche testet, ob eine Zufallsstichprobe unabhängiger $x_1, \ldots, x_n$ aus einer normalverteilten Grundgesamtheit kommt. Die Prüfgröße W des Shapiro-Wilk-Test berechnet sich zu

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} a_i x_{(i)}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}, \tag{3.61}$$

wobei $x_{(i)}$ der Wert auf dem i-ten Rang der Stichprobe ist. Die Konstanten a_i werden aus dem Vektor $\boldsymbol{m}$ der Erwartungswerte $m_1, \ldots, m_n$ der Rangplätze unabhängiger und identisch verteilter Zufallszahlen und der Inversen ihrer Kovarianzmatrix $\boldsymbol{V}$ berechnet:

$$\boldsymbol{a}^T = \frac{\boldsymbol{m}^T \boldsymbol{V}^{-1}}{\left(\boldsymbol{m}^T \boldsymbol{V}^{-1} \boldsymbol{V}^{-1} \boldsymbol{m}\right)^{1/2}}. \tag{3.62}$$

Ist die W-Statistik signifikant, sollte die Hypothese einer normalverteilten Grundgesamtheit abgelehnt werden. Stichproben mit einem signifikanten Shapiro-Wilk-Test sollten daher bevorzugt mit nicht-parametrischen Verfahren untersucht werden.

Nicht-parametrische Tests abhängiger Stichproben

Werden zwei (oder mehr) Stichproben mit statistischen Tests verglichen, muss bei der Wahl des Verfahrens auf die Abhängigkeit (oder Unabhängigkeit) dieser Stichproben geachtet werden. Man spricht von abhängigen Stichproben, wenn die Elemente der Stichproben einander paarweise zugeordnet werden können. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn im Rahmen einer Befragung die Teilnehmer zwei- oder mehrmals gefragt werden. Im Folgenden werden nur die in dieser Arbeit verwendeten nicht-parametrische Tests für abhängige Stichproben vorgestellt. Einen guten Überblick über nicht-parametrische Tests geben Siegel und Castellan, Jr. (1988) sowie Sheskin (2007).

2 abhängige Stichproben: der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test

Bei diesem Test wird anhand von Differenzen geprüft, ob sich zwei abhängige Stichproben unterscheiden. Er berücksichtigt nicht nur die Richtung (wie z.B. der Vorzeichentest), sondern auch die Größenordnung der Differenzen. Hierbei wird wie folgt vorgegangen:

1. Bilde die Differenzen für die gepaarten i Elemente der zwei Stichproben:
   $$d_i = x_i^{(1)} - x_i^{(2)}. \tag{3.63}$$

2. Entferne alle Paare mit $d_i = 0$. Diese n_0 Paare reduzieren die Stichprobengröße n auf die effektive Anzahl
$$n' = n - n_0 . \tag{3.64}$$

3. Bilde die Ränge r_i von $|d_i|$, wobei der kleinste Betrag den Rang 1 erhält.

4. Bilde den Mittelwert der jeweiligen Ränge r_i mit identischem $|d_i|$ und ordne ihnen den zugehörigen mittleren Rang zu.

5. Bilde die Rangsummen
$$R^+ = \sum_i r_i \quad \forall\, i \text{ mit } d_i > 0 \quad \text{und} \quad R^- = \sum_i r_i \quad \forall\, i \text{ mit } d_i < 0 \tag{3.65}$$

6. Prüfe die Signifikanz der Prüfgröße
$$T = \text{Min}\left(R^+, R^-\right) \tag{3.66}$$

6.1. Falls $n' \leq 15$ und T-Statistik signifikant: die Stichproben sind signifikant unterschiedlich.

6.2. Falls $n' > 15$, kann die T-Statistik durch eine Normalverteilung mit dem Mittelwert und der Varianz
$$\mu_T = \frac{n'(n'+1)}{4} \text{ und } \sigma_T^2 = \frac{T - n'(n'+1)(2n'+1)}{24} \tag{3.67}$$
approximiert werden. Bei verbundenen Rängen sollte nach Sheskin (2007) die Varianz durch die Anzahl t_s der verbundenen Ränge in den zugehörigen g Gruppen korrigiert werden. Für die korrigierte Varianz gilt
$$\sigma_T^2 = \frac{1}{24}\left(n'(n'+1)(2n'+1) - \frac{1}{2}\sum_{s=1}^{g} t_s^3 - t_s \right). \tag{3.68}$$
Damit berechnet sich die normalverteilte Prüfgröße z zu
$$z = \frac{T - \mu_T}{\sigma_T}, \tag{3.69}$$
anhand deren Signifikanz die Hypothese signifikant unterschiedlicher Stichproben angenommen werden kann.

Eine nicht-parametrische Alternative für 2 unabhängige Stichproben ist der Mann-Whitney-U-Test.

k abhängige Stichproben: Friedmans ANOVA

Be *k* abhängigen Stichproben kann mit Hilfe der Friedman ANOVA getestet werden, ob sich mindestens einer der Mediane der Stichproben signifikant von den anderen unterscheidet. Es wird also geprüft, ob die Stichproben der *k* Be-

dingungen alle aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Muss diese Nullhypothese abgelehnt werden, unterscheidet sich mindestens eine der Bedingungen von mindestens einer anderen. Es kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, für welche Bedingungen dies der Fall ist. Bei der Friedman ANOVA wird wie folgt vorgegangen:

1. Bilde die Ränge $r_{i,j}$ mit $j = 1$ bis k für jedes i-te der n gepaarten Elemente in den k Stichproben.

2. Bilde den Mittelwert der jeweiligen Ränge $r_{i,j}$ deren Elemente j identisch sind und ordne ihnen den zugehörigen mittleren Rang zu.

3. Bilde die Rangsummen R_j über die n Elemente in jeder der k Stichproben:

$$R_j = \sum_{i=1}^{n} r_{i,j} \ . \tag{3.70}$$

4. Berechne die Prüfgröße X_r^2 unter Beachtung einer Korrektur C für die t_s verbundenen Ränge in den zugehörigen g Gruppen nach Sheskin (2007) zu

$$C = 1 - \frac{1}{n\left(k^3 - k\right)} \sum_{s=1}^{g} \left(t_s^3 - t_s\right), \tag{3.71}$$

$$X_r^2 = \frac{1}{C}\left(\frac{12}{nk(k+1)} \sum_{j=1}^{k} R_j^2 - 3n(k+1)\right). \tag{3.72}$$

5. Prüfe die Signifikanz der Prüfgröße anhand einer χ^2-Verteilung mit $df = k - 1$ Freiheitsgraden. Ist der Test signifikant, so stammen die k Stichproben nicht alle aus der gleichen Grundgesamtheit.

Eine nicht-parametrische Alternative für k unabhängige Stichproben ist die Kruskal-Wallis ANOVA.

3.4.3 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse ist ein weit verbreitetes Verfahren, um einen Satz mehrdimensionaler Variabler auf einige Faktoren – ihre Hauptkomponenten – und damit in der Anzahl der Dimensionen zu reduzieren. In dieser Arbeit wird er dafür verwendet, um aus mehreren Fragebogenitems durch sie beschriebene latente Variablen als Faktoren auszuwählen (siehe Kapitel 5.2.6). Die reduzierten Faktoren sollen den ursprünglichen Variablensatz dabei optimal wiedergeben, indem etwa ein möglichst großer Anteil der ursprünglichen Varianz erklärt wird. Eine Einführung in die Hauptkomponentenanalyse und ihre Anwendung geben Backhaus et al. (2006) und Sheskin (2007).

Werden bei der Untersuchung von Effekten viele Erklärungsvariablen eingesetzt, wie dies beispielsweise häufig bei Befragungen mit mehreren Fragen zu ähnlichen Sachverhalten der Fall ist, so ist die Notwendigkeit dieser zur unabhängigen Erklärung der beobachteten Effekte nicht mehr sichergestellt, d.h. in einem solchen Fall erklären mehrere Variable (hier Antworten auf verschiedene Fragen) jeweils zu einem Teil den selben Effekt. Ziel ist es also die ursprünglichen Variablen so zu reduzieren, dass möglichst unabhängige Faktoren die untersuchten Effekte optimal erklären. Diese Faktoren – oder Hauptkomponenten – repräsentieren dementsprechend die dem Variablenraum unterliegenden Dimensionen, dessen Basis. Die fundamentale Annahme der Hauptkomponentenanalyse ist daher, dass ein gewonnener Datensatz $\boldsymbol{x}$ aus dem Variablenraum mit der Dimension N sich als Linearkombination der unterliegenden Basis der Dimension $K < N$ darstellen lässt, d.h. dass er mit einer Matrix $\boldsymbol{T}$ der Dimension $K \times N$ in einen neuen Vektor $\boldsymbol{y}$ der Dimension K transformiert werden kann:

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{x} \tag{3.73}$$

Geometrisch wird also das zugrunde liegende Basis-Koordinatensystem so gedreht, dass eine neue unabhängige (d.h. orthogonale) Basis gefunden wird, in welcher sich der Datensatz so optimal beschreiben lässt, dass für die Beschreibung unwesentliche Dimensionen weggelassen werden können. Als Kriterium für diese Optimierung eignet sich die Varianz: die neue Basis wird entlang der Richtungen gewählt, in welchen die erklärte Varianz maximal wird. Grafisch ist dies anhand eines zweidimensionalen Beispiels in Abbildung 3.25 dargestellt. Hier kann der Datensatz gut durch die Basis u_1 beschrieben werden, während die Daten in u_2-Richtung kaum streuen (eine kleine Varianz haben). Durch Reduktion auf lediglich die u_1-Richtung könnte also eine zufriedenstellende Beschreibung der Daten gefunden werden.

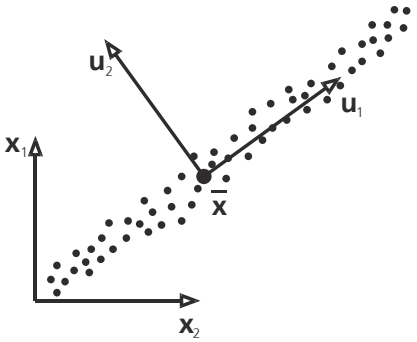


Abbildung 3.25: 2D-Beispiel der geometrischen Interpretation der Hauptkomponentenanalyse als Hauptachsentransformation bei maximierter Varianz entlang der Hauptachsen.

Mathematisch ist dieses Vorgehen äquivalent mit einer einfachen Hauptachsentransformation der Daten in eine neue Basis bestehend aus den Eigenvektoren

der Kovarianzmatrix mit den größten Eigenwerten. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass zentrierte Variablen verwendet werden, d.h. es erfolgt zunächst eine Translation der Basis mit anschließender Rotation in die neue Basis, in welcher einige Dimensionen vernachlässigt werden können. Die folgenden Schritte erklären die Vorgehensweise der Reduktion von M Datensätzen $\boldsymbol{x}_i$ der Dimension N.

1. Bilde den Vektor der Mittelwerte der N Dimensionen
$$\bar{\boldsymbol{x}} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} \boldsymbol{x}_i \ . \tag{3.74}$$

2. Zentriere die M Datensätze
$$\boldsymbol{z}_i = \boldsymbol{x}_i - \bar{\boldsymbol{x}} \ . \tag{3.75}$$

3. Berechne die Kovarianzmatrix aus der Matrix $\boldsymbol{A} = [\boldsymbol{z}_1\ \boldsymbol{z}_2\ \ldots\ \boldsymbol{z}_M]$
$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^T \ . \tag{3.76}$$

4. Berechne die N Eigenwerte $\boldsymbol{\Lambda} = \mathrm{diag}[\lambda_j]$ und (normierten) Eigenvektoren $\boldsymbol{U} = [\boldsymbol{u}_1\ \boldsymbol{u}_2\ \ldots\ \boldsymbol{u}_N]$ von $\boldsymbol{S}$ aus dem Eigenwertproblem
$$\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{U} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{U} \ . \tag{3.77}$$

5. Sortiere die Eigenwerte und entsprechend die Eigenvektoren so, dass gilt
$$\lambda_1 > \lambda_2 > \ldots > \lambda_N \ . \tag{3.78}$$
Große Einträge in den zugehörigen Eigenvektoren werden als hohe Ladungen auf einen Faktor bezeichnet. Geometrisch können diese als Kosinus des Winkels zwischen den Vektoren der ursprünglichen und neuen Basis interpretiert werden. Daher wählt man hier meist eine Schwelle von 0,7 was in etwa einem Winkel von 45° entspricht.

6. Wähle die $K < N$ größten Eigenwerte und transformiere die Daten in den reduzierten Raum entsprechend Gleichung (3.73) mit der Transformationsmatrix
$$\boldsymbol{T} = [\boldsymbol{u}_1\ \boldsymbol{u}_2\ \ldots\ \boldsymbol{u}_K]^{\mathrm{T}}. \tag{3.79}$$

Das Kriterium der Wahl der größten Eigenwerte begründet sich darin, dass diese identisch der Varianz der transformierten Variablen sind. Denn es gilt bei $K = N$ mit der Matrix $\boldsymbol{B} = [\boldsymbol{y}_1\ \boldsymbol{y}_2\ \ldots\ \boldsymbol{y}_M]$ der durch $\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}}$ transformierten Variablen $\boldsymbol{y}$:
$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{B}^T = \left(\boldsymbol{U}^T\boldsymbol{A}\right)\left(\boldsymbol{U}^T\boldsymbol{A}\right)^T = \boldsymbol{U}^T\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{U} = \boldsymbol{U}^T\boldsymbol{S}\boldsymbol{U} = \boldsymbol{\Lambda}. \tag{3.80}$$

Somit wird je nach Wahl der Größe von K der maximal mögliche Anteil an Varianz durch den reduzierten Variablenraum erklärt. Für die Wahl der Größe von K existieren verschiedene Methoden. Beispielsweise kann der Prozentsatz P der

durch die Hauptkomponenten erklärten Varianz von der ursprünglichen Gesamtvarianz festgelegt werden. Somit würde K so gewählt werden, dass

$$\frac{\sum_{i=1}^{K} \lambda_i}{\sum_{i=1}^{N} \lambda_i} < P \,. \tag{3.81}$$

Ein weiteres, weit verbreitetes Kriterium hierfür ist das sogenannte Kaiser-Kriterium (Kaiser (1960)). Nach diesem werden nur die Komponenten als maßgebend erachtet, deren Eigenwerte größer eins sind und somit mehr Varianz erklären können, als von jeder einzelnen Variablen erwartet wird.

Keine dieser Methoden kann jedoch die Aufgabe übernehmen Hauptkomponenten zu wählen, welche auch inhaltlich sinnvoll und interpretierbar sind. Diese Interpretation bleibt dem Untersuchenden überlassen. Des Weiteren ist zu beachten, dass jede Hauptkomponentenanalyse spezifisch für die verwendeten Datensätze ist, bei Verwendung eines anderen Datensatzes sind abweichende Ergebnisse zu erwarten.

3.5 Grundlagen der Strukturgleichungsmodellierung

Während die meisten der verbreiteten statistischen Analyseverfahren darauf basieren die beobachteten Sachverhalte abzubilden und erklärende Modelle zu belegen, liegt der Strukturgleichungsmodellierung ein anderer Ansatz zugrunde. Basierend auf angenommenen kausalen Zusammenhängen verknüpft ein Strukturgleichungsmodell beobachtete mit unterliegenden, latenten Variablen, indem der Unterschied zwischen den Kovarianzen $\boldsymbol{S}$ der Stichprobe und den durch das Modell mit Hilfe der zu schätzenden Parameter $\boldsymbol{\theta}$ vorhergesagten Kovarianzen $\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$ minimiert wird. Dabei wird angenommen, dass das Modell die Kovarianzen $\boldsymbol{\Sigma}$ der Population der Stichprobe widerspiegelt. Die fundamentale Annahme der Strukturgleichungsmodellierung ist somit

$$\boldsymbol{\Sigma} = \boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta}). \tag{3.82}$$

3.5.1 Notation und Pfaddiagramme

Die in dieser Arbeit verwendete Notation der Strukturgleichungsmodelle orientiert sich an der von Bollen (1989) und Jöreskog und Sörbom (2001) eingeführ-

ten Schreibweise (nach der weit verbreiteten Software auch LISREL-Notation genannt) und die von ihnen benutzte grafische Darstellung in Pfaddiagrammen.

Im Allgemeinen unterscheidet man bei Strukturgleichungsmodellen zum Einen latente (vereinfacht: nicht beobachtbare) und manifeste Variablen und zum Anderen exogene und endogene Variablen. Während exogene Variablen kausal außerhalb des Modells verankert sind, werden endogene Variablen durch das Modell erklärt. Wird beispielsweise angenommen, dass der *Erfolg* einer Person durch ihre *Leistung* begründet ist, so wird der *Erfolg* und seine Ausprägungen, z.B. ein *Gewinn*, durch das Modell erklärt. Die *Leistung* hingegen wird, gemessen durch das Verhältnis bekannter *Inputs* und *Outputs*, als für das Modell gegeben vorausgesetzt. In der Notation repräsentieren lateinische Buchstaben manifeste Variablen, latente werden durch griechische Buchstaben dargestellt. Jedes Strukturgleichungsmodell setzt sich prinzipiell aus dem Strukturmodell, welches die Beziehungen zwischen latenten Variablen beschreibt, und den Messmodellen der latenten Variablen zusammen. In der grafischen Darstellung werden diese durch Ellipsen, die manifesten Variablen durch Rechtecke gekennzeichnet. Angenommene Beziehungen zwischen den Variablen werden durch gerade Pfeile gekennzeichnet, die in Richtung des zugrunde liegenden kausalen Zusammenhangs zeigen.

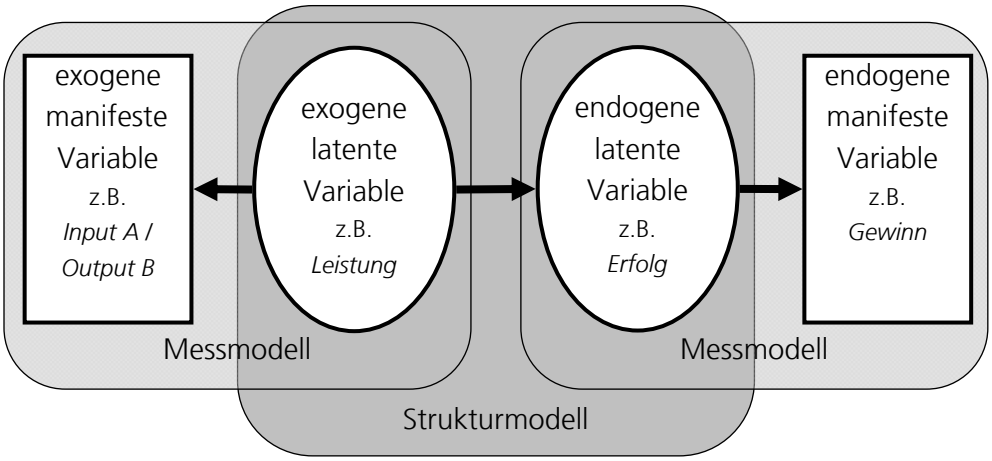


Abbildung 3.26: Grundelemente und Untermodelle eines Strukturgleichungsmodells dargestellt als prinzipielles Pfaddiagramm.

Üblicherweise werden die manifesten Variablen mit $\boldsymbol{x}$ (exogen) und $\boldsymbol{y}$ (endogen) sowie die latenten Variablen mit $\boldsymbol{\xi}$ (exogen) und $\boldsymbol{\eta}$ (endogen) bezeichnet. Die (linearen) Beziehungen der q $\boldsymbol{x}$- und p $\boldsymbol{y}$-Variablen in den Messmodellen werden mittels der Matrizen $\boldsymbol{\Lambda_x}$ (exogen) und $\boldsymbol{\Lambda_y}$ (endogen) auf die n $\boldsymbol{\xi}$- bzw. m $\boldsymbol{\eta}$-Variablen abgebildet. Im Strukturmodell bildet die Matrix $\boldsymbol{\Gamma}$ die exogenen latenten Variablen $\boldsymbol{\xi}$ auf die endogenen $\boldsymbol{\eta}$ ab. Letztere können sich auch gegen-

seitig beeinflussen, was durch die Matrix $\boldsymbol{B}$ bewerkstelligt wird. Während die Kovarianzen der manifesten Variablen bekannt sind und für die Schätzung zur Verfügung stehen, müssen die der latenten Variablen ermittelt werden. Hierbei ist es üblich lediglich die Kovarianzen $\boldsymbol{\Phi}$ der exogenen Variablen einzuführen, die der endogenen Variablen sind bestimmt aus den übrigen Variablen. Im Pfaddiagramm werden diese Kovarianzen durch gebogene Doppepfeile symbolisiert.

Wie bei jedem anderen statistischen Schätzverfahren beinhalten auch Strukturgleichungsmodelle Fehlervariablen für alle im Modell erklärten Variablen: $\boldsymbol{\delta}$ für $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{\varepsilon}$ für $\boldsymbol{y}$ sowie $\boldsymbol{\zeta}$ für $\boldsymbol{\eta}$. Diese Fehlervariablen setzen sich aus drei Komponenten zusammen (siehe auch Bollen (2002)), die im Modell jedoch nur durch einen Term repräsentiert werden. Die erste Komponente des Fehlers ist zufälliger Art resultierend aus der Schätzung, die zweite ist der zufällige Fehler aufgrund ungenauer Erfassung der Variablen und die dritte Komponente stammt aus der Vernachlässigung sämtlicher Größen, welche einen Einfluss auf die Variable haben. Aufgrund der Modellierung von kausalen Beziehungen wird bei Strukturgleichungsmodellen davon ausgegangen, dass die Voraussetzungen für diese Kausalität – Assoziation, Isolierung und Richtung – gegeben sind. Daher ist implizit eine Pseudo-Isolation im Modell enthalten, indem angenommen wird, dass die erklärten Variablen nicht mit ihren Fehlern korrelieren. Nachdem die Quelle der Fehler $\boldsymbol{\delta}$ und $\boldsymbol{\varepsilon}$ außerhalb des Modells liegt, wird vorausgesetzt, dass diese nicht mit den latenten Variablen $\boldsymbol{\xi}$ und $\boldsymbol{\eta}$ sowie ihren Fehlern $\boldsymbol{\zeta}$ korrelieren. Darüber hinaus korrelieren die exogenen Fehlervariablen $\boldsymbol{\delta}$ nicht mit den endogenen $\boldsymbol{\varepsilon}$, da diese ansonsten in der kausalen Struktur des Modells begründet lägen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Fehler um ihren Erwartungswert von Null streuen. Da diese Fehler ebenfalls nicht beobachtbar sind, werden auch sie in Pfaddiagrammen durch Ellipsen dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber werden diese oft auch weggelassen.

In Gleichungsform stellen sich somit Struktur- und Messmodelle wie folgt dar:

Strukturmodell: $$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{B\eta} + \boldsymbol{\Gamma\xi} + \boldsymbol{\zeta}, \tag{3.83}$$

Messmodell, exogen: $$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{\Lambda_x\xi} + \boldsymbol{\delta}, \tag{3.84}$$

Messmodell, endogen: $$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\Lambda_y\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{3.85}$$

mit den Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{\Phi} = \mathrm{COV}(\boldsymbol{\xi})$, $\boldsymbol{\Psi} = \mathrm{COV}(\boldsymbol{\zeta})$, $\boldsymbol{\Theta_\delta} = \mathrm{COV}(\boldsymbol{\delta})$ und $\boldsymbol{\Theta_\varepsilon} = \mathrm{COV}(\boldsymbol{\varepsilon})$.

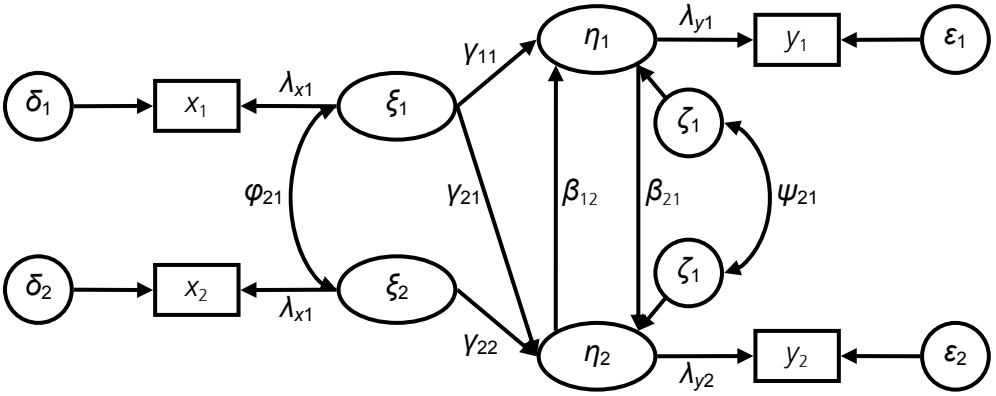


Abbildung 3.27: Hypothetisches Strukturgleichungsmodell zur Darstellung sämtlicher Grundelemente als Pfaddiagramm.

Somit werden Strukturgleichungsmodelle durch die acht Parametermatrizen $\boldsymbol{\theta} = [\boldsymbol{\Lambda_x}, \boldsymbol{\Lambda_y}, \boldsymbol{\Gamma}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Psi}, \boldsymbol{\Theta_\delta}, \boldsymbol{\Theta_\varepsilon}]$ charakterisiert, mit welchen die zu schätzende Kovarianzmatrix des Modells formuliert werden kann:

$$\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Lambda}_y (\boldsymbol{I}-\boldsymbol{B})^{-1}\left(\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Gamma}^T + \boldsymbol{\Psi}\right)(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{B})^{-T}\boldsymbol{\Lambda}_y^T + \boldsymbol{\Theta}_\varepsilon & \boldsymbol{\Lambda}_y (\boldsymbol{I}-\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{\Gamma}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Lambda}_x^T \\ \boldsymbol{\Lambda}_x\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Gamma}^T(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{B})^{-T}\boldsymbol{\Lambda}_y^T & \boldsymbol{\Lambda}_x\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Lambda}_x^T + \boldsymbol{\Theta}_\delta \end{bmatrix}. \quad (3.86)$$

3.5.2 Schätzverfahren und Stichprobengrößen

Bei gegebener Kovarianzmatrix $\boldsymbol{S}$ der manifesten Variablen müssen schlussendlich die Modellparameter $\boldsymbol{\theta}$ so geschätzt werden, dass $\boldsymbol{S}$ optimal $\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$ repräsentiert und damit die grundlegende Hypothese (3.82) erfüllt wird.

Die am häufigsten genutzte Variante die Parameter zu schätzen ist die Minimierung einer Fitfunktion, welche die Wahrscheinlichkeit der richtigen Schätzung der Parameter maximiert, und wird entsprechend auch Maximum-Likelihood (ML) Methode genannt. Die zugehörige Fitfunktion ist:

$$F_{ML} = \log|\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})| + \mathrm{tr}\left[\boldsymbol{S}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\boldsymbol{\theta})\right] - \log|\boldsymbol{S}| - (p+q). \quad (3.87)$$

Baltes-Götz (2002) fasst die Vorteile des Maximum-Likelihood Schätzers bei multivariater Normalverteilung der manifesten Variablen wie folgt zusammen: er ist asymptotisch erwartungstreu und effizient und konvergiert bei wachsender Stichprobengröße gegen eine Normalverteilung. Darüber hinaus ist die Fitfunktion skaleninvariant und erlaubt einen globalen Modelltest. Obwohl der ML Schätzer sich als robust gegenüber der Verletzung der Voraussetzung einer multivariaten Normalverteilung der manifesten Variablen erwiesen hat, sollte er nicht bei erheblicher Abweichung von dieser Normalverteilung, sowie bei ordi-

nal skalierten, also nicht kontinuierlichen manifesten Variablen verwendet werden.

Um das Problem der Abweichung von einer multivariaten Normalverteilung zu berücksichtigen, wurden Verfahren entwickelt, die asymptotisch verteilungsfrei sind und damit keine Voraussetzungen dieser Art machen. Das gängigste Verfahren beruht auf einer Gewichtungsmatrix und wird abgeleitet davon Weighted-Least-Squares (WLS) Methode genannt. Bei dieser Methode wird der gewichtete Unterschied zwischen der Kovarianzmatrix $\boldsymbol{S}$ der manifesten Variablen und der impliziten Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$ der Modellparameter minimiert. Die entsprechende Fitfunktion ist:

$$F_{WLS} = [\boldsymbol{s} - \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\theta})]^T \boldsymbol{W}^{-1} [\boldsymbol{s} - \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\theta})], \tag{3.88}$$

wobei $\boldsymbol{s}$ ein Vektor der ½ $(p + q)$ $(p + q + 1)$ hintereinander angeordneten Elemente der unteren Dreiecksmatrix von $\boldsymbol{S}$ und $\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\theta})$ der entsprechende Vektor der Elemente von $\boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{\theta})$ in derselben Reihenfolge ist. Üblicherweise wird die Wichtungsmatrix $\boldsymbol{W}^{-1}$ durch Schätzungen einer asymptotischen Kovarianz zwischen den Elementen s_{gh} und s_{ij} von $\boldsymbol{S}$ gewonnen. Die Einträge $w_{gh,ij}$ von $\boldsymbol{W}$ berechnen sich typischerweise nach

$$w_{gh,ij} = \frac{1}{N} \sum_{a=1}^{N} (z_{ag} - \bar{z}_g)(z_{ah} - \bar{z}_h)(z_{ai} - \bar{z}_i)(z_{aj} - \bar{z}_j) - s_{gh} s_{ij}\,, \tag{3.89}$$

wobei z_{ab} die Elemente der N unabhängigen Beobachtungen und $\bar{z}_a$ der zugehörige Mittelwert sind.

Für eine erfolgreiche und verlässliche Schätzung bei Verfahren, die auf asymptotischer Statistik beruhen, ist eine minimale Stichprobengröße N erforderlich. Baltes-Götz (2002) fasst die Empfehlungen für diese wie folgt zusammen:

- mindestens $N \geq 100$, besser $N \geq 200$,
- mindestens $N \geq 5\ t$, wobei t die Anzahl der zu schätzenden Parameter $\boldsymbol{\theta}$ ist.

Asymptotisch verteilungsfreie Schätzverfahren wie die WLS Methode erfordern noch größere Stichproben:

- bei $k < 12$ manifesten Variablen: $N \geq 200$,
- bei $k \geq 12$ manifesten Variablen: $N \geq 1{,}5\ k\ (k + 1)$.

Verfügt man für die Schätzung nicht über eine ausreichend große Stichprobe N empfehlen Jöreskog und Yang (1996) die ML-Methode zu verwenden, nachdem für diese keine Wichtungsmatrix $\boldsymbol{W}$ benötigt wird. Allerdings sollten in diesem Fall die berechneten Standardfehler (und deren t-Werte) nicht als for-

melle Test-Statistik verwendet, sondern vielmehr als Richtlinie betrachtet werden.

3.5.3 Polychorische Korrelation

Während das WLS-Verfahren bei nicht-multinormalverteilten Variablen angewendet werden kann, löst es nicht das Problem nicht-kontinuierlicher Variabler. Hierfür wurde basierend auf Olsson (1979) die sogenannte polychorische Korrelation entwickelt (siehe auch Drasgow (2006)). Diese approximiert die Beziehung zwischen zwei ordinalen Variablen, im Falle einer Schätzung der Korrelation zwischen einer ordinalen und einer metrischen Variablen wird diese als polyserielle Korrelation bezeichnet.

Diese Korrelationen benutzen im Prinzip nicht die eigentlichen ordinalen Variablen, sondern gehen von der Annahme unterliegender normalverteilter Variablen aus, auf welche die Kategorien abgebildet werden. Dies folgt dem Ansatz von latenten Variablen, die nicht direkt beobachtbar sind, wie er letztlich auch bei Strukturgleichungsmodellen vorliegt. In Abbildung 3.28 ist ein Beispiel einer solchen Abbildung dargestellt: eine ordinale schief verteilte 7-Punkte-Skala wird auf eine normalverteilte latente Variable ξ abgebildet. Bei dieser werden Schwellen α_i geschätzt, welche die originalen Skalenpunkte bezüglich ξ trennen. Die resultierende abgebildete 7-Punkte-Skala kann letztlich nicht mehr als äquidistant betrachtet werden. Bei einer Verwendung von Korrelationen mit originalen ordinalen Skalen führt dies zu verzerrten Ergebnissen, der polychorische Ansatz hingegen ist für solche Daten brauchbar.

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der polychorischen Korrelation anhand zweier ordinaler Variabler x_1 und x_2 beschrieben. Die Daten dieser Variabler fallen in r bzw. s Kategorien, welche durch die Schwellen α_i mit i = 0, 1, …, r bzw. β_j mit j = 0, 1, …, s getrennt werden. Mit $\alpha_0 = -\infty = \beta_0$ und $\alpha_r = +\infty = \beta_s$ verbleiben r-1 und s-1 unbekannte Schwellenwerte. Mit den angenommenen unterliegenden normalverteilten Variablen ξ_1 und ξ_2 können die ordinalen Variablen x_1 und x_2 wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned} x_1 &= i \quad \text{für } \alpha_{i-1} < \xi_1 < \alpha_i \quad \text{mit } i = 1, \ldots, r \\ x_2 &= j \quad \text{für } \beta_{j-1} < \xi_2 < \beta_j \quad \text{mit } j = 1, \ldots, s. \end{aligned} \tag{3.90}$$

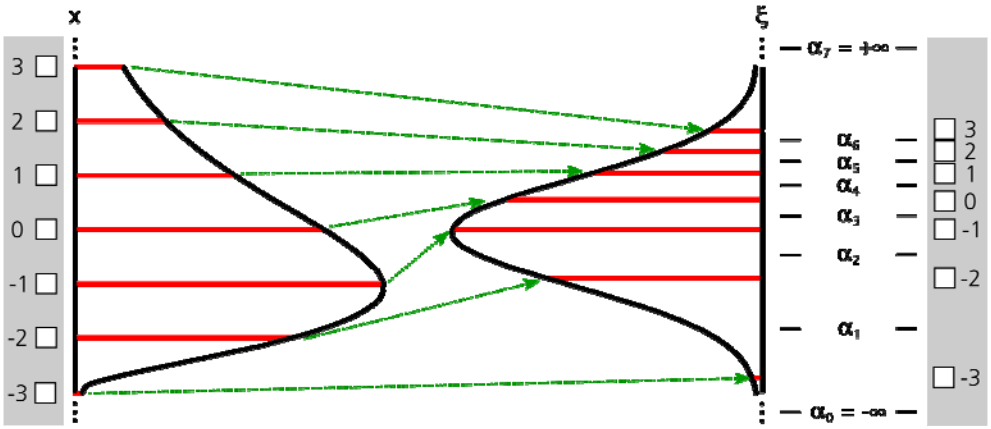


Abbildung 3.28: Beispielhafte Abbildung der resultierenden Variablen *x* einer ordinalen 7-Punkt-Skala, z.B. aus einem Fragebogen, mit schiefer Verteilung auf eine unterliegende normalverteilte Variable ξ. Die Schwellen α trennen hier die abgebildeten ordinalen Skalenpunkte.

Die *r*-1 bzw. *s*-1 unbekannten Schwellenwerte können bei *m* bzw. *n* Beobachtungen in jeder Kategorie *i* bzw. *j* und *M* bzw. *N* Beobachtungen insgesamt folgendermaßen geschätzt werden:

$$\hat{\alpha}_i = \Phi^{-1}\left(\sum_{k=1}^{i}\frac{m_k}{M}\right) \text{ bzw. } \hat{\beta}_j = \Phi^{-1}\left(\sum_{k=1}^{j}\frac{n_k}{N}\right), \tag{3.91}$$

wobei $\Phi^{-1}(\bullet)$ die Inverse der Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung ist. Mit diesen Schwellen kann der normalverteilte Wert für jede Kategorie *i* und *j* berechnet werden:

$$\xi_{1,i} = \left(\Phi\left(\hat{\alpha}_{i-1}\right) - \Phi\left(\hat{\alpha}_i\right)\right)\frac{M}{m_i} \text{ und } \xi_{2,j} = \left(\Phi\left(\hat{\beta}_{j-1}\right) - \Phi\left(\hat{\beta}_j\right)\right)\frac{N}{n_j}. \tag{3.92}$$

Die polychorische Korrelation der zwei ordinalen Variablen x_1 und x_2 ist schließlich die Korrelation $\rho_{\xi_1\xi_2}$ der unterliegenden kontinuierlichen Variablen ξ_1 und ξ_2, welche durch folgende log-Likelihood-Funktion approximiert werden kann:

$$\ell = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{s} n_{ij} \ln\left(\Pi_{ij}\right), \tag{3.93}$$

$$\text{mit } \Pi_{ij} = \Phi_2\left(\alpha_i, \beta_j\right) - \Phi_2\left(\alpha_i, \beta_{j-1}\right) - \Phi_2\left(\alpha_{i-1}, \beta_j\right) + \Phi_2\left(\alpha_{i-1}, \beta_{j-1}\right), \tag{3.94}$$

wobei n_{ij} die Anzahl der Beobachtungen in beiden Kategorien *i* und *j* und $\Phi_2(\bullet,\bullet)$ die bivariate Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung ist.

Olsson (1979) beschreibt zwei Möglichkeiten mit welchen die Schwellenwerte und die polychorische Korrelation geschätzt werden können: (a) man schätze alle Parameter gleichzeitig von einer bivariaten Verteilung oder (b) man berechne zunächst die Schwellenwerte basierend auf einer univariaten Verteilung und schätze anschließend die Korrelation mit einer bivariaten Verteilung. Jöreskog (1994) bemerkt, dass beide Methoden praktisch die gleichen Ergebnisse liefern, während zweitere rechentechnisch einfacher ist. Daneben hat erstere Methode den Nachteil verschiedener Schwellenwerte für dieselbe Variable in den unterschiedlichen Paarungen der Korrelationsmatrix.

Wenn eine der Variablen kontinuierlich ist und die zweite ordinal (im Folgenden *X* und *Y*) kann die polyserielle Korrelation basierend auf einer bivariaten beschreibenden statistischen Größe für *X* bestehend aus der Häufigkeit n_j, dem Mittelwert μ_j und der Varianz s_j^2 für jede der *j* Kategorien von *Y* (Jöreskog (1990)). Dieses Vorgehen ist auch in Abbildung 3.29 skizziert.

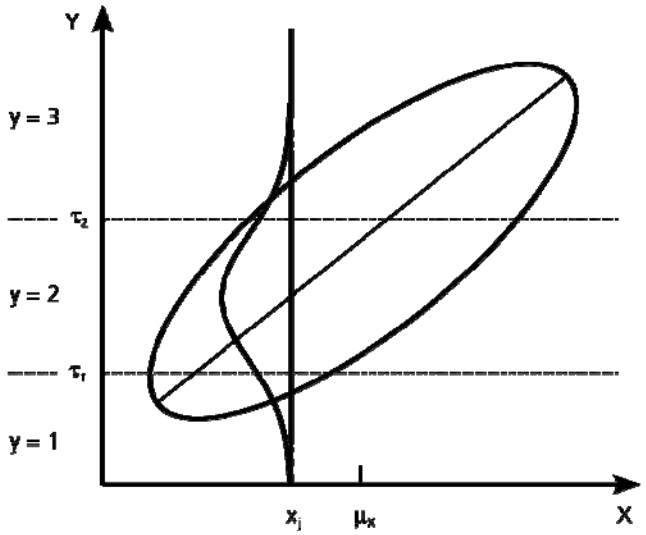


Abbildung 3.29: Gemeinsame Verteilung einer kontinuierlichen Variablen *X* (mit dem Mittelwert μ_j) und einer ordinalen Variablen *Y* mit den drei Kategorien $y_j = \{1; 2; 3\}$ welche durch die Schwellen τ_j diskretisiert wurden (adaptiert von Drasgow (2006)).

3.5.4 Modelle für nicht-lineare bzw. Interaktionseffekte

Die oben beschriebene Vorgehensweise bei der Strukturgleichungsmodellierung basiert auf linearen Beziehungen zwischen den Variablen. Aufgrund kausaler Überlegungen hängen diese von anderen ab oder können sich wechselseitig beeinflussen. Nicht berücksichtigt wurden hingegen Interaktionseffekte oder nicht-lineare Zusammenhänge. Mit der prinzipiellen Methodik der Strukturglei-

chungsmodelle können diese nicht abgebildet, durch eine geschickte Architektur der Modelle jedoch eingebaut werden.

Basierend auf der Arbeit von Kenny und Judd (1984) wurden Modelle mit nicht-linearen bzw. Interaktionseffekten ausführlich von Yang Jonsson (1997) diskutiert. Grundsätzlich werden diese Effekte in Form neuer Variabler eingebaut, welche den nicht-linearen Term repräsentieren. Hierbei tritt letztlich das Problem auf, welche Kombinationen der den einfachen Effekten zugeordneten manifesten Variablen für die Messmodelle der nicht-linearen Terme verwendet werden sollen. Yang Jonsson (1998) untersucht dies anhand eines einfach strukturierten Beispiels (siehe Abbildung 3.30). Sie kommt zu dem Schluss, dass nicht notwendigerweise sämtliche Kombinationen der manifesten Variablen im Modell berücksichtigt werden müssen, um signifikante Effekte abbilden zu können. Abhängig von der Stichprobengröße kann sich eine größere Anzahl an zu schätzenden Parametern hingegen auch ungünstig auswirken.

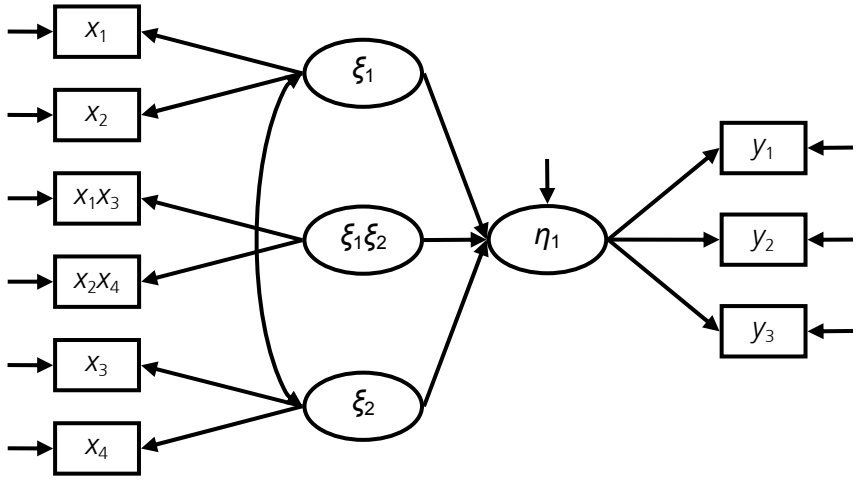


Abbildung 3.30: Pfaddiagramm für ein nicht-lineares Strukturgleichungsmodell mit zwei Produktvariablen nach Yang Jonsson (1998). Fehlervariablen sind lediglich durch Pfeile mit offenen Enden repräsentiert.

Aufgrund dieses Erfordernisses von wesentlich größeren Stichproben durch mehr zu schätzende Parameter empfehlen Jöreskog und Yang (1996) nicht-lineare oder Interaktionseffekte nur auf Basis einer soliden Theorie in der Modellarchitektur zu berücksichtigen. Von einem routinemäßigen Einbau raten sie ab. Auch die Implementierung von Zwangsbedingungen muss mit großer Sorgfalt vollzogen werden, da diese durch die Kombinationen sehr komplex werden, allerdings auf die Schätzung der Parameter große Auswirkungen haben. Verzichtet man auf korrekte Standardfehler und χ^2-Werte, so empfiehlt Jöreskog (1998) auch hier auf die Maximum-Likelihood Methode für die Parameterschätzung zurückzugreifen.

3.5.5 Modelle für mehrere Stichproben

Während die zuvor beschriebenen Modelle die Struktur einer einzelnen Stichprobe untersuchen, können Strukturgleichungsmodelle auch für mehrere Gruppen formuliert werden. Hierbei ändern sich die Grundgleichungen (3.83) bis (3.85) für G Gruppen g wie folgt:

Strukturmodell: $$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{B}^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\zeta}, \tag{3.95}$$

Messmodell, exogen: $$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{\Lambda}_x^{(g)}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\delta}, \tag{3.96}$$

Messmodell, endogen: $$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\Lambda}_y^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{3.97}$$

mit den Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{\Phi}^{(g)} = \mathrm{COV}(\boldsymbol{\xi})$, $\boldsymbol{\Psi}^{(g)} = \mathrm{COV}(\boldsymbol{\zeta})$, $\boldsymbol{\Theta}_\delta^{(g)} = \mathrm{COV}(\boldsymbol{\delta})$ und $\boldsymbol{\Theta}_\varepsilon^{(g)} = \mathrm{COV}(\boldsymbol{\varepsilon})$.

Die Fitfunktion ist letztlich eine gewichtete Kombination aus dem Fit für alle Gruppen mit den jeweiligen Stichprobengrößen $N^{(g)}$ und deren Summe N:

$$\mathrm{F} = \sum_{g=1}^{G} \frac{N^{(g)}}{N} \mathrm{F}^{(g)}\left(\boldsymbol{S}^{(g)}, \boldsymbol{\Sigma}^{(g)}\left(\boldsymbol{\theta}^{(g)}\right)\right), \tag{3.98}$$

mit den entsprechenden Fitfunktionen der Maximum-Likelihood Methode

$$\mathrm{F}_{\mathrm{ML}}^{(g)} = \log\left|\boldsymbol{\Sigma}^{(g)}\left(\boldsymbol{\theta}^{(g)}\right)\right| + \mathrm{tr}\left[\boldsymbol{S}^{(g)}\boldsymbol{\Sigma}^{(g)-1}\left(\boldsymbol{\theta}^{(g)}\right)\right] - \log\left|\boldsymbol{S}^{(g)}\right| - (p+q), \tag{3.99}$$

oder der Weighted-Least-Squares Methode

$$\mathrm{F}_{\mathrm{WLS}}^{(g)} = \left[\boldsymbol{s}^{(g)} - \boldsymbol{\sigma}^{(g)}\left(\boldsymbol{\theta}^{(g)}\right)\right]^T \boldsymbol{W}^{(g)-1}\left[\boldsymbol{s}^{(g)} - \boldsymbol{\sigma}^{(g)}\left(\boldsymbol{\theta}^{(g)}\right)\right], \tag{3.100}$$

Wobei hier die Vektoren $\boldsymbol{s}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\sigma}^{(g)}$ gruppenweise äquivalent zu (3.88) definiert sind und die Einträge $\boldsymbol{W}^{(g)}$ sich gruppenweise äquivalent zu (3.89) berechnen.

Über solche Mehrgruppen-Modelle können entsprechend Zwangsbedingungen gelegt werden, so dass beispielsweise bestimmte Parameter in den unterschiedlichen Gruppen identisch geschätzt werden. Somit lassen sich Hypothesen über gleiche Strukturen in verschiedenen Gruppen gut überprüfen. Beispielsweise ist dieses Verfahren nützlich beim Vergleich von Stichproben vor und nach einer bestimmten Behandlung.

Wichtig bei der Anwendung dieses Verfahrens ist nach Jöreskog und Sörbom (2001), dass die Variablen innerhalb jeder Gruppe nicht standardisiert werden.

Um sie über die Gruppen vergleichen zu können müssen die Variablen vielmehr in einer für alle Gruppen gemeinsamen Metrik gemessen werden.

3.5.6 Modelle mit Mittelwerten ungleich Null

Für die bisher dargestellten Modelle galt sämtlich die Annahme, dass die vorliegenden Variablen einen Erwartungswert gleich Null haben. Durch Transformationen können eine Reihe von manifesten Variablen entsprechend zentriert werden, während es für andere nicht sinnvoll ist. Darüber hinaus können auch latente Variablen mit Mittelwerten ungleich Null erwartet werden, welche jedoch aufgrund ihrer Rolle im Strukturgleichungsmodell nicht transformiert werden können. Daher wurde in Jöreskog und Sörbom (2001) der Formelapparat um Parameter für diese Mittelwerte und die aus ihnen folgenden zusätzlichen Terme erweitert. Mit diesen Konstanten werden die Grundgleichungen (3.95) bis (3.97) wie folgt angepasst:

Strukturmodell: $$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\alpha}^{(g)} + \boldsymbol{B}^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\zeta}, \tag{3.101}$$

Messmodell, exogen: $$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{\tau}_x^{(g)} + \boldsymbol{\Lambda}_x^{(g)}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\delta}, \tag{3.102}$$

Messmodell, endogen: $$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\tau}_y^{(g)} + \boldsymbol{\Lambda}_y^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{3.103}$$

wobei der Erwartungswert für den Mittelwert von $\boldsymbol{\xi}$ mit $\boldsymbol{\kappa}^{(g)}$ bezeichnet wird. Der Erwartungswert von $\boldsymbol{\eta}$ und die Mittelwerte $\boldsymbol{\mu}_x^{(g)}$ und $\boldsymbol{\mu}_y^{(g)}$ folgen aus (3.101) bis (3.103) zu

$$\mathrm{E}^{(g)}(\boldsymbol{\eta}) = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{B}^{(g)})^{-1}(\boldsymbol{\alpha}^{(g)} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{\kappa}^{(g)}), \tag{3.104}$$

$$\boldsymbol{\mu}_x = \boldsymbol{\tau}_x^{(g)} + \boldsymbol{\Lambda}_x^{(g)}\boldsymbol{\kappa}^{(g)} \text{ und} \tag{3.105}$$

$$\boldsymbol{\mu}_y^{(g)} = \boldsymbol{\tau}_y^{(g)} + \boldsymbol{\Lambda}_y^{(g)}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{B}^{(g)})^{-1}(\boldsymbol{\alpha}^{(g)} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{\kappa}^{(g)}). \tag{3.106}$$

Für die Schätzung der Modellparameter ändert sich die Fitfunktion der einzelnen Gruppen mit dem Vektor der Populationsmittelwerte $\boldsymbol{\mu}^{(g)} = [\boldsymbol{\mu}_x^{(g)}, \boldsymbol{\mu}_y^{(g)}]$ und der Stichprobenmittelwerte $\bar{\boldsymbol{z}}^{(g)}$ zu:

$$\mathrm{F}^{(g)} = \left[\boldsymbol{s}^{(g)} - \boldsymbol{\sigma}^{(g)}\right]^T \boldsymbol{W}^{(g)-1}\left[\boldsymbol{s}^{(g)} - \boldsymbol{\sigma}^{(g)}\right] + \left[\bar{\boldsymbol{z}}^{(g)} - \boldsymbol{\mu}^{(g)}\right]^T \boldsymbol{V}^{(g)-1}\left[\bar{\boldsymbol{z}}^{(g)} - \boldsymbol{\mu}^{(g)}\right], \tag{3.107}$$

wobei $\boldsymbol{V}^{(g)} = \boldsymbol{S}^{(g)}$ für die Weighted-Least-Squares Methode und $\boldsymbol{V}^{(g)} = \hat{\boldsymbol{\Sigma}}^{(g)}$ (d.h. die geschätzte Populationskovarianzmatix des Modells) für die Maximum-Likelihood Methode.

3.5.7 MIMIC-Modelle

Die bisher betrachteten Modelle haben gemein, dass sowohl die endogenen, als auch die exogenen manifesten Variablen kausal im Modell verankert sind – graphisch in den Pfaddiagrammen durch auf sie deutende Pfeile dargestellt. Solche Modelle werden auch als reflektive Modelle bezeichnet. Wie bei Eberl (2004) diskutiert, tritt jedoch häufig auch der Fall formativer Modelle ein. Bei diesen sind die exogenen manifesten Variablen außerhalb des Modells begründet und beeinflussen die latenten Variablen des Modells (siehe Abbildung 3.31). Daher werden diese auch als Multiple Indicators Multiple Causes (MIMIC) Modelle bezeichnet.

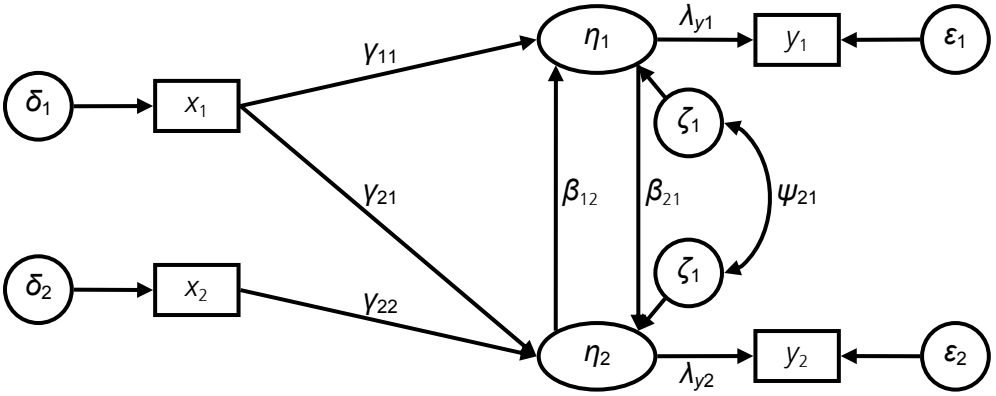


Abbildung 3.31: Hypothetisches MIMIC-Modell zur Darstellung der zugehörigen Grundelemente als Pfaddiagramm.

Liegt ein rein formatives Modell vor, so bedeutet dies schlicht, dass keine latenten exogenen Variablen $\boldsymbol{\xi}$ auftreten. Im Gleichungsapparat der Strukturgleichungsmodellierung (3.101) bis (3.103) wird dies erreicht durch die Identitäten $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{\xi}$, $\boldsymbol{\tau}_x^{(g)} = \boldsymbol{\kappa}^{(g)}$, $\boldsymbol{\Lambda}_x^{(g)} = \mathbf{I}$ und $\boldsymbol{\Theta}_\delta^{(g)} = \mathbf{0}$ (siehe auch Jöreskog und Sörbom (2001)).

3.5.8 Kriterien zur Überprüfung und Bewertung

Bei der Schätzung von Strukturgleichungsmodellen werden üblicherweise Standardfehler und als Verhältnismaßzahl dieser Fehler ihre t-Statistik angegeben. Diese Fehler sind, wie oben erwähnt, bei einer Schätzung mit dem Maximum-Likelihood Verfahren nur korrekt, wenn die Voraussetzung einer multivariaten Normalverteilung der beobachteten Variablen gegeben ist. Gegen moderate Abweichungen von der Normalverteilung sind die Schätzungen robust, ansonsten werden diese Fehler unterschätzt. Auch für eine Schätzung mit der Weigh-

ted-Least-Squares Methode werden nur dann richtige Fehler berechnet, wenn die korrekte Wichtungsmatrix verwendet wurde.

Neben diesen Maßzahlen für die Beurteilungen der Parameterschätzungen existiert eine Reihe von Kriterien zur Bewertung der Schätzung des gesamten Modells, die Goodness-of-Fit Maßzahlen. Anhand dieser kann beurteilt werden, ob das untersuchte Modell gut an die Daten angepasst oder auch welches Modell aus einer Reihe von Modellen vorzuziehen ist.

χ^2 Goodness-of-Fit Test

Mit dem χ^2 Goodness-of-Fit Test wird die experimentelle Hypothese geprüft, ob ein Unterschied zwischen den beobachteten und erwarteten Häufigkeiten *N* unabhängiger kategorialer Daten besteht. Ist dieser Test signifikant, so muss die Nullhypothese, dass diese Differenz für alle *k* Kategorien gleich Null ist, verworfen werden. Die beobachteten Häufigkeiten O_i weichen in diesem Fall für mindestens eine Kategorie von den erwarteten Häufigkeiten E_i ab. Sheskin (2007) empfiehlt, dass die Anzahl der Beobachtungen in jeder Kategorie *i* nicht weniger fünf sein sollte. Die Test-Statistik

$$X^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \tag{3.108}$$

folgt für große *N* bei normalverteilten Daten asymptotisch einer χ^2-Verteilung mit *df* Freiheitsgraden.

Im Rahmen der Strukturgleichungsmodellierung wird aufgrund der fundamentalen Annahme (3.82) davon ausgegangen, dass die Erwartungswerte mit Hilfe der geschätzten Modellparameter $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ approximiert werden können. Bei gegebener Kovarianzmatrix $\boldsymbol{S}$ minimiert $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ die Fitfunktion, welche den Unterschied zwischen beobachteter und erwarteter Kovarianzmatrix beschreibt. Somit kann als Test-Statistik die mit $N - 1$ multiplizierte minimale Fitfunktion, z.B. (3.107), verwendet werden:

$$X^2 = (N-1)\min\left(\mathrm{F}\left(\boldsymbol{S}, \boldsymbol{\Sigma}\left(\hat{\boldsymbol{\theta}}\right)\right)\right). \tag{3.109}$$

Diese kann anhand einer χ^2-Verteilung mit $df = \frac{1}{2}G(p+q)(p+q+1) - t$ Freiheitsgraden auf Signifikanz geprüft werden (vergleiche Jöreskog und Sörbom (1993)). Hierbei ist *G* die Anzahl der Gruppen, *p* und *q* die Anzahl der manifesten Variablen $\boldsymbol{y}$ und $\boldsymbol{x}$ und *t* die Anzahl der zu schätzenden Parameter in $\hat{\boldsymbol{\theta}}$.

Nachdem X^2 jedoch sehr stark von der Stichprobengröße N abhängt, raten Jöreskog und Sörbom (1993) von einer Verwendung als Test-Statistik ab. Sie empfehlen es jedoch als Gütekriterium für die Anpassung des Modells an die Daten zu verwenden, indem relativ kleine X^2 auf eine gute Anpassung hinweisen. Hierfür wird häufig das Verhältnis X^2/df verwendet. Empfehlungen für maximale X^2/df variieren zwischen 2 und 5 (siehe Bollen (1989)).

Als statistische Prüfgröße kann X^2 jedoch eingesetzt werden, wenn Modelle mit mehr oder weniger Zwangsbedingungen gegeneinander getestet werden sollen. Hier wird üblicherweise die Differenz in den X^2-Prüfgrößen anhand einer χ^2-Verteilung mit einer Anzahl von Freiheitsgraden entsprechend der Differenz derer der verglichenen Modelle überprüft.

Da der Nachteil einer Sensitivität bezüglich der Stichprobengröße entscheidend ist, wurden weitere Gütekriterien für die Anpassung des Modells entwickelt, welche im Folgenden kurz beschrieben werden. Eine gute Übersicht über diese Indizes gibt Langer (2002), die in der Software LISREL verwendeten Indizes sind in Jöreskog und Sörbom (1993) beschrieben, eine detaillierte Diskussion von Goodness-of-Fit Indizes ist in Bollen und Long (1993) sowie Marsh et al. (1996) zu finden.

GFI – Goodness-of-Fit Index

Der Goodness-of-Fit Index (*GFI*) basiert auf einer Normierung der X^2-Prüfgröße unter Berücksichtigung der Indikatoren (manifesten Variablen) des Modells durch ein sogenanntes Nullmodell. Dies ist das Modell bevor eine Anpassung vorgenommen wurde, d.h. alle zu schätzenden Parameter sind gleich Null. Damit kann der *GFI* definiert werden zu:

$$GFI = 1 - \frac{F\left(\boldsymbol{S}, \boldsymbol{\Sigma}\left(\hat{\boldsymbol{\theta}}\right)\right)}{F\left(\boldsymbol{S}, \boldsymbol{\Sigma}\left(\boldsymbol{0}\right)\right)}. \tag{3.110}$$

Der *GFI* liegt somit im Intervall [0;1], wobei 1 eine ideale und 0 gar keine Anpassung repräsentieren. Ein Modell mit einem $GFI \geq 0{,}98$, $GFI \geq 0{,}95$ bzw. $GFI < 0{,}95$ kann als vollständig bestätigt, tendenziell bestätigt bzw. nicht bestätigt betrachtet werden (siehe Langer (2002)).

AGFI – Adjusted Goodness-of-Fit Index

Der Adjusted Goodness-of-Fit Index (*AGFI*) gleicht den *GFI* durch eine Berücksichtigung der Anzahl p und q der Indikatoren $\boldsymbol{y}$ und $\boldsymbol{x}$ und Freiheitsgrade df wie folgt an:

$$AGFI = 1 - \frac{(p+q)(p+q+1)}{2\,df}(1 - GFI). \tag{3.111}$$

Auch er liegt im Intervall [0;1], wird jedoch bei einem *AGFI* ≥ 0,95, *AGFI* ≥ 0,90 bzw. *AGFI* < 0,90 als vollständig bestätigt, tendenziell bestätigt bzw. nicht bestätigt bezeichnet (siehe Langer (2002)). Der verwendete Bruch zur Wichtung des *GFI* gilt jedoch nur bei der Betrachtung von Eingruppen-Modellen, ein Äquivalent für den Fall von Strukturgleichungsmodellen mit mehreren Gruppen konnte nicht identifiziert werden.

RMR – Root Mean Squared Residual

Das Root Mean Squared Residual (*RMR*) ist die Größe des geschätzten durchschnittlichen Residuums des Strukturgleichungsmodells mit *p* und *q* manifesten Variablen $\boldsymbol{y}$ und $\boldsymbol{x}$:

$$RMR = \sqrt{2\sum_{i=1}^{p+q}\sum_{j=1}^{i}\frac{\left(s_{ij} - \hat{\sigma}_{ij}\right)^2}{(p+q)(p+q+1)}}, \tag{3.112}$$

wobei s_{ij} und $\hat{\sigma}_{ij}$ die Einträge in der beobachteten sowie geschätzten Kovarianzmatrix $\boldsymbol{S}$ und $\hat{\boldsymbol{\Sigma}}$ sind. Je kleiner dieses Residuum ausfällt, desto besser ist die Anpassung des Modells. Im Allgemeinen spricht man bei einem *RMR* ≤ 0,05, *RMR* ≤ 0,10 bzw. *RMR* > 0,10 von einem vollständig bestätigtem, tendenziell bestätigtem bzw. nicht bestätigtem Modell (siehe Langer (2002)).

NNFI – Non-Normed-Fit Index

Der Non-Normed-Fit Index (*NNFI*) ist ein relatives Anpassungsmaß, welches den Fit des aktuellen Modells $F_A = \mathrm{F}\left(\boldsymbol{S}, \boldsymbol{\Sigma}\left(\hat{\boldsymbol{\theta}}\right)\right)$ mit dem des Nullmodells $F_0 = \mathrm{F}(\boldsymbol{S}, \boldsymbol{\Sigma}(\boldsymbol{0}))$ vergleicht. Bei einer Stichprobengröße N und df_A bzw. df_0 Freiheitsgraden des aktuellen bzw. des Nullmodells ist der Index definiert zu:

$$NNFI = \frac{(N-1)\frac{F_0}{df_0} - (N-1)\frac{F_A}{df_A}}{(N-1)\frac{F_0}{df_0} - 1}. \tag{3.113}$$

Bei einem *NNFI* ≥ 0,90 kann die Modellstruktur im Allgemeinen als bestätigt angesehen werden (siehe Langer (2002)).

RMSEA – Root Mean Square Error of Approximation

Um die zunehmende Komplexität von Modellen mit einer größeren Anzahl Parameter zu berücksichtigen wurde der Root Mean Square Error of Approximation (*RMSEA*) vorgeschlagen. Dieser berücksichtigt die Freiheitsgrade *df* des aktuellen Modells, die Stichprobengröße *N* sowie die Fitfunktion des geschätzten Modells wie folgt:

$$RMSEA = \sqrt{\frac{\max\left(\mathrm{F}\left(\boldsymbol{S}, \hat{\boldsymbol{\Sigma}}\right) - \frac{df}{N-1}, 0\right)}{df}}. \tag{3.114}$$

Der *RMSEA* kann als Maß für die Abweichung je Freiheitsgrad betrachtet werden. Ist der $RMSEA \leq 0{,}05$, $RMSEA \leq 0{,}08$ bzw. *RMSEA* wird die Modellanpassung nach Jöreskog und Sörbom (1993) als gut, angemessen bzw. nicht angemessen bezeichnet.

CN – Critical N

Das Critical N (*CN*) beschreibt eine theoretische Stichprobengröße, bei welcher der aktuelle X^2-Wert des Modells beim angenommenen Signifikanzniveau α gerade eben als signifikant gelten würde. Mit dem (1- α)-Perzentil der χ^2-Verteilung ist er entsprechend definiert zu:

$$CN = \frac{X^2_{1-\alpha}}{\mathrm{F}(\boldsymbol{S}, \hat{\boldsymbol{\Sigma}})} + 1 \tag{3.115}$$

Häufig wird empfohlen, dass bei einer guten Modellanpassung $CN > 200$ sein sollte. Langer (2002) sieht dieses Maß eher geeignet für eine Einschätzung der Eignung des χ^2 Goodness-of-Fit Test für das betrachtete Modell. Ist *CN* deutlich kleiner als der aktuelle Stichprobenumfang, sollte von diesem Test Abstand genommen werden.

AIC – Akaike-Information-Criterion

Akaikes Information-Criterion (*AIC*) kann zum Vergleich mehrerer alternativer Strukturgleichungsmodelle herangezogen werden. Bei *t* zu schätzenden Modellparametern ist dieses eine Funktion des X^2-Werts nach (3.109):

$$AIC = X^2 + t. \tag{3.116}$$

Für die Auswahl eines Modells aus mehreren alternativen Modellen ist nicht der Betrag des *AIC* relevant, hingegen sollte das Modell gewählt werden, dessen *AIC* am niedrigsten ist (siehe Langer (2002)).

CAIC – Corrected Akaike-Information-Criterion

Das Corrected Akaike-Information-Criterion (*CAIC*) nimmt eine Korrektur des *AIC* um die Stichprobengröße *N* vor:

$$CAIC = X^2 + (1 + \ln(N))t \,. \tag{3.117}$$

Auch hier gilt, dass das beste Modell aus mehreren Alternativen den kleinsten *CAIC* hat (siehe Langer (2002)).

Insbesondere den letzten beiden Indizes *AIC* und *CAIC* kommt in dieser Arbeit eine zentrale Rolle zu, da anhand ihrer in Kapitel 6.3 ein Vergleich der abgeleiteten Strukturgleichungsmodelle vorgenommen wird. Aufgrund eines gewählten Mehrgruppen-Ansatzes werden bis auf den *AGFI* sämtliche vorgestellten Indizes zur Beurteilung der Anpassung der Modelle herangezogen.

3.6 Resümee des Stands des Wissens

Das Raumklima kann aus bauphysikalischer Sicht anhand von vier grundlegenden Aspekten beschrieben werden: (hygro-)thermisches Raumklima, Luftqualität, vibro-akustisches und visuelles Raumklima. Im Kontext der Flugzeugkabine spielt dieses eine wesentliche Rolle: die Kabine muss zum Einen ein lebensfreundliches Raumklima schaffen, zum Anderen soll dies den Komfortansprüchen der Passagiere genügen.

Eine Definition von Komfort aus raumklimatischer Sicht ist in der Literatur nicht zu finden. Auch in benachbarten Bereichen des Fachgebiets Ergonomie existiert keine eindeutige Interpretation dieses Begriffs. Einigkeit herrscht jedoch über die Natur von Komfort als ein Konstrukt: eine Bezeichnung, welche sich nicht direkt auf beobachtbare Sachverhalte zurückführen lässt (Wienold (1994)). Komfort ist weiterhin eine subjektive Reaktion auf die Umwelt und wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst (physikalische, physiologische, psychologische). Daher empfehlen Vink et al. (2004) in der Ergonomie sämtliche Sinnesmodalitäten in einer möglichst realistischen Umgebung zu berücksichtigen. Ob Komfort auf einer bipolaren Skala mit den Polen „unkomfortabel“ und „komfortabel“ beschrieben werden kann, oder Diskomfort und Komfort zwei ver-

schiedene Faktoren sind, wird unterschiedlich bewertet. Für diese Arbeit wurde basierend auf der Diskussion in Kapitel 3.1 folgende Definition von Komfort gewählt:

Komfort ist ein subjektives psychologisches Konstrukt. Es bietet die Möglichkeit der Operationalisierung und ist das Ergebnis der Wahrnehmung von Personen und der Bewertung anhand ihrer Erfahrung und Erwartung. Komfort ist ein angenehmer Zustand physiologischer, psychologischer und physikalischer Harmonie zwischen der Person und den verschiedenen Aspekten ihrer Umgebung. Diskomfort tritt ein, wenn diese Harmonie verletzt ist. Komfort und Diskomfort können bezüglich unterschiedlicher Aspekte zugleich auftreten. Im Kontext des Raumklimas wird die Schaffung einer Umgebung angestrebt, in welcher eine Person keinen Diskomfort aufgrund einer Stimulation durch die Umgebungsbedingungen erfährt. Diese wirken nicht unabhängig voneinander.

Die Auffassung von Komfort als Konstrukt ist maßgebend für die in dieser Arbeit gewählte Strukturmodellierung. Die Modellierung von Zusammenhängen mit Konstrukten als latenten Variablen ist in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften sowie der Verhaltensforschung üblich. In diesen Forschungszweigen wird die Strukturmodellierung häufig für die mathematische Ableitung von Zusammenhängen verwendet, ihre Entwicklung geht im Wesentlichen auf die 1970er und 1980er Jahre zurück (siehe Bollen (2002)). Dieser Modellansatz wird auf die Komfortanalyse hinsichtlich des Raumklimas übertragen und im Folgenden anhand einiger Modelle untersucht. Nachdem Komfort ein subjektives psychologisches Konstrukt ist, basieren die später entwickelten Modelle auf subjektiven Daten, welche in möglichst realitätsnaher Umgebung anhand von Fragebögen erhoben wurden. Im Gegensatz zu üblichen bauphysikalischen Messdaten sind Fragebogendaten häufig einem anderen Skalenniveau – dem ordinalen – zugeordnet. Damit sind oft nicht-parametrische statistische Verfahren notwendig, von denen die in dieser Arbeit verwendeten in den vorgehenden Kapiteln beschrieben sind. Strukturgleichungsmodelle setzen im Allgemeinen jedoch normalverteilte – und damit auch kontinuierliche – Daten voraus. Als mögliches Näherungsverfahren, um trotz dieser Voraussetzung auch ordinale Daten in Strukturgleichungsmodellen verwenden zu können, wurde die polychorische Korrelation vorgestellt. Bei dieser werden die ordinalen Daten auf kontinuierliche Skalen mit angenommener Normalverteilung abgebildet. Somit liegt mit der Strukturgleichungsmodellierung unter Verwendung polychorischer Korrelationen ein möglicher Modellierungsansatz für raumklimatischen Komfort vor, welcher zum Einen Komfort als Konstrukt durch latente Variablen berücksichtigt und zum Anderen die aus Fragebögen ordinal vorliegenden Daten der

subjektiven Komfortbewertung adäquat behandelt. Um jedoch robuste Schätzungen der Modellparameter erreichen zu können sind große Stichproben notwendig, so wird z.B. bei 15 manifesten Variablen eine Stichprobengröße von etwa 360 benötigt. Zudem muss der für die Modellierung essenziellen möglichen Isolation der Variablen von dritten Effekten durch möglichst umfassend kontrollierte Bedingungen Rechnung getragen werden. Für die Untersuchung der Bewertung des Raumklimas sind Studien, die solchen Anforderungen gerecht werden sehr aufwändig, für eine ganzheitliche Modellierung des Raumklimakomforts jedoch erforderlich.

Daher sind Studien hinsichtlich mehrerer Komfortaspekte des Raumklimas und ihrer holistischen Modellierung selten. Dementsprechend existieren derzeit auch keine allgemein akzeptierten systematischen Ansätze für die Formulierung von solchen Komfortmodellen. Im Gegensatz dazu sind für die einzelnen Raumklimaaspekte sowohl die Vorgänge der physiologischen Wahrnehmung, als auch deren Bewertung umfassend in der Literatur beschrieben. Im Allgemeinen wird die Komfortbewertung hinsichtlich des Raumklimas als durch die Umgebung verursacht aufgefasst. Neben den individuellen Faktoren, wie beispielsweise die Erfahrung oder Einflussnahmemöglichkeit, werden die physikalischen Parameter des Raumklimas als Parameter für Modelle verwendet. Mit ihnen können die Phänomene der Wahrnehmung gut beschrieben werden. Die anschließende Signalübertragung ins zentrale Nervensystem ist für die meisten Sensoren dokumentiert, ein Ansatz für die subjektive Bewertung wurde aus ihr jedoch bislang nicht hergeleitet. Vielmehr stützen sich sämtliche Modelle der Komfortbewertung von Raumklimaaspekten auf Probandenstudien und die Vota der untersuchten Personen.

Teils unter Hinzuziehung von Modellen der menschlichen Thermoregulation wurden für das (hygro-)thermische Raumklima verschiedene Indizes entwickelt, deren prominentester Vertreter das PMV/PPD-Modell nach Fanger (1970) ist. Es berücksichtigt neben den Raumklimaparametern Luft- und Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und -geschwindigkeit auch die individuellen Faktoren des Bekleidungsdämmwertes und der Aktivität.

Für die Bewertung der empfundenen Luftqualität existieren verschiedene Herangehensweisen: mit trainierten und/oder untrainierten Personen. Unabhängig vom gewählten Untersuchungspanel wurde eine Abhängigkeit der empfundenen Luftqualität von der Enthalpie der dargebotenen Luft festgestellt, wobei trainierte Probanden sich eher auf die Geruchsintensität, untrainierte anscheinend auf den Gesamteindruck der Luftqualität konzentrieren (Böttcher (2003)). Ansätze für Bewertungsindizes anhand von bestimmten Luftbestandteilen

konnten sich aufgrund der Vielzahl der Indikatoren für die Luftqualität noch nicht durchsetzen.

Das vibro-akustische Raumklima kann anhand verschiedener Summenpegel bewertet werden. Auch wenn sich die Frequenzbereiche der Wahrnehmung von vibratorischem und akustischem Raumklima überlappen, werden sie meist getrennt betrachtet. Für die Bewertung von Vibrationen existieren verschiedene Wichtungsverfahren, wobei sowohl das Phänomen der Vibration, als auch des mechanischen Schocks einbezogen werden kann. Aufgrund der Mannigfaltigkeit von Geräuschen wurden für das akustische Raumklima diverse Bewertungsgrößen entwickelt. Am weitesten verbreitet ist eine Beurteilung anhand des Lautstärkepegels. Um die für die Sprachverständlichkeit wesentlichen Frequenzbereiche zu betrachten wird auch das preferred speech interference level PSIL verwendet, welches nur die entsprechenden Pegel berücksichtigt. Andere Summengrößen berücksichtigen andere Muster im akustischen Frequenzspektrum, um Phänomene wie beispielsweise Schärfe oder Angenehmheit zu erklären (siehe auch Fastl und Zwicker (2007)).

Es liegen somit für die Raumklimaaspekte diverse Summengrößen vor, welche in einer ganzheitlichen Komfortmodellierung berücksichtigt werden können. Während durch sie der Aufwand zur Parameterschätzung in Modellen reduziert werden kann, muss berücksichtigt werden, dass auch Einzelindizes lediglich Modelle sind und damit eine Unschärfe tragen. Dies soll bei der Wahl der im Folgenden untersuchten Modelle in Betracht gezogen werden.

4 Versuchsdesign

Im Folgenden werden die für die Probandenstudie angepasste Versuchseinrichtung, sowie der Ablauf, die Randbedingungen und die zu kontrollierenden Raumklimaparameter in der simulierten Flugzeugumgebung beschrieben. Dieses Versuchsdesign wurde gemeinsam mit dem Konsortium des EU-Projektes ICE erstellt und in der Flight Test Facility des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik umgesetzt. Die in dieser Arbeit aufgestellten Modelle basieren auf den hierbei vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik aufgezeichneten Messdaten und den vom Zentrum für Public Health des Instituts für Umwelthygiene der Medizinischen Universität Wien erhobenen Fragebögen.

4.1 Konzeption der Versuchsumgebung

Um Probandenstudien in einer realistischen Umgebung bezüglich des speziellen Raumklimas in Flugzeugkabinen durchführen zu können wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, ein Labor errichtet. Kernstück dieser Flight Test Facility (FTF) ist eine Niederdruckröhre (Länge 30 m, Durchmesser 9,6 m) in welche das vordere originale Stück eines Großraumflugzeuges montiert wurde. Dieses wurde so ausgestattet, dass die maßgebenden Raumklimaparameter vergleichbar zu realen Flügen eingestellt und auch über einen großen Bereich variiert werden können. In Tabelle 4.1 ist ein Überblick über diese Spezifikationen dargestellt, eine detailliertere Beschreibung ist auch in Mayer et al. (2007) zu finden.

In der Flugzeugkabine können bis zu 80 Probanden gleichzeitig untergebracht werden. Für die in dieser Arbeit verwendeten simulierten Flüge wurde die Kabine mit Economy-Sitzen in einem 2-4-2 Layout ausgestattet. Dabei wurde ein typischer Sitzabstand von 0,81 m gewählt. In Abbildung 4.1 ist das eingerichtete Sitzlayout mit den in den Versuchen belegten Plätzen und ihrer Bezeichnung dargestellt. Im vorderen Bereich sind Galley sowie Toiletten zu erkennen, welche von den Probanden während der simulierten Langstreckenflüge genutzt werden können.

Tabelle 4.1: Physikalische Spezifikationen der Fraunhofer Flight Test Facility.

Parameter	Spezifikation
Niederdruck	bis zu 180 hPa (ca. 43.000 ft äquivalente Höhe)
Relative Feuchte	5 % bis 65 % (bei 20°C)
Lufttemperatur	-20°C bis 30°C
Rumpftemperatur	-30°C bis 45°C
Luftmenge	Frischluft: max. 3050 m³/h (bei 930 hPa) Umluft: max. 1630 m³/h (bei 930 hPa) Gesamt: max. 4680 m³/h (bei 930 hPa)
Luftfilterung	Frischluft: HEPA-Filter Klasse H11/H13 + Aktivkohlefilter Umluft: HEPA-Filter Klasse H11/H13
Schallpegel	Spektrum: 33 Hz bis 20.000 Hz max. 120 dB(A)
Vibrationen	Shaker in z-Richtung unter jedem Sitz
Beleuchtung	Verschiedene Szenarien Mittlere Leuchtdichte (Cruise): 52 cd/m² Leselampen

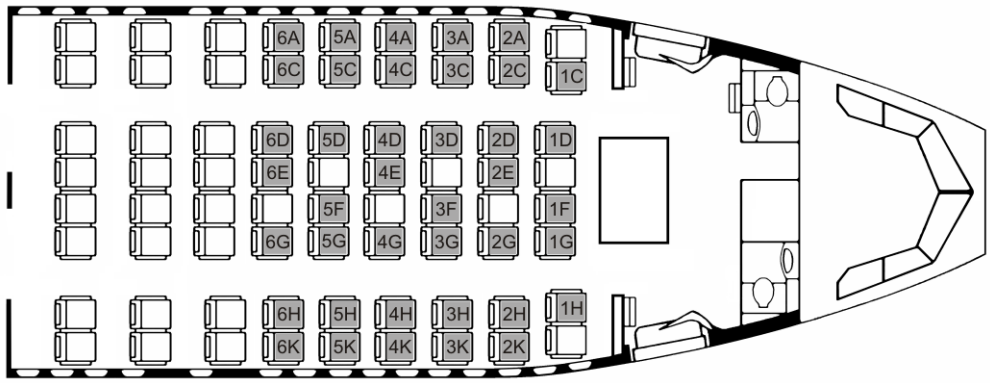


Abbildung 4.1: Verwendetes Sitzlayout einer 2-4-2 Economy Class Bestuhlung. Grau hinterlegt wurden die von Probanden belegten Plätze, beschrieben durch die übliche Sitzplatznummerierung an Bord von Passagierflugzeugen.

Zur kontinuierlichen Erfassung der physikalischen Bedingungen während der Versuche wurde das Fluglabor mit einem flexiblen und robusten Messwerterfassungssystem ausgestattet. Über ein Ethernet kommunizieren diverse FieldPoints mit einem Host PC, auf welchem die im Niederdruck gewonnen Messwerte online außerhalb der Niederdruckröhre überwacht werden können. Die FieldPoints sind über die Flugzeugkabine verteilt und erhalten über entspre-

chende Module die Sensorsignale. Einen Überblick gibt Abbildung 4.2. Mit diesem System können die Daten sicher gehalten und die Sensorik flexibel an die Versuchserfordernisse angepasst werden.

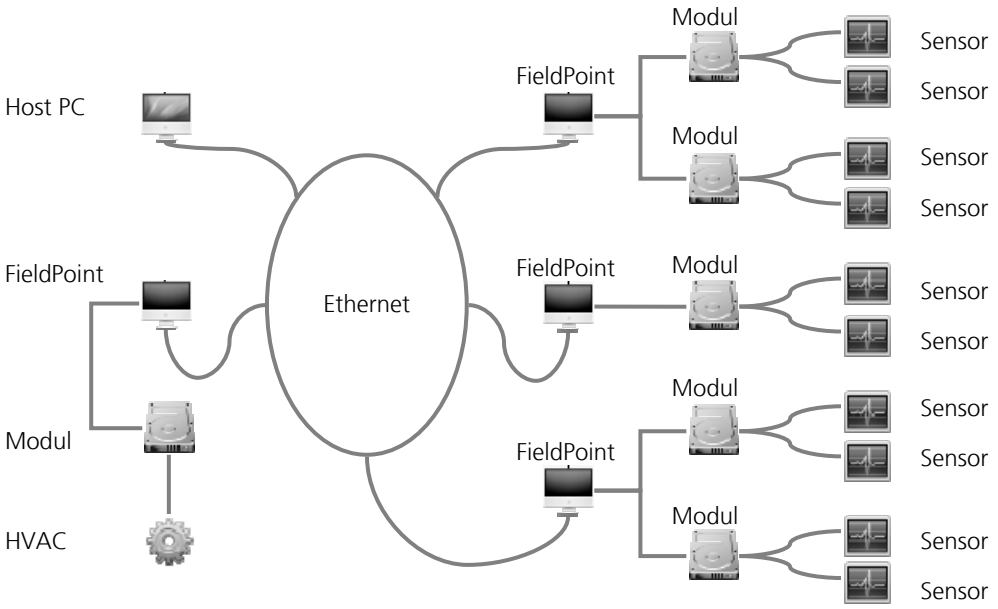


Abbildung 4.2: Prinzipskizze des Messwerterfassungssystems in der Fraunhofer FTF.

Um einen realistischen Eindruck der Flugzeugkabine zu erreichen, wurde die oben beschriebene Messwerterfassung für die in dieser Arbeit verwendeten Versuche so adaptiert, dass deren Elemente möglichst unauffällig positioniert waren. Die Montage der FieldPoints geschah in die hinteren Gepäckfächer, so dass die Fächer im Bereich der Probanden für deren Nutzung zur Verfügung standen. Die Kabelführung der Sensorik an den Plätzen der Probanden wurde über den Cargoraum realisiert, so dass die Messfühler für Temperaturen und Feuchten unauffällig an Sitzen, Boden und Wänden montiert werden konnten. Einen Überblick über die verwendeten Sensorarten und ihre Spezifikationen gibt Tabelle 4.2.

Tabelle 4.2: Verwendete Sensorarten und ihre Spezifikationen für die jeweiligen Raumklimaparameter.

Parameter	Sensorart	Mess-bereich	Genauig-keit	Ansprech-zeit
Luftdruck	kapazitiver Keramiksensor	0 hPa bis 1600 hPa	± 8 hPa	0,02 s
relative Luftfeuchte	kapazitives Hygrometer	0 % bis 100 %	± 1 % bei 23°C	15 s
Lufttemperatur	Pt100 4L Wider-standsthermometer	-20°C bis 100°C	± 0,15 K bei 0°C	12 s
Globe-temperatur	Pt100 4L Wider-standsthermometer in matt-schwarzer Kupferkugel (∅ 0,15 m)	-50°C bis 200°C	± 0,15 K bei 0°C	12 s
Luft-geschwindigkeit	omnidirektionales Thermoanemometer (∅ 8 mm)	0,01 m/s bis 1 m/s	± 1,5 % vom Messwert	0,1 s

Während für den Luftdruck innerhalb des Flugzeugrumpfes der Sensor hinter das Lining gehängt werden konnte, wurden die Sensoren für Luftfeuchte und Temperaturen über die Kabine verteilt (siehe Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4) um die örtliche Verteilung erfassen zu können.

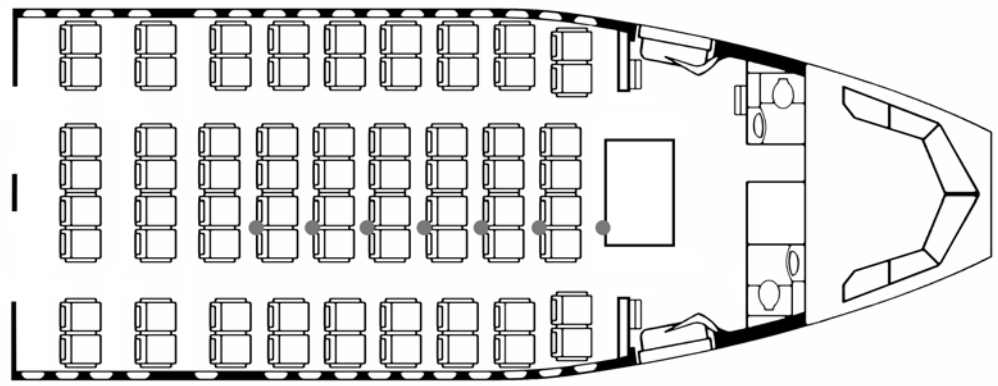


Abbildung 4.3: Grundriss der Flugzeugkabine mit den Installationsorten der Feuchtesensoren, jeweils in 1,1 m Höhe am Sitz befestigt.

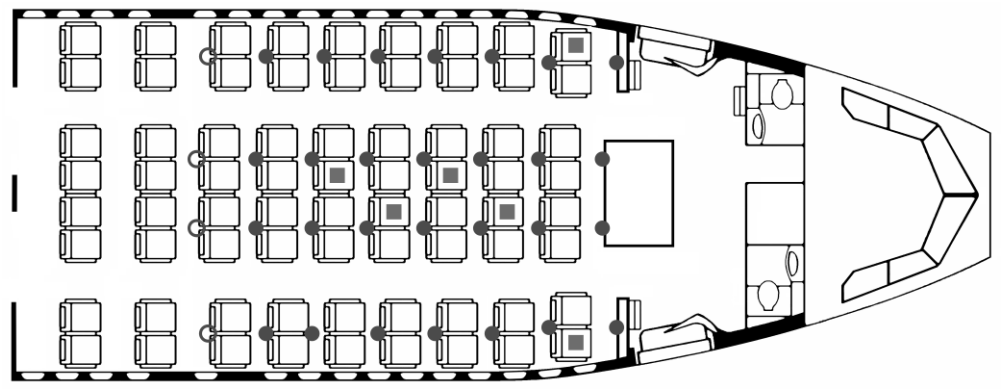


Abbildung 4.4: Grundriss der Flugzeugkabine mit den Installationsorten der Lufttemperatur- (rund) und Globetemperatursensoren (eckig). Lufttemperaturen wurden in 0,1 m, 0,6 m und 1,1 m Höhe (gefüllt) bzw. 1,1 m Höhe (offen), Globetemperaturen in 1,1 m Höhe gemessen.

Aufgrund der empfindlichen Messwertaufnehmer wurden die Luftgeschwindigkeiten nicht während der Versuche ermittelt. Für diese wurden zwei separate Tests durchgeführt, während deren eingewiesene Statisten die Plätze von Probanden einnahmen. Die verwendeten Ergebnisse der mittleren Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade sind in Anhang C und Anhang D zu finden.

Schall- und Vibrationspegel wurden im Vorfeld zu den Versuchen vom Institut für Physik der Universität Oldenburg eingemessen. Die verwendeten Ergebnisse des A-bewerteten Schallpegels sowie der ungewichteten Vibrationen sind in Anhang E und Anhang F dargestellt.

Die Lichtsituation wurde während der Flugphase der simulierten Flüge konstant auf dem voreingestellten Szenario „Cruise“ gehalten. In Anhang G sind die mittig auf den Klapptischen der jeweiligen Sitze gemessenen Leuchtdichten berichtet.

4.2 Probandenstudie

Für die Untersuchung verschiedener Ansätze der Strukturgleichungsmodellierung eines Komfortindex werden Probandendaten aus den umfangreichen Untersuchungen des EU-Projekts Ideal Cabin Environment (ICE) verwendet. Da ein Ziel dieses Projekts die Untersuchung von kombinierten Effekten des Raumklimas in Passagierflugzeugen ist, jedoch nur eine begrenzte Anzahl an Versuchen zur Verfügung stand, wurde nach der Festlegung eines sinnvollen Parameterraums vom National Aerospace Laboratoy NLR, Niederlande, ein D-optimaler Versuchsplan erstellt. Ein solcher Versuchsplan optimiert die Informationsaus-

beute aus möglichen Versuchen bei minimiertem Gesamtaufwand. D.h. es werden die Versuchspunkte so gewählt, dass für ein angenommenes Modell eine maximale Anzahl von Parametern mit einer minimalen Versuchszahl bestimmt werden kann. Eine gute Kurzeinführung und Diskussion der optimalen Versuchsplanung ist bei Gundlach (2004) zu finden.

Als relevante Raumklimaparameter für die Passagierflugzeugkabine wurden der Luftdruck (P), die relative Luftfeuchte (RH), die Lufttemperatur (TA) sowie der Schalldruckpegel (SPL) identifiziert. Nachdem einige Versuche für niedere Schalldruckpegel sowie Kontrollen auf Normaldruckniveau reserviert wurden, wurde die D-Optimierung im verbleibenden Kandidatensatz durchgeführt. Bei der Versuchsplanung wurden folgende Parameterlevel gewählt:

Luftdruck:

- Normaldruckniveau = ca. 937 hPa am Fraunhofer FTF (680 m ü. NN)
- 4000 ft äquivalente Höhe = 875 hPA → äquivalente Höhe ohne notwendige physiologische Kompensation
- 6000 ft äquivalente Höhe = 812 hPa → mittlere relevante äquivalente Höhe
- 8000 ft äquivalente Höhe = 753 hPa → maximal zulässige Kabinendruckhöhe

Relative Luftfeuchte:

- 10 % → übliche relative Feuchte während Langstreckenflügen
- 25 % → vorstellbare, jedoch derzeit nicht erreichte relative Feuchte auf Langstreckenflügen
- 40 % → auch in Gebäuden übliche relative Feuchte als Referenzpunkt

Lufttemperatur:

- 21°C → vermutete eher kalte Umgebung
- 23°C → vermutete thermisch neutrale Umgebung
- 25°C → vermutete eher warme Umgebung

Schalldruckpegel:

- 64 dB(A) → eher leises, aber noch charakteristisches Flugzeuggeräusch als Kontrolle
- 69 dB(A) → unter Umständen vorstellbarer, jedoch derzeit nicht erreichter Schalldruckpegel in Passagierflugzeugen
- 74 dB(A) → derzeitiger Stand der Technik in neuen Passagierflugzeugen

Parallel zum Schalldruckpegel wurde auch der Pegel der simulierten Vibrationen geändert. Die im Versuchsdesign gewählten Kandidatenpunkte, welche in dieser Arbeit verwendet werden, sind in Abbildung 4.5 und Tabelle 4.3 zusam-

menfassend dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsdesigns ist in Grün et al. (2008) zu finden.

Es liegt somit ein Parameterraum für Aspekte von zwei der vier wesentlichen raumklimatischen Eigenschaften vor, für die thermische und akustische Umgebung. Die Beleuchtung wurde während der Testphasen konstant auf das oben berichtete Level eingestellt. Die Lüftung erfolgte konstant mit 20 Kubikfuß pro Minute und Passagier bei einer Umluftrate von 40 %, was in der Fraunhofer FTF bei einer maximalen Belegung durch 82 Personen 1672 m³/h Frisch- und 1115 m³/h Umluft entspricht. Aufgrund des Zusammenhangs von Enthalpie und empfundener Luftqualität können trotz konstanter Lüftung beschränkte Rückschlüsse auf diese raumklimatische Eigenschaft gezogen werden.

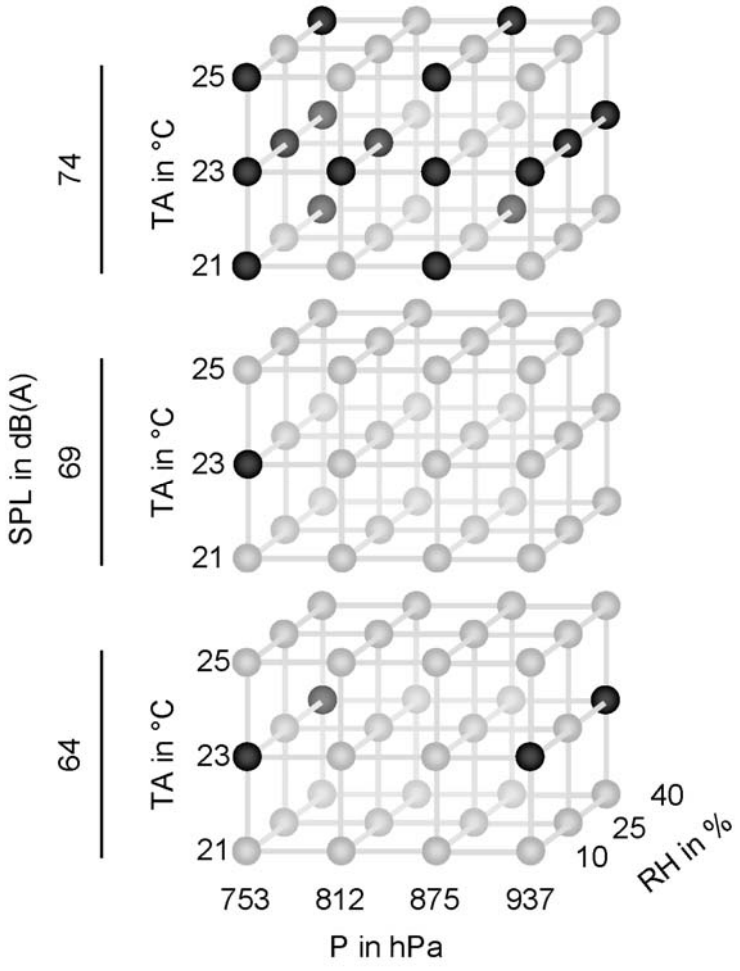


Abbildung 4.5: Dreidimensionale Darstellung des Parameterraums der vier gewählten Variablen: Luftdruck (P), relative Luftfeuchte (RH), Lufttemperatur (TA) und Schalldruckpegel (SPL). Sämtliche nach Definition der genannten Level möglichen Kandidatenpunkte sind als Kugeln dargestellt. Dunkel eingefärbt sind die im Versuchsdesign ausgewählten Punkte.

Tabelle 4.3: Übersicht über die verwendeten Tests und die gewählten Umgebungsbedingungen für Luftdruck (P), relative Feuchte (RH), Lufttemperatur (TA) und Schalldruckpegel (SPL).

Test	P [hPa]	RH [%]	TA [°C]	SPL [dB(A)]
3	937	10	23	74
4	937	25	23	74
5	937	40	23	74
6	812	10	23	74
7	753	10	23	69
8	812	25	23	74
9	753	25	23	74
10	753	40	23	74
11	875	10	21	74
12	875	10	23	74
13	875	10	25	74
14	875	40	21	74
15	875	40	25	74
16	753	10	21	74
17	753	10	23	74
18	753	10	25	74
19	753	40	21	74
20	753	40	25	74
21	753	40	23	64
22	753	10	23	64
23	937	10	23	64
28	937	40	23	64

Für jeden Versuch wurden 40 gesunde Probanden entsprechend dem in Tabelle 4.4 dargestellten Alters- und Geschlechtsprofil ausgewählt, um ein möglichst breites relevantes Spektrum der reisenden Bevölkerung abzudecken. Aufgrund des Umfangs der Testreihe nahmen an jedem Versuch andere Probanden teil.

Tabelle 4.4: Geplantes Alters- und Geschlechtsprofil für jeden der simulierten Flüge.

Geschlecht	weiblich			männlich		
Alter	18-34	35-50	>50	18-34	35-50	>50
Anzahl Probanden	6 bzw. 7	7 bzw. 6	7	7 bzw. 6	6 bzw. 7	7

Da in der Versuchsreihe simulierte Langstreckenflüge betrachtet wurden, hatte jeder Test eine Gesamtdauer von acht Stunden, welche in Untersuchungsintervalle von je einer halben Stunde unterteilt wurden. In der ersten und letzten

halben Stunde wurden die Raumklimaparameter jeweils auf Kontrollbedingungen eingestellt (Umgebungsdruck, 25 % relative Feuchte, 23°C und keine Flugzeuggeräusche, was bei laufender Lüftung etwa 55 dB(A) entspricht). Diese Pre- und Post-Baselines dienten vor allem dem Vergleich zum Ausgangszustand der Personen sowie der Betrachtung der Erholung nach einem Flug. Die Untersuchungsintervalle danach bzw. davor wurden genutzt, um Niederdruck, relative Feuchte und Temperatur einzustellen. Während der Tests wurden an die Probanden Mahlzeiten und Getränke sowie fünf Fragebögen verteilt: in den Baselines sowie dreimal unter Untersuchungsbedingungen. Letztere Untersuchungsintervalle werden im Folgenden als Expositionsphasen referenziert. Abbildung 4.6 gibt einen Überblick über den zeitlichen Ablauf jedes Versuchs.

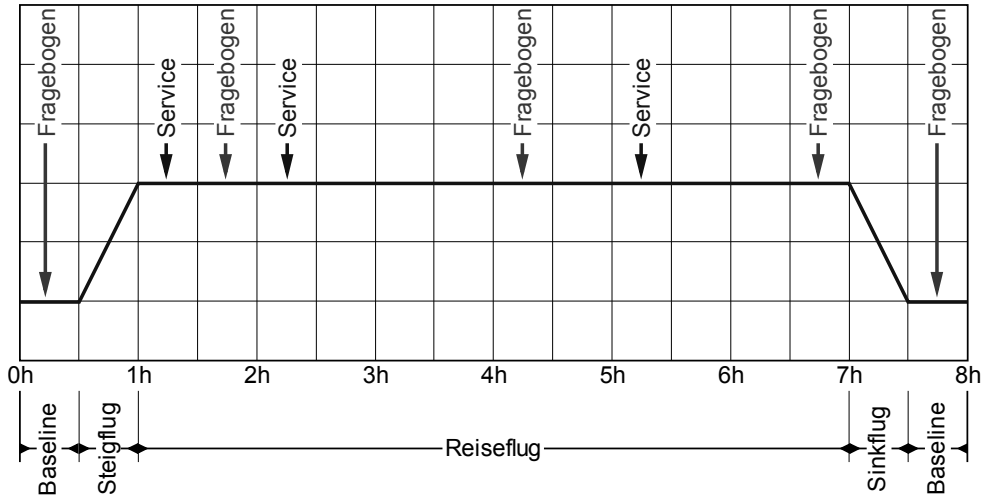


Abbildung 4.6: Zeitlicher Ablauf der simulierten Flüge.

5 Modellierung

Für die Modellierung eines Komfortindex werden zunächst die Modellhypothesen aufgestellt. Für die notwendige Datenhebung wurde das verwendete Versuchsdesign in Kapitel 4 beschrieben, welches sowohl die Konzeption der Versuchsumgebung, als auch die eigentliche Probandenstudie berücksichtigt. Anschließend werden die erhobenen Fragebogen- und Messdaten analysiert und geeignete Modellvariablen ausgewählt. Abschließend werden vier verschiedene Modelle abgeleitet und deren Parameter geschätzt.

5.1 Modellhypothesen

Basierend auf der obigen Diskussion und Definition von Komfort liegen dieser Arbeit eine Reihe von Hypothesen zugrunde, welche durch die gewählte Form der Modellierung anhand von Strukturgleichungsmodellen überprüft werden sollen. Gemäß der Definition in Abschnitt 3.1.3 ist Komfort ein Konstrukt, welches das Ergebnis der Wahrnehmung von Personen und der Bewertung anhand ihrer Erfahrung und Erwartung ist. Es wird davon ausgegangen, dass diese Wahrnehmung und Bewertung aufgrund einer Stimulation durch die Umgebungsbedingungen erfolgt. Diese postulierte kausale Kette ist anschaulich in Abbildung 5.1 dargestellt.

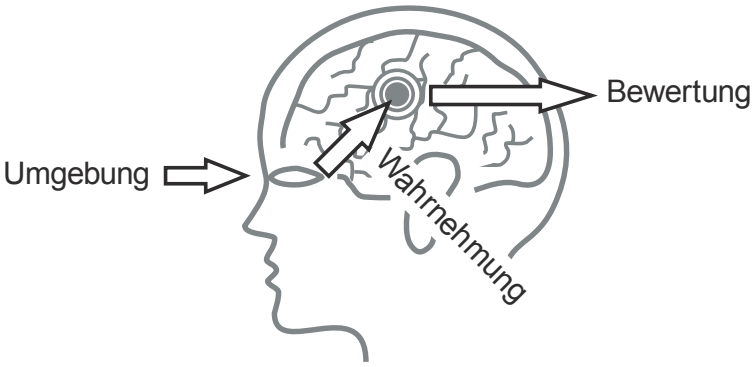


Abbildung 5.1: Postulierte kausale Kette des Zusammenhangs zwischen Umgebungsbedingungen und Komfort. Die Umgebung stimuliert die Wahrnehmung, welche zu einer Bewertung durch die Person führt. Ergebnis ist eine Aussage bezüglich des Komforts.

Dieser kausale Zusammenhang wird in der Raumklimaforschung als plausible Ursache-Wirkungs-Beziehung vorausgesetzt und lässt sich aufgrund der Auffas-

sung von Komfort als subjektives psychologisches Konstrukt direkt in die Notation von Strukturgleichungsmodellen als MIMIC-Modell (Multiple Indicators Multiple Causes) überführen, siehe Abbildung 5.2.

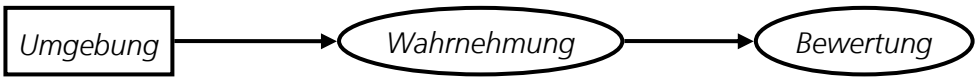


Abbildung 5.2: MIMIC-Modell der kausalen Kette des Zusammenhangs von Umgebungsbedingungen und Komfort. Nicht dargestellt sind Fehlervariablen und mögliche Messmodelle.

Hierbei fungieren die exogenen manifesten Variablen der *Umgebung* als Ursache, die endogenen latenten Variablen *Wahrnehmung* und *Bewertung* als Wirkung. In dieser Arbeit wird Komfort als angenehmer Zustand physiologischer, psychologischer und physikalischer Harmonie zwischen der Person und den verschiedenen Aspekten ihrer Umgebung verstanden. Dementsprechend wird weiterhin angenommen, dass unterschiedliche Umgebungsparameter unterschiedliche Wahrnehmungen stimulieren, durch welche aufgrund einer spezifischen Bewertung eine Gesamtbewertung des Komfortzustandes erfolgt. Abbildung 5.3 stellt dies wiederum als reduziertes Pfaddiagramm dar.

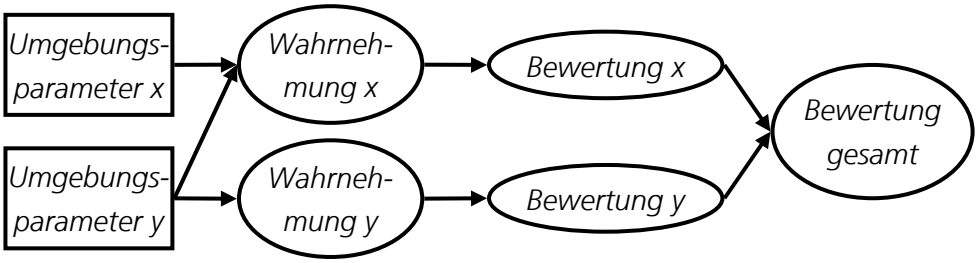


Abbildung 5.3: MIMIC-Modell der kausalen Kette von Umgebungsbedingungen und spezifischer sowie Gesamtbewertung. Nicht dargestellt sind Fehlervariablen und mögliche Messmodelle.

Unter der Annahme, dass die Stimulation des Komfortzustandes durch die Umgebungsparameter nicht unabhängig erfolgt, werden in dem Modell Interrelationen oder Interaktionen angenommen. Hierbei werden unter Interrelationen gegenseitige Abhängigkeiten, unter Interaktionen gemeinsame Wirkungen verstanden. Beispielsweise kann die Bewertung der Luftqualität von der Bewertung der thermischen Umgebung abhängen – eine Interrelation. Oder es könnte der Gesamtdiskomfort größer sein, wenn sowohl akustischer als auch thermischer Diskomfort steigen, im Vergleich zur Zunahme nur eines dieser Bewertungsaspekte – eine Interaktion. Während Interrelationen zwischen latenten Variablen in Strukturgleichungsmodellen einfach abgebildet werden können, bedarf es für Interaktionen der Einführung zusätzlicher latenter Variablen inklusive derer Messmodelle. In dieser Arbeit werden ausschließlich Interrelationen in die Modellierung mit einbezogen, da zum Einen die Einführung weiterer Para-

meter eine Schätzung schwächt und zum Zweiten bezweifelt werden darf, dass bei der erwarteten großen Varianz auf recht kleinen Bewertungsskalen die Teststärke der Schätzung nicht ausreicht, um die erwartet schwachen Effekte einer Interaktion abzubilden. In Abbildung 5.4 sind die prinzipiellen Interrelationen im Pfaddiagramm dargestellt. Es werden lediglich Interrelationen zwischen den latenten Variablen der Bewertung angenommen, da einen gegenseitige Beeinflussung der Sinnesorgane hier nicht relevant erscheint. Eine prinzipielle Hemmung oder Verstärkung der Wahrnehmung, z.B. über neuronale oder hormonelle Vorgänge, ist vorstellbar, deren Betrachtung ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit.

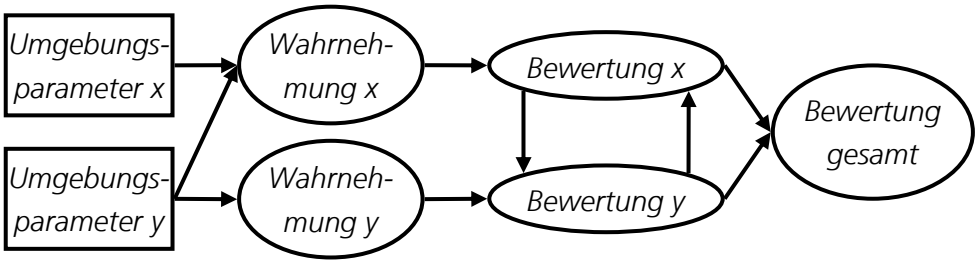


Abbildung 5.4: MIMIC-Modell der kausalen Kette von Umgebungsbedingungen und spezifischer sowie Gesamtbewertung unter Berücksichtigung von Interrelationen der spezifischen Bewertungen. Nicht dargestellt sind Fehlervariablen und mögliche Messmodelle.

Die Umgebungsparameter charakterisieren das physikalische Raumklima. Hierzu werden zum Einen gewonnene Messwerte (z.B. der Temperatur) herangezogen, zum Anderen werden aus den Messgrößen berechnete Indizes betrachtet. Letztere fassen die Einzelgrößen zu Klimasummenmaßen zusammen und inkorporieren bestehendes Wissen über die relativen Beiträge der Einzelgrößen zu deren totalen Effekt auf die Wahrnehmung. Allerdings tragen solche Summengrößen – welche auch eine Form eines Modells sind - einen impliziten Fehler. Dem gegenüber steht einer durch ihre Verwendung geringere Anzahl an im Modell zu schätzender Parameter.

In der angenommenen kausalen Kette des raumklimatischen Komforts nehmen die Wahrnehmungen der Umgebungsparameter die Rolle intervenierender Variablen ein. Sie resultieren aus dem Verständnis der Sinnesorgane als Schnittstelle zwischen Umgebung und Person und vervollständigen das Modell durch ihre Repräsentation eines internen Prozesses. Allerdings erhöhen sie die Komplexität und damit auch die zu schätzenden Parameter erheblich, so dass vor dem Hintergrund einer beschränkten Stichprobe eine Auslassung dieser Zwischenschritte überlegt werden muss. Bollen (1989) bemerkt, dass eine solche Auslassung häufig nicht überaus nachteilig ist, sofern berücksichtigt wird, dass durch dieses Vorgehen lediglich Nettoeffekte geschätzt werden. Dies kann als unkritisch betrachtet werden, solange die ausgelassenen direkten und indirek-

ten Effekte nicht von gegensätzlichem Vorzeichen bei ähnlicher Größenordnung sind, sich also im Nettoeffekt aufheben können. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass solche Auslassungen zulässig sind, da bei der Konzentration auf den Zustand des Diskomforts sämtliche Effekte vorzeichengleich erwartet werden. In Abbildung 5.5 ist ein solches konkurrierendes Modell dargestellt.

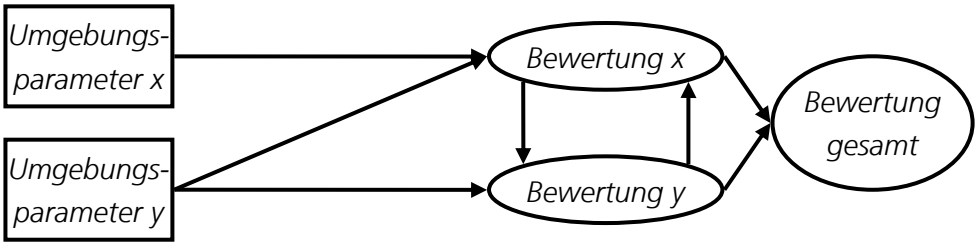


Abbildung 5.5: MIMIC-Modell der kausalen Kette von Umgebungsbedingungen und spezifischer sowie Gesamtbewertung ohne die intervenierenden Variablen der Wahrnehmung. Nicht dargestellt sind Fehlervariablen und mögliche Messmodelle.

In der Literatur finden sich ähnliche Modellvorstellungen, welche in derselben Notation ausgedrückt werden können, beispielsweise bei Nagano und Horikoshi (2005), oder der prinzipielle Vorschlag von Cain (2002) (siehe Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7)

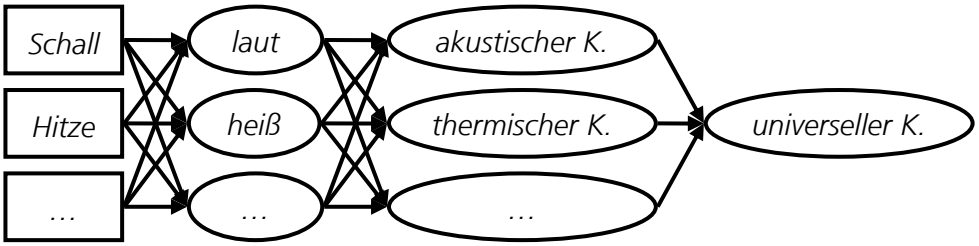


Abbildung 5.6: Modell der kombinierten Effekte nach Nagano und Horikoshi (2005) in einer übersetzten Darstellung als Pfaddiagramm (*K.* kürzt *Komfort* ab). Basierend auf der Stimulus-Antwort-Hypothese gehen sie von einer kausalen Kette Umweltfaktor → Wahrnehmung → faktor-spezifische Bewertung → nicht-spezifische Bewertung aus.

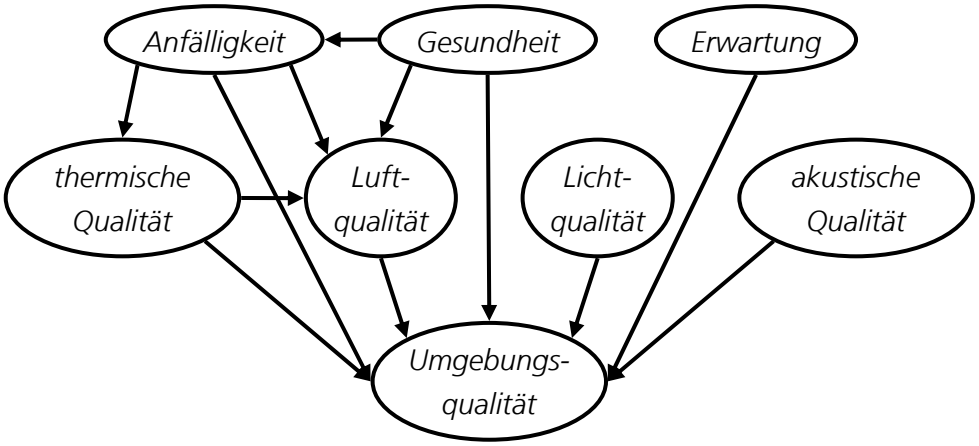


Abbildung 5.7: Prinzipielles Strukturgleichungsmodell nach Cain (2002). Nicht dargestellt sind seine vorgeschlagenen Messmodelle mit ihren Fehlern. Er betont, dass dieses Modell lediglich eine von vielen Möglichkeiten darstellt, mit welchen Komfort modelliert werden könnte.

Sämtliche Modelle basieren auf dem Postulat, dass das Konstrukt Komfort operationalisiert werden kann. Im Rahmen der Strukturgleichungsmodellierung wird dies in Form der Messmodelle ausgedrückt. Da Komfort ein subjektiver Zustand ist, kann dies beispielsweise durch eine Befragung von Probanden realisiert werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass eine latente Variable durch mehrere Ausprägungen beobachtet werden sollte. Als günstig werden hierfür häufig drei bis fünf manifeste Variablen angesehen. Dieses offensichtliche Erfordernis führt zu einer weiteren Zunahme der zu schätzenden Parameter. So ist beispielsweise für ein Strukturgleichungsmodell mit 15 manifesten Variablen bei einer Verwendung einer asymptotischen Kovarianzmatrix (wie bei der WLS-Schätzmethode) eine Stichprobengröße von mindestens 360 notwendig (Baltes-Götz (2002)).

Eine für die Entwicklung solcher Modelle taugliche Untersuchungsreihe mit einer großen Stichprobe und einem kontrollierten Raumklima wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in der Flight Test Facility durchgeführt. Im Rahmen des EU-Projekts Ideal Cabin Environment (ICE) wurden mehrere hundert Probanden bei verschiedenen raumklimatischen Bedingungen in einer simulierten Flugzeugumgebung befragt. Da ein Ziel dieses Projektes die Untersuchung von kombinierten Effekten des Kabinenklimas auf die physiologische und psychologische Reaktion der Passagiere ist, wurde auf ein sorgfältiges Versuchsdesign wert gelegt, welches eine solide Basis für die in dieser Arbeit durchgeführte Modellierung ist.

Zusammenfassend werden für die hier gewählten Strukturgleichungsmodelle die folgenden Hypothesen getroffen:

H1 Die Messmodelle der latenten Variablen sind adäquat.

H2 Mit Hilfe der manifesten Variablen der Raumklimagrößen können die latenten Variablen (a) der Komfortaspekte bzw. (b) der Wahrnehmung erklärt werden.

H3 Die latente Variable des Gesamtkomforts kann durch eine Kombination der latenten Variablen (a) der Komfortaspekte bzw. (b) der Komfortaspekte und der zugehörigen Wahrnehmung erklärt werden.

H4 Die Modellgüte ist gleichwertig oder besser, falls die intervenierenden latenten Variablen der Wahrnehmung vernachlässigt werden.

H5 Die Modellgüte ist gleichwertig oder besser, falls die manifesten Variablen der Raumklimagrößen durch Raumklimaindizes ersetzt werden.

Die Messmodelle für die erste Hypothese werden anhand einer Hauptkomponentenanalyse, als spezielle Form der Strukturgleichungsmodellierung, aufgestellt. Darauf folgend werden die Hypothesen eins bis drei für die jeweiligen Modelle aufgrund von Goodness-of-fit Indizes bewertet und anhand eines Validierungsdatensatzes getestet. Für diesen wird die ursprüngliche Stichprobe zufällig in zwei Datensätze geteilt. Die beiden letzten Hypothesen werden anhand von Modellgütekriterien, mit welchen die unterschiedlichen Modelle miteinander verglichen werden können, untersucht.

5.2 Analyse der Fragebogendaten

Nach einer Beschreibung der verwendeten Fragebogenitems und ihrer Kodierung wird das Verfahren zur Bereinigung der Daten aufgezeigt. Es folgt eine Deskription und Untersuchung der bei konstantem Raumklima mehrfach gestellten Fragen auf eine Änderung über die Zeit. Schließlich werden anhand einer Hauptkomponentenanalyse für die Strukturgleichungsmodellierung geeignete latente Variablen und ihre Messmodelle ausgewählt.

5.2.1 Verwendete Items

Im Rahmen des EU-Projektes Ideal Cabin Environment (ICE) wurde vom Konsortium ein umfangreicher Fragebogen zu den Themenfeldern Komfort, Stimmung, Symptome und Verhalten entworfen, dessen Erhebung in der Fraunhofer FTF vom Zentrum für Public Health, Institut für Umwelthygiene der Medizi-

nischen Universität Wien betreut wurde. In dieser Arbeit werden daraus Fragen zur Wahrnehmung und Bewertung von den Umweltfaktoren thermische Umgebung, Luftqualität, Vibro-Akustik und Gesamteindruck verwendet, welche sich an die in DIN EN ISO 10551 (2002) empfohlenen Items für Fragebögen zur thermischen Behaglichkeit anlehnen. Die verwendeten Items sind in Tabelle 5.1, Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 gegliedert nach Wahrnehmung, Komfort und Gesamtbedingungen dargestellt.

Tabelle 5.1: Relevante Items des Fragebogens der Klasse „Wahrnehmung" inklusive ihrer Kodierung. In der ersten Spalte ist die in dieser Arbeit verwendete Variable aufgeführt. Hierbei steht der Index „o" für die originale Kodierung. Das Präfix „Sv" repräsentiert die Fragebogen-Klasse Wahrnehmung („sensation vote").

Variable	Umwelt: Momentane Wahrnehmung						
SvT_o	Momentan ist die Temperatur insgesamt …						
	1	2	3	4	5	6	7
	kalt	kühl	leicht kühl	neutral	leicht warm	warm	heiß
$SvT11_o$	Momentan ist die Temperatur im Kopfbereich …						
	1	2	3	4	5	6	7
	kalt	kühl	leicht kühl	neutral	leicht warm	warm	heiß
$SvT01_o$	Momentan ist die Temperatur im Fußbereich …						
	1	2	3	4	5	6	7
	kalt	kühl	leicht kühl	neutral	leicht warm	warm	heiß
$SvRH_o$	Momentan ist die Luft …						
	1	2	3	4	5	6	7
	sehr trocken	trocken	etwas trocken	neutral	etwas feucht	feucht	sehr feucht
$SvVent_o$	Momentan ist die Luft …						
	1	2	3	4			
	sehr abgestanden	abgestanden	etwas abgestanden	überhaupt nicht abgestanden			

Variable	Umwelt: Momentane Wahrnehmung
$SvOdour_o$	Momentan sind Gerüche …
	1 stark; 2 deutlich; 3 schwach; 4 nicht wahrnehmbar
$SvSPL_o$	Momentan sind die Geräusche …
	1 sehr leise; 2 leise; 3 etwas leise; 4 neutral; 5 etwas laut; 6 laut; 7 sehr laut
$SvNpax_o$	Momentan sind … Geräusche von anderen Passagieren zu hören
	1 viele; 2 einige; 3 wenige; 4 keine
$SvVibra_o$	Momentan ist die Vibration …
	1 stark; 2 deutlich; 3 schwach; 4 nicht wahrnehmbar

Tabelle 5.2: Relevante Items des Fragebogens der Klasse „Komfort" inklusive ihrer Kodierung. In der ersten Spalte ist die in dieser Arbeit verwendete Variable aufgeführt. Hierbei steht der Index „o" für die originale Kodierung. Das Präfix „Cv" repräsentiert die Fragebogen-Klasse Komfort („comfort vote").

Variable	Komfort: Bewerten Sie den Komfort (= ideale Bedingung) Ihrer Umgebung
CvT_o	Momentan finde ich die Temperatur insgesamt …
	1 ---; 2 --; 3 -; 4 +; 5 -; 6 --; 7 ---
	1 zu kühl; 4 komfortabel; 7 zu warm

Variable	Komfort: Bewerten Sie den Komfort (= ideale Bedingung) Ihrer Umgebung

$CvT11_o$ Momentan finde ich die Temperatur im Kopfbereich …

1	2	3	4	5	6	7
---	--	-	+	-	--	---
zu kühl			komfortabel			zu warm

$CvT01_o$ Momentan finde ich die Temperatur im Fußbereich …

1	2	3	4	5	6	7
---	--	-	+	-	--	---
zu kühl			komfortabel			zu warm

$CvRH_o$ Momentan finde ich die Luft …

1	2	3	4	5	6	7
---	--	-	+	-	--	---
zu trocken			komfortabel			zu feucht

$CvVent_o$ Momentan finde ich die Luft …

1	2	3	4
---	--	-	+
zu abgestanden			komfortabel

$CvOdour_o$ Momentan finde ich die Gerüche in der Kabine …

1	2	3	4
---	--	-	+
lästig			komfortabel

$CvSPL_o$ Momentan finde ich die Geräusche …

1	2	3	4	5	6	7
---	--	-	+	-	--	---
zu leise			komfortabel			zu laut

Variable	Komfort: Bewerten Sie den Komfort (= ideale Bedingung) Ihrer Umgebung
$CvNannoy_o$	Momentan finde ich den Lärm …
	1 (---) lästig; 2 (--); 3 (-); 4 (+) komfortabel
$CvVibra_o$	Momentan finde ich die Vibrationen …
	1 (---) unkomfortabel; 2 (--); 3 (-); 4 (+) komfortabel

Tabelle 5.3: Relevante Items des Fragebogens der Klasse „Gesamtbedingungen" inklusive ihrer Kodierung. In der ersten Spalte ist die in dieser Arbeit verwendete Variable aufgeführt. Hierbei steht der Index „o" für die originale Kodierung. Das Präfix „CvC" repräsentiert die Fragebogen-Klasse Gesamtbedingungen („comfort vote conditions").

Variable	Bitte geben Sie einige Einschätzungen über die Bedingungen insgesamt ab:
$CvCcomf4_o$	Momentan sind mir die Bedingungen insgesamt …
	1 sehr unkomfortabel; 2 unkomfortabel; 3 etwas unkomfortabel; 4 komfortabel
$CvCpleas_o$	Momentan sind mir die Bedingungen insgesamt …
	1 sehr unbehaglich; 2 unbehaglich; 3 etwas unbehaglich; 4 behaglich

Die Fragen wurden den Probanden in der genannten Reihenfolge auf Personal Digital Assistants (PDAs) während der Expositionsphasen präsentiert. Je Bildschirm war lediglich eine Frage sichtbar, ein Vor- und Zurückschalten war möglich, ohne dass eine Eingabe des Nutzers erzwungen wurde.

5.2.2 Umkodierung der Variablen

Während die Fragen nach den Gesamtbedingungen auf einer unipolaren Skala gefragt wurden, sind für Items der Wahrnehmung und Bewertung je nach Dimension sowohl unipolare, als auch bipolare Skalen verwendet worden. Die Eindrücke bezüglich der Temperatur können sowohl Wärme- als auch Kälteempfinden ansprechen, ebenso ist es vorstellbar, dass eine Umgebung (zu) laut oder (zu) leise beziehungsweise (zu) trocken oder (zu) feucht sein kann. Im Hinblick auf eine Modellbildung mittels linearer Strukturgleichungsmodellen ist es notwendig sämtliche Skalen in einer äquivalenten Form zu verwenden, da sowohl niedrige, wie auch hohe Werte einer bipolaren Skala mit niedrigen Werten der unipolaren Skalen hypothetisch zusammenhängen würden. In Abbildung 5.8 ist dies am Beispiel von fiktiven Fragen zur Beleuchtungssituation demonstriert.

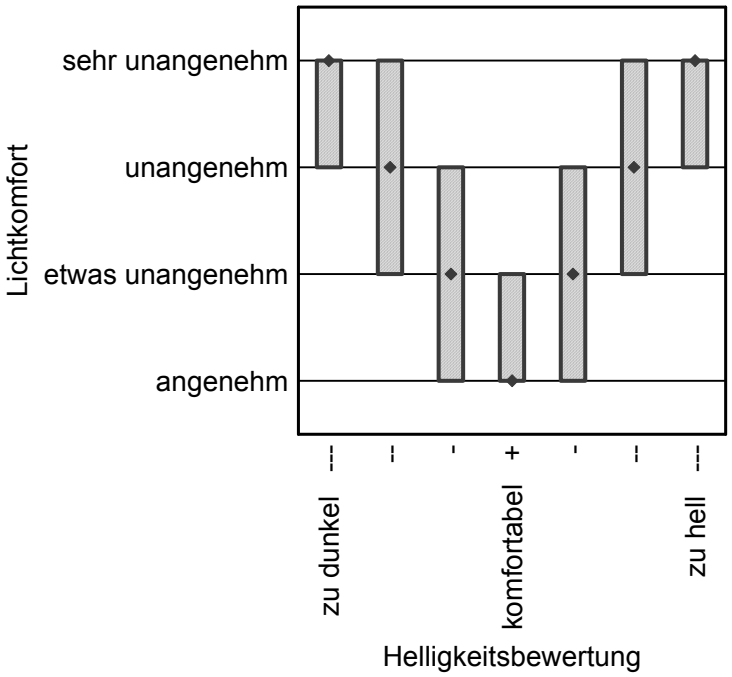


Abbildung 5.8: Nichtlinearer Zusammenhang zwischen fiktiven Fragen nach der Helligkeitsbewertung (bipolar) und dem Lichtkomfort (unipolar). Durch Splitten des Items Helligkeitsbewertung in zwei Variablen mit den Polen „zu dunkel" bzw. „zu hell" könnten zwei lineare Beziehungen zum Item Lichtkomfort geschätzt werden.

Um mit Hilfe linearer Beziehungen Zusammenhänge abzubilden gibt es zum einen die Möglichkeit die Skalen zu transformieren und zum anderen die bipolaren in zwei unipolare Skalen zu splitten. Da die Varianz in den Antworten bei den in dieser Arbeit verwendeten Skalen grundsätzlich hoch ist, die Skalen jedoch mit vier bis sieben Punkten beschränkt sind, bietet eine Transformation

der Daten aufgrund der Unsicherheiten kaum Vorteile. Daher wurde hier das alternative Vorgehen gewählt und die Fragen bezüglich Temperatur, Schall und Feuchte gesplittet. Bei den akustischen und hygrischen Items waren aufgrund der speziellen Umgebung der simulierten Flugzeugs und der dabei gewählten Parameter (64 dB(A) bis 74 dB(A) bzw. 10 % bis 40 % RH) nur wenige Antworten in den Ausprägungen „(zu) leise" und „(zu) feucht" zu erwarten. Dies konnte bestätigt werden (siehe Tabelle 5.4 bis Tabelle 5.7), weshalb diese Skalen nach dem Splitting mit dem Indifferenzpunkt zusammengefasst wurden. Ansonsten läge der größte Teil der Antworten (ca. 90 %) in den aufgesplitteten Items für die Ausprägungen „(zu) leise" und „(zu) feucht" im Indifferenzpunkt, womit von diesen Items kein substantieller Beitrag zur Aufklärung der Varianz geleistet werden kann.

Tabelle 5.4: Häufigkeitstabelle für die Variable *SvRH*. Anteile in Prozent gruppiert nach den nominalen Leveln der relativen Feuchte. Grau hinterlegt sind jene Stufen, welche mit dem Indifferenzpunkt (4) zusammengefasst wurden, da ihr prozentualer Anteil gering ist.

Stufe	1	2	3	4	5	6	7
10 % RH	2,8	14,2	37,6	40,7	4,2	0,4	0,0
25 % RH	3,2	13,5	36,0	44,1	3,2	0,0	0,0
40 % RH	2,1	11,7	37,7	43,8	4,5	0,1	0,0
alle	2,6	13,3	37,4	42,3	4,2	0,3	0,0

Tabelle 5.5: Häufigkeitstabelle für die Variable *CvRH*. Anteile in Prozent gruppiert nach den nominalen Leveln der relativen Feuchte. Grau hinterlegt sind jene Stufen, welche mit dem Indifferenzpunkt (4) zusammengefasst wurden, da ihr prozentualer Anteil gering ist.

Stufe	1	2	3	4	5	6	7
10 % RH	5,3	13,3	37,3	40,7	3,0	0,3	0,1
25 % RH	4,3	13,8	36,1	42,4	3,4	0,0	0,0
40 % RH	3,2	14,5	35,1	44,0	3,1	0,1	0,0
alle	4,5	13,8	36,4	42,1	3,1	0,2	0,0

Tabelle 5.6: Häufigkeitstabelle für die Variable *SvSPL*. Anteile in Prozent gruppiert nach den nominalen Leveln des Schalldruckpegels. Grau hinterlegt sind jene Stufen, welche mit dem Indifferenzpunkt (4) zusammengefasst wurden, da ihr prozentualer Anteil gering ist.

Stufe	1	2	3	4	5	6	7
64 dB(A)	0,3	4,1	7,6	24,2	50,9	11,7	1,3
69 dB(A)	0,0	3,3	5,8	27,5	45,8	16,7	0,8
74 dB(A)	0,1	1,7	2,4	16,8	45,1	25,9	8,0
alle	0,1	2,2	3,5	18,6	46,1	23,0	6,5

Tabelle 5.7: Häufigkeitstabelle für die Variable *CvSPL*. Anteile in Prozent gruppiert nach den nominalen Leveln des Schalldruckpegels. Grau hinterlegt sind jene Stufen, welche mit dem Indifferenzpunkt (4) zusammengefasst wurden, da ihr prozentualer Anteil gering ist.

Stufe	1	2	3	4	5	6	7
64 dB(A)	0,0	0,3	2,6	28,3	41,8	20,4	6,6
69 dB(A)	0,0	0,8	2,5	26,3	39,0	26,3	5,1
74 dB(A)	0,0	0,3	2,3	16,0	38,0	29,8	13,7
alle	0,0	0,3	2,3	18,6	38,7	28,0	12,1

Dementsprechend wurden die originalen Fragen wie folgt umkodiert, wobei der Index „o" für die originale Kodierung steht. Die Präfixe „Sv", „Cv" und„CvC" repräsentieren die Fragebogen-Klassen Wahrnehmung („sensation vote"), Komfort („comfort vote") und Gesamtbedingungen („comfort vote conditions"). Die Suffixe „w" und „c" bei Items bezüglich der thermischen Umgebung stehen für den jeweiligen warmen („warm") und kalten („cool") Aspekt.

$$SvTw = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } SvT_o - 4 < 0 \\ SvT_o - 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$SvTc = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } SvT_o - 4 > 0 \\ -SvT_o + 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$SvT11w = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } SvT11_o - 4 < 0 \\ SvT11_o - 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$SvT11c = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } SvT11_o - 4 > 0 \\ -SvT11_o + 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$SvT01w = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } SvT01_o - 4 < 0 \\ SvT01_o - 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$SvT01c = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } SvT01_o - 4 > 0 \\ -SvT01_o + 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$SvRH = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } SvRH_o - 4 > 0 \\ -SvRH_o + 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$SvVent = -SvVent_o + 4 \quad (5.8)$$

$$SvOdour = -SvOdour_o + 4 \quad (5.9)$$

$$SvSPL = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } SvSPL_o - 4 < 0 \\ SvSPL_o - 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.10)$$

$$SvNpax = -SvNpax_o + 4 \quad (5.11)$$

$$SvVibra = -SvVibra_o + 4 \quad (5.12)$$

$$CvTw = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } CvT_o - 4 < 0 \\ CvT_o - 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.13)$$

$$CvTc = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } CvT_o - 4 > 0 \\ -CvT_o + 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.14)$$

$$CvT11w = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } CvT11_o - 4 < 0 \\ CvT11_o - 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.15)$$

$$CvT11c = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } CvT11_o - 4 > 0 \\ -CvT11_o + 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.16)$$

$$CvT01w = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } CvT01_o - 4 < 0 \\ CvT01_o - 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.17)$$

$$CvT01c = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } CvT01_o - 4 > 0 \\ -CvT01_o + 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.18)$$

$$CvRH = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } CvRH_o - 4 > 0 \\ -CvRH_o + 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.19)$$

$$CvVent = -CvVent_o + 4 \quad (5.20)$$

$$CvOdour = -CvOdour_o + 4 \quad (5.21)$$

$$CvSPL = \begin{cases} 0 & \text{, wenn } CvSPL_o - 4 < 0 \\ CvSPL_o - 4 & \text{, sonst} \end{cases} \quad (5.22)$$

$$CvNannoy = -CvNannoy_o + 4 \quad (5.23)$$

$$CvVibra = -CvVibra_o + 4 \quad (5.24)$$

$$CvCcomf4 = -CvCcomf4_o + 4 \quad (5.25)$$

$$CvCpleas = -CvCpleas_o + 4 \quad (5.26)$$

5.2.3 Bereinigung der Fragebogendaten anhand von Bekleidungsitems

Das Finden von Ausreißern auf 4- bzw. 7-stufigen Skalen ist objektiv kaum möglich. Insbesondere für die hier untersuchten Fragen werden Antworten auf der gesamten Skala erwartet, wobei individuelle Unterschiede recht groß sein können. Standardisierte Methoden für die Ausreißersuche sind daher nicht geeignet. Erfahrungsgemäß nehmen an Probandenstudien auch Personen teil, deren Antworten unzuverlässig sind. Als Indikatorfragen für solche Personen wurden die Fragen nach der Bekleidung verwendet. In Tabelle 5.8 sind die mit dem Fragebogen erfassten Items und die verwendeten Bekleidungsdämmwerte aufgeführt, wobei Mehrfachantworten zugelassen waren. Die angegebenen Bekleidungsdämmwerte in der Einheit clo orientieren sich an den Angaben in DIN EN ISO 9920 (2005).

Tabelle 5.8: Verwendete Bekleidungsitems und –dämmwerte in clo, Mehrfachantworten waren zulässig.

Welche Unterwäsche tragen Sie?				
keine	Unterhemd	Body	T-Shirt	Unterhosen
0 clo	0,06 clo	0,10 clo	0,12 clo	0,03 clo
Welche Strumpfhosen tragen Sie?				
keine	warme Strumpfhose	dünne Strumpfhose	lange Unterhose / Leggins	
0 clo	0,08 clo	0,03 clo	0,10 clo	
Was für Strümpfe tragen Sie?				
keine	Socken (knöchellang)	Kniestrümpfe	Stützstrümpfe	
0 clo	0,02 clo	0,06 clo	0,03 clo	

Was für Schuhe tragen Sie?				
keine	leichte Schuhe / Sandalen / leichte Turn-schuhe	normale Schuhe / Turnschuhe	warme Schuhe	Stiefel
0 clo	0,02 clo	0,03 clo	0,05 clo	0,10 clo
Welche Hose / Rock / Kleid tragen Sie?				
keine(n)	dünne Hose / dünner Rock / dünnes Kleid	warme Hose / warmer Rock	Winterkleid mit langem Arm	
0 clo	0,20 clo	0,28 clo	0,47 clo	
Was für Oberteile tragen Sie?				
kein(e)	leichte Bluse / leichtes Hemd	warme Bluse / warmes Hemd	leichter Pullover / leichte Weste	warmer Pullo-ver / Sweater / Pullunder
0 clo	0,20 clo	0,30 clo	0,20 clo	0,35 clo
Welche Überbekleidung tragen Sie?				
keine	Jacke	Anorak / Parka	leichter Mantel	schwerer Mantel
0 clo	0,40 clo	0,70 clo	0,50 clo	0,60 clo

Nach DIN EN ISO 9920 (2005) berechnet sich der Gesamtbekleidungsdämmwert I_{cl} aus den einzelnen Bekleidungsangaben $I_{cl,i}$ zu

$$I_{cl} = 0{,}161 + 0{,}835 \sum_{i=1}^{n} I_{cl,i} \tag{5.27}$$

wobei der Flugzeugsitz mit einem Dämmwert von 0,27 clo angenommen wurde (Nilsson (2004)). Als Grundlage für eine Datenbereinigung wird zum einen ein Gesamtbekleidungsdämmwert um die 1 clo (inklusive Stuhl) erwartet, zum anderen können ungewöhnliche Antworten recht leicht gefunden werden. Demzufolge wurden die Antworten von Probanden ausgeschlossen, wenn Bekleidungsdämmwert außerhalb des Intervalls 0,5 clo bis 1,5 clo und auffällige Bekleidungskombinationen wie folgt angegeben wurden:

- Missing data oder unplausibel fehlende Items (z.B. Oberteil, Beinbekleidung)
- jedes oder unplausibel mehrere Items angekreuzt (z.B. Schuhe, Hosen)
- auffällig häufig wechselnde Items.

Aufgrund dieser Indikatoren wurden 21 Probanden vollständig, von einem Probanden zwei und von fünf Probanden je eine Exposition aus der Datenbank entfernt.

5.2.4 Beschreibende Statistiken der verwendeten Items

Die nach der Bereinigung resultierenden Bekleidungsdämmwerte sind in Tabelle 5.9 für jede Exposition aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass Bekleidungsdämmwerte grundsätzlich um einen Mittelwert von 1,1 clo streuen, unabhängig von Expositionsphase und/oder Test. Ebenfalls aufgeführt sind die resultierenden Anzahlen an Probanden bezüglich des Geschlechts- und Altersprofils. Hierfür sowie für die folgenden Analysen wurde die Statistik-Software STATISTICA 8.0 (StatSoft, Inc., Tusla, OK, USA) benutzt.

Tabelle 5.9: Anzahl n an Probanden bezüglich Geschlechts- und Altersprofil sowie mittlere Bekleidungsdämmwerte in clo während der Expositionen für die jeweiligen sowie alle betrachteten Tests.

Test	Geschlecht		Alter			Bekleidungsdämmwert		
	$n_{männlich}$	$n_{weiblich}$	n_{18-34}	n_{35-50}	$n_{>50}$	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
3	16	19	13	8	14	1,18	1,17	1,16
4	18	19	14	9	14	1,17	1,19	1,17
5	20	18	17	9	12		1,13	1,10
6	21	17	14	12	12	1,11	1,11	1,09
7	21	19	15	9	16	1,12	1,09	1,10
8	20	19	16	10	13	1,06	1,04	1,04
9	20	20	16	9	15	1,06	1,06	1,05
10	19	20	13	13	13	1,07	1,06	1,05
11	20	19	14	9	16		1,11	1,10
12	20	19	11	16	12	1,08	1,07	1,07
13	20	19	12	15	12	1,09	1,08	1,06
14	20	18	13	11	14		1,10	1,10
15	21	17	13	11	14	1,10	1,10	1,09
16	18	20	14	10	14	1,10	1,13	1,14
17	24	15	15	10	14	1,06	1,06	1,04
18	16	20	12	12	12	1,10	1,08	1,14
19	18	22	13	12	15		1,11	1,12
20	16	22	14	9	15	1,13	1,11	1,09
21	22	17	13	12	14		1,04	1,04
22	18	21	13	12	14	1,17	1,14	1,13
23	16	23	13	12	14	1,09		1,09
28	17	23	7	12	21	1,16	1,12	1,16
alle	**421**	**426**	**295**	**242**	**310**	**1,11**	**1,10**	**1,10**

Über alle Tests sind in Tabelle 5.10 für alle umkodierten Items neben Mittelwert und Standardabweichung der Median sowie das untere und obere Quartil dar-

gestellt. Nachdem Mittelwert und Standardabweichung eine zuverlässige Aussage nur für normalverteilte Daten geben, wurden die umkodierten Fragen mit Hilfe des Shapiro-Wilk Tests auf Abstammung aus einer normalverteilten Population untersucht. Die Ergebnisse für die Überprüfung über alle Tests ist ebenfalls dargestellt. Der Shapiro-Wilk Test ist für sämtliche Fragen signifikant ($p < 0,05$), weshalb die Hypothese von normalverteilten Antworten abgelehnt werden muss.

Tabelle 5.10: Deskription und Ergebnisse des Shapiro-Wilk Tests für sämtliche Fragen über alle Tests in allen drei Expositionen (Q25 = unteres Quartil, Q75 = oberes Quartil, Stdabw. = Standardabweichung, W = Prüfgröße und p = Signifikanzniveau des Shapiro-Wilk Tests).

Variable	Exposition	Anzahl	Q25	Median	Q75	Mittelwert	Stdabw.	W	p
SvTc	1	657	0,0	0,0	1,0	0,51	0,73	0,699	< 0,01
	2	813	0,0	0,0	1,0	0,45	0,72	0,653	< 0,01
	3	847	0,0	0,0	1,0	0,34	0,65	0,579	< 0,01
SvT11c	1	657	0,0	0,0	1,0	0,36	0,62	0,611	< 0,01
	2	813	0,0	0,0	1,0	0,35	0,61	0,602	< 0,01
	3	847	0,0	0,0	0,0	0,28	0,57	0,544	< 0,01
SvT01c	1	657	0,0	0,0	1,0	0,69	0,87	0,756	< 0,01
	2	813	0,0	0,0	1,0	0,54	0,82	0,681	< 0,01
	3	847	0,0	0,0	1,0	0,46	0,81	0,618	< 0,01
SvTw	1	653	0,0	0,0	0,0	0,31	0,59	0,563	< 0,01
	2	806	0,0	0,0	1,0	0,39	0,67	0,616	< 0,01
	3	844	0,0	0,0	1,0	0,49	0,72	0,683	< 0,01
SvT11w	1	647	0,0	0,0	1,0	0,32	0,60	0,576	< 0,01
	2	805	0,0	0,0	0,0	0,31	0,60	0,570	< 0,01
	3	840	0,0	0,0	1,0	0,43	0,69	0,647	< 0,01
SvT01w	1	651	0,0	0,0	0,0	0,18	0,48	0,429	< 0,01
	2	805	0,0	0,0	0,0	0,29	0,58	0,547	< 0,01
	3	839	0,0	0,0	1,0	0,37	0,66	0,592	< 0,01
SvRH	1	657	0,0	0,0	1,0	0,60	0,74	0,745	< 0,01
	2	813	0,0	1,0	1,0	0,74	0,80	0,792	< 0,01
	3	847	0,0	1,0	1,0	0,77	0,81	0,799	< 0,01
SvVent	1	649	0,0	1,0	1,0	0,70	0,73	0,782	< 0,01
	2	808	0,0	1,0	1,0	0,87	0,74	0,819	< 0,01
	3	842	0,0	1,0	1,0	0,98	0,76	0,832	< 0,01

Variable	Exposition	Anzahl	Q25	Median	Q75	Mittelwert	Stdabw.	W	p
SvOdour	1	656	0,0	1,0	1,0	0,68	0,68	0,771	< 0,01
	2	812	0,0	1,0	1,0	0,71	0,64	0,771	< 0,01
	3	843	0,0	1,0	1,0	0,77	0,66	0,782	< 0,01
SvSPL	1	653	1,0	1,0	2,0	1,24	0,82	0,861	< 0,01
	2	811	0,0	1,0	2,0	1,09	0,86	0,855	< 0,01
	3	843	0,0	1,0	2,0	1,05	0,85	0,846	< 0,01
SvNpax	1	655	1,0	1,0	2,0	1,35	0,60	0,763	< 0,01
	2	811	1,0	1,0	2,0	1,27	0,59	0,751	< 0,01
	3	844	1,0	1,0	2,0	1,26	0,61	0,766	< 0,01
SvVibra	1	654	1,0	1,0	1,0	0,89	0,59	0,747	< 0,01
	2	811	0,0	1,0	1,0	0,84	0,58	0,748	< 0,01
	3	845	0,0	1,0	1,0	0,81	0,58	0,739	< 0,01
CvTc	1	657	0,0	0,0	1,0	0,60	0,84	0,714	< 0,01
	2	813	0,0	0,0	1,0	0,50	0,82	0,650	< 0,01
	3	847	0,0	0,0	0,0	0,37	0,73	0,564	< 0,01
CvT11c	1	657	0,0	0,0	1,0	0,38	0,73	0,576	< 0,01
	2	813	0,0	0,0	1,0	0,35	0,65	0,586	< 0,01
	3	847	0,0	0,0	0,0	0,26	0,60	0,486	< 0,01
CvT01c	1	657	0,0	0,0	2,0	0,82	1,01	0,766	< 0,01
	2	813	0,0	0,0	1,0	0,66	0,94	0,709	< 0,01
	3	847	0,0	0,0	1,0	0,53	0,89	0,632	< 0,01
CvTw	1	657	0,0	0,0	0,0	0,18	0,50	0,413	< 0,01
	2	811	0,0	0,0	0,0	0,23	0,56	0,468	< 0,01
	3	843	0,0	0,0	0,0	0,31	0,65	0,532	< 0,01
CvT11w	1	653	0,0	0,0	0,0	0,18	0,50	0,413	< 0,01
	2	805	0,0	0,0	0,0	0,21	0,52	0,449	< 0,01
	3	847	0,0	0,0	0,0	0,27	0,61	0,507	< 0,01
CvT01w	1	653	0,0	0,0	0,0	0,10	0,37	0,294	< 0,01
	2	807	0,0	0,0	0,0	0,18	0,51	0,395	< 0,01
	3	841	0,0	0,0	0,0	0,22	0,57	0,451	< 0,01
CvRH	1	657	0,0	0,0	1,0	0,68	0,80	0,764	< 0,01
	2	813	0,0	1,0	1,0	0,81	0,86	0,801	< 0,01
	3	847	0,0	1,0	1,0	0,81	0,86	0,803	< 0,01

Variable	Exposition	Anzahl	Q25	Median	Q75	Mittelwert	Stdabw.	W	p
CvVent	1	650	0,0	1,0	1,0	0,92	0,78	0,831	< 0,01
	2	803	0,0	1,0	2,0	1,05	0,80	0,848	< 0,01
	3	841	0,0	1,0	2,0	1,09	0,85	0,856	< 0,01
CvOdour	1	654	0,0	1,0	1,0	0,74	0,77	0,791	< 0,01
	2	807	0,0	1,0	1,0	0,80	0,74	0,805	< 0,01
	3	842	0,0	1,0	1,0	0,86	0,74	0,816	< 0,01
CvSPL	1	653	1,0	1,0	2,0	1,47	0,92	0,880	< 0,01
	2	807	1,0	1,0	2,0	1,28	0,95	0,873	< 0,01
	3	843	1,0	1,0	2,0	1,22	0,93	0,867	< 0,01
CvNannoy	1	651	1,0	1,0	2,0	1,57	0,90	0,872	< 0,01
	2	808	1,0	1,0	2,0	1,47	0,90	0,871	< 0,01
	3	844	1,0	1,0	2,0	1,43	0,86	0,866	< 0,01
CvVibra	1	655	0,0	0,0	1,0	0,57	0,67	0,743	< 0,01
	2	809	0,0	1,0	1,0	0,64	0,72	0,763	< 0,01
	3	847	0,0	1,0	1,0	0,64	0,71	0,762	< 0,01
CvCcomf4	1	654	0,0	1,0	1,0	0,74	0,72	0,779	< 0,01
	2	806	0,0	1,0	1,0	0,83	0,69	0,793	< 0,01
	3	842	0,0	1,0	1,0	0,89	0,72	0,802	< 0,01
CvCpleas	1	649	0,0	1,0	1,0	0,69	0,69	0,767	< 0,01
	2	810	0,0	1,0	1,0	0,81	0,69	0,789	< 0,01
	3	843	0,0	1,0	1,0	0,85	0,70	0,799	< 0,01

Nachdem die Variablen der Fragebogenantworten nicht normalverteilt sind, können die eigentlich ordinal skalierten Antworten nicht als kontinuierlich angesehen werden. Demzufolge ist es nicht zulässig für die Strukturgleichungsmodellierung eine Schätzung der Parameter basierend auf Kovarianz- oder Produkt-Moment-Korrelationsmatrizen durchzuführen. Hier bietet die polychorische Korrelation die Möglichkeit robuste Schätzungen durch Abbilden der ordinalen auf unterliegende normalverteilte kontinuierliche Variablen zu erhalten. Daher werden in dieser Arbeit polychorische Korrelationsmatrizen für die Strukturgleichungsmodellierung verwendet.

5.2.5 Analyse der zeitlichen Konstanz

Um zu prüfen, ob sich die Bewertung des Kabinenklimas mit der Zeit ändert, wurden die Antworten aller Fragen für jeden Test auf Unterschiede zwischen

den Expositionen getestet. Mit Hilfe des Wilcoxon-Tests wurden je zwei Expositionen überprüft, alle Expositionen wurden mittels einer Friedman-ANOVA untersucht. Eine Zusammenfassung der prozentualen Anteile ist in Tabelle 5.11 dargestellt.

Tabelle 5.11: Prozent der signifikant unterschiedlichen Expositionen (p<0,05), geringe Anteile sind farbig hinterlegt: hellgrau = <20 %, mittelgrau = <15 %, dunkelgrau = <10 %. Getestet wurden die Unterschiede zwischen je zwei Expositionen mit dem Wilcoxon-Test, zwischen allen drei Expositionen mittels einer Friedman-ANOVA.

Variable	Wilcoxon-Test Exp. 1 & 2	Wilcoxon-Test Exp. 1 & 3	Wilcoxon-Test Exp. 2 & 3	Friedman-ANOVA Exp. 1 & 2 & 3
SvTc	31,25	56,25	30,00	68,75
SvT11c	18,75	41,18	20,00	50,00
SvT01c	40,00	64,71	19,05	68,75
SvTw	26,67	68,75	16,67	62,50
SvT11w	18,75	41,18	10,00	43,75
SvT01w	35,71	58,82	10,53	50,00
SvRH	12,50	17,65	4,76	25,00
SvVent	37,50	64,71	28,57	81,25
SvOdour	0,00	5,88	0,00	6,25
SvSPL	25,00	35,29	0,00	37,50
SvNpax	12,50	17,65	19,05	31,25
SvVibra	0,00	5,88	4,76	0,00
CvTc	33,33	68,75	31,58	68,75
CvT11c	13,33	41,18	15,79	43,75
CvT01c	53,33	68,75	25,00	62,50
CvTw	23,08	43,75	10,53	43,75
CvT11w	7,14	17,65	22,22	31,25
CvT01w	18,18	18,75	5,56	25,00
CvRH	18,75	5,88	0,00	0,00
CvVent	18,75	29,41	0,00	25,00
CvOdour	0,00	11,76	4,76	18,75
CvSPL	25,00	47,06	0,00	50,00
CvNannoy	18,75	17,65	0,00	25,00
CvVibra	0,00	0,00	0,00	6,25
CvCcomf4	25,00	23,53	9,52	31,25
CvCpleas	18,75	29,41	4,76	37,50

Insbesondere unter Einschluss der ersten Exposition sind auffallend viele Tests über alle Fragen hinweg signifikant unterschiedlich, was auf eine zeitliche Än-

derung der Bewertung, zumindest von der ersten zur zweiten Exposition, hindeutet. Die Antworten der zweiten und dritten Exposition scheinen recht gut miteinander übereinzustimmen. Durchweg wenige Unterschiede finden sich bei den Antworten bezüglich Geruch und Vibrationen.

Um dieser Beobachtung Rechnung zu tragen werden im Folgenden die einzelnen Expositionen separat behandelt. Dies wird in der Strukturgleichungsmodellierung mit Hilfe eines Mehrgruppenansatzes berücksichtigt, d.h. für jede Exposition werden separat Parameter für das gleiche Modell geschätzt. Somit wird die Variable *Zeit* zwar nicht explizit berücksichtigt, jedoch ist mit diesem Ansatz ihr Einfluss nicht um Interaktion und Nicht-Linearität beschränkt.

5.2.6 Auswahl von Items für die Messmodelle

Um plausible Messmodelle für die Komfortaspekte sowie die zugehörigen Wahrnehmungen zu erhalten wurde eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Hierbei wurde eine Varimax-Rotation gewählt, bei welcher werden die Variablen in einen Vektorraum mit den Faktoren als neue Basis transformiert werden. Durch die Varimax-Rotation wird diese Basis so gewählt, dass sie die Varianz der quadrierten Ladungen je Faktor maximiert. Durch die Transformation werden genauso viele Faktoren gefunden wie Variablen untersucht werden. Da eine Reduktion des Variablenraums auf wenige Faktoren gewünscht ist, müssen einige Faktoren vernachlässigt werden. Hierfür wurde das Kaiser-Kriterium gewählt, nach welchem nur solche Faktoren als sinnvoll erachtet werden, deren Eigenwerte größer eins sind.

In Tabelle 5.12 bis Tabelle 5.14 sind die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse nach Anwendung des Kaiser-Kriteriums für jede der drei Expositionen dargestellt. Nicht eingeschlossen in die Analyse wurden die Variablen *CvCcomf4* und *CvCpleas*. Diese werden als manifeste Variablen für das Messmodell einer latenten Variablen des Gesamtkomforts angenommen und beschreiben somit die Zielgröße für die untersuchten Strukturgleichungsmodelle.

Tabelle 5.12: Hauptkomponentenanalyse für Exposition 1 (mit sVarimax Rotation). Die dargestellten Faktoren erfüllen das Kaiser-Kriterium: Eigenwerte > 1. Auf einzelne Faktoren hoch ladende (> 0,7) Variablen wurden grau markiert.

Faktor	1	2	3	4	5	6
SvTc	0,847	-0,207	0,054	0,022	0,075	0,024
SvT11c	0,793	-0,169	0,000	0,006	0,232	0,110
SvT01c	0,796	-0,115	0,044	0,071	-0,274	-0,025
SvTw	-0,227	0,845	0,055	0,068	-0,034	0,019
SvT11w	-0,204	0,837	0,033	0,083	-0,078	-0,003
SvT01w	-0,188	0,644	0,022	-0,084	0,383	0,151
SvRH	0,060	0,150	0,095	0,161	-0,017	0,832
SvVent	0,004	0,169	0,003	0,669	0,092	0,409
SvOdour	0,065	0,072	-0,061	0,697	0,140	0,090
SvSPL	0,059	0,032	0,859	0,012	0,075	0,090
SvNpax	0,101	0,129	0,173	0,297	-0,205	-0,155
SvVibra	0,066	0,040	0,118	0,197	0,683	-0,033
CvTc	0,871	-0,170	0,078	0,020	0,041	-0,001
CvT11c	0,787	-0,127	0,045	0,003	0,238	0,064
CvT01c	0,787	-0,100	0,091	0,097	-0,284	-0,026
CvTw	-0,137	0,762	0,005	0,205	0,017	0,115
CvT11w	-0,095	0,779	0,029	0,205	-0,140	0,067
CvT01w	-0,098	0,585	-0,054	-0,057	0,365	0,263
CvRH	0,080	0,153	0,155	0,251	-0,040	0,820
CvVent	0,021	0,182	0,152	0,720	0,113	0,336
CvOdour	0,007	0,011	0,132	0,789	0,108	0,025
CvSPL	0,080	0,005	0,884	0,018	0,088	0,063
CvNannoy	0,070	0,030	0,836	0,223	0,069	0,088
CvVibra	0,082	-0,012	0,221	0,387	0,571	-0,074
Erklärte Varianz	4,20	3,63	2,42	2,61	1,49	1,83
Anteil Gesamtvarianz	0,17	0,15	0,10	0,11	0,06	0,08
Anteil kumuliert	0,17	0,33	0,43	0,54	0,60	0,67
Eigenwert	5,45	4,42	2,04	1,76	1,33	1,18
% Gesamtvarianz	22,69	18,43	8,49	7,33	5,56	4,90
% kumuliert	22,69	41,12	49,61	56,94	62,50	67,40

Tabelle 5.13: Hauptkomponentenanalyse für Exposition 2 (mit sVarimax Rotation). Die dargestellten Faktoren erfüllen das Kaiser-Kriterium: Eigenwerte > 1. Auf einzelne Faktoren hoch ladende (> 0,7) Variablen wurden grau markiert.

Faktor	1	2	3	4	5
SvTc	0,866	-0,002	-0,168	0,020	0,008
SvT11c	0,804	0,038	-0,123	0,029	-0,006
SvT01c	0,818	0,010	-0,171	0,006	0,046
SvTw	-0,244	0,008	0,809	-0,005	0,135
SvT11w	-0,213	0,015	0,784	0,024	0,157
SvT01w	-0,200	0,067	0,750	0,039	0,016
SvRH	0,112	0,068	0,192	0,088	0,803
SvVent	-0,044	-0,054	0,126	0,613	0,494
SvOdour	0,020	-0,066	0,041	0,692	0,257
SvSPL	0,059	0,859	0,033	-0,003	0,082
SvNpax	0,111	0,250	0,060	0,258	-0,023
SvVibra	0,116	0,107	0,085	0,523	-0,140
CvTc	0,872	0,116	-0,172	0,072	0,030
CvT11c	0,815	0,121	-0,122	0,090	0,032
CvT01c	0,794	0,045	-0,188	0,070	0,080
CvTw	-0,111	-0,005	0,843	0,155	0,144
CvT11w	-0,115	-0,008	0,794	0,136	0,143
CvT01w	-0,088	0,043	0,747	0,160	-0,062
CvRH	0,081	0,166	0,144	0,122	0,830
CvVent	-0,022	0,114	0,114	0,661	0,487
CvOdour	-0,016	0,100	0,090	0,760	0,239
CvSPL	0,077	0,901	0,003	0,081	0,048
CvNannoy	0,042	0,814	0,013	0,278	0,135
CvVibra	0,094	0,233	0,078	0,688	-0,162
Erklärte Varianz	4,37	2,44	4,00	2,88	2,11
Anteil Gesamtvarianz	0,18	0,10	0,17	0,12	0,09
Anteil kumuliert	0,18	0,28	0,45	0,57	0,66
Eigenwert	5,81	4,63	2,11	1,92	1,34
% Gesamtvarianz	24,19	19,27	8,78	7,99	5,57
% kumuliert	24,19	43,47	52,25	60,24	65,81

Tabelle 5.14: Hauptkomponentenanalyse für Exposition 3 (mit sVarimax Rotation). Die dargestellten Faktoren erfüllen das Kaiser-Kriterium: Eigenwerte > 1. Auf einzelne Faktoren hoch ladende (> 0,7) Variablen wurden grau markiert.

Faktor	1	2	3	4	5
SvTc	0,872	0,015	-0,160	0,027	-0,051
SvT11c	0,791	0,027	-0,105	0,045	-0,123
SvT01c	0,807	0,001	-0,185	0,028	0,085
SvTw	-0,243	0,063	0,817	0,054	0,151
SvT11w	-0,209	0,023	0,826	0,043	0,085
SvT01w	-0,184	0,101	0,779	0,044	-0,024
SvRH	0,090	0,497	0,280	0,149	0,548
SvVent	-0,042	0,797	0,211	-0,012	0,027
SvOdour	-0,009	0,742	0,054	-0,066	-0,185
SvSPL	0,056	0,028	0,043	0,875	-0,002
SvNpax	0,095	0,323	0,084	0,087	0,022
SvVibra	0,174	0,334	0,063	0,097	-0,539
CvTc	0,890	0,069	-0,155	0,047	0,005
CvT11c	0,806	0,079	-0,086	0,030	-0,104
CvT01c	0,796	0,037	-0,195	0,059	0,090
CvTw	-0,120	0,192	0,830	0,041	0,071
CvT11w	-0,100	0,167	0,814	0,018	0,053
CvT01w	-0,084	0,196	0,724	0,005	-0,130
CvRH	0,129	0,515	0,232	0,219	0,551
CvVent	0,033	0,803	0,185	0,123	0,078
CvOdour	-0,006	0,770	0,019	0,118	-0,154
CvSPL	0,069	0,048	0,059	0,906	0,003
CvNannoy	0,043	0,270	0,041	0,829	-0,063
CvVibra	0,071	0,454	-0,008	0,300	-0,558
Erklärte Varianz	4,36	3,56	4,21	2,50	1,37
Anteil Gesamtvarianz	0,18	0,15	0,18	0,10	0,06
Anteil kumuliert	0,18	0,33	0,51	0,61	0,67
Eigenwert	5,96	4,65	2,16	1,98	1,26
% Gesamtvarianz	24,84	19,37	9,00	8,27	5,23
% kumuliert	24,84	44,21	53,22	61,48	66,72

Werden lediglich hohe Ladungen auf einzelne Faktoren für deren Charakterisierung berücksichtigt, so können die in Tabelle 5.15 aufgeführten Hauptkomponenten genannt werden.

Tabelle 5.15: Mögliche Bezeichnungen der Hauptkomponenten in den jeweiligen Expositionen. Maßgebend sind Antworten hinsichtlich Tc = kalter Temperaturen, Tw = warmer Temperaturen, SPL = Schall, AQ = Aspekte der Luftqualität, RH = Trockenheit.

Exposition	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6
1	Tc	Tw	SPL	AQ	Unspez.	RH
2	Tc	SPL	Tw	AQ	RH	-
3	Tc	AQ	Tw	SPL	Unspez.	-

Diese reduzierten Faktoren können im Sinne der Strukturgleichungsmodellierung als latente Variablen aufgefasst werden. Die auf sie hoch ladenden Variablen sind die maßgebenden Ausprägungen dieser Faktoren und können die zugehörigen Messmodelle beschreiben. Entsprechend der in Kapitel 5.1 abgeleiteten Modellarchitektur wird dabei unterschieden in Variablen der Wahrnehmung und Bewertung (abgekürzt durch *Sens* bzw. *Comf*). Somit werden folgende Messmodelle für die Strukturgleichungsmodellierung gewählt:

SensTc → *SvTc, SvT11c, ScT01c*
ComfTc → *CvTc, CvT11c, CvT01c*
SensTw → *SvTw, SvT11w, SvT01w*
ComfTw → *CvTw, CvT11w, CvT01w*
SensSPL → *SvSPL, SvNpax*
ComfSPL → *CvSPL, CvNannoy*
SensAQ → *SvVent, SvOdour*
ComfAQ → *CvVent, CvOdour*

Eine eigene latente Variable für Antworten hinsichtlich Trockenheit wird nicht gewählt, da zum Einen dieser Faktor nur in zwei Expositionen markant ist, zum Zweiten der Eigenwert dieses Faktors nur wenig größer als eins ist (1,18 bzw. 1,34) und zum Dritten nur jeweils eine Frage bezüglich Wahrnehmung und Bewertung große Faktorladungen haben. Die Variablen hinsichtlich Vibrationen laden auf keinen der extrahierten Faktoren hoch, weshalb sie in der Strukturgleichungsmodellierung nicht weiter berücksichtigt werden. Ähnliches trifft auf die Variable *SvNpax* zu. Allerdings wird diese Variable aus Plausibilitätsgründen der latenten Variablen *SensN* zugerechnet und somit weiter verwendet. Wie schon erwähnt wird als Zielvariable für den Gesamtkomfort folgendes Messmodell verwendet:

ComfAll → *CvCcomf4, CvCpleas*

5.3 Analyse der Messdaten

Vor einer Überprüfung der tatsächlich eingestellten physikalischen Randbedingungen wird das Verfahren zur Bereinigung der Messdaten beschrieben. Nach einer Deskription der Parameter sowie ausgewählter Kontrollmessungen nicht variierter Raumklimagrößen werden geeignete exogene Variablen für die Strukturgleichungsmodellierung gewählt und ihre Berechnung beschrieben.

5.3.1 Bereinigung anhand eines bewegten Medians

Für jeden Messwert eines Datensatzes wurden die Daten in einem Fenster 15 Minuten vor und nach dem aktuellen Messwert betrachtet. Der Wert wurde markiert, wenn er der Konvention milder Ausreißer nach Tukey (1977) entspricht, d.h. er größer (kleiner) als der Median des Intervalls plus/minus dem anderthalbfachen Interquartilsabstand ist. Abschließend wurden alle markierten Messwerte als Ausreißer aus dem Datensatz entfernt. In Abbildung 5.9 ist dieses Verfahren des bewegten Medians für ein beispielhaftes Fenster illustriert.

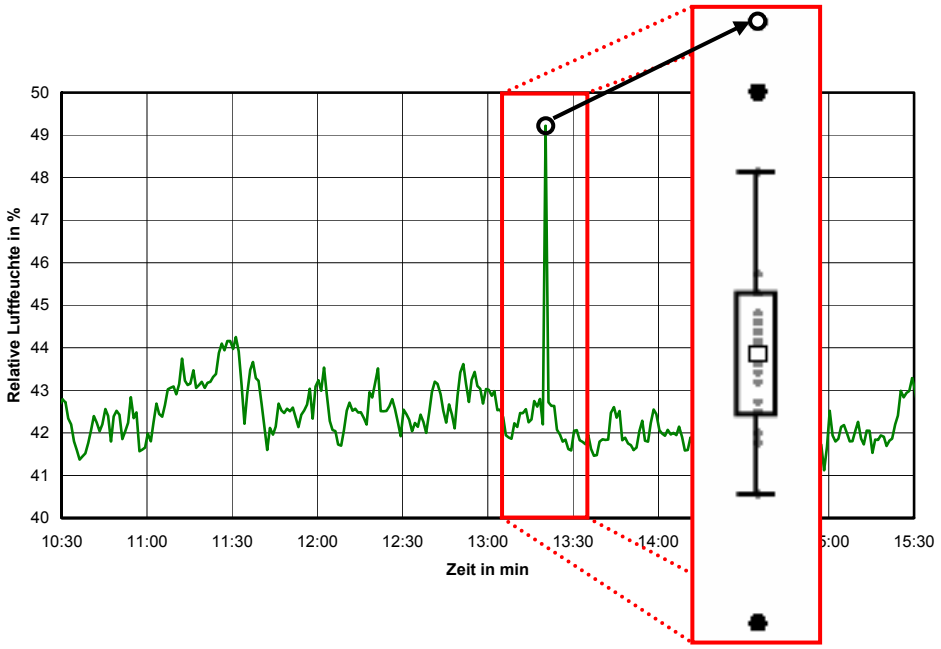


Abbildung 5.9: Darstellung des Prinzips des bewegten Medians. Ist der Wert innerhalb eines Fensters von 15 Minuten vor und nach dem betrachteten Messwert ein Ausreißer nach der Definition von Tukey (1977) so wird dieser als Ausreißer markiert.

5.3.2 Überprüfung der physikalischen Randbedingungen

Die physikalischen Randbedingungen innerhalb einer Exposition wurden als nicht erreicht definiert, falls die Kriterien in Tabelle 5.16 nicht erfüllt wurden. Die gewählten Schranken wurden so gewählt, dass sie im Rahmen der Regelgenauigkeit der Versuchseinrichtung liegen. Es wurden nicht nur Phasen ausgeschlossen, in welchen die Bedingungen außerhalb dieser Schranken lagen, sonder auch jene, in denen das Raumklima zu stark schwankte. Dies wird anhand einer maximal zulässigen Standardabweichung innerhalb der 30minütigen Versuchsintervalle bewertet. Diese Beschränkung wurde konsistent gleich der maximalen Abweichung vom Zielwert gewählt. Dieser Konvention folgend mussten die ersten Expositionen der Tests 5, 11, 14, 19 und 21 sowie die Exposition 2 des Tests 23 aus der Datenbank entfernt werden.

Tabelle 5.16: Kriterien für die Bewertung der Einstellung des Zielwerts und Konstanz des Raumklimas während der Expositionsphasen.

Variable	Maximale Abweichung vom Zielwert	Maximale Standardabweichung innerhalb Exposition
P	25,0 hPa	25,0 hPa
RH	4,0 %	4,0 %
TA11	1,5°C	1,5°C

5.3.3 Beschreibende Statistiken der physikalischen Randbedingungen

Aufgrund der metrischen Natur von physikalischen Messdaten und der Abtastfrequenz von < 1 s werden normalverteilte Daten angenommen. Dementsprechend wurden unter Berücksichtigung oben ausgeschlossener Phasen und Ausreißer für die physikalischen Variablen für jedes Zielgrößen-Level Mittelwert und Standardabweichung berechnet. Diese sind in Tabelle 5.17 bis Tabelle 5.20 aufgeführt.

Tabelle 5.17: Zielwert der einzelnen Level sowie Mittelwerte und Standardabweichung während der Testphasen für den absoluten Luftdruck (P) in hPa.

Level	1	2	3	4
Zielwert	Umgebung	875,1	812,0	752,7
Pre-Baseline	938,5 ± 0,3	-	-	-
Exposition 1	943,4 ± 0,2	873,1 ± 0,2	812,1 ± 0,2	752,2 ± 0,2
Exposition 2	944,7 ± 0,2	875,6 ± 0,2	814,2 ± 0,1	753,9 ± 0,2
Exposition 3	944,6 ± 0,1	875,8 ± 0,2	814,5 ± 0,2	754,6 ± 2,8
Post-Baseline	939,4 ± 0,2	-	-	-

Tabelle 5.18: Zielwert der einzelnen Level sowie Mittelwerte und Standardabweichung während der Testphasen für die relative Luftfeuchte (RH) in %.

Level	1	2	3
Zielwert	10,0	25,0	40,0
Pre-Baseline	-	24,0 ± 0,8	-
Exposition 1	11,9 ± 1,0	23,7 ± 0,7	41,3 ± 1,6
Exposition 2	10,4 ± 0,8	24,0 ± 0,7	41,1 ± 1,4
Exposition 3	10,4 ± 0,9	23,5 ± 0,8	41,4 ± 1,7
Post-Baseline	-	25,1 ± 1,7	-

Tabelle 5.19: Zielwert der einzelnen Level sowie Mittelwerte und Standardabweichung während der Testphasen für die Lufttemperatur in 1,1 m Höhe (TA11) in °C.

Level	1	2	3
Zielwert	21,0	23,0	25,0
Pre-Baseline	-	23,8 ± 0,7	-
Exposition 1	21,8 ± 1,3	23,3 ± 0,9	25,5 ± 0,8
Exposition 2	21,5 ± 1,1	23,5 ± 0,8	25,0 ± 0,7
Exposition 3	21,3 ± 1,1	23,4 ± 0,8	25,2 ± 0,7
Post-Baseline	-	23,3 ± 0,8	-

Tabelle 5.20: Zielwert der einzelnen Level sowie Mittelwerte und Standardabweichung während der Testphasen für den Schalldruckpegels (SPL) der Hintergrundgeräusche in dB(A).

Level	1	2	3	4
Zielwert	Lüftung	64,0	69,0	74,0
Pre-Baseline	55,1 [1)]	-	-	-
Exposition 1	-	63,8 [2)]	68,8 [2)]	73,8 [2)]
Exposition 2	-	63,8 [2)]	68,8 [2)]	73,8 [2)]
Exposition 3	-	63,8 [2)]	68,8 [2)]	73,8 [2)]
Post-Baseline	55,1 [1)]	-	-	-

[1)] gemessene Werte bei laufenden Lüftungssystemen - ohne Beschallung
[2)] kalibrierte Werte

Zur Kontrolle wurden diverse Luftbestandteile kontinuierlich gemessen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen in den einzelnen Phasen über alle Tests sind in Tabelle 5.21 berichtet. Die Kohlendioxidwerte liegen im üblichen und erwarteten Bereich. Auch die Filtersysteme der Lüftungsanlage hatten eine hohe Effektivität, weshalb nur geringe Mengen an Partikeln und TVOC gefunden wurden, welche ein Hinweis auf belastete Luft wären. Im Gegensatz zu realen Flügen konnten nur geringe Ozonmengen nachgewiesen werden, welche erwartungsgemäß unterhalb üblicher Außenluftkonzentrationen liegen.

Tabelle 5.21: Mittelwert und Standardabweichung während der Testphasen für mehrere Luftbestandteile: PM_2 und PM_{10} in µg/m³, CO_2 in ppm, O_3 in ppb, TVOC in ppm.

Luftbestandteil	PM_2	PM_{10}	CO_2	O_3	TVOC
Einheit	µg/m³	µg/m³	ppm	ppb	ppm
Pre-Baseline	4,0 ± 2,6	1,2 ± 1,9	854 ± 9	2,0 ± 0,5	1,06 ± 0,02
Exposition 1	4,1 ± 2,5	1,1 ± 2,0	812 ± 10	2,2 ± 0,5	1,08 ± 0,09
Exposition 2	3,4 ± 2,4	0,9 ± 2,0	835 ± 11	2,2 ± 0,8	1,02 ± 0,01
Exposition 3	4,1 ± 4,9	1,4 ± 4,3	826 ± 7	1,4 ± 0,5	1,00 ± 0,03
Post-Baseline	4,8 ± 3,0	1,5 ± 2,3	844 ± 19	1,2 ± 0,4	1,01 ± 0,08

5.3.4 Wahl der exogenen Variablen

Im Rahmen der hier betrachteten Strukturgleichungsmodelle werden thermische, luftqualitätsbezogene und akustische Eigenschaften berücksichtigt. Wie in Kapitel 5.1 dargelegt, sollen sowohl Modelle basierend auf relevanten Messgrößen als auch Alternativen unter Verwendung von Indizes erstellt werden.

Für die thermische Behaglichkeit sind hinsichtlich der Thermoregulation des Menschen sieben Variablen relevant: die metabolische Rate, der Bekleidungs-

dämmwert, die Luft- sowie die Strahlungstemperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und Luftdruck. Letzterer wird in gängigen Modellen aus dem Gebäudesektor häufig vernachlässigt, da die dort erwarteten Schwankungen klein sind. In der hier untersuchten speziellen Umgebung des Flugzeugkabinenklimas ist dies jedoch nicht der Fall, weshalb dieser in die Modellierung einbezogen wird. Während für die Temperaturen und die Luftfeuchte detaillierte Messwerte vorliegen, werden für die Luftgeschwindigkeiten die in separaten Tests ermittelten Daten herangezogen. Um in Flugzeugen übliche vertikale Temperaturgradienten zu berücksichtigen, werden für die Temperatur Messwerte auf 0,1 m sowie 1,1 m Höhe verwendet. Die metabolische Rate und der Bekleidungsdämmwert sind individuelle Eigenschaften, die hier aufgrund fehlender verlässlicher Informationen nicht einbezogen werden. Wie in Kapitel 3.3.1 diskutiert existieren diverse Ansätze diese Variablen in eine Klimasummengröße zusammenzufassen. Mit Abstand am weitesten verbreitet ist hier der PMV nach Fanger (1970), welcher daher auch in dieser Arbeit verwendet wird. Dieser benötigt neben den Eingangsgrößen Luft- und Strahlungstemperatur, relative Feuchte und Luftgeschwindigkeit auch Angaben über die metabolische Rate sowie den Bekleidungsdämmwert. Diese wurden hier zu konstant 1,0 met (entspanntes Sitzen nach DIN EN ISO 7730 (2006)) bzw. 1,1 clo (siehe Kapitel 5.2.4) angenommen.

Die Bewertung der Luftqualität wird hauptsächlich durch die Bestandteile der Luft getrieben, hängt aber auch von der Enthalpie der eingeatmeten Luft ab. Nachdem in der hier zugrunde liegenden Versuchsreihe eine konstante Lüftungsrate mit einem relativ hohen Frischluftanteil bei sehr guter Filterung verwendet wurde, ist die Belastung der Luft durch Fremdbestandteile sehr gering. Dies wird auch durch die Messergebnisse in Tabelle 5.21 bestätigt. Demzufolge wird erwartet, dass die Variation dieses Faktors durch die veränderten physikalischen Randbedingungen Luftdruck, relative Feuchte und Lufttemperatur erklärt werden kann. Aus diesen Größen kann anhand der Gleichungen (5.29) bis (5.31) die Enthalpie berechnet werden, welche dementsprechend im Folgenden als zugehöriger Index verwendet wird.

Für die Beschreibung des Lautstärkeaspekts des akustischen Raumklimas wird häufig der A-bewertete Schalldruckpegel verwendet. Dieser berücksichtigt für ein bestimmtes Frequenzspektrum das menschliche Hörempfinden. In die Ermittlung dieses Pegels fließen daher meist repräsentative Messungen aus verschiedenen Frequenzbändern ein (empfohlen werden die Oktavmittenfrequenzen in Tabelle 5.22). Für das Verständnis von Gesprochenem sind hauptsächlich die Frequenzen in den Oktaven um 500 Hz bis 4000 Hz wichtig, welche auch durch Summengrößen wie dem Speech Interference Level (SIL) beschrieben werden (Newman und Beattie (1985)). Nachdem in der hier verwendeten Test-

reihe Geräusche verschiedener Lautstärke, jedoch mit gleicher Zusammensetzung des Frequenzspektrums, benutzt wurden, erscheint es sinnvoll, die zu findenden Modelle nicht durch eine übermäßige Einführung exogener Variabler zu überfrachten. Daher werden in den Modellen lediglich die Oktavmittenfrequenzen des PSIL bzw. der PSIL als Index verwendet. Dies wird gestützt durch die Beobachtung, dass die verwendeten A-bewerteten Schalldruckpegel in guter Näherung linear durch den PSIL beschrieben werden (siehe Abbildung 5.10).

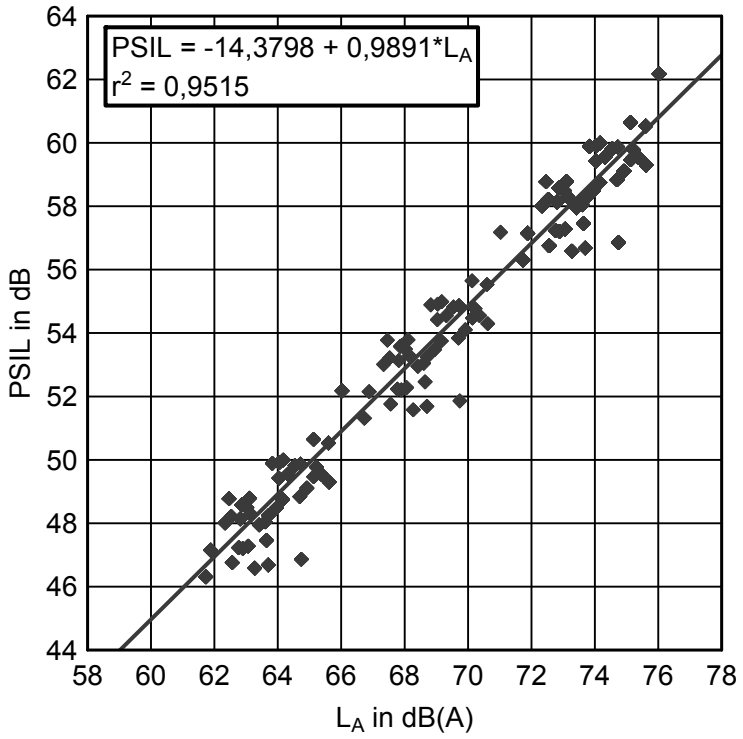


Abbildung 5.10: Lineare Regression zwischen dem A-bewerteten Schalldruckpegel und PSIL für die in der Versuchsreihe verwendeten eingespielten Hintergrundgeräusche.

5.3.5 Umrechnung von Messdaten

Die notwendigen Umrechnungen für die gewählten, aus den Messwerten abgeleiteten Größen sind im Folgenden angegeben. Dies sind Gleichungen für die Strahlungstemperatur und die Enthalpie, sowie Formeln und Faktoren für die Berechnung des A-bewerteten Schalldruckpegels und des preferred speech interference levels (PSIL).

Nach DIN EN ISO 7726 (2002) Anhang B2.2 kann die mittlere Strahlungstemperatur $\bar{t}_r$ bei erzwungener Konvektion aus Luft- und Globetemperatur (t_a und t_g)

bei Verwendung einer Normkugel mit D = 0,15 m und ε_g = 0,95 (mattschwarz gestrichen) wie folgt berechnet werden:

$$\bar{t}_r = \left(\left(t_g + 273 \right)^4 + 2{,}5 \cdot 10^8 \, v_a{}^{0{,}6} \left(t_g - t_a \right) \right)^{0{,}25} - 273 \,. \tag{5.28}$$

Für die Ermittlung der Enthalpie *h* wird neben der Temperatur *t* in °C, der relativen Feuchte *rh* in % und dem absoluten Luftdruck *p* in hPa der entsprechende Sättigungsdampfdruck benötigt. Nach Deutscher Wetterdienst (1976) berechnet sich der Sättigungsdampfdruck über Wasser in hPa zu

$$p_s = 6{,}1078 \, e^{\frac{17{,}08085 \, t}{234{,}175 + t}} \,. \tag{5.29}$$

Damit kann der Wassergehalt der Luft *x* in kg/kg wie folgt ermittelt werden:

$$x = \frac{0{,}01 \, rh \, p_s}{p - 0{,}01 \, rh \, p_s} \frac{287{,}1}{461{,}4} \,, \tag{5.30}$$

womit schließlich die Enthalpie der Luft *h* in kJ/kg berechnet werden kann:

$$h = 1{,}01 \, t + x \left(2501 + 1{,}86 \, t \right). \tag{5.31}$$

Der A-bewertete Schalldruckpegel L_A in dB(A) berechnet sich aus den gemessenen Schallpegeln L_i und den entsprechenden Bewertungsfaktoren $\Delta_{A,i}$ der Bewertungskurve A nach DIN EN 61672-1 (2003) wie folgt:

$$L_A = 10 \, \lg \left(\sum_{i=1}^{n} 10^{0{,}1 \left(L_i + \Delta_{A,i} \right)} \right). \tag{5.32}$$

Tabelle 5.22: Frequenzabhängige Bewertungsfaktoren der A-Bewertungskurve nach DIN EN 61672-1 (2003), aufgelistet für die wesentlichen Oktavbänder.

Mittenfrequenz	Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta_{A,i}$	dB(A)	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0	-1,1

Die für die menschliche Sprachwahrnehmung wesentlichen Frequenzen können im preferred speech interference level (*PSIL*) zusammengefasst werden (Newman und Beattie (1985)). Dies ist definiert als das arithmetische Mittel der Schalldruckpegel in den 500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz Oktavbändern:

$$PSIL = \tfrac{1}{3} \left(L_{500Hz} + L_{1000Hz} + L_{2000Hz} \right). \tag{5.33}$$

Über die diskutierten Messgrößen und Indizes gibt abschließend Tabelle 5.23 für die Verwendung in der Strukturgleichungsmodellierung einen Überblick. Diese werden im Folgenden für die Modellfindung verwendet. Modelle mit Messgrößen als exogene manifeste Variablen werden durch das Präfix „M" gekennzeichnet, solchen basierend auf Indizes wird ein „I" vorangestellt.

Tabelle 5.23: Überblick über die für die Strukturgleichungsmodellierung verwendeten Messgrößen und Indizes inklusive der Bezeichnung ihrer Variablen (kursiv gesetzt).

Raumklimaaspekt	Messgröße	Index

thermisch	• Lufttemperatur
	  • in 0,1 m: *TA01*
	  • in 1,1 m: *TA11*
	• Strahlungstemperatur: *TR*
	• relative Feuchte: *RH*
	• Luftdruck: *P*
	• Luftgeschwindigkeit: *AV*
		PMV
		(mit 1,0 met und 1,1 clo)

Luftqualität	• Lufttemperatur • in 1,1 m: *TA11* • relative Feuchte: *RH* • Luftdruck: *P*	*Enthalpie*
akustisch	Schalldruckpegel bei: • 500 Hz: *SPL_0500* • 1000 Hz: *SPL_1000* • 2000 Hz: *SPL_2000*	*PSIL*

5.4 Modellfindung

Um die in Kapitel 5.1 aufgestellten Hypothesen überprüfen zu können werden vier Strukturgleichungsmodelle untersucht. Diese unterscheiden sich in ihren exogenen manifesten Variablen sowie in der Verwendung von intervenierenden endogenen latenten Variablen der Wahrnehmung. Zielgröße jedes dieser Modelle ist der Gesamtkomfort, welcher anhand der spezifischen raumklimatischen Komfortaspekte (siehe Tabelle 5.23) erklärt werden soll. Folgende Modellbezeichnungen werden gewählt:

MCv: Messgrößen → Komfortaspekte → Gesamtkomfort

MSC: Messgrößen → Wahrnehmung → Komfortaspekte → Gesamtkomfort

ICv: Indizes → Komfortaspekte → Gesamtkomfort

ISC: Indizes → Wahrnehmung → Komfortaspekte → Gesamtkomfort

Der Modellbildung liegt die Annahme zugrunde, dass die raumklimatischen Parameter Temperatur, Feuchte, Schallpegel etc. den Komfort beeinflussen. Ein umgekehrter kausaler Zusammenhang erscheint nicht plausibel. Denkbar wäre dieser nur bei einer Möglichkeit der Einflussnahme durch die Personen, dies jedoch lediglich als indirekter Effekt beispielsweise über eine latente Variable *Einflussnahme*. Da in der hier verwendeten Versuchskonfiguration dies nicht der Fall war, werden ausschließlich formative Modelle abgeleitet, bei denen die exogenen manifesten Variablen die latenten Variablen beeinflussen. Diese Struktur entspricht der eines MIMIC-Modells. Zusätzlich zu den raumklimatischen Parametern wird grundsätzlich eine Konstante als exogene Variable *Const* implementiert. Diese ermöglicht eine Verschiebung der Zusammenhänge aus der Nulllage, da die exogenen manifesten Variablen in nicht-standardisierter Form vorliegen und sich ihr Mittelwert somit von Null unterscheidet. Für die endogenen manifesten Variablen – die Antworten aus den Fragebögen – ist dies durch die Anwendung der polychorischen Korrelation nicht der Fall. Da dadurch zudem ihre Skalierung standardisiert ist, wird jeweils ein Parameter der Messmodelle zu 1,00 festgeschrieben. Durch dieses Verfahren wird die Skalierung der latenten Variablen identisch mit dieser manifesten Variablen gesetzt, zudem wird die Anzahl der zu schätzenden Parameter reduziert, was eine Identifikation des Modells erleichtert.

Strukturgleichungsmodelle ermöglichen die Berücksichtigung von Interrelationen der latenten endogenen Variablen, welche auch in den hier aufgestellten Modellen, wie in Kapitel 5.1 aufgezeigt, verwendet werden sollen. Allerdings ist es aufgrund der wachsenden Zahl der zu schätzenden Parameter nicht sinnvoll jede denkbare Interrelation in die Modelle einzubauen. Hier werden daher nur jene Interrelationen angenommen, welche aus der Literatur bekannt sind. Hierzu zählen der Zusammenhang zwischen thermischem Komfort und Bewertung der Luftqualität (siehe z.B. Sekhar et al. (2000)) sowie die gegenseitige Abhängigkeit von thermischem und akustischem Komfort (siehe z.B. Pellerin und Candas (2004)). Keine Interrelation wird hier zwischen den Bewertungen der kalten und warmen Temperaturen angenommen, da die verwendeten Messmodelle auf einer Aufteilung von bipolaren in je zwei unipolare Antwortskalen beruhen. Dies führt dazu, dass die für einen kausalen Zusammenhang

notwendige Isolation der Variablen nicht gegeben ist. Vielmehr stehen die Fehler der endogenen manifesten Variablen in einem direkten Zusammenhang und ihre außerhalb des Modells begründete Varianz stimmt über die Gruppen hinweg überein. Dies wurde in den hier verwendeten Strukturgleichungsmodellen durch eine erzwungene Korrelation der Fehler und Identität ihrer Varianzen berücksichtigt.

Für die Berechnung sämtlicher Strukturgleichungsmodelle wurde in dieser Arbeit die Software LISREL 8.80 von Karl Jöreskog und Dag Sörbom, Scientific Software International, Inc. verwendet. Sie wurde aufgrund der Kapabilität des zugehörigen Präprozessors PRELIS polychorische Korrelationen zu schätzen sowie der Fähigkeit Mehrgruppenmodelle zu erstellen ausgewählt.

Um eine Überprüfung der Ergebnisse und Diskussion der Hypothesen zu ermöglichen wurde der Datensatz zuvor anhand eines Zufallsverfahrens in zwei Hälften geteilt. Hierfür wurde die in der Statistik-Software STATISTICA 8.0 (StatSoft, Inc., Tusla, OK, USA) verfügbare Split-Node Methode mit einer Extraktion von ca. 50 % gewählt. Diese basiert auf der Equal Probability of Selection Method (EPSEM) nach Kish (1965). Bei dieser Stichproben-Technik haben sämtliche Beobachtungen aus der Gesamtheit die gleiche Wahrscheinlichkeit in die Stichprobe ausgewählt zu werden. Die erste Hälfte – die Modellierungsstichprobe – wird in diesem Kapitel für die Modellfindung benutzt, während die zweite Hälfte – die Validierungsstichprobe – im Folgenden für die Evaluierung verwendet wird. Ihre gesamten und effektiven Größen sind in Tabelle 5.24 dargestellt. Hierbei beziehen sich effektive Stichprobengrößen auf die von zeilenweise fehlenden Daten bereinigten Datensätze.

Tabelle 5.24: Gesamte und effektive Stichprobengrößen der Datensätze für jede Expositionsphase. Stichprobengrößen der Validierungsstichprobe sind in Klammern gesetzt.

Exposition	gesamte Stichprobengröße	effektive Stichprobengröße
1	321 (336)	280 (298)
2	424 (389)	383 (353)
3	417 (430)	386 (393)
gesamt	1162 (1155)	1049 (1044)

Als Schätzverfahren wird für alle Modelle das standardmäßig verwendete Maximum-Likelihood (ML) Verfahren benutzt. Im Vergleich zum Weighted-Least-Squares (WLS) Verfahren besteht dabei allerdings die Gefahr besonders bei schiefen Verteilungen die Fehler stärker zu unterschätzten (Yang Jonsson (1997)). Aufgrund der für dieses Verfahren noch immer recht kleinen Stichprobe muss jedoch auf die Robustheit der ML-Methode vertraut werden, zumal Irrtümer bei der Schätzung der für das WLS Verfahren notwendigen asymptoti-

schen Kovarianzmatrix schwerwiegendere Konsequenzen für die Verlässlichkeit des Modells haben als unterschätzte Fehler des Modells (siehe auch Baltes-Götz (2002)). Unter Berücksichtigung der drei Expositionen im Mehrgruppenmodell basieren die Schätzungen auf den in Tabelle 5.24 dokumentierten effektiven Stichprobengrößen.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der vier aufgestellten Modelle berichtet. Neben vereinfachten Pfaddiagrammen sind die verschiedenen Vektoren der Variablen im Modell aufgeführt. Die Parametermatrizen für die jeweiligen Gruppen sind in Anhang H bis Anhang K dargestellt. Es wird die in Kapitel 3.5 beschriebene LISREL-Notation verwendet:

Strukturmodell: $$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\alpha}^{(g)} + \boldsymbol{B}^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\varsigma}^{(g)} \quad (5.34)$$

Messmodell: $$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\Lambda}_y^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}^{(g)} \quad (5.35)$$

mit den Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{\Psi}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\Theta}_{\varepsilon}^{(g)}$ der Fehler $\boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$.

5.4.1 Modell *MCv*: Bewertung ausgehend von Messgrößen

Das zuerst betrachtete Modell basiert auf der Annahme, dass sich die Bewertung der raumklimatischen Komfortaspekte von entsprechenden Messgrößen ableiten lässt. Schlussendlich lässt sich der Gesamtkomfort aus diesen Komfortaspekten erklären, welche untereinander in Beziehung stehen. Der nicht durch diese zu erklärende Anteil verbleibt in einem Fehler. Ein vereinfachtes Pfaddiagramm ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Dort sind der Übersichtlichkeit halber lediglich die exogenen manifesten Variablen $\boldsymbol{x}$ sowie die endogenen latenten Variablen $\boldsymbol{\eta}$ und manifesten Variablen $\boldsymbol{y}$ eingezeichnet. Jede der endogenen Variablen trägt einen Fehler mit sich, der ebenfalls geschätzt werden muss. Diese Fehlervariablen sind nicht dargestellt. Dieses Pfaddiagramm gilt für alle drei Expositionen, wobei sämtliche Parameter neu geschätzt wurden.

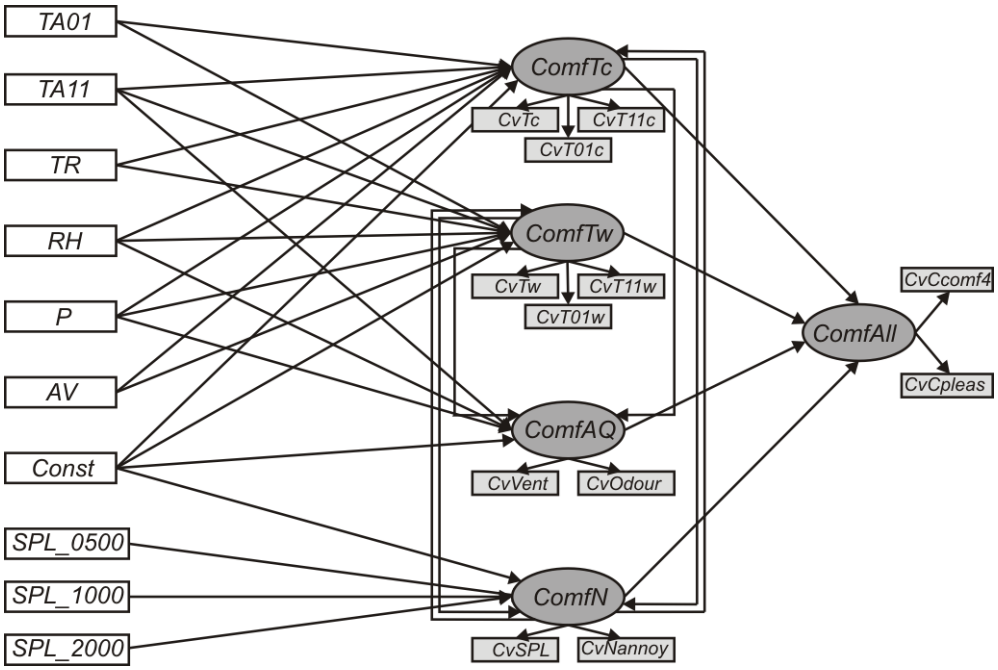


Abbildung 5.11: Vereinfachtes Pfaddiagramm für jede Gruppe des Modells *MCv*. Die entsprechenden Fehlervariablen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt. Endogene Variablen sind grau hinterlegt, latente Variablen durch einen Kreis gekennzeichnet. Die Pfeile geben die postulierten Zusammenhänge in ihrer Richtung an.

Basierend auf obigem Pfaddiagramm wird für die Reihenfolge der Variablen in den Vektoren $\boldsymbol{x}$, $\boldsymbol{\eta}$ und $\boldsymbol{y}$ folgende Definition getroffen:

$$\boldsymbol{x} = \begin{Bmatrix} P \\ RH \\ TA11 \\ TA01 \\ TR \\ AV \\ SPL_0500 \\ SPL_1000 \\ SPL_2000 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\eta} = \begin{Bmatrix} ComfTc \\ ComfTw \\ ComfAQ \\ ComfN \\ ComfAll \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{y} = \begin{Bmatrix} CvTc \\ CvT11c \\ CvT01c \\ CvTw \\ Cv11w \\ Cv01w \\ CvVent \\ CvOdour \\ CvSPL \\ CvNannoy \\ CvCcomf4 \\ CvCpleas \end{Bmatrix}$$

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die drei Expositionen berichtet. Die Goodness-of-Fit Indizes (*GFI*) der drei Phasen liegen mit 0,97 und 0,99 sowie 0,99 allesamt im akzeptablen (≥ 0,95) bis guten (≥ 0,98) Bereich. Das Modell fittet dementsprechend die Daten zufriedenstellend. Das Root Mean Squared

Residuum (*RMR*) bestätigt diese Aussage. Hier liegen die Werte mit 0,059 und 0,044 sowie 0,046 ebenfalls im akzeptablen (≤ 0,10) bis guten (≤ 0,05) Bereich. Eine Evaluation des Modells wird in Kapitel 6 vorgenommen. Die geschätzten Parameter für die drei Gruppen sind in Anhang H zu finden.

Bei einer Anzahl an Freiheitsgraden von $df = 423$ und $\chi^2 = 196{,}38$ ist die Wahrscheinlichkeit eines gültigen Modells $p > 0{,}99$. Auch weitere Gütekriterien liegen sämtlich im guten Bereich: $CN = 2420{,}76$, $RMSEA < 0{,}01$ wobei $p(RMSEA < 0{,}05) > 0{,}99$ und $NNFI = 1{,}07$.

Während die Konstanten $\boldsymbol{\alpha}^{(g)}$ für die drei Gruppen für die Komfortaspekte *ComfTc*, *ComfTw* und *ComfAQ* recht stark streuen – was der unterschiedlichen Dimension der Eingangsparameter *P*, *RH* und *TA11* geschuldet sein dürfte – haben Parameter der Matrix $\boldsymbol{\Gamma}^{(g)}$ über alle Expositionen eine ähnliche Tendenz. Ihre Vorzeichen sind plausibel, insbesondere für die Temperaturen, Luftgeschwindigkeit und Schalldruckpegel. Bei einer Untersuchung der Matrix $\boldsymbol{B}^{(g)}$ muss darauf geachtet werden, dass Interrelationen berücksichtigt wurden. Diese führen indirekte Effekte der Komfortaspekte auf den Gesamtkomfort ein. Reduziert man die Beziehungen auf totale Effekte, lässt sich dies in Gleichungsform für die drei Expositionen darstellen:

$$\begin{Bmatrix} ComfAll^{(1)} \\ ComfAll^{(2)} \\ ComfAll^{(3)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1{,}21 & 1{,}22 & -0{,}61 & 0{,}36 \\ 0{,}67 & 0{,}66 & 0{,}06 & 0{,}40 \\ 0{,}60 & 0{,}52 & 0{,}22 & 0{,}46 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} ComfTc \\ ComfTw \\ ComfAQ \\ ComfN \end{Bmatrix}$$

Der thermische Aspekt hat hierbei die größten Koeffizienten, wobei beachtet werden muss, dass $ComfTc = 0$, falls $ComfTw > 0$ und $ComfTw = 0$, falls $ComfTc > 0$. Die Faktoren von *ComfAQ* fluktuieren auffallend stark. Dies deutet darauf hin, dass diese nur schlecht geschätzt werden können, was aufgrund des Testdesigns auch zu erwarten war. Die relativ großen Koeffizienten für die thermischen Aspekte in der ersten Exposition können ihre Erklärung in dieser schlechten Schätzung finden. Wird die Matrix $\boldsymbol{\Lambda}^{(g)}$ betrachtet, fällt auch hier der niedere Faktor für *CvOdour* in der ersten Exposition auf.

Insgesamt fittet das Modell die Daten sehr gut und enthält bis auf einige Faktoren des Komfortaspekts Luftqualität plausible Parameter.

5.4.2 Modell *MSC*: Wahrnehmung und Bewertung ausgehend von Messgrößen

Das Modell *MSC* geht von der Annahme aus, dass sich die Bewertung der raumklimatischen Komfortaspekte über die assoziierten Wahrnehmungen von entsprechenden Messgrößen ableiten und sich schließlich der Gesamtkomfort aus diesen Komfortaspekten, welche untereinander in Beziehung stehen, erklären lässt. Der nicht durch diese zu erklärende Anteil wird durch Fehlervariablen beschrieben. Ein vereinfachtes Pfaddiagramm ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Dieses beinhaltet der Übersichtlichkeit halber lediglich die exogenen manifesten Variablen ***x*** sowie die endogenen latenten Variablen ***η*** und manifesten Variablen ***y***. Jeder der endogenen Variablen ist eine Fehlervariable zugeordnet, welche ebenfalls geschätzt werden muss. Diese Fehler sind nicht eingezeichnet. Das Pfaddiagramm gilt für alle drei Expositionen, wobei sämtliche Parameter neu geschätzt wurden.

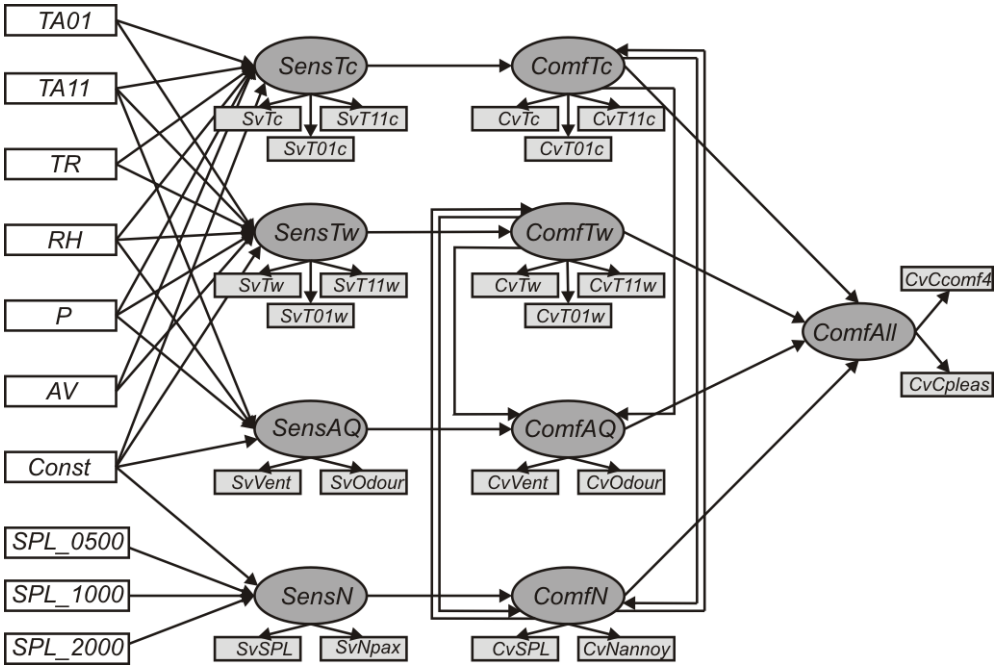


Abbildung 5.12: Vereinfachtes Pfaddiagramm für jede Gruppe des Modells *MSC*. Die entsprechenden Fehlervariablen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt. Endogene Variablen sind grau hinterlegt, latente Variablen durch einen Kreis gekennzeichnet. Die Pfeile geben die postulierten Zusammenhänge in ihrer Richtung an.

Basierend auf obigem Pfaddiagramm wird für die Reihenfolge der Variablen in den Vektoren ***x***, ***η*** und ***y*** folgende Definition getroffen:

$$\boldsymbol{x} = \begin{Bmatrix} P \\ RH \\ TA11 \\ TA01 \\ TR \\ AV \\ SPL_0500 \\ SPL_1000 \\ SPL_2000 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\eta} = \begin{Bmatrix} SensTc \\ SensTw \\ SensAQ \\ SensN \\ ComfTc \\ ComfTw \\ ComfAQ \\ ComfN \\ ComfAll \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{y} = \begin{Bmatrix} SvTc \\ SvT11c \\ SvT01c \\ SvTw \\ SvT11w \\ SvT01w \\ SvVent \\ SvOdour \\ SvSPL \\ SvNpax \\ CvTc \\ CvT11c \\ CvT01c \\ CvTw \\ CvT11w \\ CvT01w \\ CvVent \\ CvOdour \\ CvSPL \\ CvNannoy \\ CvCcomf4 \\ CvCpleas \end{Bmatrix}$$

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Schätzungen für die drei Expositionen dargestellt. Die Goodness-of-Fit Indizes (*GFI*) der drei Phasen liegen in der ersten Exposition mit 0,93 unterhalb des ansonsten mit 0,96 sowie 0,95 im akzeptablen (≥ 0,95) Bereich. Das Modell ist dementsprechend in der ersten Exposition nicht zufriedenstellend an die Daten angepasst. Das Root Mean Squared Residuum (*RMR*) bestätigt diese Aussage. Hier liegen die Werte mit 0,110 in der ersten Exposition oberhalb des ansonsten mit 0,083 sowie 0,084 im akzeptablen (≤ 0,10) Bereich. Das Modell wird in Kapitel 6 evaluliert, die geschätzten Parameter sind für die drei Gruppen in Anhang I aufgeführt.

Bei einer Anzahl an Freiheitsgraden von $df = 1173$ und $\chi^2 = 891{,}71$ ist die Wahrscheinlichkeit eines gültigen Modells $p > 0{,}99$. Auch die weiteren Anpassungsmaße des Gesamtmodells sind gut: $CN = 1384{,}38$, $RMSEA < 0{,}01$ wobei $p(RMSEA < 0{,}05) > 0{,}99$ und $NNFI = 1{,}02$.

Auch hier streuen die Konstanten $\boldsymbol{\alpha}^{(g)}$ für die drei Gruppen der Komfortaspekte *ComfTc*, *ComfTw* und *ComfAQ* recht stark, was wiederum auf die unterschied-

lichen Dimension der Eingangsparameter *P*, *RH* und *TA11* zurückzuführen sein dürfte. Die Parameter der Matrix $\boldsymbol{\Gamma}^{(g)}$ haben über alle Expositionen eine ähnliche Tendenz und sind denen des Modells MCv sehr ähnlich. Ihre Vorzeichen sind plausibel, insbesondere für die Temperaturen, Luftgeschwindigkeit und Schalldruckpegel. Bei einer Untersuchung der Matrix $\boldsymbol{B}^{(g)}$ müssen die indirekten Effekte der Komfortaspekte auf den Gesamtkomfort durch die Einführung von Interrelationen berücksichtigt werden. Nach einer Reduktion des rechten Teils der Matrix, welcher die Beziehungen zwischen Komfortaspekten und Gesamtkomfort repräsentiert, lässt sich dies in Gleichungsform für die drei Expositionen darstellen:

$$\begin{Bmatrix} ComfAll^{(1)} \\ ComfAll^{(2)} \\ ComfAll^{(3)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1{,}19 & 1{,}12 & 0{,}02 & 0{,}10 \\ 0{,}71 & 0{,}68 & 0{,}20 & 0{,}22 \\ 0{,}58 & 0{,}49 & 0{,}36 & 0{,}23 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} ComfTc \\ ComfTw \\ ComfAQ \\ ComfN \end{Bmatrix}$$

Auf den thermische Aspekt entfallen die größten Koeffizienten, wobei beachtet werden muss, dass *ComfTc* = 0, falls *ComfTw* > 0 und *ComfTw* = 0, falls *ComfTc* > 0. Die Faktoren von *ComfAQ* fluktuieren wie auch schon im Modell Mcv auffallend stark. Dies deutet darauf hin, dass diese nur schlecht geschätzt werden können, was aufgrund des Testdesigns auch zu erwarten war. Die relativ großen Koeffizienten für die thermischen Aspekte in der ersten Exposition können ihre Erklärung in dieser schlechten Schätzung finden. Die Ladungen für die akustischen Aspekte sind wesentlich niedriger, als im Modell *MCv*. Wird die Matrix $\boldsymbol{\Lambda}^{(g)}$ betrachtet, fällt der niedrige Faktor für *SvNpax* in allen Expositionen auf. Dies war aufgrund der Hauptkomponentenanalyse in Kapitel 5.2.6 zu erwarten.

Insgesamt fittet das Gesamtmodell die Daten gut und enthält bis auf einige Faktoren des Komfortaspekts Luftqualität plausible Parameter. Die Gütekriterien der ersten Expositionen sind im Gegensatz zu den beiden späteren Untersuchungsintervallen nicht zufriedenstellend.

5.4.3 Modell *ICv*: Bewertung ausgehend von Indizes

Das in diesem Abschnitt betrachtete Modell geht von der Annahme aus, dass sich die Bewertung der raumklimatischen Komfortaspekte von entsprechenden Indizes ableiten lässt. Aus diesen interrelierenden Komfortaspekten wird schließlich der Gesamtkomfort erklärt. Der nicht durch diese zu erklärende Anteil verbleibt in einem Fehler. Ein vereinfachtes Pfaddiagramm ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind lediglich die exogenen mani-

festen Variablen ***x*** sowie die endogenen latenten Variablen ***η*** und manifesten Variablen ***y*** eingezeichnet. Jede der endogenen Variablen trägt einen Fehler mit sich, welcher als Modellparameter ebenfalls geschätzt werden muss. Diese Fehlervariablen sind nicht dargestellt. Das Pfaddiagramm gilt für alle drei Phasen, wobei die jeweiligen Parameter neu geschätzt wurden.

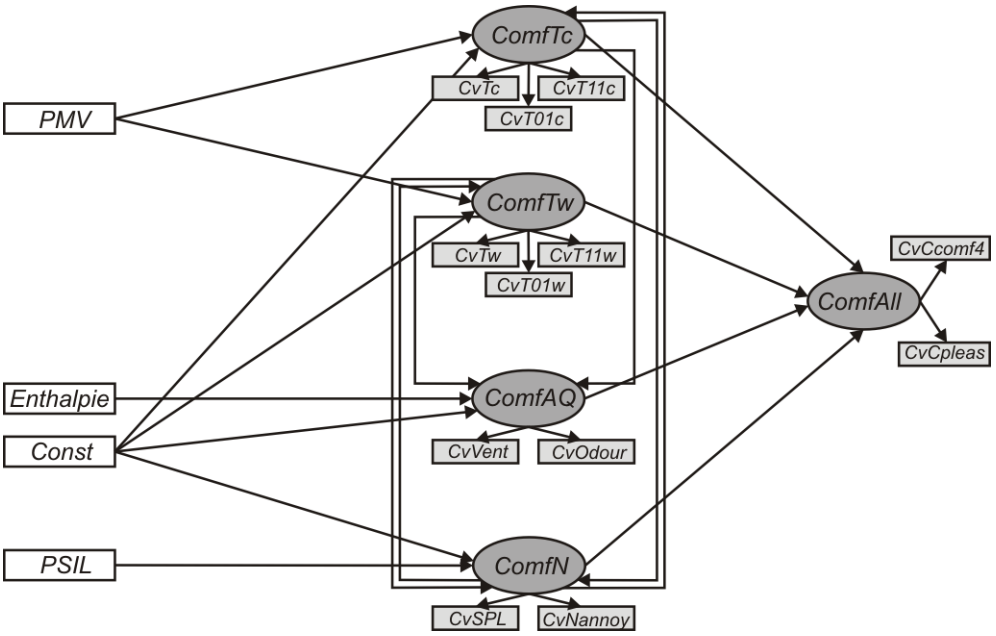


Abbildung 5.13: Vereinfachtes Pfaddiagramm für jede Gruppe des Modells *ICv*. Die entsprechenden Fehlervariablen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt. Endogene Variablen sind grau hinterlegt, latente Variablen durch einen Kreis gekennzeichnet. Die Pfeile geben die postulierten Zusammenhänge in ihrer Richtung an.

Basierend auf obigem Pfaddiagramm wird für die Reihenfolge der Variablen in den Vektoren ***x***, ***η*** und ***y*** folgende Definition getroffen:

$$\boldsymbol{x} = \begin{Bmatrix} PMV \\ Enthalpie \\ PSIL \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\eta} = \begin{Bmatrix} ComfTc \\ ComfTw \\ ComfAQ \\ ComfN \\ ComfAll \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{y} = \begin{Bmatrix} CvTc \\ CvT11c \\ CvT01c \\ CvTw \\ Cv11w \\ Cv01w \\ CvVent \\ CvOdour \\ CvSPL \\ CvNannoy \\ CvCcomf4 \\ CvCpleas \end{Bmatrix}$$

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die drei Untersuchungsintervalle erläutert. Die Goodness-of-Fit Indizes (*GFI*) der drei Phasen liegen mit 0,97 und 0,98 sowie 0,99 alle im akzeptablen (≥ 0,95) bis guten (≥ 0,98) Bereich. Das Modell fittet folglich die Daten zufriedenstellend. Das Root Mean Squared Residuum (*RMR*) bestätigt diese Aussage. Hier liegen die Werte mit 0,075 und 0,055 sowie 0,048 ebenfalls im akzeptablen (≤ 0,10) bis guten (≤ 0,05) Bereich. Eine Evaluation des Modells wird in Kapitel 6 durchgeführt. Die geschätzten Parameter für die drei Gruppen sind in Anhang J gelistet.

Bei einer Anzahl an Freiheitsgraden von $df = 249$ und $\chi^2 = 147{,}75$ ist die Wahrscheinlichkeit eines gültigen Modells $p > 0{,}99$. Mit $CN = 2000{,}43$, $RMSEA < 0{,}01$ wobei $p(RMSEA < 0{,}05) > 0{,}99$ und $NNFI = 1{,}03$ liegen auch weitere Gütekriterien des Gesamtmodells im guten Bereich.

Im Gegensatz zu den Modellen basierend auf Messgrößen streuen hier lediglich die Konstanten $\boldsymbol{\alpha}^{(g)}$ der drei Gruppen für den Komfortaspekt *ComfAQ.* Die Parameter der Matrix $\boldsymbol{\Gamma}^{(g)}$ haben wiederum über alle Expositionen eine ähnliche Tendenz. Ihre Vorzeichen sind plausibel, Effekte der Enthalpie sind nur äußerst schwach ausgeprägt. Bei einer Untersuchung der Matrix $\boldsymbol{B}^{(g)}$ muss darauf geachtet werden, dass Interrelationen berücksichtigt wurden, da diese indirekte Effekte der Komfortaspekte auf den Gesamtkomfort einführen. Werden die Beziehungen auf totale Effekte reduziert, lässt sich dies in Gleichungsform für die drei Expositionen darstellen:

$$\begin{Bmatrix} ComfAll^{(1)} \\ ComfAll^{(2)} \\ ComfAll^{(3)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1{,}43 & 1{,}40 & -0{,}90 & 1{,}17 \\ 0{,}65 & 0{,}62 & 0{,}04 & 0{,}56 \\ 0{,}64 & 0{,}58 & 0{,}18 & 0{,}50 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} ComfTc \\ ComfTw \\ ComfAQ \\ ComfN \end{Bmatrix}$$

Der thermische Aspekt hat hierbei die größten Koeffizienten, wobei beachtet werden muss, dass $ComfTc = 0$, falls $ComfTw > 0$ und $ComfTw = 0$, falls $ComfTc > 0$. Die Faktoren von *ComfAQ* fluktuieren auch hier auffallend stark. Dies deutet darauf hin, dass diese nur schlecht geschätzt werden können, was aufgrund des Testdesigns zu erwarten war. Die relativ großen Koeffizienten für die thermischen Aspekte in der ersten Exposition können ihre Erklärung in dieser schlechten Schätzung finden. Auffallend ist ebenfalls die hohe Ladung des akustischen Aspekts in der ersten Exposition. Wird die Matrix $\boldsymbol{\Lambda}^{(g)}$ betrachtet, so kann festgestellt werden, dass diese sich nur unwesentlich von der des Modells *MCv* unterscheidet. Die maximale Differenz einzelner Einträge beträgt 0,04.

Insgesamt fittet das Modell die Daten sehr gut und enthält bis auf einige Faktoren des Komfortaspekts Luftqualität plausible Parameter.

5.4.4 Modell *ISC*: Wahrnehmung und Bewertung ausgehend von Indizes

Basierend auf der Annahme, dass sich die Bewertung der raumklimatischen Komfortaspekte über die assoziierten Wahrnehmungen von entsprechenden Indizes ableiten lässt wurde das Modell *ISC* abgeleitet. Der Gesamtkomfort lässt sich auch in diesem Modell aus den Komfortaspekten erklären, welche sich wechselseitig beeinflussen. Der nicht durch diese zu erklärende Anteil verbleibt in einer Fehlervariablen. Ein vereinfachtes Pfaddiagramm ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Dort sind der Übersichtlichkeit halber lediglich die exogenen manifesten Variablen ***x*** sowie die endogenen latenten Variablen ***η*** und manifesten Variablen ***y*** abgebildet. Jede der endogenen Variablen trägt einen Fehler mit sich, der ebenfalls geschätzt werden muss, welche jedoch nicht dargestellt sind. Das Pfaddiagramm ist für alle drei Expositionen identisch, wobei alle Parameter neu geschätzt wurden.

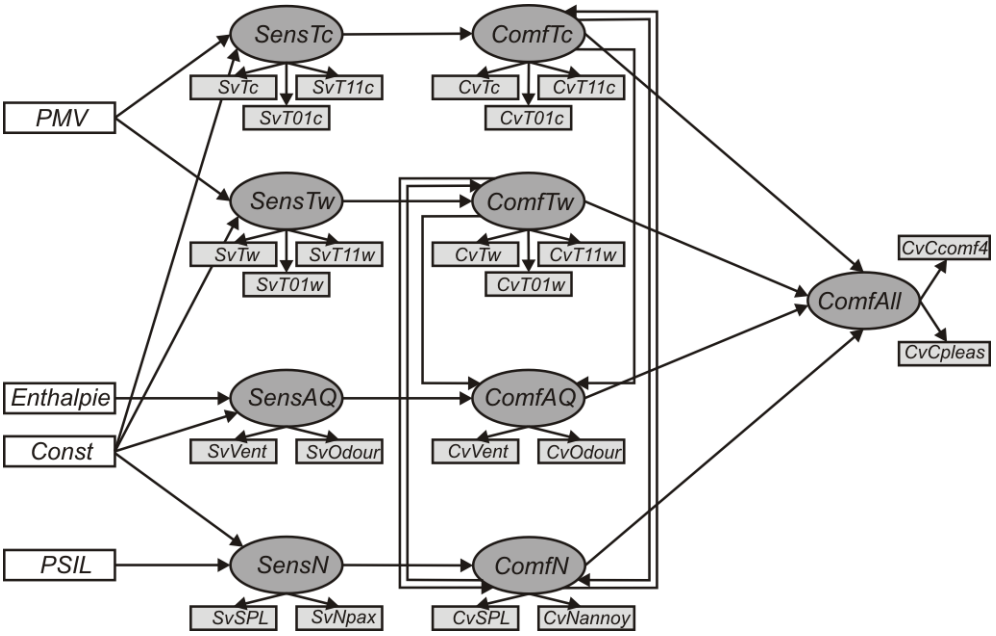


Abbildung 5.14: Vereinfachtes Pfaddiagramm für jede Gruppe des Modells *ISC*. Die entsprechenden Fehlervariablen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt. Endogene Variablen sind grau hinterlegt, latente Variablen durch einen Kreis gekennzeichnet. Die Pfeile geben die postulierten Zusammenhänge in ihrer Richtung an.

Basierend auf obigem Pfaddiagramm wird für die Reihenfolge der Variablen in den Vektoren ***x***, ***η*** und ***y*** folgende Definition getroffen:

$$\boldsymbol{x} = \begin{Bmatrix} PMV \\ Enthalpie \\ PSIL \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\eta} = \begin{Bmatrix} SensTc \\ SensTw \\ SensAQ \\ SensN \\ ComfTc \\ ComfTw \\ ComfAQ \\ ComfN \\ ComfAll \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{y} = \begin{Bmatrix} SvTc \\ SvT11c \\ SvT01c \\ SvTw \\ SvT11w \\ SvT01w \\ SvVent \\ SvOdour \\ SvSPL \\ SvNpax \\ CvTc \\ CvT11c \\ CvT01c \\ CvTw \\ CvT11w \\ CvT01w \\ CvVent \\ CvOdour \\ CvSPL \\ CvNannoy \\ CvCcomf4 \\ CvCpleas \end{Bmatrix}$$

Die Ergebnisse für die drei Expositionen werden im Folgenden dargelegt. Die Goodness-of-Fit Indizes (*GFI*) der drei Phasen liegen mit 0,92 in der ersten Exposition unterhalb des ansonsten mit jeweils 0,95 im akzeptablen (≥ 0,95) Bereich. Das Modell fittet dementsprechend die Daten in der ersten Phase nicht zufriedenstellend. Das Root Mean Squared Residuum (*RMR*) bestätigt dieses Ergebnis. Hier liegen die Werte mit 0,130 in der ersten Exposition oberhalb des in den übrigen Phasen mit 0,099 sowie 0,100 im akzeptablen (≤ 0,10) Bereich. Eine Evaluation des Modells wird in Kapitel 6 vorgenommen. Für die drei Gruppen sind die geschätzten Parametermatrizen in Anhang K aufgeführt.

Bei einer Anzahl an Freiheitsgraden von $df = 819$ und $\chi^2 = 790{,}66$ ist die Wahrscheinlichkeit eines gültigen Modells $p = 0{,}76$. Die weiteren Gütekriterien des Gesamtmodells liegen sämtlich im guten Bereich: $CN = 1133{,}42$, $RMSEA < 0{,}01$ wobei $p(RMSEA < 0{,}05) > 0{,}99$ und $NNFI = 1{,}00$.

Im Gegensatz zu den Modellen basierend auf Messgrößen streuen hier lediglich die Konstanten $\boldsymbol{\alpha}^{(g)}$ der drei Gruppen für den Komfortaspekt *ComfAQ*. Die Pa-

rameter der Matrix $\boldsymbol{\Gamma}^{(g)}$ haben wiederum über alle Expositionen eine ähnliche Tendenz. Ihre Vorzeichen sind plausibel, Effekte der Enthalpie sind wie schon im Modell *ICv* nur schwach. Bei einer Untersuchung der Matrix $\boldsymbol{B}^{(g)}$ muss die Berücksichtugung von Interrelationen in Betracht gezogen werden. Diese führen zu indirekten Effekten der Komfortaspekte auf den Gesamtkomfort. Reduziert man den rechten Teil der Matrix, welcher die Beziehungen zwischen Komfortaspekten und Gesamtkomfort repräsentiert, auf totale Effekte, lässt sich dies in Gleichungsform für die drei Expositionen darstellen:

$$\begin{Bmatrix} ComfAll^{(1)} \\ ComfAll^{(2)} \\ ComfAll^{(3)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1{,}27 & 1{,}18 & 0{,}00 & 0{,}11 \\ 0{,}71 & 0{,}67 & 0{,}20 & 0{,}22 \\ 0{,}58 & 0{,}49 & 0{,}35 & 0{,}23 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} ComfTc \\ ComfTw \\ ComfAQ \\ ComfN \end{Bmatrix}$$

Der thermische Aspekt hat wie schon bei den ersten drei Modellen die größten Koeffizienten. Hierbei muss beachtet werden, dass *ComfTc* = 0, falls *ComfTw* > 0 und *ComfTw* = 0, falls *ComfTc* > 0. Die Faktoren von *ComfAQ* fluktuieren wie auch schon im Modell *ICv* auffallend stark. Dies deutet darauf hin, dass diese auch hier nur schlecht geschätzt werden können, was aufgrund des Testdesigns zu erwarten war. Die relativ großen Koeffizienten für die thermischen Aspekte in der ersten Exposition können ihre Erklärung in dieser schlechten Schätzung finden. Wird die Matrix $\boldsymbol{\Lambda}^{(g)}$ betrachtet, so ist festzustellen, dass diese sich nur unwesentlich von der des Modells *ISC* unterscheidet. Die maximale Differenz einzelner Einträge beträgt 0,02. Ebenfalls fällt wieder der niedrige Faktor für *SvNpax* in allen Expositionen auf. Dies ist allerdings aufgrund der Hauptkomponentenanalyse in Kapitel 5.2.6 zu erwarten.

Insgesamt fittet das Gesamtmodell die Daten zufriedenstellen, wenn auch schlechter als die übrigen Modelle, enthält aber bis auf einige Faktoren des Komfortaspekts Luftqualität plausible Parameter. Die Gütekriterien der ersten Exposition sind hingegen nicht zufriedenstellend.

6 Evaluierung

Nach der Ableitung und Berechnung der vier Modelle *MCv*, *MSC*, *ICv*, *ISC* werden diese im Folgenden anhand des Validierungsdatensatzes überprüft. Untermodelle werden getestet und anschließend die Modelle miteinander verglichen, um Aussagen über favorisierte Modellierungsstrategien treffen zu können.

6.1 Validierung der Modelle

Wie in Kapitel 0 beschrieben wurde der zugrundeliegende Datensatz vor der Modellierung in zwei Hälften geteilt (für die effektiven Stichprobengrößen siehe Tabelle 5.24), um eine Überprüfung der Modelle durchführen zu können.

Wie beispielsweise in Bollen (1989) beschrieben, kann dies anhand eines Mehrgruppenvergleichs vollzogen werden. Bei diesem werden Modellierungs- und Validierungsdatensatz als zwei Gruppen betrachtet, deren Elemente unabhängig sind und aus einer Zufallsstichprobe stammen. Dieses trifft auf die vorliegenden Datensätze zu, da die Datensätze von unterschiedlichen Probanden stammen, welche nach einem Zufallsprinzip getrennt wurden. Für diese beiden Gruppen wird eine Reihe von Hypothesen getestet, unter welchen die Gleichheit der Parametermatrizen des Modells für beide Gruppen angenommen wird.

Dies geschieht anhand des Vergleichs zweier Schätzungen unterschiedlich restriktiv geschachtelter Modelle. Während beim Ausgangsmodell alle Parametermatrizen beider Gruppen unterschiedlich geschätzt werden, werden diese anschließend stückweise gleichgesetzt. So eingeschränkte Modelle werden als geschachtelt bezeichnet, nachdem sie ein Spezialfall der freieren Modelle sind. Eine wichtige Eigenschaft geschachtelter Modelle ist, dass die Differenz ihrer X^2-Werte asymptotisch einer χ^2-Verteilung mit der Differenz ihrer Freiheitsgrade folgt. Somit kann der relative Fit dieser Modelle anhand dieser Differenz getestet werden, d.h. die Parametermatrizen beider Gruppen sind gleich, wenn der χ^2-Test der Differenzen nicht signifikant ist.

Die Wahl der schrittweise gleichgesetzten Parametermatrizen ist prinzipiell willkürlich, es wird zunächst diejenige gewählt, welche die höchste Priorität bezüglich einer Unterscheidung beider Gruppen besitzt. Bollen (1989) schlägt vor die Gleichheit der Parametermatrizen in folgenden Reihenfolge zu testen: $\boldsymbol{\Lambda}$, $\boldsymbol{B}$ und

$\boldsymbol{\Gamma}$, $\boldsymbol{\Theta}$, $\boldsymbol{\Psi}$, $\boldsymbol{\Phi}$. Für MIMIC-Modelle reduziert sich dies auf die Matrizen $\boldsymbol{\Lambda}_y$, $\boldsymbol{B}$ und $\boldsymbol{\Gamma}$, $\boldsymbol{\Theta}_\varepsilon$, $\boldsymbol{\Psi}$. Da in MIMIC-Modellen durch die Identität $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{\xi}$ die Bedeutung der Parametermatrix $\boldsymbol{\Gamma}$ ähnlich zu der von $\boldsymbol{\Lambda}$ ist, wird die Reihenfolge der getesteten Restriktionen entsprechend geändert. Für die in dieser Arbeit berechneten Modelle muss ebenfalls die Gleichheit der geschätzten Konstanten $\boldsymbol{\alpha}$ überprüft werden. Diese bilden im Gleichungsapparat gemeinsam mit den Parametern $\boldsymbol{\Gamma}$ das formative Modell der endogenen latenten Variablen $\boldsymbol{\eta}$. Daher werden hier die Parametermatrizen in folgender Reihenfolge in beiden Gruppen gleichgesetzt: $\boldsymbol{\Lambda}$, $\boldsymbol{\Gamma}$ und $\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{\Theta}$, $\boldsymbol{\Psi}$.

Ausgangspunkt für den Vergleich der unterschiedlich eingeschränkten Modelle ist das nicht eingeschränkte Modell. Anhand dessen Goodness-of-Fit Indizes kann zunächst bewertet werden, ob die Form des Modells in beiden Gruppen die gleiche ist: sind die Indizes akzeptabel, kann von gleichen Modellstrukturen ausgegangen werden. Eine weitere Restriktion der Parametermatrizen ist nur solange sinnvoll, wie eine ausreichende Anpassung der Modelle an die Daten gegeben ist, d.h. die Goodness-of-Fit Indizes im akzeptablen Bereich liegen.

Dementsprechend werden für die vier Modelle die jeweils drei Expositionen unter folgenden Hypothesen validiert:

H_{Form} Die Modellstruktur unterscheidet sich in beiden Gruppen.

H_{Λ} Die Parametermatrizen $\boldsymbol{\Lambda}^{(g)}$ unterscheiden sich in beiden Gruppen.

$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$ Zudem unterscheiden sich die Parametermatrizen $\boldsymbol{\Gamma}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\alpha}^{(g)}$ in beiden Gruppen.

$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$ Zudem unterscheiden sich die Parametermatrizen $\boldsymbol{B}^{(g)}$ in beiden Gruppen.

$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$ Zudem unterscheiden sich die Parametermatrizen $\boldsymbol{\Theta}^{(g)}$ in beiden Gruppen.

$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$ Zudem unterscheiden sich die Parametermatrizen $\boldsymbol{\Psi}^{(g)}$ in beiden Gruppen.

6.1.1 Validierung des Modells *MCv*

Für die Expositionen 1 bis 3 des Modells *MCv* mit der Architektur Messgrößen → spezifische Komfortbewertung → allgemeine Komfortbewertung sind die Ergebnisse der Überprüfung in Tabelle 6.1 bis Tabelle 6.3 dargestellt.

Tabelle 6.1: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der ersten Exposition des Modells *MCv*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
RMR_{model}	0,059	0,059	0,063	0,065	0,065	0,068
GFI_{valid}	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
RMR_{valid}	0,054	0,055	0,057	0,062	0,062	0,064
NNFI	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	1164,50	1180,86	1218,19	1158,14	1173,26	1169,99
df	282	289	311	321	333	339
X^2	152,89	154,24	160,00	175,79	176,69	180,15
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	7	22	10	12	6
Δ_{X^2}	-	1,35	5,76	15,79	0,90	3,46
p_{Δ}	-	0,99	1,00	0,11	1,00	0,75

Tabelle 6.2: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der zweiten Exposition des Modells *MCv*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98
RMR_{model}	0,044	0,044	0,049	0,054	0,054	0,054
GFI_{valid}	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
RMR_{valid}	0,048	0,050	0,056	0,060	0,059	0,059
NNFI	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	2252,02	2252,59	2169,64	2085,33	2129,83	2123,71
df	282	289	311	321	333	339
X^2	108,81	111,19	124,05	132,60	134,51	137,37
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	7	22	10	12	6
Δ_{X^2}	-	2,38	12,86	8,55	1,91	2,86
p_{Δ}	-	0,94	0,94	0,58	1,00	0,83

Tabelle 6.3: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der dritten Exposition des Modells *MCv*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98
RMR_{model}	0,046	0,046	0,048	0,050	0,050	0,052
GFI_{valid}	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98
RMR_{valid}	0,044	0,044	0,047	0,050	0,050	0,051
NNFI	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	2361,11	2391,32	2332,41	2285,63	2328,78	2331,55
df	282	289	311	321	333	339
X^2	110,64	111,81	123,33	129,90	131,84	133,73
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	7	22	10	12	6
Δ_{X^2}	-	1,17	11,52	6,57	1,94	1,89
p_{Δ}	-	0,99	0,97	0,77	1,00	0,93

Sämtliche Hypothesen über Unterschiede in Modellen basierend auf dem Modellierungs- oder Validierungsdatensatz müssen auf dem 5 % Signifikanzniveau abgelehnt werden. Alle Irrtumswahrscheinlichkeiten sind mit $p_{\Delta} > 50$ % relativ groß, mit der Ausnahme der Hypothese $H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$ der Exposition 1. Die mit $p_{\Delta} = 0{,}11$ recht kleine Irrtumswahrscheinlichkeit von $H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$ der Exposition 1 könnte durch die instabile Schätzung der Gruppe des Modellierungsdatensatzes zustande kommen, in welcher eine negative Fehlervarianz berechnet wird. Die Anpassungsmaße befinden sich hingegen alle im akzeptablen Bereich. Aufgrund der Ablehnung sämtlicher Hypothesen kann somit von einer Übereinstimmung des Modells *MCv* in beiden Datensätzen ausgegangen werden.

6.1.2 Validierung des Modells *MSC*

Die Ergebnisse der Überprüfung des Modells *MSC* mit der Architektur Messgrößen → Wahrnehmung → spezifische Komfortbewertung → allgemeine Komfortbewertung werden für die Expositionen 1 bis 3 in Tabelle 6.4 bis Tabelle 6.6 berichtet.

Tabelle 6.4: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der ersten Exposition des Modells *MSC*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92
RMR_{model}	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110
GFI_{valid}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
RMR_{valid}	0,085	0,085	0,086	0,088	0,088	0,088
NNFI	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	749,81	757,71	769,56	764,43	778,60	781,16
df	782	795	817	831	853	864
X^2	592,83	596,11	604,57	616,27	619,09	623,17
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	13	22	14	22	11
Δ_{X^2}	-	3,28	8,46	11,70	2,82	4,08
p_{Δ}	-	1,00	1,00	0,63	1,00	0,97

Tabelle 6.5: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der zweiten Exposition des Modells *MSC*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
RMR_{model}	0,083	0,083	0,085	0,087	0,087	0,086
GFI_{valid}	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
RMR_{valid}	0,080	0,080	0,085	0,085	0,085	0,085
NNFI	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	1306,60	1324,49	1318,93	1318,44	1344,81	1350,89
df	782	795	817	831	853	864
X^2	487,91	489,29	504,30	512,07	515,45	519,33
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	13	22	14	22	11
Δ_{X^2}	-	1,38	15,01	7,77	3,38	3,88
p_{Δ}	-	1,00	0,86	0,90	1,00	0,97

Tabelle 6.6: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der dritten Exposition des Modells *MSC*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
RMR_{model}	0,084	0,084	0,087	0,087	0,087	0,087
GFI_{valid}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
RMR_{valid}	0,091	0,092	0,092	0,094	0,094	0,095
NNFI	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	1132,24	1143,55	1145,47	1145,20	1159,44	1163,39
df	782	795	817	831	853	864
X^2	604,32	609,39	623,14	632,76	642,75	644,36
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	13	22	14	22	11
Δ_{X^2}	-	5,07	13,75	9,62	9,99	1,61
p_{Δ}	-	0,97	0,91	0,79	0,99	1,00

Auch für dieses Modell müssen alle Hypothesen auf dem 5 % Signifikanzniveau abgelehnt werden, wobei sämtliche Irrtumswahrscheinlichkeiten mit $p_{\Delta} > 50$ % relativ groß sind. Obwohl die Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* in Exposition 1 knapp außerhalb des akzeptablen Bereichs liegen (siehe Kapitel 3.5.8) wird aufgrund der annehmbaren Anpassungsmaße der untersuchten Gesamtmodelle von einer Aussagekraft dieser Modelle ausgegangen. Die ungünstigen Goodness-of-Fit Indizes kommen vermutlich aufgrund der für die Komplexität des Modells kleinen Stichprobengröße zustande. Unter diesen Voraussetzungen kann schlussendlich auch für das Modell *MSC* von einer Übereinstimmung des Modells im Modellierungs- und Validierungsdatensatz ausgegangen werden.

6.1.3 Validierung des Modells *ICv*

Die Ergebnisse der Überprüfung des Modells *ICv* mit der Architektur Indizes → spezifische Komfortbewertung → allgemeine Komfortbewertung sind für die Expositionen 1 bis 3 in Tabelle 6.7 bis Tabelle 6.9 gelistet.

Tabelle 6.7: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der ersten Exposition des Modells *ICv*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96
RMR_{model}	0,075	0,075	0,075	0,081	0,081	0,085
GFI_{valid}	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
RMR_{valid}	0,071	0,072	0,073	0,079	0,079	0,080
NNFI	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	1011,19	1035,33	1075,13	1007,20	1032,24	1029,88
df	166	173	181	191	203	209
X^2	110,89	112,36	112,66	128,86	130,37	134,21
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	7	8	10	12	6
Δ_{X^2}	-	1,47	0,30	16,20	1,51	3,84
p_{Δ}	-	0,98	1,00	0,09	1,00	0,70

Tabelle 6.8: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der zweiten Exposition des Modells *ICv*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
RMR_{model}	0,055	0,055	0,056	0,060	0,060	0,061
GFI_{valid}	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
RMR_{valid}	0,058	0,060	0,061	0,066	0,065	0,065
NNFI	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	1765,63	1784,62	1830,43	1774,86	1841,52	1854,07
df	166	173	181	191	203	209
X^2	85,95	88,30	89,71	97,17	99,16	101,46
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	7	8	10	12	6
Δ_{X^2}	-	2,35	1,41	7,46	1,99	2,30
p_{Δ}	-	0,94	0,99	0,68	1,00	0,89

Tabelle 6.9: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der dritten Exposition des Modells *ICv*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
RMR_{model}	0,048	0,049	0,049	0,053	0,053	0,056
GFI_{valid}	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98
RMR_{valid}	0,052	0,053	0,054	0,058	0,057	0,060
NNFI	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	2218,10	2272,38	2325,59	2252,96	2323,02	2327,58
df	166	173	181	191	203	209
X^2	73,58	74,58	76,17	82,34	84,39	86,18
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	7	8	10	12	6
Δ_{X^2}	-	1,00	1,59	6,17	2,05	1,79
p_{Δ}	-	0,99	0,99	0,80	1,00	0,94

Sämtliche Hypothesen über Unterschiede in Modellen basierend auf dem Modellierungs- oder Validierungsdatensatz müssen auf dem 5 % Signifikanzniveau abgelehnt werden. Bis auf $H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$ der Exposition 1 sind alle Irrtumswahrscheinlichkeiten $p_{\Delta} > 50$ % und somit relativ groß. Die recht kleine Irrtumswahrscheinlichkeit von $H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$ der Exposition 1 könnte durch die instabile Schätzung der Gruppe des Modellierungsdatensatzes begründet sein, in welcher eine negative Fehlervarianz berechnet wird. Allerdings sind die Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für beide Datensätze akzeptabel. Aufgrund der Ablehnung sämtlicher Hypothesen kann jedoch von einer Übereinstimmung des Modells *ICv* in beiden Datensätzen ausgegangen werden.

6.1.4 Validierung des Modells *ISC*

In Tabelle 6.10 bis Tabelle 6.12 sind die Ergebnisse der Überprüfung des Modells *ISC* mit der Architektur Indizes → Wahrnehmung → spezifische Komfortbewertung → allgemeine Komfortbewertung für die Expositionen 1 bis 3 aufgeführt.

Tabelle 6.10: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der ersten Exposition des Modells *ISC*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
RMR_{model}	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130
GFI_{valid}	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94
RMR_{valid}	0,100	0,100	0,100	0,110	0,110	0,110
NNFI	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	634,30	644,19	652,24	649,13	667,07	670,81
df	546	559	567	581	603	614
X^2	514,50	517,94	518,91	530,72	533,23	538,06
p	0,83	0,89	0,93	0,93	0,98	0,99
Δ_{df}	-	13	8	14	22	11
Δ_{X^2}	-	3,44	0,97	11,81	2,51	4,83
p_{Δ}	-	1,00	1,00	0,62	1,00	0,94

Tabelle 6.11: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der zweiten Exposition des Modells *ISC*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
RMR_{model}	0,099	0,099	0,100	0,100	0,100	0,100
GFI_{valid}	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95
RMR_{valid}	0,095	0,095	0,096	0,096	0,096	0,097
NNFI	1,01	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	1054,20	1075,21	1076,74	1081,88	1113,92	1125,21
df	546	559	567	581	603	614
X^2	431,65	433,21	437,54	444,85	448,27	451,11
p	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Δ_{df}	-	13	8	14	22	11
Δ_{X^2}	-	1,56	4,33	7,31	3,42	2,84
p_{Δ}	-	1,00	0,83	0,92	1,00	0,99

Tabelle 6.12: Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* für die Gruppe des Modellierungs- (model) und des Validierungsdatensatzes (valid) sowie für das Gesamtmodell *NNFI*, *RMSEA* und *CN* für die geschachtelten Modelle zur Validierung der dritten Exposition des Modells *ISC*. Die Überprüfung der Hypothesen erfolgt anhand eines χ^2-Tests der Differenzen in X^2 bei Δ_{df} Freiheitsgraden.

Hypothese	H_{Form}	H_{Λ}	$H_{\Lambda\Gamma\alpha}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta}$	$H_{\Lambda\Gamma\alpha B\Theta\Psi}$
GFI_{model}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
RMR_{model}	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
GFI_{valid}	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
RMR_{valid}	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110
NNFI	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	907,30	921,81	927,16	931,27	950,77	957,47
df	546	559	567	581	603	614
X^2	538,96	543,96	546,51	556,02	566,31	568,29
p	0,58	0,67	0,72	0,77	0,86	0,91
Δ_{df}	-	13	8	14	22	11
Δ_{X^2}	-	5,00	2,55	9,51	10,29	1,98
p_{Δ}	-	0,98	0,96	0,80	0,98	1,00

Auch hier müssen alle Hypothesen auf dem 5 % Signifikanzniveau abgelehnt werden, sämtliche Irrtumswahrscheinlichkeiten p_{Δ} sind > 50 % und somit relativ groß. Obwohl die Anpassungsmaße *GFI* und *RMR* in Exposition 1 und für den *RMR* des Validierungsdatensatzes auch in Exposition 3 knapp außerhalb des weithin als akzeptabel bezeichneten Bereichs liegen (siehe Kapitel 3.5.8) wird aufgrund der annehmbaren Anpassungsmaße des Gesamtmodells von einer Aussagekraft der Modelle ausgegangen. Die ungünstigen Fit-Parameter finden ihre Begründung vermutlich in der für die Komplexität des Modells kleinen Stichprobengröße. Unter diesen Voraussetzungen kann damit auch für das Modell *ISC* von einer Übereinstimmung des Modells im Modellierungs- und Validierungsdatensatz ausgegangen werden.

6.2 Überprüfung von Teilmodellen

Vor dem Vergleich der verschiedenen abgeleiteten Modelle werden zunächst Teilmodelle überprüft, um Aussagen über die Hypothesen H1 und H2 treffen zu können. Zunächst werden dementsprechend lediglich die verwendeten Messmodelle geschätzt und ihre Anpassung an die Daten überprüft. Im Anschluss werden Teilmodelle betrachtet, welche nicht die Zusammenführung auf den

Gesamtkomfort beinhalten, um den formativen Modellansatz zur Erklärung der latenten Variablen der Wahrnehmung bzw. der Komfortaspekte zu testen.

6.2.1 Überprüfung der Messmodelle

Zur Überprüfung der Messmodelle und damit der Hypothese H1 werden die aufgrund der Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse in Kapitel 5.2.6 vorgeschlagenen Faktoren untersucht. Durch Weglassen der Strukturgleichungen entspricht dies einer klassischen konfirmatorischen Faktorenanalyse, bei welcher basierend auf der Kovarianzmatrix geprüft wird, ob die angenommenen Strukturen mit den Daten übereinstimmen. Sie ist somit ein Spezialfall der allgemeinen Strukturgleichungsmodellierung (siehe auch Backhaus et al. (2006)).

Für die hier vorgeschlagenen Modelle werden im Folgenden die in Abbildung 1.1 dargestellten Messmodelle betrachtet. Für die Modelle *MSC* und *ISC* werden sämtliche Messmodelle berücksichtigt, während für die Modelle *MCv* und *ICv* nur die der latenten Variablen *ComfTc*, *ComfTw*, *ComfAQ*, *ComfN* und *ComfAll* einbezogen werden.

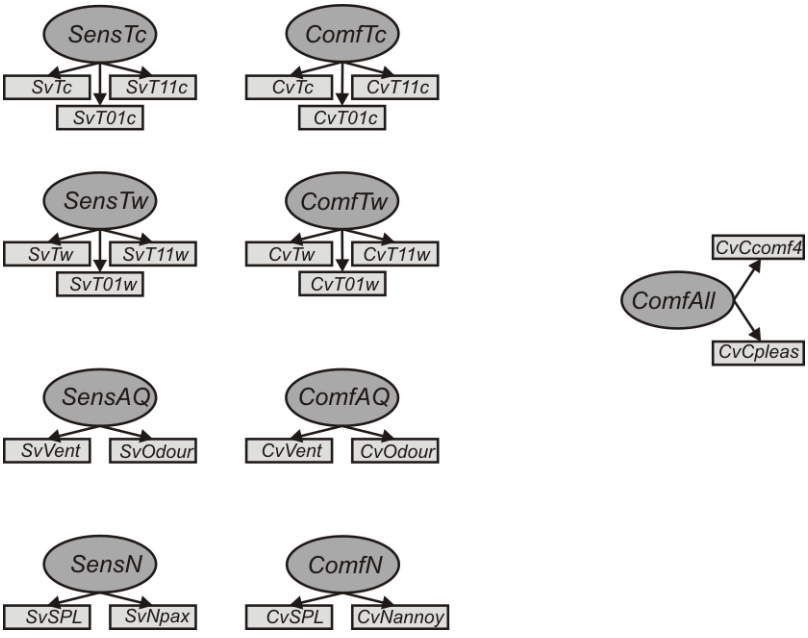


Abbildung 6.1: Messmodelle der untersuchten Strukturgleichungsmodelle. Der Übersichtlichkeit halber sind die zu berücksichtigen Korrelationen zwischen den latenten Variablen und die Fehlervariablen nicht eingezeichnet.

Die Anpassungsmaße sind in Tabelle 6.13 mit „Comf & Sens“ bzw. „Comf“ überschrieben. Dabei ist zu beachten, dass die Anpassungsmaße auf der Schät-

zung der in Abbildung 6.1 der Übersichtlichkeit halber nicht eingezeichneten Kovarianzen beruhen.

Tabelle 6.13: Anpassungsmaße der überprüften Messmodelle. Der mit „Comf" überschriebenen Spalte liegen nur die Messmodelle der latenten Variablen *ComfTc*, *ComfTw*, *ComfAQ*, *ComfN* und *ComfAll* zugrunde.

Messmodelle	Comf	Sens & Comf
$GFI_{\text{Exposition 1}}$	0,97	0,93
$GFI_{\text{Exposition 2}}$	0,99	0,97
$GFI_{\text{Exposition 3}}$	0,99	0,96
$RMR_{\text{Exposition 1}}$	0,091	0,093
$RMR_{\text{Exposition 2}}$	0,055	0,071
$RMR_{\text{Exposition 3}}$	0,059	0,078
NNFI	1,01	1,00
RMSEA	0,00	0,00
CN	1726,41	1225,49
df	150	587
X^2	110,96	533,90
p	0,99	0,94

Bei generell akzeptablen Anpassungsmaßen (bis auf $GFI_{\text{Exposition 1}}$ für „Sens & Comf") sind die Irrtumswahrscheinlichkeiten *p* für sich vom Datensatz unterscheidende Messmodelle sehr hoch (> 90 %). Damit kann Hypothese H1 angenommen werden, d.h. die angenommenen Messmodelle der latenten Variablen sind adäquat.

6.2.2 Überprüfung des Modellteils für Komfortaspekte

Um die jeweiligen Modellteile für die Beschreibung der Komfortaspekte (Bewertung/Wahrnehmung des thermischen bzw. akustischen Raumklimas sowie der Luftqaualität), überprüfen zu können werden Teilmodelle durch Weglassung der Zusammenführung der auf eine latente Variable des Gesamtkomforts untersucht. Diese sind entsprechend der in Kapitel 0 abgeleiteten Modelle *MCv*, *MSC*, *ICv* und *ISC* in Abbildung 6.2 bis Abbildung 6.5 dargestellt.

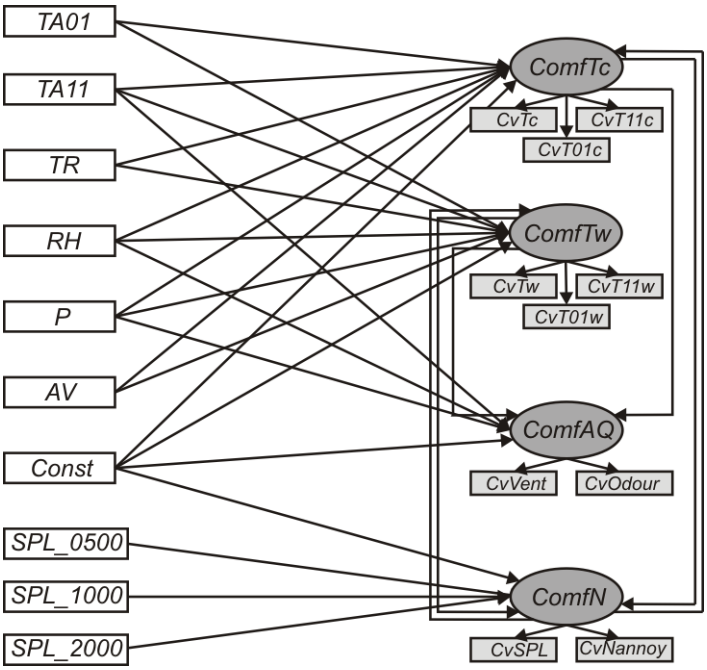


Abbildung 6.2: Teilmodell des Komfortmodells *MCv* entsprechend Kapitel 5.4.1. Hier wurde die Zusammenführung auf eine latente Variable des Gesamtkomforts weggelassen. Die Fehlervariablen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

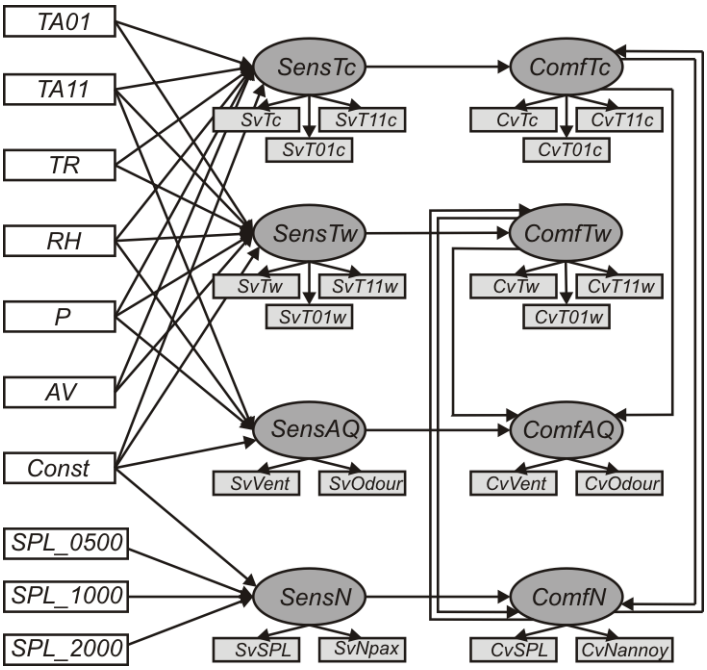


Abbildung 6.3: Teilmodell des Komfortmodells *MSC* entsprechend Kapitel 5.4.2. Hier wurde die Zusammenführung auf eine latente Variable des Gesamtkomforts weggelassen. Die Fehlervariablen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

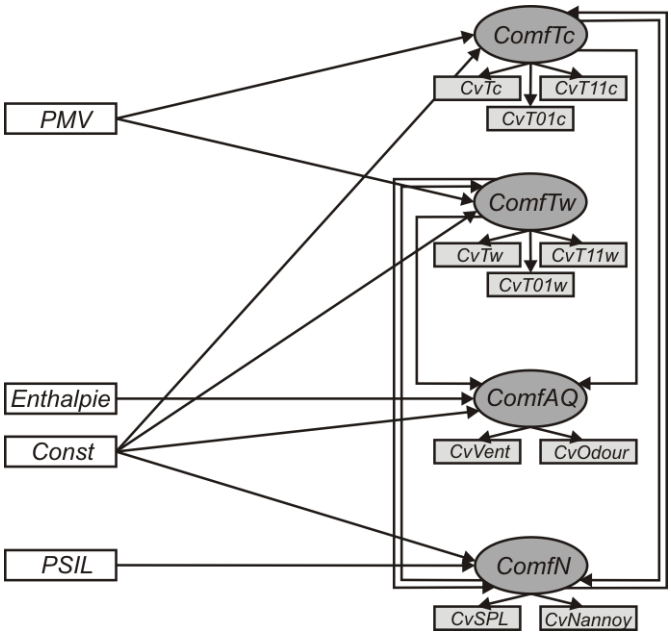


Abbildung 6.4: Teilmodell des Komfortmodells *ICv* entsprechend Kapitel 5.4.3. Hier wurde die Zusammenführung auf eine latente Variable des Gesamtkomforts weggelassen. Die Fehlervariablen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

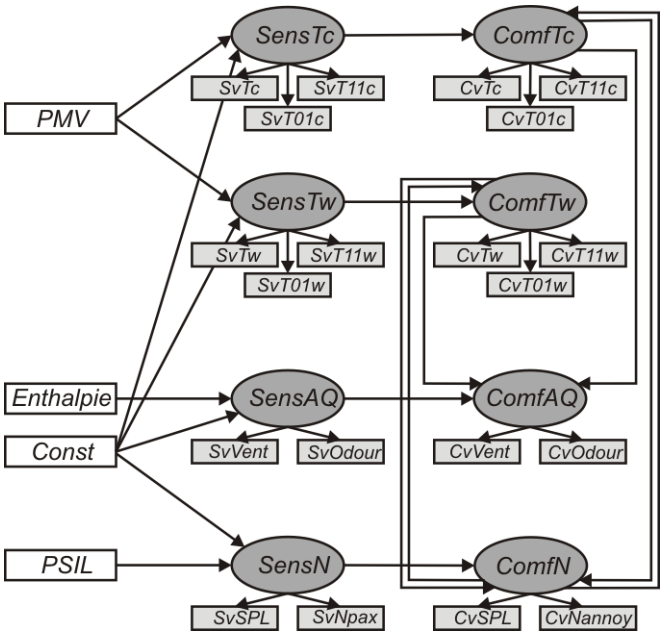


Abbildung 6.5: Teilmodell des Komfortmodells *ISC* entsprechend Kapitel 5.4.4. Hier wurde die Zusammenführung auf eine latente Variable des Gesamtkomforts weggelassen. Die Fehlervariablen sind der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

Tabelle 6.14: Anpassungsmaße der überprüften Teilmodelle, welche die Wahrnehmung und Bewertung der Komfortsapekte abbilden.

Teilmodell	$MCv_{Aspekte}$	$MSC_{Aspekte}$	$ICv_{Aspekte}$	$ISC_{Aspekte}$
$GFI_{Exposition\ 1}$	0,97	0,93	0,97	0,92
$GFI_{Exposition\ 2}$	0,99	0,96	0,99	0,95
$GFI_{Exposition\ 3}$	0,99	0,95	0,99	0,95
$RMR_{Exposition\ 1}$	0,056	0,100	0,079	0,130
$RMR_{Exposition\ 2}$	0,046	0,085	0,059	0,100
$RMR_{Exposition\ 3}$	0,043	0,085	0,050	0,100
NNFI	1,06	1,01	1,02	0,99
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,01
CN	2390,29	1308,87	1824,46	1036,95
df	318	1008	180	690
X^2	152,83	827,62	120,82	739,83
p	1,00	1,00	1,00	0,09

Wiederum sind die Anpassungsmaße im akzeptablen Bereich, mit Ausnahme der ersten Expositionen der Teilmodelle $MSC_{Aspekte}$ und $ISC_{Aspekte}$, für welche *GFI* und *RMR* knapp unterhalb der allgemein als akzeptabel bezeichneten Bereiche liegen (siehe Kapitel 3.5.8). Dies dürfte wiederum der Komplexität der Modelle bei gleichzeitig relativ kleiner Stichprobengröße geschuldet sein. Es kann jedoch aufgrund der Akzeptanz der übrigen Goodness-of-Fit Indizes von einer gültigen Modellstruktur ausgegangen werden. Für alle Teilmodelle wird die Modellstruktur zudem durch den χ^2-Goodness-of-Fit Test voll bestätigt. Somit kann auch Hypothese H2 bestätigt werden, d.h. die latenten Variablen der Komfortaspekte bzw. der Wahrnehmung können mit Hilfe der manifesten Variablen der Raumklimagrößen erklärt werden.

6.3 Vergleich der Modelle

Die Goodness-of-Fit Indizes für die in Kapitel 0 abgeleiteten Modelle sind nochmals in Tabelle 6.15 aufgeführt. Neben den Anpassungsmaßen für die einzelnen Expositionen (*GFI* und *RMR*) sowie für die Gesamtmodelle (*NNFI*, *RMSEA*, *CN*, X^2) sind auch die Gütekriterien *AIC* und *CAIC* zum Modellvergleich angegeben.

Die Anpassungsmaße, welche die Anpassung der jeweiligen Modelle an die Modellierungsdaten beschreiben, fallen gut bis akzeptabel aus. Lediglich *GFI* und *RMR* der ersten Exposition für die Modelle *MSC* und *ISC* liegen knapp au-

ßerhalb des akzeptablen Bereichs. Jedoch wird auch hier aufgrund der übrigen annehmbaren Indizes von einer gültigen Modellstruktur ausgegangen. Somit kann auch Hypothese H3 angenommen werden, d.h. die latente Variable des Gesamtkomforts kann durch eine Kombination der latenten Variablen der Komfortaspekte erklärt werden. Die aufgestellten Modelle können insgesamt als akzeptabel bewertet werden.

Tabelle 6.15: Anpassungsmaße der Komfortmodelle. Die Maße *AIC* und *CAIC* geben für sich gesehen keinen Hinweis über die Anpassung eines Modells. Im Gegensatz zu den übrigen Anpassungsmaßen weist ein kleineres *AIC* bzw. *CAIC* auf ein überlegenes Modell hin.

Modell	*MCv*	*MSC*	*ICv*	*ISC*
$GFI_{\text{Exposition 1}}$	0,97	0,93	0,97	0,92
$GFI_{\text{Exposition 2}}$	0,99	0,96	0,98	0,95
$GFI_{\text{Exposition 3}}$	0,99	0,95	0,99	0,95
$RMR_{\text{Exposition 1}}$	0,059	0,110	0,075	0,130
$RMR_{\text{Exposition 2}}$	0,044	0,083	0,055	0,099
$RMR_{\text{Exposition 3}}$	0,046	0,084	0,048	0,100
NNFI	1,07	1,02	1,03	1,00
RMSEA	0,00	0,00	0,00	0,00
CN	2420,76	1384,38	2000,43	1133,42
df	423	1173	249	819
X^2	196,38	891,71	147,75	790,66
p	1,00	1,00	1,00	0,76
AIC	862,38	1707,71	459,75	1252,66
CAIC	2845,59	4137,59	1388,82	2628,4

Wie in Kapitel 3.5.8 beschrieben kann durch den Vergleich der Indizes *AIC* und *CAIC* aus verschiedenen ähnlichen Modellen eine Reihenfolge überlegener Modelle hergestellt werden. Aus mehreren Alternativen wird im Allgemeinen dasjenige mit dem kleineren *AIC* bzw. *CAIC* als das bessere angesehen (siehe Langer, 2002).

Zur Überprüfung der Hypothese H4 werden die Indizes der Modelle *MSC* und *MCv* bzw. *ISC* und *ICv* verglichen. Das Modell *MCv* besitzt ein kleineres *AIC* und *CAIC* als das Modell *MSC*, äquivalent hat auch das Modell *ICv* ein kleineres *AIC* und *CAIC* als das Modell *ISC*. Damit kann die Hypothese H4 angenommen werden, d.h. die Modellgüte ist besser, sofern die intervenierenden latenten Variablen der Wahrnehmung weggelassen werden. Dies liegt im Wesentlichen an der weitaus geringeren Komplexität der Modelle ohne diese Variablen. In den Modellen *MCv* und *ICv* liegen dementsprechend weniger zu schätzende Parameter vor, was sich auch in der geringeren Anzahl der Freiheitsgrade *df* wider-

spiegelt. Durch die Einfügung der intervenierenden Variablen wird letzten Endes die Komplexität des Modells unnötig erhöht, ohne einen entsprechenden Beitrag zur Erklärung der Kovarianzen zu leisten.

Entsprechend wird auch Hypothese H5 analysiert, indem die Indizes der Modelle *MSC* und *ISC* bzw. *MCv* und *ICv* verglichen werden. Sowohl das Modell *ICv*, als auch das Modell *ISC* haben kleinere *AIC* und *CAIC* als die Modelle *MCv* bzw. *MSC*. Die Modelle, welche sinnvolle Klimasummengrößen statt einzelne Parameter als exogene manifeste Variablen verwenden, können dementsprechend als überlegen bezeichnet und Hypothese H5 angenommen werden. Auch hier wird die Komplexität der Modelle durch die Verwendung von Raumklimaindizes verringert und die Güte erhöht. Der implizite Fehler der Klimasummengrößen kann somit bei einer sinnvollen Wahl gegenüber der Schätzung vieler Modellparameter vorteilhaft sein. Die Reduktion der das Raumklima beschreibenden Größen auf Klimasummenmaße ist also auch für die Modellierung komplexer Zusammenhänge sinnvoll.

Zusammenfassend können die abgeleiteten Modelle als valide angesehen werden. Die In Kapitel 5.1 aufgestellten Hypothesen konnten durch die Untersuchung von Teilmodellen und den Vergleich der verschiedenen Modelle angenommen werden. Als überlegenes Modell stellt sich das Modell *ICv* heraus, welches Komfortaspekte direkt durch Raumklimasummengrößen erklärt, die schließlich in die latente Variable des Gesamtkomforts eingehen.

7 Parameterstudie für das Modell *ICv*

Basierend auf dem best bewerteten Modell *ICv* wird im Folgenden eine Parameterstudie über den Gültigkeitsbereich des Modells durchgeführt. Das Modell basiert auf den als manifeste exogene Variablen deklarierten Summengrößen *PMV*, *Enthalpie* und *PSIL*. Während die empfundene Luftqualität *ComfAQ* und der akustische Komfort *ComfN* linear formuliert sind, ist der thermische Komfort durch die zwei gegensätzlichen Fragen *ComfTc* bzw. *ComfTw* nach einer zu kalten bzw. zu warmen Umgebung durch zwei gegenläufige lineare Beziehungen im Modell ausgeprägt. Daher werden die assoziierten Summengrößen *Enthalpie* und *PSIL* in ihrem Minimum und Maximum und der Index *PMV* zusätzlich im Nullpunkt betrachtet. Es ergeben sich somit die Kandidatenpunkte *PMV* = {-1,2; 0,0; 0,9}, *Enthalpie* = {24,0 kJ/kg; 55,6 kJ/kg} und *PSIL* = {46,3 dB; 62,2 dB} für deren Kombination die latenten endogenen Variablen *ComfTc*, *ComfTw*, *ComfAQ*, *ComfN* und *ComfAll* des Modells *ICv* berechnet wurden (siehe Abbildung 7.1).

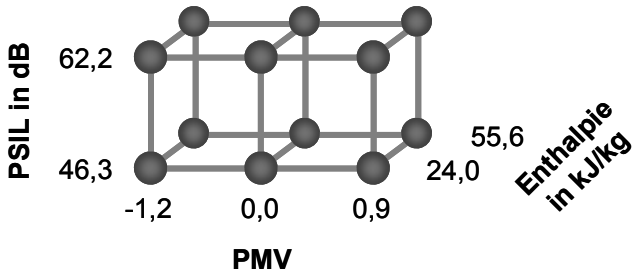


Abbildung 7.1: Kandidatenpunkte der Raumklimasummengrößen PMV, Enthalpie und PSIL für die Parameterstudie des Modells *ICv*.

Die Skalierung der Variablen entspricht durch die Bedingung $\lambda_{ij}^{(g)} = 1{,}00$ bei der Modellierung derjenigen der manifesten endogenen Variablen *CvTc*, *CvTw*, *CvVent*, *CvSPL* bzw. *CvCcomf4* (siehe Kapitel 5.4.3). Werte gleich Null bedeuten also komfortable, Werte bis drei entsprechend unkomfortable Bedingungen. Hierbei ist auf die Besonderheit zu achten, dass diese Variablen ausschließlich positiv definiert sind. Nehmen sie nach dem Strukturgleichungsmodell Werte kleiner Null an, so wurde ihr Wert gleich Null gesetzt.

7.1 Betrachtung der Variable des thermischen Komforts im Modell *ICv*

Entsprechend des in Kapitel 5.2.2 ausgeführten Splits der Fragebogenitems bezüglich des thermischen Komforts werden die beiden latenten endogenen Variablen *ComfTc* und *ComfTw* zugleich betrachtet. Die Ergebnisse der zwölf ausgewählten Kandidatenpunkte sind in Tabelle 7.1 dargestellt.

Tabelle 7.1: Ergebnisse der Parameterstudie für die latenten Variablen des thermischen Komforts *ComfTc* und *ComfTw* im Modell *ICv*. Variiert wurden die manifesten exogenen Klimasummengrößen *PMV*, *Enthalpie* und *PSIL*.

PMV	***Enthalpie***	***PSIL***	***ComfTc***			***ComfTw***		
[-]	[kJ/kg]	[dB]	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
-1,2	24,0	46,3	0,30	0,27	0,29	0,00	0,00	0,00
0,0	24,0	46,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03
0,9	24,0	46,3	0,00	0,00	0,00	0,22	0,17	0,21
-1,2	55,6	46,3	0,30	0,27	0,29	0,00	0,00	0,00
0,0	55,6	46,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03
0,9	55,6	46,3	0,00	0,00	0,00	0,22	0,17	0,21
-1,2	24,0	62,2	0,45	0,34	0,41	0,00	0,03	0,00
0,0	24,0	62,2	0,00	0,03	0,09	0,00	0,21	0,20
0,9	24,0	62,2	0,00	0,00	0,00	0,30	0,32	0,37
-1,2	55,6	62,2	0,45	0,34	0,41	0,00	0,03	0,00
0,0	55,6	62,2	0,00	0,03	0,09	0,00	0,21	0,20
0,9	55,6	62,2	0,00	0,00	0,00	0,22	0,32	0,37

Wie erwartet ist die Variable *ComfTc* für $PMV < 0$ im leicht unkomfortablen Bereich. Mit zunehmender Expositionsdauer ist dies auch für laute Umgebungen der Fall, in welchen auch der kalte Diskomfort stärker ausgeprägt ist. Eine Änderung der Enthalpie hat hingegen keinen Einfluss. Dies gilt größtenteils auch für die modellierte Variable *ComfTw.* Dies ist vermutlich auf die Berücksichtigung der Größen Lufttemperatur, Luftfeuchte sowohl im *PMV* als auch in der Enthalpie zurückzuführen. Die Ausprägungen des Diskomforts sind auch für die Variable *ComfTw* in lauten Umgebungen größer. Dieser Zusammenhang zwischen akustischer Umgebung und thermischem Komfort ist somit übereinstimmend mit Ergebnissen von Pellerin und Candas (2004) und Hellwig et al. (2006). Zudem nimmt hier bei fortschreitender Dauer der warme Diskomfort zu, interessanterweise auch für $PMV = 0{,}0$. Die beschriebenen Verläufe sind graphisch auch in Abbildung 7.2 dargestellt.

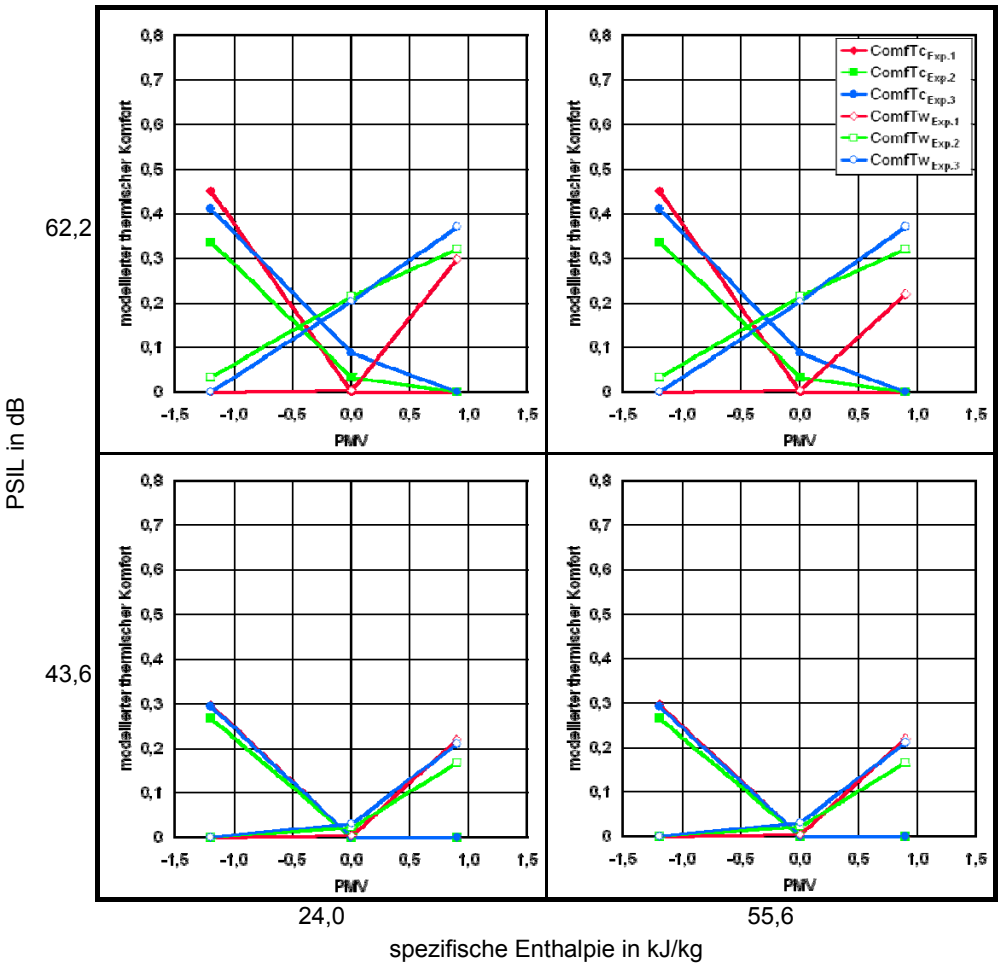


Abbildung 7.2: Graphische Darstellung der Parameterstudie für die latenten Variablen des thermischen Komforts im Modell *ICv*: *ComfTc* (geschlossene Symbole) und *ComfTw* (offene Symbole). Eingezeichnet sind die Ergebnisse für alle drei Expositionen (1: rot, 2: grün, 3: blau).

Die Werte sind sämtlich kleiner eins und damit auf der originalen Skala zwischen komfortabel und etwas unkomfortabel. Bei einer durchschnittlichen Fehlervarianz von 0,84 für *ComfTc* und 0,95 für *ComfTw* ist die Schätzung relativ unsicher. Entsprechende Trends lassen sich trotzdem ableiten, nachdem auch der Fehler diesen folgt. Für Vorhersagen sollten jedoch weitere Kriterien herangezogen werden. Die grundsätzlich niedrigen Werte sind wahrscheinlich durch die unscharfe Schätzung begründet. Bis auf die Lautstärkepegel bewegen sich sämtliche Umgebungsparameter in einem moderaten Bereich, in welchem keine extremen Komfortbeschwerden erwartet werden. Durch die daraus folgende große individuelle Schwankung in den Antworten resultiert auch die Schätzung des Komfortmodells in Zusammenhängen nahe einer komfortablen Bewertung. Somit sind die berechneten Werte zwar niedriger als erwartet, jedoch im Rahmen der Genauigkeit plausibel.

7.2 Betrachtung der Variable der empfundenen Luftqualität im Modell *ICv*

In Tabelle 7.2 sind die Ergebnisse für die Betrachtung der Variable *ComfAQ* der empfundenen Luftqualität im Modell *ICv* für die drei Expositionen gelistet.

Tabelle 7.2: Ergebnisse der Parameterstudie für die latente Variable der empfundenen Luftqualität *ComfAQ* im Modell *ICv*. Variiert wurden die manifesten exogenen Klimasummengrößen *PMV*, *Enthalpie* und *PSIL*.

PMV	***Enthalpie***	***PSIL***	***ComfAQ***		
[-]	[kJ/kg]	[dB]	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
-1,2	24,0	46,3	0,12	0,00	0,23
0,0	24,0	46,3	0,00	0,00	0,05
0,9	24,0	46,3	0,08	0,00	0,21
-1,2	55,6	46,3	0,57	0,61	0,18
0,0	55,6	46,3	0,28	0,46	0,00
0,9	55,6	46,3	0,53	0,60	0,16
-1,2	24,0	62,2	0,27	0,00	0,32
0,0	24,0	62,2	0,00	0,00	0,27
0,9	24,0	62,2	0,17	0,04	0,35
-1,2	55,6	62,2	0,72	0,69	0,27
0,0	55,6	62,2	0,28	0,66	0,22
0,9	55,6	62,2	0,53	0,74	0,30

Für größere Enthalpien, also wärmere und/oder weniger trockene Umgebungen bei höherem Luftdruck, ist der Diskomfort erwartungsgemäß höher, wobei die Ergebnisse der Expositionen stark divergieren (siehe Abbildung 7.3). Dieser Trend wurde auch von Fang et al. (1998a) und Böttcher (2003) aufgezeigt. Auch hier muss die Unschärfe des Modells berücksichtigt werden: die durchschnittliche Fehlervarianz für die drei Expositionen beträgt 0,40. Die modellierten Werte liegen wie auch in Kapitel 7.1 zwischen 0 und 1. Nichtsdestotrotz können Aussagen über Trends gemacht werden. So sind die Werte bei höherem *PSIL* tendenziell höher, was die Ergebnissen von Clausen et al. (1993) bestätigt. Auffallend ist auch, dass die Variable der empfundenen Luftqualität in jedem der zwölf Fälle ein Minimum bei *PMV* = 0,0 hat. Leichter thermischer Diskomfort beeinflusst somit offensichtlich auch die empfundene Luftqualität – nicht nur eine höhere Enthalpie, bei welcher vor allem eine Zunahme unter unkomfortabel warmen Bedingungen erwartet werden würde. Ähnliches wurde

auch von Sekhar et al. (2000) im Rahmen ihrer Untersuchungen von der Zufriedenheit in Gebäuden gefunden.

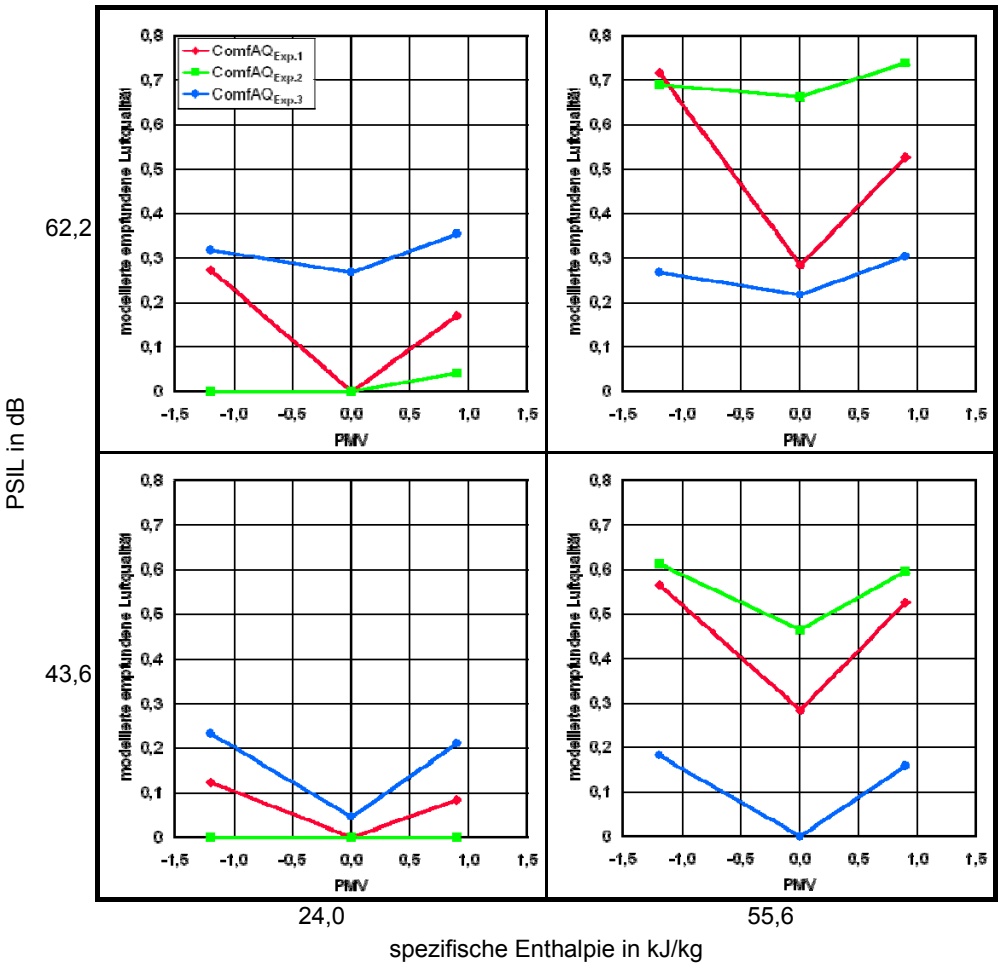


Abbildung 7.3: Graphische Darstellung der Parameterstudie für die latente Variable der empfundenen Luftqualität *ComfAQ* im Modell *ICv*. Eingezeichnet sind die Ergebnisse für alle drei Expositionen (1: rot, 2: grün, 3: blau).

7.3 Betrachtung der Variable des akustischen Komforts im Modell *ICv*

Für die Betrachtung der Variable des akustischen Komforts *ComfN* sind die Ergebnisse der Kanditatenpunkte für das Modell *ICv* in Tabelle 7.3 aufgeführt.

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Parameterstudie für die latente Variable des akustischen Komforts *ComfN* im Modell *ICv*. Variiert wurden die manifesten exogenen Klimasummengrößen *PMV*, *Enthalpie* und *PSIL*.

PMV	***Enthalpie***	***PSIL***	***ComfN***		
[-]	[kJ/kg]	[dB]	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
-1,2	24,0	46,3	0,00	0,00	0,00
0,0	24,0	46,3	0,00	0,00	0,00
0,9	24,0	46,3	0,00	0,00	0,00
-1,2	55,6	46,3	0,00	0,00	0,00
0,0	55,6	46,3	0,00	0,00	0,00
0,9	55,6	46,3	0,00	0,00	0,00
-1,2	24,0	62,2	0,37	0,36	0,39
0,0	24,0	62,2	0,40	0,34	0,43
0,9	24,0	62,2	0,39	0,27	0,40
-1,2	55,6	62,2	0,37	0,36	0,39
0,0	55,6	62,2	0,40	0,34	0,43
0,9	55,6	62,2	0,40	0,27	0,40

Für sämtliche Konditionen bei einem *PSIL* von 46,3 dB berechnet das Modell *ICv* einen akustischen Komfort von Null. Nach der in Abbildung 5.10 angegebenen Regressionsgleichung entspricht dies in der zugrunde liegenden Studie einem Schalldruckpegel von 61,4 dB(A). Bei höheren Lautstärkepegeln nimmt der akustische Diskomfort über alle Konditionen hinweg zu, wobei eine durchschnittliche Fehlervarianz von 1,00 berücksichtigt werden muss. Dieser Trend ist weithin bekannt, siehe beispielsweise Fastl und Zwicker (2007). Auch beim modellierten akustischen Diskomfort liegen die Werte des Modells zwischen 0 und 1, was analog zu Kapitel 7.1 diskutiert werden kann. Eine graphische Darstellung findet sich in Abbildung 7.4.

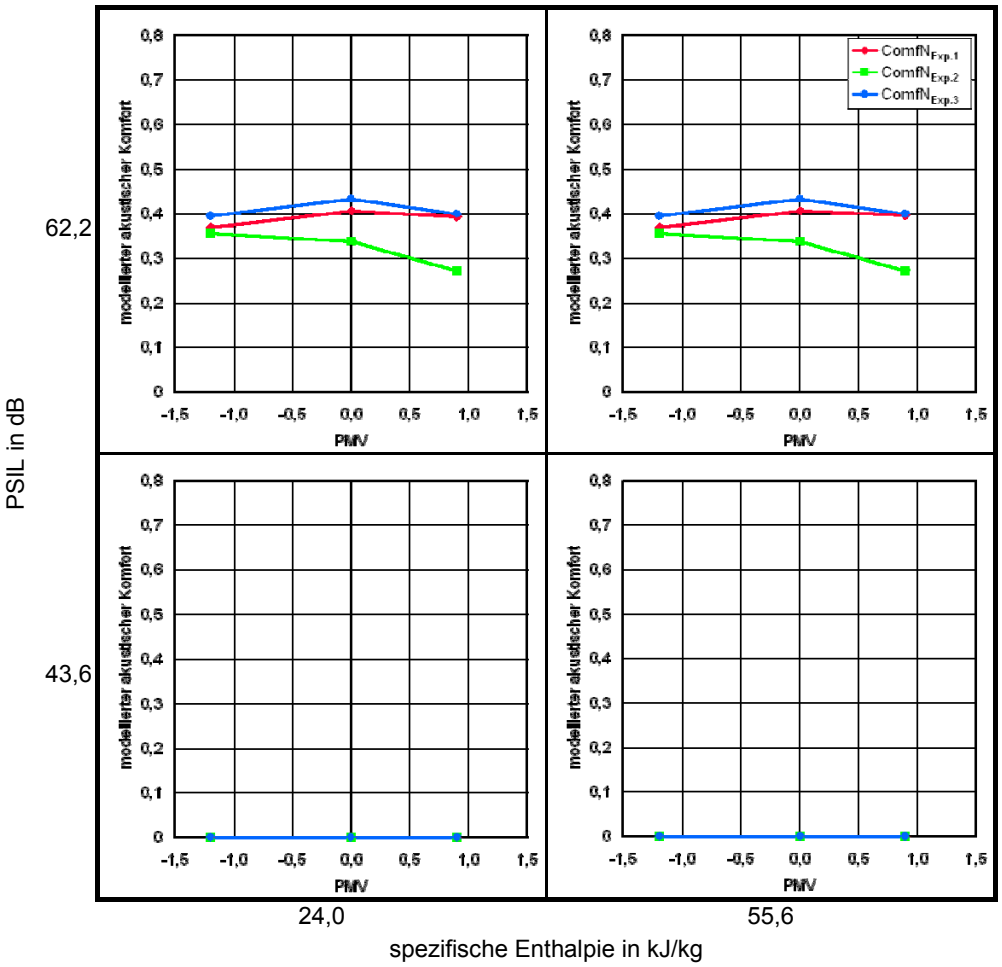


Abbildung 7.4: Graphische Darstellung der Parameterstudie für die latente Variable des akustischen Komforts *ComfN* im Modell *ICv*. Eingezeichnet sind die Ergebnisse für alle drei Expositionen (1: rot, 2: grün, 3: blau).

7.4 Betrachtung der Variable des Gesamtkomforts im Modell *ICv*

Abschließend wird die Variable des Gesamtkomforts *ComfAll* im Modell *ICv* im Rahmen der Parameterstudie untersucht. Die Ergebnisse für die zwölf Kandidatenpunkte sind in Tabelle 7.4 für die drei Expositionen aufgeführt.

Tabelle 7.4: Ergebnisse der Parameterstudie für die latente Variable des Gesamtkomforts *ComfAll* im Modell *ICv*. Variiert wurden die manifesten exogenen Klimasummengrößen *PMV*, *Enthalpie* und *PSIL*.

PMV	***Enthalpie***	***PSIL***	***ComfAll***		
[-]	[kJ/kg]	[dB]	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
-1,2	24,0	46,3	0,56	0,17	0,21
0,0	24,0	46,3	0,01	0,01	0,02
0,9	24,0	46,3	0,45	0,11	0,14
-1,2	55,6	46,3	0,17	0,20	0,20
0,0	55,6	46,3	0,00	0,03	0,01
0,9	55,6	46,3	0,06	0,13	0,13
-1,2	24,0	62,2	0,68	0,27	0,34
0,0	24,0	62,2	0,00	0,18	0,25
0,9	24,0	62,2	0,46	0,23	0,29
-1,2	55,6	62,2	0,28	0,30	0,33
0,0	55,6	62,2	0,00	0,21	0,24
0,9	55,6	62,2	0,00	0,26	0,28

Mit Ausnahme der berechneten Werte für die erste Exposition unterscheiden sich die beiden Level der Enthalpie nur wenig. Die starken Änderungen in der ersten Exposition können ihre Erklärung jedoch in der schlechten Schätzung mit negativer Fehlervarianz finden. Für die beiden übrigen Expositionen liegt diese durchschnittlich bei 0,39. Wie auch die Variablen der Komfortaspekte fallen die berechneten Werte in das Intervall zwischen 0 und 1, also zwischen komfortabel und etwas unkomfortabel. Tendenziell wird bei kühleren oder wärmeren Umgebungen ein größerer Diskomfort berechnet, wie auch Trimmel et al. (2005) berichten. Gleiches gilt, wie auch Mellert et al. (2008) ausführen, für lautere Umgebungen, wobei sich bei diesen die Dauer der Exposition verstärkend auf den Diskomfort auswirkt.

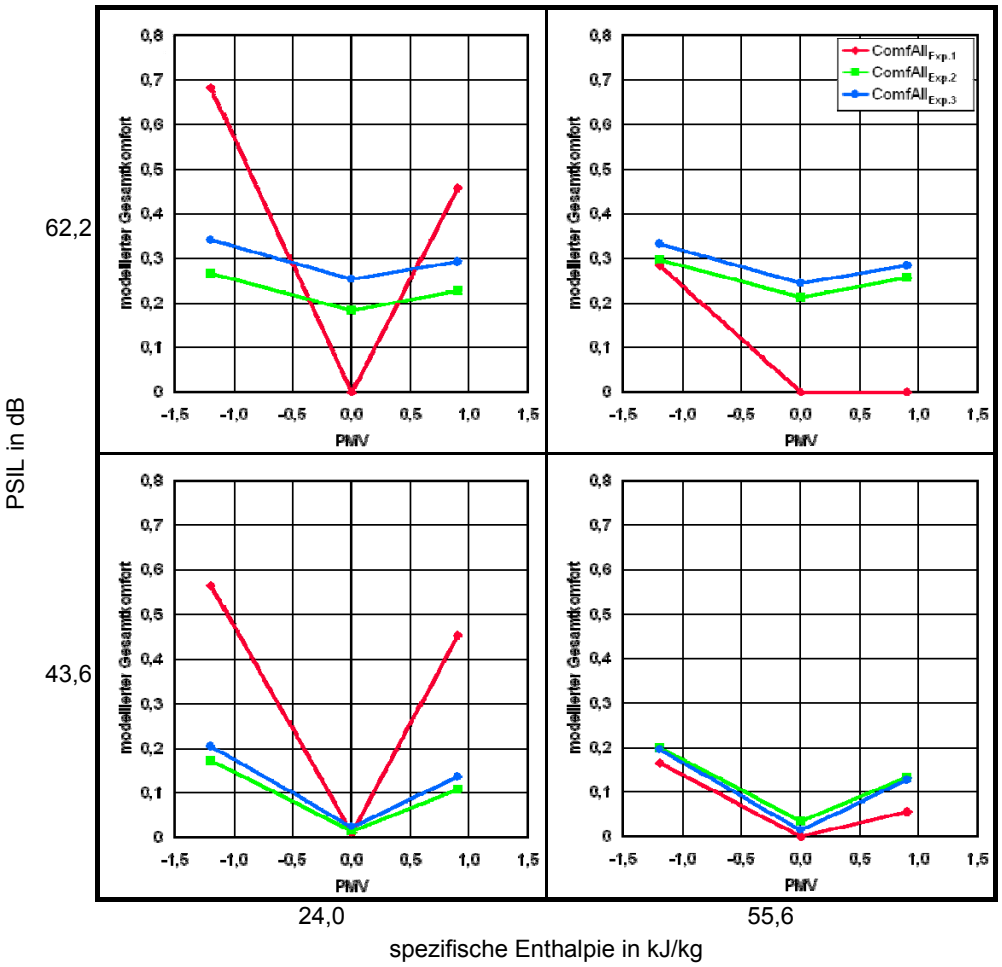


Abbildung 7.5: Graphische Darstellung der Parameterstudie für die latente Variable des Gesamtkomforts *ComfAll* im Modell *ICv*. Eingezeichnet sind die Ergebnisse für alle drei Expositionen (1: rot, 2: grün, 3: blau).

Abschließend werden die beobachteten Trends des Modells *ICv* in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Grundsätzlich sollte der Gültigkeitsbereich des Modells, welcher durch diese Parameterstudie vollständig abgedeckt wird, berücksichtigt werden. Auch sollte der Ursprung der Daten aus Probandenstudien in einer simulierten Flugzeugumgebung bei einer Anwendung in Betracht gezogen werden.

Tabelle 7.5: Zusammenfassung der beobachteten Trends zu höherem Diskomfort im Modell *ICv*.

latente Modellvariable	Trend zu höherem Diskomfort, wenn …
ComfTc, *ComfTw*	*|PMV|* ↑; *PSIL* ↑; *Dauer* & *PSIL* ↑
ComfAQ	*Enthalpie* ↑; *|PMV|* ↑ *PSIL* ↑
ComfN	*PSIL* ↑
ComfAll	*|PMV|* ↑; *PSIL* ↑; *Dauer* & *PSIL* ↑

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bei einer Reflektion der in dieser Arbeit erarbeiteten wissenschaftlichen Methodik werden Schlussfolgerungen gezogen und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen gegeben. Abschließend werden einige praktische Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt.

8.1 Wissenschaftliche Reflektion und potenzielle Weiterentwicklungen

Ausgehend von einer eingehenden Analyse des Komfortbegriffs und dessen Natur als Konstrukt wurde erfolgreich das Verfahren der Strukturgleichungsmodellierung für die Entwicklung eines möglichen Komfortindex gewählt. Dieser wurde auf Basis subjektiver Diskomfortbewertungen abgeleitet, wobei das Erreichen eines Zustands in welchem kein Diskomfort herrscht als maßgebendes Kriterium für ein gutes Raumklima betrachtet wird.

Mit der Strukturgleichungsmodellierung wurde ein in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften etabliertes, im Ingenieurwesen jedoch weitgehend unbekanntes Verfahren verwendet. Zum Einen sind statistische Verfahren in den Ingenieurwissenschaften häufig auf direkt beobachtbare Variablen beschränkt, zum Anderen liegen diese Variablen meist als physikalische Messgrößen, wie z.B. Kräfte oder Temperaturen, vor. Damit reduziert sich die Anwendung der Statistik größtenteils auf einfache parametrische Verfahren. Strukturgleichungsmodelle hingegen können zusätzlich nicht direkt beobachtbare Größen, wie Konstrukte, als latente Variablen berücksichtigen. Die weit verbreitete lineare Regression ist nach Weglassen der latenten Variablen beispielsweise ein Spezialfall der Strukturgleichungsmodelle.

Ein Nachteil der herkömmlichen Strukturgleichungsmodellierung, wie sie auch der hier verwendeten Software LISREL zugrunde liegt, ist ihre Annahme multivariat normalverteilter Daten. Diese oder verwandte Annahmen liegen sämtlichen parametrischen Statistiken zugrunde, sind jedoch bei der Verwendung von subjektiven Bewertungen anhand von Fragebögen nicht immer gerechtfertigt. Die in dieser Arbeit verwendeten Fragebogendaten sind ordinal skaliert und es muss die Annahme normalverteilter Daten abgelehnt werden. Um

trotzdem die Strukturgleichungsmodellierung einsetzen zu können wurde das Verfahren der polychorischen Korrelation angewendet. Dieses schätzt die Korrelation ordinaler Daten unter Abbildung dieser auf eine normalverteilte kontinuierliche Skala. Auch wenn damit eine korrekte Behandlung kategorialer Daten vollzogen wird, verbleibt eine Unsicherheit in der Schätzung der Fehlervariablen. Eine Möglichkeit, um dieser Problematik in Zukunft zu begegnen sind die aktuell in der Entwicklung befindlichen bayes'schen Strukturgleichungsmodelle, welche unabhängig von der zugrunde liegenden Verteilung der Daten geschätzt werden (siehe beispielsweise Lee (2007)). Große Strichproben sind bei ihnen jedoch ebenfalls notwendig, wenn nicht sogar in größerem Umfang.

Die in dieser Arbeit verwendete Stichprobe wurde anhand eines Zufallsverfahrens in zwei Hälften geteilt, um eine Validierung zu ermöglichen. Diese konnte auf Basis eines Vergleichs von zwei Gruppen (den beiden Hälften des Datensatzes) für die jeweils zu schätzenden Parametermatrizen durchgeführt werden. Für die abgeleiteten Modelle konnte eine Übereinstimmung gefunden werden, womit sie als valide betrachtet werden können. Damit kann auch auf eine Modell-Daten Konsistenz geschlossen werden, welche eine fundamentale Voraussetzung für gültige Modelle ist.

Basierend auf fünf Hypothesen wurden vier unterschiedliche Strukturgleichungsmodelle entwickelt, wobei jedes der Modelle durch drei Gruppen Unterschiede in der zeitlichen Änderung der Komfortbewertung berücksichtigt.

Die erste Hypothese adäquater Messmodelle konnte bestätigt werden. Unter Messmodellen werden in der Strukturgleichungsmodellierung die Modellteile verstanden, welche die Beschreibung der latenten (nicht direkt messbaren) Größen durch messbare (manifeste) Variablen abbilden. Diese wurden zuvor anhand einer Hauptkomponentenanalyse aus den vorliegenden Fragebogendaten gewonnen. Nachdem diese aus dem EU-Forschungsprojekt Ideal Cabin Environment (ICE) mit einem Fokus auf Auswirkungen von Luftdruck, -feuchte und -temperatur sowie Hintergrundlautstärke stammen, wurden Faktoren bezüglich thermischer und akustischer Komfortbewertung sowie empfundener Luftqualität extrahiert. Hierbei konnte jedoch die Empfindung der Trockenheit als erklärender Bestandteil der thermischen Bewertung oder der empfundenen Luftqualität ausgeschlossen werden. Unabhängig von den untersuchten Feuchteleveln (10 % bis 40 %) wurde die Umgebung von 40 % bis 45% der Probanden als neutral bzw. komfortabel angegeben, lediglich zwischen 3 % und 5 % der Personen bewerteten die Umgebung als (zu) feucht. Auch die Bewertung der Vibrationen konnte durch die Hauptkomponentenanalyse keinem Faktor zugeordnet werden. Durch diesen Aspekt wird kaum Varianz in den Daten erklärt, was durch die relativ niedrigen Vibrationslevel begründet werden kann.

Diese werden zwar schwach wahrgenommen, die Bewertungen liegen jedoch sämtlich nahe „komfortabel“ und variieren wenig.

Es konnten ebenfalls die Hypothesen zwei und drei bestätigt werden. Diese sagen aus, dass mit Hilfe der manifesten Variablen der Raumklimagrößen die latenten Variablen der Komfortaspekte bzw. der Wahrnehmung erklärt werden können und dass die latente Variable des Gesamtkomforts durch eine Kombination dieser latenten Variablen erklärt werden kann. Damit sind die gewählten Architekturen der verglichenen Strukturgleichungsmodelle grundsätzlich akzeptabel.

Allerdings ist hierbei zu beachten, dass zum Einen die Fehlervarianz für die abgebildeten Skalen recht hoch ist und zum Anderen die Schätzungen für die erste Expositionsphase (welche in den Untersuchungen 30 Minuten nach Einstellen der Umgebungsbedingungen begann) teilweise schlecht sind. Vermutlich sind zu diesem Zeitpunkt Einflüsse unbekannter Variabler auf die Varianz der Daten zu groß. Im Sinne der kausalen Modellierung liegt somit wahrscheinlich trotz kontrollierter Umgebungsbedingungen keine Pseudo-Isolation der Variablen vor. Interessant wäre in zukünftigen Modellen mögliche Ursachen, wie beispielsweise Erfahrung oder Erwartungshaltung, mit einzubeziehen. Das Problem der großen Fehlervarianz in Relation zum durch das Modell abgebildeten Skalenintervall kann durch die ausschließliche Untersuchung von einigermaßen akzeptablen Umgebungsbedingungen begründet sein. Extreme Raumklimata wurden nicht betrachtet. Die erwartete Varianz der individuellen Bewertungen durch Probanden ist jedoch nahe dem Komfortbereich sehr groß und nimmt bei unkomfortableren Bedingungen im Allgemeinen ab. Daher wäre es wünschenswert bei zukünftigen Untersuchungen und Modellbildungen solche Bedingungen einfließen lassen zu können. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass der lineare Ansatz der herkömmlichen Strukturgleichungsmodelle kritisch hinterfragt werden muss, da Summengrößen für einzelne Raumklimaaspekte, wie der PMV oder die Lautstärke, ein nicht-lineares Verhalten zeigen. Außerdem sind für nicht-lineare Modelle mehr Parameterschätzungen und damit auch größere Stichproben notwendig.

Bei einem Vergleich der Modelle hinsichtlich der Verwendung intervenierender latenter Variablen der Wahrnehmung, wurden Modelle ohne diese als überlegen identifiziert. In ihnen ist eine wesentlich geringere Anzahl an Parametern zu schätzen, was ihre Favorisierung größtenteils begründen wird. Ähnliches trifft zu für den Vergleich von Modellen basierend auf raumklimatischen Messgrößen und solchen basierend auf Summengrößen. Auch hier werden die Modelle mit weniger Parametern favorisiert, d.h. also jene mit Raumklimaindizes als Eingangsgrößen. Allerdings muss beachtet werden, dass die Güte der Mo-

delle abhängig von der Wahl dieser exogenen manifesten Variablen ist. Bei unsinniger Wahl der Variablen ist auch kein interpretierbares Ergebnis zu erwarten. Werden Größen verwendet, welche die Varianz der Komfortbewertungen besser abbilden, wird die Güte der Modelle zunehmen. Von den vier untersuchten Modellen wurde folglich jenes basierend auf Klimasummengröße und ohne intervenierende latente Variablen der Wahrnehmung ausgewählt.

Die anschließende Parameterstudie zeigte plausible Trends auf, welche aufgrund der hohen Fehlervarianz jedoch nicht als quantitative Vorhersage verwendet werden sollten. Die bekannten Zusammenhänge von wärmerem und kühlerem Raumklima und erhöhtem Diskomfort, unkomfortableren lauten Umgebungen und schlechter empfundener Luftqualität bei höherer Enthalpie werden durch das Modell abgebildet. Zudem werden durch das Modell Interrelationen zwischen der thermischen Bewertung und der akustischen Umgebung bestätigt. Auch die empfundene Luftqualität zeigt einen Trend eines höheren Diskomforts in lauten sowie thermisch unkomfortableren Umgebungen. Jedoch ist hier keine Systematik hinsichtlich der Expositionsdauer erkenntlich. Während bei der akustischen Bewertung die zeitliche Komponente keinen Einfluss zu haben scheint, wird die thermische Umgebung bei gleichzeitig höherem Lautstärkepegel mit der Zeit etwas schlechter bewertet. Der Gesamtdiskomfort wird tendenziell bei kühleren oder wärmeren Umgebungen größer berechnet. Gleiches gilt für lautere Umgebungen, wobei sich bei diesen die Dauer der Exposition verstärkend auf den Diskomfort auswirkt. Diese Trends decken sich mit aus der Literatur bekannten Ergebnissen anderer Studien. Damit kann implizit auch auf eine annehmbare Modell-Realität Konsistenz geschlossen werden, so dass das untersuchte Modell *ICv* als eine gültige Abbildung von Komfortbewertungen in Flugzeugkabinen angesehen werden kann.

Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz für die Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas kann abschließend als brauchbar bewertet werden. Die entwickelten Modelle sind valide, akzeptabel und führen zu qualitativ plausiblen Ergebnissen. Um quantitativ verlässliche Vorhersagen treffen zu können wäre es jedoch wünschenswert eine größere Menge kompatibler Daten für eine robuste Schätzung zur Verfügung zu haben, welche auch unkomfortablere Raumklimabedingungen umfassen. Um einen ganzheitlichen raumklimatischen Index formulieren zu können ist es weiterhin notwendig auch das visuelle Raumklima in eine Formulierung von Modellen mit einzubeziehen. Diese wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, der gewählte Modellansatz stellt sich jedoch als aussichtsreich für eine brauchbare Modellarchitektur heraus.

8.2 Praktische Anwendungsmöglichkeiten

Auch wenn das hier gewählte Beispiel des Raumklimas in Passagierflugzeugkabinen der Modellierung zugrunde liegt ist der entwickelte Modellansatz auf andere Räume, wie in Gebäuden oder Kraftfahrzeugen, anwendbar. Die Flugzeugkabine unterscheidet sich jedoch erheblich von anderen Räumen bezüglich der zentralen Klimatisierung, der Nutzungsdauer und dem Tätigkeitsspektrum der Nutzer. In anderen Räumen sind zum Einen andere spezifische Ausprägungen des Raumklimas und zum Anderen unterschiedliche weitere Einflussparameter, wie beispielsweise die Erwartungshaltung, Einflussnahme, etc., oder transiente Raumklimata zu erwarten. Eine Integration solcher weiterer Variabler und eine Schätzung basierend auf konsistenten Daten für Räume in Gebäuden wäre daher einer direkten Übertragung der Modelle vorzuziehen.

Die Bewertung des Raumklimas anhand von ganzheitlichen Modellen kann ihre Anwendung in der Planung von Räumen, im Speziellen in der Planung von künftigen Flugzeugkabinen finden. Dies betrifft nicht nur Kabinen neuer Flugzeugtypen, sondern auch die Umrüstung bestehender Flugzeuge. Ziel ist mit geringem Aufwand ein komfortableres Raumklima zu schaffen und damit letzten Endes eine höhere Kundenzufriedenheit zu erreichen. Dies kann auch durch intelligente Klimaregelungen geschehen, welche auf sich ändernde Klimaparameter oder Passagierwünsche reagieren. Anhand holistischer Raumklimamodelle könnten diese Entscheidungen finden oder als lernendes System ihre Regelparameter anpassen. Gerade im Hinblick auf solche Systeme könnten auch alternative Modellansätze, wie künstliche neuronale Netze, von Interesse sein. Eine Untersuchung dieser im Vergleich zu den in dieser Arbeit herausgestellten Kapabilitäten von Strukturgleichungsmodellen wäre ein weiterer Schritt hin zu einem nutzerorientierten Raumklima.

Literaturverzeichnis

Alm O, Witterseh T, Clausen G, Toftum J und Fanger PO. (1999) The Impact of Human Perception of Simultaneous Exposure to Thermal Load, Low-Frequency Ventilation Noise and Indoor Air Pollution. In: *Proceedings of Indoor Air '99*. 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 8.Aug.1999, Edinburgh, UK. Construction Research Communications Ltd., London, UK, 270-275.

American Heritage Dictionary. (2000) The American Heritage Dictionary of the English Language. Pickett JP und et al. (Hrsg.). 4. Ausgabe, Houghton Mifflin Company, Boston, MA, USA. http://www.bartleby.com/61/ (17.9.2008).

ASHRAE 55 (2004) ASHRAE 55:2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA.

Amoore JE. (1962) The Stereochemical Theory of Olfaction. I. Identification of Seven Primary Odors. *Proceedings of the Scientific Section, Toilet Goods Association*, **13** (Supplement), 1-13.

Andersen I, Lundqvist GR, Jensen PL und Proctor DF. (1974) Human Response to 78-Hour Exposure to Dry Air. *Archives of Environmental Health*, **29** (6), 319-324.

Backhaus K, Erichson B, Plinke W und Weiber R. (2006) *Multivariate Analysemethoden: Eine Anwendungsorientierte Einführung*, 11. Auflage. In: *Springer-Lehrbuch*. Springer, Berlin, Germany.

Balazova I, Clausen G und Wyon DP. (2007) The Influence of Exposure to Multiple Indoor Environmental Parameters on Human Perception, Performance and Motivation. In: FINVAC (Hrsg.) *Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors*. Clima 2007 WellBeing Indoors, 10.Jun.2007, Helsinki, Finland, Helsinki, Finland. **1133**.

Baltes-Götz B. (2002) Einführung in Die Analyse Von Strukturgleichungsmodellen Mit LISREL 7 Und PRELIS Unter SPSS. Universitäts-Rechenzentrum Trier, Trier, Germany.

Bear MF, Connors BW und Paradiso MA. (2001) *Neuroscience*, 2. Auflage, Katz S (Hrsg.). Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, MD, USA.

Bellmann M, Baumann I, Hillebrand P, Mellert V und Weber R. (2002) Wirkung Von Sitz- Und Lenkradvibrationen Auf Den Komfort Im Fahrzeug. In: Becker K (Hrsg.), *Subjektive Fahreindrücke Sichtbar Machen II*. expert-Verlag, Essen. 99-113.

Bellmann MA, Röder A und Remmers H. (2005) Environmental Conditions for Cockpit and Cabin Crew Members During Long-Haul Flights. Internatio-

nal Symposium on Health Effects in Aircraft Cabin Environment - HEACE, 22.Jun.2004, Oldenburg.

Benzinger TH. (1979) The Physiological Basis for Thermal Comfort. In: Fanger PO (Hrsg.), *Indoor Climate*. 441-476.

Beranek LL. (1947) Airplane Quieting II - Specification of Acceptable Noise Levels. *Transactions of the A.S.M.E.*, **69**, 97-100.

Beranek LL. (1957) Revised Criteria for Noise in Buildings. *Noise Control*, **3** (1), 19-27.

Beranek LL. (1989) Balanced Noise-Criterion (NCB) Curves. *Journal of the Acoustical Society of America*, **86** (2), 650-664.

Bertelsmann Wörterbuch. (2008) Bertelsmann Wörterbuch. (Hrsg.). Wissen Media Verlag GmbH, Gütersloh, Germany. http://www.wissen.de/wde/generator/wissen/ressorts/bildung/woerterbuecher/index.html (17.9.2008).

Blazier WE. (1981) Revised Noise Criteria for Application in the Acoustical Design and Rating of HVAC Systems. *Noise Control Engineering*, **16** (2), 64-73.

Blazier WE. (1997) RC Mark II: A Refined Procedure for Rating the Noise of Heating, Ventilating and Air-Conditioning (HVAC) Systems in Buildings. *Noise Control Engineering*, **45** (6), 243-250.

Bluyssen PM. (1990) Air Quality Evaluated by a Trained Panel. PhD Thesis, Technical University of Denmark

Bollen KA. (1989) *Structural Equations With Latent Variables*. In: Shewhart WA und Wilks SS (Hrsg.) *Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Bollen KA. (2002) Latent Variables in Psychology and the Social Sciences. *Annual Review of Psychology*, **53**, 605-634.

Bollen KA und Long SJ. (1993) *Testing Structural Equation Models*. In: *SAGE Focus Editions*, **154**. SAGE Publications, United States of America.

Böttcher O. (2003) Experimentelle Untersuchungen Zur Berechnung Der Empfundenen Luftqualität. Dissertation, Technische Universität Berlin. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf.

Branton P. (1969) Behaviour, Body Mechanics and Discomfort. *Ergonomics*, **12** (2), 316-327.

BS 6841 (1987) BS 6841:1987 Guide to Measurement and Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Mechanical Vibration and Repeated Shock. British Standards Institution, London, UK.

Brockhaus. (2006) Der Brockhaus in 15 Bänden: Permanent Aktualisierte Online-Auflage. (Hrsg.). Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim, Germany. http://www.brockhaus-suche.de/ (17.9.2008).

Cain WS. (2002) The Construct of Comfort: a Framework for Research. In: *Proceedings of Indoor Air 2002*. 9th International Conference on Indoor Air

Quality and Climate, 30.Jun.2002, Monterey, CA, USA. The Printing House, Inc., Stoughton, WI, USA, 12-20.

Clausen G, Carrick L, Fanger PO, Kim SW, Poulsen T und Rindel JH. (1993) A Comparative Study Of Discomfort Caused By Indoor Air Pollution, Thermal Load And Noise. *Indoor Air*, **3** (4), 255-262.

de Dear R, Brager, G und Cooper, D. (1997) Final Report: Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, *ASHRAE-RP 884, Adaptive Model Project*. Macquarie University

Dean RD und McGlothlen CL. (1965) Effects of Combined Heat and Noise on Human Performance, Physiology, and Subjective Estimates of Comfort and Performance. In: *Institute of Environmental Sciences Annual Technical Meeting Proceedings*. Institute of Environmental Sciences Annual Technical Meeting, 1965, 55-64.

Deutscher Wetterdienst. (1976) *Aspirations-Psychrometer-Tafeln*, 5. Auflage. Vieweg Verlag, Wiesbaden, Germany.

DIN 45631 (1991) DIN 45631:1991 Berechnung Des Lautstärkepegels Und Der Lautheit Aus Dem Geräuschspektrum; Verfahren Nach E. Zwicker. DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany.

DIN EN ISO 10551 (2002) DIN EN ISO 10551:2002 Ergonomie Des Umgebungsklimas - Beurteilung Des Einflusses Des Umgebungsklimas Unter Anwendung Subjektiver Bewertungsskalen - Deutsche Fassung EN ISO 10551:2001. DIN Deutsches Institut für Normung.

DIN EN ISO 7726 (2002) DIN EN ISO 7726:2002 Umgebungsklima - Instrumente Zur Messung Physikalischer Gröben - Deutsche Fassung EN ISO 7726:2001. DIN Deutsches Institut für Normung.

DIN EN 61672-1 (2003) DIN EN 61672-1:2003 Elektroakustik - Schallpegelmesser. Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2002). DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany.

DIN EN 13725 (2003) DIN EN 13725:2003 Luftbeschaffenheit - Bestimmung Der Geruchsstoffkonzentration Mit Dynamischer Olfaktometrie. DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany.

DIN EN ISO 9920 (2005) DIN EN ISO 9920:2005 Entwurf - Ergonomie Der Thermischen Umgebung - Abschätzung Der Wärmeisolation Und Des Verdunstungswiderstandes Einer Bekleidungskombination - Deutsche Fassung PrEN ISO 9920:2004. DIN Deutsches Institut für Normung.

DIN EN ISO 7730 (2006) DIN EN ISO 7730:2006 Ergonomie Der Thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung Und Interpretation Der Thermischen Behaglichkeit Durch Berechnung Des PMV- Und Des PPD-Indexes Und Kriterien Der Lokalen Thermischen Behaglichkeit - Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005. DIN Deutsches Institut für Normung.

Drasgow F. (2006) Polychoric and Polyserial Correlations. In: John Wiley & Sons I (Hrsg.), *Encyclopedia of Statistical Sciences*. 1-6.

Duden. (2008) Duden - Deutsches Universalwörterbuch. (Hrsg.). Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, Mannheim, Germany. http://www.duden-suche.de/ (17.9.2008).

Eberl M. (2004) Formative Und Reflektive Indikatoren Im Forschungsprozess: Entscheidungsregeln Und Die Dominanz Des Reflektiven Modells.

Fang L, Clausen G und Fanger PO. (1998a) Impact of Temperature and Humidity on Perception of Indoor Air Quality During Immediate and Longer Whole-Body Exposures. *Indoor Air Copenhagen International Journal*, **8** (4), 276-284.

Fang L, Clausen G und Fanger PO. (1998b) Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality. *Indoor Air*, **8** (2), 80-90.

Fanger PO. (1970) *Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark.

Fanger PO. (1988) Introduction of the Olf and the Dipol Units to Quantify Air Pollution Perceived by Humans Indoors and Outdoors. *Energy and Buildings*, **12**, 1-6.

Fanger PO, Breum NO und Jerking E. (1977) Can Colour and Noise Influence Man's Thermal Comfort? *Ergonomics*, **20** (1), 11-18.

Fanger PO, Ipsen BM, Langkilde G, Olessen BW, Christensen NK und Tanabe S. (1985) Comfort Limits for Asymmetric Thermal Radiation. *Energy and Buildings*, **8** (3), 225-236.

Fanger PO, Melikov AK, Hanzawa H und Ring J. (1988) Air Turbulence and Sensation of Draught. *Energy and Buildings*, **12**, 21-39.

Fanger PO. (2006) What Is IAQ? *Indoor Air*, **16** (5), 328-334.

Fastl H. (2004) Audio-Visual Interactions in Loudness Evaluation. In: International Commission on Acoustics (Hrsg.) *Proceedings of ICA 2004*. 18. International Congress on Acoustics - Acoustic Science and Technology for Quality of Life, 4.Apr.2004, Kyoto, Japan. **2**, 1161-1166.

Fastl H und Zwicker E. (2007) *Psychoacoustics: Facts and Models*, 3. Auflage. In: Huang TS, Kohonen T und Schroeder MR (Hrsg.) *Springer Series in Information Sciences*. Springer, Berlin, Germany.

Federal Aviation Administration. (1996) Federal Aviation Regulations.

Fiala D. (1998) Dynamische Simulation Der Wärmetransportvorgänge Beim Menschen Und Der Thermischen Behaglichkeit. Dissertation, De Montfort University Leicester

Fletcher H und Munson WA. (1933) Loudness, Its Definition, Measurement and Calculation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **5** (2), 82-108.

Gagge AP. (1940) Standard Operative Temperature, Generalized Temperature Scale Applicable to Direct and Partitional Calometry. *American Journal of Physiology*, **131** (1), 93-103.

Gagge AP, Fobelets AP und Berglund LG. (1986) A Standard Predicitive Index of Human Response to the Thermal Environment. *PO*, **14** (1), 709-731.

Gagge AP, Stolwijk JAJ und Nishi Y. (1971) An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response. *ASHRAE Transactions*, **77**, 247-262.

Goldstein EB. (2002) *Wahrnehmungspsychologie*, 2. Auflage, Ritter M (Hrsg.). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Germany.

Goontilleke RS. (1998) Designing to Minimize Discomfort. *Ergonomics in Design*, **6** (3), 12-19.

Grether WF, Harris CS, Mohr GC, Nixon CW, Ohlbaum M, Sommer HC, Thaler VH und Veghte JH. (1971) Effects of Combined Heat, Noise and Vibrations Stress on Human Performance and Physiological Functions. *Aerospace Medicine*, **42** (10), 1092-1097.

Grether WF, Harris CS, Ohlbaum M, Sampson PA und Guignard JC. (1972) Furhter Study of Combined Heat, Noise and Vibration Stress. *Aerospace Medicine*, **43** (6), 641-645.

Grün G, Holm AH, Luks N, Malone-Lee J, Trimmel M, Schreiber R, Mellert V, Kos J und Hofbauer W. (2008) Impact of Cabin Pressure on Aspects of the Well-Being of Aircraft Passengers - A Laboratory Study. In: Grant I (Hrsg.) *Proceedings of ICAS 2008*. 26th Congress of the International Council of the Aeronautical Science, 14.Sep.2008, Anchorage, Alaska, USA. **402**.

Gundlach C. (2004) Entwicklung Eines Ganzheitlichen Vorgehensmodells Zur Problemrientierten Anwendung Der Statistischen Versuchsplanung. Dissertation, Universität Kassel, Kassel, Germany.

Haghighat F, Allard F, Megri AC, Blondeau P und Shimotakahara R. (1999) Measurement of Thermal Comfort and Indoor Air Quality Aboard 43 Flights on Commercial Airlines. *Indoor and Built Environment*, **8** (1), 58-66.

Hancock PA und Pierce JO. (1985) Combined Effects of Heat and Noise on Human Performance: A Review. *American Industrial Hygiene Association Journal*, **46** (10), 555-566.

Hellwig RT, Brasche S und Bischof W. (2006) Thermal Comfort in Offices. Natural Ventilation Vs. Air-Conditioning. In: Nicol F (Hrsg.) *Proceedings of Windsor 2006 Conference: Comfort and Energy Use in Buildings - Getting Them Right*. Windsor 2006 Conference: Comfort and Energy Use in Buildings - Getting Them Righ, 27.Apr.2006, Windsor, UK, London, UK, 11.

Hinkelbein J und Dambier M. (2007) *Flugmedizin Und Flugpsychologie Für Die Privatpilotenausbildung*. Lulu.com.

Hopkins KD und Weeks DL. (1990) Tests for Normality and Measures of Skewness and Kurtosis: Their Place in Research Reporting. *Educational and Psychological Measurement*, **50** (4), 717-729.

Huizenga C, Hui Z, Duan T und Arens E. (1999) An Improved Multinode Model of Human Physiology and Thermal Comfort. In: International Building Performance Simulation Association (Hrsg.). IBPSA Conference - Building Simulation 1999, Kyoto, 13.Sep.1999.

Humphreys MA und Nicol JF. (1998) Understanding the Adaptive Approach to Thermal Comfort. *ASHRAE Transactions*, **104** (1), 991-1004.

ISO 2631-1 (1997) ISO 2631-1:1997 Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. Teil 1: General Requirements. ISO International Standard Organization, Geneva, Switzerland.

ISO 226 (2003) ISO 226:2003 Acoustics - Normal Equal-Loudness-Level Contours. ISO International Standard Organization, Geneva, Swizerland.

ISO 14505-2 (2004) ISO 14505-2:2004 Ergonomics of the Thermal Environment - Evaluation of Thermal Environment in Vehicles. Teil 2: Determination of Equivalent Temperature. ISO International Standard Organization, Geneva, Switzerland.

ISO 2631-5 (2004) ISO 2631-5:2004 Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration. Teil 5: Method for Evaluation of Vibration Containing Multiple Shocks. ISO International Standard Organization, Geneva, Switzerland.

Jokl MV. (2000) Evaluation of Indoor Air Quality Using the Decibel Concept Based on Carbon Dioxide and TVOC. *Building and Environment*, **35** (8), 677-697.

Jöreskog KG. (1990) New Developments in LISREL: Analysis of Ordinal Variables Using Polychoric Correlations and Weighted Least Squares. *Quality & Quantity*, **24**, 387-404.

Jöreskog KG. (1994) On the Estimation of Polychoric Correlations and Their Asymptotic Covariance Matrix. *Psychometrika*, **59** (3), 381-389.

Jöreskog KG. (1998) Interaction and Nonlinear Modeling: Issues and Approaches. In: Schumacker RE und Marcoulides GA (Hrsg.), *Interaction and Nonlinear Effects in Structural Equation Modeling*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA. 239-250.

Jöreskog KG und Sörbom D. (1993) *LISREL 8: Structural Equation Modeling With the SIMPLIS Command Language*, 5. Auflage, Stam L und Bock DR (Hrsg.). Scientific Software International, Inc., Lincolnwood, IL, USA.

Jöreskog KG und Sörbom D. (2001) *LISREL 8: User's Reference Guide*, 2. Auflage, Stam L (Hrsg.). Scientific Software International, Inc., Lincolnwood, IL, USA.

Jöreskog KG und Yang F. (1996) Nonlinear Structural Equation Models: The Kenny-Judd Model With Interaction Effects. In: Marcoulides GA und Schumacker RE (Hrsg.), *Advanced Structural Equation Modeling: Issues and Techniques*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA. 57-88.

Kaiser HF. (1960) The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educational and Psychological Measurement*, **20** (1), 141-151.

Kauer S. (2003) Entwicklung Einer Multimedia-Lehranwendung Zur Psychoakustik: Auditive Wahrnehmung Und Die Rolle Kritischer Bandbreiten: Dokumentation Des Stands Der Wissenschaft, Implementierung Der Lehreinheit. Magisterarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany.

Kenny DA. (1987) *Statistics for the Social and Behavioral Scienses*. Little, Brown and Company, Canada.

Kenny DA. (2004) *Correlation and Causality*.

Kenny DA und Judd CM. (1984) Estimating the Nonlinear and Interactive Effects of Latent Variables. *Psychological Bulletin*, **96** (1), 201-210.

Kish L. (1965) *Survey Sampling*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

Kolcaba KY. (1991) A Taxanomic Structure for the Concept Comfort. *Journal of Nursing Scholarship*, **23** (4), 237-240.

Kolcaba KY. (1992) Holistic Comfort: Operationalizing the Construct As a Nurse-Sensitive Outcome. *Advances in Nursing Science*, **15** (1), 1-10.

Kolcaba KY. (1994) A Theory of Holistic Comfort for Nursing. *Journal of Advanced Nursing*, **19**, 1178-1184.

Kolcaba KY und Kolcaba RJ. (1991) An Analysis of the Concept of Comfort. *Journal of Advanced Nursing*, **16** (11), 1301-1310.

Konieczny G. (2001) Die Messung Und Steigerung Der Qualität Von Dienstleistungen in Der Flugzeugkabine - Ein Beitrag Zur Kundenorientierten Flugzeugentwicklung. Dissertation, Technische Universität Berlin

Kryter KD. (1959) Scaling Human Reactions to the Sound From Aircraft. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **31** (11), 1415-1429.

Kuijt-Evers LFM, Groenesteijn L, de Looze MP und Vink P. (2004) Identifying Factors of Comfort in Using Hand Tools. *Applied Ergonomics*, **35** (5), 453-458.

Langer W. (2002) Neuere Entwicklungen Bei Den Fitindizes Für LISREL-Modele

Laurentin C, Berrutto V und Fontoynont M. (2000) Effect of Thermal Conditions and Light Source Type on Visual Comfort Appraisal. *Lighting Research and Technology*, **32** (4), 223-233.

Lee SC, Poon CS, Li D, Luk F und Chang M. (2000a) Questionnaire Survey to Evaluate the Health and Comfort of Cabin Crew. In: Nagda NL (Hrsg.) *Air Quality and Comfort in Airliner Cabins*. Symposium on Air Quality and Comfort in Airliner Cabins, 27.Oct.1999a, New Orleans, LA, USA. American Society for Testing and Materials (ASTM), Conshohocken, PA, USA, 259-266.

Lee S-C, Lam S und Luk F. (2000b) Invesitgation of Cabin Air Quality in Commercial Aircrafts. In: Seppänen O (Hrsg.) *Proceedings of Healthy Buildings 2000*. Healthy Buildings 2000, 6.Aug.2000b, Espoo, Finland. **1**, 471-475.

Lee S-Y. (2007) *Structural Equation Modeling: A Bayesian Approach*. In: Shewhart WA und Wilks SS (Hrsg.) *Wiley Series in Probability and Statistics*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK.

Lindgren T. (2003) Cabin Air Quality in Commercial Aircraft: Exposure, Symptoms and Signs, Acta Universitatis Uppsaliensis

Lindgren T und Norback D. (2005) Health and Perception of Cabin Air Quality Among Swedish Commercial Airline Crew. *Indoor Air*, **15** (s10), 65-72.

Lindgren T, Norback D, Andersson K und Dammstrom BG. (2000) Cabin Environment and Perception of Cabin Air Quality Among Commercial Aircrew. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, **71** (8), 774-782.

Lindgren T, Norback D und Wieslander G. (2007) Perception of Cabin Air Quality in Airline Crew Related to Air Humidification, on Intercontinental Flights. *Indoor Air*, **17** (3), 204-210.

Maeda S. (2005) Necessary Research for Standardization of Subjective Scaling of Whole-Body Vibration. *Industrial Health*, **43**, 390-401.

Maeda S, Mansfield NJ und Shibata N. (2008) Evaluation of Subjective Responses to Whole-Body Vibration Exposure: Effect of Frequency Content. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **38** (5-6), 509-515.

Mair S, Witek W, Dahn U, Mayer F und Breuer K. (2006) Zur Präzision Humanolfaktometrischer Messungen. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, **66** (3), 94-98.

Marsh HW, Balla JR und Hau K-T. (1996) An Evaluation of Invremental Fit Indices: A Clarification of Mathematical and Empirical Properties. In: Marcoulides GA und Schumacker RE (Hrsg.), *Advanced Structural Equation Modeling: Issues and Techniques*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA. 315-353.

Mayer E. (1997) A New Correlation Between Predicted Mean Votes and (PMV) and Predicted Percentages of Dissatisfied (PPD). In: Fraunhofer Institut für Bauphysik I (Hrsg.) *Proceedings of the Healthy Buildings/IAQ '97*. Healthy Buildings / IAQ '97 - Global Issues and Regional Solutions, 27.Sep.1997, Washington, DC, USA, 189-194.

Mayer E, Grün G, Hellwig RT und Holm AH. (2007) The New Pressurised Fraunhofer Flight Test Facility Offered To The Scientific Cabin Environment Network. CEAS European Air and Space Conference, 10.Sep.2007, Berlin, Germany, 889-893.

Mellert V, Baumann I, Freese N und Weber R. (2004) Investigation of Noise and Vibration Impact on Aircraft Crew, Studied in an Aircraft Simulator. Inter Noise 2004, 22.Aug.2004, Prague, Czech Republic.

Mellert V, Baumann I, Freese N und Weber R. (2008) Impact of Sound and Vibration on Health, Travel Comfort and Performance of Flight Attendants and Pilots. *Aerospace Science and Technology*, **12** (1), 18-25.

Menzel D. (2007) Psychoakustische Untersuchungen Zum Einfluss Der Farbe Auf Die Lautheit Von Sportwagen. In: Leistner P und Mehra S-R (Hrsg.)

Tagungsband Fortschritte Der Akustik - DAGA 2007. 33. Deutsche Jahrestagung Für Akustik, 19.Mar.2997, Stuttgart, Germany. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, Germany, 855-856.

Menzel D, Faccinelli E und Fastl H. (2008) Untersuchung Von Farbeinflüssen Auf Die Lautheit Mit Einem Einregelverfahren. In: Jekosch U und Hoffmann R (Hrsg.) *Tagungsband Fortschritte Der Akustik - DAGA 2008*. 34. Jahrestagung Für Akustik, 10.Mar.2008, Dresden, Germany, 383-384.

Merriam-Webster Online Dictionary. (2005) Merriam-Webster Online Dictionary. (Hrsg.). Merriam-Webster Inc., Springfield, MA, USA. http://www.merriam-webster.com/ (17.9.2008).

Meyers Lexikon. (2008) Meyers Lexikon Online. (Hrsg.). Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus, Mannheim, Germany. http://lexikon.meyers.de (17.9.2008).

Miwa T. (1968) Evaluation Methods for Vibration Effect: Part 5. Calculation Method of Vibration Greatness Level on Compound Vibrations. *Industrial Health*, **6**, 11-17.

Mui KW und Wong LT. (2006) A Method of Assessing the Acceptability of Noise Levels in Air-Conditioned Offices. *Building Service Engineering*, **27** (3), 249-254.

Müller D, Bitter F und Böttcher O. (2004) Neue Systematik Zur Bewertung Der Empfundenen Luftqualität. *HLH*, **55** (12), 52-57.

Nagano K und Horikoshi T. (2005) New Comfort Index During Combined Conditions of Moderate Low Ambient Temperature and Traffic Noise. *Energy and Buildings*, **37** (3), 287-294.

Nagda NL und Hodgson M. (2001) Low Relative Humidity and Aircraft Cabin Air Quality. *Indoor Air*, **11** (3), 200-214.

Nagda NL und Rector HE. (2003) A Critical Review of Reported Air Concentrations of Organic Compounds in Aircraft Cabins. *Indoor Air*, **13** (3), 292-301.

Nagda NL. (2000) Air Quality and Comfort in Airliner Cabins. Symposium on Air Quality and Comfort in Airliner Cabins, New Orleans, LA, USA, 27.Oct.1999. American Society for Testing and Materials (ASTM), Conshohocken, PA, USA.

Nagda NL, Rector HE, Li Z und Space DR. (2000) Aircraft Cabin Air Quality: A Critical Review of Past Monitoring Studies. In: Nagda NL (Hrsg.) *Air Quality and Comfort in Airliner Cabins*. Symposium on Air Quality and Comfort in Airliner Cabins, 27.Oct.1999, New Orleans, LA, USA. American Society for Testing and Materials (ASTM), Conshohocken, PA, USA, 215-235.

National Research Council. (1986) *The Airliner Cabin Environment*, Chalmers TC (Hrsg.). National Academy Press, Washington, DC, USA.

National Research Council. (2002) *The Airliner Cabin Environment and the Health of Passengers and Crew*, Lippmann M (Hrsg.). National Academy Press, Washington, DC, USA.

Newman JS und Beattie, KR. (1985) FAA-EE-85-2: Aviation Noise Effects, Federal Aviation Administration (Hrsg.). Federal Aviation Administration, Office of Environment and Energy, Washington, DC, USA.

Nilsson HO und Holmer, I. (2002) 1: Definitions and Measurements of Equivalent Temperature. In: Norén O, *EQUIV Report*

Nilsson HO. (2004) Comfort Climate Evaluation With Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models.

Nomoto S, Shibata M, Iriki M und Riedel W. (2004) Role of Afferent Pathways of Heat and Cold in Body Temperature Regulation. *International Journal of Biometeorology*, **49**, 67-85.

Oborne DJ. (1978) Passenger Comfort - An Overview. *Applied Ergonomics*, **9** (3), 131-136.

Ohloff G. (1990) *Riechstoffe Und Geruchssinn: Die Molekulare Welt Der Düfte*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.

Olesen BW, Scholer M und Fanger PO. (1979) Vertical Air Temperature Differences and Comfort. In: Fanger PO und Valbjorn O (Hrsg.), *Indoor Climate*. Danish Building Research Institute, Copenhagen, Denmark. 561-579.

Olesen BW. (1977) Thermal Comfort Requirements for Floors. In: Institute for International Research I (Hrsg.). Meeting of Commissions B1, B1, E1 of the IIR, 1977, Belgrade, 307-313.

Olsson U. (1979) Maximum Likelihood Estimation of the Polychoric Correlation Coefficient. *Psychometrika*, **44** (4), 443-460.

Oxford wordpower dictionary. (1994) *Oxford Wordpower Dictionary*, 5. Auflage, Wehmeier S (Hrsg.). Oxford University Press, Oxford, UK.

Parsons KC. (2003) *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort and Performance*, 2. Auflage. Taylor & Francis, London, UK.

Pellerin N und Candas V. (2004) Effects of Steady-State Noise and Temperature Conditions on Environmental Perception and Acceptability. *Indoor Air*, **14** (2), 129-136.

Pierce MW, Janczewski NJ, Roethlisberger B und Janczewski GM. (1999) Air Quality on Commercial Aircraft. *ASHRAE Journal*, **41** (9), 26-32.

Pineau C. (1982) The Psychological Meaning of Comfort. *International Review of Applied Psychology*, **31**, 271-283.

Quehl J. (2001) Comfort Studies on Aircraft Interior Sound and Vibration. Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Rankin WL, Space DR und Nagda NL. (2000) Passenger Comfort and the Effect of Air Quality. In: Nagda NL (Hrsg.) *Air Quality and Comfort in Airliner Cabins*. Symposium on Air Quality and Comfort in Airliner Cabins,

27.Oct.1999, New Orleans, LA, USA. American Society for Testing and Materials (ASTM), Conshohocken, PA, USA, 269-289.

Recknagel H, Sprenger E und Schramek E-R. (2007) *Taschenbuch Für Heizung-Und Klimatechnik 2007/08*, 73. Auflage. Oldenbourg Industrieverlag, München, Germany.

Richards LG. (1980) On the Psychology of Passenger Comfort. In: Oborne DJ und Levis JA (Hrsg.), *Human Factors in Transport Research, Volume 2: User Factors: The Environment and Behavior*. Academic Press Inc. (London) Ltd., London, UK. 15-23.

Roget's II Thesaurus. (1995) Roget's II: The New Thesaurus. Pickett JP und et al. (Hrsg.). 3. Ausgabe, Houghton Mifflin Company, Boston, MA, USA. www.bartleby.com/62/ (17.9.2008).

Rohles FH und Nevins RG. (1971) The Nature of Thermal Comfort for Sedentary Man. *ASHRAE Transactions*, **77** (1), 239-246.

Rönsch HD. (1994) Operationalisierung. In: Fuchs-Heinritz W, Lautmann R, Rammstedt O und Wienold H (Hrsg.), *Lexikon Zur Soziologie*. Westdeutscher Verlag, Opladen, Germany. 476.

Rueckwald R. (2006) Improving Passenger Services. Aeronautics Days 2006, Vienna, Austria.

SAE AIR 512 (2007) SAE AIR 512:2007 Aircraft Cabin Illumination. SAE Aerospace.

Schmidt RF, Lang F und Thews G. (2005) *Physiologie Des Menschen Mit Pathophysiologie*, 29. Auflage. In: *Springer-Lehrbuch*. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, Germany.

Schultz TJ. (1968) Noise-Criterion Curves for Use With the USASI Preferred Frequencies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **43** (3), 637-638.

Sekhar SC, Tham KW und Cheong KW. (2003) Indoor Air Quality and Energy Performance of Air-Conditioned Office Buildings in Singapore. *Indoor Air*, **13** (4), 315-331.

Sekhar SC, Tham KW, Cheong KW und Wong NH. (2000) A Study of Indoor Polutant Standard Index (IPSI) and Building Symptom Index (BSI). *Proceedings of Healthy Building*, **1**, 145-151.

Shapiro SS und Wilk MB. (1965) An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, **52** (3-4), 591-611.

Sheskin DJ. (2007) *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures*, 4. Auflage. Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, USA.

Shi MH und Tao AR. (1996) Investigation of the Comfort Evaluation Index CPD of Indoor Environments. In: *Proceedings of Indoor Air '96*. International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 21.Jul.1996, Nagoya, Japan. **1**, 423-428.

Siegel S und Castellan NJ, Jr. (1988) *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*, 2. Auflage. McGraw-Hill, Inc., New York, USA.

Slater K. (1985) *Human Comfort*. Charles C. Thomas Publisher, Ltd., Springfield, IL, USA.

Smith CE. (1991) A Transient, Three-Dimensional Model of the Human Thermal System. PhD Thesis, Kansas State University, Manhattan, KS, USA.

Sofuoglu SC und Moschandreas DJ. (2003) The Link Between Symptoms of Office Building Occupants and in-Office Air Pollution: the Indoor Air Pollution Index. *Indoor Air*, **13** (4), 332-343.

Spicer CW, Murphy, MJ, Holdren, MW, Myers, JD, MacGregor, IC, Holloman, C, James, RR, Tucker, K und Zaborski, R. (2004) Part I: Relate Air Quality and Other Factors To Comfort and Health Symptoms Reported By Passengers and Crew on Commercial Transport Aircraft. In: Battelle Science and Technology International A, *ASHRAE Project 1262-TRP*

Stolwijk JAJ und Hardy JD. (1966) Temperature Regulation in Man - A Theoretical Study. *Pflügers Archiv European Journal of Physiology*, **291** (2), 129-162.

Strom-Tejsen P, Wyon DP, Lagercrantz LP und Fang L. (2006) Passenger Evaluation of the Optimum Balance Between Fresh Air Supply and Humidity From 7-h Exposures in Simulated Aircraft Cabin. *Indoor Air*, **17** (2), 92-108.

Student. (1908) The Probable Error of a Mean. *Biometrika*, **6** (1), 1-25.

Sunwoo Y, Chou C, Takeshita J, Murakami M und Tochihara Y. (2006) Physiological and Subjective Responses to Low Relative Humidity. *Journal of Physiological Anthropology*, **25** (1), 7-14.

Tan HZ. (1996) Information Transmission With a Multi-Finger Tactual Display. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.

Tanabe S, Stuzuki T, Kimuar K und Horikawa S. (1995) Numerical Simulation Model of Thermal Regulation of Man With 16 Body Parts of Evaluating Thermal Environment. Part 1: Heat Transfer at Skin Surface and Comparison With SET* and Stolwijk Model. In: Architectural Institute of Japan (Hrsg.) *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*. Aug.1995.

Trimmel M, Goger C, Groll-Knapp E, Mellert V, Baumann I, Freese N, Weber R, Bellmann M, Remmers H, Grünewald M, Faulhaber P, Röder A, Seller J, Aizlewood C, Emms H, Hamilton L und Tsahalis D. (2005) Modelling the Impact of Environmental Conditions on Comfort, Task Load and Motivation in the Mock-Up and in Real Flights. In: *Proceedings of the 1st IC-EpsMsO*. 1st International Conference on Experiments, Process, System, Modelling, Simulation Optimization, 6.Jul.2005, Athens, Greece.

Tsutsumi H, Tanabe SI, Harigaya J, Iguchi Y und Nakamura G. (2007) Effect of Humidity on Human Comfort and Productivity After Step Changes From Warm and Humid Environment. *Building and Environment*, **42** (12), 4034-4042.

Tukey JW. (1977) *Exploratory Data Analysis*. In: Mosteller F (Hrsg.) *Addison-Wesley Series in Behavioral Science*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA, USA.

van Hoof J. (2008) Forty Years of Fanger's Model of Thermal Comfort: Comfort for All? *Indoor Air*, **18** (3), 182-201.

Vaughan G, Cambridge C, Dean L und Phillips AW. (2005) Water Vapour and and Ozone Profiles in the Midlatitude Upper Troposphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **5**, 963-971.

Vink P, de Looze MP und Kuijt-Evers LFM. (2004) Theory of Comfort. In: Vink P (Hrsg.), *Comfort and Design: Principles and Good Practice*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 13-32.

Vink P. (2004) *Comfort and Design: Principles and Good Practice*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Visual Thesaurus. (2008) Visual Thesaurus. (Hrsg.). Thinkmap, Inc., New York, NY, USA. http://www.visualthesaurus.com/ (17.9.2008).

Wahrig. (2006) Wahrig - Die Deutsche Rechtschreibung. (Hrsg.). Wissen Media Verlag GmbH, Gütersloh, Germany. http://www.wissen.de/wde/generator/wissen/ressorts/bildung/woerterbuecher/index.html (17.9.2008).

Webster JC. (1969) SIL - Past, Present and Future. *Sound and Vibration*, **3** (1), 22-26.

Wienold H. (1994) Theoretische Konstrukte. In: Fuchs-Heinritz W, Lautmann R, Rammstedt O und Wienold H (Hrsg.), *Lexikon Zur Soziologie*. Westdeutscher Verlag, Opladen, Germany. 363.

Witterseh T, Wargocki P, Fang L, Clausen G und Fanger PO. (1999) Effects of Exposure to Noise and Indoor Air Pollution on Human Perception and Symptoms. In: *Proceedings of Indoor Air '99*. 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 8.Aug.1999, Edinburgh, UK. Construction Research Communications Ltd., London, UK, 125-130.

Witterseh T, Wyon DP und Clausen G. (2002) The Effects of Moderate Heat Stress and Open-Plan Office Noise Distraction on Office Work. In: *Proceedings of Indoor Air 2002*. 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 30.Jun.2002, Monterey, CA, USA. The Printing House, Inc., Stoughton, WI, USA, 12-20.

Wong LT, Mui KW und Hui PS. (2008) A Multivariate-Logistic Model for Acceptance of Indoor Environmental Quality (IEQ) in Offices. *Building and Environment*, **43** (1), 1-6.

Wyon DP, Fang L, Meyer HW, Sundell J, Weirsøe CG, Sederberg-Olsen N, Tsutsumi H, Agner T und Fanger PO. (2002) Limiting Criteria for Human Exposure to Low Humidity Indoors. In: *Proceedings of Indoor Air 2002*. 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 30.Jun.2002, Monterey, CA, USA. The Printing House, Inc., Stoughton, WI, USA, 400-405.

Yaglou CP. (1927) Temperature, Humidity and Air Movement in Industries: The Effective Temperature Index. *Journal for Industrial Hygiene*, **9**, 297-309.

Yamazaki K, Nomoto S, Yokota Y und Murai T. (1998) The Effects of Temperature, Light, and Sound on Perceived Work Environment. *ASHRAE Transactions*, **104** (1), 711-720.

Yang Jonsson F. (1997) Non-Linear Structural Equation Models: Simulation Studies of the Kenny-Judd Model. Dissertation, Uppsala University. Almqvist & Wiksell International, Stockholm, Sweden.

Yang Jonsson F. (1998) Modeling Interaction and Nonlinear Effects: A Step-by-Step LISREL Example. In: Schumacker RE und Marcoulides GA (Hrsg.), *Interaction and Nonlinear Effects in Structural Equation Modeling*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA. 17-42.

Zarzo M und Stanton DT. (2006) Identification of Latent Variables in a Semantic Odor Profile Database Using Principal Component Analysis. *Chemical Senses*, **31** (8), 713-724.

Zhang H. (2003) Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments. Dissertation, University of California, Berkeley

Zhang L, Helander MG und Drury CG. (1996) Identifying Factor of Comfort and Discomfort in Sitting. *Human factors*, **38** (3), 377-389.

Zotterman Y. (1953) Special Senses: Thermal Receptors. *Annual Review of Physiology*, **15**, 357-372.

Zwicker E. (1961) Subdivision of the Audible Frequency Range into Critical Bands (Frequenzgruppen). *The Journal of the Acoustical Society of America*, **33** (2), 248-248.

Anhang A Fiktives erläuterndes Beispiel

Stand des Wissens

Zusammenhänge zwischen der Komfortbewertung von Aspekten der Luftqualität und des visuellen Raumklimas sind unbekannt (siehe Kapitel 3.3.4).

Hypothesen

Bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke wird die Luftqualität anders bewertet. Dies ändert sich auch mit der olfaktorischen Beanspruchung.

Es können gültige Messmodelle für die empfundene Luftqualität und den visuellen Diskomfort aufgestellt werden.

Versuchsdesign

Die Luftqualität wird durch emittierende Baustoffe in einem Prüfraum so eingestellt, dass sie von einem unabhängigen Probandenpanel in den drei Stufen 3 olf, 6 olf und 9 olf bewertet wird. Daneben wir die Beleuchtungsstärke bei einer typischen Bürobeleuchtung in den drei Stufen 300 lx, 600 lx und 900 lx geregelt. Da ausreichende Mittel zur Verfügung stehen wird ein vollfaktorielles Versuchsdesign gewählt, d.h. jede mögliche Kombination von Luftqualitätsstufe und Beleuchtungsstärke wird getestet. Jede Einstellung wird von einem Probandenpanel von je 35 Personen bewertet, nachdem sich diese eine Stunde in der jeweiligen Situation aufgehalten haben und weitestgehend Zufriedenheit mit der thermischen Situation herrscht. Die relative Feuchte wird auf 50 % kontrolliert, der Hintergrundschallpegel durch Lüftungsanlagen etc. kann nicht kontrolliert werden, beträgt aber konstant weniger 40 dB(A). Die Probanden füllen folgenden Fragebogen aus:

CvVent Momentan finde ich die Luft …

---	--	-	+
zu abgestanden			komfortabel

CvOdour Momentan finde ich die Gerüche …

---	--	-	+
lästig			komfortabel

CvContra Momentan finde ich den Farbkontrast …

---	--	-	+
zu gering			komfortabel

CvLight Momentan finde ich die Beleuchtung

---	--	-	+
zu dunkel			komfortabel

Versuch:

Vor dem Versuch wird die Luftqualität von einem unabhängigen Probandenpanel in olf bewertet, die Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur an den Plätzen der Probanden wird auf Tischhöhe erfasst und der Hintergrundschallpegel überprüft. Während der Tests werden Lufttemperatur und Luftfeuchte gemessen.

Analyse der Fragebögen und Messdaten

Die Daten werden von Ausreißern (z.B. über das Verfahren eines bewegten Medians im Falle der Temperaturen und Feuchten) bereinigt. Aus Lufttemperatur und -feuchte wird die Enthalpie bei üblichem Umgebungsdruck berechnet. Die Messdaten werden für den Befragungszeitraum zusammengefasst und in Form von Box-Whisker-Plots bei Verwendung von Mittelwerten, Standardfehler und -abweichung dargestellt, um einen Eindruck der erzielten Stufen gewinnen zu können. Die Fragebogendaten werden anhand eines Shapiro-Wilk-Tests auf Abstammung aus einer normalverteilten Grundgesamtheit getestet. Sämtliche Fragebogendaten sowie die Messdaten der Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur, Enthalpie und bewertete Luftqualität in olf werden für die Modellierung verwendet, wobei auf eventuelle Verletzung der Annahme normalverteilter Daten geachtet wird. Der Datensatz wird in zwei Teile geteilt, von denen der eine zur Modellfindung, der zweite für die Validierung verwendet wird.

Modellfindung

Es wird ein Strukturgleichungsmodell in MIMIC-Formulierung bei Berücksichtigungen von Interaktionen abgeleitet. Hierbei werden zwei latente Variablen des *visuellen Komforts*, operationalisiert durch *CvContra* und *CvLight*, und der *empfundenen Luftqualität*, mit den endogenen manifesten Variablen *CvVent* und *CvOdour*, verwendet. Diese werden durch die exogenen manifesten Variablen Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur bzw. bewertete Luftqualität und Enthalpie beeinflusst und stehen in Interrelation.

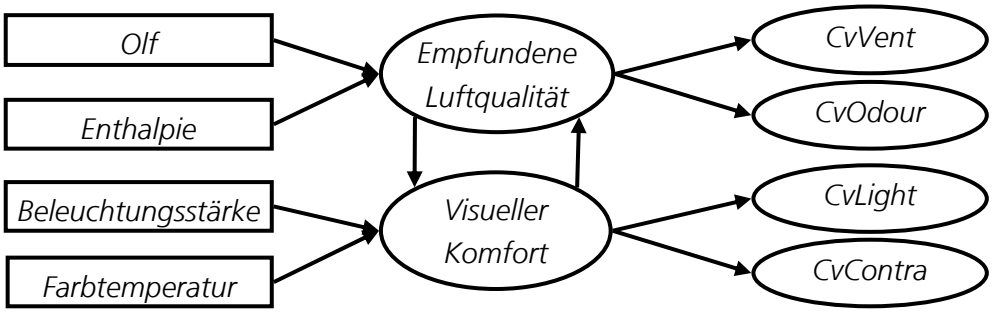


Abbildung A 1: Angenommenes MIMIC-Modell mit Interrelationen zwischen den latenten Variablen *empfundenen Luftqualität* und *visueller Komfort*.

Validierung

Anhand eines Mehrgruppenvergleichs wird das gefundene Modell für zwei Gruppen, bestehend aus dem Modellierungs- bzw. dem Validierungsdatensatz, überprüft.

Überprüfung von Teilmodellen

Es werden die Messmodelle als Teilmodelle betrachtet und anhand ihrer Anpassungsmaße beurteilt.

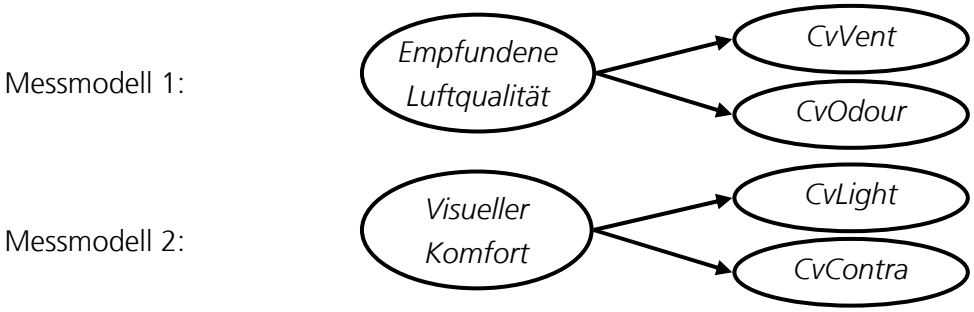


Abbildung A 2: Messmodelle für die *empfundenen Luftqualität* und den *visuellen Komfort* des angenommenen Strukturgleichungsmodells.

Eine separate Schätzung erfolgt für die Teilmodelle der empfundenen Luftqualität und des visuellen Komfort ohne Interrelationen mit einer anschließenden Bewertung anhand ihrer Goodness-of-Fit-Indizes.

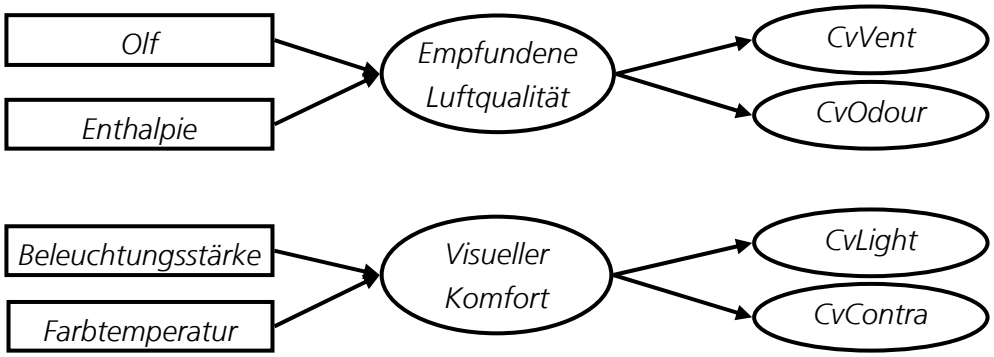


Abbildung A 3: Teilmodelle für die *empfundenen Luftqualität* und den *visuellen Komfort* ohne Interrelationen des angenommenen Gesamtmodells.

Bewertung

Bei Gültigkeit der Messmodelle und separaten MIMIC-Modelle wird das Gesamtmodell durch Vergleich der Fit-Indizes (z.B. *GFI*, *AGFI*, *RMR*) mit gängigen Richtwerten bewertet.

Parameterstudie

Es wird eine Parameterstudie über die latenten Variablen *empfundene Luftqualität* und *visueller Komfort* bei Variation der manifesten exogenen Variablen *Enthalpie*, *Olf*, *Beleuchtungsstärke* und *Farbtemperatur* durchgeführt. Die Ergebnisse werden auf Plausibilität überprüft und die Interrelationseffekte analysiert.

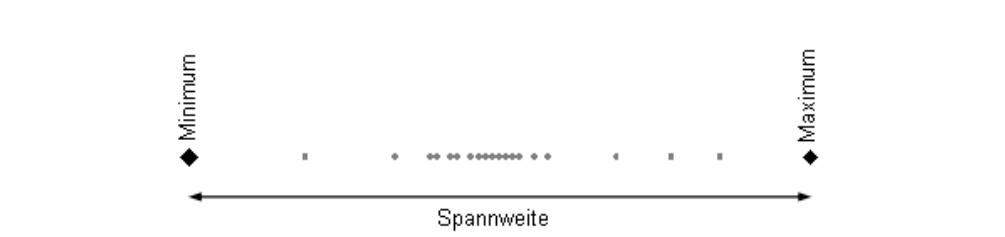
Schlussfolgerungen

Be Gültigkeit des Gesamtmodells können Schlussfolgerungen über die Modellierung der empfundenen Luftqualität und des visuellen Komforts sowie ihrer Interrelation gezogen werden.

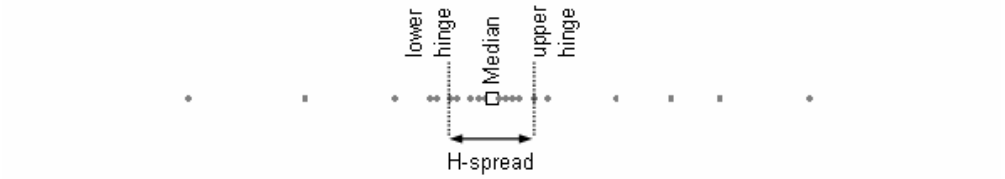
Anhang B Konstruktion von Box-Whisker-Plots

Box-Whisker-Plots werden häufig für eine zusammenfassende Darstellung von Daten verwendet. Sie liefern anschaulich Informationen über Schwerpunkt, Streuung und Verteilung der Daten. Im Folgenden werden die Begrifflichkeiten zur Beschreibung eines Datensatzes aufgezeigt, sowie die Vorgehensweise nach Tukey (1977) zur Erstellung eines Box-Whisker-Plots mit Ausreißern anhand eines Beispieldatensatzes dargestellt.

1. Die Spannweite der Daten wird durch das Minimum und Maximum begrenzt. Es gilt die Beziehung: Spannweite = Maximum – Minimum.

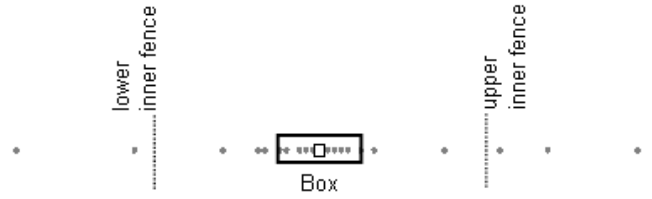


2. Der Wert, welcher kleiner gleich und größer gleich 50 % der Daten ist wird als Median bezeichnet. Tukey hat darüber hinaus untere und obere „hinges“ eingeführt, welche dem unteren und oberen Quartil entsprechen. Den Abstand zwischen diesen nennt er „H-spread“, auch Interquartilsabstand genannt.

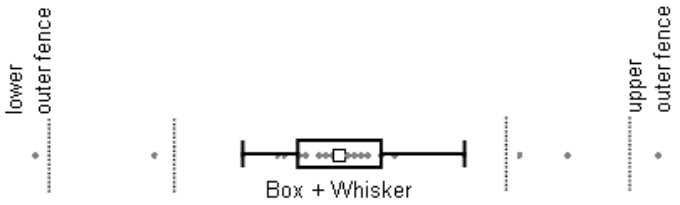


3. Mit der Definition der „hinges“ kann eine Box um die mittleren 50 % der Daten gezeichnet werden. Im Abstand des 1,5fachen von „H-spread“ defi-

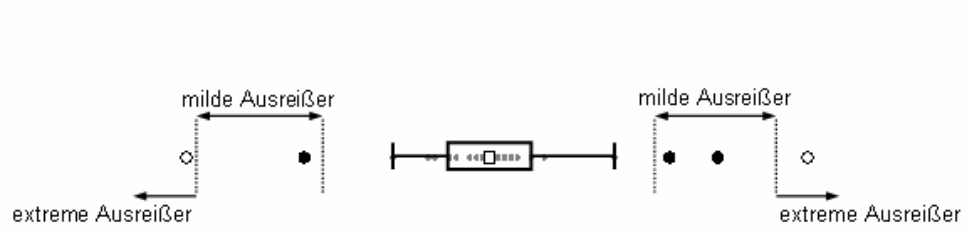
niert Tukey den unteren und oberen „inner fence“.



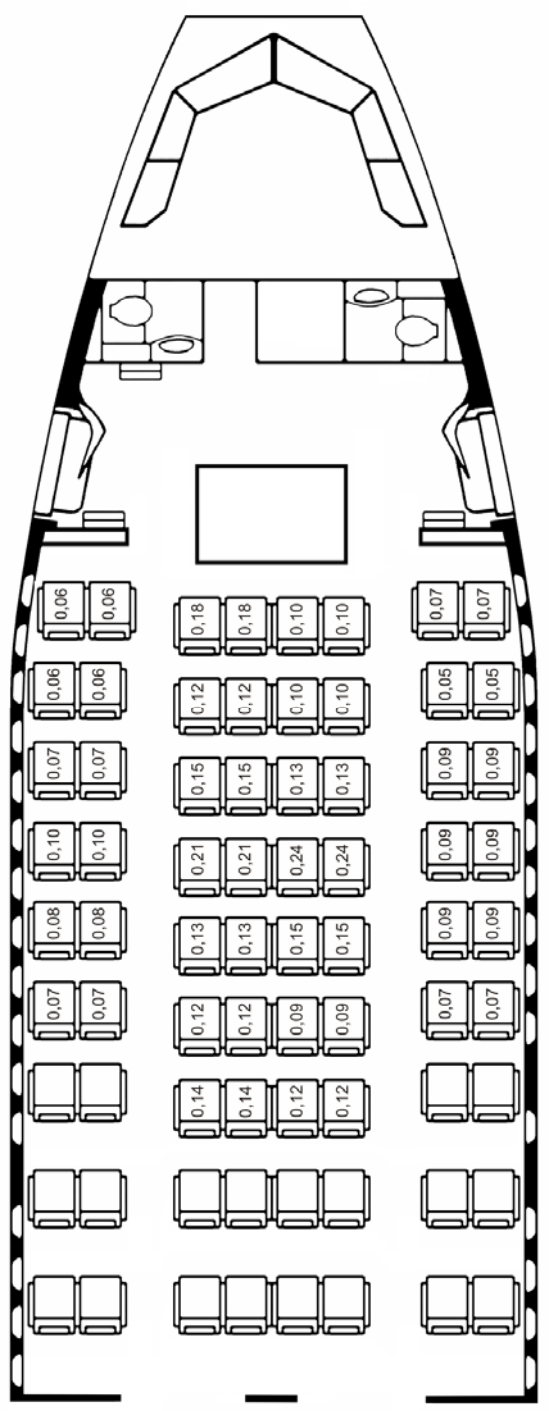
4. Die nächstliegenden Werte innerhalb der „inner fences“ werden durch Whisker markiert. Im Abstand des 3fachen von „H-spread“ definiert Tukey den unteren und oberen „outer fence“.



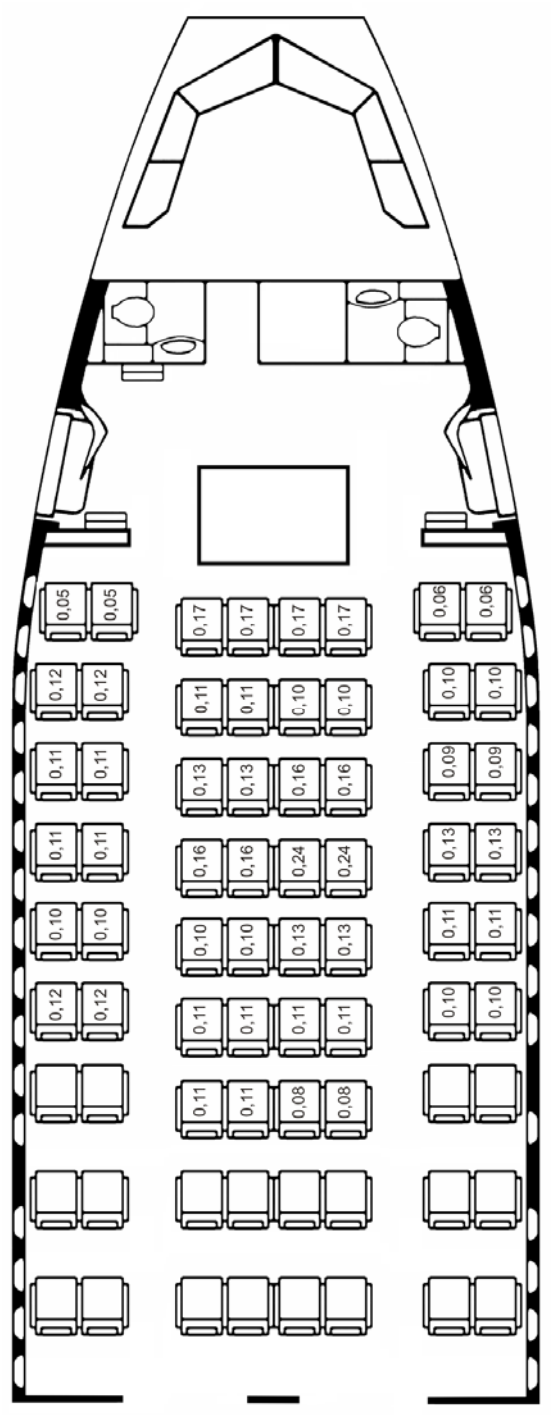
5. Die Werte außerhalb der „fences“ werden als Ausreißer bezeichnet: diejenigen zwischen „inner fence“ und „outer fence“ als milde, Werte außerhalb der „outer fences“ als extreme Ausreißer.



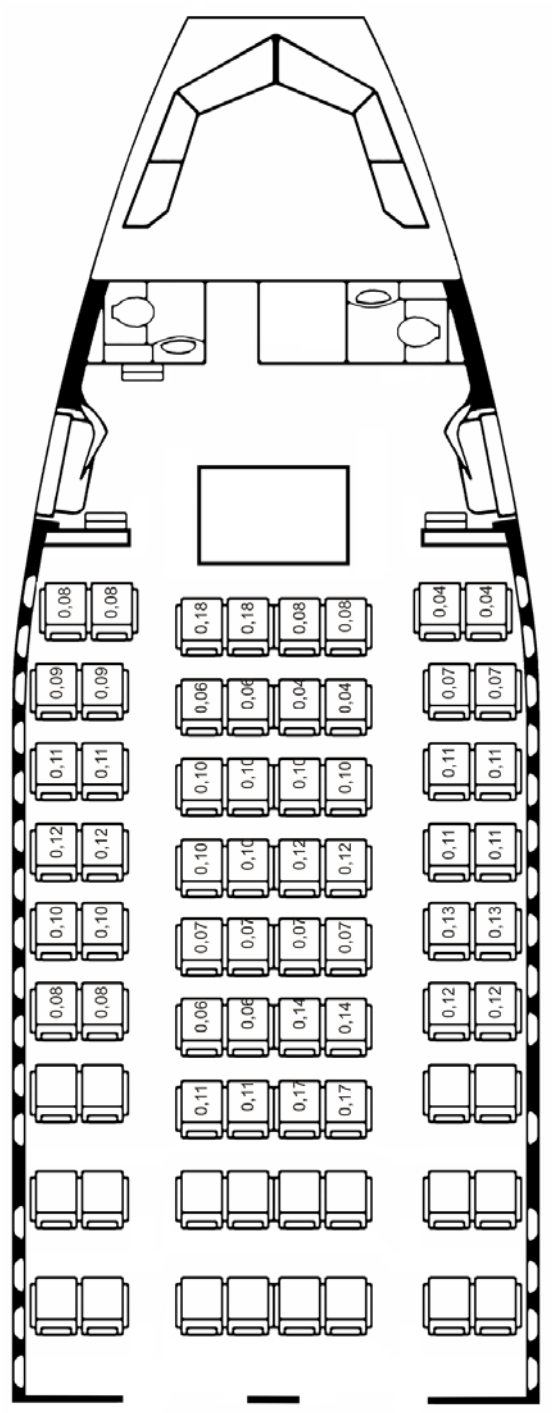
Anhang C Luftgeschwindigkeiten



Luftgeschwindigkeiten in m/s in der Versuchseinrichtung gemessen in 1,1 m Höhe.

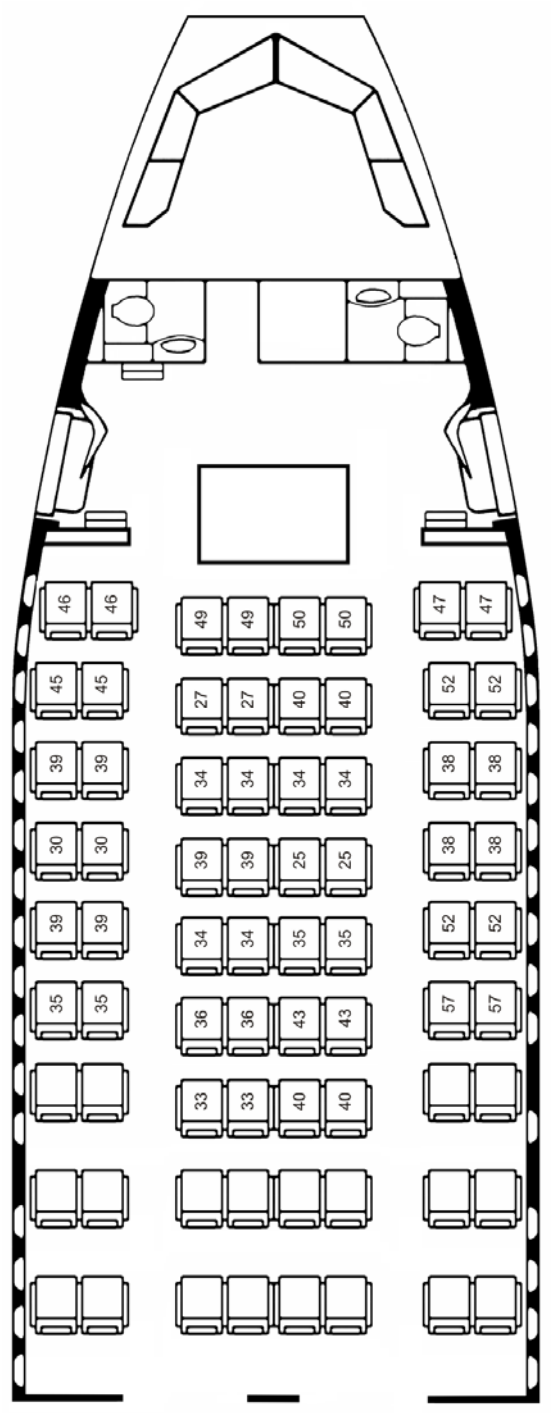


Luftgeschwindigkeiten in m/s in der Versuchseinrichtung gemessen in 0,6 m Höhe.

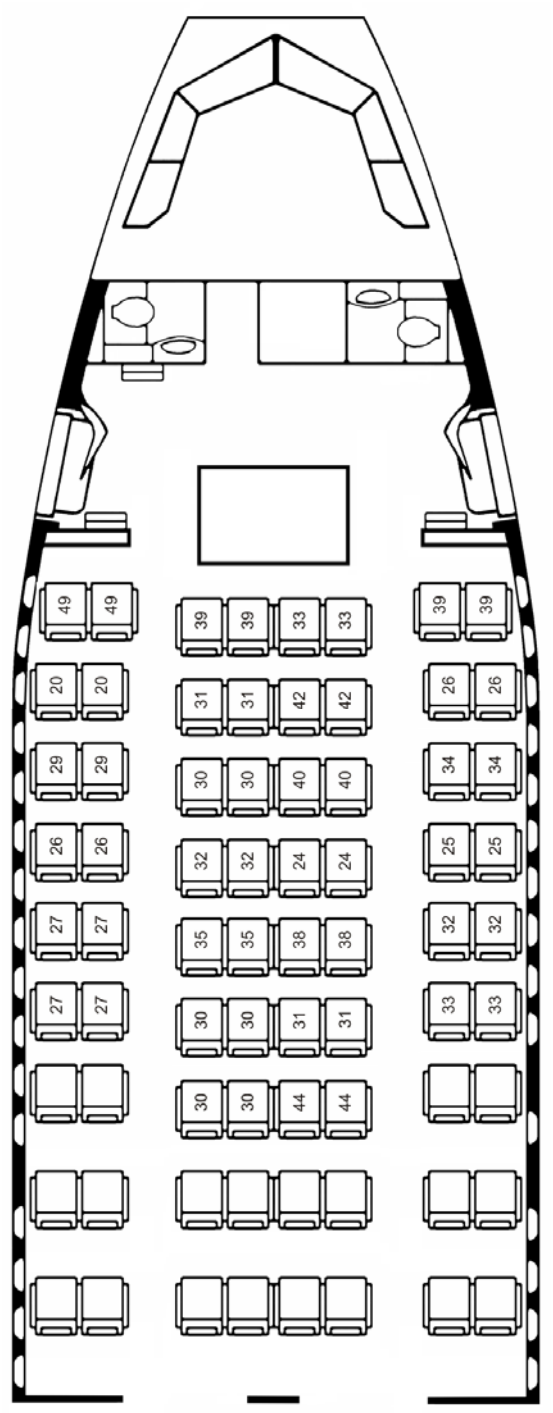


Luftgeschwindigkeiten in m/s in der Versuchseinrichtung gemessen in 0,1 m Höhe.

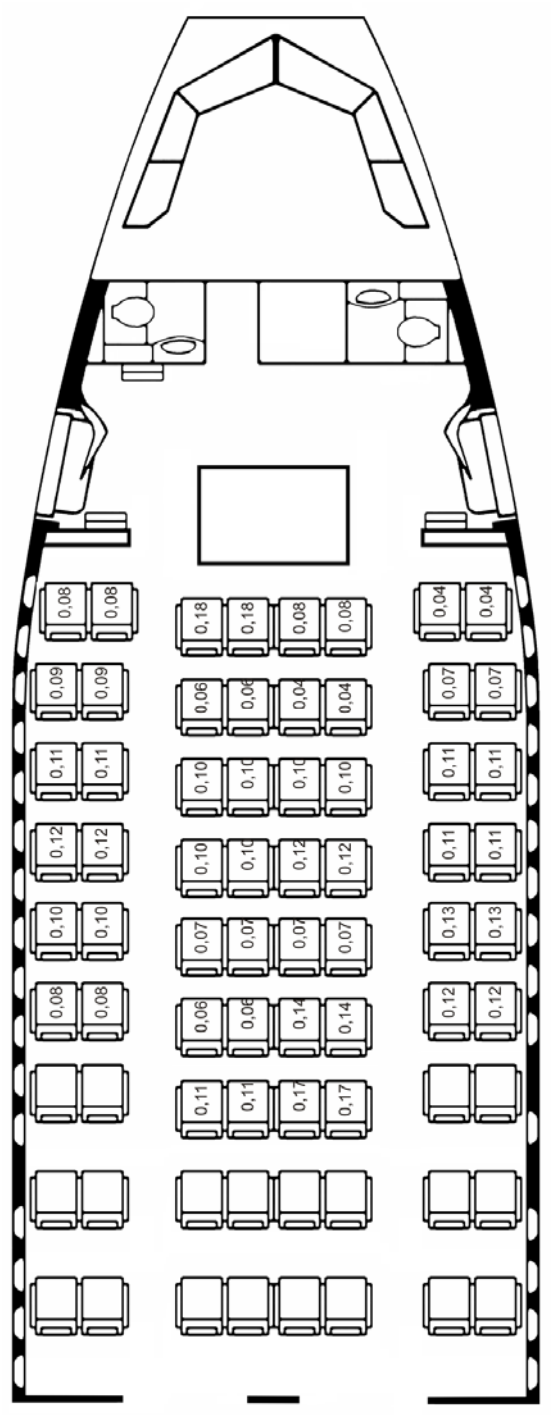
Anhang D Turbulenzgrade



Turbulenzgrad in % in der Versuchseinrichtung gemessen in 1,1 m Höhe.

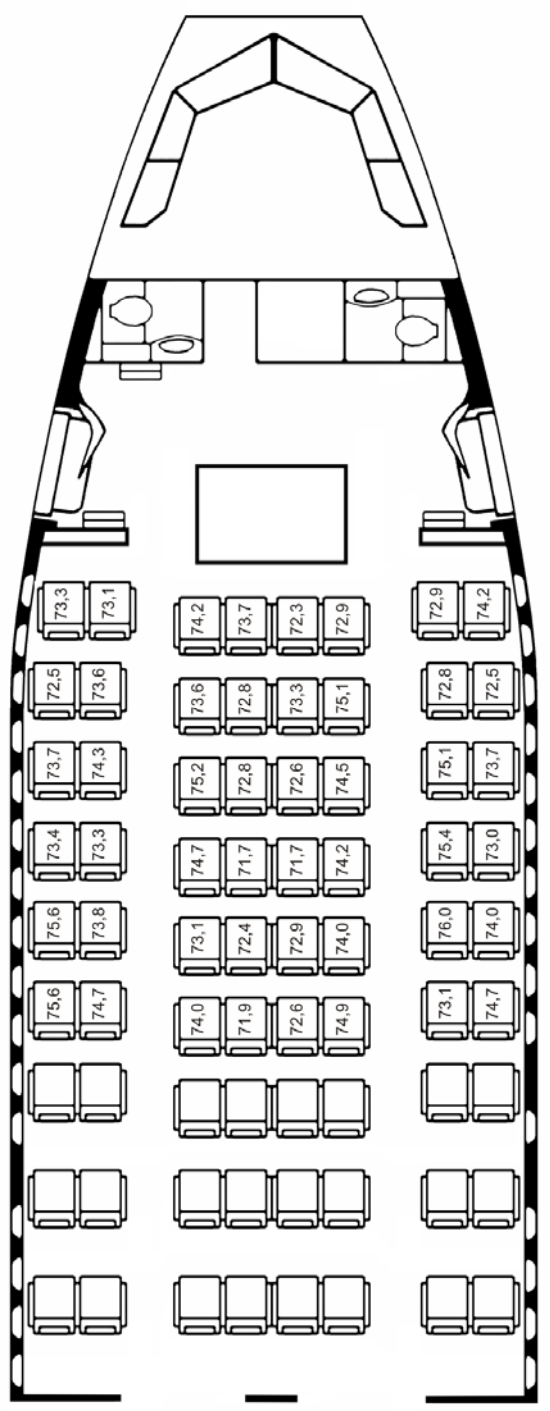


Turbulenzgrad in % in der Versuchseinrichtung gemessen in 0,6 m Höhe.



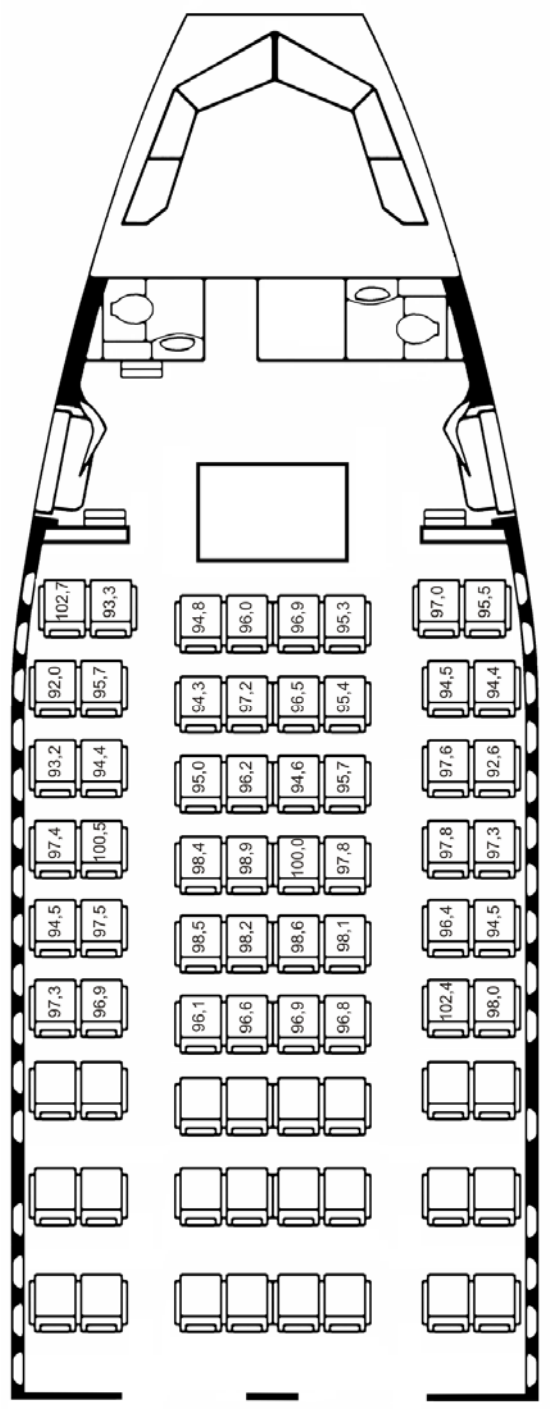
Turbulenzgrad in % in der Versuchseinrichtung gemessen in 0,1 m Höhe.

Anhang E Schalldruckpegel



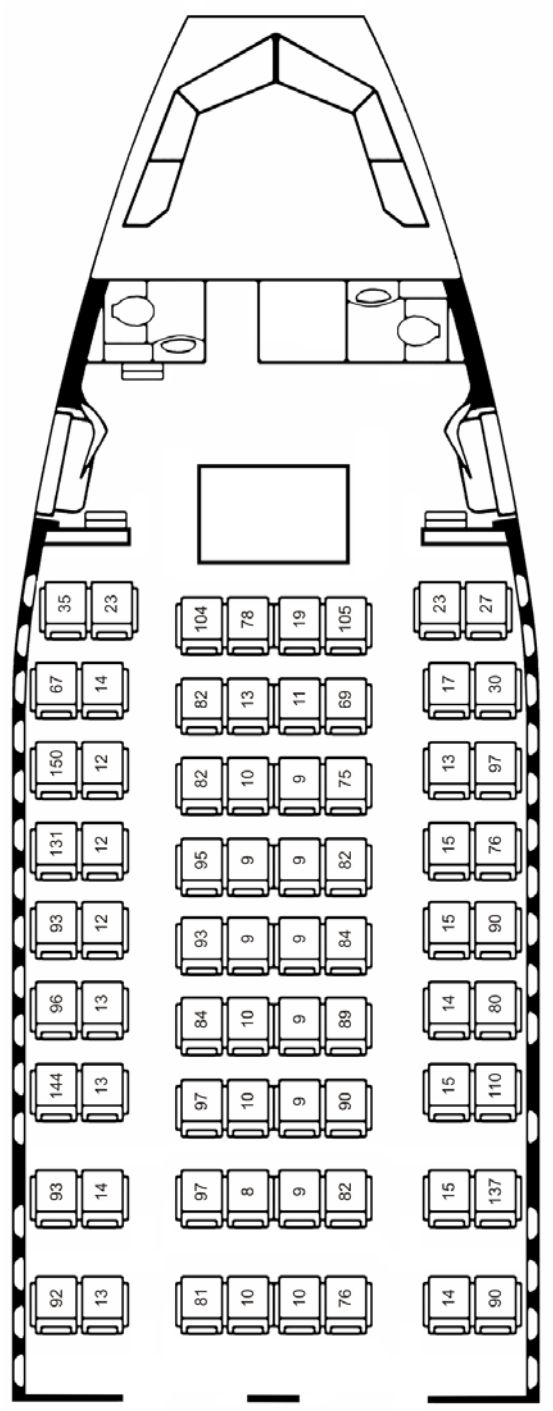
A-bewertete Schalldruckpegel in dB(A) in der Versuchseinrichtung gemessen 0,65 m über den Sitzflächen im Abstand von 0,10 m bis 0,15 m von den Rückenlehnen. Dargestellt sind die Pegel für die 74 dB(A)-Einstellung. Für die 69 dB(A)- und 64 dB(A)-Einstellungen wurden die Pegel um jeweils 5 dB reduziert.

Anhang F Vibrationspegel



Ungewichtete Vibrationspegel in dB in der Versuchseinrichtung gemessen am Übergang zwischen Sitzschiene und Sitzgestell. Dargestellt sind die zum 74 dB(A)-Pegel des Schalldrucks gehörigen Vibrationspegel. Äquivalent zum Schalldruckpegel wurden die Vibrationspegel für die 69 dB(A)- und 64 dB(A)-Schalldruckpegel um jeweils 5 dB reduziert.

Anhang G Leuchtdichten



Leuchtdichten in cd/m² in der Versuchseinrichtung während der Expositionen gemessen mittig auf den heruntergeklappten Sitztischen.

Anhang H Parametermatrizen des Modells *MCv*

Im Folgenden sind die geschätzten Parametermatrizen für das in Kapitel 5.4.1 beschriebene Strukturgleichungsmodell *MCv* dargestellt. Es wird die in Kapitel 3.5 beschriebene LISREL-Notation verwendet:

Strukturmodell: $\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\alpha}^{(g)} + \boldsymbol{B}^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ (5.34)

Messmodell: $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\Lambda}_y^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$ (5.35)

mit den Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{\Psi}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\Theta}_{\varepsilon}^{(g)}$ der Fehler $\boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$.

$$\boldsymbol{\alpha}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 21{,}28 \\ 1{,}85 \\ 16{,}32 \\ -6{,}27 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\alpha}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 40{,}90 \\ 41{,}75 \\ -64{,}82 \\ -7{,}63 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\alpha}^{(3)} = \begin{Bmatrix} -6{,}81 \\ -7{,}97 \\ 14{,}95 \\ -11{,}01 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{H.1}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(1)} = \begin{bmatrix} -0{,}01 & -0{,}08 & -0{,}17 & -0{,}10 & -0{,}07 & 0{,}10 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}01 & 0{,}05 & 0{,}13 & 0{,}12 & 0{,}10 & -0{,}10 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}02 & -0{,}01 & 0{,}04 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}03 & 0{,}04 & 0{,}03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(2)} = \begin{bmatrix} -0{,}04 & -0{,}05 & -0{,}17 & -0{,}15 & -0{,}08 & 0{,}06 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}06 & 0{,}04 & 0{,}11 & 0{,}12 & 0{,}02 & -0{,}06 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}08 & 0{,}01 & 0{,}07 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}04 & 0{,}06 & 0{,}02 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0{,}02 & -0{,}00 & -0{,}20 & -0{,}17 & -0{,}11 & 0{,}05 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}00 & -0{,}00 & 0{,}16 & 0{,}16 & 0{,}03 & -0{,}04 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}02 & -0{,}03 & 0{,}07 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}09 & 0{,}06 & 0{,}03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{H.2}$$

$$\boldsymbol{B}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0{,}24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}06 & 0 \\ 0{,}93 & 1{,}06 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}28 & 0{,}27 & 0 & 0 & 0 \\ 1{,}83 & 1{,}92 & -0{,}61 & -0{,}19 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0{,}24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}28 & 0 \\ 0{,}69 & 0{,}93 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}00 & -0{,}15 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}63 & 0{,}62 & 0{,}06 & 0{,}08 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0{,}26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}47 & 0 \\ 0{,}74 & 0{,}87 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}41 & -0{,}50 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}49 & 0{,}40 & 0{,}22 & 0{,}14 & 0 \end{bmatrix} \qquad \text{(H.3)}$$

$$\boldsymbol{\varsigma}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0{,}75 \\ 0{,}90 \\ 0{,}41 \\ 0{,}43 \\ -0{,}25 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varsigma}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 0{,}74 \\ 0{,}86 \\ 0{,}36 \\ 0{,}83 \\ 0{,}35 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varsigma}^{(3)} = \begin{Bmatrix} 0{,}78 \\ 0{,}82 \\ 0{,}48 \\ 1{,}00 \\ 0{,}44 \end{Bmatrix} \qquad \text{(H.4)}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{12}^{(1)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(1)} = -0{,}57 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{12}^{(2)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(2)} = -0{,}58 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{12}^{(3)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(3)} = -0{,}54 \qquad \text{(H.5)}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_{y}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}96 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}74 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}81 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}71 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}59 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}95 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_y^{(2)} = \begin{bmatrix} 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}90 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}78 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}98 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}82 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}88 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}13 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_y^{(3)} = \begin{bmatrix} 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}84 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}84 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}94 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}84 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}78 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}01 \end{bmatrix} \qquad \text{(H.6)}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0{,}94 \\ 1{,}20 \\ 1{,}47 \\ 0{,}94 \\ 1{,}20 \\ 1{,}47 \\ 0{,}90 \\ 1{,}62 \\ 1{,}43 \\ 0{,}99 \\ 1{,}17 \\ 1{,}26 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varepsilon}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 1{,}01 \\ 1{,}14 \\ 1{,}38 \\ 1{,}01 \\ 1{,}14 \\ 1{,}38 \\ 1{,}18 \\ 1{,}37 \\ 1{,}21 \\ 1{,}17 \\ 1{,}31 \\ 1{,}11 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varepsilon}^{(3)} = \begin{Bmatrix} 0{,}97 \\ 1{,}20 \\ 1{,}28 \\ 0{,}97 \\ 1{,}20 \\ 1{,}28 \\ 1{,}10 \\ 1{,}45 \\ 1{,}36 \\ 1{,}02 \\ 1{,}24 \\ 1{,}23 \end{Bmatrix} \qquad \text{(H.7)}$$

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{\Theta}_{14}^{(1)} = \boldsymbol{\Theta}_{41}^{(1)} = -0{,}16 \qquad \boldsymbol{\Theta}_{14}^{(2)} = \boldsymbol{\Theta}_{41}^{(2)} = -0{,}28 \qquad \boldsymbol{\Theta}_{14}^{(3)} = \boldsymbol{\Theta}_{41}^{(3)} = -0{,}22 \\ &\boldsymbol{\Theta}_{25}^{(1)} = \boldsymbol{\Theta}_{52}^{(1)} = -0{,}43 \qquad \boldsymbol{\Theta}_{25}^{(2)} = \boldsymbol{\Theta}_{52}^{(2)} = -0{,}39 \qquad \boldsymbol{\Theta}_{25}^{(3)} = \boldsymbol{\Theta}_{52}^{(3)} = -0{,}41 \\ &\boldsymbol{\Theta}_{36}^{(1)} = \boldsymbol{\Theta}_{63}^{(1)} = -0{,}63 \qquad \boldsymbol{\Theta}_{36}^{(2)} = \boldsymbol{\Theta}_{63}^{(2)} = -0{,}58 \qquad \boldsymbol{\Theta}_{36}^{(3)} = \boldsymbol{\Theta}_{63}^{(3)} = -0{,}46 \end{aligned} \qquad \text{(H.8)}$$

Anhang I Parametermatrizen des Modells *MSC*

Im Folgenden sind die geschätzten Parametermatrizen für das in Kapitel 5.4.2 beschriebene Strukturgleichungsmodell *MSC* dargestellt. Es wird die in Kapitel 3.5 beschriebene LISREL-Notation verwendet:

Strukturmodell: $\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\alpha}^{(g)} + \boldsymbol{B}^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ (5.34)

Messmodell: $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\Lambda}_y^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$ (5.35)

mit den Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{\Psi}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\Theta}_{\varepsilon}^{(g)}$ der Fehler $\boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$.

$$\boldsymbol{\alpha}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 19{,}96 \\ -4{,}16 \\ 27{,}50 \\ -12{,}09 \\ \hline \boldsymbol{0} \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\alpha}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 37{,}36 \\ 17{,}73 \\ -2{,}26 \\ -10{,}47 \\ \hline \boldsymbol{0} \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\alpha}^{(3)} = \begin{Bmatrix} -9{,}27 \\ -10{,}69 \\ 7{,}49 \\ -9{,}96 \\ \hline \boldsymbol{0} \end{Bmatrix} \tag{I.1}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(1)} = \left[\begin{array}{rrrrrrrrr} -0{,}01 & -0{,}09 & -0{,}21 & -0{,}11 & -0{,}04 & 0{,}11 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}01 & 0{,}08 & 0{,}17 & 0{,}14 & 0{,}11 & -0{,}08 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}04 & -0{,}04 & 0{,}10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}05 & 0{,}07 & 0{,}08 \\ \hline \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(2)} = \left[\begin{array}{rrrrrrrrr} -0{,}03 & -0{,}03 & -0{,}19 & -0{,}15 & -0{,}09 & 0{,}05 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}03 & 0{,}00 & 0{,}13 & 0{,}12 & 0{,}06 & -0{,}06 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}00 & 0{,}01 & 0{,}05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}06 & 0{,}06 & 0{,}04 \\ \hline \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(3)} = \left[\begin{array}{rrrrrrrrr} 0{,}02 & 0{,}02 & -0{,}21 & -0{,}17 & -0{,}11 & 0{,}08 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}00 & 0{,}01 & 0{,}16 & 0{,}15 & 0{,}03 & -0{,}06 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}01 & -0{,}04 & 0{,}09 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}07 & 0{,}06 & 0{,}03 \\ \hline \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{array}\right] \tag{I.2}$$

$$\boldsymbol{B}^{(1)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ 0{,}89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}17 & 0 \\ 0 & 0{,}87 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}03 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}75 & 0 & 0{,}58 & 0{,}56 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}60 & 0{,}37 & 0{,}31 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}23 & 1{,}15 & 0{,}02 & -0{,}14 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}^{(2)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ 0{,}93 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}24 & 0 \\ 0 & 0{,}87 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}12 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}91 & 0 & 0{,}43 & 0{,}60 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}82 & 0{,}17 & 0{,}14 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}62 & 0{,}56 & 0{,}20 & 0{,}00 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}^{(3)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ 0{,}95 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}07 & 0 \\ 0 & 0{,}82 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}16 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}88 & 0 & 0{,}42 & 0{,}45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}10 & 0{,}16 & 0{,}16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}40 & 0{,}30 & 0{,}36 & 0{,}15 & 0 \end{bmatrix} \qquad \text{(I.3)}$$

$$\boldsymbol{\varsigma}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0{,}73 \\ 0{,}69 \\ 0{,}73 \\ 1{,}05 \\ 0{,}06 \\ 0{,}32 \\ 0{,}05 \\ 0{,}16 \\ -0{,}01 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varsigma}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 0{,}74 \\ 0{,}79 \\ 0{,}64 \\ 0{,}81 \\ 0{,}06 \\ 0{,}22 \\ -0{,}03 \\ 0{,}18 \\ 0{,}34 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varsigma}^{(3)} = \begin{Bmatrix} 0{,}68 \\ 0{,}79 \\ 0{,}73 \\ 0{,}67 \\ 0{,}17 \\ 0{,}31 \\ 0{,}00 \\ -0{,}05 \\ 0{,}44 \end{Bmatrix} \qquad \text{(I.4)}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{12}^{(1} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(1)} = -0{,}56 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{12}^{(2)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(2)} = -0{,}61 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{12}^{(3)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(3)} = -0{,}57$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{56}^{(1)} = \boldsymbol{\Psi}_{65}^{(1)} = -0{,}04 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{56}^{(2)} = \boldsymbol{\Psi}_{65}^{(2)} = -0{,}07 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{56}^{(3)} = \boldsymbol{\Psi}_{65}^{(3)} = -0{,}11 \qquad \text{(I.5)}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_y^{(1)} = \begin{bmatrix}
1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}97 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}78 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}95 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}86 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0{,}82 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0{,}12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}84 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}76 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}79 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}01 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}95
\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_y^{(2)} = \begin{bmatrix}
1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}90 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}85 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}86 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0{,}93 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0{,}30 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}92 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}99 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}84 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}89 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}94 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}16
\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_y^{(3)} = \begin{bmatrix}
1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}91 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}88 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}97 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}92 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0{,}92 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0{,}26 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}86 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}85 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}96 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}86 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}91 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}89 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}98
\end{bmatrix} \tag{I.6}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} = \begin{Bmatrix}
1{,}04 \\ 1{,}12 \\ 1{,}38 \\ 1{,}04 \\ 1{,}12 \\ 1{,}38 \\ 1{,}24 \\ 1{,}49 \\ 0{,}91 \\ 1{,}98 \\ 1{,}01 \\ 1{,}18 \\ 1{,}42 \\ 1{,}01 \\ 1{,}18 \\ 1{,}42 \\ 1{,}18 \\ 1{,}49 \\ 1{,}26 \\ 1{,}24 \\ 1{,}17 \\ 1{,}26
\end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varepsilon}^{(2)} = \begin{Bmatrix}
1{,}06 \\ 1{,}17 \\ 1{,}32 \\ 1{,}06 \\ 1{,}17 \\ 1{,}32 \\ 1{,}36 \\ 1{,}44 \\ 1{,}16 \\ 1{,}92 \\ 1{,}04 \\ 1{,}15 \\ 1{,}35 \\ 1{,}04 \\ 1{,}15 \\ 1{,}35 \\ 1{,}20 \\ 1{,}37 \\ 1{,}14 \\ 1{,}25 \\ 1{,}32 \\ 1{,}09
\end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varepsilon}^{(3)} = \begin{Bmatrix}
1{,}05 \\ 1{,}16 \\ 1{,}23 \\ 1{,}05 \\ 1{,}16 \\ 1{,}23 \\ 1{,}25 \\ 1{,}37 \\ 1{,}30 \\ 1{,}95 \\ 0{,}97 \\ 1{,}19 \\ 1{,}26 \\ 0{,}97 \\ 1{,}19 \\ 1{,}26 \\ 1{,}23 \\ 1{,}36 \\ 1{,}12 \\ 1{,}30 \\ 1{,}22 \\ 1{,}25
\end{Bmatrix} \tag{I.7}$$

$$
\begin{array}{lll}
\Theta_{14}^{(1)} = \Theta_{41}^{(1)} = -0{,}17 & \Theta_{14}^{(2)} = \Theta_{41}^{(2)} = -0{,}19 & \Theta_{14}^{(3)} = \Theta_{41}^{(3)} = -0{,}20 \\
\Theta_{25}^{(1)} = \Theta_{52}^{(1)} = -0{,}24 & \Theta_{25}^{(2)} = \Theta_{52}^{(2)} = -0{,}29 & \Theta_{25}^{(3)} = \Theta_{52}^{(3)} = -0{,}28 \\
\Theta_{36}^{(1)} = \Theta_{63}^{(1)} = -0{,}51 & \Theta_{36}^{(2)} = \Theta_{63}^{(2)} = -0{,}42 & \Theta_{36}^{(3)} = \Theta_{63}^{(3)} = -0{,}37 \\
\Theta_{1114}^{(1)} = \Theta_{1411}^{(1)} = -0{,}23 & \Theta_{1114}^{(2)} = \Theta_{1411}^{(2)} = -0{,}30 & \Theta_{1114}^{(3)} = \Theta_{1411}^{(3)} = -0{,}21 \\
\Theta_{1215}^{(1)} = \Theta_{1512}^{(1)} = -0{,}41 & \Theta_{1215}^{(2)} = \Theta_{1512}^{(2)} = -0{,}40 & \Theta_{1215}^{(3)} = \Theta_{1512}^{(3)} = -0{,}44 \\
\Theta_{1316}^{(1)} = \Theta_{1613}^{(1)} = -0{,}63 & \Theta_{1316}^{(2)} = \Theta_{1613}^{(2)} = -0{,}55 & \Theta_{1316}^{(3)} = \Theta_{1613}^{(3)} = -0{,}45
\end{array}
\qquad \text{(I.8)}
$$

Anhang J Parametermatrizen des Modells *ICv*

Im Folgenden sind die geschätzten Parametermatrizen für das in Kapitel 5.4.3 beschriebene Strukturgleichungsmodell *ICv* dargestellt. Es wird die in Kapitel 3.5 beschriebene LISREL-Notation verwendet:

Strukturmodell: $\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\alpha}^{(g)} + \boldsymbol{B}^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ (5.34)

Messmodell: $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\Lambda}_y^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$ (5.35)

mit den Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{\Psi}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\Theta}_{\varepsilon}^{(g)}$ der Fehler $\boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$.

$$\boldsymbol{\alpha}^{(1)} = \begin{Bmatrix} -0{,}00 \\ 0{,}00 \\ -0{,}50 \\ -4{,}26 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\alpha}^{(2)} = \begin{Bmatrix} -0{,}03 \\ 0{,}02 \\ -0{,}78 \\ -5{,}70 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\alpha}^{(3)} = \begin{Bmatrix} -0{,}04 \\ 0{,}03 \\ 0{,}06 \\ -5{,}67 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{J.1}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(1)} = \begin{bmatrix} -0{,}25 & 0 & 0 \\ 0{,}24 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}01 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}08 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(2)} = \begin{bmatrix} -0{,}25 & 0 & 0 \\ 0{,}16 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}02 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}10 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(3)} = \begin{bmatrix} -0{,}28 & 0 & 0 \\ 0{,}20 & 0 & 0 \\ 0 & -0{,}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}10 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{J.2}$$

$$\boldsymbol{B}^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0{,}42 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}20 & 0 \\ 0{,}97 & 1{,}12 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}08 & -0{,}04 & 0 & 0 & 0 \\ 2{,}28 & 2{,}40 & -0{,}90 & -0{,}27 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0{,}20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}57 & 0 \\ 0{,}64 & 0{,}92 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}41 & -0{,}78 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}65 & 0{,}64 & 0{,}04 & 0{,}07 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0{,}30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}40 & 0 \\ 0{,}73 & 0{,}91 & 0 & 0 & 0 \\ -0{,}38 & -0{,}41 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}56 & 0{,}47 & 0{,}18 & 0{,}14 & 0 \end{bmatrix} \qquad \text{(J.3)}$$

$$\boldsymbol{\zeta}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0{,}81 \\ 0{,}95 \\ 0{,}33 \\ 0{,}60 \\ -0{,}46 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\zeta}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 0{,}83 \\ 1{,}04 \\ 0{,}38 \\ 1{,}48 \\ 0{,}35 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\zeta}^{(3)} = \begin{Bmatrix} 0{,}88 \\ 0{,}86 \\ 0{,}49 \\ 0{,}91 \\ 0{,}42 \end{Bmatrix} \qquad \text{(J.4)}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_{12}^{(1)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(1)} = -0{,}66 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{12}^{(2)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(2)} = -0{,}67 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{12}^{(3)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(3)} = -0{,}62 \qquad \text{(J.5)}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_{y}^{(1)} = \begin{bmatrix} 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}97 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}73 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}80 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}71 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}61 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}33 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}95 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_y^{(2)} = \begin{bmatrix} 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}90 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}77 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}98 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}82 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}87 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}13 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_y^{(3)} = \begin{bmatrix} 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}84 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}85 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}85 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}77 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \end{bmatrix} \tag{J.6}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0{,}94 \\ 1{,}20 \\ 1{,}48 \\ 0{,}94 \\ 1{,}20 \\ 1{,}48 \\ 0{,}95 \\ 1{,}61 \\ 1{,}43 \\ 0{,}99 \\ 1{,}17 \\ 1{,}26 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varepsilon}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 1{,}00 \\ 1{,}14 \\ 1{,}39 \\ 1{,}00 \\ 1{,}04 \\ 1{,}39 \\ 1{,}17 \\ 1{,}38 \\ 1{,}21 \\ 1{,}16 \\ 1{,}31 \\ 1{,}11 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varepsilon}^{(3)} = \begin{Bmatrix} 0{,}98 \\ 1{,}21 \\ 1{,}27 \\ 0{,}98 \\ 1{,}21 \\ 1{,}27 \\ 1{,}09 \\ 1{,}45 \\ 1{,}38 \\ 0{,}98 \\ 1{,}24 \\ 1{,}23 \end{Bmatrix} \tag{J.7}$$

$$\begin{array}{lll}
\Theta_{14}^{(1)} = \Theta_{41}^{(1)} = -0{,}15 & \Theta_{14}^{(2)} = \Theta_{41}^{(2)} = -0{,}28 & \Theta_{14}^{(3)} = \Theta_{41}^{(3)} = -0{,}23 \\
\Theta_{25}^{(1)} = \Theta_{52}^{(1)} = -0{,}42 & \Theta_{25}^{(2)} = \Theta_{52}^{(2)} = -0{,}39 & \Theta_{25}^{(3)} = \Theta_{52}^{(3)} = -0{,}41 \\
\Theta_{36}^{(1)} = \Theta_{63}^{(1)} = -0{,}63 & \Theta_{36}^{(2)} = \Theta_{63}^{(2)} = -0{,}59 & \Theta_{36}^{(3)} = \Theta_{63}^{(3)} = -0{,}44
\end{array} \quad \text{(J.8)}$$

Anhang K Parametermatrizen des Modells *ISC*

Im Folgenden sind die geschätzten Parametermatrizen für das in Kapitel 5.4.4 beschriebene Strukturgleichungsmodell *ISC* dargestellt. Es wird die in Kapitel 3.5 beschriebene LISREL-Notation verwendet:

Strukturmodell: $\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\alpha}^{(g)} + \boldsymbol{B}^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Gamma}^{(g)}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ (5.34)

Messmodell: $\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\Lambda}_y^{(g)}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$ (5.35)

mit den Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{\Psi}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\Theta}_{\varepsilon}^{(g)}$ der Fehler $\boldsymbol{\varsigma}^{(g)}$ und $\boldsymbol{\varepsilon}^{(g)}$.

$$\boldsymbol{\alpha}^{(1)} = \begin{Bmatrix} -0{,}00 \\ 0{,}00 \\ -0{,}68 \\ -7{,}48 \\ \hline \boldsymbol{0} \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\alpha}^{(2)} = \begin{Bmatrix} -0{,}04 \\ 0{,}03 \\ -0{,}85 \\ -5{,}44 \\ \hline \boldsymbol{0} \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\alpha}^{(3)} = \begin{Bmatrix} -0{,}05 \\ 0{,}03 \\ 0{,}10 \\ -5{,}35 \\ \hline \boldsymbol{0} \end{Bmatrix} \tag{K.1}$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(1)} = \left[\begin{array}{ccc} -0{,}26 & 0 & 0 \\ 0{,}28 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}02 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}13 \\ \hline \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(2)} = \left[\begin{array}{ccc} -0{,}25 & 0 & 0 \\ 0{,}18 & 0 & 0 \\ 0 & 0{,}02 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}10 \\ \hline \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{\Gamma}^{(3)} = \left[\begin{array}{ccc} -0{,}29 & 0 & 0 \\ 0{,}20 & 0 & 0 \\ 0 & -0{,}00 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}09 \\ \hline \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{array}\right] \tag{K.2}$$

$$\boldsymbol{B}^{(1)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ 0{,}90 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}18 & 0 \\ 0 & 0{,}90 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}04 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}75 & 0 & 0{,}57 & 0{,}56 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}60 & 0{,}36 & 0{,}31 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}33 & 1{,}24 & 0{,}00 & -0{,}18 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}^{(2)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ 0{,}93 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}24 & 0 \\ 0 & 0{,}87 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}12 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}90 & 0 & 0{,}42 & 0{,}60 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0{,}91 & 0{,}17 & 0{,}14 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}63 & 0{,}55 & 0{,}20 & 0{,}00 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}^{(3)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ 0{,}95 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}07 & 0 \\ 0 & 0{,}81 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}15 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}87 & 0 & 0{,}39 & 0{,}45 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1{,}12 & 0{,}17 & 0{,}18 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}42 & 0{,}31 & 0{,}35 & 0{,}15 & 0 \end{bmatrix} \qquad \text{(K.3)}$$

$$\boldsymbol{\varsigma}^{(1)} = \begin{Bmatrix} 0{,}83 \\ 0{,}78 \\ 0{,}76 \\ 1{,}06 \\ 0{,}04 \\ 0{,}30 \\ 0{,}05 \\ 0{,}16 \\ -0{,}05 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varsigma}^{(2)} = \begin{Bmatrix} 0{,}83 \\ 0{,}84 \\ 0{,}65 \\ 0{,}74 \\ 0{,}05 \\ 0{,}22 \\ -0{,}03 \\ 0{,}12 \\ 0{,}33 \end{Bmatrix} \qquad \boldsymbol{\varsigma}^{(3)} = \begin{Bmatrix} 0{,}80 \\ 0{,}85 \\ 0{,}74 \\ 0{,}66 \\ 0{,}16 \\ 0{,}31 \\ 0{,}01 \\ -0{,}07 \\ 0{,}44 \end{Bmatrix} \qquad \text{(K.4)}$$

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{\Psi}_{12}^{(1)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(1)} = -0{,}64 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{12}^{(2)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(2)} = -0{,}67 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{12}^{(3)} = \boldsymbol{\Psi}_{21}^{(3)} = -0{,}66 \\ &\boldsymbol{\Psi}_{56}^{(1)} = \boldsymbol{\Psi}_{65}^{(1)} = -0{,}04 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{56}^{(2)} = \boldsymbol{\Psi}_{65}^{(2)} = -0{,}07 \qquad \boldsymbol{\Psi}_{56}^{(3)} = \boldsymbol{\Psi}_{65}^{(3)} = -0{,}12 \end{aligned} \qquad \text{(K.5)}$$

$$\Lambda_y^{(1)} = \begin{bmatrix}
1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}97 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}78 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}95 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}86 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0{,}81 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0{,}13 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}84 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}76 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}80 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}01 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}94
\end{bmatrix}$$

$$\Lambda_y^{(2)} = \begin{bmatrix}
1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}90 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}85 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}86 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0{,}93 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0{,}32 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}92 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}82 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}99 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}84 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}89 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}94 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}16
\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_y^{(3)} = \begin{bmatrix}
1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}90 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0{,}89 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}97 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0{,}93 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0{,}93 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0{,}26 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}86 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}85 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}96 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}86 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}91 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}90 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1{,}00 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}98
\end{bmatrix} \tag{K.6}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(1)} = \begin{Bmatrix}
1{,}05 \\ 1{,}12 \\ 1{,}38 \\ 1{,}05 \\ 1{,}12 \\ 1{,}38 \\ 1{,}24 \\ 1{,}50 \\ 0{,}91 \\ 1{,}98 \\ 1{,}01 \\ 1{,}18 \\ 1{,}43 \\ 1{,}01 \\ 1{,}18 \\ 1{,}43 \\ 1{,}19 \\ 1{,}48 \\ 1{,}25 \\ 1{,}25 \\ 1{,}17 \\ 1{,}26
\end{Bmatrix} \quad
\boldsymbol{\varepsilon}^{(2)} = \begin{Bmatrix}
1{,}06 \\ 1{,}16 \\ 1{,}32 \\ 1{,}06 \\ 1{,}16 \\ 1{,}32 \\ 1{,}35 \\ 1{,}44 \\ 1{,}24 \\ 1{,}92 \\ 1{,}04 \\ 1{,}15 \\ 1{,}35 \\ 1{,}04 \\ 1{,}15 \\ 1{,}35 \\ 1{,}20 \\ 1{,}37 \\ 1{,}14 \\ 1{,}25 \\ 1{,}32 \\ 1{,}09
\end{Bmatrix} \quad
\boldsymbol{\varepsilon}^{(3)} = \begin{Bmatrix}
1{,}05 \\ 1{,}16 \\ 1{,}22 \\ 1{,}05 \\ 1{,}16 \\ 1{,}22 \\ 1{,}26 \\ 1{,}36 \\ 1{,}32 \\ 1{,}96 \\ 0{,}98 \\ 1{,}19 \\ 1{,}26 \\ 0{,}98 \\ 1{,}19 \\ 1{,}26 \\ 1{,}23 \\ 1{,}36 \\ 1{,}13 \\ 1{,}30 \\ 1{,}21 \\ 1{,}25
\end{Bmatrix} \tag{K.7}$$

$$
\begin{array}{lll}
\Theta_{14}^{(1)} = \Theta_{41}^{(1)} = -0{,}17 & \Theta_{14}^{(2)} = \Theta_{41}^{(2)} = -0{,}19 & \Theta_{14}^{(3)} = \Theta_{41}^{(3)} = -0{,}20 \\
\Theta_{25}^{(1)} = \Theta_{52}^{(1)} = -0{,}23 & \Theta_{25}^{(2)} = \Theta_{52}^{(2)} = -0{,}29 & \Theta_{25}^{(3)} = \Theta_{52}^{(3)} = -0{,}28 \\
\Theta_{36}^{(1)} = \Theta_{63}^{(1)} = -0{,}52 & \Theta_{36}^{(2)} = \Theta_{63}^{(2)} = -0{,}43 & \Theta_{36}^{(3)} = \Theta_{63}^{(3)} = -0{,}36 \\
\Theta_{1114}^{(1)} = \Theta_{1411}^{(1)} = -0{,}22 & \Theta_{1114}^{(2)} = \Theta_{1411}^{(2)} = -0{,}30 & \Theta_{1114}^{(3)} = \Theta_{1411}^{(3)} = -0{,}21 \\
\Theta_{1215}^{(1)} = \Theta_{1512}^{(1)} = -0{,}40 & \Theta_{1215}^{(2)} = \Theta_{1512}^{(2)} = -0{,}40 & \Theta_{1215}^{(3)} = \Theta_{1512}^{(3)} = -0{,}44 \\
\Theta_{1316}^{(1)} = \Theta_{1613}^{(1)} = -0{,}63 & \Theta_{1316}^{(2)} = \Theta_{1613}^{(2)} = -0{,}55 & \Theta_{1316}^{(3)} = \Theta_{1613}^{(3)} = -0{,}45
\end{array}
\qquad \text{(K.8)}
$$

Glossar

Im Folgenden werden ausgewählte Begriffe im Kontext dieser Arbeit erläutert:

Anpassungsmaß	engl. Goodness-of-Fit-Index; Maß für die Güte eines statistischen Modells, d.h. wie gut ein Modell die für die Schätzung verwendeten Daten wiedergibt.
bipolare Antwortskala	Skala mit einem positiven und einem negativen Pol, z.B. „sehr gut“ (= positiver Pol) und „sehr schlecht“ (= negativer Pol).
endogene Variable	Variable in der Statistik, deren Ursachen innerhalb eines Modells liegen, d.h. welche durch das Modell erklärt wird.
exogene Variable	Variable in der Statistik, deren Ursachen außerhalb eines Modells liegen, d.h. welche nicht durch das Modell erklärt wird.
Hypothese	begründete, widerspruchsfreie Vermutung.
Interaktion	gemeinsame Wirkung zweier Variabler; beispielsweise könnte der Gesamtdiskomfort größer sein, wenn sowohl akustischer als auch thermischer Diskomfort steigen, im Vergleich zur Zunahme nur eines dieser Bewertungsaspekte.
Interrelation	gegenseitige Abhängigkeit zweier Variabler; beispielsweise kann die Bewertung der Luftqualität von der Bewertung der thermischen Umgebung abhängen.
intervenierende Variable	Variable in der Statistik, welche im kausalen Zusammenhang mit zwei anderen Variablen steht, von denen die eine einen scheinbaren Effekt auf die andere hat. Bei Kontrolle der intervenierenden Variablen verschwindet dieser.
Kandidatenpunkt	möglicher Punkt im Parameterraum einer Untersuchung.
Kausalität	Beziehung zwischen Ursache und Wirkung.
Konstrukt	Begriffe, "die sich nicht direkt auf beobachtbare Sachverhalte zurückführen lassen, die jedoch geeignet sind, Beobachtungen aufeinander zu beziehen“ (Wienold (1994)).

Kookkurenz	gemeinsames Auftreten zweier lexikalischer Einheiten, z.B. Wörter, in einer übergeordneten Einheit, z.B. Satz.
latente Variable	Variable in der Statistik, die nicht direkt beobachtet werden kann.
manifeste Variable	Variable in der Statistik, die direkt beobachtet werden kann.
Nettoeffekt	Effekt einer Variabler auf eine andere unter Nichtberücksichtigung einer intervenierenden Variablen.
Operationalisierung	„Präzisierung, Standardisierung von Begriffen (…) durch Angabe der messbaren Ereignisse, die das Vorliegen dieses Sachverhaltes anzeigen (Indikatoren)“ (Rönsch (1994)).
Parameterraum	der durch die Untersuchungsvariablen aufgespannte Raum.
Population	auch: Grundgesamtheit; Menge aller möglichen Objekte für eine bestimmte Untersuchung.
Pseudo-Isolation	Reduktion der Erklärung einer statistischen Variable auf eine andere Variable und eine als nicht mit dieser kovariierend angenommenen Fehlergröße, d.h. Fehlergröße und beeinflussende Variable sind voneinander unabhängig. Dies entspricht dem Fall einer isolierten Betrachtung der Beziehung zwischen den beiden Variablen.
Stichprobe	Teilmenge einer Population.
unipolare Antwortskala	Skala mit einem Bezugspunkt und einem positiven (bzw. negativen) Pol, z.B. „nicht gut“ (= Bezugspunkt) und „sehr gut“ (= Pol).

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK BAND 1

Im Zusammenhang mit dem Raumklima als physikalische Beschreibung der (hygro-) thermischen, olfaktorischen, vibro-akustischen und visuellen Umgebung wird die Methodik für die Modellierung eines Komfortindex untersucht. Hierbei wird als Beispiel das Raumklima an Bord von Passagierflugzeugen gewählt. Dort ist das Klima kontrolliert um überlebensnotwendige Bedingungen zu schaffen. Zudem besteht das Interesse der Airlines durch komfortables Klima eine hohe Kundenbindung zu erreichen.

Der in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften etablierte Ansatz der Strukturgleichungsmodellierung wird auf die Komfortanalyse hinsichtlich des Raumklimas übertragen. Die entwickelten Modelle des psychologischen Konstrukts Komfort basieren auf subjektiven Daten, welche in der Fraunhofer Flight Test Facility anhand von Fragebögen erhoben wurden.

Der gewählte Ansatz für die Modellierung eines Komfortindex zur Beurteilung des Raumklimas wird als brauchbar bewertet. Nicht nur die Modell-Daten Konsistenz wird positiv beurteilt, sondern es wird auch eine glaubwürdige Abbildung der Realität erreicht, so dass die Ergebnisse in die Optimierung des Raumklimas in Passagierflugzeugkabinen einfließen können.

ISBN 978-3-8396-0008-5