

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
eines
Diplomingenieurs (FH)

Fachhochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen
Fachhochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst
Fakultät Bauwesen
Fachrichtung Holzingenieurwesen

Frank Stein
Mat.-Nr. 293370
Hildesheim

Untersuchungen zum klimatischen Verhalten von Wohn-
mobilen

WS 2003/2004

Beurteilung

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer
2. Prüfer: Dipl.-Ing. Ralf Gronemann



Aufgabenstellung

Thema: Untersuchungen zum klimatischen Verhalten von Wohnmobilen

Reisen in Wohnwagen und Reisemobilen gewinnt in der mobilen Welt immer größere Bedeutung. Hierbei werden zu unterschiedlichen Jahreszeiten verschiedene Regionen in Europa bereist. Grundlegende Voraussetzung ist hierbei die Aufrechterhaltung eines angenehmen Raumklimas.

Im Rahmen der Diplomarbeit sollen die Auswirkungen der unterschiedlichen regionalen Klimata auf das Raumklimas und die Bauteile und Baustoffe der Wohnmobile untersucht werden.

Im Einzelnen werden verlangt:

1. Beschreibung der Bauteile eines Wohnmobiles mit ihren Schichtenaufbauten
2. Beschreibung der Heiz- und Klimaanlage in den Fahrzeugen sowie deren Regelbetrieb
3. Beschreibung des z.Zt. vorhandenen und des optimalen/gewünschten Raumklimas in Wohnmobilen
4. Berechnung des raumklimatischen Verhaltens bei unterschiedlichsten europäischen Klimata
5. Berechnung des feuchtetechnischen Verhaltens der Außenbauteile und Überprüfung der Funktionstauglichkeit der Bauteile und Baustoffe
6. Optimierung der Bauteile und Baustoffe unter bauklimatischen und bautechnischen Gesichtspunkten

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass die gesamte Diplomarbeit und die zugehörigen Berechnungen von mir selbständig angefertigt wurden. Zitate und/oder Übernahmen sind entsprechend gekennzeichnet und in einem Quellenverzeichnis am Ende dieser Diplomarbeit aufgeführt.

Hildesheim, den 19. Dezember 2003

Frank Stein



Inhaltsverzeichnis:

Zusammenfassung der Ausarbeitung	7
1 Einleitung	8
2 Grundlagen Wohnmobil	9
2.1 Definition Wohnmobil	9
2.2 Wohnmobilenvarianten.....	9
2.3 Konstruktion.....	10
Außenbauteile eines Wohnmobils	10
2.3.1 Außenwände	11
2.3.2 Dach.....	11
2.3.3 Fahrzeugboden.....	12
2.3.4 Einbaukomponenten	14
2.3.5 Fahrerhaus.....	17
2.4 Materialien im Bereich von Außen- und Innenbauteilen	18
2.5 Klimatechnik in Wohnmobilen	19
2.5.1 Allgemeines	19
2.5.2 Heizungsanlagen	19
2.5.3 Gebläseheizsysteme.....	20
2.5.4 Warmwasserheizsysteme	21
2.5.5 Lüftungsanlagen	22
2.5.6 Klimaanlage	23
2.5.7 Regelung der Klimatechnik.....	26
3 Das zu untersuchende Wohnmobil.....	27
3.1 Auswahl des zu untersuchenden Wohnmobils	27
3.2 Technische Beschreibung des zu analysierenden Wohnmobils.....	28
3.2.1 Kurzbeschreibung des Modells.....	28
3.2.2 Technische Ausstattung	28
3.2.3 Aufbereitung des Wohnmobils für die folgenden Untersuchungen	32
4 Existierende klimatische Untersuchungen von Wohnmobilen.....	34
4.1 Thermografische Untersuchungen	34
4.2 Aufheizkurven.....	37
5 EDV-gestützten Verfahren zur klimatischen Untersuchung von Wohnmobilen	45
5.1 Grundlagen der EDV-gestützten Verfahren	45
5.2 Klassifizierung der EDV-gestützten Verfahren.....	45
5.3 Auswahl des für diese Ausarbeitung geeigneten EDV-gestützten Verfahrens.....	47
5.4 Kurzbeschreibung der verwendeten Programme	48
6 Klimaphysikalische Grundlagen.....	50
6.1 Das „optimale“ Raumklima	50
6.1.1 Thermische und hygrische Bedingungen für ein als behaglich empfundenen Raumklima in ganzjährig nutzbaren Wohnmobilen	51



6.2	Klimaphysikalische Grundlagen der eingesetzten EDV-gestützten Verfahren	54
6.3	Grundlagen der Wärmebrückenermittlung mit Hilfe von Detailverfahren	55
6.4	Grundlagen des Bauteilverfahrens.....	55
6.4.1	Bauteilbetrachtungen nach DIN EN 1645-1 Caravans	55
6.4.2	Hygrothermische Bauteilbetrachtungen unter instationären Bedingungen mit WUFI	56
	Stoffe / Bauteile / Bauteilschichten.....	59
6.4.3	Thermisches Verhalten von Stoffen und Bauteilen	60
7	Materialkenndaten	64
7.1	Materialkenndaten für die numerischen Untersuchungen	64
7.2	Erläuterung der Materialkenndaten.....	65
7.2.1	Dichte, Rohdichte, Reindichte [kg/m ³]	66
7.2.2	Porosität [m ³ /m ³]	66
7.2.3	Wärmekapazität [J/kg · K].....	67
7.2.4	Wärmeleitfähigkeit trocken / feuchteabhängig [W/m · K].....	67
7.2.5	Diffusionswiderstandszahl trocken / feuchteabhängig [-]	67
7.2.6	Feuchtespeicherfunktion.....	68
7.2.7	Flüssigtransportkoeffizienten Saugen und Weiterverteilen	69
7.3	Kennwerte für die von der Firma Knaus verarbeiteten Materialien.....	71
8	Untersuchungen zum Nutzerverhalten	74
8.1	Vorhandene Untersuchungen des Nutzerverhaltens	74
8.2	Untersuchungen zum Nutzerverhalten im Zuge der Diplomarbeit.....	75
8.3	Ziele der Untersuchungen zum Nutzerverhalten.....	75
8.4	Durchführung der Untersuchungen zum Nutzerverhalten	75
8.5	Auswertung der Umfrageergebnisse.....	76
8.6	Das wohnmobiltypische Nutzerverhalten	76
8.7	Außenklima für Wohnmobile	82
8.8	Klimadaten für die Untersuchungen in WUFI.....	86
9	Die Bauteiluntersuchungen in WUFI.....	87
9.1	Vorbemerkungen.....	87
9.2	Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen.....	88
9.3	Ergebnisse der Bauteiluntersuchungen	91
9.4	Überprüfung neuer Ansätze	95
9.5	Sinnvolle Verbesserungen	96
10	Die energetischen Untersuchungen in Helios.....	98
10.1	Vorbemerkungen.....	98
10.2	Einschränkungen von Helios.....	99
10.3	Durchführung der Untersuchungen.....	101
10.4	Ergebnisse der Untersuchungen.....	103
10.4.1	Gasverbrauch im Heizbetrieb (U1 bis U6).....	103
10.4.2	Einfluss der Frontscheibe auf die Energiebilanz im Winter	104



10.4.3	Aufheizversuch nach DIN EN 1646-1	106
10.4.4	Einsatz von Klimaanlage	108
10.5	Schlussbemerkungen zu den Heliosuntersuchungen	108
11	Schlusswort	109
12	Quellenverzeichnis	110
12.1	Literatur/Normen/Richtlinien	110
12.2	Verwendete PC – Programme	110
12.3	Verzeichnis der Abbildungen	110
12.4	Verzeichnis der Diagramme	111
12.5	Verzeichnis der Tabellen	111
12.6	Sonstige Informationsquellen	112



Zusammenfassung der Ausarbeitung

Abstract

The old ways are changing you can not deny. The day of the old traveller is over. There are many places to go in such a little time, so farewell to the life of the rover. Good bye to the tent and the old caravan, to the tinker, the gipsy, the travelling man, and good bye to the thirty foot trailer (compare: "The Thirty Foot Trailer")

Diese Ausarbeitung beschäftigt sich mit dem Einsatz von instationären bauphysikalischen Berechnungsprogrammen in der Wohnmobilbranche. Neben allgemeinen Grundlagen des technischen Aufbaus von Wohnmobilen sowie einigen bauphysikalischen Grundlagen, werden die besonderen Anforderungen der klimaphysikalischen Wohnmobiluntersuchung an die Berechnungsprogramme untersucht. Schwierigkeiten bereiten in diesem Zusammenhang vor allem die noch nicht ausreichend recherchierten klimaphysikalischen Grundlagen von Wohnmobilen sowie die beschränkten Möglichkeiten der hier angewandten Programme, das individuelle Verhalten von Wohnmobilitzern darzustellen.

Der Schwerpunkt dieser Ausarbeitung wurde daher neben der Simulation des energetischen und thermohygrischen Verhaltens von Wohnmobilen vor allem auf die Durchführung einiger grundlegender Untersuchungen gelegt. So wurde z.B. durch Befragungen von Wohnmobilitzern versucht, Tendenzen hinsichtlich deren Wohn- und Reiseverhalten im bzw. mit dem Wohnmobil zu erkennen. Als Ergebnis dieser Umfrage konnten sogenannte Wohnmobilitzer- und Klimadatensätze erstellt werden, die es erlauben, das Verhalten der Wohnmobilitzer in Abhängigkeit vom jeweiligen Umgebungsklima darzustellen. Da diese Datensätze „offen“ angelegt sind, können sie jederzeit erweitert oder geändert werden – eine Beschränkung auf die hier vorgestellte Software ist damit nicht vorhanden.

Ein weiteres Ziel dieser Ausarbeitung liegt darin, bereits vorhandene klimaphysikalische Untersuchungen zusammenzutragen und zu analysieren. Schwerpunktmäßig fiel dabei der Blick auf Auswertung von Aufheizversuchen und Thermografieuntersuchungen.

Der zweite Schwerpunkt der Ausarbeitung liegt auf der bereits erwähnten Untersuchung eines Wohnmobils mit Hilfe der thermohygrischen Simulation im Programm WUFI sowie die energetische Simulation im Programm Helios.

Die Ergebnisse der Ausarbeitung bilden zum einen die Nutzer- und Klimadatensätze für die Wohnmobilsimulation und zum anderen die Erkenntnis, dass mit den hier eingesetzten Verfahren in Kombination mit den mangelnden Grundlagen im Bereich der klimaphysikalischen Wohnmobilsimulation nur qualitativ gesicherte Aussagen über das klimatische Verhalten von Wohnmobilen gemacht werden können. Die gesicherte zahlenmäßige Analyse ist zur Zeit mangels vergleichbarer, am Wohnmobil ermittelter Daten noch nicht durchführbar.



1 Einleitung

Seit geraumer Zeit sind im mobilen Freizeitbereich immer stärkere Tendenzen hinsichtlich der ganzjährigen Nutzung von Wohnmobilen und Wohnwagen zu erkennen. Diese Tendenzen stellen in vielerlei Hinsicht neue Ansprüche an die Konstruktion und Ausstattung dieser Mobile. Es kann nicht mehr ausgeschlossen werden, dass Mobile nur von „Schönwetterurlaubern“ in südlichen Gefilde bewegt werden – das Gegenteil scheint zur Zeit der Fall zu sein: Es ist Chic, mit dem Mobil am all winterlichen Skispektakel teilzunehmen, oder einfach nur in der kalten Jahreszeit nicht auf die gewohnten mobilen Freiheiten verzichten zu müssen. In jedem Fall müssen die Hersteller diesen neuen Kundenwünschen gerecht werden, um am hart umkämpften Markt in Zukunft bestehen zu können.

Ein erster Schritt in diese Richtung ist das bewusste einbeziehen klimaphysikalischer Grundsätze in die Entwicklung von Wohnmobilen. Bereits in der Planungsphase muss deshalb systematisch an der Umsetzung dieser Grundsätze gearbeitet werden. Empirische Daten, „Try and Error“ sowie Tests des fertig entwickelten Mobiles in Klimakammern dürfen nicht die ausschließliche Grundlage eines Bewusstseins in den Köpfen der Hersteller sein, das Problem der „Ganzjahrestauglichkeit“ durch solche Methoden lösen zu können. Damit keine Missverständnisse aufkommen: nichts gegen diese Erfahrungen und Versuche, im Gegenteil. Erst sie liefern in Verbindung mit anderen messbaren Quellen das nötige Feedback, ob die „geplante Ganzjahrestauglichkeit“ der tatsächlichen entspricht.

Das Ergebnis dieser Diplomarbeit soll es sein, diese Situation in das Bewusstsein aller am „Mobil Beteiligten“ zu rücken. Mit der dem Anhang beiliegenden Software soll eine Grundlage für das Planen des klimatischen Verhaltens von Wohnmobilen geschaffen werden.

Ich hoffe, mit dieser Ausarbeitung einen Anstoß hinsichtlich des planbaren klimatischen Verhaltens in der Branche gegeben zu haben und bedanke mich bei allen Beteiligten, die durch ihre Unterstützung das Zustandekommen dieser Ausarbeitung ermöglicht haben.

Hildesheim, den 19. Dezember 2003



2 Grundlagen Wohnmobil

2.1 Definition Wohnmobil

„Wohnmobile sind Kraftfahrzeuge mit Einrichtungen für Wohnzwecke. Der Wohnteil muss mit seiner Einrichtung dazu geeignet sein, einer oder mehreren Personen einen Wohnaufenthalt zu ermöglichen....“ [1]. Da es sich bei den nachfolgenden Untersuchungen um die rein technische Betrachtung von Wohnmobilen handelt, wird als Mindestvoraussetzung für eine Zuordnung eines KFZ in die Gruppe der Wohnmobile folgende Ausstattung festgelegt:

- Vorhandensein mindestens einer bettähnlichen Schlaffmöglichkeit
- Festinstallierte Waschmöglichkeit
- Festinstalliertes WC
- Küchenausstattung in Form von Kochmöglichkeit, Spüle und evtl. Kühlmöglichkeit.

2.2 Wohnmobilenvarianten

Wohnmobile, welche der unter 2.1 gemachten Definition entsprechen, lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen:

- Kastenwagen
- Aufbaufahrzeuge

Bei **Kastenwagen** handelt es sich um Transporter oder Kleinbusse, deren Serienkarosserie evtl. mit Fenstern, Dämmung, Hoch-, Klapp- oder Hubdächern sowie der unter 2.1 definierten Mindestausstattung ausgestattet wurde. Eine weitläufige Bezeichnung für diese, hauptsächlich im Innenbereich modifizierten Serienfahrzeuge ist der Begriff Campingbus.

Aufbaufahrzeuge bauen auf dem Chassis eines Basisfahrzeuges, sowie einem fest oder abnehmbar darauf montierten Wohnaufbau auf. Im Wohnaufbau ist dabei die unter 2.1 aufgeführte Mindestausstattung des Wohnmobils untergebracht.

Für den europäischen Markt sind vor allem die fest mit dem Chassis montierten Aufbauten von Bedeutung. Aufgesetzte Wohncontainer und abnehmbare Wohnkabinen auf LKW oder Pick-Up-Fahrzeugen haben vor allem im Expeditionsbereich und auf dem nordamerikanischen Markt eine Bedeutung. Auf dem europäischen Markt sind diese Bauformen eher eine Randerscheinung und werden im nachfolgenden daher nicht näher erläutert.

Aufbaufahrzeuge mit fest auf dem Chassis montierten Wohnaufbauten werden in drei Grundformen unterteilt:

- Alkovenfahrzeuge
- Teilintegrierte
- Vollintegrierte



Alkovenfahrzeuge besitzen einen kastenförmigen Wohnaufbau, welcher fest mit dem Chassis eines Basisfahrzeuges verbunden ist. Der Wohnaufbau überbaut dabei das Fahrzeugfahrerhaus des Basisfahrzeuges. In diesem, auch als Alkoven bezeichneten Überbau, befindet sich eine Schlafgelegenheit des Wohnmobils.

Teilintegrierte besitzen den gleichen Wohnaufbau wie Alkovenfahrzeuge. Allerdings entfällt die Schlafgelegenheit über dem Fahrzeugfahrerhaus.

Typisch für Alkovenfahrzeuge und Teilintegrierte ist, dass der gesamte vordere Fahrzeugbereich (Fahrerhaus) dem des vom Nutzfahrzeughersteller gelieferten Serienmodells entspricht.

Vollintegrierte Wohnmobile haben im Vergleich zu den beiden erstgenannten Varianten einen komplett eigenständigen Aufbau, basierend auf dem Chassis eines Nutzfahrzeugherstellers. Der gesamte vordere Fahrzeugbereich ist bei diesem Typ in den Aufbau integriert, so dass Türen, Kotflügel und meist auch die Frontscheibe des Basisfahrzeugs entfallen.



Abbildung 2-1: Campingbus



Abbildung 2-2: Alkovenfahrzeug



Abbildung 2-3: Teilintegrierter



Abbildung 2-4: Integrierter

2.3 Konstruktion

Außenbauteile eines Wohnmobils

Ein Wohnmobil besteht grundsätzlich aus folgenden Außenbauteilen:

- Außenwänden
- Dach
- Fahrzeugboden
- Einbaukomponenten, wie Türen, Fenster, Dachluken, etc.



Um eine genauere klimatische Betrachtung des Wohnmobils zu gewährleisten, erscheint es sinnvoll, diese grundsätzliche Einteilung um den Fahrerhausbereich zu erweitern. Diese detaillierte Betrachtung der Außenbauteile ermöglicht es, Schwachstellen, wie sie gerade im Bereich des Fahrerhauses vorhanden sind, besser zu analysieren.

2.3.1 Außenwände

Die Wandkonstruktionen aller gängigen Reisemobile setzen sich aus einem dreischichtigen Aufbau zusammen:

- Außenhaut
- Isolierung
- Innenverkleidung

Als Materialien für die Außenhaut werden hauptsächlich glatte und strukturierte Aluminiumbleche oder glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) verwendet.

Die zwischen den Schichten angebrachte Isolierung besteht aus geschlossen- oder offenporigen Schäumen, die als Plattenware oder „Ortschaum“ eingebracht werden.

Beschichtete Holzwerkstoffplatten oder Kunststoffplatten, in seltenen Fällen Aluminiumbleche, bilden die Innenverkleidung der Außenwände. Die Beschichtung der Furniersperrholzplatten hat hierbei hauptsächlich optische und hygienische Gründe und besteht daher aus Folien, Melaminharzbeschichtungen oder Kunststoffbespannungen.

Um den Wandaufbau zu stabilisieren und Einbauteilen eine Befestigungsmöglichkeit zu geben, werden bei den meisten Herstellern Holzleisten oder Alu- und Stahlprofile in die Wände eingelegt.

Die Herstellung der Wände erfolgt üblicherweise im Warmpressverfahren. Dabei werden die verschiedenen Schichten mit Klebstoff belegt und anschließend in einer Heizpresse zu einem sogenannten Sandwich verpresst. Einige Hersteller verkleben nur Außen- und Innenverkleidung sowie die eingebrachten Leisten bzw. Profile und schäumen die Hohlräume zwischen Außen- und Innenverkleidung nachträglich mit speziellen Schäumen („Ortschaumverfahren“) aus.

Oft werden parallel zu diesen Sandwichwänden auch GFK-Bauteile im Außenwandbereich verwendet. Grundsätzlich finden diese Bauteile vor allem da Verwendung, wo starke dreidimensionale Krümmungen den Einsatz der glattflächigen Sandwichwände erschweren. Als Einsatzbeispiel seien hier vor allem Heckwände, Alkoven und Frontbauteile von Integrierten genannt.

Je nach Einsatzbestimmung werden diese GFK-Formteile unter Umständen gedämmt, indem Schaumdämmstoffe beim Laminieren der Formteile zwischen die Innen- und Außenschicht eingebracht werden.

2.3.2 Dach

Die Dachkonstruktionen entsprechen in Aufbau und Herstellung den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Außenwandkonstruktionen. Vermehrt werden hier allerdings vor allem im Alkovenbereich fertig laminierte Bauteile aus GFK eingesetzt, da diese, wie bereits erwähnt, eine rationelle Fertigung gekrümmter dreidimensionaler Außenflächen zulassen.



Einige Hersteller setzen im Dachbereich auch dickes Furniersperrholz mit eingelegtem Dämmstoff und einer Wetterschutzschicht aus Aluminium oder GFK ein, um ein voll begehbares Dach zu erhalten.

2.3.3 Fahrzeugboden

Prinzipiell werden in Wohnmobilen zwei Konstruktionsarten von Fahrzeugböden eingesetzt:

- Einfachboden
- Doppelboden

Welcher dieser beiden Fahrzeugböden verwendet wird, hängt in erster Linie vom verwendeten Basisfahrzeug bzw. dessen Tragrahmen ab. Basisfahrzeuge mit einer serienmäßigen Bodenkonstruktion des Nutzfahrzeugherstellers stellen häufig einen Kompromiss zwischen verschiedenen Einsatzzwecken dar. Sie sind vom Fahrzeughersteller folglich so konstruiert, dass sie z.B. sowohl als Wohnmobil als auch als Basis für Krankenwagen oder andere Transportfahrzeuge einsetzbar sind. Aufgrund der großen Ausgangshöhe der Rahmenoberseite können diese Serienchassis nur mit einem Einfachboden ausgestattet werden.

Einfachböden sind einteilige Sandwichböden aus Holzwerkstoffplatten und einer Zwischendämmung, welche direkt auf das Serienchassis des Basisfahrzeugs aufgesetzt werden. An der Außenseite erfolgt in Abhängigkeit vom verwendeten Plattenmaterial eine Beschichtung mit Unterbodenschutz.

Basisfahrzeuge, die meist von speziellen Herstellern nachträglich mit einem sogenannten Tieffrahmen ausgestattet wurden, haben eine geringere Höhe an der Rahmenoberseite. Diese Tatsache ermöglicht den Einsatz eines Doppelbodens bei zugleich identischer Innenraum- und Fahrzeuggesamthöhe wie bei Modellen mit Einfachboden.



Abbildung 2-5:
ALKO – Tieffrahmenchassis (Hersteller Fa. ALKO) vor der Montage der Doppelbodenbaugruppe. Die rot gestrichelte Linie markiert die Lage des späteren gedämmten Innenbodens.

Der Doppelboden besteht grundsätzlich aus einem Innen- und einem Außenboden. Der Raum zwischen den beiden Schichten wird zur Installationsführung, als Unterbringung der Wassertanks und als zusätzlicher Stauraum genutzt. Die Lage der Dämmebene ist dabei vom Konzept des Herstellers abhängig. Liegt die Dämmung im Außenboden, ist der gesamte Doppelbodenbereich gedämmt. Ein solcher Boden erfor-



dert allerdings sehr aufwendige und sorgfältige Abdichtung aller außenliegenden Doppelbodenzugänge, wie z.B. Stauraumklappen. Da diese Art von Doppelböden meist komplett beheizt werden, erwärmt sich auch der Fußboden auf der Wohnmobilinnenseite, was sich im allgemeinen positiv auf die Behaglichkeit auswirkt.

Eine andere Möglichkeit ist die Verlegung der Dämmebene in den Bereich des Innenbodens. Diese Variante wird auch von der Firma Knaus bevorzugt. Im Gegensatz zur außenliegenden Dämmebene kann bei dieser Konstruktion auf den Einsatz aufwendiger Doppelbodenzugänge verzichtet werden. Des Weiteren ist die Dämmebene meist weniger stark zergliedert und unterbrochen. Nachteile dieser Konstruktion sind vor allem der zusätzliche Dämmaufwand im Bereich der Wassertanks sowie die Installationsführung im Innenraumbereich. Ebenso muss auf den angenehmen Nebeneffekt der Fußbodenerwärmung verzichtet werden.

Die im folgenden abgebildeten Darstellungen zeigt das von der Firma Knaus eingesetzte Doppelbodenprinzip.



Abbildung 2-6:
Fertig zusammengebaute Doppelbodenbaugruppe vor der Montage auf ein Tiefrahmenchassis. Der hier abgebildete Doppelboden wird auch im Knaus Sun Liner (untersuchtes Modell) eingesetzt.

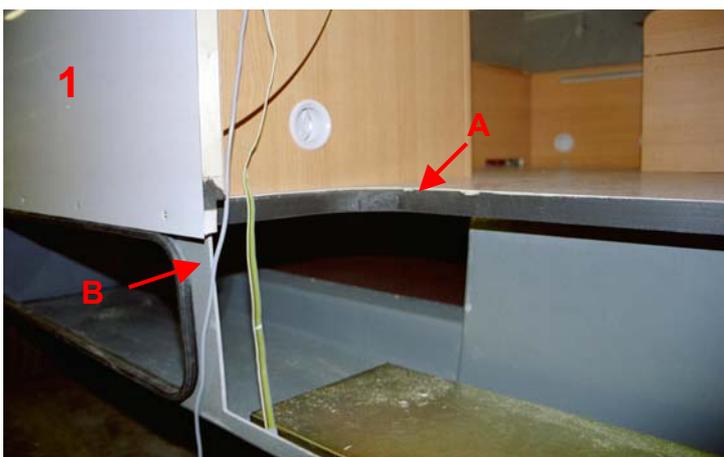


Abbildung 2-7:
Schnittdarstellung der fertig montierten Doppelbodenbaugruppe. Gut zu erkennen ist die dicke obere Dämmebene (A) im Fußbodenbereich sowie die relativ dünnen GFK-Seitenstaukästen (B) im ungedämmten unteren Doppelbodenbereich.

Die Tendenzen der letzten Jahre verlaufen eindeutig hin zum Doppelboden. Hauptgründe dafür sind vor allem der zusätzliche Stauraum sowie die Aufnahme eines Großteils der Installation im Doppelboden. Bei entsprechender Ausführung ist auch eine Verbesserung der Wärmedämmung des Wohnmobilinnenraums durch die vom Doppelboden geschaffene Zwischenzone zu erwarten.



Die Herstellung der Sandwichelemente ist in den [Anlagen Abschnitt 2.1](#) in einer kurzen Bildfolge dokumentiert.

2.3.4 Einbaukomponenten

Zu den Einbaukomponenten in die Wohnmobilaußenhülle zählen folgende Bauteile:

- Türen und Klappen
- Seitenfenster
- Dachfenster
- Lüftungskomponenten

Da es sich bei den im folgenden beschriebenen Einbaukomponenten um Bauteile handelt, die während der Montage des Wohnmobilaufbaus installiert werden, fallen die Fenster und Türen der Basisfahrzeuge nicht in diese Unterteilung. Diese mit dem Basisfahrzeug gelieferten Komponenten werden im Zuge der Betrachtung des Fahrerhauses analysiert.

Eine Ausnahme stellen dabei die Campingbusse auf Basis von Kastenwagen dar, da sie mit den Schiebetüren und Hecktüren der Serienfahrzeuge des jeweiligen Nutzfahrzeugherstellers ausgerüstet sind. Allerdings werden die Hohlräume der Türen mit verschiedenen Dämmstoffen (z.B. EPS, Mineralwolle, Polyethylen, etc.) je nach Hersteller mehr oder weniger aufwendig ausgedämmt. Die Tür- und Fensterdichtungen der Fahrzeuge verbleiben dabei im Serienzustand.

Türen und Klappen eines Wohnmobils bestehen oft aus dem gleichen Material und Schichtaufbau wie die Wandflächen, in welche sie integriert sind. Grund hierfür sind die bei der Formatierung der Seitenwände anfallenden Ausschnitte im Bereich von Klappen und Türen. Diese Ausschnitte werden in Rahmen gesetzt, mit Beschlägen versehen und anschließend wieder in die Außenwand montiert.

Eine andere Variante ist die Montage von Zulieferern vorgefertigter Klappen und Türen.

Entscheidend für die dämmtechnische Qualität beider Tür- bzw. Klappenvarianten sind in erster Linie die verwendeten Beschläge, Rahmen und Dichtungen.

Bei den **Seitenfenstern** werden hauptsächlich horizontale Schiebefenster, vertikale Ausstellfenster und Festverglasungen eingesetzt. Hinsichtlich der Konstruktion wird zwischen Rahmenfenstern und vorgehängten Fenstern unterschieden. Rahmenfenster besitzen einen profilierten Rahmen, der in die Wandöffnung eingesetzt wird und aus Gründen der Dichtheit und Stabilität die angrenzende Wandfläche im Bereich der Öffnung sowohl innen- wie außenseitig einfasst.

Vorgehängte Fenster werden einfach auf die Außenhaut der Wand aufgesetzt und überdecken die Wandöffnung. Aufgrund von Luft- und Feuchtedichtheitsproblemen sowie der schlechten Wärmeisolierung hat sich diese Bauweise im Wohnmobilbau nicht durchsetzen können. Diese preislich günstigere Fenstervariante findet vor allem bei günstigen Wohnwagen ihre Verwendung und wird in den hier aufgeführten Betrachtungen daher nicht näher erläutert.



Tests der Firma Seitz (Fensterhersteller) in der Kältekammer haben ergeben, dass ein mit Rahmenfenstern ausgestattete Wohnwagen eine ca. 4 Kelvin höhere mittlere Innentemperatur und einen um ca. 15 % reduzierten Gasverbrauch gegenüber einen identisch ausgestatteten Wohnwagen mit vorgehängten Fenstern aufweist. [2]

Weitere Laboruntersuchungen des häufig in Wohnmobilen eingesetzten Seitz S4 – Fensters ergaben einen Wärmedurchgangskoeffizienten U_w von 2,40 W/(m²K) bzw. 1,65 W/(m²K) bei einem Fenster mit geschlossenem Rollosystem. [2]

Die Rahmen der Fenstersysteme werden aus verschiedenen Kunststoffen oder Aluminium gefertigt. Ein Großteil der Aluminiumkonstruktionen weist dabei aus Kostengründen keine thermische Trennung der Profilebenen auf. Die Anzahl der Dichtungsebenen beschränkt sich meist bei einer Dichtung.

Als Scheibenmaterial finden Kunststoffgläser aus Acryl Verwendung, die als Doppelscheiben mit eingeschlossener Luftschicht zum Einsatz kommen. Oft sind innenraumseitig Insektenschutzgitter und Sonnenschutzrollo in die Fenstersysteme integriert. Dabei handelt es sich um außenseitig aluminiumbeschichtete Rollostoffe oder sogenannte Plissees, die im geschlossenen Zustand eine Luftschicht in ihren Faltschichten aufbauen.

Ähnlich den Türen und Klappen, so sind auch bei den Fenstern die dämmtechnischen Qualitäten in erster Linie von den verwendeten Beschlägen, Rahmen und Dichtungen abhängig.

Relativ neu auf dem Markt sind Ausstellfenster mit außen montierten Rollläden.

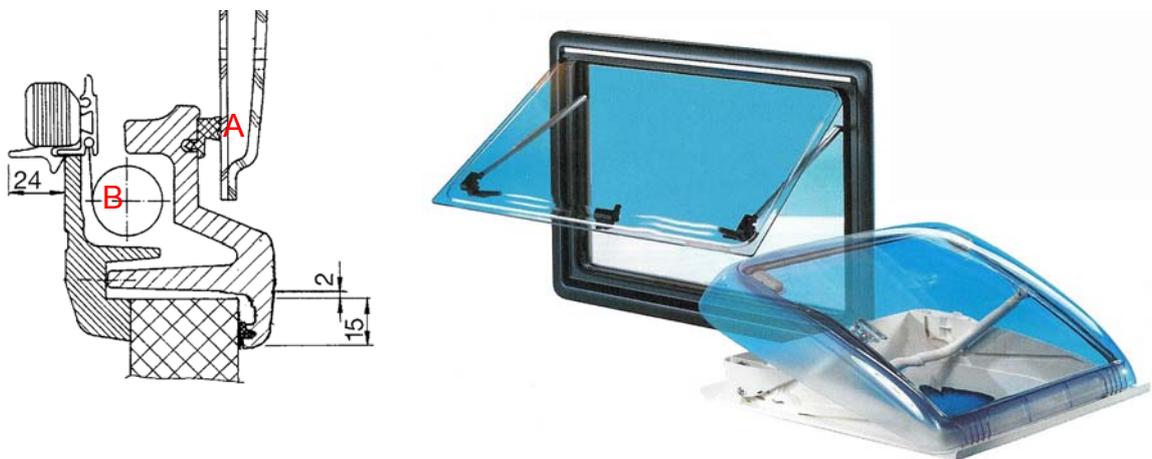


Abbildung 2-8: Typisches Rahmenfenster (Seitz S4) sowie ein Dachfenster (Seitz Heki), wie sie in vielen Wohnmobilen Verwendung finden. Die Schnittdarstellung des S4 - Rahmenfensters zeigt die einfache Dichtungsebene (A) und das in den Fensterrahmen integrierte Sonnenschutzrollo (B).

Dachfenster / Dachluken werden je nach Einsatzzweck als aufstellbare, nicht lichtdurchlässige Luken mit reiner Lüftungsfunktion oder als durchsichtige Bauteile mit oder ohne Zwangsbelüftung (siehe Abschnitt 2.5.5) eingesetzt. Die verwendeten Materialien entsprechen dabei denen der Seitenfenster. Rollos und Insektenschutzgitter sind teilweise in den Innenrahmen der Dachfenster integriert.



Wie in Abbildung 2-8 erkennbar ist, überdecken die Scheiben der meisten Dachfenster den Fensterrahmen komplett. Grund dafür ist vor allem die bessere Dichtheit gegenüber eindringender Nässe im Fahrbetrieb des Wohnmobils.

Lüftungskomponenten in der Außenhülle des Wohnmobils dienen der Leitung von Zu- und Abluft für brennerbetriebene Installationskomponenten, wie z.B. Heizungen, Kühlschränke oder aber zur gesetzlich vorgeschriebenen Zwangsbelüftung des Wohnmobileninnenraumes [3]. Da es sich dabei um zwingend notwendige Luftdurchlässe handelt, kann hinsichtlich dämmtechnischer Aspekte nur versucht werden, diese Öffnungen bzw. Luftströme auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren und bedarfsabhängig zu gestalten.

Beim Thema Außenwandausschnitten gilt der Grundsatz: „Weniger ist Mehr“. Gerade die Zerstückelungen der Außenhülle sind für einen nicht unerheblichen Teil der klimatechnischen Probleme von Wohnmobilen verantwortlich. Im **Abschnitt Thermografie 4.1** werden einige dieser Problemstellen sichtbar.

Die nachfolgenden Bilder (Abbildung 2-9) zeigen am Beispiel einer Außenwandklappe, wie problematisch sich die oft verwendeten einteiligen Aluminiumrahmen hinsichtlich der Wärmebrückengefahr verhalten. Das linke Bild zeigt eine einteilige Aluminiumrahmenkonstruktion (A), bei welcher die Wärme nahezu ungehindert durch den Rahmen abfließen kann. Die Rahmenkonstruktion im rechten Bild hingegen ist durch eine Gummieinlage (B) in eine Innen- und Außenhälfte getrennt und somit thermisch entkoppelt. Weiterhin besitzt diese Konstruktion einen Doppelpfalz und somit zwei Dichtungsebenen (C). Da diese Konstruktion kostenmäßig weit über der einfachen Variante im linken Bild liegt, ist ihre Verwendung meist nur hochpreisigen Wohnmobilen vorbehalten.

Prinzipiell lassen sich die unten abgebildeten Konstruktionsprinzipien und die damit verbundenen dämmtechnischen Konsequenzen auf alle Türen und Fenster übertragen.

Eine entscheidende Forderung an die Hersteller und Zulieferer ist demzufolge die Entwicklung und Herstellung kostengünstiger thermisch getrennter Aluminiumprofile oder stabiler, UV - beständiger Kunststoffprofile mit grundsätzlich zwei Dichtungsebenen.

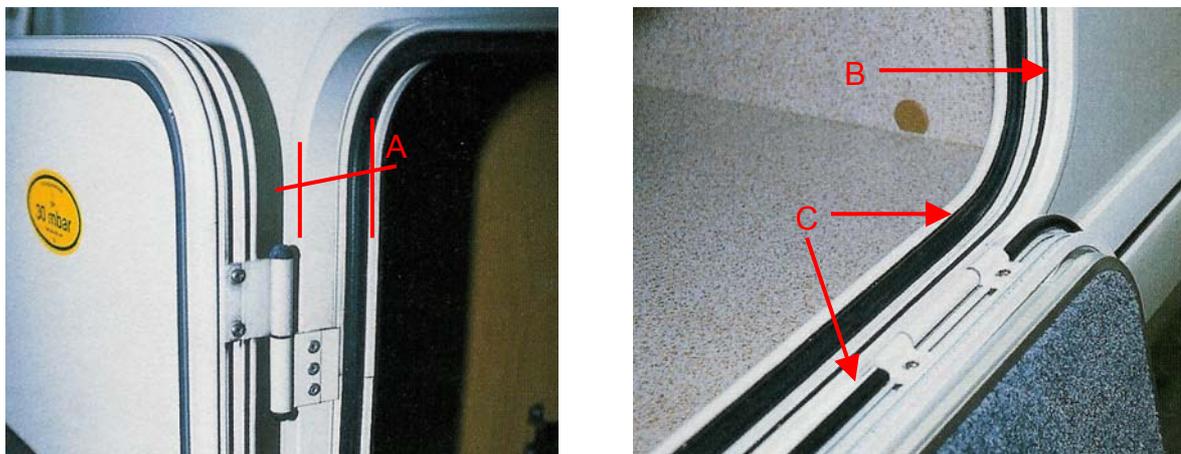


Abbildung 2-9: Links: Üblicher Aluminiumrahmen mit einteiligen Außenrahmen (A) und einer Dichtungsebene. Rechts: Aufwendiger, durch Gummieinlage (B) im wandseitigen Rahmenprofil thermisch getrennter Aluminiumrahmen mit insgesamt zwei Dichtungsebenen (C).



2.3.5 Fahrerhaus

Die Fahrerhäuser von Wohnmobilen lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

- Serienmäßiges Fahrerhaus des Basisfahrzeuges
- Fahrerhaus eines integrierten Wohnmobils

Die **Fahrerhäuser** der meisten Campingbusse, Alkovenfahrzeuge und teilintegrierten Wohnmobile entsprechen, was ihren äußeren und inneren Aufbau betrifft, dem Serienstandard des jeweiligen Basisfahrzeuglieferanten. Lediglich Türen, Fahrerhausboden und Dach werden eventuell durch zusätzliche Dämmmaßnahmen verstärkt.

Da die Basisfahrzeuge oft als Nutzfahrzeuge konzipiert sind, werden seitens der Fahrzeughersteller kaum Anstrengungen unternommen, diese Fahrerhäuser hinsichtlich ihres klimatischen Verhaltens im Wohnmobilbetrieb zu verbessern. Spürbar sind diese Problemzonen vor allem im Bereich Spritzwand (Trennwand Motor – Innenraum) mit den dämmtechnisch schlecht isolierten Durchgängen von Leitungen und anderen Fahrzeugkomponenten. Hinzu kommen die Übergänge von Aufbau und Basisfahrzeug, die nicht nur von der Betrachtung der Wärmebrücken her sondern auch hinsichtlich der Spritzwasserdichtheit als problematisch zu bezeichnen sind. Als weiterer Schwachpunkt können die einfach verglasten Scheiben im Fahrerhaus, die Radläufe sowie nicht gedämmte Holme und Hohlräume der Karosserien angesehen werden.

Einige Hersteller versuchen daher die Problemzone Fahrerhaus durch Schiebetüren, etc. vom übrigen Aufbau abzutrennen. Gerade bei kleineren und mittleren Mobilen geht der Trend allerdings in die genau umgekehrte Richtung: Fahrerhäuser werden durch drehbare Sitzen und hochklappbare Alkovenbetten bewusst in den übrigen Wohnraum integriert. Was vom Raumgewinn durchaus positiv erscheint, hat klimatechnisch betrachtet, sowohl im Winter als auch im Sommer negative Auswirkungen auf die Temperierung des Wohnmobileninnenraums.

Integrierte Wohnmobile umgehen die oben erwähnten Probleme teilweise, in dem sie eine durchgängige Außenhaut auch im Bereich des Vorderwagens aufweisen. Je nach Aufwand des Herstellers werden dabei mehr oder weniger Komponenten des Basisfahrzeuges verwendet. Nachfolgendes Foto zeigt ein solches, auch als Windlauf bezeichnetes, Basisfahrzeug.



Abbildung 2-10: Windlauf eines integrierten Wohnmobils vor der Montage des Aufbaus. Häufig entfallen bei diesen Windläufen auch Außenkotflügel und Motorhaube.



Als klimatische Problemzonen der integrierten Wohnmobile müssen die große Frontscheiben sowie die oft vorhandene, völlige Integration des Fahrerhauses in den Wohnbereich angesehen werden. Versuche, diesen Bereich durch Rollos hinter den Scheiben (also innenseitig) dämmtechnisch zu entschärfen, bringen, wie auf den im **Abschnitt 4.1** dargestellten Thermografieaufnahmen ersichtlich, nur unbefriedigende Verbesserungen hinsichtlich des Wärmedurchgangs.

2.4 Materialien im Bereich von Außen- und Innenbauteilen

Nachfolgende Tabelle stellt eine Auflistung der im Wohnmobilbau häufig verwendeten Materialien sowie deren Einsatzbereiche dar. Die Bezeichnung der Materialien erfolgt dabei Hersteller unabhängig und ausschließlich zu Übersichtszwecken. Auf die genauen Materialbezeichnungen und die für diese Untersuchungen relevanten Kennwerte der von der Firma Knaus verwendeten Materialien wird im **Abschnitt ...** detaillierter eingegangen.

Material	Außenwand	Dach	Unterboden	Innenausbau	Anmerkungen
Aluminiumblech	X	X			
Stahlblech	X	X	X		Bauteile der Basisfahrzeuge
Nadelholz	X	X		X	Einsatz in den Wand und Dach zur Aussteifung
Laubholz				X	
Furniersperrholz	X	X	X	X	
Fahrzeugbau- platte			X		
Spanplatte				X	Selten, da hohes spezifisches Gewicht und feuchteempfindlich
MDF				X	Siehe Spanplatte
HDF				X	Siehe Spanplatte
Schichtstoffe	X	X		X	Innenbekleidung der Außenbauteile, Möbelbau
Furnier	X	X		X	Innenbekleidung der Außenbauteile (selten), Möbelbau
Kunststoff- Dekorfolien	X	X		X	Innenbekleidung der Außenbauteile, Möbelbau
Plastik	X	X	X	X	Verschiedene Anbauteile
GFK	X	X	X		Außenschichten von Bauteilen Anbauteile, komplette Dächer, Türen, etc.
Glas	X				Fahrzeugscheiben, meist im Fahrerhausbereich
Acrylglas	X	X			Fensterscheiben
EPS	X	X	X		Dämmmaterial
XPS	X	X	X		Dämmmaterial
PUR	X	X	X		Dämmmaterial, als Hart- oder Ortschaum
Glasfaser	X	X	X		Dämmmaterial
Mineralwolle	X	X	X		Dämmmaterial

Tabelle 2-1: Typische Materialien und deren Verwendung in der Wohnmobilindustrie.



2.5 Klimatechnik in Wohnmobilen

2.5.1 Allgemeines

Der derzeitige Ausrüstungsstand von Wohnmobilen hinsichtlich klimatechnischer Anlagen umfasst folgende Baugruppen:

- Heizungsanlagen
- Lüftungsanlagen
- Klimaanlage

Des Weiteren laufen Versuchsreihen über den Einsatz von Brennstoffzellen und Sterlingmotoren zur Stromerzeugung und Heizwärmegewinnung. Aufgrund der zur Zeit noch auftretenden technischen Probleme sowie der hohen Anschaffungskosten können diese Techniken noch als Randerscheinungen auf dem Markt betrachtet werden. Mittelfristig bieten sie jedoch ein enormes Potential, da sie eine weitestgehend autarke und effiziente Strom- oder Wärmeerzeugung gewährleisten können.

2.5.2 Heizungsanlagen

Grundsätzlich lassen sich die in Wohnmobilen verwendeten Heizsysteme sowohl hinsichtlich der Funktionsweise als auch der verwendeten Energieform unterscheiden:

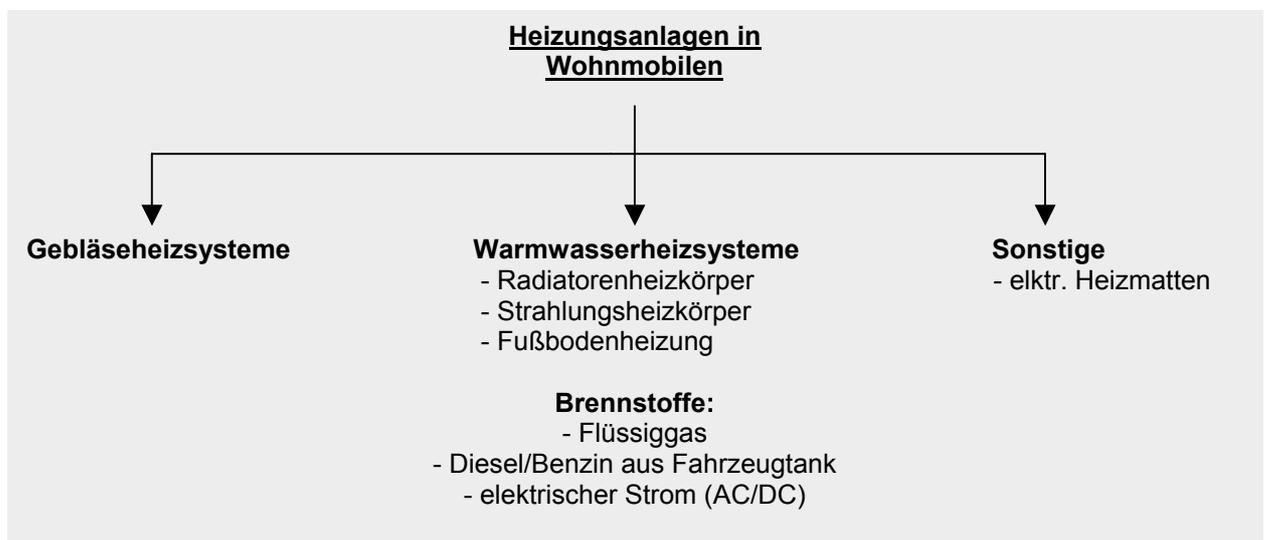


Abbildung 2-11: Übersicht der gängigen Heizungsanlagen in Wohnmobilen.

Zu den **Gebläseheizungen** zählen alle Luftheizungen, welche kalte Luft aus dem Wohnmobileninnenraum erwärmen und anschließend direkt oder über ein Luftleitungssystem an diesen zurückführen.

Warmwasserheizsysteme erwärmen einen Wasserkreislauf, in welchem das Wasser die Wärme zu Heizkörpern transportiert, wo sie anschließend, je nach Art der Heizkörper, in konvektiver Form und als Wärmestrahlung an den Wohnmobileninnenraum abgegeben wird.



Bei den **sonstigen Heizsystemen** sind vor allem die elektrischen Fußbodenmattenheizungen zu nennen. Sie erzeugen durch in eine Matte eingebettete Widerstandsdrähte Wärme. Aufgrund des hohen Stromverbrauchs sind diese Heizungen für einen längeren, vom Feststromnetz unabhängigen Betrieb nicht geeignet.

Für die hier durchgeführten Untersuchungen kann diese Einteilung der Heizsysteme als primär angesehen werden. Eine Unterscheidung hinsichtlich der von den Heizsystemen umgewandelten Energieträger ist für die nachfolgenden Betrachtungen eher sekundär und sei deshalb hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt:

- Flüssiggas verarbeitende Heizungen
- Kraftstoff (Diesel, Benzin) verarbeitende Heizungen
- Elektroheizungen

2.5.3 Gebläseheizsysteme

Gebläseheizsysteme sind die mit Abstand am häufigsten in Wohnmobilen verwendeten Heizungsanlagen. Bei diesen Systemen wird die aus dem Innenraum angesaugte Kaltluft erwärmt und anschließend durch ein Leitungssystem an die Austrittsstellen im Wohnmobileninnenraum befördert. Um die Wärme im Leitungssystem zu transportieren, werden der Wärmeerzeugung je nach Leitungslänge und Wärmeaustrittsöffnung eine oder mehrere, meist drehzahlregelbare, Gebläse nachgeschaltet. Einfachere Systeme begnügen sich mit einem Warmluftaustritt direkt an der Wärmequelle.

Als das verbreitetste Erwärmungssystem dienen hierbei Flüssiggasbrenner, die teilweise mit Boilern zur Warmwasserbereitung kombiniert werden. Ebenso befinden sich aber auch Diesel/Benzin betriebene Brennersysteme auf dem Markt, welche nach dem gleichen Prinzip wie die Flüssiggasbrenner arbeiten, ihren Brennstoff allerdings aus dem Kraftstofftank des Fahrzeugs beziehen. Eine Ausnahmeerscheinung stellen die mit elektrischem Strom betriebenen Gebläseheizregister dar (hoher Energiebedarf).

Nachfolgende Abbildung verdeutlicht das Funktionsprinzip einer mit Flüssiggas betriebenen Gebläseheizung mit integrierte Warmwasserboiler.

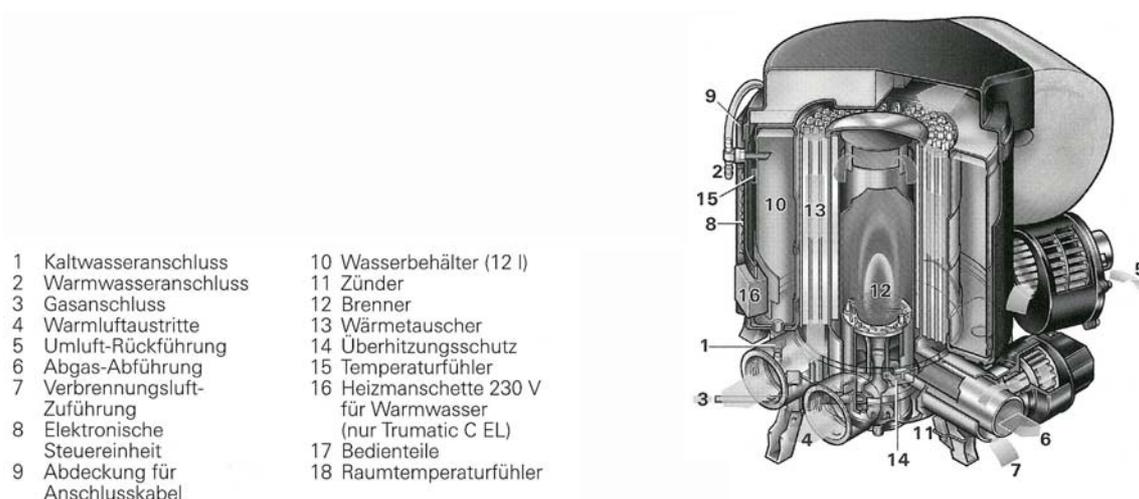


Abbildung 2-12: Aufbau einer typischen Gebläseheizung mit integriertem Warmwasserboiler (Truma C6002)



Von entscheidender Bedeutung für die Behaglichkeit und Aufheizdauer eines Wohnmobillinnenraumes sind aus anlagentechnischer Sicht neben der reinen Brenner- und Gebläseleistung vor allem die Anordnung und Anzahl der Warmluftaustritte im Innenraum. Wie bereits anfangs erwähnt, begnügen sich einfache Systeme damit, die erwärmte Luft unmittelbar nach deren Erwärmung an einem einzigen Auslass in den Innenraum abzugeben. Diese Art der Warmluftverteilung kann aufgrund der Größe und Innenraumgestaltung moderner Wohnmobile als nicht mehr zeitgemäß bezeichnet werden – folglich findet sie auf dem Markt in dieser Form auch keine Beachtung mehr. Lediglich in kleineren Campingbussen oder als Zusatzheizung zum eigentlichen Heizsystem hat diese zweifellos einfache Form der Innenraumerwärmung noch ihre Daseinsberechtigung.

Nachfolgende Darstellung zeigt eine gebräuchliche Verteilung der Warmluft am Beispiel eines Alkovenfahrzeug durch mehrere, im Fahrzeug verteilt angeordnete, Warmluftaustritte:

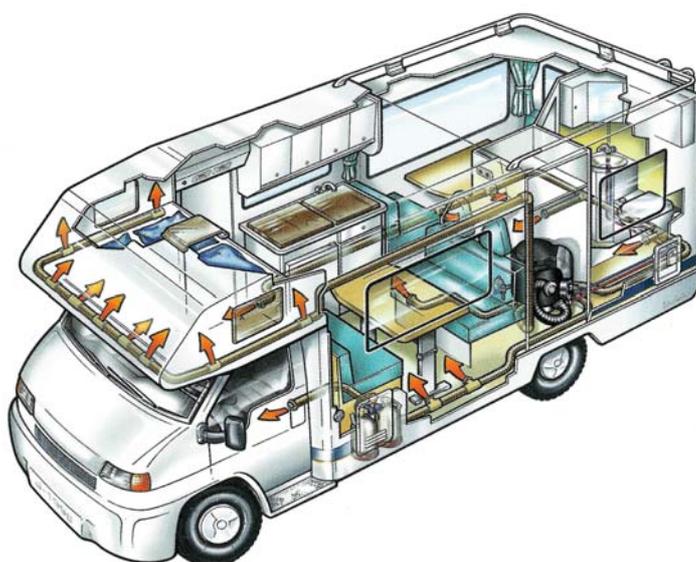


Abbildung 2-13:
Warmluftverteilsystem in einem Wohnmobil mit Gebläseheizung.

Um die Strömungsgeschwindigkeiten an den Warmluftaustritte zu verringern, aber auch um den Effekt einer Flächenheizung mit Wärmestrahlung nachzuempfinden, wird der Warmluftstrom in bestimmten Bereichen des Innenraums durch viele unmittelbar nacheinander angeordnete Luftaustritte in den Raum abgegeben (perforierte Warmluftrohre). Diese sogenannten Flächenbeheizungen werden bevorzugt in solchen Innenraumbereichen angeordnet, in denen Strahlungswärme und minimierte Strömungsgeschwindigkeiten der Warmluft für Behaglichkeit sorgen sollen. Als Einbaubeispiele seien hier vor allem Sitzgruppen und Betten genannt.

2.5.4 Warmwasserheizsysteme

Im Gegensatz zu den auf hauptsächlich konvektiver Wärmeabgabe beruhenden Gebläseheizsystemen arbeiten die im folgenden dargestellten Warmwasserheizsysteme auf Basis der Abgabe von Wärmestrahlung durch ein von der Heizung bzw. dem Wärmetransportmedium erwärmten Heizkörper. Da im Bereich dieser Heizkörper Luftzirkulationen auftreten, die in einigen Fällen durch Gebläse verstärkt werden, setzt sich die abgegebene Wärme je nach Art des Heizkörpers immer aus einem Strahlungsanteil sowie einem konvektiven Anteil zusammen.



Warmwasserheizungen basieren auf dem gleichen Funktionsprinzip wie die aus dem Wohnungsbau bekannten Warmwasserheizsysteme: Ein Heizgerät erwärmt dabei einen oder mehrere Wasserkreisläufe, in denen eine Pumpe für die Zirkulation und somit für den Transport des Wassers zu den Heizkörpern sorgt. Als Energielieferant dienen die bereits im Abschnitt Gebläseheizsysteme genannten Energieträger.

Die zur Übertragung der Wärme an den Innenraum dienenden Heizkörper der Wasserheizungen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Wirkprinzips ebenfalls nicht von den im Wohnungsbau gebräuchlichen Modellen. Es gibt neben verschiedenen Formen von Plattenheizkörpern, Handtuchheizkörper, Konvektoren - mit oder ohne integriertem Lüfter - auch Fußbodenheizungen.

Wie bei den Gebläseheizsystemen gibt es auch bei den Wasserheizungen Kombinationen, bei welchen ein Boiler zur Warmwassererwärmung in das Heizsystem integriert ist.

Aufgrund des hohen technischen Aufwandes bei der Verlegung der Warmwasserleitungen finden Warmwasserheizsysteme vor allem in teuren Wohnmobilen ihre Verwendung. Um das träge Ansprechverhalten dieser Systeme zu kompensieren, werden Warmwasserheizsysteme in vielen Fällen mit Gebläseheizungen kombiniert.

2.5.5 Lüftungsanlagen

Die Belüftung von Wohnmobilen geschieht prinzipiell auf drei von einander unabhängigen Arten:

- einer vorgeschriebenen Zwangsbelüftung
- einer manuellen Lüftung durch den Nutzer
- sowie einer mechanischen Belüftung

Die **Zwangsbelüftung** gewährleistet die gesetzlich vorgeschriebene Belüftung des Wohnmobileninnenraumes. Sie erfolgt bei den meisten Wohnmobilen über Dachluken mit in den Rahmen integrierten, permanent offenen Luftdurchlässen. Diese meist aus Kostengründen installierten Dachluken garantieren zwar (wenn nicht vom Benutzer „modifiziert“) die geforderte Zwangsbelüftung, sorgen aber gleichzeitig dafür, dass es während der Fahrt zu erheblichen Zuglufterscheinungen im Wohnmobilaufbau kommt. Ein weiteres Problem ist die oftmals nicht vorhandene vollkommene Schnee- und Regendichtheit.

Die DIN EN 721 „Anforderungen an die Sicherheitslüftung“, sowie einige andere Bestimmungen auf verschiedenen Exportmärkten beinhalten klare Forderungen an Größe und Anordnung der Zwangsbelüftungen. Auszugsweise sei an dieser Stelle Tabelle 1 der o.g. Norm abgebildet:

Gesamtgrundfläche des bewohnbaren Freizeitfahrzeugs m ²	Mindestlüftung im oberen Bereich (Dachabzugsöffnung) mm ²	Mindestlüftung im unteren Bereich mm ²
bis 5	7.500	1.000
über 5 bis 10	10.000	1.500
über 10 bis 15	12.500	2.000
über 15 bis 20	15.000	3.000
über 20	20.000	5.000

Tabelle 2-2: Mindestanforderungen der Lüftungsöffnungen in Räumen mit Geräten ohne geschlossenen Verbrennungskreislauf gemäß DIN EN 721.



Auf die **manuellen Lüftungsmöglichkeiten** durch Fenster, Türen und Dachhauben soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, da sie nutzerabhängig sind und somit nicht in Zusammenhang mit den technischen Grundlagen eines Wohnmobils bezüglich dessen Lüftungsanlagen gebracht werden können. Im **Abschnitt 8.6** wird näher auf den Aspekt der manuellen Lüftung durch den Nutzer eingegangen.

Eine **mechanische Belüftung** des Wohnmobilaufbaus kann durch das in Wohnmobilaufbauklimaanlagen vorhandene Gebläse durchgeführt werden (**Siehe dazu Abschnitt 2.5.6**). Dabei wird die Verdampfer- und Kompressoreinheit nicht in Betrieb genommen. Es besteht sowohl die Möglichkeit des Umluft- und des Frischluftbetriebes. Da die momentane Ausstattung der meisten Neufahrzeuge noch keine serienmäßige Klimaanlage enthält, sind allerdings nur wenige Wohnmobile mit solchen Systemen ausgestattet.

Zur Zeit versuchen einige Hersteller Lüftungssysteme einzuführen, die bei Bedarf Frischluft von der Fahrzeugunterseite in den Innenraum einblasen. Eine Bewertung solcher Maßnahmen soll an dieser Stelle nicht abgegeben werden. Es bleibt zu untersuchen, welche Temperaturen tatsächlich unterhalb des Fahrzeugbodens bei sommerlichen Bedingungen herrschen – vor allem wenn man davon ausgeht, dass ein Wohnmobil u.U. häufiger am Tag bewegt wird und die vorhandene Restwärme des Motors unter dem Fahrzeugboden noch lange nach dem Parken vorhanden ist. Eine temperaturgesteuerte Ansaugklappe im Bodenbereich könnte eine solche Situation entschärfen.

Eine weitere mechanische Belüftungsmöglichkeit bieten Dachfenster mit integriertem Ventilator. Diese reichen von einfachen schaltbaren Ventilatoren, bis hin zu temperatur- und drehzahlgesteuerten Lüftern, welche über im Wohnmobilinnenraum angebrachte Sensoren gesteuert werden.

Die Belüftungsanlage des Basisfahrzeuges ist aufgrund ihres hohen Energieverbrauches und der ausschließlichen Konzentration auf den Bereich des Fahrerhauses nicht für eine dauernde mechanische Belüftung des gesamten Wohnmobils geeignet.

2.5.6 Klimaanlagen

Klimaanlagen, welche für den Einsatz in Wohnmobilen in Frage kommen, können gemäß ihres Wirkprinzips in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- Verdunstergeräte
- Kompressoranlagen

Als weiteres Unterscheidungskriterium können der Montageort und die benötigte Energieart angesehen werden. Nachfolgende Übersicht gibt dazu einen schematischen Überblick:

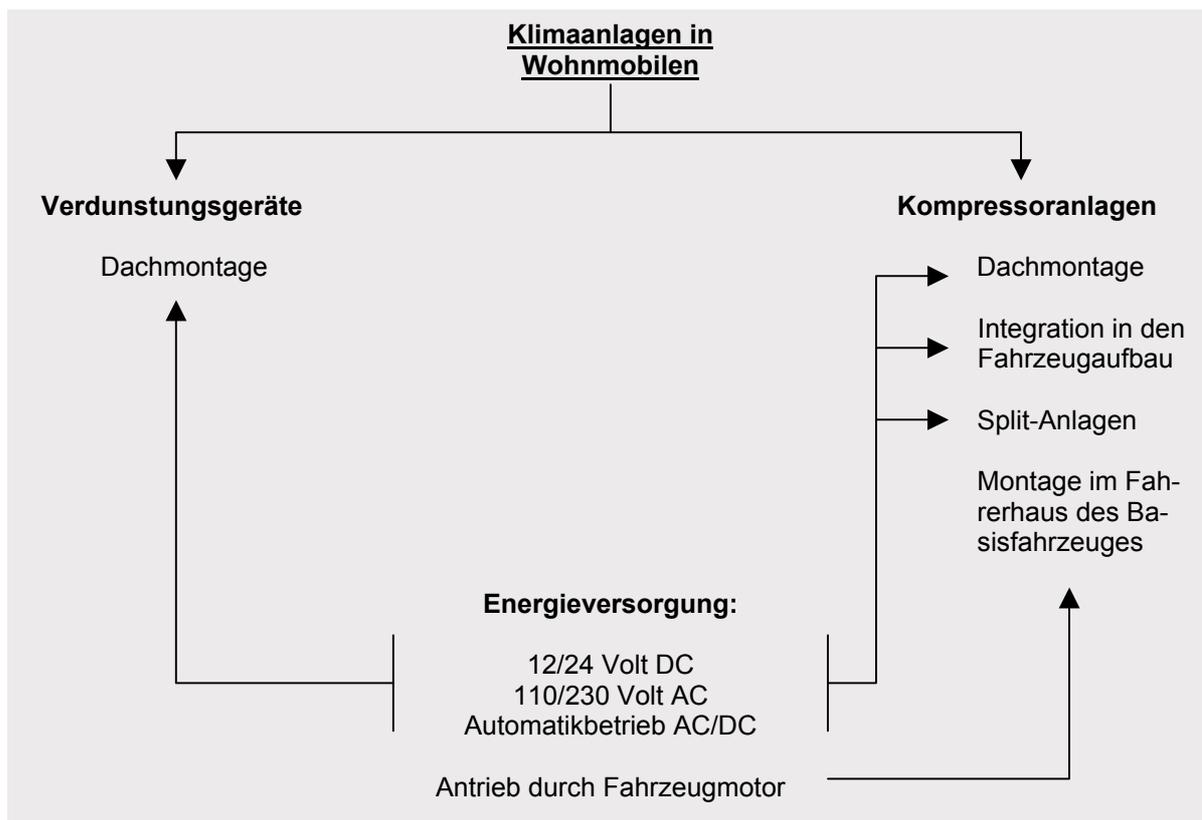


Abbildung 2-14: Übersicht der verschiedenen Klimaanlagen im Wohnmobil.

Verdunstungsanlagen nutzen den Effekt des Energieentzuges in Folge des Aggregatzustandwechsels einer verdunstenden Flüssigkeit. Hierbei wird Wasser in der Anlage verdunstet und kühlt dabei die durchströmende Luft ab. Aufgrund der Tatsache, dass die ohnehin geringe Kühlleistung dieser Anlagen mit der Zunahme des Luftfeuchtegehalts der zu kühlenden Luft abnimmt, hat sich dieses Wirkprinzip nicht am Markt durchsetzen können. Für diese Anlagen sprechen geringes Gewicht, niedrige Anschaffungskosten sowie der geringe Stromverbrauch.

Kompressoranlagen arbeiten nach dem als bekannt vorausgesetzten Prinzip eines Kompressorkühlschranks. Ihr Hauptunterscheidungskriterium ist neben der Einbaulage im Wohnmobil vor allem die benötigte Energieform:

Während die Klimaanlage des Basisfahrzeugs vom Fahrzeugmotor über eine mechanische Verbindung (z.B. Keilriemen) angetrieben wird, erfolgt der Betrieb einer in den Wohnmobilaufbau integrierten Klimaanlagen über Gleich- und/oder Wechselstrom.

Bedingt durch die Lage der Kaltluftaustritte im Fahrerhaus sowie den Ausfall der Anlage bei stehendem Motor, eignen sich die Klimaanlagen der Basisfahrzeuge nur beschränkt für die Klimatisierung des Wohnmobilaufbaus.

Mit elektrischem Strom betriebene Kompressoranlagen im Wohnmobilaufbau umgehen aufgrund ihres elektrisch betriebenen Kompressors diesen Schwachpunkt der Anlagen der Basisfahrzeughersteller. Allerdings bereitet ihr Betrieb unabhängig von einem festen Stromnetz erhebliche Schwierigkeiten bei der Bereitstellung der benötigten Energiemengen. Trotz der teilweisen Eignung für den Betrieb der Klimaan-



lage am 12 Volt DC-Bordstromnetz eines Wohnmobiles sind diese Schwierigkeiten zur Zeit nur durch den Einsatz eines Stromgenerators („Notstromaggregat“) vernünftig in den Griff zu bekommen. Diesen massiven Technikeinsatz zu bewerten, ist nicht das Anliegen dieser Ausarbeitung. Für einen vernünftigen Einsatz von Klimaanlage in Wohnmobilen bedarf es allerdings noch einer erheblichen Weiterentwicklung.

Für diese Ausarbeitung von Bedeutung sind die verschiedenen Einbausituationen der Klimaanlage:

Dachklimaanlagen werden auf vorhandene oder nachträglich eingebracht Dachöffnungen montiert. Neben der reinen Funktion als Klimaanlage im Umluftbetrieb, besitzen viele Modelle auch zusätzliche Heizfunktionen sowie reine Gebläsefunktionen. Eine automatische und manuelle Steuerung aller dieser Funktionen bezüglich Temperatur und Luftaustrittsgeschwindigkeit kann bei modernen Geräten als Standard angesehen werden. Aufgrund der Konzentration der gesamten Anlage auf einen kleinen Bereich im Wohnmobildach treten bei diesen Klimageräten systembedingte Schwierigkeiten auf. Trotz verschiedener, meist schwenkbar angebrachter Luftaustritte, ist es nur beschränkt möglich, die gekühlte Luft gleichmäßig im Raum zu verteilen. Fast unmöglich wird diese angestrebte gleichmäßige Kühlluftverteilung in größeren Wohnmobilen oder Inneneinrichtungen mit durch Türen etc. getrennten Aufenthaltsbereichen. So ist es kaum zu vermeiden, dass im Wirkungsbereich der Luftaustritte eventuell zu niedrige Temperaturen und hohe Luftgeschwindigkeiten auftreten, in den restlichen Innenraumbereichen jedoch nur unbefriedigende Temperaturen herrschen.

Die nachfolgenden Darstellung zeigen die Funktionsweise einer Dachklimaanlage im Kühl- und im Frischluftbetrieb:

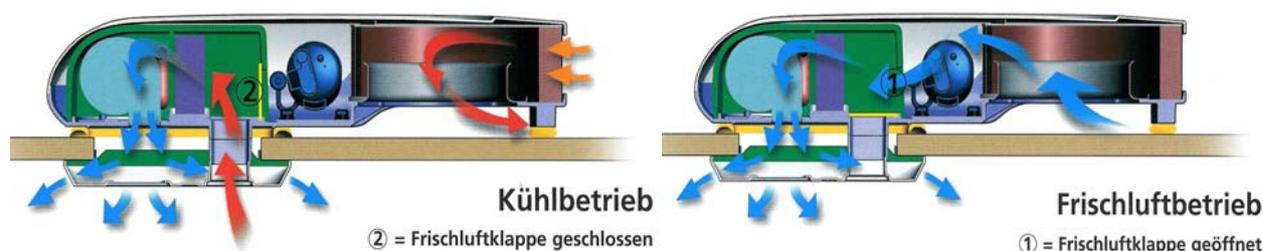


Abbildung 2-15: Funktionsprinzip von Dachklimaanlagen.

Integrierte Klimaanlage werden zum Großteil im Bodenbereich des Wohnmobils angebracht. Ihr Vorteile gegenüber den Dachklimaanlagen liegen in der niedrigen Schwerpunktlage und dem Witterungsschutzes der Anlage. Aufgrund der vielen Luftauslässe des von der Warmluftverteilung unabhängigen Kühlsystems, kann die Kühlluft gezielt an die gewünschten Stellen geleitet werden. Folglich werden gleichmäßigere Temperaturverteilungen sowie geringere Strömungsgeschwindigkeiten der eingeleiteten Kühlluft erreicht. Vorzugsweise erfolgt die Anordnung der Kaltluftaustritte im oberen Bereich des Innenraums, um durch die nach unten sinkende Kaltluft eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Innenraum zu erhalten.

Die Arbeitsweise der integrierten Anlagen erfolgt analog den Dachanlagen. Es sind ebenfalls reiner Frischluft- und Heizbetrieb möglich.



Die nachfolgende Darstellung veranschaulicht den prinzipiellen Aufbau einer integrierten Klimaanlage:

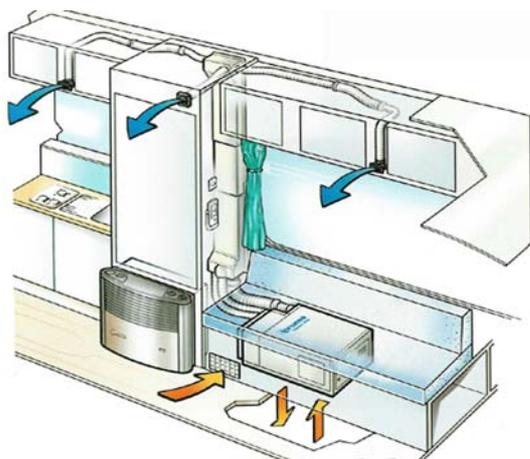


Abbildung 2-16:

In den Wohnmobilaufbau
integrierte Klimaanlage

Der Vollständigkeit halber seien an dieser Stelle noch die sogenannten Split-Anlagen erwähnt. Bei diesen Anlagen ist die Kompressoreinheit im Bodenbereich des Wohnmobils untergebracht. Der Verdampfer und das Gebläse befinden sich allerdings ähnlich der Dachklimaanlagen außerhalb des Fahrzeugs auf dem Fahrzeugdach. Bis auf den Vorteil der niedrigeren Schwerpunktlage sowie der prinzipiell möglichen Versorgung zwei getrennt angeordneter Verdunster durch eine Kompressoreinheit ist der erhöhte Nutzen gegenüber einer herkömmlichen Dachklimaanlage allerdings recht zweifelhaft.

2.5.7 Regelung der Klimatechnik

Abschließend kann festgestellt werden, dass – mit Ausnahme der Regelung der Heizungs- und Klimaanlagen – keine Steuersysteme im derzeitigen Wohnmobilbau Verwendung finden, die einen gezielten Einsatz bzw. eine Steuerung von Heizung, Klimaanlage, Außenluftöffnungen und den verschiedenen Formen der mechanischen Belüftung als Anlagenverbund ermöglichen.

Die Regelung der Heizungs- und Klimaanlagen erfolgt über einen Regelkreis bestehend aus Temperaturfühler im Innenraum und die Vorgabetemperatur durch den Benutzer an der Regeleinheit des jeweiligen Gerätes. Die Steuerung des jeweiligen Gerätes versucht, durch entsprechenden Leistungseinsatz des Gerätes die tatsächliche Innenraumtemperatur der gewünschten Temperatur (Stellgröße) anzugleichen. Bei den mit Gebläse ausgestatteten Anlagen (Gebläseheizungen, Klimaanlagen) erfolgt die Anpassung der Kühl- bzw. Heizleistung im Zusammenspiel mit der Fördermenge des Kalt- bzw. Warmluftverteilergebläses. In der Steuerung der jeweiligen Anlage sind dafür Kennlinien hinterlegt, welche die Fördermenge so bemessen, dass eine optimale Temperaturabgabe der Anlage erreicht wird.

Im Falle der Heizungsregelung von Gebläseheizungen sowie von Klimaanlagen erfolgt eine genauere Beschreibung der Regelvorgänge im [Abschnitt 3.2.2](#) im Zuge der Vorstellung des untersuchten Wohnmobilmodells.



3 Das zu untersuchende Wohnmobil

3.1 Auswahl des zu untersuchenden Wohnmobils

Die Auswahl des zu analysierenden Wohnmobilmodells wurde unter Zugrundelegung folgender Überlegungen durchgeführt:

- Bei welchem Modell sind bereits Untersuchungen in klimatechnischer Hinsicht durchgeführt worden ?
- Bei welcher Bauart treten die größten Probleme bezüglich der Klimatisierung auf ?
- Stellt das ausgewählte Modell einen Synthese von Bauteilen und Konstruktionsprinzipien dar, die in ähnlicher Form auch in anderen Modellen des Herstellers Verwendung finden ?
- Ist das gewählte Modell „Stand der Technik“ und dient als Grundlage für zukünftige Weiterentwicklungen ?
- Ist ausreichend Datenmaterial über Konstruktion und Herstellung des ausgewählten Modells vorhanden ?
- Besteht die Möglichkeit eines Praxistests mit dem betreffenden Modell ?

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien fiel die Wahl des zu analysierenden Wohnmobils auf einen Knaus Sun Liner 650 LG. Bei diesem Typ handelt es sich um ein integriertes Wohnmobil („Integrierter“) aus der aktuellen Produktion der Firma Knaus. Die Konstruktion dieses Modells stellt mit einem Doppelboden, dreidimensional gekrümmten GFK-Bauteilen sowie der Integration des Fahrerhauses in den Wohnbereich den derzeitigen Stand der Technik dar. Aufgrund des Käuferverhaltens ist daher davon auszugehen, dass sich viele Konstruktionsmerkmale mittelfristig in fast allen Volumenmodellen des Herstellers wiederfinden werden.

Wie bereits in den Grundlagen angesprochen, bereiten vor allem die Integration des Fahrerhauses in den Wohnbereich und die bei Integrierten vorhandenen großflächigen Verglasungen ernsthafte Probleme bei der Klimatisierung des Wohnaufbaus. Beim gewählten Testmodells besteht die Möglichkeit, diese Problematik eingehender zu analysieren und mit den Auswertungen der unter kontrollierten Bedingungen durchgeführten Klimaversuche zu vergleichen.

Rationalisierungsmaßnahmen im Bereich von Konstruktion, Materialwirtschaft und Fertigung führen unter anderem dazu, dass Gleichteile- und Baugruppenstrategien immer größere Bedeutung finden. Es ist davon auszugehen, dass zukünftig mehrere – beim ersten Betrachten auch unterschiedliche Modelle – auf ein und dem selben Grundaufbau basieren. Im Fall des hier untersuchten Sun Liners 650 liegt eine konstruktive Verwandtschaft mit dem Knaus Sun Traveller - einem Alkovenwohnmobil - vor. Zwar unterscheiden sich beide Baureihen durch ihren unterschiedlichen Aufbau des Vorderwagens, die eigentlichen Aufbaubereiche sind aber weitestgehend identisch. Als logische Schlussfolgerung hieraus lassen sich viele aufbauspezifische Simulationsparameter unter Berücksichtigung der starken Abweichungen der Vorderwägen auf das jeweils andere Modell übertragen.

Als letzte Kriterien waren die gute Verfügbarkeit von Konstruktionsdaten und die bei Bedarf zur Verfügung stehenden Testmodelle ausschlaggebend für die Auswahl des hier untersuchten Modells.



3.2 Technische Beschreibung des zu analysierenden Wohnmobils

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Werte und Überlegungen stellen in Verbindung mit den in [Abschnitt 7.3](#) aufgelisteten Materialkenndaten die Grundlage für die EDV-gestützte Analyse des Knaus Sun Liners 650 LG dar. Aus den hier gemachten Angaben erfolgte die direkte Generierung der einzelnen Bauteile für die noch näher beschriebenen Berechnungsprogrammen.

An dieser Stelle sei auch auf die zahlreichen Abbildungen in den [Anlagenabschnitte 2.2 sowie 3](#) verwiesen. Viele dieser Abbildungen dokumentieren die Herstellung und den Aufbau eines Knaus Sun Traveller, einem konstruktiven Verwandten des hier untersuchten Knaus Sun Liners.

3.2.1 Kurzbeschreibung des Modells

Der Knaus Sun Liner 650 LG gehört wie bereits erwähnt zur Kategorie der integrierten Wohnmobile. Seine Außenabmessungen weisen folgende Werte auf: Länge 6,80m; Breite 2,30m; Höhe 3,05m. Das Wohnmobil basiert auf einen Fiat Ducato Windlauf mit ALKO – Tieffrahmenchassis und hat ein gebrauchsbereites Leergewicht von ca. 3.150 kg.

Zur Ausstattung gehören unter anderem ein Heckbett (2 Personen), Hubbett im Fahrerhaus (2 Personen), Küchenausstattung mit Kühlschrank, 3-Flammenkocher und Spüle sowie ein mit Dusche, WC und Waschbecken ausgestatteter separater Badraum.

Durch die drehbaren Fahrer-/Beifahrersitze und die im Wohnraum folgende L-förmige Sitzgruppe ist das Fahrerhaus voll in den Wohnbereich des Aufbaus integriert.

Wand-, Dach- und Bodenbauteile (Innenbodenplatte) bestehen aus Sandwichkonstruktionen mit Holzverstärkungen in der Dämmebene. Die Frontmaske des Wohnmobils besteht aus einem dreidimensional gekrümmten GFK-Sandwichelement mit zwischen den GFK-Schichten platzierter Dämmung.

Als Besonderheit dieses Modells sind die unter dem Heckbett angeordnete Heckgarage sowie der bis zum Fahrerhaus durchgängige Doppelboden hervorzuheben. Die Dämmebene liegt im Innenboden des Doppelbodens.

In diesem Doppelboden sind die jeweils ca. 100 Liter fassenden Frisch- und Abwassertanks sowie die Zusatzbatterie untergebracht. Um ein Einfrieren der Wasserversorgung bei tiefen Temperaturen zu verhindern, sind die Bereiche der Wassertanks zusätzlich isoliert und beheizt.

3.2.2 Technische Ausstattung

Für diese Ausarbeitung sind folgende Geräte und Anlagenkomponenten von Bedeutung:

- Heizungsanlage
- Klimaanlage
- Innenraumbeleuchtung (Interne Wärmelasten)
- Kocher (Interne Wärmelasten)
- Gasabsorberkühlschrank (Interne Wärmelasten)



Heizungsanlage

Serienmäßig erfolgt der Einbau einer Trumatic C6002 Warmluft-Flüssiggasheizung mit integriertem Warmwasserboiler der Firma Truma. Der Heizungs Brenner arbeitet gebläseunterstützt und besitzt in der höchsten Brennerstufe eine Nennwärmeleistung von 6000 Watt. Der Transport der Wärmeenergie zu den Warmluftaustritten im Innenraum wird durch ein zusätzliches Gebläse mit einer maximalen Luftfördermenge von 287 m³/h gewährleistet. Die Heizungsanlage arbeitet ausschließlich im Umluftbetrieb. Eine Funktion als Lüftungsanlage ohne Inbetriebnahme des Brenners ist nicht vorgesehen.

Der Einbauort der Heizung befindet sich in einem separatem Fach im unteren Bereich des Kleiderschranks (Siehe auch Grundriss Absatz 4.2). Von diesem Punkt führen vier Heizstränge mit diversen Warmluftaustritten an die verschiedenen Bereiche im Wohnmobilaufbau. Die Leitung der Warmluft erfolgt in flexiblen Aluminiumrohren mit einem Durchmesser von 72 mm. Bis auf eine Unterdückerung im Bereich des Vorderwagens sind alle Warmluftrohre innerhalb des klimatisierten Aufbaubereichs in Schränken und Truhen verlegt. Die Wärmeabgabe der Leitungsmantelflächen hat eine Erwärmung dieser Bereiche zur Folge und geht somit dem Innenraum nicht verloren.

Der Wirkungsgrad bezüglich der Wärmeenergiegewinnung der Heizungsanlage liegt nach Aussagen des Herstellers bei ca. 95 %.

Die Steuerung der Heizung unterscheidet grundsätzlich zwischen den Betriebszuständen Sommer und Winter. Während im **Sommerbetrieb** ausschließlich in der kleinsten Brennerstufe (2.000 Watt) und ohne Warmluftgebläse das Brauchwasser im Boiler erhitzt wird, erfolgt im Winterbetrieb die Regelung der Heizung durch eine Innenraumtemperaturvorwahl am Bedienteil der Heizung. Das Bedienteil ist im Falle des Knaus Sun Liners 650 LG im Bereich der Aufbaueingangstür angebracht und beinhaltet gleichzeitig einen Raumlufttemperatursensor. Nach Inbetriebnahme der Heizung im **Winterbetriebsmodus ohne Warmwasseranforderung** und Vorwahl der gewünschten Innenraumtemperatur wird die Heizung – eine Temperaturdifferenz von > ca. 1,5 Kelvin zwischen gemessenen und einem größeren, gewählten Wert vorausgesetzt – in Betrieb gesetzt. Die Steuerung der Heizung wählt dabei in Abhängigkeit der gemessenen Temperaturdifferenz selbsttätig die erforderliche Brennerstufe (1-3) sowie die Förderleistung des Warmluftgebläses aus. Je größer die gemessene Temperaturdifferenz ist, umso höher ist folglich auch die durch die Steuerung abgerufene Brenner- und Gebläseleistung. Sobald die gewünschte Innenraumtemperatur am Sensor erreicht ist, schaltet die Heizung den Brenner und das Gebläse ab.

Im **Winterbetriebsmodus mit Warmwasseranforderung** regelt die Steuerung den Brenner nach Erreichen der gewünschten Innenraumtemperatur auf die kleinste Stufe zurück und schaltet das Warmluftgebläse ab. Der Brenner dient dann ausschließlich zur Warmwassererwärmung des Boilers. Ist dieser Vorgang ebenfalls abgeschlossen, wird der Brenner abgeschaltet.

Die beschriebenen Regelvorgänge wiederholen sich, sobald eine erneute Temperaturdifferenz von > ca. 1,5 Kelvin bezüglich Lufttemperatur auftritt. Die Warmwasserbereitung besitzt eine Hysterese von ca. 5 Kelvin.

Der Einfluss des Wohnmobilmotors beschränkt sich bei der Regelung der Heizleistung ausschließlich auf die Wahl der gewünschten Innenraumtemperatur. Direkt mit dieser Auswahl ist nur die Auswahl der Brennerstufe der Heizung in Abhängigkeit von der vorhandenen Temperaturdifferenz verbunden. Auf die Leistung des Warmluftgebläses hat der Nutzer keinen direkten Einfluss.



Die Regelung des Warmluftgebläses erfolgt wie bereits erwähnt in Abhängigkeit von der gewählten Leistungsstufe des Brenners. Bis zum Erreichen einer Temperatur von ca. 95 °C unmittelbar am Warmluftaustritt der Heizung, arbeitet das Warmluftgebläse grundsätzlich mit maximaler Drehzahl. Nach dem Überschreiten dieser Temperatur versucht die Heizungssteuerung, die vom heizungsinternen Temperaturfühler unmittelbar am Warmluftaustritt gemessene Temperatur zwischen etwa 100 °C und 110 °C zu halten. Um diesen, für den Wirkungsgrad der Heizung günstigen Bereich einzuhalten, wird das Warmluftgebläse bei sinkender Luftaustrittstemperatur zurückgeregelt, bis der Wärmestrom erneut eine Temperatur im optimalen Bereich annimmt. Steigt hingegen die Temperatur unmittelbar am Warmluftaustritt der Heizung, so wird die Warmluftgebläsedrehzahl erhöht und somit mehr Wärmeenergie von der Heizung in das Warmluftverteilsystem befördert.

Diese, vom direkten Eingriff des Benutzers unabhängige Regelung des Warmluftgebläses ermöglicht es dem Heizungshersteller mit einer einzigen Art von Heizungssteuerung eine Vielzahl unterschiedlicher Wohnmobile unabhängig von deren individuellen Warmluftverteilsystem auszustatten. Des weiteren werden Schutzmechanismen zum Verhindern von Überhitzungserscheinungen dem Einfluss von Fehlbedienung oder Manipulation durch den Nutzer entzogen.

Klimaanlage:

Abgesehen von einer Fahrerhausklimaanlage (motorabhängig) kann das Wohnmobil optional mit zusätzlichen Kompressorklimaanlagen vom Typ Truma Frostair 1700 bzw. 2300 ausgestattet werden. Dabei handelt es sich um Geräte, deren Kompressor- und Verdampferinheit grundsätzlich mit 110/230 V Wechselstrom betrieben werden müssen. In Analogie zu den im Abschnitt xxxx abgehandelten Grundlagen ist ein sinnvoller und dauernder Betrieb dieser Anlagen derzeit nur mit einer stationären Wechselstromversorgung möglich.

Die Anlagen haben je nach Ausführung eine Kühlleistung gemäß DIN EN 814 von 1.700 Watt und eine maximale Luftfördermenge von 260 m³/h (Frostair 1700) bzw. 2.300 Watt und 330 m³/h (Frostair 2300). Die Montage der Anlage erfolgt in der Truhe unter der vorderen Sitzbank. Maximal drei unabhängig von der Heizung betriebene Kaltluftstränge aus flexiblen Aluminiumrohr mit einem Durchmesser von 65 mm werden zu den im oberen Bereich des Fahrzeugs installierten Kaltluftaustritten verlegt. Die Klimaanlage arbeitet ausschließlich im Umluftbetrieb. Im Gegensatz zur Heizungsanlage ist allerdings ein reiner Umluftbetrieb ohne Kühleinheit möglich. Die Kühlung des Verdampfers im Kühlbetrieb erfolgt durch unter dem Fahrzeug angesaugte Außenluft.

Die Steuerung der Anlagenleistung basiert prinzipiell auf dem Prinzip der Heizungsanlage. Ein Temperaturfühler misst die Lufttemperatur im Innenraum und vergleicht diese mit der vom Nutzer gewählten Temperatur. Ist eine Temperaturdifferenz von > 2 Kelvin zwischen gemessenen und einem niedrigeren, vom Nutzer gewählten Wert vorhanden, wird die Anlage in Betrieb gesetzt. Nach dem Absinken der Raumtemperatur auf den gewählten Wert wird die Anlage automatisch abgeschaltet. Die Förderleistung des Gebläses lässt sich dabei manuell oder automatisch regeln. Im Automatikbetrieb wird die Förderleistung in Abhängigkeit von der vorhandenen Temperaturdifferenz der Innenraumluft und der Vorgabe des Nutzers durch die Anlagensteuerung festgelegt.



Die im folgenden beschriebenen technischen Komponenten wurden ausschließlich aufgrund ihrer Wärmeabgabe an den Wohnmobileninnenraum in die Auflistung der technischen Ausstattung aufgenommen. Die Beschreibung der Komponenten erfolgt daher ausschließlich mit Blick auf die internen Wärmelasten des Wohnmobils.

Innenraumbelichtung:

Folgende Beleuchtungsmittel werden im Knaus Sun Liner 650 LG serienmäßig verbaut:

Anzahl	Art	Einzelwirkungsgrad [%]	Einzelleistung [W]	Summe Einzelleistung [W]
1	Leuchtstoffröhre	80	11	11
2	Leuchtstoffröhre	80	8	16
8	Halogen-Kaltlichtspiegellampe	60	10	80
1	Halogen-Stiftsockellampe	50	5	5
2	Halogen-Stiftsockellampe	50	10	20
2	Glühbirnen	15	21	42
Lichtleistung der gesamten Anlage		ca. 55 %*		174 Watt

* Berechnung des Gesamtwirkungsgrades:
Gesamtwirkungsgrad der Anlage = $\frac{\sum(\text{Einzelwirkungsgrad} \times \text{Summe Einzelleistung})}{\text{Leistung der gesamten Anlage}} \times 100$

Tabelle 3-1: Serienausstattung der Innenraumbelichtung Knaus Sun Liner 650 LG

Davon ausgehend, dass der Wirkungsgrad der gesamten Beleuchtungsanlage ca. 55 % beträgt, würde beim gleichzeitigen Betrieb aller Leuchtmittel eine Wärmelast von ca. 95 Watt im Wohnmobileninnenraum freigesetzt werden. Da der gleichzeitige Betrieb aller Lampen eher unwahrscheinlich ist, erfolgt eine Abminderung dieser Wärmeleistung in Abhängigkeit zum Nutzerverhalten. Näheres dazu im [Abschnitt 8.6](#).

Gaskocher:

Eine weitere Wärmelast wird durch die Verwendung der Gaskochstellen in das Wohnmobil eingebracht. Der Wirkungsgrad der drei Kochstellen von jeweils 2.000 Watt Nennleistung beträgt annähernd 100 %. Da der gleichzeitige Betrieb aller drei Kochstellen unwahrscheinlich ist, erfolgt eine Abminderung dieser Wärmeleistung in Abhängigkeit zum Nutzerverhalten. Näheres dazu im ebenfalls in [Abschnitt 8.6](#).

Sonstige technische Ausstattung:

Die Wärmeabgabe des Ladegerätes wird in dieser Ausarbeitung nicht berücksichtigt, da sie nur im reinen Stationärbetrieb bei 230V – Wechselstromversorgung sowie im Fahrbetrieb anfällt. Ihre Anrechnung auf das Tagesnutzerprofil bezüglich der internen Wärmelasten ist daher nicht möglich.



Die Verbrennungsabgase des Absorberkühlschranks werden über ein geschlossenes Abgassystem direkt an die Außenluft abgeleitet. Des Weiteren ist der Absorberbereich des Kühlschranks zum Innenraum hin thermisch gekapselt und steht mit der zur Kühlung benötigten Außenluft in Verbindung. Eine Anrechnung auf das Tagesnutzerprofil bezüglich der internen Wärmelasten ist daher nicht notwendig, da die tatsächlich abgegebene Wärmemenge des Kühlschranks in den Innenraum von ihrem Betrag in keinem Verhältnis zur tatsächlichen Genauigkeit der hier getroffenen Annahmen steht.

3.2.3 Aufbereitung des Wohnmobils für die folgenden Untersuchungen

Um die Untersuchungen am betreffenden Wohnmobil mit ausreichender Genauigkeit durchführen zu können, bedarf es neben der bereits erfolgten technischen Analyse auch einer Massenermittlung sowie einer „Modellierung“ des zu untersuchenden Objektes.

Modellbildung für die Untersuchungen

Die Modellierung eines Objektes hat den Zweck, dass Objekt hinsichtlich der Arbeitsweise der verwendeten numerischen Verfahren aufzubereiten bzw. zu analysieren. Bei dem hier untersuchten Wohnmobil beschränkt sich diese Aufgabe hauptsächlich auf die Definition der Außenflächen. Was auf den ersten Blick einfach erscheint, erweist sich in der Praxis allerdings als durchaus erklärungsbedürftige Aufgabe. Gründe für diese Probleme sind in der Struktur des Wohnmobils und den Limitierungen der hier eingesetzten numerischen Verfahren zu suchen.

Die Struktur des Wohnmobils mit seinem Doppelboden und der beheizten Heckgarage lässt keine klare Abtrennung zwischen Innen- und Außenbereich zu. Je nach Nutzerverhalten, kann z.B. die beheizbare Heckgarage zum Innenraum gezählt werden oder nicht.

Der hier gewählte Ansatz stellt sich aufgrund der im Anschluss beschriebenen Gründe wie folgt dar:



Abbildung 3-1: Kennzeichnung des gedämmten Innenbereichs (rot dargestellt).

Die dargestellte Zonierung des Wohnmobils wurde aus folgenden Gründen gewählt:

- EDV-spezifische Gründe. Siehe dazu [Abschnitt 10.2](#)
- Die Dämmebene des Bodens liegt im Bereich des Innenbodens (A). Daher endet dort auch der gedämmte Innenbereich des Wohnmobils.



- Die Beheizung der Heckgarage (B) ist nutzerabhängig. Da es energetisch wenig sinnvoll ist diesen Raum zu beheizen, wird dieser Bereich vom gedämmten Innenraum abgetrennt. Das Heckbett (C) und die Abtrennung der Heckgarage zum Innenraum (D) stellen die Begrenzungen des gedämmten Innenraums dar.
- Der Gasflaschenkasten (E) wurde aufgrund seiner Zwangsbelüftung vom gedämmten Innenbereich abgetrennt.
- Der Motorraum (F) gehört ebenfalls nicht zum gedämmten Innenraum. Trennendes Bauteil ist die Spritzwand.

Zur besseren Veranschaulichung der Gründe dieser Zonierung sei auf die Anlagen [Abschnitt 2.1 und 2.2](#) verwiesen. Die in diesem Abschnitt abgebildeten Fotos geben einen Einblick in das „Innere“ eines Wohnmobils und tragen zum besseren Verständnis der hier getroffenen Festlegungen bei.

Größe und Schichtaufbau der Bauteile

Die Ermittlung dieser Daten erfolgte zum Großteil in einem 3D-Konstruktionsprogramm des Wohnmobilherstellers. Die ermittelten Flächenmaße können daher selbst an den dreidimensional gekrümmten Bauteilen mit einer Genauigkeit ermittelt werden, die weit über den Anforderungen der hier angestellten Untersuchungen liegt.

Die genauen Flächendaten der Bauteilflächen des Wohnmobils sowie deren Schichtaufbauten sind in den Anlagen [Kapitel 3](#) hinterlegt. Die Bauteilnummerierungen sind sowohl im Text der Diplomarbeit, den Anlagen und den verwendeten Programmen identisch. Die Kennwerte der in den Bauteilen verarbeiteten Materialien sind im [Abschnitt 7.3](#) aufgeführt.



4 Existierende klimatische Untersuchungen von Wohnmobilen

Folgendes Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse bereits durchgeführter Untersuchungen und Tests zum allgemeinen Thema „Klimaverhältnisse in Wohnmobilen“. Hauptaugenmerk liegt hierbei vor allem auf folgenden Punkten:

- Thermografische Untersuchungen
- Aufheizkurven

4.1 Thermografische Untersuchungen

Da es sich bei den in diesen Abschnitt aufgeführten Darstellungen um eine Analyse von Untersuchungen Dritter handelt, kann nicht sicher festgestellt werden, in wie fern Messfehlerbetrachtungen und verschiedene, in den Untersuchungsberichten nicht erwähnte, Randparameter in den Untersuchungsergebnissen berücksichtigt wurden. Allerdings decken sich die in den Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse mit eigenen Erfahrungen oder sind plausibel nachvollziehbar.

Bei der Thermografie handelt es sich um ein messtechnisches Verfahren zum Sichtbarmachen und Aufzeichnen von Temperaturverhältnissen an Oberflächen von Objekten hervorgerufen durch von diesen abgegebene Wärmestrahlung. Das Ergebnis der Thermografie ist ein Wärmebild (Thermogramm), auf dem das betrachtete Objekt in unterschiedlichen Farben bzw. Grauwerten dargestellt ist, die durch langwellige Infrarotstrahlung zustande kommen. Moderne Thermografiegeräte arbeiten mit Infrarotdetektoren in CCD-Bauweise und ermöglichen im Gegensatz zu herkömmlichen Wärmebildgeräten eine direkte Betrachtung der untersuchten Objekte. (vgl. [4])

Die folgenden Thermografieaufnahmen wurden im Zuge verschiedener Reportagen der Zeitschrift „promobil“ gemacht. Die Außentemperatur während den Außenaufnahmen lagen gemäß Bildangabe bei ca. minus 6 °C bis minus 9 °C. Die Außentemperaturen bei den abgebildeten Innenaufnahmen sind nicht bekannt. Trotzdem offenbaren die Aufnahmen eine Reihe von konstruktiven herstellerübergreifenden Schwachstellen, die in den jeweiligen Bildbeschreibungen nähere Betrachtung finden.

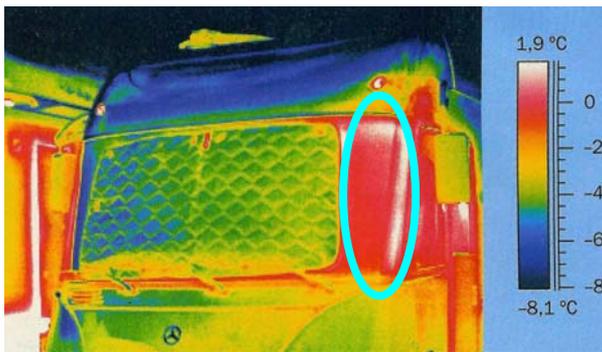


Abbildung 4-1: Links abgebildete Thermografie zeigt deutlich, welche dämmtechnischen Probleme von den großen Windschutzscheiben integrierter Wohnmobile ausgehen. Nicht das innen angebrachte Faltrollo des Herstellers sondern die viel zu kleine außen angebrachte Isolier - Matte des Benutzers isoliert wirklich.



Abbildung 4-2: Die Problemzone Fahrerhaus wird im Bild wirkungsvoll durch eine auf Maß gefertigte Außenisiermatte entschärft. Im Vergleich zu Abbildung 4-1 erweist sich auch die Abdeckung des Motorraumes als dämmtechnischer Vorteil. Als Schwachstelle ist hier ein deutlicher Wärmeverluste im Bereich des vorderen Radhauses zu erkennen.

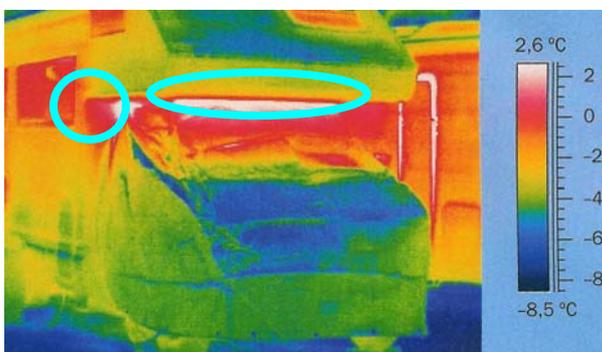


Abbildung 4-3: Wieder erweist sich eine ganzflächige, hier im oberen Bereich leicht verrutschte, Außenabdeckung des Fahrerhauses als wirkungsvoll. Erkennbar sind allerdings Schwächen im waagerechten Übergang von Alkoven und Fahrerhaus sowie im Eckbereich Aufbau – Fahrerhaus.



Abbildung 4-5: Welchen negativen Einfluss viele Außenwanddurchbrüche auf die ansonsten gute Dämmung dieses Wohnmobils haben, veranschaulicht dieses Thermogramm. Als konstruktiv gut gelöst können die thermisch gut voneinander getrennten Bauteilanschlüsse von Wand und Dach bewertet werden (Siehe zum Vergleich Abbildung 4-6).

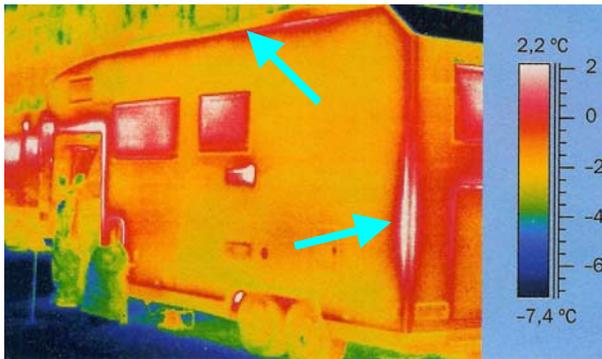


Abbildung 4-6: Deutlich zu sehen sind die Wärmebrücken im Bereich der Anschlüsse Dach – Wand. Zurückzuführen sind diese wahrscheinlich auf thermisch nicht sauber getrennte Verbindungsprofile (Siehe zum Vergleich Abbildung 4-5).

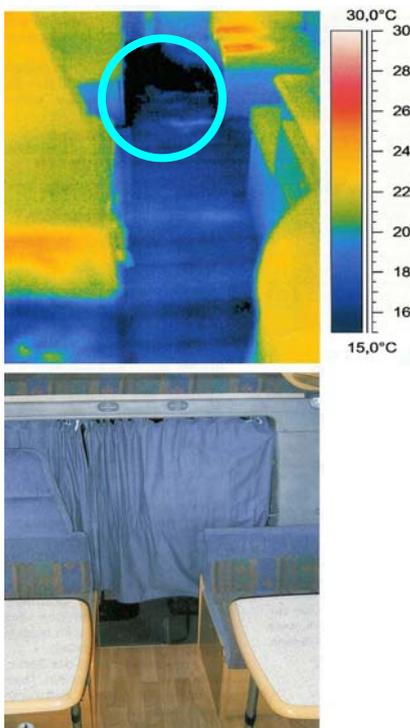


Abbildung 4-7: Im Bild offenbaren sich gravierende Schwächen bei der Dämmung des Fußbodens. Dies führt soweit, dass selbst die Stauräume unter den Sitzen sehr stark ausgekühlt sind.

Vom Fahrerhaus her dringt kalte Luft in den Bereich des Wohnmobilaufbaus ein. Der Vorhang könnte, wenn er den Durchgang vollständig abdecken würde, diese ungünstige Luftzirkulation entscheidend verringern.



Abbildung 4-8: Aufgrund ihres thermisch nicht getrennten Rahmens und der fehlenden zweiten Dichtungsebene, stellt diese Tür im Bereich des Rahmens eine von ihrer Länge her nicht zu unterschätzende Wärmebrücke dar.

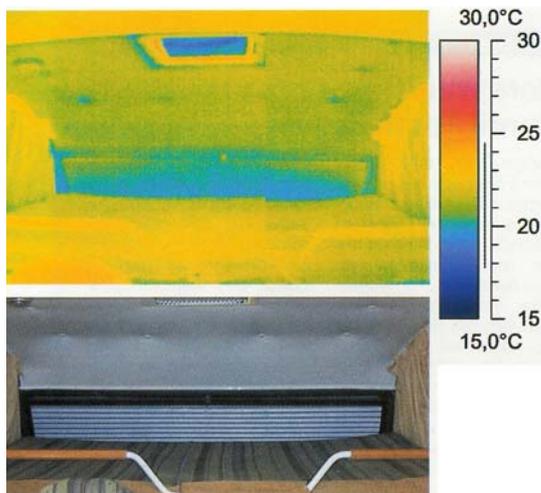


Abbildung 4-9: Erneut die Schwachstelle Windschutzscheibe. Bei diesem Integrierten wird trotz geschlossenem Rollo das Bett im scheinennahen Bereich abgekühlt.

Anhand der Thermogramme lassen sich bestimmte Zonen als allgemeine Schwachpunkte von Wohnmobilen nennen:

- Grundsätzlich alle nicht zum Wohnraum hin abgetrennten Fahrerhäuser
- Windschutzscheiben (aufgrund ihrer großen Fläche insbesondere bei Integrierten)
- Baugruppen des Basisfahrzeuges (Radkästen, Spritzwand)
- Übergänge von Bauteilgruppen hervorgerufen durch Verbindungsprofile (Dach-Wand, Wand-Wand, Aufbau-Fahrerhaus)
- Grundsätzlich alle Außenbauteildurchbrüche (Türen, Fenster, Luken, Klappen, etc.), vor allem deren Rahmenkonstruktionen
- Zwangsbelüftungen
- Abluft-/Zuluftöffnungen von technischen Geräten (Heizungen, Kühlschränke, etc.)

4.2 Aufheizkurven

Allgemeines

Aufheizversuche zählen zu den wenigen planmäßig durchgeführten Klimaversuchen im Bereich des Wohnmobilbaus. Grundlage der Durchführung sind die Anforderungen an Heizungen in Wohnmobilen gemäß DIN EN 1646 – 1 „Motorcaravans“. In dieser Norm werden u.a. Aufheizzeiten festgelegt, in welchen eine Heizungsanlage unter definierten Ausgangsbedingungen einen Wohnmobilaufbau auf eine bestimmte Temperatur temperieren muss, um einer in der DIN festgelegten Klassifizierung zu entsprechen. Die Klassifizierung der Heizungsanlage und des Wohnmobils erfolgt durch die Zuordnung geprüfter Wohnmobile zu drei unterschiedlichen Kategorien:

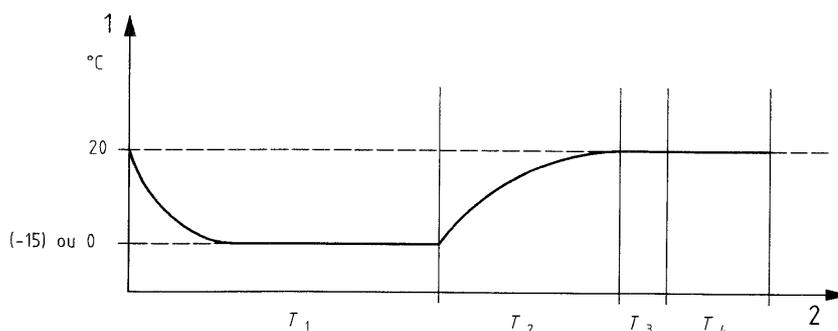


Klassifizierung	Erreichbare Mindesttemperaturdifferenz Innen/Außen
Stufe 1	Keine Anforderungen
Stufe 2	Min. 20 K, wenn die Außentemperatur 0 °C beträgt
Stufe 3	Min. 35 K, wenn die Außentemperatur -15 °C beträgt

Tabelle 4-1: Klassifizierung gemäß DIN EN 1646 – 1 „Motorcaravans“

In der Praxis werden solche Aufheizversuche in Klima- bzw. Kältekammern durchgeführt. Die Vorbereitung und Durchführung des Aufheizversuche wird in der oben genannten Norm im Anhang J klar geregelt. Auszugsweise hierfür ist nachfolgend das Diagramm J 1 dargestellt, welches den zeitlichen Verlauf einer Messung hinsichtlich der mindestens zu erreichenden Prüftemperatur aufzeichnet.

Auf die ebenfalls im Anhang J sowie Abschnitt 9 der DIN EN 1646 – 1 festgelegten Randparameter der Versuchsdurchführung wird im [Abschnitt 6.4.1](#) noch genauer eingegangen.



Legende:

- 1 Umgebungstemperatur
- 2 Zeit in h
- T1 Abkühlzeit des Wohnmobils ≥ 10 h
- T2 Aufheizzeit: Stufe 2: ≤ 2 h für 20 K
Stufe 3: ≤ 4 h für 35 K
- T3 Stabilisierungszeit = 1 h (Beginn bei Innentemperatur = 20 °C)
- T4 Messzeit ≤ 2 h zur Messung des Wärmeenergieverbrauchs

Diagramm 4-1: Diagramm für Prüftemperatur – DIN EN 1646 – 1

Analyse der Aufheizkurve eines Knaus Sun Liner 650 LG

Die hierfür von der Firma Knaus zur Verfügung gestellten Unterlagen können, da die Versuche unter bekannten Prüfbedingungen in einer Kältekammer durchgeführt wurden, als gesicherte Erkenntnisse zur Beurteilung des betreffenden Wohnmobils herangezogen werden.

Die in den [Anlagen Kapitel 4](#) beigefügten Aufheizkurven wurde in der Klimakammer bei -15°C in einem Knaus Sun Liner 650 LG der aktuellen Modellreihe aufgezeichnet.



Im Anschluss an die Aufheizphase folgen Stabilisierungs- und Verbrauchsmessphase, welche zur Messung des Energie- bzw. Gasverbrauchs der Heizungsanlage dienen. (vgl. [5])

Ergebnisse des Aufheizversuchs

Das getestete Wohnmobil vom Typ Knaus Sun Liner 650 LG hat den Aufheizversuch gemäß den Prüfbedingungen der DIN EN 1646 – 1 / Stufe 3 nicht bestanden. Nach einer Aufheizzeit von 4 Stunden lagen die Lufttemperaturen an den Normmesspunkten (M00 bis M04) zwischen ca. 15°C und 17°C anstelle der geforderten 20°C. Erst nach einer weiteren Aufheizzeit von ca. zwei Stunden wurde an diesen Stellen eine Lufttemperatur von 20°C erreicht.

Die Temperaturverteilung im Innenraum kann aufgrund der Differenzen von max. zwei Kelvin zwischen den einzelnen Messstellen (M00 bis M04, M07, M11) als gleichmäßig bezeichnet werden. Einschränkend muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass vor allem in unmittelbarer Nähe von den Oberflächen schlecht gedämmter Bauteile, wie z.B. Frontscheibe (M05: 2,1 °C nach vier Stunden) und Fahrerhausboden (M06: 5,2 °C nach vier Stunden) erheblich niedrigere Lufttemperaturen gemessen wurden.

Die gemessenen Lufttemperaturen im abgetrennten Badraum (M12, M13) des Wohnmobils liegen mit 19,4 °C und 22,8 °C nach vier Stunden im Bereich der Normvorgaben für Stufe 3.

Eine durch die in der DIN EN 721 vorgeschriebene Zwangsbelüftung hervorgerufene Schwachstelle offenbart sich im Bereich des Aufbaueinganges (M10). Trotz eines in unmittelbarer Nähe angeordneten Warmluftaustrittes erreicht die gemessene Lufttemperatur nach vier Stunden Aufheizphase in diesem Punkt nur 11 °C in unmittelbarer Bodennähe.

Ein Kuriosum stellen die Messwerte im Bereich der Heckgarage (M15) und an der Oberseite des Heckbettes (M14) dar: Im Messbereich der Garage herrschen annähernd die gleichen Temperaturen wie im Wohnraum des Fahrzeuges, was primär auf den Warmluftaustritt in der Heckgarage zurückzuführen ist. Die genau über der Messstelle M15 im Wohnraum (M14) gemessenen Temperaturen ist um ca. 3 Kelvin geringer als die gemessene Temperatur im Heckgaragenbereich. Eine Erklärung für dieses Kuriosum ist in einer wahrscheinlich vorhandenen ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Heckgaragenraum zu finden. Der dezentral in der Ecke der Heckgarage platzierte Warmluftaustritt ist nicht in der Lage, dieses relativ große Volumen gleichmäßig zu erwärmen. Es ist davon auszugehen, dass sich im oberen Bereich der Heckgarage und somit unter dem Heckbett warme Luft ansammelt. Da allerdings aufgrund der Unstetigkeit der Aufheizkurve des Garagenraumes von starken Luftbewegungen in diesem Bereich ausgegangen werden muss, wird allerdings immer auch Kaltluft an der Bettunterseite entlang strömen, die für die niedrigen Temperaturen an der Bettoberseite verantwortlich ist. Ein weiteres Indiz für große Temperaturunterschiede an verschiedenen Stellen der Heckgarage ist die im Zwischenboden (M17) gemessene Temperatur von –3 °C. Da der Zwischenboden direkt mit Heckgarage durch eine ca. 0,40 m² große Durchlademöglichkeit verbunden ist, sind Temperaturdifferenzen von annähernd 20 Kelvin zwischen den beiden Messpunkten eher unwahrscheinlich.

Bei Betrachtung der Stetigkeit der einzelnen Messkurven zeigt sich, dass die gemessenen Lufttemperaturen im Wohnraumbereich kontinuierlich und annähernd gleichmäßig ansteigen. Im Gegensatz dazu neigen die Kurven der den Außenflächen nahen Temperaturfühler oft zu starken Ausschlägen innerhalb



kürzester Zeiträume. Das gleiche gilt auch für die Aufheizkurve des Temperaturfühlers in der Heckgarage (M15). Diese Unregelmäßigkeiten lassen auf starke Luftströmungen mit unterschiedlichen Temperaturen schließen. Gründe dafür könnten in dem Aufeinandertreffen der warmen Raumluft mit den kalten Außenflächen und den sich möglicherweise im Laufe des Aufheizversuches ändernden Luftströmungen im Wohnmobileninnenraum sein.

Untersuchungen zu Temperatur und Strömungsgeschwindigkeiten an den Warmluftaustritten

Um Wohnmobilaufbauten zukünftig auch hinsichtlich des thermodynamischen Verhaltens ihrer Klimatisierungsanlagen im Zusammenhang mit der Aufbausituation simulieren und bewerten zu können, sind unter anderem auch Verfahren zur Modellbildung einer solchen Klimatisierungsanlage nötig. Diese Verfahren setzen allerdings genaue Kenntnisse über das tatsächliche Temperatur- und Strömungsverhalten von verschiedenen Anlagenkonstellationen voraus. Im hier abgehandelten Beispiel des Knaus Sun Liners wären vor allem der Einfluss von Länge, Form sowie Anzahl der Heizstränge auf die Luftaustrittstemperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten an den Warmluftaustritten von Interesse.

Vom Hersteller der Heizungsanlage, der Firma Truma, sind diesbezüglich keine umfassenderen systematische Untersuchungen durchgeführt worden, die eine wenigstens näherungsweise Ermittlung dieser Größen in Abhängigkeit von der Anlagenkonstellation ermöglichen.

Einzig die Fachzeitschrift „promobil“ [6] hat im Zusammenhang mit den von ihr durchgeführten Freilandaufheizversuchen Werte für Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten an den Warmluftaustritten ermittelt. Aufgrund der inhaltlichen Ausrichtung der Zeitschrift ist die Versuchsdurchführung relativ oberflächlich beschrieben. Dennoch lassen sich anhand der Versuchsergebnisse Tendenzen erkennen, die zukünftig bei ersten einfachen Strömungssimulation als Datengrundlage dienen könnten.

Bei den in den Versuchen bewerteten Wohnmobilen handelt es sich u.a. um folgende Modelle:

- Eura Mobil Sport 635 VB (Alkoven)
- Hytermobil S 820 (Integrierter)

Beide Modelle sind genau wie der in dieser Ausarbeitung untersuchte Knaus Sun Liner 650 LG mit einer Gas-Gebläseheizung vom Typ Truma C 6002 ausgestattet. Die verwendeten Systemkomponenten der Warmluftverteilung wie Leitungen, Verteiler, Luftaustritte, etc. sind ebenfalls bei allen Modellen in ihrer Bauart identisch und wurden innerhalb des isolierten Aufbaubereichs verlegt.

Vorausgesetzt, die bei dem Freilandversuch von „promobil“ ermittelten Werte wurden unter annähernd gleichen Voraussetzungen ermittelt, so lassen sich die Werte zumindest näherungsweise auch auf den hier untersuchten Knaus Sun Liner 650 LG übertragen. In jedem Fall ist jedoch bei detaillierteren Betrachtungen eine grundsätzliche Untersuchung dieser hier angestellten, mehr oder weniger empirischen Zusammenhänge unter kontrollierten Bedingungen notwendig.

Bei der Auswertung der von „promobil“ ermittelten Daten wurden von den oben genannten Testmodellen die Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten mit den aus den Grundrissen herausgemessenen Warmluftleitungslängen verglichen. Des Weiteren wurden die Beeinflussung von Temperatur und Stö-



mungsgeschwindigkeit durch die Form des Lüftungsstranges sowie die Art und Anzahl der Luftaustritte analysiert.

Da Längen- und Geometrieanalyse der Heizungssysteme im Grundrissmaßstab M 1:100 erfolgte, sind gewisse Toleranzen in der Anlagendarstellung und somit in der Längenmessung unvermeidbar.

Gespräche mit der Entwicklungsabteilung des Anlagenherstellers (Fa. Truma) ergaben darüber hinaus gewisse Zweifel an der Messmethodik bzw. den Werten der Strömungsgeschwindigkeiten. Kritisiert wurde dabei vor allem der Einsatz eines mit der Strömung in Kontakt stehenden Anemometers. Diese Form der Strömungsmessung führte laut Anlagenhersteller bei eigenen Versuchen zu unbefriedigenden Ergebnissen. Eine kontaktlose Messung, z.B. mit einem Schallanemometer hätte in den Versuchen vom „promobil“ zu exakteren und tendenziell einheitlichen Werten geführt, da die Messapparatur den zu messenden Luftstrom praktisch nicht beeinflusst. Diese Beeinflussung des Luftstromes durch das Anemometer ist wahrscheinlich auch für teilweise unlogische Strömungsmessergebnisse in den Freilandversuchen von „promobil“ verantwortlich. Eine Analyse der Strömungszusammenhänge wurde daraufhin nicht durchgeführt.

Die Versuchsmessungen wurden bei maximaler Heizlast und Erreichen der Betriebstemperatur der Heizungsanlage durchgeführt. Die gemessenen Lufttemperaturen im Innenraum (nicht die an den Warmluftaustritten !) lassen darauf schließen, dass die Dimensionierung der Heizungsanlagen den Gegebenheiten des jeweiligen Wohnmobils angepasst ist. Folglich kann auch davon ausgegangen werden, dass die Anlagen in einem effizienten Wirkungsbereich betrieben wurde und somit negative Beeinflussungen durch Überlastung der Anlage auszuschließen sind. Ein effizienter Wirkungsbereich der Anlage ist dann erreicht, wenn das Verhältnis von Heiz- und Gebläseleistung zum Wärmeverteilsystem (Leitungen, Luftaustritte, etc.) so gewählt ist, dass die erzeugte Wärmeenergie an alle Stellen des Heizsystems transportiert werden kann. Ein uneffizienter Wirkungsbereich einer Anlage wäre beispielsweise eine Anlage, die zwar über eine hohe Wärmeenergieerzeugung verfügt, durch ein schwaches Gebläse aber nicht in der Lage ist, diese Wärmeenergie in alle bereiche des Anlagensystems zu transportieren.

Das nachfolgend abgebildete Diagramm verdeutlicht die Abhängigkeit zwischen der Entfernung der einzelnen Warmluftaustritte und der gemessenen Lufttemperatur an den jeweiligen Luftaustritten bei gut abgestimmten Heizungsanlagen.

**Abhängigkeit Temperatur Warmluftaustritt-Leitungslänge
Truma C6002 (Eura Mobil und Hymer)**

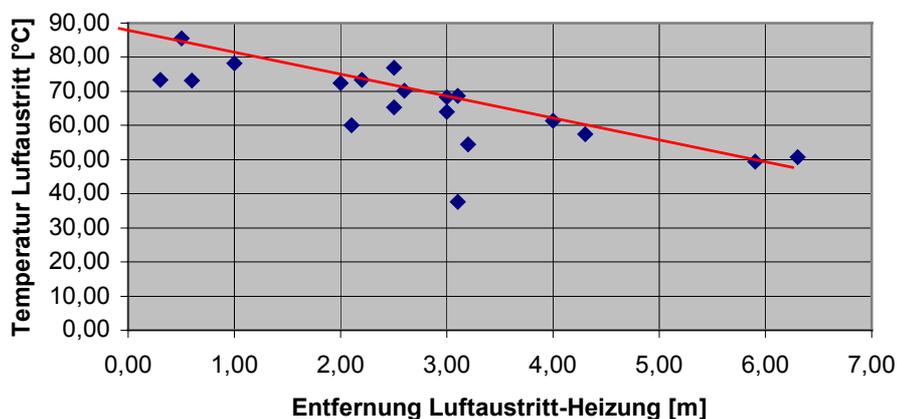


Diagramm 4-2:
Auswertung der
„promobil“ -
Untersuchungen



Es war zu erwarten, dass mit zunehmender Entfernung von der Heizung die gemessene Lufttemperatur aufgrund der Wärmeabgabe über die Leitungsmantelflächen an den weiter entfernt liegenden Warmluftaustritten abnimmt. Dass diese Temperaturabnahme jedoch relativ unabhängig von der Art der Luftaustritte, der Form des Luftstranges sowie der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten erfolgt, lässt auf folgende Zusammenhänge schließen:

- Bei Betrieb der Heizungsanlage im effizienten Wirkungsbereich fließt trotz der „Luftverluste“ vorher angeordneter Luftaustritte genügend Warmluft zu den am Ende des Lüftungsstranges liegenden Luftaustritten nach. Daher ist der Einfluss der vor der eigentlichen Messstelle angeordneten Warmluftaustritte auf das Messergebnis bei der hier angestellten überschlägigen Betrachtung zu vernachlässigen. Physikalisch lässt sich dieses Phänomen damit begründen, dass bei der Teilung eines Luftvolumenstromes mit einer bestimmten Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit die jeweilige Temperatur der geteilten Luftvolumenströme unmittelbar nach der Teilung gleich der Temperatur unmittelbar vor der Teilung des Luftvolumenstromes ist.
- Hauptgrund für die Temperaturabnahme sind die Wärmeverluste der Luftvolumenströmung an die Ummantelung des Luftleitrohres. Je größer die Länge des Luftleitrohres wird, desto größer wird die wärmeableitende Fläche und somit der Wärmeenergieverlust der Luftvolumenströmung. Beeinflusst wird der Wärmeenergieverlust der Luftvolumenströmung neben dem Wärmedurchgangswiderstand der Ummantelung bzw. deren Fläche vor allem durch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft. Diese Einflüsse anhand der faktisch ungesicherten Messwerte von „promobil“ aufzudecken ist allerdings nicht möglich und bedarf daher der anfangs geforderten Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen.

Bei der weiteren Analyse der „promobil“ - Messdaten ließen sich keinerlei weitere physikalisch begründbaren Zusammenhänge zwischen Temperatur, Länge der Wärmeleitungen und Strömungsgeschwindigkeiten erkennen. Dies ist, wie bereits erwähnt, vor allem auf die starke Streuung der Ergebnisse der Strömungsgeschwindigkeitsmessungen zurückzuführen.

Aus den in Diagramm 4-2 dargestellten Zusammenhängen lässt sich jedoch folgende empirische Gleichung zur Berechnung der Temperatur an den Luftaustritten in Abhängigkeit von der Entfernung zur Heizung aufstellen:

$$y = mx + n$$

$$m = \text{Funktionssteigung} = \tan \alpha = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{49,4^\circ\text{C} - 78,2^\circ\text{C}}{5,9\text{m} - 1,0\text{m}} = -5,88$$

$$n = x - \text{Nullstelle} = 88^\circ\text{C}$$

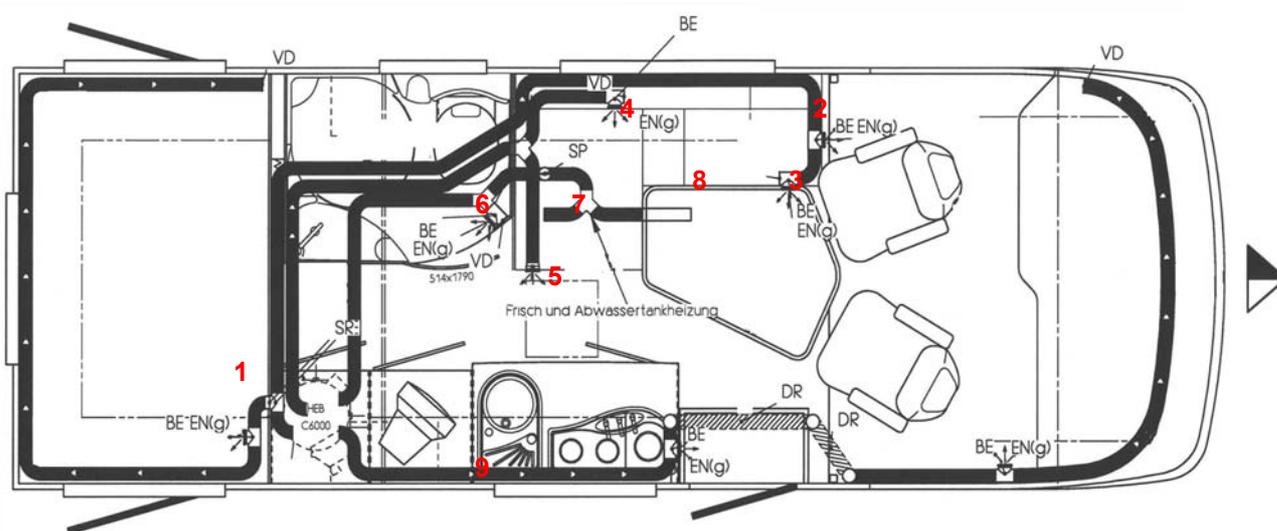
$$y = -5,88x + 88$$



Randbedingungen für die Gültigkeit dieser Gleichung:

- Gasbläseheizung vom Typ Truma C 6002
- Heizungsanlage ist richtig dimensioniert
- Betrachtung erfolgt unter Vollast im Aufheizbetrieb
- Die Gleichung wurde mangels Datenmaterial nicht hinsichtlich ihrer Gültigkeit bei der Temperaturberechnung von perforierten Warmluftrohren (z.B. Truma Isotherm-System) zur Flächenbeheizung überprüft. Daher ist bei solchen Systemen nur der letzte Punkt vor Beginn der Perforierung durch die Gleichung abgedeckt.

Übertragen auf das hier zu untersuchende Modell Knaus Sun Liner 650 LG lassen sich folgende Temperaturwerte an den unten abgebildeten Warmluftaustritten errechnen:



Warmluftaustritt	Entfernung von Heizung [m]	Errechnete Temperatur [°C]	Anmerkung
1	0,40	85,6	
2	5,20	57,4	
3	5,60	55,1	
4	3,90	65,1	
5	3,20	69,2	
6	1,80	77,4	
7	2,50	73,3	
8	2,90	70,9	
9	0,9	82,7	Letzter Punkt vor Perforation (Isothermrohr)

Tabelle 4-2: Empirisch ermittelte Luftaustrittstemperaturen des Knaus Sun Liner 650 LG.

Im Zuge der im Anschluss an diese Diplomarbeit stattfindenden Untersuchungen am Knaus Sun Liner 650 LG sollen die hier aufgestellten Berechnungen auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden.

Da keine thermodynamischen Simulationen zur Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit gehören, sind die im letzten Abschnitt gewonnenen Erkenntnisse für die eigentliche Ausarbeitung von sekundärer Bedeu-



tung. Um die enorme Wichtigkeit dahingehender Untersuchungen zu verdeutlichen, wurde dieser Abschnitt allerdings mit in diese Ausarbeitung aufgenommen.

5 EDV-gestützten Verfahren zur klimatischen Untersuchung von Wohnmobilen

5.1 Grundlagen der EDV-gestützten Verfahren

Grundlage für diese Ausarbeitung in numerischer Hinsicht sind verschiedene bauphysikalische Berechnungsprogramme aus den Bereichen der Wärmebrückenbetrachtung, der Berechnung instationärer thermohygrischer Transportvorgänge sowie der instationären energetischen Simulation.

5.2 Klassifizierung der EDV-gestützten Verfahren

Die Einteilung der numerischen Verfahren erfolgt aus Gründen der Übersichtlichkeit sowie der für den durchschnittlichen Anwender belanglosen EDV-spezifischen Klassifizierungen (Finite Elemente Methoden, Gewichtsfaktormethode, usw.) nach einer eigenen, auf die Anwendung im Freizeitfahrzeugbau ausgerichteten Klassifizierung:

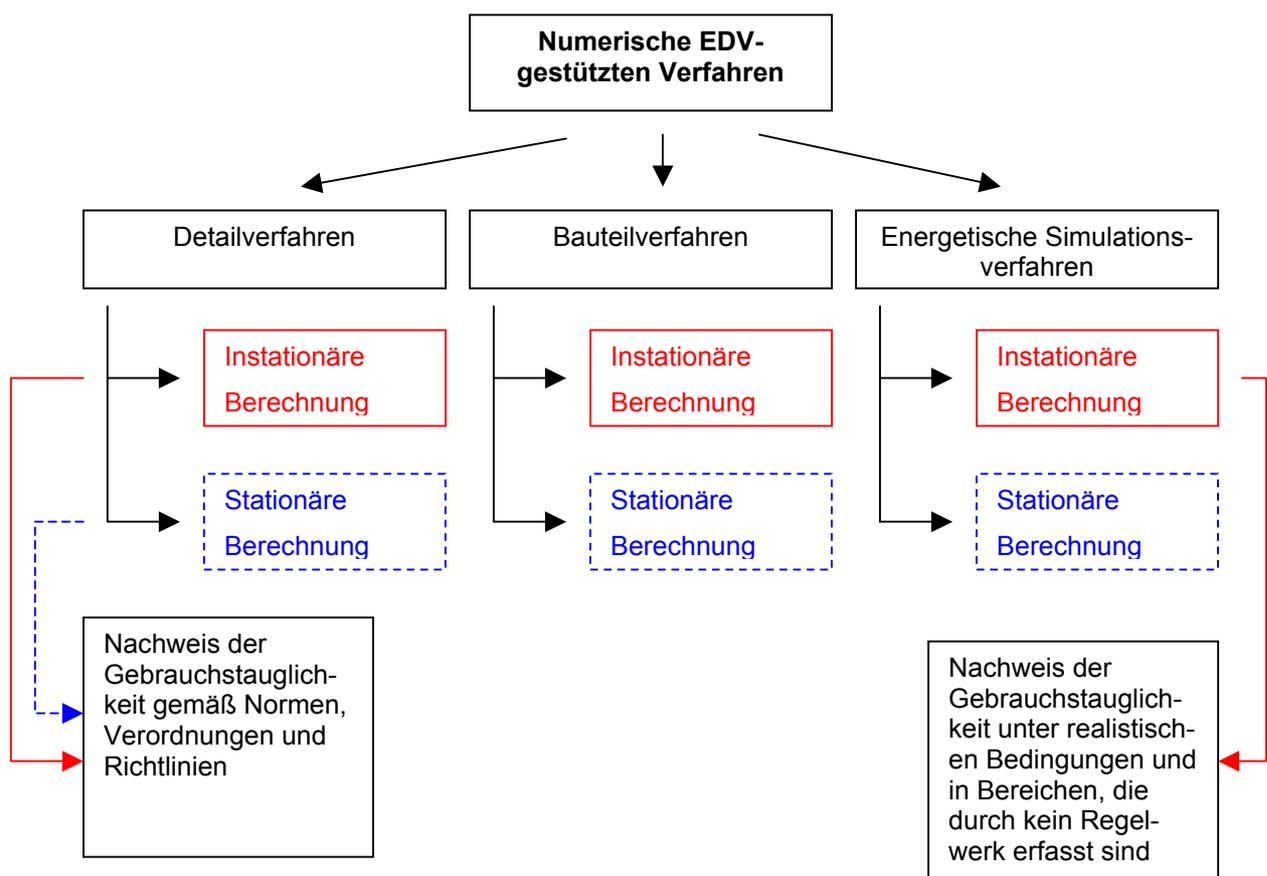


Diagramm 5-1: Einteilung der numerischen Verfahren zur Untersuchung der klimatischen Verhältnisse in Wohnmobilen



Zu den **Detailverfahren** werden alle Programme gezählt, welche sich mit der Untersuchung von Detailpunkten von Konstruktionen bzw. Bauteilen beschäftigen. Hierzu gehören insbesondere die Wärmebrückenprogramme.

Die **Bauteilverfahren** beschäftigen sich mit der Analyse ganzer Bauteile. Die Definition des Begriffs Bauteil kann in diesem Fall wie folgt erfolgen: Ein Bauteil ist eines von mehreren Bestandteilen eines Ganzen, welches aus verschiedenen Einzelementen besteht, die wiederum alle den annähernd gleichen Bedingungen (z.B. Wärme, Feuchte) unterliegen. Des Weiteren besitzt ein Bauteil im Gegensatz zu den Einzelementen bereits eine wesentliche, der späteren Nutzung des Ganzen direkt zuzuordnende, Funktion.

Zu den EDV-gestützten Bauteilverfahren zählen z.B. Berechnungsprogramme für den Wärmedurchlasswiderstand von verschiedenen Wandkonstruktionen, aber auch Dimensionierungsprogramme für Schornsteine, etc..

Als EDV-gestützte **energetische Simulationsverfahren** können alle Anwendungen bezeichnet werden, die das Verhalten eines Systems auf einem Computer modellhaft darstellt oder nachbildet. Das Verhalten des Systems sollte dabei einem Zustand entsprechen, welcher sich auch in der Realität unter den der Simulation zugrunde liegenden Bedingungen einstellen würde.

Als Beispiele solcher Simulationsprogramme seien hier Programme zur Gebäude- und Anlagensimulation genannt.

Die Begriffe **stationäre** und **instationäre** Berechnungsverfahren entsprechen den oft gebrauchten Bezeichnungen statische und dynamische Verfahren.

Stationäre (statische) Verfahren arbeiten im Zuge ihrer Berechnung mit feststehenden, zeitunabhängigen Eingangsparametern. Daher erlauben sie nur die Betrachtung des unveränderlichen Zustandes eines Systems, festgelegt durch fixe Eingabeparameter.

Instationäre (dynamische) Verfahren arbeiten mit sich verändernden zeitabhängigen Eingabeparametern. Sie erlauben die Betrachtung eines Systems über einen definierten Zeitraum mit veränderlichen Eingabeparametern.

Da zu dem in dieser Ausarbeitung abgehandelten Thema kaum empirische oder wissenschaftlich belegte Erfahrungen vorliegen, scheiden stationäre arbeitende EDV-gestützte Verfahren zur realistischen Darstellung der klimatischen Vorgänge in Wohnmobilen aus. Hauptgrund dieses Ausschlusses ist die Tatsache, dass statischen Verfahren nur einen bestimmten, von fixen Umgebungsparametern abhängigen, klimatischen Zustand beschreiben können. Da es aber weder einen klimatischen Referenzzustand für das klimatische Verhalten von Wohnmobil, wie etwa bei der Tauwasserbetrachtung nach Glaser, noch das ausschließlich an einem Ort in einem Umgebungsklima verharrende Wohnmobil gibt, müssen Evaluierungen grundsätzlich instationär, also realitätsnah und verschiedene Klimata einbeziehend, vorgenommen werden. Eine Ausnahme bilden die Nachweise zur Einhaltung der Anforderungen der DIN EN 1645-1 „Caravans“ an die Mindestwärmedurchgangskoeffizienten der Außenbauteile von Wohn**wagen**.



5.3 Auswahl des für diese Ausarbeitung geeigneten EDV-gestützten Verfahrens

Der Einsatz verschiedener Programme ergibt sich vor allem aus dem nicht Vorhandensein einer alle relevanten Bereiche umfassenden Standardsoftware. Gerade beim Zusammenspiel verschiedener Softwarekomponenten unterschiedlicher Hersteller ist es aber zwingend erforderlich, dass gewisse Grundkompatibilitäten der Programme vorhanden sind, um unnötige Mehrarbeiten zu vermeiden. So kann zum Beispiel eine Programmzusammenstellung aus sehr guten Einzelprogrammen für die zur Bearbeitung der Diplomarbeit vorhandenen Bedingungen als ungeeignet eingestuft werden, wenn jedes dieser Programme auf einer unterschiedlichen Computerplattform arbeitet. Gleiches gilt in gewissen Umfang auch für Programme, die inhaltlich gleiche Eingabedaten benötigen, diese jedoch aufgrund inkompatibler Datenformate mehrmals generiert werden müssen.

Als Auswahlgrundlage für die zu verwendenden EDV-gestützten Verfahren werden folgende Kriterien herangezogen:

- Die ausgewählten Programme müssen realistische Ergebnisse liefern (z.B. Konformität mit der VDI 6020 im Bereich der energetischen Simulationsprogramme).
- Da es keine alles umfassende Standardlösung für die hier zu bearbeitende Aufgabenstellung gibt, müssen die verschiedenen Einzelprogramme eine möglichst hohe Kompatibilität hinsichtlich ihrer Eingabedatenstruktur besitzen (z.B. Datenkataloge auf MS Office-Basis oder gängiger Datenbanksysteme, CAD-Datenübernahme per DXF – Format, etc.).
- Die verwendeten Programme sollten sich auf den Einsatzbereich Wohnmobil anpassen lassen (z.B. veränderbare Eingabeparameter, evtl. änderbare Eingabemasken).
- Da die Programme im betrieblichen Alltag eines Wohnmobilherstellers eingesetzt werden sollen, muss ein gewisses Maß an Benutzerfreundlichkeit gegeben sein, die es einer mit der Problematik vertrauten Person erlaubt, in einem vertretbaren Zeitrahmen nutzbare Ergebnisse zu erarbeiten.
- Die Einarbeitung in die verschiedenen Programme muss innerhalb einer achtwöchigen Diplomarbeit möglich sein.

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien, kommt zur Bearbeitung der Aufgabenstellung die auf der nächsten Seite schematisch dargestellte Programmkonstellation zum Einsatz. Ausschlaggebend für diese Programmzusammenstellung sind in Analogie zu den geforderten Auswahlkriterien folgende Gesichtspunkte:

- Bei allen zum Einsatz kommenden Programmen handelt es sich um erprobte Programme, die ihre Tauglichkeit bezüglich einer verwertbaren Ergebnisfindung bereits in vielen praktischen Anwendungsfällen bewiesen haben.
- Alle ausgewählten Programme arbeiten mit einer Eingabe - Datenstruktur auf MS Excel - bzw. MS Access – Basis und vereinfachen damit die Eingabedatenerstellung sowie deren Verwaltung erheblich.
- Die Benutzung einer MS Windows – Programmoberfläche sowie die Anlehnung an MS Excel bzw. MS Access erleichtern die Einarbeitung im betrieblichen Einsatz.



- Die Strukturierung der Bearbeitungsaufgabe in Detail-, Bauteil- und Simulationsverfahren ermöglicht den Einsatz „spezialisierter Werkzeuge für spezielle Aufgaben“.

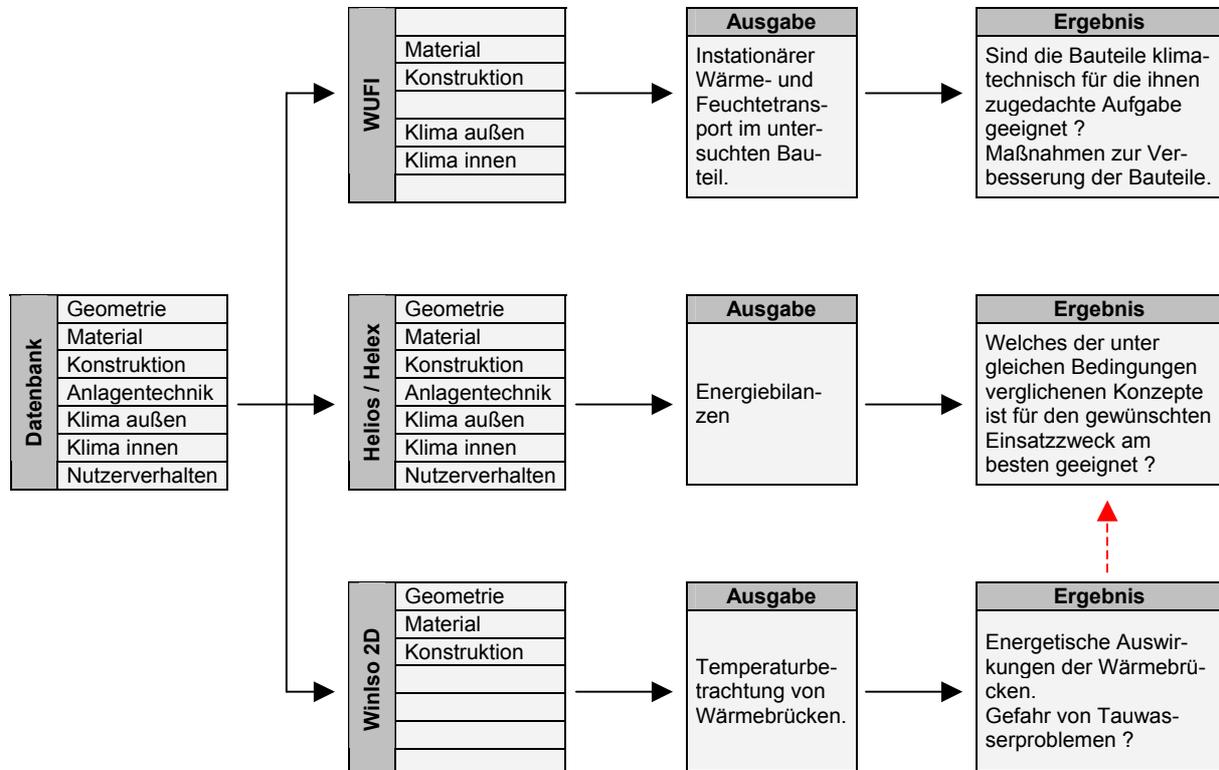


Diagramm 5-2: Struktur des Programmeinsatzes

5.4 Kurzbeschreibung der verwendeten Programme

Detailverfahren / WinIso 2D:

Wesentliche Aufgabe der Detailbetrachtung ist bei den folgenden Untersuchungen die Evaluierung von Wärmebrücken der Wohnmobilkonstruktionen. Als Programm wurde hierfür die Wärmebrückenberechnungssoftware WinIso 2D Version 3.0 gewählt.

Das Programm WinIso 2D ist in der Lage, zweidimensionale Wärmebrücken unter stationären Bedingungen zu analysieren. Ein Vorteil des Programms liegt in der Art der Geometriedateneingabe: sowohl im Programm erzeugte Zeichnungen als auch DXF-CAD-Daten aus Konstruktionsprogrammen können mit dem Programm verarbeitet werden. Gerade für die vom Baubereich doch erheblich abweichenden Konstruktionsdetails der Wohnmobile stellt diese Form der Datenübergabe mit DXF eine arbeitstechnische Erleichterung dar.

Hauptkriterien bei der Untersuchung von Konstruktionsdetails in WinIso 2D sind:

- Analyse von verschiedenen „wärmetechnischen“ Schwachpunkten.



- Katalogisierung der Wärmebrücken und Ermittlung eines Faktors zur Beeinflussung der Simulationsergebnisse.
- Betrachtung möglicher Schäden infolge von Tauwasseranfall.
- Überprüfen von Verbesserungsmaßnahmen.

Aufgrund von Verzögerungen bei der Bestellung einer Programmlizenz können die Ergebnisse der Wärmebrückenbetrachtungen nicht mehr in diese Ausarbeitung aufgenommen werden. Für den interessierten Leser wurden die klimaphysikalischen Grundlagen der Wärmebrückenbetrachtung in den Anlagen dargestellt.

Bauteilverfahren / WUFI 3.3

Aufgabe des Bauteilprogramms WUFI 3.3 ist die Analyse von Wohnmobilbauteilen wie z.B. Wänden hinsichtlich ihres instationären Wärme- und Feuchteverhaltens (hygrothermisches Verhalten).

WUFI 3.3 (**W**ärme und **F**euchtetransport instationär) simuliert dabei unter Einbeziehung von Wetterdatensätzen sowie verschiedener Bauteil-, Material- und Nutzungsparameter den zeitabhängigen eindimensionalen Wärme- und Feuchtestrom im betrachteten Bauteil. Anders als in stationären Betrachtungen, wie z.B. dem Verfahren nach Glaser, lassen sich durch die instationäre Betrachtung eines Bauteils mit WUFI Rückschlüsse auf das unter realistischen Bedingungen auftretende hygrothermische Verhalten des Bauteils ziehen.

Hauptkriterien bei der Untersuchung von Bauteilen in WUFI sind:

- Größe und Richtung von Wärme- und Feuchteströmen im Bauteil.
- Kommt es im Bauteil während einer vorbestimmten Zeit mit einer bestimmten Klimabeaufschlagung zur Austrocknung oder Durchfeuchtung des Bauteils ?
- Ergebnis: Ist das Bauteil aus hygrotechnischer Hinsicht für die ihm zugedachte Aufgaben bei zu erwartenden Klimaverhältnissen geeignet ?
- Vergleichsberechnungen verschiedenartiger Bauteile und Materialien.
- Ermitteln von Situationen, in denen das Bauteil feuchtigkeitstechnisch versagt.
- Erprobung und Wirksamkeitsnachweis von Verbesserungsmaßnahmen am Bauteil.

Simulationsverfahren / Helios-Helex 2.1:

Das Programm Helios dient zur instationären energetischen Simulation von Einzonen-Modellen. Ähnlich wie beim Programm WUFI wird hierbei unter Einbeziehung von Wetterdatensätzen sowie verschiedener Bauteil-, Material- und Nutzungsparameter das instationäre Verhalten eines einzonigen Baukörpers realistisch abgebildet. Zusätzlich fließen Parameter gebäudetechnischer Anlagen wie z.B. Heizungen und Klimaanlage sowie Lüftungsparameter in die Berechnungen mit ein.

Eine wesentliche Vereinfachung und Übersichtlichkeit bei der Dateneingabe und Ergebnisanalyse von Helios wird durch die auf MS - Excel basierende Benutzeroberfläche Helex 2.1 erreicht. Helex gewährleistet somit - klimaphysikalische Grundkenntnisse vorausgesetzt - eine schnelle Einarbeitung in das System.



Hauptkriterien bei der Untersuchung von Wohnmobilaufbauten in Helios/Helex sind:

- Feststellen der Raumluffttemperaturen im Simulationszeitraum.
- Ermittlung der Transmissionswärmeverluste.
- Ermittlung der Luftwechselverluste.
- Wärmespeicherverhalten der Innenbauteile.
- Strahlungsgewinne durch transparente Bauteile.
- Leistungsanforderungen an die klimatechnischen Anlagen.
- Vergleich von verschiedenen Bauteil- und Wohnmobilvariationen unter identischen Bedingungen.

6 Klimaphysikalische Grundlagen

(vgl. [7]; [14])

6.1 Das „optimale“ Raumklima

Neben der Verhinderung witterungs- und klimabedingter Schäden sollte die Schaffung eines „optimalen“ Raumklimas unter Einsatz vertretbarer Mittel das erklärte Hauptziel jeder klimaphysikalischen Maßnahme im Wohnmobilmobilität sein. Doch bevor weiter über Maßnahmen zum Erreichen solcher Raumklimazustände nachgedacht wird, ist zu aller erst eine Definition des Begriffs „optimales“ Raumklima notwendig:

Optimales Raumklima herrscht dann, wenn sich die dem Klima ausgesetzten Personen behaglich fühlen und ihre Organismen aufgrund des vorhandenen Klimas keinen zusätzlichen Belastungen ausgesetzt sind.

Bei Analyse dieser Aussage lassen sich drei Variablen festlegen, welche die Definition des optimalen Raumklimas entscheidend beeinflussen:

- Person
- Organismus
- Belastung

Aufgrund dieser Variablen ist das optimale Raumklima eine momentane, von der Person, deren Organismus sowie deren Belastung abhängige Größe – also ein theoretischer klimatischer Zustand – deren Erreichen in der Praxis über einen sinnvollen Zeitraum für mehrere Personen nicht möglich ist.

Beispiele:

- Person A friert, Person B schwitzt und Person C fühlt sich im gemeinsamen genutzten Raum behaglich (Personenabhängigkeit)
- Ein kranker oder gestresster Mensch friert/schwitzt u.U. bei Klimaverhältnissen in denen er sich normalerweise behaglich fühlt (Zustand des Organismus)
- Das bei Schreibtischtätigkeit als behaglich empfundene Klima, wird bei längerem Einräumen eines Bücherregals von der gleichen Person als zu warm empfunden (Belastungszustand)



Einen praktikablen Ersatz für den theoretischen Zustand des optimalen Raumklimas stellt daher die Definition sogenannter Behaglichkeitsbereiche dar. Da es sich hierbei um Klimabereiche handelt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese Behaglichkeit auch von vielen unterschiedlichen Personen empfunden wird, entscheidend größer als die momentane Betrachtung eines einzigen Klimazustandes.

Gestützt wird dieser Ansatz durch die Tatsache, dass der menschliche Körper in der Lage ist, sich in gewissen Grenzen an wechselnde Zustände des Umgebungsklimas anzupassen.

Behaglichkeitsbereiche definieren also die Grenzen der Anpassungsfähigkeit des menschlichen Körpers an wechselnde Umgebungsklimabedingungen, ohne dass ein Gefühl des Unwohlseins und zusätzlichen Belastungen des Organismus durch das Umgebungsklima auftreten.

Die nachfolgende Auflistung von Bedingungen, die für die Schaffung eines als behaglich empfundenen Raumklimas in ganzjährig genutzten Wohnmobilen als empfehlenswert anzusehen sind, wurde aus dem Buch Wärmeschutz und Feucht in der Praxis entnommen und hinsichtlich der wohnmobilspezifischen Gegebenheiten überarbeitet (vgl. [7]). Die ursprünglichen Kriterien beruhen auf Untersuchungen, die zum Teil auch in verschiedenen Normen und Richtlinien verankert sind.

Folgende Punkte wurden bei der Anpassung dieser Kriterien berücksichtigt:

- Um ein Wohnmobil bei hohen Außentemperaturen auf ein Temperaturniveau eines Gebäudes herunterzukühlen, sind im autarken Standbetrieb Energiemengen nötig, die nach heutigem Stand der Technik unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht bereitgestellt werden können.
- Aufgrund der im Vergleich zum Hochbau geringen Massen und Bauteilstärken ist die Veränderung des Innenklimas in Bezug auf das Außenklima sehr dynamisch (Kaum Wärmespeicherfähigkeit, relativ hohe Wärmedurchgangskoeffizienten, etc.).
- Durch die überwiegend eingesetzten Gebläseheizungen entstehen zwangsläufig größere Turbulenzen und Luftbewegungen – Dieses sollte bei der Aufstellung der angepassten Behaglichkeitskriterien berücksichtigt werden.
- Die DIN EN 1646-1 Anhang J definiert klare Temperaturdifferenzen im Aufheizbetrieb (7 Kelvin).
- Die gleiche Norm schreibt eine im Winterbetrieb mindestens zu erreichende Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen von 35 Kelvin vor (Wohnmobil Stufe 3).

6.1.1 Thermische und hygrische Bedingungen für ein als behaglich empfundenen Raumklima in ganzjährig nutzbaren Wohnmobilen

Raumlufttemperaturen:

- Die Raumlufttemperatur soll mit Ausnahme von heißen Sommertagen grundsätzlich zwischen 18°C und 22°C betragen.
- Ausnahmefall: Die Lufttemperatur an heißen Tagen soll bei ausreichender Luftzirkulation grundsätzlich 3-5 Kelvin unter der Außenlufttemperatur liegen.
- Die in häufig genutzten Aufenthaltsbereichen (z.B. Sitzgruppe) des Wohnmobils gemessene Raumlufttemperatur soll während der Heizphase gemäß DIN EN 1646-1 nicht mehr als 7 Kelvin über der Lufttemperatur gemessen im Abstand von 200 mm von Wänden und Fenstern liegen.



Dieser Wert sollte durch geeignete Maßnahmen möglichst weit unterschritten werden, um die Luftzirkulation im Innenraum auf ein erträgliches Maß abzusenken.

- Die Differenz der Lufttemperatur zwischen Boden und Decke („Fuß und Kopf“) sollte in den Hauptaufenthaltsbereichen 3 Kelvin nicht übersteigen.

Luftfeuchtigkeit:

- Luftfeuchtigkeiten zwischen 30% und 70% haben in der Regel nur einen geringen Einfluss auf die Behaglichkeit bzw. das menschliche Temperaturempfinden. Bei zu hohen Luftfeuchtigkeiten (Schwülegefühl) wird die Körperkühlung durch Transpiration sehr stark herabgesetzt. Zu niedrige Luftfeuchtigkeiten trocknen die Schleimhäute zu stark aus. Die relative Luftfeuchte sollte sich daher in den in der nachfolgenden Darstellung gekennzeichneten Bereichen befinden.

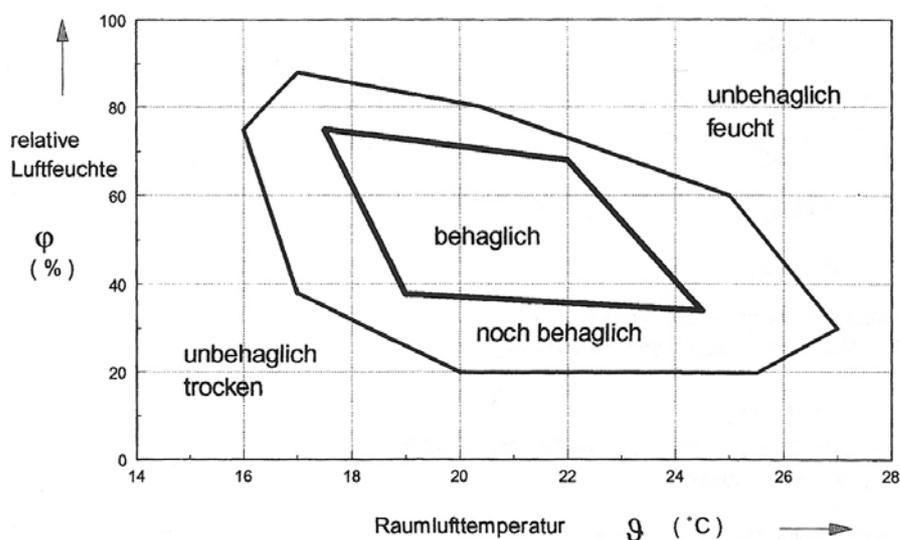


Diagramm 6-1: Zusammenhang zwischen Raumlufttemperatur und relativer Luftfeuchte für das Behaglichkeitsempfinden des Menschen

Luftbewegung:

- Zu hohe Luftbewegungen haben bei normalen und niedrigen Innentemperaturen oft eine lokale Abkühlung des menschlichen Körpers und somit ein unbehagliches Gefühl zur Folge. Idealerweise soll die mittlere Luftgeschwindigkeit nicht mehr als 0,25 m/s betragen (Luftbewegung soll aber vorhanden sein).

Aufgrund der gebräuchlichen Gebläseheizungen in Wohnmobilen ist dieser Wert während der Heizphase allerdings unrealistisch. Wichtiger hierbei ist, dass die Warmluftverteilung so erfolgt, dass der Innenraum zügig und gleichmäßig aufgeheizt wird. Zwar lassen sich dadurch die hohen Luftbewegungen im Wohnmobil nicht verhindern, dafür ist allerdings gewährleistet, dass es sich um warme Luftmassen handelt, die im Raum zirkulieren. Generell kann davon ausgegangen werden, dass viele Warmluftaustritte mit geringerem Luftaustrittsvolumen eine gleichmäßigere und weniger turbulente Warmluftverteilung hervorrufen als wenige großvolumige Warmluftaustritte.



te. Allerdings erfolgt bei großvolumigen (= wenig Warmluftaustritte bei gegebener Gebläse- und Heizleistung) Warmluftaustritten eine schnellere Anfangsaufheizung des Innenraumes. Eine sinnvolle Alternative wäre daher der dreistufige Aufbau einer Gebläseheizung nach folgendem Schema:

1. Stufe: Anfangsaufheizung mit maximaler Heiz- und Gebläseleistung durch wenige großvolumige Warmluftaustritte mit zentraler Anordnung im Aufenthaltsbereich.
2. Stufe: Beim Erreichen einer bestimmten Innentemperatur erfolgt die Verteilung der Warmluft über viele Warmluftaustritte und sorgt somit für eine gleichmäßigere Temperaturverteilung.
3. Stufe: Beim Erreichen einer als behaglich empfundenen Temperatur wird die Gebläse- und/oder Heizleistung auf eine Erhaltungsstufe zurückgefahren. Kritische Bereiche wie etwa ein in den Aufenthaltsbereich integriertes Fahrerhaus werden partiell mit einem erhöhtem Wärmestrom versorgt.

Das gleiche gilt analog für Klimaanlage.

Oberflächentemperaturen:

- Die Oberflächentemperatur der Innenseiten von großflächigen Außenbauteilen, wie z.B. Außenwänden, Dach und Außentüren soll die Raumlufttemperatur im Aufenthaltsbereich um nicht mehr als 2 Kelvin unterschreiten. Bei kleinformatischen Außenbauteilen, wie z.B. Dachluken, Außenfenstern sollen bei Nichteinhaltung der Temperaturdifferenz zusätzliche Maßnahmen (z.B. Warmluftaustritt) für eine Erhöhung der inneren Oberflächentemperatur sorgen. Das gleiche gilt für in den Aufenthaltsbereich integrierte Fahrerhäuser.
- Die Oberflächentemperatur des Fußbodens soll je nach Nutzungsbereich des Wohnmobils zwischen mindestens 14°C und maximal 26°C liegen, um einen Schutz gegen Wärmeableitung über die Füße zu gewährleisten.

Aufenthaltsbereiche: ca. 18°C bis ca. 22°C

Küche (Arbeitsbereich): mind. 14°C bis ca. 22 °C

Bad (Bahrfuß-Bereich): mind. 22°C

Anmerkungen zum Einfluss der Oberflächen- und Lufttemperaturen auf das Wärmegefühl eines Menschen:

Oft tritt bei ein und dem selben Mensch das Phänomen auf, dass dessen Wärmegefühl in verschiedenen Räumen mit der gleichen Raumlufttemperatur unterschiedlich reagiert. Die Erklärung für dieses Phänomen ist neben einem eventuellen Luftfeuchteunterschied oder physischer/psychischer Veränderungen des Organismus vor allem in der unterschiedlichen Oberflächentemperatur der Innenwände der Räume zu suchen.

Jeder Mensch steht in einem ständigen Wärmeenergieaustausch mit seiner Umgebung. Dieser Energieaustausch funktioniert unter anderem auf zwei Arten:

- Abgabe/Aufnahme von Wärmeenergie an/von Umgebungsluft
- Abgabe/Aufnahme von Wärmeenergie an/von Körper in Form von Strahlung



Ob nun Energie vom Menschen aufgenommen oder abgegeben wird, hängt vom Energieniveau und somit grundsätzlich von der Temperatur der Luft und der den Menschen umgebenden Körper ab.

Das Temperaturgefühl „warm“, beschreibt demzufolge stark vereinfacht ausgedrückt die Aufnahme von Wärmeenergie aus der Umgebung. Kalt hingegen bedeutet eine Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung. Behaglichkeit stellt sich ein, wenn die Wärmeenergieabgabe und Aufnahme nicht stattfindet bzw. gering ist

Das Temperaturempfinden des Menschen wird also sowohl von der Temperatur der ihn umgebenden Luft als auch von den in seiner Umgebung befindlichen Körpern beeinflusst. Zwangsläufig ist die Lufttemperatur nicht wie oft angenommen die alleinige wichtige Grundlage des menschlichen Temperaturempfindens. Erst die Synthese aus Luft- und Körpertemperatur der Umgebung bildet die eigentlich vom Organismus wahrgenommene Temperatur. Diese Temperatur wird daher auch als empfundene oder gefühlte Temperatur bezeichnet.

Die empfundene Temperatur lässt sich unter der vereinfachten aber ausreichend genauen Annahme, dass die Strahlungstemperatur eines Körpers in etwa seiner mittleren Oberflächentemperatur entspricht, wie folgt ermitteln:

$$\mathcal{I}_{\text{empfundene}} = 0,5 \cdot (\mathcal{I}_{\text{Luft}} + \mathcal{I}_{\text{mittlere Strahlung}}) \quad [7]$$

Durch diesen Zusammenhang erklärt sich das anfangs erwähnte Phänomen der Temperaturunterschiede. Körper bzw. Bauteile mit guten dämmenden Eigenschaften auf der Rauminnenseite bauen ein geringeres Energiegefälle zum Menschen auf als z.B. massive Bauteile und verringern somit den Strahlungsaustausch. Der Mensch gibt demnach weniger Energie an diese Bauteile ab und das Gefühl der Behaglichkeit kann sich in Anlehnung an obige Gleichung bei geringeren Lufttemperaturen einstellen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Schaffung eines als behaglich empfundenen Klimas neben dem Schutz der Bauteile vor schädigenden klimatischen Einflüssen als ein wichtiges Ziel in der Konstruktion und Entwicklung von Wohnmobilen angesehen werden muss. Dieses Ziel muss aber immer in einem vernünftigen Gleichgewicht zu anderen wesentlichen Faktoren, wie Gewichtsreduzierung, Kostenminimierung, Umweltverträglichkeit usw. stehen. Nicht der Einsatz teurer und aufwendiger technischer Anlagen mit derzeitiger beschränkter mobiler Einsatzfähigkeit lösen die hier aufgeführten Probleme. Vielmehr müssen grundsätzliche Probleme, wie mögliche Schwächen bei der Dämmung oder geringes Wärmeverharungsvermögen der Leichtbauteile genauer untersucht und durch gute konstruktive und materialtechnische Lösungen behoben werden.

6.2 Klimaphysikalische Grundlagen der eingesetzten EDV-gestützten Verfahren

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten klimaphysikalischen Grundlagen abgehandelt, deren Kenntnis Voraussetzung für ein sinnvolles Arbeiten mit den hier eingesetzten Programmen ist. Dabei wurde weniger Wert auf eine wissenschaftliche Herleitung der einzelnen Größen und Zusammenhänge gelegt. Vielmehr soll dieser Abschnitt eine Grundlage für die praxisorientierte Anwendung der Programme bei den Herstellern von Wohnmobilen sein.



6.3 Grundlagen der Wärmebrückenermittlung mit Hilfe von Detailverfahren

Aufgrund von Verzögerungen bei der Bestellung einer Programmlizenz können die Ergebnisse der Wärmebrückenbetrachtungen nicht mehr in diese Ausarbeitung aufgenommen werden. Für den interessierten Leser wurden die klimaphysikalischen Grundlagen der Wärmebrückenbetrachtung in den Anlagen dargestellt.

6.4 Grundlagen des Bauteilverfahrens

Die in dieser Ausarbeitung abgehandelten Bauteilverfahren lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

- Bauteilbetrachtungen im Zuge des stationären Verfahrens nach DIN EN 1645-1 z.B. mit Hilfe einer MS-Excel Tabelle.
- Realistische Betrachtungen der hygrothermischen Vorgänge im Bauteil mit Hilfe einer instationären Simulation im Programm WUFI

6.4.1 Bauteilbetrachtungen nach DIN EN 1645-1 Caravans

Die wärmetechnische Beurteilung der Bauteile eines Wohnmobils sollte mindestens hinsichtlich der Normen DIN EN 1645-1 Caravans (Anforderungen an den Wohnbereich hinsichtlich Gesundheit und Sicherheit) sowie DIN EN 1646-1 Motorcaravans (Anforderungen an den Wohnbereich hinsichtlich Gesundheit und Sicherheit) erfolgen.

Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist, dass die DIN EN 1645-1 eindeutige Anforderungen hinsichtlich der Wärmedurchgangswiderstände einzelner Bauteilen von Caravans – also Wohnwagen – beschreibt. Die DIN EN 1646-1 Motorcaravans beinhaltet dagegen keinerlei Anforderungen diesbezüglich. Ursachen für diese Differenzierung sind höchstwahrscheinlich die nicht vorhandenen – da schwer zu ermittelnden – Wärmedurchgangskoeffizienten der Fahrerhäuser von Wohnmobilen.

Trotz allem sollten die für Wohnwagen geforderten Werte unter Berücksichtigung der Fahrerhausproblematik auch auf die Beurteilung des Mindestwärmeschutzes von Wohnmobilen herangezogen werden. Für eine solche Betrachtung sprechen folgende Punkte:

- Viele Untersuchungen dieser Ausarbeitung sind dadurch unter Berücksichtigung der Fahrerhausproblematik auch auf den Bereich der Wohnwagenherstellung übertragbar
- Die verwendeten Konstruktionsprinzipien und Materialien der Wohnwagen- und Wohnmobilherstellung sind weitestgehend identisch und sollten daher unter gleichen Voraussetzungen beurteilt werden
- Viele Hersteller bieten sowohl Wohnmobile als auch Wohnwagen an und sind somit in der Lage, Untersuchungsergebnisse in gewissem Umfang auf die jeweils andere Herstellung zu übertragen
- Die DIN EN 1646-1 schreibt im Anhang J klare Bewertungskriterien für die Messung der Aufheiztemperaturen im Innenraum von Wohnmobilen vor. Darin heißt es sinngemäß: Die Lufttemperatur gemessen 1000mm über dem Boden und **200mm von einer Wand oder einem Fenster** entfernt darf nicht mehr als 7 Kelvin über der Innentemperatur gemessen in der Mitte des Wohnbereichs in einer Höhe von 1000mm über dem Boden betragen.



Aus dieser eindeutigen Festsetzung heraus ist das Bestreben der Norm erkennbar, eine - wenigstens im Ansatz - gleichmäßige Temperaturschichtung im Wohnraum eines Wohnmobils zu fordern. Aus Gründen der Behaglichkeit (hohe Luftströmungen, kalte Bauteilinnenoberflächen, etc.) ist es daher unumgänglich, gewisse Mindestwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten von Bauteilen einzuhalten. Die Auffassung „Viel Heizen ersetzt die in der Norm nicht direkt festgelegten Anforderungen an die Wärmedämmung von Wohnmobilen“ wird so auf indirekte Weise von der Norm absurdum geführt. Die ebenfalls in der DIN EN 1646-1 aufgeführten maximalen Aufheizzeiten für Wohnmobile bestätigen diese Überlegungen.

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die Wärmedurchgangsermittlung der Wohnmobilaußenbauteile keiner gesetzlichen Forderung unterliegen und ausschließlich aus den oben genannten Gründen in diese Untersuchungen einbezogen werden.

Die folgende Tabelle veranschaulicht die Mindestwärmedurchgangskoeffizienten nach DIN EN 1645-1 für Außenbauteile von Wohnwagen. Dabei erfolgt eine Klassifizierung der Wohnwagen (Stufe 1 bis Stufe 3) hinsichtlich der Anforderungen an die Qualität der Bauteilwärmedämmung sowie des Verhältnisses Außen-/Innenraumtemperatur.

Klassifizierung	Durchschnittlicher Wärmedurchgang (U) der Bauelemente einschl. Türen, Fenster und Dachluken	Erreichbare Mindesttemperaturdifferenz Innen/Außen
Stufe 1	1, 7 W/(m ² * K)	Keine Anforderungen
Stufe 2	1, 7 W/(m ² * K)	Min. 20 K, wenn die Außentemperatur 0 °C beträgt
Stufe 3	1, 2 W/(m ² * K)	Min. 35 K, wenn die Außentemperatur -15 °C beträgt

Abbildung 6-1: Klassifizierung von Wohnwagen gemäß DIN EN 1645-1 Caravans

Aufgrund derzeit aktueller Tendenzen hinsichtlich der ganzjährigen Nutzbarkeit von Wohnmobilen unter Berücksichtigung von Behaglichkeitskriterien sowie zum Schutz der Konstruktion vor Feuchtschäden, sollte eine Klassifizierung eines vom Hersteller als wintertauglich eingestuftes Wohnmobils analog zur Stufe 3 der DIN EN 1645-1 als eine verbindliche Mindestanforderung gelten.

6.4.2 Hygrothermische Bauteilbetrachtungen unter instationären Bedingungen mit WUFI

Als Grundlage der physikalischen Prinzipien der Arbeitsweise einer numerischen EDV-gestützten Bauteilbetrachtung sei an dieser Stelle auf die Merkblätter 6-1-01/D und 6-2-01/D der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA) sowie die WUFI Hilfetexte verwiesen.



Physikalische Prinzipien der hygrothermischen Bauteilbetrachtung

Hygrothermische Vorgänge in Bauteilen beruhen analog zur gewählten Bezeichnung auf dem feuchtphysikalischen und wärmetechnischen Transport- und Speicherverhalten der betrachteten Stoffe und Bauteile.

Feuchttransport

Physikalisch betrachtet lässt sich der Feuchtigkeitsaustausch bzw. Feuchttransport zwischen kapillarporösen Bauteilen und ihrer Umgebung im Wesentlichen auf den Transport von flüssigem Wasser und Wasserdampf zurückführen.

Nachfolgendes Diagramm gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Formen des Feuchttransportes in kapillarporösen Stoffen:

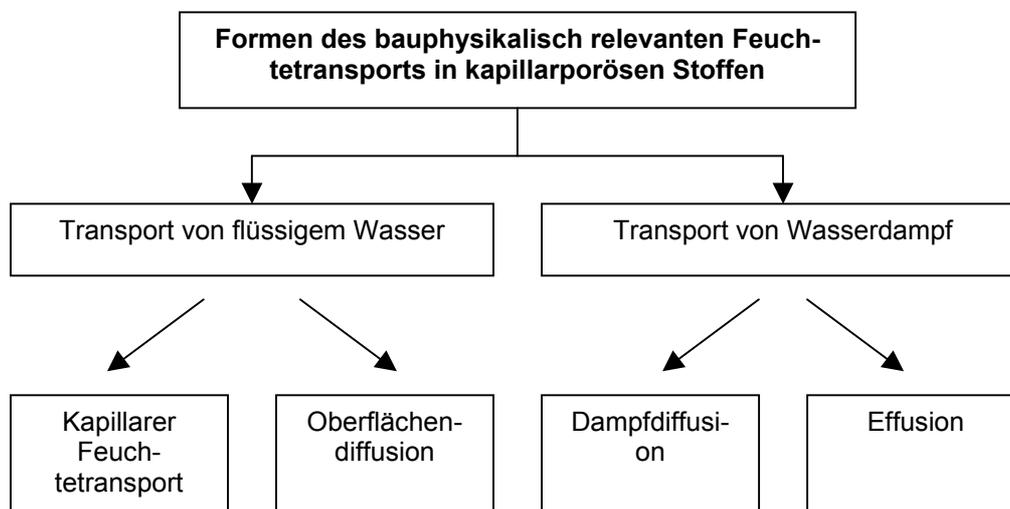


Diagramm 6-2: Formen des Feuchttransportes in kapillarporösen Stoffen

Kapillarer Feuchttransport: Feuchtigkeitsaustausch, der durch die Aufnahme und Abgabe von flüssigem Wasser durch das Poren- und Kapillarsystem des jeweiligen Stoffes erfolgt. Der kapillare Feuchttransport ist im Wesentlichen von der Art des Stoffes, der Temperatur, dem Vorhandensein sowie dem Kontakt mit Wasser und dem Kapillardruck abhängig.

Diffusionserscheinungen: Bezüglich des hier behandelten Themas erscheint eine Unterteilung der Diffusionserscheinungen in Gas- und Flüssigkeitsdiffusion sinnvoll:

Zu den Gasdiffusionen zählen u.a. die **Effusion** und die **Dampfdiffusion**. Beide Formen lassen sich hinsichtlich ihrer Erscheinung in Stoffen nicht eindeutig voneinander abgrenzen. Aufgrund von Wasserdampfdruck- und Temperaturunterschieden die gegebenenfalls an verschiedenen Stellen eines Stoffes bzw. Bauteils herrschen, kommt es zur Aufnahme von Wasserdampf aus der Umgebungsluft an der Seite des Bauteils, welche einem höheren Wasserdampfdruck ausgesetzt ist. Um die Druckdifferenz zur Bau-



teilseite mit dem niedrigeren Wasserdampfdruckverhältnissen auszugleichen, kommt es zu einem Feuchtetransport zu dieser Seite hin.

Eine weitere Diffusionserscheinung ist die sogenannte **Oberflächendiffusion**. Hygroskopische Stoffe nehmen in Abhängigkeit von der Stofftemperatur, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf aus der Umgebungsluft auf. Dieser als hygroskopisches Stoffverhalten bezeichnete Vorgang ist bestrebt, eine stoffspezifische Gleichgewichtsfeuchte in Abhängigkeit von den genannten Größen herzustellen.

Einflüsse von osmotischen Erscheinungen sowie andere Arten des Flüssigkeitstransports wie z.B. die verschiedenen Formen der Lösungsdiffusionen (Ausnahme: verschiedener Dampfsperren) haben für die hier angestellten Betrachtungen keine nennenswerte Bedeutung.

Die angesprochenen Feuchtetransporterscheinungen treten in der Regel in überlagerter, teilweise auch gegenläufiger Weise auf. Es ist daher sinnvoll, die Feuchtetransporterscheinungen mit Hilfe des dem Energieerhaltungssatz zugrundeliegenden Masseerhaltungsgesetz zu umschreiben. Demnach ändert sich also die Masse der Feuchtigkeit bzw. des Wassers in einem Stoff/Bauteil, wenn der Massenstrom der Feuchtigkeit bzw. des Wassers zwischen verschiedenen Begrenzungsflächen ungleich null ist. Als Umkehrschluss bedeutet dies: Es erfolgt keine Massenänderung der Feuchtigkeit bzw. des Wassers in einem Stoff/Bauteil, wenn der besagte Massenstrom gleich null ist. Die mathematische Darstellung dieser Vorgänge ist unter anderem im WTA-Merkblatt 6-2-01/D Kapitel 2 abgebildet.

Die für diese Ausarbeitung relevanten Erkenntnisse können wie folgt herausgestellt werden:

- Der Gesamtmassestrom der Feuchtigkeit bzw. des Wassers im Stoff/Bauteil ist für dessen hygri-sches Verhalten verantwortlich.
- Der Gesamtmassestrom setzt sich aus den einzelnen Masseströmen der unterschiedlichen Was-ser- bzw. Feuchtigkeitstransportprozesse (hygroskopischer und kapillarer Feuchteaus-tausch, Wasserdampfdiffusion) zusammen. Da diese einzelnen Feuchteströme auch gegenläufig gerich-tet sein können, ist eine Betrachtung der Stromrichtung erforderlich.
- Die einzelnen transportprozessabhängigen Masseströme werden von zum Teil verschiedenen Parametern beeinflusst.
- Die Kenntnis über diese Parameter sowie deren Einfluss auf das Verhalten der Masseströme dient als Grundlage für die Beschreibung und Berechnung der hygri-schen Vorgänge in Stof-fen/Bauteilen.

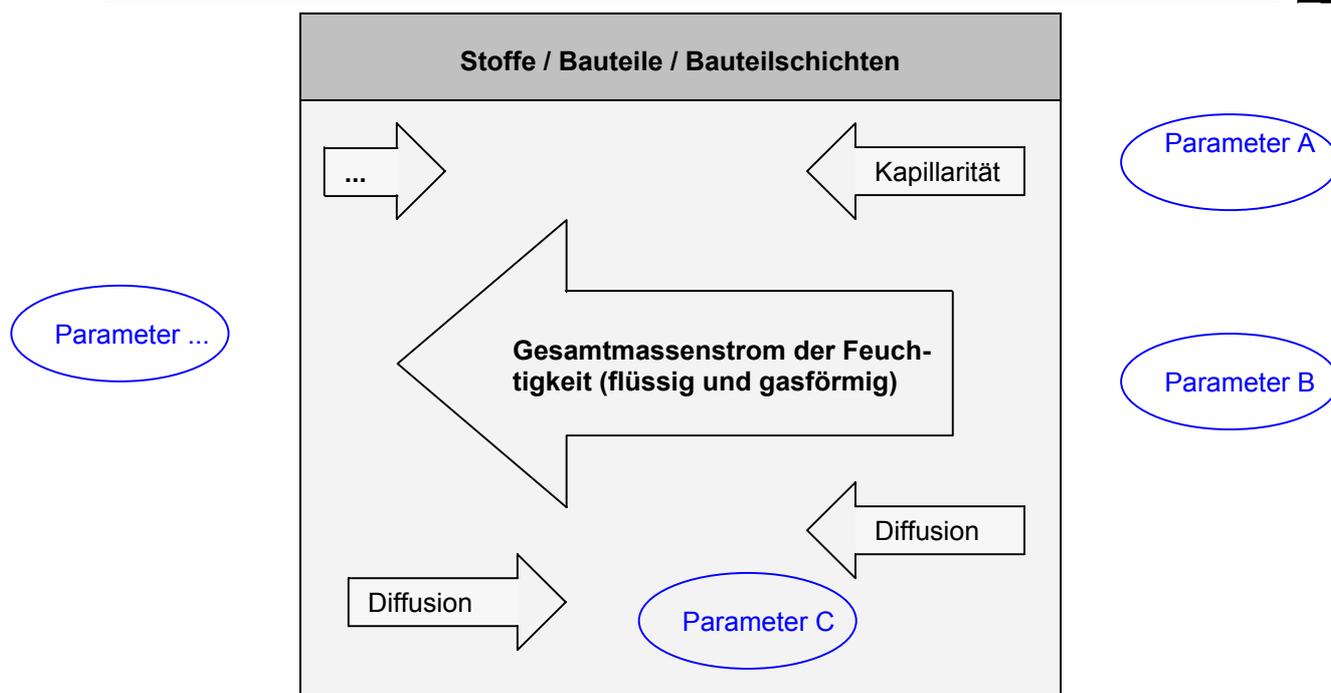


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung von hygrischen Transportvorgängen

Feuchtespeicherung:

Neben dem Feuchtetransport hat auch die Feuchtespeicherfähigkeit von Stoffen/Bauteilen einen entscheidenden Einfluss auf deren hygrisches Verhalten. Da der Feuchtetransport in Abhängigkeit von dessen Geschwindigkeit ebenfalls als eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Form der Feuchtespeicherung angesehen werden kann, erscheint eine strikte Trennung der beiden Eigenschaften nicht eindeutig nachvollziehbar. Bekräftigt wird diese Vermischung durch die Tatsache, dass bei der Speicherung und Abgabe von Feuchtigkeit in den Baustoffen die gleichen Feuchtetransportmethoden auftreten, wie bei der reinen Feuchtetransportbetrachtung. These: Die Feuchtespeicherung eines Stoffes ist, mit Ausnahme des theoretischen Punktes der Gleichgewichtsfeuchte, eine Form des Feuchtetransportes.

Die Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit erfolgt bei kapillarporösen Stoffen in drei sich überlagernden Stufen. Das Erreichen einer dieser Stufen ist hauptsächlich von der relativen Luftfeuchte der Umgebung, der Umgebungstemperatur sowie der Stoffart abhängig.

Stufe 1 - Sorption: Kapillarporöse Stoffe sind in der Lage, je nach Größe ihrer inneren Oberfläche Feuchtigkeit in Form von meist einmolekularem Wasser an die Innenwände des Porenraums zu binden. Die Bindung erfolgt dabei größtenteils durch die physikalische Wechselwirkung der unterschiedlichen Ladungen der sich gegenüberliegenden Stoffe. Eine chemische Bindung der Feuchtigkeit ist hierbei in einigen Fällen durchaus möglich (z.B. Holz, verschiedene cellulosehaltige Materialien).

Die Anlagerung der Wassermoleküle erfolgt in ein- oder mehrmolekularen Schichten, wobei es durch das geordnete Anlagern der Wassermoleküle oft zu einer Erhöhung der Dichte des angelagerten Wassers



kommt. Aufgrund dieser mehr oder weniger festen Anlagerung des Wassers an die Poreninnenwände wird dieses Wasser oft als gebundenes Wasser bezeichnet.

Stufe 2 – Kapillarkondensation: Gegen Ende der ein- oder mehrschichtigen Anlagerung des Wassers an den Poreninnenwänden kondensiert die aus der Umgebung aufgenommene gasförmige Feuchtigkeit in kapillarporösen Stoffen und lagert sich in den Kapillaren an. Mit Beendigung der Kapillarkondensation ist der Bereich der maximalen hygroskopischen Ausgleichsfeuchte eines Stoffes in Abhängigkeit zur relativen Umgebungsluftfeuchte und Umgebungstemperatur erreicht.

Stufe 3 – Kapillare Wasserleitung: Über den eben beschriebenen Sättigungsbereich hinweg wird sich kein Wasser in einem Stoff binden lassen. Zusätzlich auftretende Feuchte in Form von flüssigem Wasser wird als freies Wasser in den noch verbleibenden Porenräumen aufgenommen und durch Kapillarkräfte im Stoff transportiert.

Alle diese Vorgänge werden neben den Größen relative Luftfeuchte, Temperatur und Stoffeigenschaften vor allem durch Inhomogenitäten der Stoffe, Quellvorgänge der Stoffe und Konstanz der Feuchte bzw. der Wasserzufuhr (Unterbrechung des Saugvorgangs) wesentlich beeinflusst.

6.4.3 Thermisches Verhalten von Stoffen und Bauteilen

Im folgenden werden die Grundlagen der Wärmeleitungseigenschaften von Stoffen und Bauteilen sowie deren Verhalten unter Berücksichtigung verschiedener Strahlungseinflüsse beschrieben.

Analog zur Arbeitsmethode des Programms WUFI sind in dieser Darstellung vor allem der Wärmetransport, die Wärmespeicherfähigkeit sowie die Einflüsse der verschiedenen Strahlungsarten hinsichtlich des thermischen Verhaltens der Stoffe/Bauteile von Bedeutung.

Um die Vorgänge der Wärmeleitung besser verstehen zu können, bedarf es zuvor einiger genauerer Betrachtungen bezüglich der Begriffe Wärme und Temperatur:

Was ist eigentlich Wärme? In der eigentlichen Bedeutung ist Wärme nichts anderes als eine menschliche Sinnesempfindung hervorgerufen durch verschiedener physikalischer Erscheinungen. Im allgemeinen Gebrauch des Begriffs Wärme – auch in verschieden wissenschaftlichen Ausarbeitungen – kommt es immer wieder zu Vermischungen dieser Sinnesempfindung und der sie hervorruhenden physikalischen Erscheinungen. Um eine präzisere Definition der Aussage zu erhalten, ist es sinnvoll, den Begriff Wärme als einen reinen subjektiven menschlichen Sinneszustand zu bezeichnen, welchem erst durch die Temperatur eine objektiven physikalischen Größe zugeordnet werden kann. Die Temperatur eines Stoffes bestimmt also erst die Wärmemenge, welche vom Menschen unter Umständen als Wärme oder Kälte empfunden wird.

Die Wärme ist von der Bewegung der atomaren Teilchen eines Stoffes abhängig und folglich eine Erscheinung der Summe aller kinetischen Teilchenenergien eines Stoffes bzw. Körpers. Demzufolge gelten folgende Zusammenhänge zwischen Wärme, Energie und Temperatur:



- Bei 0 Kelvin (ca. $-273,15\text{ °C}$ / absoluter Temperaturnullpunkt) findet keine Teilchenbewegung in Materie statt. Der Körper verfügt über keine kinetische Energie und somit über keine Wärmeenergie.
- Mit Ansteigen der Temperatur nimmt auch die Teilchenbewegung in Stoffen zu. Der Betrag der Wärmeenergie eines Körpers erhöht sich. Temperatur und Teilchenbewegung verändern sich proportional.
- Die Temperatur beschreibt aufgrund dieser Proportionalität die mittlere kinetische Energie der Stoffteilchen. Die Bezeichnung mittlere kinetische Energie begründet sich aus der Tatsache, dass die Teilchen eines Stoffes unterschiedliche kinetische Energien haben. Die mittlere kinetische Energie ergibt sich daher aus der Summe der kinetischen Energien der einzelnen Teilchen dividiert durch die Anzahl der Teilchen.
- Resultat: Wärme ist physikalisch betrachtet eine Energieform.

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich folgende Zusammenhänge herleiten:

- Die Wärmemenge W ist proportional der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$, wenn die Masse m konstant ist.
- Die Wärmemenge W ist proportional der Masse m , wenn die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$, konstant bleibt.

Werden diese Aussagen durch die Einführung eines Proportionalitätsfaktors c zusammengefasst, so ergibt sich die Grundgleichung der Wärmelehre [8]:

$$W = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta \quad [8]$$

„Die einem Körper zugeführte oder von ihm abgegebene Wärmemenge W ist gleich dem Produkt aus der spezifischen Wärme c des Stoffes, aus dem der Körper besteht, seiner Masse m und der Temperaturänderung $\Delta\theta$, die er erfährt.“ (Zitat: [8])

Der Proportionalitätsfaktor dieser Gleichung wird auch als die sogenannte spezifische Wärme oder die spezifische Wärmekapazität bezeichnet. Sie ist von der Art des Stoffes sowie der Temperatur abhängig und ist die maßgebende Größe für das Verharrungsvermögen von Wärmeenergie in diesem Stoff. Die physikalische Einheit der spezifischen Wärmekapazität ist $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

Eine weitere wichtige Erscheinung des thermischen Stoffverhaltens wird durch das Gesetz des Wärmeaustausches beschrieben [8]:

$$W_{w1} = W_{w2} \quad [8]$$

„Die von einem kalten Körper aufgenommene Wärmemenge W_{w1} ist gleich der vom warmen Körper abgegebenen Wärmemenge W_{w2} .“ (Zitat: [8])



Der Wärmeaustausch bzw. die Wärmeübertragung erfolgt dabei immer von selbst und stets vom Körper höherer Temperatur zum Körper niedriger Temperatur. Der Wärmeaustausch zwischen den beiden Körpern ist abgeschlossen, wenn beide Körper die gleiche Temperatur erreicht haben.

Der Wärmeaustausch bzw. die Wärmeübertragung kann dabei auf drei unterschiedliche Weisen erfolgen:

- Konvektion bzw. Wärmeströmung
- Wärmestrahlung
- Wärmeleitung
- Überlagerungen zwischen den genannten Wärmeübertragungsarten (Realität)

Wärmekonvektion – auch als Wärmeströmung bezeichnet – ist eine Form der Wärmeübertragung, welche grundsätzlich an ein Wärmetransportmedium gebunden ist. Dabei wird Wärme durch Materieverlagerung, hervorgerufen durch strömende Flüssigkeiten oder Gase, an mit dieser Strömung in Kontakt stehende Orte transportiert und an diese in Abhängigkeit von deren Energie- bzw. Wärmeniveau abgegeben. Eine Wärmeabgabe erfolgt analog zum Gesetz des Wärmeaustausches nur, wenn der Ort der Wärmeabgabe ein geringeres Energie- bzw. Wärmeniveau als der Wärmestrom unmittelbar an diesem Ort besitzt.

Konvektionserscheinungen lassen sich grundsätzlich zwei Kategorien zuordnen: freie und erzwungene Konvektion. **Freie Konvektion** beschreibt alle konvektiven Vorgänge, welche ungezwungen, das heißt durch verschiedenen physikalische Phänomene oder Wettererscheinungen wie z.B. Luftströmungen durch unterschiedliche Temperatur/Dichte der Luft, usw. hervorgerufen werden.

Als **erzwungene Konvektion** werden alle konvektiven Vorgänge bezeichnet, die durch technische Maßnahmen erzeugt oder verstärkt werden. Als Beispiele seien hier der Warmluftventilator und pumpenbetriebene Wasserkreisläufe in Heizungsanlagen genannt.

Bei der **Wärmestrahlung** erfolgt der Transport der Wärmeenergie durch elektromagnetische Wellen. Dabei ist kein direkter Kontakt zwischen dem abstrahlenden und dem empfangenden Körper notwendig. Da es sich bei der Wärmestrahlung um eine elektromagnetische Strahlung handelt, gelten die vom Licht bzw. der Optik bekannten Reflexions-, Brechungs-, Beugungs- und Polarisationserscheinungen.

Die Ausbreitung der Wärmestrahlung erfolgt in Analogie zum Licht mit der Lichtgeschwindigkeit des jeweiligen Mediums. Ein wesentliches Unterscheidungskriterium der Wärmestrahlung von anderen elektromagnetischen Strahlungsformen ist eine relative Langwelligkeit der Strahlung und damit einhergehend die niedrige Frequenz sowie der geringe Energiegehalt der Strahlung. Der typische Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung ist im Infrarotbereich und somit bei Wellenlängen von ca. 800 nm bis ca. 1mm angesiedelt.

Wärmeleitung ist eine Form der Wärmeübertragung welche in ruhenden Flüssigkeiten (idealisiert) und festen Stoffen stattfindet. Dabei geben energiereiche (wärmere) Teilchen in Stoßprozessen Teile ihrer kinetischen Energie an energieärmere (kältere) Teilchen ab. Dieser Vorgang findet so lange statt, bis das Niveau der kinetischen Energie aller in Kontakt stehenden Teilchen gleich ist – also Temperaturgleichheit



herrscht. Der Stoff selbst und auch seine Teilchen erfahren dabei keine Veränderung ihres Ortes (abgesehen von der Bewegung der Teilchen um ihren theoretischen Ruhepunkt). Die Weiterleitung und Verteilung der Wärme erfolgt bei reinen Stoffen mit regelmäßiger Struktur gleichmäßig. In der Realität führen Verunreinigungen und Störungen des Gefüges zu einer oft erheblichen Abweichung von diesem Ideal.

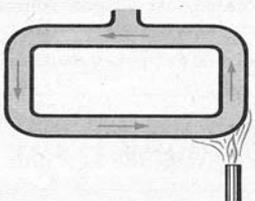
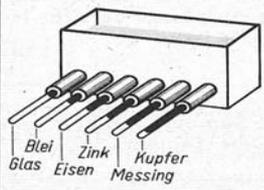
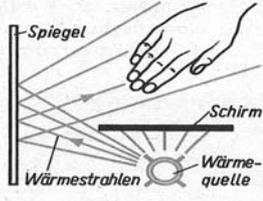
Wärmeströmung	Wärmeleitung	Wärmestrahlung
 <p>Wärmeströmung entsteht, indem stoffliche Teilchen ihre Lage verändern und dabei Wärme mit sich fortführen</p>	 <p>Körper bleibt in Ruhe. Seine schneller bewegten Teilchen übertragen durch Stoß Energie an benachbarte Teilchen</p>	 <p>Kein direkter Kontakt zwischen wärmerem und kälterem Körper. Warmer Körper sendet elektromagnetische Wellen aus, die sich wie Licht ausbreiten</p>
<ul style="list-style-type: none"> ■ Erwärmung von Wohnräumen, Zentralheizung, Winde und Meeresströmungen 	<p>Gute Leiter: Metalle, schlechte Leiter: Glas (Wärmedämmung), Gase</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Kühlrippen an Motoren, Isolierstoffe, Kleidung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sonnendach, Ofenschirm, Sonnenstrahlung, Abkühlung der Erde in wolkenlosen Nächten, Infrarotstrahler

Abbildung 6-3:
Grundformen der Wärmeübertragung
(Wissensspeicher Physik)

Am Ende dieses Abschnittes sei noch auf zwei wichtige Erscheinungen hingewiesen, welche die thermohydrischen Eigenschaften eines Stoffes bzw. Bauteils beeinflussen können (vgl. [4]):

- Enthalpieerscheinungen
- Beeinflussung der Wärmeleitung durch den Feuchtegehalt

Als **Enthalpie** wird ein thermodynamische Zustand bezeichnet, der sich als Summe aus innerer Energie U und Volumenarbeit pV ergibt: $H = U + pV$ (p äußerer Druck, V Volumen). Die Enthalpie ist somit vereinfacht dargestellt - eine Energieform.

Bei einer unter konstantem Druck ablaufenden Zustandsänderung (z.B. Verdampfung) ist die Änderung der Enthalpie gleich der vom System mit der Umgebung ausgetauschten Wärmemenge.

Als **freie Enthalpie** wird der Teil der Enthalpie bezeichnet, welcher bei umkehrbaren Vorgängen in einem thermodynamischen System in jede beliebige Energieform umwandelbar ist.

Von besonderer Bedeutung in diesen Betrachtungen sind die mit den Aggregatzustandsänderungen einhergehenden Umwandlungsenthalpieerscheinungen: Dabei handelt es sich um Wärme, die bei Phasenübergängen verbraucht oder freigesetzt wird, ohne zu einer entsprechenden Temperaturveränderung zu führen. Zugeführte Wärme bewirkt z.B. beim Schmelzen von Eis keinen Temperaturanstieg, solange Eis und Wasser nebeneinander vorliegen, sondern sie wird als Schmelzenthalpie gebunden und beim Gefrieren wieder freigesetzt (Erstarrungsenthalpie).

An vereisten Bauteiloberflächen kann diese Schmelzenthalpie dazu führen, dass trotz Temperaturen über dem Gefrierpunkt Vereisungen nicht abtauen. Das Programm WUFI betrachtet diesen Vorgang nicht



explizit. Falls Betrachtungen dieser Art notwendig sind, kann allerdings in der Simulation ein Vereisung durch eine Reifschicht an der Bauteiloberfläche dargestellt werden. Die verwendeten Klimadaten sollten bei diesen Betrachtungen allerdings an die Enthalpiebedingungen angepasst werden.

[Vergleiche: Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG, 2001]

Der Einfluss des Feuchtegehaltes auf die wärmetechnischen Eigenschaften von Stoffen und Bauteilen ist in **Abschnitt 7.2** im Zusammenhang mit den Materialkenndaten näher beschrieben. Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Mit zunehmenden Feuchtegehalt erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit von kapillarporösen Stoffen. Die Zunahme stagniert bei Erreichen der maximalen Wassersättigung des Poren- und Kapillarovolumens.
- Die Wärmekapazität eines kapillarporösen Stoffes erfährt ebenfalls eine Veränderung. Diese Veränderung ist allerdings in der Praxis bedeutungslos, da diese Veränderung entweder sehr gering ist oder der entsprechende Stoff so stark durchfeuchtet ist, dass seine Verwendbarkeit in Frage zu stellen ist.

7 Materialkenndaten

Da sich die im Wohnmobilbau verwendeten Materialien sowie die eingesetzten Konstruktionen zum Teil erheblich von denen aus dem Baubereich unterscheiden, ist eine direkte Übernahme von Material- und Bauteilkenndaten, wie sie z.B. in der DIN 4108 und verschiedenen Baufachbüchern aufgeführt sind, nur eingeschränkt möglich.

Dies hat zur Folge, dass Daten mit Hilfe der jeweiligen Material- und Bauteilhersteller recherchiert werden müssen. Die Schwierigkeit dieser Recherchen liegt darin begründet, dass viele Daten aufgrund der Ausrichtung des Produktes nicht ermittelt wurden. So interessiert es z.B. den Hersteller einer Fahrzeugbauplatte nicht, welchen „Flüssigtransportkoeffizient Saugen“ sein Produkt aufweist, da die Käufer seiner Produkte keinerlei Anforderungen an das Produkt diesbezüglich stellen.

Die Beschaffung einiger Materialdaten gestaltete sich folglich auch relativ schwierig. Wo Werte nicht bekannt waren, wurde daher versucht, anhand vorhandener Erfahrungen oder vergleichbarer Materialien diese unbekannt Materialdaten abzuschätzen.

7.1 Materialkenndaten für die numerischen Untersuchungen

Nachfolgende Tabelle stellt einen Überblick der in den numerischen Untersuchungen benötigten Materialdaten dar. Um die Bedeutung der Materialdaten für die Durchführung der Berechnungen zu veranschaulichen, wurden die für diese Untersuchung zwingend notwendigen Materialdaten rot gekennzeichnet.



Materialkennwert	Einheit	Detailver- fahren	Bauteilver- fahren	Simulati- onsverfah- ren
		WinIso 2D	WUFI	Helios
Rohdichte	kg/m ³	X	X	X
Porosität	m ³ /m ³		X	
Massenspezifische Wärmekapazität	J/(kg · K)	X	X	X
Wärmeleitfähigkeit trocken	W/(m · K)		X	
Wärmeleitfähigkeit (praktische Feuchte)	W/(m · K)	X	X	X
Wärmeleitfähigkeit feuchteabhängig als Tabelle oder generiert aus dem Feuchtezuschlag	W/(m · K)		X	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl trocken	-		X	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (praktische Feuchte)	-		X	
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl feuchteabhängig als Tabelle	-		X	
Feuchtespeicherfunktion als Tabelle oder approximiert durch Ausgleichsfeuchtegehalt bei 80% (w80) und freie Sättigung (wf)	kg/m ³		X	
Flüssigtransportkoeffizient Saugen als Tabelle oder generiert aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Wert)	m ² /s		X	
Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen [m ² /s] als Tabelle oder generiert aus dem Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Wert)	m ² /s		X	
X = zwingend erforderlich X = optional				

Tabelle 7-1: Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen.

7.2 Erläuterung der Materialkenndaten

Bei der Simulation mit dem Programm Helios stehen hauptsächlich energetische Gesichtspunkte eines Wohnmobils im Vordergrund. Die hierfür benötigten wärmetechnischen Kennwerte sind anhand der einschlägigen Literatur bzw. durch Herstellerbefragung relativ einfach zu ermitteln.

Ein Hauptaugenmerk sollte dabei allerdings auf der Berücksichtigung des Feuchtegehaltes und den davon abhängigen wärmetechnischen Eigenschaften der Materialien liegen. Falls sich die Angaben der Werte auf das trockene Material beziehen, so ist in jedem Fall eine Korrektur hinsichtlich der anzunehmenden Materialfeuchte erforderlich, um realistische Werte zu erhalten.

Diese Korrektur der „trockenen“ Materialkenndaten muss im Programm Helios über statische – das heißt zu Beginn der Eingabe bereits festgelegte – Werte erfolgen, da Helios im Gegensatz zum Programm WUFI keine Funktionen zur hygrischen Bauteilbetrachtung und der damit einher gehenden Veränderung des thermischen Bauteilverhaltens besitzt.

Gleiches gilt auch für die Wärmebrückenbetrachtungen mit dem Wärmebrückenprogramm WinIso 2D.

Genau diese Kopplung von hygrischen und thermischen Analysefunktionen und deren gegenseitige Beeinflussungen ermöglicht dem Programm WUFI eine sehr realistische Darstellungsweise der tatsächli-



chen Vorgänge im und am Bauteil. Allerdings ist demzufolge der Bedarf an detaillierten hygrischen und thermischen Materialkennwerten ungleich höher als bei Helios und WinIso 2D.

Allerdings sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass WUFI aufgrund der guten numerischen Erfassung der ablaufenden hygrischen und thermischen Vorgänge in der Lage ist, aus den in der vorangegangenen Tabelle abgebildeten Mindestwerten (schwarzes X), aufwendigere Werte (rotes X) näherungsweise zu generieren. Da diese Generierung nur eine Annäherung an experimentell gemessene Werte sein kann, ist einleuchtend. Daher stellt sich am Anfang einer jeden Untersuchung immer die Frage, was zu untersuchen ist, und welche Ergebnisgenauigkeit gefordert ist. Die sehr guten Hilfetexte des Programms WUFI gehen in den Kapiteln 13 bis 17 sehr genau auf die Zusammenhänge zwischen Genauigkeit bestimmter Materialkennwerten und den Abweichungen des Berechnungsergebnisses ein.

Nachfolgende Kurzdarstellung der Materialkennwerten basiert unter anderem auf den Hilfetexten von WUFI [9]. Sie ist jedoch in den für Helios und WinIso 2D relevanten Punkten uneingeschränkt auch für diese Programme gültig.

7.2.1 Dichte, Rohdichte, Reindichte [kg/m³]

Die Rohdichte ρ_{roh} ist das Verhältnis der Masse m eines Probenstücks zum Gesamtvolumen V_{ges} der Probe inklusive aller darin befindlichen (Fremd-) Stoffe: $\rho_{\text{roh}} = m / V_{\text{ges}}$. Die Rohdichte ist demnach bei hygroskopischen Stoffen von deren Feuchtegehalt abhängig.

Die Reindichte ρ_{rein} ist dagegen das Verhältnis der Masse m des Probenstücks zum Volumen, das von der Materialmatrix selbst eingenommen wird: $\rho_{\text{rein}} = m / (V_{\text{ges}} - V_{\text{poren}}) = m / V_{\text{rein}}$. [9]

(vgl. [9])

7.2.2 Porosität [m³/m³]

Die Porosität definiert das Volumen des inneren Porenraumes eines Stoffes. Ist dieser Porenraum in der Lage, Wasser aufzunehmen und zu transportieren, so ergibt sich aus der Porosität der maximale Wassergehalt w_{max} eines Probestückes ($w_{\text{max}} = \text{Porosität} \cdot \rho_{\text{wasser}}$). [9]

Falls keine Angaben zur Porosität vorliegen, kann diese aus der Reindichte ρ_{rein} und der Rohdichte ρ_{roh} gemäß dem Hilfetext von WUFI Kapitel 13 wie folgt geschätzt werden:

$\rho_{\text{roh}} = m / V_{\text{ges}} = m / (V_{\text{rein}} + V_{\text{poren}})$, daraus folgt:

$\rho_{\text{rein}} / (1 + V_{\text{poren}}/V_{\text{rein}}) = \rho_{\text{rein}} \cdot V_{\text{rein}}/V_{\text{ges}} = \rho_{\text{rein}} \cdot (1 - V_{\text{poren}}/V_{\text{ges}}) = \rho_{\text{rein}} \cdot (1 - \text{Porosität})$, und somit

Porosität = 1 – $\rho_{\text{roh}} / \rho_{\text{rein}}$. [9]

ρ_{rein} wiederum kann durch Vergleich mit anderen Materialien geschätzt werden, welche dieselbe Zusammensetzung und nur eine andere Rohdichte haben, sofern deren Rohdichte und Porosität bekannt sind. Beispiel: ein Porenbetonblock mit $\rho_{\text{roh}} = 600 \text{ kg/m}^3$ und Porosität = 0.72 hat eine $\rho_{\text{rein}} = 600 / (1 - 0.72) \text{ kg/m}^3 = 2140 \text{ kg/m}^3$. Die Porosität eines Porenbetonblocks mit $\rho_{\text{roh}} = 400 \text{ kg/m}^3$ kann daher abgeschätzt werden als Porosität = $1 - 400/2140 = 0.81$.

(vgl. [9])



7.2.3 Wärmekapazität [J/kg · K]

Die Wärmekapazität ist definiert als die massenspezifische Wärmekapazität des trockenen Materials. Die Verwendung der massenspezifischen Wärmekapazität bietet den Vorteil, dass dieser Wert nur von der chemischen Zusammensetzung des Materials abhängt, nicht aber von seiner Porosität. So haben beispielsweise Porenbetonblöcke mit Rohdichten von 400 kg/m^3 und 600 kg/m^3 dieselbe massenspezifische Wärmekapazität.

Die Wärmekapazität der u.U. im Porenraum vorhandenen Feuchtigkeit wird von WUFI selbständig berücksichtigt. Für Helios und WinIso 2D können die in den Anlagen aufgeführten Wärmekapazitäten der Materialien ohne Veränderung in die Berechnungen einbezogen werden, da die Feuchteabhängigkeit für die Genauigkeit der Ergebnisse keine praktische Bedeutung hat.

(vgl. [9])

7.2.4 Wärmeleitfähigkeit trocken / feuchteabhängig [W/m · K]

Beschreibt die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffs. Da dieser Wert bei allen kapillarhygroskopischen Stoffen feuchteabhängig ist, muss die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der tatsächlichen Stofffeuchte betrachtet werden. Rechenwerte, wie z.B. die in der DIN 4108 angeführten, können bereits einen Zuschlag enthalten, der den Beitrag eines typischen Feuchtegehaltes berücksichtigt. Sie sind dann streng genommen keine Trockenwerte mehr.

Wenn Berechnung in WUFI mit einer konstanten (d.h. nicht feuchtegehaltsabhängigen) Wärmeleitfähigkeit durchgeführt wird (z.B. weil keine detaillierten Daten zur Feuchteabhängigkeit verfügbar sind), so können die Wärmeleitfähigkeitswerte mit dem bereits enthaltenen typischen Feuchtegehalt (z.B. DIN 4108) verwendet werden. Die Feuchteabhängigkeit wird dann von WUFI näherungsweise berücksichtigt.

Falls jedoch explizit eine Tabelle mit feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten vorhanden ist, muss sichergestellt sein, dass der Wert für den Feuchtegehalt = 0 auch wirklich dem Trockenwert entspricht, da der Feuchtegehalt sonst doppelt berücksichtigt wird.

Für die Programme Helios und WinIso 2D sind grundsätzlich die mit der typischen Feuchte beaufschlagten Wärmeleitfähigkeitswerte zu verwenden.

(vgl. [9])

7.2.5 Diffusionswiderstandszahl trocken / feuchteabhängig [-]

Bezeichnet die Diffusionswiderstandszahl (μ -Wert) eines Stoffs. Der μ -Wert gibt an, um welchen Faktor der Diffusionswiderstand im Material höher ist als in ruhender Luft. Die Verwendung der Diffusionswiderstandszahlen in den einzelnen Programmen erfolgt in Analogie zur Wärmeleitfähigkeit. Während Helios und WinIso 2D einen mit der praktischen Einsatzfeuchte beaufschlagten Kennwert benötigen, stellt WUFI aufgrund seiner detaillierten thermohygrischen Analysemethoden höhere Anforderungen an die Genauigkeit der Kennwerte.

Ein Möglichkeit der Dateneingabe erfolgt ähnlich den feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten über das Anlegen von Wertetabellen aus Messreihen, Untersuchungen, etc.. Während der Rechnung führt WUFI wiederholende Näherungsberechnungen durch, in deren Verlauf es kleine Bereiche der tabellierten Kurve 'absucht'. Allzu scharfe Knickpunkte in den Kurven können dabei unter ungünstigen Umständen das Nähe-



rungsverhalten (Konvergenzfehler) der Rechnung beeinträchtigen. In einem solchen Fall ist die Kurve durch Einfügen zusätzlicher Punkte zu glätten. Dabei sollte allerdings auch bedacht werden, dass eine übermäßige Anzahl von Tabelleneinträgen die Rechenzeit des Programms verlängert.

Wenn keine der o.g. Messreihen, etc. und somit keine feuchteabhängigen μ -Werte zur Verfügung stehen, wird WUFI einen „normalen“ Diffusionswiderstandswert bei Wassergehalten über der freien Sättigung w_f als feuchteabhängig behandeln: WUFI reduziert ihn proportional zum Feuchteüberschuss über w_f , bis er bei maximaler Sättigung w_{max} den Wert $\mu=0$ erreicht. Damit wird näherungsweise berücksichtigt, dass bei sehr hohen Wassergehalten auch die großen Kapillaren zunehmend mit Wasser gefüllt sind und nicht mehr zum Dampftransport beitragen können.

Die Verwendung der gebräuchlichen, mit der praktischen Einsatzfeuchte beaufschlagten Kennwerte ist für die hier angestellten Betrachtungen daher in aller Regel hinreichend.

(vgl. [9])

7.2.6 Feuchtespeicherfunktion

Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt die Feuchtespeicherfähigkeit eines Stoffes.

Bei **kapillarporösen hygrokopischen Stoffen** stellt sie den Zusammenhang zwischen dem Feuchtezustand der umgebenden Luft und dem entsprechenden Ausgleichswassergehalt des Stoffes dar. Dabei treten ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 60 bis 80 % wegen der Dampfdruckerniedrigung in den feinen Kapillaren zusätzlich Kondensationserscheinungen auf, die einen deutlichen Anstieg der Ausgleichsfeuchte zur Folge haben.

Kapillaraktive Stoffe können bei Kontakt mit Wasser dieses so lange aufsaugen, bis die freie Sättigung w_f des Stoffes erreicht ist. Dieser Wassergehalt entspricht der Feuchtespeicherfunktion bei einer relativen Feuchte von 100 %. Wegen der im Stoff eingeschlossener Luft ist der Wassergehalt w_f jedoch geringer als der durch die Porosität bestimmte maximale Wassergehalt w_{max} . Über w_f hinausgehende Wassergehalte können z.B. durch Kondensation im Temperaturgefälle erreicht werden (z.B. in Dämmstoffen; diese sind häufig nicht kapillaraktiv und haben daher $w_f \gg 0$).

In WUFI wird die Feuchtespeicherfunktion durch eine Tabelle beschrieben, die den relativen Feuchten die entsprechenden Feuchtegehalte zuordnet. Die Tabelle kann eine beliebige Anzahl von Einträgen enthalten, zwischen denen linear interpoliert wird. Es sollte bei der Erstellung bzw. Verwendung solcher Tabellen allerdings bedacht werden, dass zu viele Daten den Rechenablauf von WUFI verlangsamen, zu wenige Daten wiederum eine zu plötzliche und somit unrealistische Änderung der Feuchtespeicherfunktion bedeuten (Siehe Konvergenzfehler Abschnitt 9.1).

Falls keine Werte zur kontinuierlichen Beschreibung der Feuchtespeicherfunktion vorliegen, kann für den Gebrauch in WUFI eine sogenannte approximierete Feuchtespeicherfunktion gemäß WUFI-Hilfetext Kapitel 14 wie folgt angewandt werden:

Die freie Sättigung w_f und der „praktische Feuchtegehalt“ w_{80} , welcher der Ausgleichsfeuchte bei einer relativen Feuchte von 80% entspricht, gehört zu den Standardstoffkennwerten und sind daher für viele



Materialien bekannt. Falls sich die Feuchtespeicherfunktion des betreffenden Stoffes hinreichend genau durch die Funktion

$$w = w_f \cdot \frac{(b-1) \cdot \varphi}{b - \varphi} \quad [9]$$

w	[kg/m ³]	:	Feuchtegehalt
w _f	[kg/m ³]	:	Feuchtegehalt bei freier Sättigung
φ	[-]	:	Relative Feuchte
b	[-]	:	Anpassungsparameter

darstellen lässt, genügt die Angabe von w₈₀ und w_f, um die Feuchtespeicherfunktion für WUFI eindeutig festzulegen.

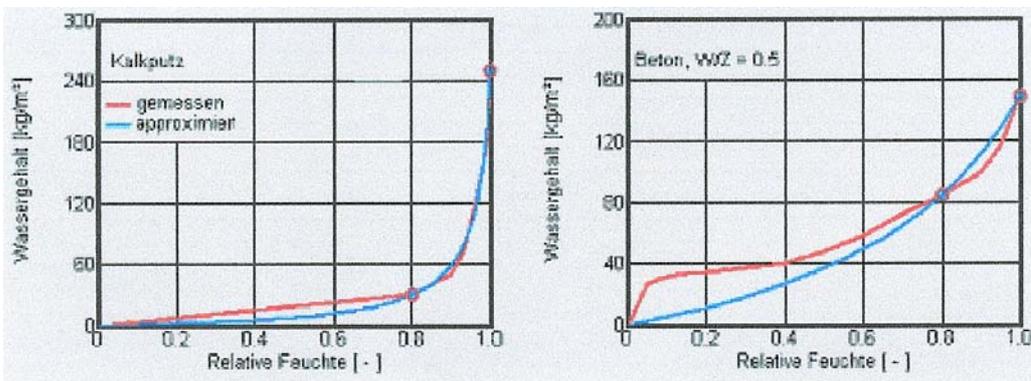


Diagramm 7-1: Genauigkeitsvergleich der approximierten Feuchtespeicherfunktion

(vgl. [9])

7.2.7 Flüssigtransportkoeffizienten Saugen und Weiterverteilen

Der Flüssigtransportkoeffizient Saugen D_{ws} beschreibt die kapillare Wasseraufnahme bei vollständiger Benetzung der Bauteiloberfläche. Dies entspricht in bauphysikalischem Zusammenhang der Beregnung eines Bauteils oder einem Wasseraufnahmeversuch. Der Saugvorgang wird von den größeren Kapillaren bestimmt, da sie zwar eine geringere Saugkraft als die kleinen Kapillaren besitzen, ihr Strömungswiderstand aber wesentlich geringer als der von kleinen Kapillaren ist.

Der Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D_{ww} beschreibt die Umverteilung des aufgesaugten Wassers, wenn nach Beendigung der Benetzung kein neues Wasser mehr eindringt und das vorhandene Wasser sich zu verteilen beginnt. Das Weiterverteilen wird von den kleineren Kapillaren bestimmt, da sie mit ihrer größeren Saugkraft die großen Kapillaren leersaugen. Da das Weiterverteilen in den kleinen Kapillaren mit ihrem höheren Strömungswiderstand langsamer abläuft, ist der zugeordnete Flüssigtransportkoeffizient in der Regel deutlich kleiner als für das Saugen.



Das Programm WUFI benutzt daher für kapillaraktiven Materialien je zwei Flüssigtransportkoeffizienten in Tabellenform (Saugen, Weiterverteilen), die je nach Randbedingung (Regen / kein Regen) in der Rechnung zur Anwendung kommen.

(vgl. [9])

Da eine Hauptanforderung an die Außenbauteile von Wohnmobilen die größtmögliche Wasser- bzw. Regendichtheit ist, können die Flüssigtransportkoeffizienten für die hier angestellten Untersuchungen vernachlässigt werden. Bei der Betrachtung von bereits vorhandenen konstruktionsbedingten Feuchteschäden in Wohnmobilen können diese Werte allerdings sehr aufschlussreiche Ergebnisse über die Geschwindigkeit und das Ausmaß von Feuchteverteilungen in einem Bauteil geben.



7.3 Kennwerte für die von der Firma Knaus verarbeiteten Materialien

Die nachfolgenden Materialien sowie deren Kennzahlen werden in unveränderter Form in den Berechnungen verwendet. Um eine Nachvollziehbarkeit der Daten zu gewährleisten, ist in der Tabellenspalte „Anmerkung“ die Herkunft der einzelnen Daten beschrieben. Da oft widersprüchliche Aussagen oder Nichtnennung von einzelnen Daten in den verschiedenen Quellen auftreten, besteht häufig die Notwendigkeit, Materialdaten aus Quellen verschiedener Herkunft zu kombinieren. In den Anmerkungen sind daher oft mehrere Quellen genannt.

Kategorie	Material	Rohdichte [kg/m ³]	Porosität [m ³ /m ³]	Wärmekapazität [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit bei praktischem Feuchtegehalt [W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit feuchteabh. [W/(mK)]	Diffusionswiderstand bei praktischem Feuchtegehalt [-]	Diffusionswiderstand feuchteabh. [-]	Feuchtespeicherfunktion	Flüssigtransportkoeffizient Saugen und Weiterverteilen	Anmerkung
Dämmstoffe	EPS	15	0,95	1500	0,040	3)	30	3)	x	x	Herstellerangaben 3)
	Glasfaser	30	0,99	840	0,037	3)	1,3	3)	x	x	3)
	PU-Schaum	40	0,95	1500	0,032	3)	50	3)	x	x	3) 4)
Außenbekleidung	Aluminium	2750	0	920	163	163	∞	∞	x	x	1)
	Stahl	7800	0	420	42	50	∞	∞	x	x	1)
	GFK / Polyester-schaumharz	1100	0,001	1500	0,18	x	50000	x	x	x	Herstellerangaben 13)
Holz und Holzwerkstoffe	Fichte	600	0,2	2000	0,20	3)	100	3)	3)	3)	3) 4)
	FurnierFurniersperrholz	500	0,5	1500	0,13	3)	500	3)	3)	x	3) 4) 6)
	Harte Holzfaser-platte	950	0,64	1800	0,13	3)	35	3)	3)	3)	3) 8)
	Fahrzeugbauplatten	680	0,5	1500	0,15	3)	500	3)	3)	x	Herstellerangabe 3) 4)
Schichtstoffe	Dekorpapier (Durolin®)	900	0,001	1500	0,25	x	0,75	x	x	x	Herstellerangaben 1) 9) 10) 12)
Bodenbeläge	PVC	750	0,001	1500	0,1	x	50000	x	x	x	Herstellerangaben 1) 10)
Kunststoffe	Polystyrol	1100	x	1300	0,145	x	x	x	x	x	1)
Kunststoff-scheiben	Acrylglas (PMMA)	1160	x	1465	0,175	x	x	x	x	x	1)
Gläser	Glas	2500	0	840	0,8	x	∞	x	x	x	1)
Sonstiges	Luftschichten	1,3	0,999	1000	15)	3)	0,79	3)	x	x	3) 15)
	Eis	920	x	2100	2,78	1000	x	x	x	x	1)
	Reif	910	x	2100	2,23	10	x	x	x	x	1)
	Schnee (Schwer)	500	x	2000	0,64	5	x	x	x	x	1)14)
	Wasser	1000	0	4182	0,555	150000	x	x	x	x	1) 5)
	Matratzenschaum	40	x	1500	0,040	x	x	x	x	x	7)

Tabelle 7-2: Materialkenndaten für die numerischen Untersuchungen.



Quellen der Materialdaten:

- 1): Tabellenhandbuch WEKA-Verlag Harald Buss ISBN 3-8111-3080-3 (Wertesammlung aus 2) und Cammerer, Kommentar DIN 4108 Beuth-Verlag)
- 2): DIN EN 4108-4
- 3): WUFI Materialdatenbank IBP - Holzkirchen
- 4): Praktische Werte gemittelt aus den WUFI-Tabellen
- 5): Natur und Technik CVK-Verlag ISBN 3-464-00082-6
- 6): Rohdichte angepasst
- 7): Eigene Werte, hergeleitet aus den Grundmaterialien
- 8): Daten wurden aus den in WUFI vorhandenen Werten für MDF abgeleitet, da die Herstellung und Zusammensetzung der harten Faserplatten ähnlich dem MDF erfolgt. Die Rohdichte stellt ein Mittelwert der Tabellenwerte aus 2) (1000 kg/m^3) und den Mindestwerten gemäß DIN 68750 sowie DIN 68754-1 (900 kg/m^3) dar.
- 9): Dichte gemäß Hersteller. Restliche Werte wurden anhand ähnlicher Stoffe mit Daten aus 1) gemittelt.
- 10): Porosität aus ähnlichen Stoffwerten aus WUFI Materialdatenbank gemittelt.
- 11): Dichte gemäß Hersteller. Restliche Werte wurden anhand ähnlicher Stoffe mit Daten aus 3) gemittelt.
- 12): Praktische Diffusionswiderstandszahl aufgrund Gesprächen mit dem Hersteller angenommen
- 13): Dichte und Wärmeleitfähigkeit gemäß Hersteller. Restliche Werte wurden anhand ähnlicher Stoffe mit Daten aus 3) gemittelt.
- 14) Wärmekapazität abgeschätzt
- x : Keine Angaben vorhanden oder Eigenschaft bei Material nicht ausgeprägt

15) Besonderheiten von Luftschichten (vgl. [9]; [10])

Luftschichten müssen bei der thermischen Betrachtung hinsichtlich folgender Kriterien analysiert werden:

- Anordnung der Luftschicht (waagrecht/senkrecht)
- An die Luftschichten grenzendes Material (Metalle/Nichtmetalle)
- Flussrichtung des Wärmestromes (von oben/von unten)

Voraussetzung für die Gültigkeit der hier getroffenen Aussagen ist die Bedingung, dass die betrachteten Luftschichten nicht mit der Außenluft in Verbindung stehen. Belüftete Luftschichten sind aufgrund der Stärke der Belüftung und der auftretenden Strömungen schwer abschätzbar. Je nach Stärke der Belüftung nähern sich die Bedingungen der Außenluft mehr oder weniger stark an [Vergleiche: WUFI Hilfe Details/Luftschichten].

Eine Werte mäßige Erfassung der Luftschichten erfolgt unter anderem in der DIN 4108 Teil 4. Für die im Zusammenhang mit dieser Ausarbeitung angestellten Untersuchungen genügt eine Erfassung der Luft-



schichtwerte unter Zuhilfenahme des im folgenden abgebildeten Diagramms 7-2. Detailliertere Angaben sind der oben genannten Norm sowie dem Kapitel 7.5.4 von [10] zu entnehmen.

Für die thermohygrischen Betrachtungen sei an dieser Stelle auch auf die WUFI Hilfe Details/Luftschichten [9] verwiesen.

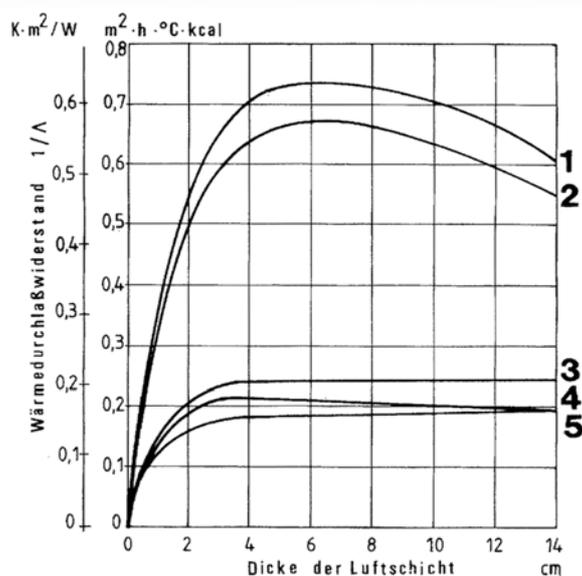


Diagramm 7-2:
Wärmedurchlasswiderstand unbelüfteter Luftschichten

Es bedeuten:

- 1 Luftschicht senkrecht zwischen blanken Metallen
- 2 Luftschicht senkrecht zwischen blankem Metall und Baustoff
- 3 Luftschicht senkrecht zwischen Baustoffen
- 4 Luftschicht waagrecht zwischen Baustoffen, Wärmestrom von oben nach unten
- 5 Luftschicht waagrecht zwischen Baustoffen, Wärmestrom von unten nach oben

Oberflächendaten der Außenbauteile:

Für die energetischen Betrachtungen in Helios sowie die thermohygrischen Untersuchungen in WUFI werden für die pulverbeschichtete reinweiße Oberfläche der sichtbaren Außenbauteile folgende Strahlungsemissions- und Absorptionswerte angenommen (Quelle: WUFI):

Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl: 0,20

Langwellige Strahlungsemissionszahl: 0,90

Eine Regenwasserabsorption der Bauteiloberflächen ist nicht vorhanden.

Wärmeübergangswiderstände:

Die Rechenwerte für die Wärmeübergangswiderstände erfolgen in Anlehnung an DIN 4108, Teil 4, Tab. 5 sowie nach DIN 1645-1 Caravans Tabelle L.1. Die Werte sind bereits in den jeweiligen Programmen hinterlegt oder wurden manuell in diese eingegeben.



Gläser:

Die Kennwerte der einzelnen Gläser finden ausschließlich in den energetischen Berechnungen im Programm Helios ihre Verwendung.

Glas	Wärmedurchgangskoeffizient U_w [W/(m ² K)]	Lichtdurchlässigkeit [%]	Gesamtenergiedurchlassgrad g [%]
VSG Windschutzscheibe 1)	5,71	78,00	52,10
Seitenscheiben des Fahrerhauses 2)	5,71	83,80	86,20
Acrylglas der Aufbau- fenster und des Dach- fensters 1)	x*	73,50	60,00

Tabelle 7-3: Glasdaten für die Berechnungen in Helios (Herstellerangaben)

- 1) Herstellerangabe Fa. Pilkington Automotive
- 2) Angaben aus Heliosdatenbank
- x* Aufgrund der Herstellerangaben (Fa. Seitz) lagen nur Wärmedurchgangskoeffizienten für das gesamte Fenster (U_w) vor. $U_w = 2,40$ W/(m²K) bzw. 1,65 W/(m²K) bei geschlossenem Rollo. Diese Werte wurden auf den Glasanteil umgerechnet. Gründe dafür sind in **Abschnitt xxx** näher erläutert.

8 Untersuchungen zum Nutzerverhalten

Folgendes Kapitel beschäftigt sich mit der Analyse des Nutzerverhaltens von Wohnmobilreisenden. Während in Bauwerken entsprechend deren Bestimmung ein ausreichend genaues Verhalten der Nutzer vorhergesagt werden kann, variiert das Verhalten der Wohnmobilmutzer doch erheblich. Diese Unterschiede werden zum einen durch die Veränderung hinsichtlich des Aufenthaltsortes und zum anderen durch die meist hobbyartigen bzw. freizeitgestaltenden Nutzung des Wohnmobils hervorgerufen. Da jeder Nutzer hinsichtlich seiner Freizeitgestaltung und Reiseplanung andere Vorstellungen besitzt, sind auch die Verhaltensweisen sehr vielfältig.

8.1 Vorhandene Untersuchungen des Nutzerverhaltens

Trotz vieler Statistiken, welche sich unter anderem mit Wohnmobilgrößen, Zulassungszahlen, Anzahl der Reisenden, etc. beschäftigen, sind derzeit keinerlei Untersuchungen über die für diese Ausarbeitung relevanten Verhaltenserscheinungen von Wohnmobilmutzern bekannt. Lediglich eine Auflistung von beliebten Reisezielen sowie die durchschnittliche Dauer eines Wohnmobilurlaubes gehen aus einigen Statistiken hervor.



8.2 Untersuchungen zum Nutzerverhalten im Zuge der Diplomarbeit

Aus Mangel an geeigneten Datenmaterial wurde im Zuge dieser Ausarbeitung eine Untersuchung des typischen Nutzerverhaltens von Wohnmobilreisenden in Form einer Umfrage durchgeführt. Da es sich dabei aus Gründen der begrenzten Zeit und der finanzieller Mittel um eine nichtrepräsentative Umfrage handelt, stellen diese Umfrageergebnisse allerdings keine statistisch belegbaren allgemeingültigen Aussagen dar.

Daher erscheint es besonders wichtig, dass die Vorgehensweise bei der Durchführung der Befragung gut dokumentiert und nachvollziehbar gestaltet ist, um den Außenstehenden die Möglichkeit einer individuellen Beurteilung der Datenqualität und somit letztlich auch der daraus gewonnenen Erkenntnisse zu geben.

8.3 Ziele der Untersuchungen zum Nutzerverhalten

Die Ziele der Verhaltensuntersuchungen im Zuge dieser Diplomarbeit lassen sich wie folgt definieren:

Ziel 1: Erstellen eines für Wohnmobilmutzer typischen Tagesablaufes. Dabei sollen besonders für das Innenraumklima relevante Verhaltensweisen ermittelt werden. Zu diesen Verhaltensweisen gehören:

- Verweildauer im Mobil in Abhängigkeit vom Außenklima (Erkenntnis über: Wärme-, Feuchteabgabe durch die Nutzer, Betriebsdauer von Heiz-, Lüftungs- oder Klimaanlage).
- Lüftungsverhalten (Erkenntnis über: Luftwechselraten und evtl. damit verbundene Energieverluste).
- Nutzung der technischen Ausstattung des Wohnmobils, wie Kocher, Kühlschrank, Dusche, etc. (Erkenntnis über: Interne Wärmelasten, Feuchteproduktion).

Ziel 2: Erstellen von wohnmobiltypischen Klimadatensätzen für die instationären numerischen Untersuchungen dieser Ausarbeitung. Folgende Kriterien sollen dabei besondere Berücksichtigung finden:

- Typische Reiseziele von Wohnmobilmutzern in Europa (Erkenntnis über: Welche Klimaregionen müssen bei der Generierung eines spezifischen Klimadatensatzes berücksichtigt werden?).
- Durchschnittliche Verweildauer in einer Region gleichen Klimas in Abhängigkeit von der dort herrschenden Wettersituation (Erkenntnis über: Dauer der Einwirkung regionaltypischer Klimata. Verweildauer in der Klimaregion bei für den Nutzer günstigen/ungünstigen Klimabedingungen).
- Jährliche Nutzungsdauer und Nutzungsart des Wohnmobils (Erkenntnis über: Häufigkeit der wohnmobiltypischen Nutzung).

8.4 Durchführung der Untersuchungen zum Nutzerverhalten

Aufgrund der bereits genannten Beschränktheit von Zeit und finanziellen Mitteln erfolgt die Untersuchung des Nutzerverhaltens von Wohnmobilmutzern mit Hilfe eines Fragebogens ([siehe Anlagen Abschnitt 8.1](#)),



der an verschiedene private Wohnmobileigentümer verteilt wurde. Die an der Umfrage teilnehmenden Wohnmobileigentümer wurden folgendermaßen zufällig ausgewählt:

- Per Internet: Einstellen des Fragebogens in Wohnmobilforen sowie Anfragen bei Wohnmobilitzern über deren Hompages. Wohnmobilforen und Hompages wurden mit einer Internet-Suchmaschine ermittelt und zufällig ausgewählt.
- Verteilen von Fragebögen an parkenden Wohnmobilen.

Die durchgeführte Untersuchung beschränkt sich auf insgesamt 11 Wohnmobileigentümer (9 per Internet, 3 per Fragebogen auf der Strasse). Es wurden dabei keinerlei Vorinformationen wie z.B. Alter, Art des Wohnmobils, Anzahl der Mitreisenden, etc. für eine Vorauswahl der Personen berücksichtigt. Einzig die Tatsache, dass die Auswahl der Personen ausschließlich über das Internet sowie auf dem Parkplatz geschah, und die Personen verständlicherweise freiwillig an der Befragung teilnahmen, könnte als eine gewisse Einschränkung hinsichtlich der Zufälligkeit gewertet werden.

Positiv kann sich in diesem Zusammenhang der Zeitpunkt der Umfrage erweisen. Da trotz aller andersgerichteten Entwicklungen viele Wohnmobileigentümer Ihre Wohnmobile in hauptsächlich in den Monaten April bis Oktober nutzen oder nutzen dürfen (saisonale Zulassung der Wohnmobile), kann davon ausgegangen werden, dass die zum Zeitpunkt der Befragung auf dem Parkplatz kontaktierten Personen ihre Wohnmobile tendenziell eher ganzjährig nutzen und somit eher in der Lage sind, aussagekräftige Hinweise über die winterliche Nutzung von Wohnmobilen zu geben als typische Sommernutzer.

8.5 Auswertung der Umfrageergebnisse

Die Auswertung der Umfrageergebnisse ist in den [Anlagen Kapitel 8](#) detailliert beschrieben. Die nachfolgenden Abschnitte des Kapitels bauen auf dieser Auswertung auf.

8.6 Das wohnmobiltypische Nutzerverhalten

Aus den Umfragedaten lassen sich acht Nutzerverhaltendatensätze ableiten, die das typische Verhalten von Wohnmobilitzern in direkter Abhängigkeit zum herrschenden Außenklima darstellen. Allen acht Nutzerverhaltendaten ist eine typische Anzahl von drei Reisenden/Wohnmobil zugrunde gelegt. Dieser Wert liegt über dem Durchschnittswert von 2,4 Reisenden/Wohnmobil der repräsentativen Umfrage der Zeitschrift „promobil“, beinhaltet dafür aber auch eine gewisse Sicherheit hinsichtlich der 15 % der Befragten, die zu viert (oder mehr) verreisen.

Die im folgenden beschriebenen Datensätze dienen ausschließlich den energetischen Untersuchungen mit dem Programm Helios. Ihr Einfluss ist daher auf folgende Eingabeparameter beschränkt:

- Benutzerdefiniertes Tagesprofil der Lüftung
- Benutzerdefiniertes Tagesprofil der internen Lasten
- Benutzerdefiniertes Tagesprofil der Heizungsleistung



Zur zahlenmäßigen Erfassung des Nutzerverhaltens wurden folgende Werte und Überlegungen in die Erstellung der Datensätze eingebunden:

Tagesprofil Lüftung:

Die Luftwechselraten wurden in Anlehnung an Gertis [11] auf die hier gestellte Problematik übertragen. Folgende Werte wurden dabei zugrundegelegt: Fenster gekippt: $\beta = 2,0 \text{ h}^{-1}$; Querlüftung: $\beta = 20,0 \text{ h}^{-1}$.

- Die Grundluftwechselrate aufgrund von Undichtigkeiten in der Außenhülle eines Wohnmobils wurde mit $\beta = 1,5 \text{ h}^{-1}$ angenommen
- Jeder Duschvorgang hat normalerweise einen Lüftungsvorgang zur Folge. Der Lüftungsvorgang wurde je Duschvorgang mit 5 min festgesetzt. Die Luftwechselrate im separaten Wohnmobilbad über die geöffnete Dachluke und/oder geöffnete Fenster wurde dabei mit $\beta = 2,0 \text{ h}^{-1}$ angesetzt. Der zusätzliche Luftwechsel für 5 min beträgt somit $\beta = 0,17 \text{ h}^{-1}$ (über Verhältnisgleichung ermittelt).
- Vor und nach dem Schlafen wurde ebenfalls ein Lüftungsvorgang durch eine Querlüftung von gegenüberliegenden Fenstern für eine Zeit von jeweils 5 min angenommen. Die Luftwechselrate wurde auf $\beta = 20 \text{ h}^{-1}$ festgesetzt. Der zusätzliche Luftwechsel für 5 min beträgt somit $\beta = 1,7 \text{ h}^{-1}$ (über Verhältnisgleichung ermittelt).
- Für das Kochen im Wohnmobil wurde ein manuell ausgeführter Luftwechsel von $\beta = 2,0 \text{ h}^{-1}$ festgelegt. Für eine Kochdauer von einer Minute errechnet sich somit ein zusätzlicher Luftwechsel von $\beta = 0,033 \text{ h}^{-1}$. Aufgrund der unterschiedlichen Kochzeiten der einzelnen Nutzerdatensätze, muss dieser Wert mit der durchschnittlichen Minutenzahl für den Kochvorgang multipliziert werden. Da gewöhnlich nur einmal pro Tag „richtig“ gekocht wird, wurde der Wert in Abhängigkeit vom Außenklima in den Tagesablauf eingeordnet (z.B. macht es keinen Sinn, den Wert bei heißem Sommerwetter auf die Mittagszeit zu legen).
- Um die zusätzliche manuell ausgeführte Lüftung während des restlichen Aufenthalts im Mobil zu erfassen, wurde je Minute Aufenthalt im Mobil ein zusätzlicher manueller Luftwechsel von $\beta = 0,0028 \text{ h}^{-1}$ festgelegt. Dies entspricht einem zusätzlichen manuell ausgeführten Luftwechsel von $\beta = 2,0 \text{ h}^{-1}$ für eine Dauer von 5 Minuten je Stunde, bezogen auf eine Minute Aufenthalt im Wohnmobil.
- **Ausnahme:** In den Nutzerdatensätzen für angenehmes und heißes Sommerklima wird grundsätzlich eine Luftwechselrate von $\beta = 10,0 \text{ h}^{-1}$ während des gesamten Tagesablaufs in die Berechnung einbezogen.
- Für den Fall, dass eine Klimaanlage im Wohnmobil genutzt wird, haben die vorab genannten Werte Gültigkeit, da sonst die Funktion der Klimaanlage bei den hohen Sommerluftwechselraten stark beeinträchtigt wird.



Tagesprofil interne Lasten:

Die internen Lasten ergeben sich vor allem durch die Wärmeentwicklung der technischen Geräte, wie z.B. Beleuchtung, Heizung, Gaskocher, etc. sowie durch die sich im Raum befindlichen Personen.

- Die Gesamtwärmeverlustleistung der Beleuchtungsanlage gemäß **Abschnitt...** beträgt ca. 95 Watt/h. Davon ausgehend dass nur die Hälfte der vorhandenen Leuchten auch gleichzeitig genutzt werden, ergibt sich eine tatsächliche interne Last hervorgerufen durch die Beleuchtungsanlage von rund **45 Watt/h**.

In den Sommerdatensätzen werden jeweils nur die 21. und 22. Stunde des Tages mit dieser Verlustleistung beaufschlagt. In allen übrigen Datensätzen erfolgt eine Beaufschlagung von in 7., 8. sowie 19. bis 22. Stunde.

- Die maximale Wärmeleistung der Kocher beträgt 6.000 Watt/h. Eine Auslastung von 50 % während eines normalen Kochvorganges vorausgesetzt, ergibt sich eine zusätzliche Wärmelast von 3.000 Watt/h bzw. **50 Watt/min**. Entsprechend der durchschnittlichen Kochzeit erfolgt eine Verteilung dieser Wärmelast zu jeweils 1/6 auf 8. und 19. Stunde des Tages (Frühstück, Abendessen) und 4/6 auf die 12. Stunde des betreffenden Tages (Mittag).

Um das Kochverhalten im Sommer zu berücksichtigen, wurden in den Sommerdatensätzen jeweils 1/6 der Wärmelast auf die 8. und 12. Stunde und die übrigen 4/6 auf die 19. Stunde verteilt.

- Alle Nutzerdatensätze werden mit einer Verlustleistung von 10% von 2.000 Watt = **200Watt/h** für zwei Stunden des Tages (8. und 20. Stunde) aufgrund der Warmwasseraufbereitung beaufschlagt (2.000 W = Nennleistung der Warmwasseraufbereitung des Boilers Truma C6002).
- Die durchschnittliche Wärmeabgabe des Menschen wird unter Zugrundelegung der DIN 1946 wie folgt berücksichtigt: Schlafen/Aufenthalt im Wohnmobil = **90 Watt/h je Person** = 1,50 Watt/min je Person. Dieser Wert wurde aus den in der DIN 1946 genannten Werten für „Liegen“ (80 W/Person) und „ruhiges Sitzen“ (105 W/Person) hergeleitet.
- Wärmequellen wie Fernsehgeräte, Radios, Computer, nach außen entlüftete Kühlschränke, etc. werden durch eine Grundwärmelast von **10 Watt/h** in der Berechnung berücksichtigt.
- Bei der Nachbildung des Aufheizversuches nach DIN EN 1646-1 wurden keine internen Lasten angenommen.

Tagesprofil Heizungsleistung:

- Die Heizung wird über die in Helex bzw. Helios eingegebene Grenztemperatur selbstständig ein- oder ausgeschaltet. Für die Nachtzeit gemäss der durchschnittlichen Schlafzeit des jeweiligen Nutzerdatensatzes erfolgt aller zwei Stunden ein Abschalten der Heizung. Diese Maßnahme ist notwendig, da Helios bei der Regelung des Heizleistungsprofils nur die Zustände „Heizung An“ (1) und „Heizung Aus“ (0) verarbeiten kann. Eine Nachtabsenkung ist in der vorliegenden Version noch nicht implementiert.
- Um im Winterbetrieb ein Einfrieren bzw. ein zu starkes Auskühlen des Wohnmobils zu verhindern sind gemäß „Tagesprofil Heizleistung“ zusätzliche Heizungsinbetriebnahmen notwendig. Diese wird in den NVD berücksichtigt, indem die Heizung in der eigentlichen „Aus-Phase“ regelmäßig nach einer nachfolgend genannten Stundenzahl in Betrieb genommen wird:



- | | |
|--|--|
| NVD_FrjHrb schön; NVD_FrjHrb schlecht: | alle 4 Stunden |
| NVD_Winter schön; NVD_Winter schlecht: | alle 2 Stunden |
| NVD_Durchschnitt: | alle 5 Stunden |
| NVD_DIN 1646: | Dauerbetrieb (nach Durchlüftungsphase) |
- In den Sommerdatensätzen erfolgt ein Nachtbetrieb der Heizung mit stündlich wechselnden Ein/Aus-Phasen zwischen der 23. Stunde und der 5. Stunde. Durch diese Maßnahme wird die eventuelle Nutzung der Heizung in kalten Sommernächten simuliert. Da die Heizung wie bereits erwähnt über die Grenztemperatur selbsttätig geregelt wird, ist ein temperaturabhängiger unabhängig vom Nutzerdatensatz in jedem Fall gewährleistet.

Sonstiges:

Da Helios nicht in der Lage ist, extern erzeugte Benutzerprofile zu verarbeiten, muss für jeden Nutzerverhalten datensatz ein eigenes Projekt angelegt werden. Die fertigen Projekte sind auf der in den Anlagen beigefügten Programm – CDROM enthalten. Jedes Projekt enthält dabei neben den Daten für das Nutzerverhalten das gleiche Bauteilmodell des Knaus Sun Liners 650 LG. Zur Bearbeitung ist daher nur noch die gewünschte Klimadatei auszuwählen.

Die Benennung der jeweiligen Datensätze (NVD) bzw. Projekte erfolgt analog zu den in der Umfrage verwendeten Wetterdefinitionen wie folgt:

NVD_Sommer normal: Angenehmes Sommerwetter: z.B. warm, nicht zu heiß, kein Niederschlag, überwiegend Sonnenschein

NVD_Sommer heiß: Heißes Sommerwetter: sehr heiß, viel Sonnenschein

NVD_Sommer kühl: Schlechtes Sommerwetter: z.B. kühl, verregnet, windig

NVD_FrjHrb schön: Schönes Frühlings-/Herbstwetter: z.B. relativ milde Temperaturen, überwiegend Sonnenschein

NVD_FrjHrb schlecht: Schlechtes Frühlings-/Herbstwetter: z.B. nasskalt, verregnet, stürmisch

NVD_Winter schön: Schönes Winterwetter: z.B. Kalt aber trocken, überwiegend Sonnenschein

NVD_Winter schlecht: Schlechtes Winterwetter: z.B. nasskalt, windig, verregnet oder verschneit

NVD_Durchschnitt: Durchschnittliches Nutzerverhalten, z.B. für längerfristige Betrachtungen

NVD_DIN 1646: Spezieller Datensatz zur Nachbildung des Aufheizversuchs gemäß DIN EN 1646-1

Da die Daten der NVD aus den Durchschnittswerten der Umfrageergebnisse ermittelt wurden, kann es vorkommen, dass einzelne Daten teilweise keine logischen Verknüpfungen aufweisen. So ist es z.B. möglich, dass ein Datensatz für interne Lasten in der 12. Stunde eine Last durch das Kochen aufweist. Andererseits befinden sich zu dieser Zeit gemäß dem Datensatz gar keine Personen im Wohnmobil. Diese Widersprüche liegen in der Dateneingabe von Helios (Stundenweise Eingabe, keine Verknüpfungen zwischen den Daten, etc.) begründet, haben aber auf die Qualität der Simulationsergebnisse keine negativen Auswirkungen, da die Gesamtenergiebilanz davon nicht beeinflusst wird.



Inhalte der einzelnen Nutzerverhaltenssätze (NVD):

Die individuellen Daten der einzelnen NVD werden in Helios/Helex in die Eingabemasken „Allgemein“ sowie „Heizung-Kühlung“ eingegeben:

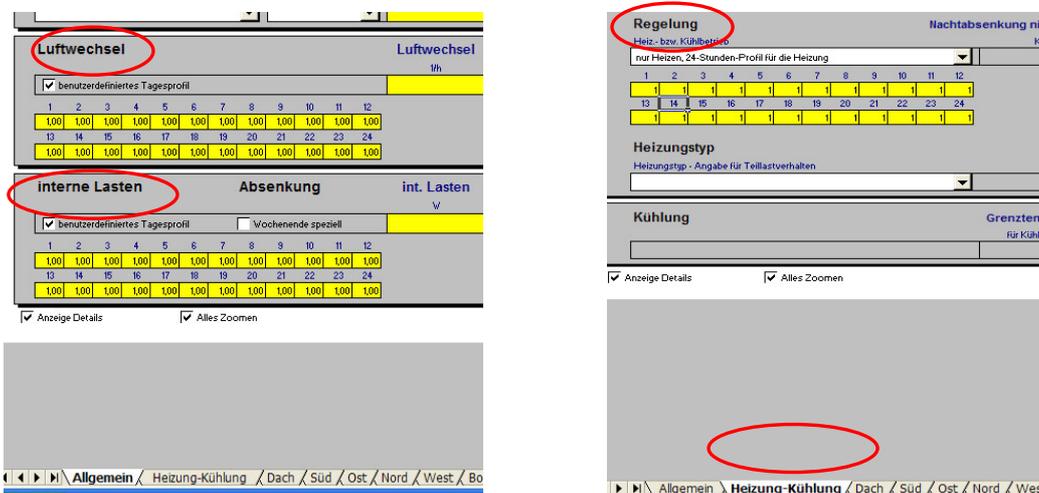


Abbildung 8-1: Eingabemasken von Helex für NVD – Generierung.

Generierung eines NVD am Beispiel des NVD_FrjHrb schön

Luftwechsel:

h ⁻¹	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
B)								0,51												0,51				
C)							1,7															1,7		
D)												0,83												
E)										0,17						0,17	0,17	0,17						
Σ	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	3,2	2,01	1,67	1,5	1,5	2,33	1,5	1,5	1,5	1,67	1,67	1,67	1,5	2,01	1,5	3,2	1,5	1,5
F)	1	1	1	1	1	1	2,13	1,34	1,11	1	1	1,55	1	1	1	1,11	1,11	1,11	1	1,34	1	2,13	1	1

Tabelle 8-1: Herleitung der Luftwechsel für das Programm Helios

Erläuterungen (siehe hierzu „Tagesprofil Lüftung“):

- A) Grundluftwechsel: Annahme $\beta = 1,5 \text{ h}^{-1}$
- B) Duschen: 3 Person/Mobil duschen zwei mal pro Tag = 6 Duschvorgänge
6 Duschvorgänge mit jeweils $\beta = 0,17 \text{ h}^{-1}$ ergibt einen zusätzlichen Luftwechsel von $\beta = 1,02 \text{ h}^{-1}$ (0,51 h^{-1} morgens, 0,51 h^{-1} abends)
- C) Querlüftung vor und nach dem Schlafen von jeweils $\beta = 1,7 \text{ h}^{-1}$
- D) Manueller Luftwechsel nach dem Kochen: 25 min durchschnittliche Kochdauer x 0,033 $\text{h}^{-1}/\text{min} = 0,83 \text{ h}^{-1}$
- E) Manueller Luftwechsel während Aufenthalt im Wohnmobil: 239 min durchschnittliche Aufenthaltsdauer x 0,0028 $\text{h}^{-1}/\text{min} = 0,67 \text{ h}^{-1}$
239 min = ca. 4h
0,67 $\text{h}^{-1} / 4\text{h} = 0,17 \text{ h}^{-1}$ Für vier Stunden erfolgt ein manueller Luftwechsel durch die Nutzer mit einer Luftwechselrate von $\beta = 0,17 \text{ h}^{-1}$. Die Stunden sind über den Tag (ca. 8. bis 20. Stunde) be-



liebig zu verteilen, da es generell nicht möglich ist, diese Zeiten exakt festzulegen. Überschneidungen mit anderen zusätzlichen manuellen Lüftungsvorgängen sind zu vermeiden, da Überschneidungen einen in der Realität unwahrscheinlichen „doppelten“ manuellen Luftwechsel beschreiben würden.

Σ Summe A) – E)

F) Multiplikator zur Berechnung der Abweichung von der Standardluftwechselrate. Helios benötigt zur Berechnung eine festzulegende Luftwechselrate. In diesem Beispiel ist das die Grundluftwechselrate $\beta = 1,5 \text{ h}^{-1}$. Um diese Grundluftwechselrate an den Tagesverlauf anzupassen, muss die jeweils stündliche Abweichung von dieser Grundluftwechselrate mittels eines Multiplikators festgelegt werden. Ist zum Beispiel in der 8. Stunde eine Luftwechselrate von $\beta = 3,00 \text{ h}^{-1}$ vorhanden, so ist im Zeitfeld der 8. Stunde der Faktor 2 einzutragen (Grundluftwechselrate $1,5 \text{ h}^{-1} \times \text{Faktor } 2 = 3,00 \text{ h}^{-1}$).

Interne Lasten:

[W]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
H)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
I)							45	45											45	45	45	45		
J)								208				834							208					
K)								200												200				
L)	270	270	270	270	270	270	270	270													270	270	270	270
Σ	283	283	283	283	283	283	328	736	10	10	10	844	10	10	10	10	10	10	263	255	328	328	283	283
M)	28	28	28	28	28	28	32,5	73,3	1	1	1	84,4	1	1	1	1	1	1	26,3	25,5	32,5	32,5	28	28

Tabelle 8-2: Herleitung der internen Lasten für das Programm Helios

Erläuterungen (siehe hierzu „Tagesprofil interne Lasten“):

- H) Grundwärmelast = 10 Watt/h
- I) Wärmeverlustleistung der Beleuchtungsanlage = 45 Watt/h. Vorhanden in 7., 8. sowie 19. bis 22. Stunde des Tages
- J) Wärmeabgabe der Gasbrenner beim Kochen = 50 Watt/min x 25 min durchschnittliche Kochdauer/Tag = 1250 Watt/Tag. Gemäß Annahmen in „Tagesprofil interne Lasten“ entfallen davon je 1/6 auf die 8. und 19. Stunde (je 208 W) sowie 4/6 auf die 12. Stunde (834 W)
- K) Verlustleistung durch die Warmwasseraufbereitung des Boilers = 200 Watt/h anfallend in der 8. und 20. Stunde des Tages
- L) Wärmeabgabe der Personen im Wohnmobil = 1,50 Watt/min je Person x 728 min Verweildauer je Tag = 1.092 Watt/Tag x 3 Personen = 3.276 Watt Wärmeabgabe aller Wohnmobilitutzer je Tag
3.276 Watt / 12,13 Stunden Aufenthaltsdauer (entspricht 728 min) = 270 Watt/Aufenthaltsstunde der 3 Personen im Wohnmobil
- Σ Summe H) – L)
- M) Multiplikator zur Berechnung der Abweichung von der Grundwärmelast. Es gelten die gleichen Ansätze wie unter Punkt F) „Multiplikator Luftwechselrate“ beschrieben.



Tagesprofil Heizleistung:

0/1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
N)	1	0	1	0	1	0			0	0	0		0	0	0		0	0	0					1	0
O)							1	1													1	1			
P)												1				1					1				

Tabelle 8-3: Herleitung Heizleistungsprofils für das Programm Helios

Erläuterungen (siehe hierzu „Tagesprofil Heizleistung“):

- N) Beschreibt den Zustand der Heizung: 1 = An, 0 = Aus. In der Schlafzeit wird eine Absenkung der Heizung bzw. der Raumtemperatur durch ein stündlich wechselndes Ein/Ausschalten der Heizung simuliert. Die durchschnittliche Schlafzeit in der Nacht beträgt 7,6 h. Beginnend mit eingeschalteter Heizung in der 23. Stunde ergibt sich der in N) dargestellte Regelverlauf
- O) Für die restliche Verweildauer der Personen im Wohnmobil wird die Heizung angestellt: 272 min = 4,5 h. Diese Zeit ist gemäß den unter L) aufgeführten internen Lasten auf den Tag zu verteilen
- P) Zusätzliche Heizungsinbetriebnahme alle 4 Stunden, beginnend vom letzten Heizvorgang am Morgen des jeweiligen Tages (Verhindern zu starken Auskühlens des Wohnmobils)

Die nachfolgenden NVD wurden in Analogie zum hier beschriebenen Beispiel ermittelt, und sind in den Anlagen auf einer CDROM hinterlegt und in Tabellenform in den [Anlagen Abschnitt 8.3](#) abgebildet.

NVD_Sommer heiß	NVD_Sommer kühl	NVD_Sommer normal
NVD_FrjHrb schön	NVD_FrjHrb schlecht	NVD_Winter schön
NVD_Winter schlecht	NVD_Durchschnitt	NVD_DIN 1646
NVD_Sommer heiß (Klimaanlage)		

8.7 Außenklima für Wohnmobile

Die Einflüsse des Außenklimas sind neben dem Nutzerverhalten entscheidend für das energetische Verhalten eines Wohnmobils sowie dessen klimatische Bauteilbeanspruchung. Um diesen Einflüssen in den Untersuchungen gerecht zu werden, bedarf es einer klaren Definition des Wohnmobilaußenklimas. Aufgrund der meist vorhandenen Mobilität von Wohnmobilen ist die Verwendung von Klimadaten, wie sie zum Beispiel bei Bauwerken Verwendung finden, nur eingeschränkt möglich. Aus dieser Tatsache heraus wurde im Zuge dieser Ausarbeitung versucht, verschiedenen Wohnmobilklimadatensätze (WKD) zu erstellen, die den individuellen Nutzerverhalten (Reiseverhalten) und der damit verbundenen Vielfältigkeit der Außenklimata Rechnung tragen.

Folgende Grundüberlegungen wurden bei der Erstellung der Wohnmobilklimadatensätze (WKD) besonders berücksichtigt:

- Die Abhängigkeit zwischen WKD und individuellem Nutzerverhalten muss darstellbar sein. Dies wurde durch die [Auswahltabelle WKD – NVD \(Tabelle 8-4\)](#) realisiert.
- Die Auswertungen der Umfrage zum Nutzerverhalten müssen in die WKD einfließen.
- Der Geltungsbereich dieser Untersuchungen beschränkt sich auf Europa.



Auswertung der Umfrageergebnisse hinsichtlich der vorhandenen Außenklimata:

Durch die Auswertung der Umfrageergebnisse werden folgende Verhaltensweisen von Wohnmobilitzern erkennbar:

- Durchschnittlicher Zeitraum der regelmäßigen Nutzung beträgt 8,5 Monate.
- 16% der durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 16.600 km entfallen auf die Alltagsnutzung des Wohnmobils.
- Über ein Drittel der Befragten haben eine regelmäßige ganzjährige Nutzung.
- Die Anzahl der Übernachtungen im Wohnmobil beträgt 57 Übernachtungen/Jahr.
- Die Dauer einer durchschnittlichen Wohnmobilreise beträgt 18 Tage.
- Die durchschnittliche Verweildauer in einer Region beträgt zwischen 8 Tagen und 20 Tagen.
- Bei anhaltend schlechten Wetter verlassen die Wohnmobilitzler die Wetterregion nach spätestens 2 Tagen.
- Bevorzugte Reiseziele in Deutschland sind: Bayern (32,2%), MeckVoPom (26,5%), Baden-Württemberg (23,3%); [11]
- Bevorzugte Reiseziele in Europa sind: Spanien (43,0%), Italien (40,2%), Frankreich (33,1%), Österreich (28,7%), Griechenland (24,6%), skandinavische Länder (je ca. 22%); [11]

Erstellung der Wohnmobilklimadatenätze für das Programm Helios:

Bei den hier zu erstellenden WKD kann grundsätzlich zwischen drei Varianten unterschieden werden:

- Technische Wohnmobilklimadatenätze
- Reale Wohnmobilklimadatenätze
- Testreferenzjahre

Technische Wohnmobilklimadatenätze (TWKD) dienen hauptsächlich der Untersuchung von Extremsituationen oder der Simulation bestimmter Normsituationen. Beispielhaft sei hier der Aufheizversuch gemäss DIN EN 1646 genannt.

Reale Wohnmobilklimadatenätze (RWKD) versuchen das tatsächliche Umgebungsklima eines Wohnmobils mit Zulassung in einem bestimmten Land (in diesem Fall Deutschland) darzustellen. Aufgrund der unterschiedlichen Klimaregionen und des individuellen Nutzerverhaltens wird die Anzahl der für die Untersuchungen notwendigen WKD von der Quantität dieser beiden Größen bestimmt. Im Gegensatz zu den Testreferenzjahren beschreiben diese WKD nicht nur das Klima eines Ortes, sondern beinhalten entsprechend der Mobilität eines Wohnmobils Klimadaten aus verschiedenen Klimaregionen.

Testreferenzjahre (TRY) stellen den typischen klimatischen Ablauf eines Jahres an einem bestimmten Ort dar. Es handelt sich dabei nicht um durchschnittliche sondern um ortstypische Wetterdaten. Da Wohnmobile oft mehreren ortsverschiedenen Außenklimata ausgesetzt werden, sind für eine realistische Betrachtung des energetischen bzw. thermohygrischen Verhaltens von Wohnmobilen weniger geeignet. Um die Arbeit bei der Generierung von WKD zu erleichtern, ist es dennoch sinnvoll, verschiedenen TRY gemäß dem Nutzerverhalten zu einem WKD zusammenzufassen.



Das weiter unten abgebildete Diagramm verdeutlicht das prinzipielle Vorgehen bei der Generierung der für die Untersuchungen mit Helios notwendigen Wohnmobilklimadatenansätze. Anhand dieser Vorgehensweise wurden folgende WKD erzeugt:

TWKD_DIN: Nachbildung des Aufheizversuchs gemäß den Vorgaben der DIN EN 1646-1. Die Außentemperatur beträgt in diesem WKD konstant -15°C . Wind und Strahlung sind nicht vorhanden.

TWKD_Winter: Entspricht dem Winterklima von Moskau in der Zeit von Dezember bis Februar (3 Monate). Hartes, kontinentales Winterklima. Laufzeit: 2.160 Stunden.

TWKD_Sommer: Entspricht dem Sommerklima von Almeria/Spanien in der Zeit vom Juni bis August (3 Monate). Laufzeit: 2.232 Stunden.

RWKD_Dwinter: Entspricht einem deutschen Winterklima Weihenstephan in der Zeit von Dezember bis Februar (3 Monate). Durch Weihenstephan wird die statistische Einfluss Bayerns als beliebte Reiseregion in den Untersuchungen berücksichtigt. Da in Helios keine Klimadaten von Hof (kältestes Klima Deutschlands) vorliegen, wurde Weihenstephan als Ersatz gewählt. Laufzeit: 2.160 Stunden.

RWKD_Dsommer: Entspricht einem deutschen Sommerklima in Freiburg/Breisgau in der Zeit von Juni bis August (3 Monate). Durch die Wahl Freiburgs wird eine der sonnenreichsten Regionen Deutschlands (wärmstes TRY Deutschlands) sowie die Beliebtheit Baden-Württembergs als Reiseregion berücksichtigt. Laufzeit: 2.208 Stunden.

RWKD_Dfrühjahr: Entspricht einem deutschen Frühjahrsklima in Heiligendamm/Ostsee (MecklVoPom) in der Zeit von März bis Mai (3 Monate). Heiligendamm repräsentiert das gemäßigte Küstenklima der deutschen Ostseeküste. Des weiteren wird die statistische Einfluss der Ostseeküste als beliebte Reiseregion in den Untersuchungen berücksichtigt. Laufzeit: 2.208 Stunden.

RWKD_Dherbst: Entspricht einem deutschen Herbstklima in Osnabrück in der Zeit von September bis November (3 Monate). Osnabrück repräsentiert das Klima der norddeutschen Tiefebene. Laufzeit: 2.184 Stunden.

RWKD_Djahr: Entspricht einem deutschen Ganzjahresklima (12 Monate). Dieser WKD beinhaltet die Wetterdaten der vorab genannten deutschen WKD (RWKD_Dxxx). Der August wurde allerdings durch die Augustklimadaten von Almeria ersetzt. Das gleiche gilt für die Wetterdaten im Februar. Diese wurden durch die Februarklimadaten von Moskau ersetzt. Laufzeit: 8.760 Stunden.

Anmerkungen zur Kombination von verschiedenen Klimadatenansätzen

Durch dieses Ergänzen von Wetterdaten soll versucht werden, der Mobilität von Wohnmobilen gerecht zu werden. Aufgrund der Beschränkungen des Programms Helios hinsichtlich der Darstellung des Nutzerverhaltens ist allerdings immer zu beachten, dass dieses Programm von einer regelmäßigen täglichen intensiven Nutzung des Wohnmobils ausgeht. Dieser Zustand entspricht allerdings in keiner Weise der Realität. Die Darstellung eines realistischen Wohnmobilyahreszyklus im Programm Helios ist unter Beachtung folgender Punkte möglich:

- Jeder Tag eines Wohnmobils muss mit einem tagweisen Klima- und Nutzerverhalten dargestellt werden.



- Diese Datensätze sind aufgrund von Reise- und Alltagsgewohnheiten der Nutzer täglich zu ermitteln.
- Für die Betrachtung der energetischen Bilanz eines Jahres sind die energetischen Bilanzen der einzelnen Tage zusammenzufassen.

Das solche Betrachtungen für die technische Weiterentwicklung von Wohnmobilen sinnvoll sind, muss bezweifelt werden. Abschließend kann festgestellt werden, dass die Qualität der aus der Umfrage ermittelten Nutzerdaten die Möglichkeiten des Programms Helios in Bezug auf eine praktikable Ganzjahressimulation bei weitem übersteigt. Die relativ detaillierte Herausstellung bestimmter Aspekte der Nutzerdaten ist damit zu begründen, dass diese Daten bei weiterführenden Untersuchungen mit leistungsfähigeren Programmen uneingeschränkt eingesetzt werden können.

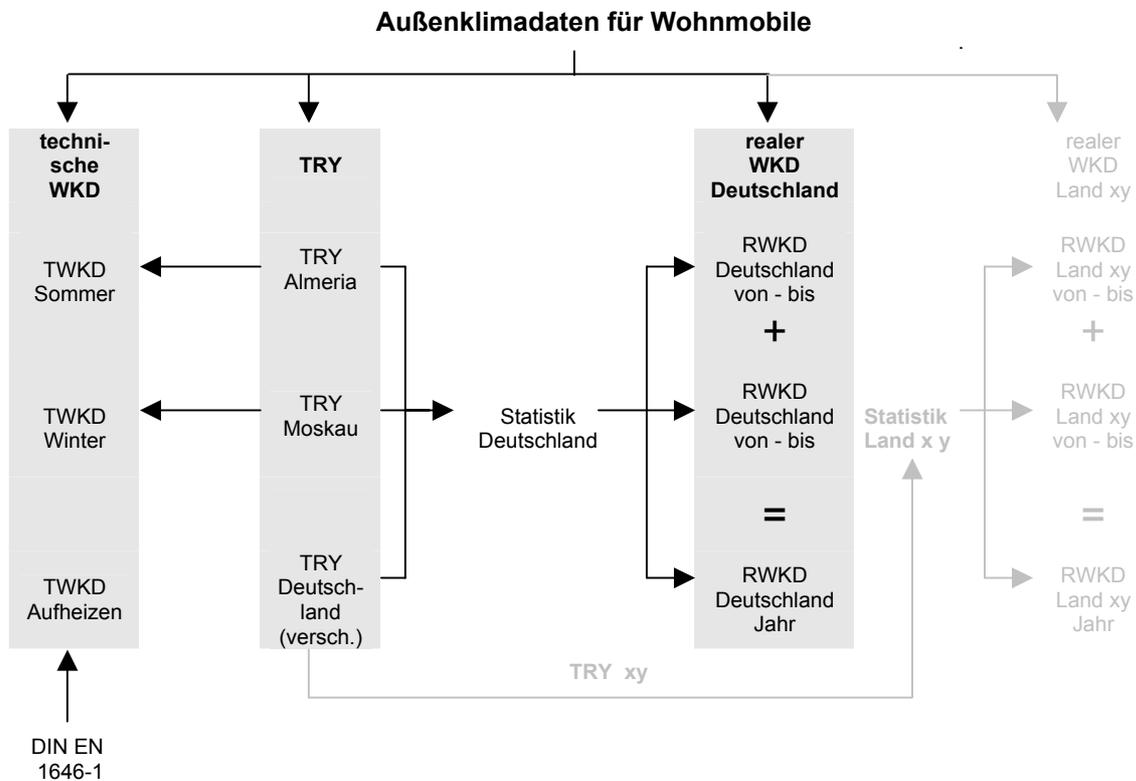


Diagramm 8-1: Generierung von Wohnmobilklimadaten.



Nutzerverhalten und Außenklima

Dem vom Außenklima abhängigen Nutzerverhalten von Wohnmobilreisenden wird durch die nachfolgend abgebildete Kombination von Nutzerverhaltensdatensätzen und Wohnmobilklimadaten Rechenung getragen:

	NVD_DIN 1646	NVD_Winter schön	NVD_Winter schlecht	NVD_Sommer normal	NVD_Sommer heiß	NVD_Sommer schlecht	NVD_FrjHrb schön	NVD_FrjHrb schlecht	NVD_Durchschnitt
TWKD_DIN	X								
TWKD_Winter			X						X
TWKD_Sommer					X				X
RWKD_Dwinter		X	X						X
RWKD_Dsommer				X	X	X			X
RWKD_Dfrühjahr							X	X	X
RWKD_Dherbst							X	X	X
RWKD_Djahr									X

Tabelle 8-4:
Sinnvolle Kombinationen
von WKD und NVD.

Die Empfehlungen für die Zuordnung der einzelnen Datensätze beschränkt sich ausschließlich auf die energetischen Simulationen in Helios. Da die Zuordnung der Einzeldaten (Stundenwerte von Klima- und Nutzerdaten) keiner logischen Verknüpfung unterliegen, kann es im Extremfall zu Umkehrungen der zugrundegelegten Logik kommen. Beispiel: Trotz schönem Wetter zu einer bestimmten Stunde des Klimadatenatzes sitzen die Wohnmobilmutzer im Mobil, weil der Nutzerdatensatz dies so vorschreibt. Die energetischen Ergebnisse solcher „unlogischen“ Verknüpfungen relativieren sich aber aufgrund der verhältnismäßig langen Zeitzyklen bei der Simulation und sind daher für die hier angestellten Untersuchungen ohne Bedeutung.

8.8 Klimadaten für die Untersuchungen in WUFI

Für die thermohygrischen Untersuchungen der Bauteile eines Wohnmobils beschränken sich die Untersuchungen auf das Klima von Holzkirchen (südlich von München). Damit sind die für feuchtetechnische Betrachtungen eher ungünstigen kühleren Regionen Deutschlands abgedeckt. Durch die Extremfallbetrachtung in einer für das Bauteil ungünstigen Klimaregion ist sichergestellt, dass ein Bauteilversagen in jedem anderen in Deutschland praktisch vorkommenden Klimafall abgedeckt ist.



9 Die Bauteiluntersuchungen in WUFI

9.1 Vorbemerkungen

Zur Berechnung der thermischen und hygrischen Ströme im Bauteil muss WUFI das Bauteil in einzelne Zonen unterteilen – die sogenannten **Gitterelemente**. Grund für diese Unterteilung ist die Tatsache, dass sich die thermischen und hygrischen Transportvorgänge über den gesamten Bauteilquerschnitt hinweg nicht mit **einer** Gleichung bzw. Funktion erfassen lassen.

In den Gitterelemente lassen sich allerdings die bekannten thermohygrischen Vorgänge numerisch darstellen. Die Unterteilung ist also eine Aufbereitung des Transportvorgangs im Bauteil hinsichtlich dessen mathematischer Erfassung. Die Genauigkeit dieser Erfassung hängt neben der grundsätzlichen Qualität der numerischen Ansätze des Programms vor allem von der Dichte der Gitterelemente im Bauteilquerschnitt ab: Je dichter die Anzahl der Gitterelemente im Bauteilquerschnitt, desto höher die zu erwartende Rechengenauigkeit. Da eine zu hohe Anzahl an Gitterelementen die Rechenleistung des Systems unnötig verlangsamt, ist immer eine Ausgewogenheit zwischen Anzahl der Gitterelemente und Ergebnisgenauigkeit notwendig. Die Anzahl und Lage der Gitterelemente sollte daher vor allem hinsichtlich der möglichen Ergebnisgenauigkeit kritisch beurteilt werden. In einer Berechnung, in welcher die Streuung der Kennwerte von Materialien in der Praxis bereits im zweistelligen Bereich liegt, macht es zum Beispiel wenig Sinn, das Gitter weiter zu verfeinern. Das gleiche gilt auch für die Mittelschichten homogener Stoffe. Da hier das Verhalten des Stoffes bzw. Körpers als relativ konstant angesehen werden kann, sollte die Gitterdichte in diesen Bereich abnehmen. In Grenzschichten zwischen zwei Stoffen hingegen muss die Gitterdichte aufgrund des wahrscheinlichen Wechsels der Stoffeigenschaften erhöht werden.

In den Untersuchungen dieser Ausarbeitung wurde grundsätzlich mit dem von WUFI vorgeschlagenen automatischen Gitter – Fein gearbeitet. Versuche mit einer Erhöhung der Gitterdichte in den Grenzschichten erbrachten bei den hier untersuchten Bauteilen praktisch keine Veränderung des Ergebnisses (vgl. [9]).

Ein Problem bei der Beurteilung der Rechenergebnisse stellt die **Konvergenzbetrachtung** von WUFI dar. Als Konvergenz in mathematischer Hinsicht wird die Eigenschaft von Folgen bezeichnet, auf einen Grenzwert zuzustreben (zu konvergieren). Existiert kein solcher Grenzwert, so ist die Folge divergent. Zur Lösung der Feuchte- und Wärmetransportgleichungen innerhalb eines Gitterelements versucht WUFI, sich durch wiederholtes Anwenden desselben Rechenverfahrens sich von einer Näherungslösung aus der exakten Lösung Transportgleichungen anzunähern. Rechenwerte der vorangegangenen Näherung dienen dabei als Basis für die folgende Näherung. Dieser Näherungsvorgang wird als mathematische Iteration bezeichnet. Da eine Näherung nie die Gestalt der Näherungsgröße annehmen kann, muss der Näherungsvorgang nach einer bestimmten Anzahl von Versuchen abgebrochen werden. Das Ergebnis entspricht dann je nach Anzahl der Näherungsversuche mehr oder weniger der Näherungsgröße. Um ein „Totlaufen“ der Iteration zu verhindern setzt WUFI bestimmte Kriterien, bei deren Erreichen die Iteration als ausreichend genau gilt und somit abgebrochen werden kann. Des weiteren begrenzt WUFI aber auch die Anzahl der Näherungsversuche. Vor allem bei Extremkonstellationen von Klima- und Bauteilgrößen kann es vorkommen, dass die maximale Anzahl der Näherungsversuche erschöpft ist, die Näherungskrite-



rien allerdings noch nicht erreicht sind. WUFI bricht in solchen Fällen die Näherung im jeweiligen Gitterbereich ab und führt die Berechnungen mit den Abbruchwerten im darauf folgenden Gitter fort. Solche Abbrüche aufgrund des Nichterreichens der Abbruchkriterien werden von WUFI als Konvergenzfehler gewertet.

Bei einer sehr hohen Anzahl an Konvergenzfehlern (ab ca. 200 pro Jahr) waren stellenweise extreme Feuchteanstiege in den Bauteilschichten zu beobachten. Die Tendenz, ob ein Bauteil austrocknet oder der Feuchtegehalt langsam zunimmt, war jedoch bei allen vergleichbaren Fällen identisch.

Die WUFI – Hilfetexte [9] bezeichnen eine Konvergenzfehlergröße von ca. 3 pro Jahreszyklus als in aller Regel unbedeutend. 50 und mehr Konvergenzfehler könnten laut WUFI auf ein Berechnungsproblem hindeuten.

Als zuverlässige Kontrollgröße für die Plausibilität der jeweiligen Rechenergebnisse erwies sich die in WUFI ausgegebene Wasserbilanz. Hierbei handelt es sich um die Änderung des Gesamtwassergehaltes eines Bauteils während eines Rechenzyklus sowie die Summe aller Oberflächenströme. Diese beiden Bilanzgrößen müssen vom Betrag her identisch sein, da die Änderungen des Gesamtwassergehaltes durch die Summe der Oberflächenströme hervorgerufen werden. Folglich sollten die Ausgabebeträge der Wasserbilanzen annähernd identisch sein.

In den Untersuchungen wiesen Berechnungen mit sehr hoher Anzahl an Konvergenzfehlern generell unterschiedliche Wasserbilanzen auf. Folglich flossen die betragsmäßigen Rechenergebnisse nicht in die Untersuchungsergebnisse ein. Die Tendenzen des Feuchteverhaltens im Bauteil stimmen allerdings mit denen der korrekten Rechenergebnisse überein.

9.2 Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen

Die Bauteiluntersuchungen mit WUFI verfolgen im wesentlichen zwei Ziele:

- Überprüfung der Tauglichkeit der zur Zeit eingesetzten Konstruktionen unter realistischen Klimabedingungen
- Überprüfung von konstruktiven und materialtechnischen Veränderungen

Um die Versuchsreihen so kompakt wie möglich zu gestalten, wurden Voruntersuchungen über das Rechenverhalten von WUFI durchgeführt. Dabei wurde anhand des Wandaufbaus (WR1) versucht, verschiedene Ergebnistendenzen in Abhängigkeit von bestimmten Eingabeparametern zu analysieren. In insgesamt 32 Rechenläufen (WR1_1 bis WR1_32) wurden folgende Abhängigkeiten festgestellt:

- Versuche, die hohen Temperaturschwankungen in Wohnmobilenräumen durch einen hohen Betrag der Innentemperaturamplitude zu berücksichtigen, führen zu einer sehr hohen Anzahl an Konvergenzfehlern bei der Berechnung. Die so ermittelten Ergebnisse kommen daher nicht für eine zuverlässige Bauteilanalyse in Frage. Zudem traten bei diesen Berechnungen zum Teil sehr extreme Ergebnisse auf, die durch andere Testrechnungen nicht bestätigt werden konnten. Um die Innentemperaturabhängigkeit der Rechenergebnisse zu verdeutlichen, müssen Rechenläufe



mit unterschiedlichen Innentemperaturen und einem kleinen Amplitudenwert durchgeführt werden. Der Wert der Innentemperaturamplitude sollte 10 K nicht überschreiten.

- Um Schwankungen der relativen Innenluftfeuchte darzustellen, ist aus folgenden Gründen von einer Erhöhung des Amplitudenwertes der rel. Innenluftfeuchte abzuraten:

Da WUFI genau wie Helios keine instationären Nutzerdaten verarbeiten kann, ist das Programm für die Betrachtung von „mobilen“ Bauteilen nur unter Einschränkungen geeignet. Versuche mit hohen Amplituden von Innentemperatur und rel. Innenluftfeuchte dieses Manko auszugleichen, ergaben neben den vorab beschriebenen Konvergenzproblemen auch Unstimmigkeiten in Bezug auf die hier abgehandelte Problemstellung. Diese Unstimmigkeiten wirken sich zum Teil sogar gegenteilig auf die Rechenergebnisse aus: Bei einer Erhöhung der Amplitude der rel. Innenluftfeuchtigkeit generiert WUFI eine Sinusfunktion der rel. Innenluftfeuchte, welche ihre Tiefpunkte im Winterhalbjahr aufweist. Für Innenräume in Bauwerken ist diese Annahme richtig, nicht aber für Wohnmobile. Bei Wohnmobilen muss aufgrund der eher sporadischen Nutzung sowie der geringen Wärmespeicherfähigkeiten der Bauteile davon ausgegangen werden, dass die Innenluftfeuchte über längere Zeiträume hinweg in etwa der Außenluftfeuchte entspricht. Die Außenluftfeuchte ist jedoch im Winterhalbjahr höher als im Sommerhalbjahr, was den an sich korrekten Ansatz von WUFI für diese Untersuchungen als unbrauchbar einstuft.

Dieser Zustand ändert sich durch die Nutzung des Wohnmobils. Gerade in kalten Jahreszeiten muss daher davon ausgegangen werden, dass die relative Luftfeuchte im genutzten Wohnmobillinnenraum über der einer normalen Wohnung im gleichen Zeitraum liegt. Unterschiedliche relative Innenluftfeuchten müssen somit über verschiedene Rechengänge mit unterschiedlichen diesbezüglichen Werten Berücksichtigung finden.

Generell ist die Tendenz festzustellen, dass sich mit Abnahme der rel. Innenluftfeuchteamplitude die Feuchtwerte in den Bauteilquerschnitten erhöhen.

- Die Ausrichtung des Bauteils hinsichtlich der Himmelsrichtung hat entgegen ersten Erwartungen keine allzu großen Auswirkungen auf das Feuchteverhalten des Bauteils (Siehe Rechenläufe WR1_17 bis WR1_21). Die Unterschiede in der Feuchtebilanz können in den hier angestellten Untersuchungen vernachlässigt werden, da eine permanente Ausrichtung in eine Himmelsrichtung bei Wohnmobilen nicht gegeben ist.
- Es erweist sich als sinnvoll, den Rechenzyklus für ganzjährige Betrachtungen auf eine Mindestdauer von 24 Monaten festzusetzen. Zum einen wird so ein langsames aber stetiges Ansteigen der Feuchtekurven sichtbar. Zum anderen kann es vorkommen, dass Extremwerte durch eine einjährige Betrachtung nicht erfasst werden. Grund hierfür ist die meist nicht vorhersehbare Anfangsfeuchte der Bauteile. Liegt die zu Rechenbeginn angenommene Bauteilfeuchte weit unter der tatsächlich vorhandenen, so wird ein gewisser Zeitraum vergehen, bis sich das System feuchtemäßig eingependelt hat. Die damit verbundene zusätzliche Feuchteaufnahme verhindert also das Erreichen von Extremwerten in einer realistischen Zeit und sorgt u.U. dafür, dass Extremwerte außerhalb des Rechenzeitraums liegen.
- Diese aus den Untersuchungen des Wandaufbaus WR1 abgeleiteten Erkenntnisse wurden stichprobenartig an den anderen Konstruktionen überprüft und haben sich ausnahmslos bestätigt.



Für die Untersuchungen der Bauteile in WUFI wurden daher anhand der Voruntersuchungen folgende Prüfungsbedingungen festgelegt:

Allgemeine fixe Prüfbedingungen:

- 36 Monate Prüfzykluszeit für alle ganzjährigen Betrachtungen
- Wetterdatensatz Holzkirchen
- Ausrichtung der Bauteile in östliche Richtung
- Anfangsfeuchten der Bauteilschichten gemäß den Vorgaben von WUFI
- Anfangstemperatur des Bauteils 12°C (entspricht einer in Helios ermittelten durchschnittlichen Innenlufttemperatur für das untersuchte Wohnmobil unter durchschnittlichen Bedingungen)
- Amplitude der Innentemperatur: 5 K
- Amplitude der rel. Innenluftfeuchte : 0 %
- Automatisches Rechengitter – Fein
- Bauteilspezifische Größen (z.B. Strahlungsabsorption, Wärmeübergangskoeffizienten, etc.)

Variable Einflussgrößen:

- Innentemperatur (5°C, 10°C, 15°C, 20°C)
- Relative Innenluftfeuchte (50%, 60%, 70%, 80%)

Untersuchte Bauteile:

- Wandaufbau ungestört (WR1)
- Dachaufbau ungestört (D1)
- Bodenaufbau ungestört (B1)
- Boden Fahrerhaus (B3)
- GFK-Frontmaske (F1)

Nicht untersuchte Bauteile und Bauteilbereiche:

- Bereiche der Wand-, Boden- und Dachverstärkungen (WR2, B2, D2): Da diese Bereiche sehr geringe Außen- und Innenoberflächen aufweisen, muss davon ausgegangen werden, dass der Betrag der Feuchteströme im Vergleich zu den flächenmäßig weit größeren benachbarten Bauteilbereichen sehr gering ist. Darüber hinaus werden die Feuchteströme in diesen Bauteilbereichen von den benachbarten „ungestörten“ Bauteilbereichen stark beeinflusst. In WUFI 2D sind solche Feuchteverteilprozesse in Bauteilebene nicht darstellbar.
- GFK – Frontmaske (z.B. F1): Die recherchierten Materialkennwerte verhindern aufgrund von teilweise erheblichen Differenzen eine zuverlässige Nachbildung des Bauteils in WUFI. Darüber hinaus erwiesen sich die Aussagen des Bauteilherstellers für die hier untersuchten Zusammenhänge als nicht brauchbar. Des weiteren wären in diesem Zusammenhang Untersuchungen hinsichtlich des osmotischen Verhaltens der GFK - Bauteile notwendig, um eine genaue Feuchtebetrachtung dieser Bauteile zu erstellen. Das osmotische Feuchte-transportverhalten von GFK – Bauteilen lässt sich allerdings in WUFI nicht darstellen.



Ausgeschlossene Größen und Szenarien:

- Anfängliche Überlegungen hinsichtlich der Berechnung eines bestimmten Jahreszeitraumes wurden wieder verworfen, da die Untersuchungen ein ganzjähriges Verhalten widerspiegeln sollen und nicht nur eventuelle Extremsituationen, die der Konstruktion jede Chance nehmen, angesammelte Feuchtelasten auch wieder abzugeben.
- Andere Bauteile, wie z.B. das Bett (Übergang zur Heckgarage) wurden aufgrund der schlechten Definierbarkeit des Umgebungsklimas nicht untersucht.

9.3 Ergebnisse der Bauteiluntersuchungen

Bei der Auswertung der verschiedenen Rechenläufe wurden die Ergebnisse der Hauptuntersuchungen der vorhandenen Bauteile berücksichtigt. Bauteiländerungen, Proberechnungen oder nicht erklärbare Rechenergebnisse sind nicht in die Ergebnisfindung einbezogen worden.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Untersuchungen in Kurzform zusammengefasst.



Bauteil	Innentemperatur [°C]	Rel. Innenluftfeuchte [%]	Ergebnisse
Wandaufbau ungestört (z.B. WR1)	5°C-20°C	50%-80%	Bauteilaufbau und Materialien sind bedingt für die gestellten klimatischen Anforderungen geeignet. Keine Probleme treten grundsätzlich bei niedrigen Innentemperaturen und hohen Außentemperaturen (z.B. Klimatisierung) auf. Kritisch erweisen sich niedrige Außentemperaturen und Innentemperaturen über 15°C, bei denen die rel. Innenluftfeuchte für längere Zeit über 70% ansteigt (z.B. Winternutzung) Tendenz: Je höher die Innentemperatur bei niedrigen Außentemperaturen, desto höher der Feuchteanstieg im Bauteil. Je höher die rel. Innenluftfeuchte, desto höher der Feuchteanstieg im Bauteil.
Dachaufbau ungestört (z.B. D1)	5°C-20°C	50%-80%	Der Dachaufbau verhält sich analog dem konstruktiv ähnlichen Wandaufbau. Bauteilaufbau und Materialien sind somit bedingt für die gestellten klimatischen Anforderungen geeignet.
Bodenaufbau ungestört (B1)	5°C-20°C	50%-80%	Bauteilaufbau und Materialien sind für die gestellten klimatischen Anforderungen gut geeignet. Keine Probleme treten grundsätzlich bei normalen Innentemperaturen auf. Aufgrund der innenliegenden Dampfsperre in Form des PVC-Belages erweisen sich bei diesem Bauteil die rel. Innenluftfeuchten als praktisch unbedeutende Größe. Als kritisch müssen Zustände bezeichnet werden, in welchen die Innentemperatur über längere Zeit weit unter die Außentemperatur sinkt (Klimatisierung in sehr heißen Regionen). Tendenz: Rel. Innenluftfeuchte ohne Bedeutung. Je geringer die Temperaturdifferenz Innen - Außen, desto geringer der Feuchtegehalt des Bauteils.
Boden Fahrerhaus (B3)	5°C-20°C	50%-80%	Bauteilaufbau und Materialien sind nicht für die gestellten klimatischen Anforderungen geeignet. Es gelten die gleichen Abhängigkeiten wie bei Dach- und Wandaufbau, allerdings erweist sich der Boden empfindlicher gegenüber hohen rel. Innenluftfeuchten. Tendenz: Je höher die Innentemperatur bei niedrigen Außentemperaturen, desto höher der Feuchteanstieg im Bauteil. Je höher die rel. Innenluftfeuchte, desto höher der Feuchteanstieg im Bauteil.

Tabelle 9-1: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse (Klima Holzkirchen, 5K Temperaturamplitude, 0% rel. Innenluftfeuchteamplitude).

Die in der Tabelle zusammengefassten Ergebnisse bedürfen einiger Erläuterungen. Selbstverständlich sind die als kritisch ausgewiesenen Bauteile und Materialien aufgrund dieser Untersuchungen nicht als untauglich zu bewerten. Zum einen wurden die Bauteile unter verschärften, für einige Teile Deutschland aber durchaus noch realistischen Klimabedingungen überprüft. Zum anderen konnte aufgrund der Be-



schränkungen von WUFI (mobiles Nutzerverhalten) sowie der nicht vorhandenen Klimadateien mit rel. Innenluftfeuchtwerten kein entschärftes Innenklima dargestellt werden. Die Tendenzen, welche durch die Untersuchungen zu Tage traten, sollten allerdings vor allem bei Wand- und Dachkonstruktion zum Nachdenken und Handeln ermahnen. Gerade die Tendenzen in der Freizeitgestaltung werden dafür Sorge tragen, dass Wohnmobile intensiver und länger genutzt werden. Die dargestellten Extrembedingungen sind Heute Realität für einige Wohnmobile – und sie werden Alltag für viele in naher Zukunft sein.

Im nachfolgenden Text werden die in der Ergebnistabelle kurz angerissenen Untersuchungsergebnisse genauer analysiert und hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft.

Da die klimatische Tauglichkeit eines Bauteils meist nicht auf einen einzigen Parameter festzulegen ist, wurden die Untersuchungsergebnisse zu sogenannten Tauglichkeitsfeldern zusammengefasst. Mit Hilfe dieser Diagramme ist es möglich, die klimatische Tauglichkeit der hier untersuchten Bauteile unter Berücksichtigung vorhandener oder neuer Umgebungsparameter zu bewerten.

Wandaufbau (z.B. WR1) und Dachaufbau (z.B. D1)

Plausibilitätsprüfung: Alle Rechenergebnisse unterliegen der in der Ergebnistabelle beschriebenen Tendenz.

Der Feuchteanstieg im Bauteil bei Erhöhung der rel. Innenluftfeuchte ist durch die direkte Abhängigkeit der Ausgleichsfeuchte des Bauteils bzw. der hygroskopischen Materialien von der Umgebungsluftfeuchte zu begründen - Je höher die rel. Luftfeuchte der Umgebungsluft, desto höher die Ausgleichsfeuchten der hygroskopischen Materialien. Die Feuchtzunahme bei steigender Temperatur steht u.a. im direktem Zusammenhang mit diesem Verhalten, da die jeweilige Ausgleichsfeuchte auch von der Temperatur abhängig ist.

Aufgrund des Temperatur- und Dampfdruckgefälles zwischen Innen- und Außenluft entsteht ein Wärme- und Feuchtestrom durch das Bauteil. Dieser Feuchtestrom kann aber durch die praktisch vollkommen dampfdichte Aluminiumaußenhaut nicht an die Außenoberfläche gelangen und dort verdunsten. Der so aufgestaute Feuchtestrom sorgt dafür, dass sich im EPS des Wandaufbaus immer mehr Feuchtigkeit sammelt, welche schließlich für den Anstieg der Gesamtbauteilfeuchte verantwortlich ist. Je nach Temperaturdifferenz kommt es u.U. zu einer Taupunktverlagerung in das Bauteil. Diese Vorgänge wirken sich immer dann negativ auf den Feuchtegehalt im Bauteil aus, wenn die Außentemperaturen unter den Innentemperaturen liegen. Die im WUFI – Datensatz WR1_HU8 hinterlegten Diagramme verdeutlichen diesen hier beschriebenen Vorgang.

Materialien: Wassergehalt des Holzes bzw. von Holzwerkstoffen ≤ 20 % Massenprozent
 Wassergehalt EPS ≤ 10 % Volumenprozent

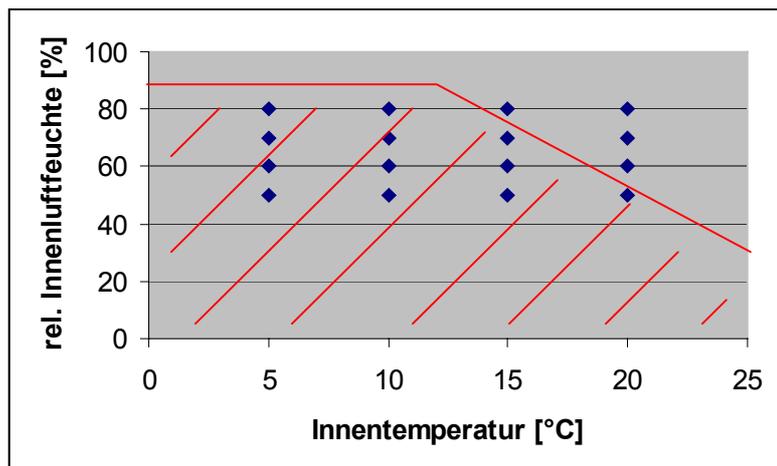


Diagramm 9-1:
Tauglichkeitsfeld der Wand- und Dachkonstruktion
Die im rot dargestellte Bereich anzutreffenden Innenklimabedingungen erweisen sich für die derzeit vorhandenen Konstruktionen als unkritisch. Die Punkte außerhalb dieses Bereiches wiesen in den Untersuchungen einen Feuchteanstieg im Bauteil auf.

Innenboden (B1)

Plausibilitätsprüfung: Alle Rechenergebnisse unterliegen der in der Ergebnistabelle beschriebenen Tendenz.

Die innenliegende Dampfbremse (PVC-Belag) verhindert ein Eindringen von Wasserdampf aus dem Wohnmobilinnenraum in die Konstruktion. Folglich haben die rel. Innenluftfeuchten – wie aus den Rechenergebnissen ersichtlich – keinen Einfluss auf den Feuchtegehalt des Bauteils.

Die Konstruktion mit der innenliegenden Dampfbremse verhält sich praktisch entgegengesetzt zum Wandaufbau: Warme Außenluft und kalte (klimatisierte) Innenluft sorgen für Wärme- und Feuchteströme im Bauteil. In den Innenraum nahen Schichten kann es aufgrund von Taupunkttemperaturunterschreitung u.U. zur Tauwasserbildung im Bauteil kommen. Dieses wird durch verschiedene hygrische Transportvorgänge (siehe Abschnitt 6.4.2) in der jeweiligen Bauteilschicht, aber auch in andere Schichten verteilt.

Das Problem der Innenbodenkonstruktion liegt in der innenseitigen Dampfbremse in Form des PVC-Belages. Dieser verhindert bei den genannten Umgebungsbedingungen, dass der Feuchtestrom an der Innenoberfläche des Bodens verdunsten kann. Der an der Dampfbremse aufgestaute Feuchtestrom sorgt dafür, dass sich im Furniersperrholz des Innenbodens immer mehr Feuchtigkeit sammelt, welche schließlich für den Anstieg der Gesamtbauteilfeuchte verantwortlich ist. Dieser Vorgang wirkt sich immer dann negativ auf den Feuchtegehalt im Bauteil aus, wenn die Innentemperaturen unter den Außentemperaturen liegen (z.B. Klimatisierung im Sommer), da sich dann ein Feuchtestrom zur niederen Temperatur bzw. dem niedrigeren Wasserdampfdruck hin bewegt. Die im WUFI – Datensatz B1_HU5 hinterlegten Diagramme verdeutlichen diesen hier beschriebenen Vorgang.

Boden Fahrerhaus (B3)

Für diesen Bereich wurden keine weiteren Untersuchungen angestellt, da als effektive Lösung nur eine allseitige diffusionsdichte Ummantelung der Dämmmatte in Frage kommt.



9.4 Überprüfung neuer Ansätze

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit Möglichkeiten, die bestehenden Konstruktionen durch realistische Maßnahmen zu verbessern. Als grundsätzliches Problem bei den Bauteilen stellt sich vor allem die Lage der Wasserdampf undurchlässigen Schicht heraus. Da diese Schicht – wie z.B. bei Wand und Dach - als Wetterschutz bzw. Außenhülle fungiert, sind Änderungen dieser Schicht nicht möglich. Anders verhält es sich z.B. mit der mehr oder weniger gewollten Dampfsperre in Form des PVC-Bodenbelages.

Diese und andere Verbesserungsansätze sollen in der nachfolgenden Tabelle übersichtsmäßig abgehandelt werden. Es wurde dabei versucht, ein schlechtes Versuchsergebnis aus den Hauptuntersuchungen zu verbessern. Die Wahl viel dabei nicht auf extrem schlechte Konstellationen, die schon in den Hauptuntersuchungen negativ auffielen. Statt dessen wurde versucht, Konstellationen materialtechnisch zu bearbeiten, die erkennbare Tendenzen für eine Verbesserung bieten. Die genauen Daten der WUFI - Rechenläufe sind in den Anlagen beigefügten CD-ROM unter der jeweiligen Bauteilbezeichnung hinterlegt. Die Kennwerte der geänderten Materialschichten wurden unverändert aus der WUFI – Datenbank übernommen. Sie sind in den Anlagen xxx in der Tabelle xxx abgebildet. Die Veränderungen wurden am Datensatz WR1_HU8 (Wand/Dach) sowie B1_HU5 (Innenboden) überprüft.

Bauteilnummer	Bauteilbezeichnung	Änderung	Ergebnis
WR1_V2	Wand / Dach	Ersetzen von EPS durch PU-Schaum	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 10 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 6,3 kg/m ² . Feuchtaufnahme wird fortgesetzt.
WR1_V4	Wand / Dach	Ersetzen des Dekorpapiers durch eine Dampfbremse ($\mu=5.000$). Diese Maßnahme könnte z.B. durch die Verwendung eines diffusionsdichteren Schichtstoff realisiert werden.	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 10 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 1,3 kg/m ² . Feuchtaufnahme wird fortgesetzt.
WR1_V6	Wand / Dach	Dampfbremse ($\mu=5.000$) zwischen Furniersperrholz und EPS, z.B. durch die Verwendung eines diffusionsdichteren Klebers.	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 10 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 1,8 kg/m ² . Feuchtaufnahme wird fortgesetzt.
WR1_V7	Wand / Dach	Erhöhung der Dämmstoffdicke um 10 mm	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 10 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 7,0 kg/m ² . Feuchtaufnahme wird fortgesetzt.
WR1_V3	Wand / Dach	Ersetzen von EPS durch Calciumsilikat	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 10 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 4,3 kg/m ² . Kein Anstieg des Feuchtegehaltes nach Einpendeln des Feuchtegehaltes.



Bauteilnummer	Bauteilbezeichnung	Änderung	Ergebnis
WR1_V1	Wand / Dach	Ersetzen von EPS durch XPS	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 10 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 2,2 kg/m ² . Feuchteaufnahme wird fortgesetzt.
WR1_V5	Wand / Dach	Ersetzen des Dekorpapiers durch eine Dampfbremse ($\mu=5.000$) sowie des EPS durch XPS	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 10 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 1,0 kg/m ² . Sehr flacher Anstieg des Feuchtegehaltes nach Einpendeln des Feuchtegehaltes.
WR1_V8	Wand / Dach	Ersetzen von EPS durch Schaumglas	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 10 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 0,8 kg/m ² . Kein Anstieg des Feuchtegehaltes nach Einpendeln des Feuchtegehaltes.
B1_V1	Innenboden	Ersetzen des PVC-Belages durch einen diffusionsoffenen Belag ($\mu=10$).	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 2 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 0,9 kg/m ² . Kein Anstieg des Feuchtegehaltes nach Einpendeln des Feuchtegehaltes.
B1_V2	Innenboden	Erhöhung der Dämmstoffdicke um 10 mm	Keine Veränderung
B1_V3	Innenboden	Ersetzen von EPS durch XPS	Reduzierung des Feuchtegehaltes im Bauteil von ca. 2 kg/m ² Bauteilfläche auf ca. 1,5 kg/m ² . Sehr flacher Anstieg des Feuchtegehaltes nach Einpendeln des Feuchtegehaltes.
B3	Fahrerhausboden	Allseitig dampfdichte Ummantelung der Dämmplatten, z.B. durch Aluminiumfolie.	Kein Eindringen von Feuchte möglich.

Tabelle 9-2: Übersicht der überprüften Verbesserungsmaßnahmen

9.5 Sinnvolle Verbesserungen

Die im folgenden vorgestellten Verbesserungsmaßnahmen lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

- Konstruktive und materialtechnische Verbesserungen
- Anlagentechnische Verbesserungen

Die Beurteilung der jeweiligen Verbesserungsmaßnahmen muss neben dem rein klimaphysikalischen Aspekten auch den Anforderungen der Fertigung und der Finanzierbarkeit gerecht werden. EPS als



günstigen Dämmstoff durch andere teurere Produkte zu ersetzen macht z.B. für einen „Mittelklasse“ - Hersteller wie die Firma Knaus wenig Sinn. Daher sind die aufgeführten Verbesserungen immer ein Kompromiss zwischen der eben genannten Aspekten.

Konstruktive und materialtechnische Verbesserungen:

Wand/Dach: Grundsätzlich muss entschieden werden, ob eine Konstruktion eher diffusionsoffen oder diffusionsdicht ausgelegt werden soll. Beim Einsatz von derzeit zur Verfügung stehenden (und bezahlbaren) Materialien sollten die Konstruktionen eher diffusionsdichter ausfallen, um das Durchfeuchten über längere Zeiträume zu unterbinden. Eine praktisch komplette Diffusionsdichtheit des Bauteils ist fertigungstechnisch mit tiefgreifenden Änderungen verbunden und würde durch die zusätzliche Innenschicht, z.B. aus Aluminium, den finanziellen Rahmen sprengen. In wie weit diese praktisch diffusionsdichten Bauteile den „Feuchtehaushalt“ des Wohnmobillinnenraumes negativ beeinflussen, wäre zusätzlich zu untersuchen.

Sinnvoll und technisch durchführbar sind alle Verfahren, die mit der Integration einer diffusionshemmenden Schicht in den Wand- und Dachaufbau verbunden sind. Diese Schicht könnte z.B. der Klebstoff bei der Herstellung der Sandwichelemente sein. Einen Diffusionswiderstandswert von $\mu = 5.000$ vorausgesetzt, würde eine Minderung des Feuchteintrags um ca. 80 % zur Folge haben (Vergleiche dazu Rechenläufe WR1_HU8 und WR1_V6).

Die Verwendung eines diffusionsdichteren Schichtstoffes anstelle des Dekorpapiers würde diesen Wert geringfügig verbessern, hätte aber zur Folge, dass die mehr oder weniger feuchteregulierende Holzwerkstoffplatte an der Raumseite der Konstruktion stark eingeschränkt würde. Des Weiteren brächte die Verwendung von Schichtstoffen verfahrenstechnische Änderungen bei der Plattenbeschichtung mit sich, die in keinem Verhältnis zur erreichten Verbesserung gegenüber der vorher genannten Variante stehen.

Der Einsatz von XPS anstelle des zur Zeit verwendeten EPS würde ebenfalls zu einer Minderung des Feuchteintrags um ca. 75 % führen. In wie weit die erhöhten Materialkosten die möglichen Verbesserungen rechtfertigen, muss vom Wohnmobilerhersteller untersucht werden.

Diese hier dargestellten Ergebnisse wurden anhand des Wandaufbaus erstellt. Sie gelten in ähnlicher Form auch für die Dachkonstruktion.

Innenboden: Verbesserungen des Innenbodens sind nur notwendig, wenn ein längerandauernde Klimatisierung des Fahrzeuges geplant ist. In Verbindung mit hohen Außentemperaturen und rel. Außenluftfeuchten können feuchtechnische Probleme in der Konstruktion entstehen.

Unabhängig davon könnte die nachfolgend dargestellten Verbesserungen eine gewisse Feuchte regulierende Wirkung im Wohnmobillinnenraum haben. Dieses Verhalten wäre zusätzlich zu untersuchen.

Der Innenboden sollte in jedem Fall so diffusionsoffen wie möglich gestaltet werden. Da durch den Doppelboden keine direkte Wetterbeaufschlagung des Bodens erfolgt, hat dieser Ansatz ohne Einschränkungen Gültigkeit.

Als diffusionshemmende und damit problematische Schicht erweist sich der verwendete PVC-Bodenbelag. Wird dieser Belag durch einen Belag mit einer Diffusionswiderstandszahl von $\mu = 10$ ersetzt, reduziert sich der Feuchtegehalt im Bauteil um ca. 50 %. Wichtiger noch als die Reduzierung des Feuch-



tegehalten ist die Tatsache, dass es nach dem Erreichen der bauteiltypischen Feuchte keinerlei Ansteigen des Feuchtegehaltes mehr gibt.

Der Einsatz von XPS anstelle von EPS als Dämmmaterial wirkt sich ebenfalls positiv auf den Feuchtegehalt des Innenbodens aus. In Analogie zum Wandaufbau ist der finanzielle Mehraufwand vom Hersteller zu prüfen.

Fahrerhausboden: Siehe Tabelle oben.

Anlagentechnische Verbesserungen

Anlagentechnisches Ziel muss die Stabilisierung und Senkung der relativen Innenluftfeuchten sein. Grundvoraussetzung für diese Stabilisierung ist ein kontrollierter Luftwechsel im Wohnmobil. Dazu müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden, die nach DIN EN 721 vorgeschriebene Zwangsbelüftung für die Zeit der Nichtbenutzung des Wohnmobils außer Kraft zu setzen. In Abhängigkeit von rel. Außenluftfeuchte und Außenlufttemperatur könnte z.B. eine kontrollierte Belüftung des Wohnmobillinnenraums nach den in den Tauglichkeitsfeldern festgelegten Kriterien erfolgen. Vorstellbar wäre dafür folgende Lösung: Im Wohnmobil werden zwei lüftungstechnisch günstig gelegene steuerbare Lüfterklappen installiert. Eine Steuerung misst Luftfeuchte und Temperatur des Innenraums sowie der Außenluft. Stellen sich für die Bauteile feuchtetechnisch günstige Außenbedingungen ein, erfolgt ein erhöhter Luftwechsel durch die geöffneten Lüfterklappen. Herrschen schlechte Außenklimaverhältnisse vor, wird bei geschlossenen Klappen versucht, die Innenluft so lange wie möglich im Wohnmobil zu behalten. Die Steuerung der Anlage könnte über Kennfelder erfolgen, die in Anlehnung an die weiter oben abgebildeten Tauglichkeitsfelder der Bauteile programmiert wurden. Um die Anlage permanent in Betrieb zu halten ist der Einsatz einer Solarzelle möglich. Falls in naher Zukunft Lüftungsanlagen in den Wohnmobilaufbau integriert werden, wäre auch eine Zusatzfunktion der Lüftungsanlage zur Permanentbelüftung in Anlehnung an das hier vorgestellte Beispiel möglich.

Abschließend kann festgestellt werden, dass sich die jetzige Situation der klimatischen Bauteilbeanspruchung, vor allem was Wand- und Dachkonstruktionen anbelangt, auf einem schmalen Pfad bewegt. Derzeitigen Ansprüchen genügen diese Konstruktionen - mit Ausnahme einiger Extreme - noch. Doch bereits kleine Veränderungen des Nutzerverhaltens können zu klimatischen Situationen führen, mit denen diese Bauteile schlicht überfordert sind.

10 Die energetischen Untersuchungen in Helios

10.1 Vorbemerkungen

Helios weist einige Beschränkungen auf, welche die Tauglichkeit des Programms für die hier angestellten Untersuchungen teilweise einschränken. Gleichzeitig treten bei verschiedenen Rechenkonstellationen nicht nachvollziehbare Programmfehler auf, die aufgrund des eingeschränkten Supports seitens der Entwickler nicht behoben werden konnten. Diese Gegebenheiten sowie die im Folgenden dargestellten Einschränkungen führen zu dem Schluss, dass Helios für eine hinreichend genaue **quantitative** Betrachtung der energetischen Vorgänge am Wohnmobil nicht geeignet ist. Die **qualitative** Analyse von Verände-



rungsmaßnahmen am Wohnmobil lassen sich allerdings hinreichend genau darstellen. Daher wurde der Untersuchungsschwerpunkt hauptsächlich auf die Darstellung der Auswirkungen von Verbesserungsvorschlägen hinsichtlich der energetischen Bilanz des Wohnmobils gelegt.

Des Weiteren muss festgestellt werden, dass die bis zu diesem Zeitpunkt erstellten Nutzer- und Klimadatensätze sowie die Detailliertheit der Aufbaubeschreibung das Programm Helios prinzipiell überfordern. Die Qualität der ermittelten Daten steht in keinem Verhältnis zu den Darstellungsmöglichkeiten von Helios. Da der Aufwand bei der Datenermittlung mit dem Hintergrund der Portierbarkeit der Datensätze in leistungsfähigere Systeme (z.B. Trnsys) geschah, kann dieser zusätzliche Aufwand aber als das eigentliche Ergebnis dieser Ausarbeitung - zumindest was die energetische Simulation von Wohnmobilen betrifft - angesehen werden.

10.2 Einschränkungen von Helios

Nachfolgend wird auf die Einschränkungen des Simulationsprogramms Helios und der Benutzeroberfläche Helex eingegangen. Diese Einschränkungen gelten für die hier abgehandelte Aufgabenstellung und können daher nicht direkt auf die eigentlichen Arbeitsfelder des Programms (Gebäudesimulation) übertragen werden.

Bei der Ermittlung der Bauteilquerschnitte wurden anhand der Hersteller- und Zuliefererangaben exakte Schichtaufbauten festgelegt. Da Helios Schichten unter einem Millimeter Dicke nicht verarbeiten kann, müssen Schichten gemäß ihrer Bedeutung für das jeweilige Rechenverfahren u.U. verändert werden. Für die energetischen Darstellungen hat dies allerdings keine praktische Bedeutung.

Weit problematischer wirkt sich die Bauteilbeschränkung von Helios aus. Maximal 15 opake Bauteile können in einer Simulation verwendet werden. Diese Zahl beinhaltet auch Fensterrahmen und Innenbauteile. Da Wohnmobile bei genauerem Betrachten aus weit mehr als 15 opaken Bauteilen bestehen, müssen Einzelbauteile zusammengefasst werden oder ihre Flächenanteile auf ähnliche Bauteile verteilt werden. Bei dem hier dargestellten Wohnmobil konnten u.a. Neigungen der Einzelflächenanteile nicht exakt dargestellt werden. Weiterhin mussten vor allem im Boden- und Wandbereich viele GFK-Bauteile zu einem Bauteil zusammengefasst werden. Vor allem bei Bauteilen die Wand und Boden durchdringen, führte dies zu gewissen Problemen. Um die Limitierung von 15 Bauteilen einzuhalten, konnten keine Innenbauteile definiert werden, da die exakte Darstellung der Außenhülle als wichtiger angesehen wurde als die ohnehin geringe Wärmespeicherfähigkeit der Möbelkorpuse.

Da es sich bei Helios um ein sogenanntes Einzonenmodell handelt, war es nicht möglich die energetischen Auswirkungen des Doppelbodens sowie der meist an den Außenwänden angeordneten Möbel zu berücksichtigen. Der Einfluss der Möbel wurden in dieser Simulation daher vernachlässigt. Um den dämmenden Effekt des Doppelbodens wenigstens näherungsweise zu berücksichtigen, wurden den Bodenbauteilen B1, B2 und B5 Luftschichten und die an der Außenseite des Bodens angeordnete Fahrzeugbauplatte zugeordnet. Da es im Doppelboden aufgrund seines Volumens und der vorhandenen Undichtigkeiten der Stauraumklappen zu Luftbewegungen kommt, ist die Zuordnung von einer ruhenden



Luftschicht nicht korrekt. Anfangs geplante Überlegungen hinsichtlich der Zuordnung eines Wärmeübergangswiderstandes für den Doppelbodenbereich wurden aufgrund der fehlenden bzw. stark differierenden Temperaturmessergebnisse der Aufheizkurven (siehe dazu [Abschnitt 4.2](#)) wieder verworfen.

Aufgrund der Bauteillimitierung konnten auch die Seitz S4-Seitenfenster sowie die Remistar-Dachhaube nicht exakt dargestellt werden. Dies erwies sich allerdings als nicht weiter problematisch, da die energetischen Eigenschaften beider Produkte zum grossteil vorlagen. Um eine ausreichend genaue Bauteileingabe zu ermöglichen, wurden die energetischen Eigenschaften des gesamten Bauteils auf die transparente Fläche des Bauteils umgerechnet. Somit ist zumindest gewährleistet, dass der Gesamtenergiedurchlassgrad transparenten Flächen ausreichend genau in die Berechnungen einfließt. Da der Rahmen der Fenster und Dachhauben gemäß der in [Abschnitt 2.3.4](#) abgebildeten Schnittdarstellung den Wandquerschnitt überdeckt, kann im Rahmenbereich von keiner Verschlechterung des Wärmedurchgangswiderstandes ausgegangen werden. Vielmehr werden Wärmebrücken für eine Verschlechterung dieses Wertes sorgen. Da diesbezüglich keinerlei Herstellerangaben vorliegen, konnte keine Anrechnung der Wärmebrücken auf das transparente Bauteil erfolgen.

In wie weit die in Helios möglichen Parameter für eine genaue Darstellung der Wohnmobilheizungsanlage hilfreich sind, kann nicht beurteilt werden. Es wurde daher versucht, die Heizung über den Wirkungsgrad und die Option „Luftheizung“ darzustellen. Da keinerlei ausreichende Dokumentierung der Datenweiterverarbeitung in Helios vorliegt, wurden keine weiteren Untersuchungen in dieser Richtung angestellt. Auf die qualitativen Betrachtungen haben diese Einstellung keine gravierenden Auswirkungen, da immer mit den gleichen Anlageparametern untersucht wurde.

Interessante Ansätze, wie die Darstellung der Heizungsanlage durch Innenbauteile wurden nicht weiter verfolgt, da der Aufwand der korrekten Generierung solcher Systeme in keinem Verhältnis zu den Gesamtmöglichkeiten von Helios steht.

Bei der Darstellung der Abhängigkeit der internen Lasten vom Tagesablauf dürfen die Faktoren der Grundlast nicht über 99 liegen. Zwar berechnet Helex bei größeren Werten immer noch das exakte Tagesmittel in der Eingabemaske, Helios kann diese Werte allerdings nicht mehr verarbeiten. In den Nutzerverhaltensdatensätzen (NVD) wurden daher alle dreistelligen Werte auf 99 begrenzt.

Bei den Beträgen von errechneten Innentemperaturen ergaben sich Diskrepanzen, für die keine plausible Erklärung gefunden werden konnte. Wahrscheinlich haben diese gegen die allgemeinen regeln laufenden Werte ihren Ursprung in der Heizungsanalyse von Helios. Da mit dem errechneten Energiebedarf gute und schlüssige Ergebnisse erzielt wurden, beschränken sich die nachfolgenden Betrachtungen mit Ausnahme der DIN-Aufheizsimulation auf diesen Wert.

Die Datenausgabe von Helios bzw. Helex hat Probleme mit der Darstellung sehr großer Energiemengen. So traten bei einjährigen Testläufen mit gemäßigten oder kalten Datensätzen grundsätzlich Probleme bei der Datenausgabe für die Frontscheibe (F2) auf. Da die Wärmeverluste nicht mehr dargestellt werden



konnten, erwiesen sich auch alle anderen Ausgabewerte als nicht richtig. Um dieses Problem zu umgehen, wurde die Frontscheibe in zwei Bereiche aufgeteilt.

10.3 Durchführung der Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden analog den in [Abschnitt 8.7 Tabelle 8-4](#) dargestellten sinnvollen Kombinationen aus Wohnmobilklimatensätzen (WKD) und Nutzerverhaltendatensätzen (NVD) durchgeführt. Um den Rahmen der Untersuchungen im Zuge dieser Ausarbeitung nicht zu sprengen, wurden die Kombinationen auf folgende beschränkt:

Wohnmobilklimatensatz (WKD)	Nutzerverhaltendatensatz (NVD)	Datenbezeichnung der Ergebnisse auf CD-ROM
TWKD_Winter	NVD_Winter schlecht	TWKD_WinterUxx
RWKD_Dwinter	NVD_Winter schön	RWKD_DwinterUxx
TWKD_Sommer	NVD_Sommer heiß	TWKD_SommerUxx
RWKD_Dsommer	NVD_Sommer kühl	RWKD_DsommerUxx
RWKD_Djahr	NVD_Durchschnitt	RWKD_DjahrUxx
TWKD_DIN	NVD_DIN 1646	TWKD_DINUxx

Tabelle 10-1: Überprüfte Kombinationen im Zuge der Ausarbeitung.

Die Eingabeparameter der einzelnen Kombinationen sind in [Abschnitt 8.6](#) näher erläutert. Eine genaue Darstellung der Eingabeparameter befindet sich im [Anlagen Abschnitt 8.3](#) sowie auf einer CD-ROM in den einzelnen Datensätzen.

Die Bauteileinteilung des Knaus Sun Liners 605 LG entspricht den in [Abschnitt 3.2.3](#) gemachten Angaben. Die ermittelten Massen der Einzelbauteile sind unter der jeweiligen Bauteilnummer im [Anlagen Kapitel 3](#) aufgeführt.

Zusätzlich zu den genannten Parametern wurden folgende Einstellungen in Helex gewählt (Siehe dazu auch HELEX_T auf in Helios):

- Anfangsinnentemperatur: 12 °C ; Ausnahme DIN 1646: -15°C
- Verschattung grundsätzlich durch sehr hohen Wert außer Kraft gesetzt
- Hohe Möblierungsdichte und normale technische Ausstattung (Beeinflussung von Sonneneinstrahlungsanteilen sowie Konvektiv/Strahlungsanteile der internen Lasten)
- Kein Abdrehen der Flächen. Obwohl anfangs anders geplant, werden die Flächen nicht abgedreht. Frontscheibe bleibt Südseite, um im Winter eine Verbesserung und im Sommer eine Verschlechterung im Hinblick auf die Innenraumerwärmung zu erzielen. Südweststellung als sommerliche Extremsituation wurde verworfen.
- Grenztemperatur der Heizung: 20°C



Im Zuge der Untersuchung wurden zuerst die Werte für den Serienzustand des Wohnmobils ermittelt. Diese Werte dienen als Beurteilungsgrundlage für die Wirksamkeit der darauf folgend überprüften Veränderungen. Bei der Auswahl der Veränderungen wurden nur Maßnahmen berücksichtigt, die in naher Zukunft in die Serienherstellung einfließen könnten. Diese Veränderungen gegenüber dem Serienzustand (**U1**) stellen sich u.a. wie folgt dar:

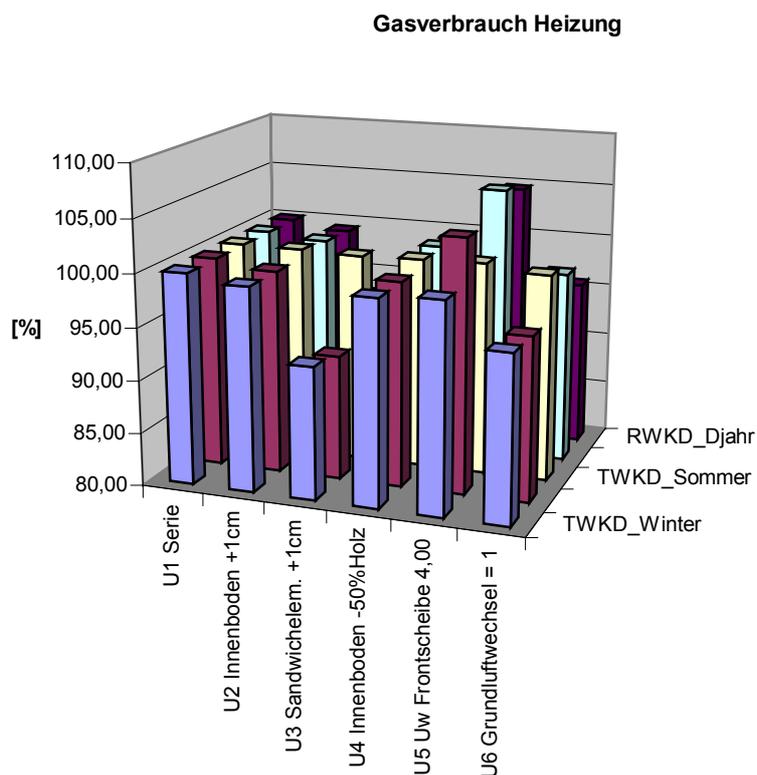
- **U2:** Erhöhung der Dämmstoffdicke im Innenbodenbereich (B1) um 10 mm
- **U3:** Erhöhung der Dämmstoffdicke in allen Sandwichbauteilen (Wand, Dach, Boden) um 10 mm
- **U4:** Verringerung des Holzanteils im Innenbodengerippe um 50 %
- **U5:** Verringerung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U_w) des Frontscheibenbereichs (F2) von 5,77 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$) auf 4,00 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$). Gesamtenergiedurchlassgrad (g) wurde von 52% auf 41% gesenkt.
- **U6:** Absenken der Grundluftwechselrate von 1,5 auf 1
- **U7:** Ausrichtung der Fahrzeugfront nach Norden
- **U8:** Ausrichtung der Fahrzeugfront nach Norden. Absenkung des U_w -Wertes der Frontscheibe auf 4,00 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$). Gesamtenergiedurchlassgrad (g) wurde von 52% auf 41% gesenkt.
- **U9:** Ausrichtung der Fahrzeugfront nach Norden. Absenkung des U_w -Wertes der Frontscheibe auf 3,00 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$). Gesamtenergiedurchlassgrad (g) wurde von 52% auf 34% gesenkt.
- **U10:** Ausrichtung der Fahrzeugfront nach Norden. Absenkung des U_w -Wertes der Frontscheibe auf 3,00 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$) bei gleichzeitigem Absenken des prozentualen Gesamtenergiedurchlassgrad auf 10% (Einsatz des Rollos).
- **U11:** Ausrichtung der Fahrzeugfront nach Norden. Absenkung des U_w -Wertes der Frontscheibe auf 2,00 ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$) bei gleichzeitigem Absenken des prozentualen Gesamtenergiedurchlassgrad auf 10% (Einsatz des Rollos).
- **U12:** Aufheizversuch nach DIN EN 1646-1



10.4 Ergebnisse der Untersuchungen

10.4.1 Gasverbrauch im Heizbetrieb (U1 bis U6)

Die Auswertungen der Untersuchungen U1 bis U6 in Verbindung mit dem jeweiligen Wohnmobilklimadatensatz sind in den folgenden Diagrammen zusammengefasst dargestellt.



	U1 Serie	U2 Innenboden +1cm	U3 Sandwichel em. +1cm	U4 Innenboden -50%Holz	U5 Uw Frontschei be 4,00	U6 Grundluftw echsel = 1
■ TWKD_Winter	100,00	99,28	92,53	99,35	99,73	95,67
■ RWKD_Dwinter	100,00	99,26	91,79	99,33	103,85	95,46
■ TWKD_Sommer	100,00	100,00	99,84	100,00	100,16	99,52
■ RWKD_Dsommer	100,00	99,52	94,59	99,88	105,77	98,20
■ RWKD_Djahr	100,00	99,27	91,92	99,39	104,73	95,75

Diagramm 10-1: Unterschiede im Gasverbrauch in Abhängigkeit von Konstruktion und Außenklima

Anhand der dargestellten Übersicht werden zwei Veränderungen sichtbar, die mit einer Brennstoffersparnis von jeweils ca. 5 bis 8 % einen ernstzunehmenden Verbesserung darstellen. Die Erhöhung der Dämmstoffdicke in allen Sandwichbauteilen (U3) stellt mit ca. 8% sicherlich die wirkungsvollste und zugleich kosten- und planungstechnisch die anspruchsvollste Verbesserung dar. Ähnliche Erfolge lassen sich allerdings mit der Reduzierung des Grundluftwechsels (U6) erzielen. Der Vorteil dieser Maßnahme liegt vor allem darin begründet, dass sich die planerischen Einschnitte in die bestehenden Konstruktionen und



Fertigungsverfahren auf ein Minimum beschränken. Des Weiteren ließen sich derartige Maßnahmen sehr gut mit den im Abschnitt xxx vorgestellten Maßnahmen zur kontrollierten Be- und Endlüftung kombinieren. Welche Bauteilbereiche in diesem Zusammenhang einer erhöhten Aufmerksamkeit bedürfen, soll im Anschluss an diese Ausarbeitung in praktischen Versuchen am Wohnmobil ermittelt werden (Blower-Door-Test).

Partielle Verbesserungen, wie z.B. die Reduzierung des Holzanteils im Innenboden (U4) oder das zusätzliche Dämmen einzelner Sandwichbauteile (U2) bringen keine nennenswerten energetischen Verbesserungen.

Ein Phänomen anderer Art zeigt sich in der Verschlechterung der Gesamtenergiebilanz bei der Verbesserung der dämmtechnischen Eigenschaften der Frontscheibe (U5). Diese Verschlechterungen sind grundsätzlich auf folgende Gegebenheiten zurückzuführen:

- Ausrichtung der Frontpartie des Wohnmobils nach Süden. Durch die Verbesserung der dämmtechnischen Eigenschaften der Frontscheibe bei gleichzeitiger Abminderung des Gesamtergedurchlassgrad wird in Zeiten tiefer Außentemperaturen und hohen Sonnenenergieeintrag das Eindringen der Sonnenenergie durch die Scheibe behindert. Diese fehlende Energie ist für die Erhöhung der Gesamtenergiebilanzen verantwortlich.
- Einsatz des Sonnen/Wärmeschutzschutrollos anhand von Nutzerkriterien ist in Helios nicht darstellbar. Somit lassen sich logische Konsequenzen des Nutzerverhaltens (Rollo nachts geschlossen, Rollo tags bei Sonnenschein und Winterwetter offen) nicht darstellen.

Um die positiven Effekte der zusätzlichen Wärmegewinne durch die Südausrichtung der Frontscheibe zu unterdrücken wurden die im hierauf folgenden Abschnitt dargestellten Werte mit einer nach Norden ausgerichteten Fahrzeugfront ermittelt.

10.4.2 Einfluss der Frontscheibe auf die Energiebilanz im Winter

Die Frontscheibe mit ihrer großen Glasfläche und der sehr hohen Wärmeleitfähigkeit erweist sich in der winterlichen Praxis als eine der größten wärmedämmtechnischen Problemzonen am Wohnmobil. Um den bei der vorangegangenen Untersuchung bereits beschriebenen Effekt der Südausrichtung des Fahrerhauses zu umgehen werden im folgenden Versuche durchgeführt, die den Winterbetrieb eines Wohnmobils simulieren.

Ausgangsparameter:

- **Siehe Abschnitt 10.3**
- Verwendete WKD – NVD Kombinationen: TWKD_Winter / NVD_Winter schlecht
RWKD_Dwinter / NVD_Winter schön

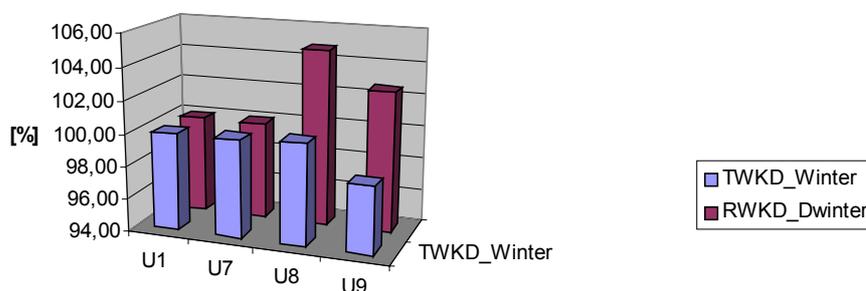


Ergebnisse:

U7: Das Abdrehen der Wohnmobilfront in nördliche Richtung erbrachte praktisch keine Veränderung im Heizenergiebedarf gegenüber der Südausrichtung. Die Strahlungsgewinne der Fenster nahmen zwar um ca. 10% ab, was sich allerdings in der Gesamtenergiebilanz nur marginal bemerkbar machte. Ein Abdrehen in südwestliche Richtung erbrachte erwartungsgemäß eine geringfügige – wenn auch praktisch unbedeutende - Absenkung der benötigten Heizenergiemenge.

U8, U9: Die Verringerung der Uw-Wertes auf 4,00 (m²K)/W bzw. 3,00 (m²K)/W bei gleichzeitiger Absenkung des Gesamtenergiedurchlassgrad (g) auf 41% bzw. 34% erbrachten folgende Änderungen gegenüber einer nach Süden ausgerichteten Serienfahrzeugfront (U1):

Gasverbrauch Heizung



	U1	U7	U8	U9
■ TWKD_Winter	100,00	100,00	100,20	98,13
■ RWKD_Dwinter	100,00	99,97	104,77	102,59

Diagramm 10-2: Unterschiede im Gasverbrauch in Abhängigkeit von Ausrichtung und Frontscheibe

Aus den Versuchsreihen mit unterschiedlichen Ausrichtungen und Uw-Werten der Frontscheibe lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die mit der Verbesserung der Wärmedämmung von Scheiben einhergehende Minderung der solaren Strahlungsgewinne kann unter Umständen die Energiebilanz eines Fahrzeuges in negativer Hinsicht beeinflussen.
- Bevor Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmedämmung transparenter Bauteile durchgeführt werden, ist daher zu prüfen, ob die erzielte Minderung der Transmissionswärmeverluste (und Strahlungsverluste) von Innen nach Außen den solaren Energieeintrag betragsmäßig übersteigt. Wie im Simulationsbeispiel zu sehen, reicht selbst eine Verbesserung der Wärmedämmung der Frontscheibe um ca. 40% nicht aus, um die Defizite des solaren Energieeintrags wirkungsvoll aufzufangen.



Die in der Simulation (U8, U9) herangezogenen Rechenbeispiele basieren auf der Überlegung der Reduzierung des Wärmedurchganges von Frontscheiben. Da diese aus fertigungstechnischen, sicherheitstechnischen und finanziellen Aspekten vorwiegend als Zweischeiben-Verbundsicherheitsgläser (VSG) bestehen, sind prinzipiell sehr schlechte wärmedämmtechnische Eigenschaften dieser Scheiben zu erwarten. Eine Lösung für dieses hier dargestellte Problem der „verschlechternden Verbesserung“ kann daher nur in einem kontrolliert eingesetzten Wärme- und Sonnenschutzsystem im Innenbereich (Wetterchutz) der Frontscheibe liegen. An dieser Stelle sei auf die den Ausarbeitungsunterlagen der Firma Knaus beigefügte Ergänzung „Sonnenschutz leicht gemacht“ [13] verwiesen, da eine ausführliche Abhandlung dieses Themas den Rahmen der Ausarbeitung überschreiten würde.

10.4.3 Aufheizversuch nach DIN EN 1646-1

Vorbemerkungen:

Der letzte Abschnitt der Heliosuntersuchungen ist der Simulation des Aufheizversuchs nach DIN EN 1646-1 gewidmet. Um das Simulationsmodell an das reale Fahrzeug anzugleichen, wurden verschiedene Einstellungen des jeweiligen Nutzerverhaltensdatensatzes NVD_DIN 1646-1 in Kombination mit dem Wohnmobilklimatensatz TWKD_DIN durch Proberechnungen analysiert. Die in den [Anlagen Abschnitt 8.3](#) dargestellte Variante erwies für die Nachbildung der Aufheizkurve des Knaus Sun Liners 650 LG als ausreichend genau. Zusätzlich wurden folgende Einstellungen vorgenommen:

- Grenztemperatur der Heizung: 48 °C. Der erhöhte Wert simuliert eine Heizleistung, die in etwa der einer Truma C6002 entspricht.
- Starttemperatur –15°C: Temperatur in der Kältekammer.
- Alle Fenster wurden mit den serienmäßigen Rollos „verschlossen“. Die Uw-Werte der Fenster betragen danach laut Herstellerangabe 1,65 (m²K)/W für Seitenfenster und Dachhaube. Front- und Seitenscheiben wurden mit einem Uw-Wert von jeweils 3,5 (m²K)/W angenommen.
- Um eine Absenken der Innentemperatur zu erreichen, wurde vor Heizbeginn ein sehr hoher Luftwechsel im Datensatz definiert (Helios setzt trotz der vorgewählten Starttemperatur die Innentemperatur nicht auf diesen Wert herab). Die maximale Heizdauer beläuft sich danach in Analogie zum Aufheizversuch in der Kältekammer bei Fa. Truma auf 7 Stunden.

Simulationsdurchführung:

Im Aufheizversuch wurden die im folgenden aufgeführten, bereits an anderen Datensätzen überprüften, Veränderungen untersucht. Da der Klimadatensatz des Aufheizversuchs keinerlei Strahlungsanteile von Infrarot- oder Sonnenstrahlung enthält, kann das in Abschnitt 10.4.1 beschriebene Phänomen der „verschlechternden Verbesserung“ durch entgangene solare Strahlungsgewinne in diesem Fall nicht auftreten.



- **U12-U1***: Serienmodell mit geschlossenen Rollos
- **U12-U1offen**: Serienmodell mit offenen Rollos (Entspricht dem Serienzustand U1; **Siehe Seite 102 oben**)
- **U12-U3***: Erhöhung der Dämmstoffdicke in allen Sandwichbauteilen (Wand, Dach, Boden) um 10 mm (Rollos geschlossen)
- **U12-U6***: Absenken der Grundluftwechselrate von 1,5 auf 1 (Rollos geschlossen)
- **U13**: Kombination der drei oben genannten Veränderungen Ux*

Ergebnisse

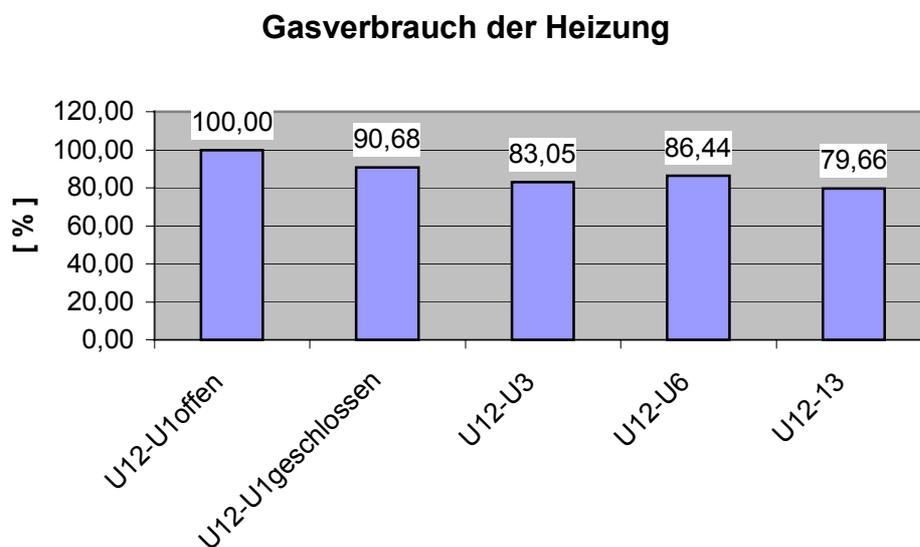


Diagramm 10-3: Unterschiede im Gasverbrauch in beim Aufheizversuch gemäß DIN EN 1646-1

Bei der energetischen Betrachtung gemäß DIN EN 1646-1 treten zum Teil erhebliche Energieeinsparpotentiale zu Tage. Da die in dieser Simulation ermittelten Werte keiner Beeinflussung durch solare Wärmegewinne erfahren, können die hier ermittelten Tendenzen uneingeschränkt auf das energetische Verhalten des Wohnmobils in kalten Winternächten übertragen werden.

Die Tendenzen der quantitativen Verbesserungen (ca. 10%) durch das Schließen der Rollos decken sich in etwa mit den Versuchen der Fa. Seitz (ca. 15%). **Siehe dazu Abschnitt 2.3.4 Seite 15 oben.**

Es bestätigt sich auch in diesem Versuch erneut die These, dass die Verringerung des Luftwechsels annähernd die gleichen energetischen Verbesserungen mit sich bringt, wie die technisch sehr aufwendig durchzuführende Erhöhung der Dämmstoffdicken in den Sandwich-Bauteilen.

Die Verläufe der jeweiligen Aufheizkurven unterscheiden sich aufgrund der ausschließlich stündlich möglichen Betrachtungen kaum voneinander. Um diesen Versuch detaillierter zu gestalten, müssten Klima- und Nutzerdatensatz sowie die sonstigen Simulationsparameter (Heizleistung, Luftwechsel, etc.) auf eine Minutenbasis umgerechnet werden. Dem Programm könnte somit ein Minutentakt vorgetäuscht werden. Versuche diesbezüglich wurden im Zuge dieser Ausarbeitung nicht mehr durchgeführt.



10.4.4 Einsatz von Klimaanlage

Die Verwendung von Klimaanlage wird gemäß [Abschnitt 8.7 Tabelle 8-4](#) anhand der WKD-NVD Kombination TWKD_Sommer / NVD_Sommer heiß (Klimaanlage) analysiert.

Folgende Szenarien sollen dabei überprüft werden:

- **U14-U1:** Wohnmobil im Serienzustand ohne Verdunkelungsrollos
- **U15*:** Alle Rollos geschlossen. Verschattung ab 500 W/m² Strahlungseinfall. Verschattungsgrad aller Fenster liegt bei 90%.
- **U15-U3*:** Erhöhung der Dämmstoffdicke in allen Sandwichbauteilen (Wand, Dach, Boden) um 10 mm (Rollos geschlossen, Verschattung wie U15)
- **U15-U6*:** Absenken der Grundluftwechselrate von 1,5 auf 1 (Rollos geschlossen, Verschattung wie U15))
- **U16*:** Kombination der drei oben genannten Veränderungen Ux*

Als Grundeinstellungen in Helios wurden eine Ausrichtung der Fahrzeugfront nach Süden sowie eine Grenztemperatur für Heizen/Kühlen von 22°C gewählt. Die sonstigen Einstellungen entsprechen dem NVD_Sommer heiß gemäß [Anlagen Abschnitt 8.3](#).

Ergebnisse

Kühlenergiebedarf

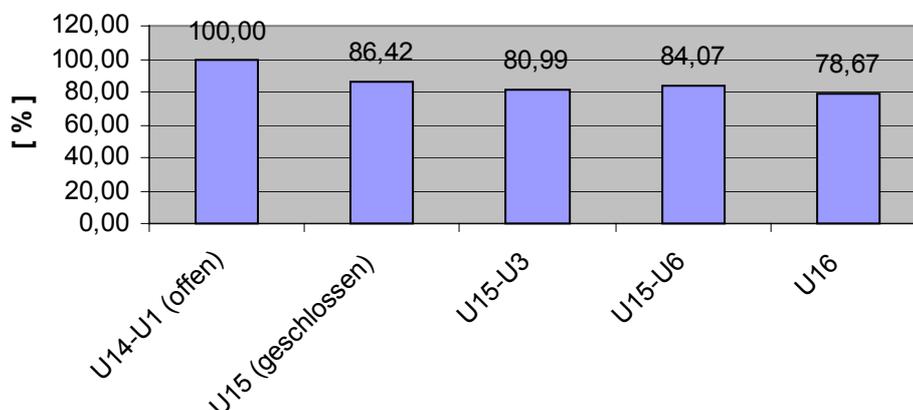


Diagramm 10-4: Unterschiede im Kühlenergiebedarf bei den oben vorgestellten Veränderungen

10.5 Schlussbemerkungen zu den Heliosuntersuchungen

Die Ergebnisse beschränken sich auf die hier dargestellten prozentualen Veränderungen der untersuchten Maßnahmen im Energieverbrauch. Zwar liegen auch quantitative Ergebnisse als Resultat dieser Untersuchungen vor, die Brauchbarkeit dieser Werte ist aber mangels real ermittelter Werte zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht gegeben.



11 Schlusswort

Als das wichtigste Ergebnis dieser Ausarbeitung müssen die verschiedenen Nutzerverhalten- und Wohnmobilklimadatensätze betrachtet werden. Sie stellen eine nachvollziehbare Grundlage für spätere Untersuchungen in für diese Aufgaben besser geeigneten Programmen dar.

Was aber mit dem ganzen Rest ? Er zeigt, wo der Anfang des Weges ist, und hoffentlich auch den Verlauf des Weges in den nächsten Jahren. Die Erkenntnis, dass mit den hier eingesetzten Verfahren nur qualitativ gesicherte Aussagen über das klimatische Verhalten von Wohnmobilen möglich sind, setzt Aufgabenschwerpunkte, die gelöst werden müssen, bevor hoffentlich weitere Untersuchungen in dieser Richtung folgen. Zu den wichtigsten Aufgaben zählen:

- Praktische klimaphysikalische Untersuchungen an Wohnmobilen
- Genaue quantitative Auswertung dieser Untersuchung
- Untersuchung von realen Schadensfällen, die durch mangelnde Klimatauglichkeit der Bauteile entstanden sind
- Untersuchungen an der Klimatechnik
- Exakte Bestimmung der für die Simulationen benötigten Materialkennndaten
- Auswahl und Anpassung geeigneter Simulationsprogramme

Die gesicherte zahlenmäßige (quantitative) Analyse ist zur Zeit mangels Erfahrungen im Bezug auf die oben genannten Punkte nicht möglich.



12 Quellenverzeichnis

12.1 Literatur/Normen/Richtlinien

- [1] Straßenverkehrszulassungsordnung (STVZO) §19; 20; 21
- [2] Angaben Firma Seitz GmbH & Co. KG, 74283 Krautheim
- [3] DIN EN 721 – Anforderungen an die Zwangsbelüftung
- [4] Brockhaus Multimedia 2002
- [5] DIN EN 1646-1
- [6] Zeitschrift promobil 4/2003
- [7] H. Arndt; Wärmeschutz und Feuchte in der Praxis; Verlag Bauwesen Berlin; ISBN 3-345-00800-9
- [8] Physik in Übersichten; Volkseigener Verlag Berlin Volk und Wissen; ISBN nicht vorhanden
- [9] Hilfetexte von WUFI; IBP Holzkirchen
- [10] H. Buss; Tabellenbuch; WEKA-Verlag; ISBN 3-8111-3080-3
- [11] Gertis; Sonnenenergie und Wärmepumpe; Heft 5/1983
- [12] N.I.T. Institut für Bäderforschung und Tourismus
- [13] N. Gruler, F. Stein; Sonnenschutz leicht gemacht
- [14] Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer; Vorlesungsskripte zur Bauphysik der FH Hildesheim

12.2 Verwendete PC – Programme

WUFI 1D Version 3.3; IBP Holzkirchen (Thermohygrische Simulationen)
Helios und Helix 2.1; econzept Energieplanung GmbH (Energetische Simulationen)
Microsoft Word (Textverarbeitung)
Microsoft Excel (Tabellen, Diagramme, Datenauswertung, Grundlage für Helix)
Adobe Photoshop (Bildbearbeitung)
CADWORK (Massenermittlung)
THINK 3D (Massenermittlung)

12.3 Verzeichnis der Abbildungen

- 2-1: Knaus Tabbert Group
- 2-2: Knaus Tabbert Group
- 2-3: Knaus Tabbert Group
- 2-4: Knaus Tabbert Group
- 2-5: Knaus Tabbert Group / F. Stein
- 2-6: Knaus Tabbert Group / F. Stein
- 2-7: Knaus Tabbert Group / F. Stein
- 2-8: Firma Seitz GmbH & Co. KG, 74283 Krautheim
- 2-9: Zeitschrift Reisemobil International 10/2003-12-20
- 2-10: Zeitschrift promobil
- 2-11: F. Stein



- 2-12: Truma GmbH & Co. KG, 85637 Putzbrunn
- 2-13: Truma GmbH & Co. KG, 85637 Putzbrunn
- 2-14: F. Stein
- 2-15: Waeco International GmbH, 48282 Emsdetten
- 2-16: Truma GmbH & Co. KG, 85637 Putzbrunn
- 3-1: Knaus Tabbert Group / F. Stein
- 4-1 bis
- 4-9: Zeitschrift promobil 1/2002 und 2/2003
- 4-10: Knaus Tabbert Group
- 6-2: F. Stein
- 6-3: Physik in Übersichten; Volkseigener Verlag Berlin Volk und Wissen; ISBN nicht vorhanden
- 8-1: Helios/Helex

12.4 Verzeichnis der Diagramme

- 4-1: Diagramm J1, DIN EN 1646-1
- 4-2: F. Stein
- 5-1: F. Stein
- 5-2: F. Stein
- 6-1: H. Arndt; Wärmeschutz und Feuchte in der Praxis; Verlag Bauwesen Berlin; ISBN 3-345-00800-9
- 6-2: F. Stein
- 7-1: Hilfetexte von WUFI; IBP Holzkirchen
- 7-2: H. Buss; Tabellenbuch; WEKA-Verlag; ISBN 3-8111-3080-3
- 8-1 bis
- 10-4: F. Stein

12.5 Verzeichnis der Tabellen

- 2-1: F. Stein
- 2-2: Tabelle 1, DIN EN 721 – Anforderungen an die Zwangsbelüftung
- 3-1: F. Stein
- 4-1: Tabelle gemäß DIN EN 1646-1
- 4-2: Knaus Tabbert Group / F. Stein
- 6-1: Klassifizierung gemäß DIN EN 1645-1
- 7-1: F. Stein
- 7-2: F. Stein; Quellen der Materialkenndaten im Verzeichnis der Tabelle aufgeführt
- 7-3: F. Stein; Fa. Seitz GmbH & Co. KG, 74283 Krautheim; Fa. Pilkington Automotive
- 8-1 bis
- 10-1: F. Stein



12.6 Sonstige Informationsquellen

- Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer
- Mitarbeiter der Knaus Tabbert Group
- Mitarbeiter des BBS – Ingenieurbüros in Wolfenbüttel und Weimar
- Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer; Vorlesungsskripte zur Bauphysik der FH Hildesheim
- Technische Unterlagen der Knaus Tabbert Group
- Auskünfte der Zulieferer
- Bundesamt für Energie (Schweiz); Wärmebrücken im Hochbau
- VEB Fachbuchverlag Leipzig; Lexikon der Holztechnik; 4. Auflage
- Metzlersche VB Stuttgart; Metzler Physik; ISBN 3-476-50209-0
- Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln; Teubner Verlag
- Volger/Laasch; Haustechnik; Teubner Verlag; ISBN 3-519-05265-2
- Merkblätter 6-1-01/D und 6-2-01/D der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA)
- DIN 4108
- DIN EN ISO 7730
- VDI 4020

Falls in dieser Ausarbeitung Quellenangaben keine Erwähnung fanden, so bitte ich dies zu entschuldigen. Selbstverständlich werden diese Quellen in möglichen nachfolgenden Ausgaben berücksichtigt.