ENERGIEWIRTSCHAFT UND ANWENDUNGSTECHNIK
LEHRSTUHL IM INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK, TU MÜNCHEN · LEHRSTUHLINHABER: UNIV. PROF. DR.- ING. U. WAGNER, ORDINARIUS

Modellraumprüfstand mit dynamischer Simulation klimatischer Einflussfaktoren zur Untersuchung von Raumheizsystemen

Werner Eiband

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Günter Dannhauer

Die Dissertation wurde am 06.05.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 02.08.2004 angenommen.

Abstract

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Konzeption und Realisierung eines Modellraumprüfstands für die messtechnische Untersuchung des dynamischen Betriebsverhaltens von Raumheizsystemen unter realitätsnahen Bedingungen von Gebäude und Klima. Insbesondere wird auf die Grundlagen und Komponenten eingegangen, die zur dynamischen Nachbildung der auf ein Gebäude einwirkenden klimatischen Einflussfaktoren Außenlufttemperatur und solare Einstrahlung eingesetzt werden. In einem weiteren Schritt wird ein Referenzheizsystem entwickelt und am Prüfstand untersucht. Es werden das Betriebsverhalten und der Energieverbrauch zur Beheizung des Raums bei definierten Versuchsbedingungen sowie der Einfluss auf die thermische Behaglichkeit im Raum analysiert und dargestellt.

Abstract

Within the scope of this work, the conception and realization of a model room test bench for the investigation of the dynamic operational behaviour of space heating systems under close-to-reality conditions of building and climate are described. Special attention is paid to fundamental aspects and components that are used for the dynamic reproduction of the climatic factors affecting a building, outside temperature and solar radiation. In a further step, a reference heating system is developed and examined at the test stand. The operational behaviour and the energy consumption for heating under defined test conditions as well as the influence on the thermal comfort in the area are analyzed and presented.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Zielsetzung 1

2 Modellraumprüfstand – Prüflinge und Prüfstand 3

3 Anforderungen an die Prüfstandskomponenten und deren Realisierung 7

3.1 Rahmenbedingungen für die Prüfstandkonzeption 7

3.2 Unterbau und Deckentragekonstruktion 7

3.2.1 Unterbau 7
3.2.2 Deckentragekonstruktion 9

3.3 Wärmedämmung zur Laborhalle 10

3.4 Kontrollierte Raumlüftung 11

3.5 Simulation von Außenlufttemperatur und solarer Einstrahlung 15

3.6 Prüfstandssteuerung und -regelung 16

4 Simulation der Außenlufttemperatur 19

4.1 Tagesgänge von Außenlufttemperatur und solarer Einstrahlung 19

4.2 Prüfstandseinrichtungen 22

4.2.1 Verglaster Vorbau 22
4.2.2 Luftverteilung 26
4.2.3 Temperieranlage 27

5 Sonnensimulation 29

5.1 Grundlagen zur Simulation direkter Sonnenstrahlung 29

5.1.1 Sonnenstandsberechnung 30
5.1.2 Berechnung der zu erzeugenden Bestrahlungsstärke 35
5.1.3 Spektrum direkter Sonnenstrahlung 37

5.2 Grundlagen zur Simulation diffuser Himmelsstrahlung 41

5.2.1 Berechnung der zu erzeugenden Bestrahlungsstärke 41
5.2.2 Spektrum diffuser Himmelsstrahlung 44

5.3 Sonnensimulator 46

5.3.1 Auswahl und Dimensionierung der Lampen und Reflektoren 46
5.3.2 Strahlerplattform 52
5.3.3 Bewegungsmechanik 53
5.3.4 Steuerung 56

5.4 Berechnung der Betriebsdaten für den Sonnensimulator 58

6 Modellraum und Referenzheizsystem 69

6.1 Variabler Modellraum 69

6.1.1 Boden- und Deckenelemente 69

6.1.2 Wände 70

6.2 Messtechnische Ausstattung des Modellraums 72

6.3 Kriterien für ein Referenzheizsystem 74

6.4 Integration des Heizsystems 76

7 Validierung des Modellraums und Prüfstandsbetrieb 79

7.1 Nachbildung von Tagesgängen der Außenlufttemperatur 79

7.2 Kontrollierte Raumlüftung 82

7.3 Energetisches Verhalten und Kennzahlen des Modellraums 84

8 Ergebnisse für das Referenzheizsystem 100

8.1 Betriebsverhalten des Referenzheizsystems 100

8.2 Thermische Behaglichkeit 105

9 Zusammenfassung und Ausblick 110

10 Literatur 113

11 Anhang 115

11.1 Abbildungsverzeichnis 115

11.2 Tabellenverzeichnis 120

11.3 Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen 121

11.4 Abbildungen 123

1 Einleitung und Zielsetzung

Der Energiebedarf für Raumheizwärme ist mit einem Anteil von über 32% am gesamten Endenergiebedarf in Deutschland einer der größten Verbrauchssektoren. Im Hinblick auf die öffentliche Diskussion um den Einfluss klimarelevanter Emissionen und die Verpflichtung der Industrieländer, ihre CO_2-Emissionen zu senken, werden vom Gesetzgeber Verordnungen erlassen, die eine Reduzierung des Energieverbrauchs für die Raumheizung zum Ziel haben. Dabei steht die Forderung nach Reduzierung des Heizwärmebedarfs, wie in den ehemaligen Wärmeschutzverordnungen und der aktuellen Energieeinsparverordnung festgeschrieben, im Vordergrund. Dies macht in zunehmendem Maße eine gemeinsame Betrachtung der am Energiehaushalt beteiligten Komponenten eines Gebäudes sowie der heiz- und klimatechnischen Einrichtungen notwendig. So erhöht die stetige Absenkung der Transmissionswärmeverluste die Bedeutung solarer und innerer Wärmegewinne. Die mit wechselnder Sonneneinstrahlung verbundenen Temperaturschwankungen im Gebäude stellen hier wachsende Anforderungen an das Heizsystem hinsichtlich seines Reaktionsvermögens. Kriterien für die Bewertung moderner Heizungssysteme sind dabei neben energetischen Kenngrößen auch Anforderungen an die Behaglichkeit der Bewohner. Die Auswahl und die Abstimmung des Heizungssystems auf das jeweilige Gebäude gewinnen deshalb immer mehr an Bedeutung. Die messtechnische Untersuchung des realen Zusammenwirkens von Heizsystem und Gebäude im Rahmen von Feldversuchen für eine vergleichende Bewertung ist dabei hinsichtlich des Zeitaufwands, der damit verbundenen Kosten und der Reproduzierbarkeit extrem aufwändig. Feldversuche sind immer von den natürlichen Witterungsbedingungen abhängig, die einen direkten Vergleich verschiedener Einflussgrößen erschweren. Prüfstandsuntersuchungen bieten durch die Möglichkeit von zeitlich und örtlich unabhängigen Versuchsreihen entscheidende Vorteile gegenüber Feldversuchen.

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Prüfstands für die messtechnische Untersuchung von Heizsystemen unter realitätsnahen Bedingungen von Gebäude und Klima. Als Heizsysteme werden in dieser Arbeit diejenigen Komponenten und Anlagen betrachtet, die der Wärmeübertragung im Raum dienen. Mit der Installation der Heizsysteme in einen sogenannten Modellraum, einem Raum mit praxisnahen Abmessungen und einer Außenfassade als Ausschnitt aus einem Gebäude, werden Versuche bei gleichen bauphysikalischen Einflüssen ermöglicht. Die in der Realität auftretenden und auf ein Gebäude einwirkenden klimatischen Einflussfaktoren Außenlufttemperatur und solare Einstrahlung werden durch dynamische Simulation mit entsprechenden Prüfstandseinrichtungen reproduzierbar nachgebildet. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei in der Konzeption und Realisierung der Simulationsanlagen zur Nachbildung der Außentemperatur sowie der in ein Gebäude fallenden Sonneneinstrahlung. Insbesondere die Sonneneinstrahlung hat aufgrund ihrer Bedeutung als Wärmelast

im Raum einen entscheidenden Einfluss auf den Betrieb eines Heizsystems. Die wichtigste Anforderung an die Anlage ist dabei die zuverlässige Nachbildung des zeitlichen Bestrahlungsstärkeverlaufs der Sonneneinstrahlung sowie des Sonnenstands. Durch die damit verbundenen unterschiedlichen Einstrahlungsrichtungen im Verlaufe eines Tages kann der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Positionierung eines Heizsystems sowie der Temperaturerfassung seiner Regelung auch am Prüfstand untersucht werden. Weiterhin können somit bei entsprechender messtechnischer Ausstattung Aussagen über den Einfluss von Sonneneinstrahlung und Heizsystem auf die Temperaturverteilung im Raum und seiner Wände abgeleitet werden.

In einem weiteren Schritt dieser Arbeit wird ein Referenzheizsystem entwickelt und am Prüfstand untersucht. Hierfür sind Kriterien zu definieren, die sich neben dem Energieverbrauch und der Qualität der Regelung auch an Anforderungen an die menschliche Behaglichkeit orientieren. Untersucht werden hier vor allem das Betriebsverhalten und der Energieverbrauch zur Beheizung des Raums bei definierten Versuchsbedingungen sowie der Einfluss auf die thermische Behaglichkeit im Raum. Die Ergebnisse für dieses Heizsystem sind die Basis für spätere Untersuchungen weiterer Raumheizsysteme.

2 Modellraumprüfstand – Prüflinge und Prüfstand

Die Grundidee des gesamten Prüfstands ist, einen modularen Prüfraum mit praxisnahen geometrischen Abmessungen und verschiedenen integrierbaren Heizsystemen mit den in der Realität auftretenden Einflussfaktoren Außenlufttemperatur und solare Einstrahlung zu beaufschlagen und das energetische Verhalten von Fassade und Raum sowie Heizsystem messtechnisch zu erfassen. Es liegen demnach mehrere Untersuchungsobjekte vor, im weiteren Prüflinge genannt, die bei definierten Rahmenbedingungen im klimatischen Tagesgang hinsichtlich energetischer Bilanzierung, raumklimatischer Zustände und weiterer Effekte untersucht werden. Neben Versuchsreihen mit konstanten Rahmenbedingungen steht dabei vor allem die dynamische Nachbildung ganzer Tagesverläufe im Vordergrund.

Der erste Prüfling ist der Modellraum selbst, ein Raum mit realen Abmessungen. Dieser ist mit einer Außenfassade als Ausschnitt aus dem zentralen Bereich eines Gebäudes zu betrachten, die drei weiteren Wände sowie Boden und Decke sind als Innenbauteile ausgeführt. Um verschiedene bauphysikalische Ausführungen des Raumes zu ermöglichen, wurde er modular aufgebaut, um einzelne oder mehrere Bauteile austauschen zu können.

Bei dem zweiten Prüfling handelt es sich um das in den Raum zu integrierende Heizungssystem. Dabei soll es möglich sein, ein breites Spektrum an Systemen zur Raumheizung untersuchen zu können. Neben konventionellen, wassergestützten Systemen (wie den derzeit gebräuchlichen Radiatoren und Konvektoren) sind vor allem auch elektrische Heizsysteme Ziel der Untersuchungen.

Für die Untersuchungen der genannten Prüflinge war ein Prüfstand zu entwickeln, der in der Laborhalle des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik aufzubauen war. **Abbildung 2-1** enthält eine schematische Darstellung der Anordnung und der Funktionsweise der wichtigsten Prüfstandskomponenten. Diese lassen sich generell in bauliche (grün), wärmetechnische (grau) und klimatische (blau/violett/gelb) Einrichtungen untergliedern. Hinzu kommen mess-, regel- und steuerungstechnische Komponenten (in Abbildung 2-1 nicht dargestellt).

Zur Minderung bzw. Vermeidung von Wärmeströmen zwischen dem Modellraum und der nicht klimatisierbaren Laborhalle ist der Raum mit einer thermischen Isolierung ausgestattet (beschrieben in Abschnitt 3.3). Dabei sind alle Raumumschließungsflächen (Wände, Decke, Boden) mit Ausnahme der Fassade des Modellraums zu isolieren. Um die baulichen Voraussetzungen für die Aufgabenstellung des Modellraums in der Laborhalle zu schaffen, wird ein geeigneter Unterbau (Abschnitt 3.2.1) als Basis für den darauf zu erstellenden Raum benötigt. Der Unterbau muss dabei die statischen Verhältnisse der Laborhalle berücksichtigen und soll einen Zugang zur Unterseite des Modellraums schaffen, um die Installation von Messtechnik

und wärmetechnischer Isolierung zu ermöglichen. Weiterhin ist eine Tragekonstruktion (Abschnitt 3.2.2) für die Raumdecke einzuplanen, damit auch Wandaufbauten des Modellraums realisiert werden können, die keine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen (nicht-tragende Wände).

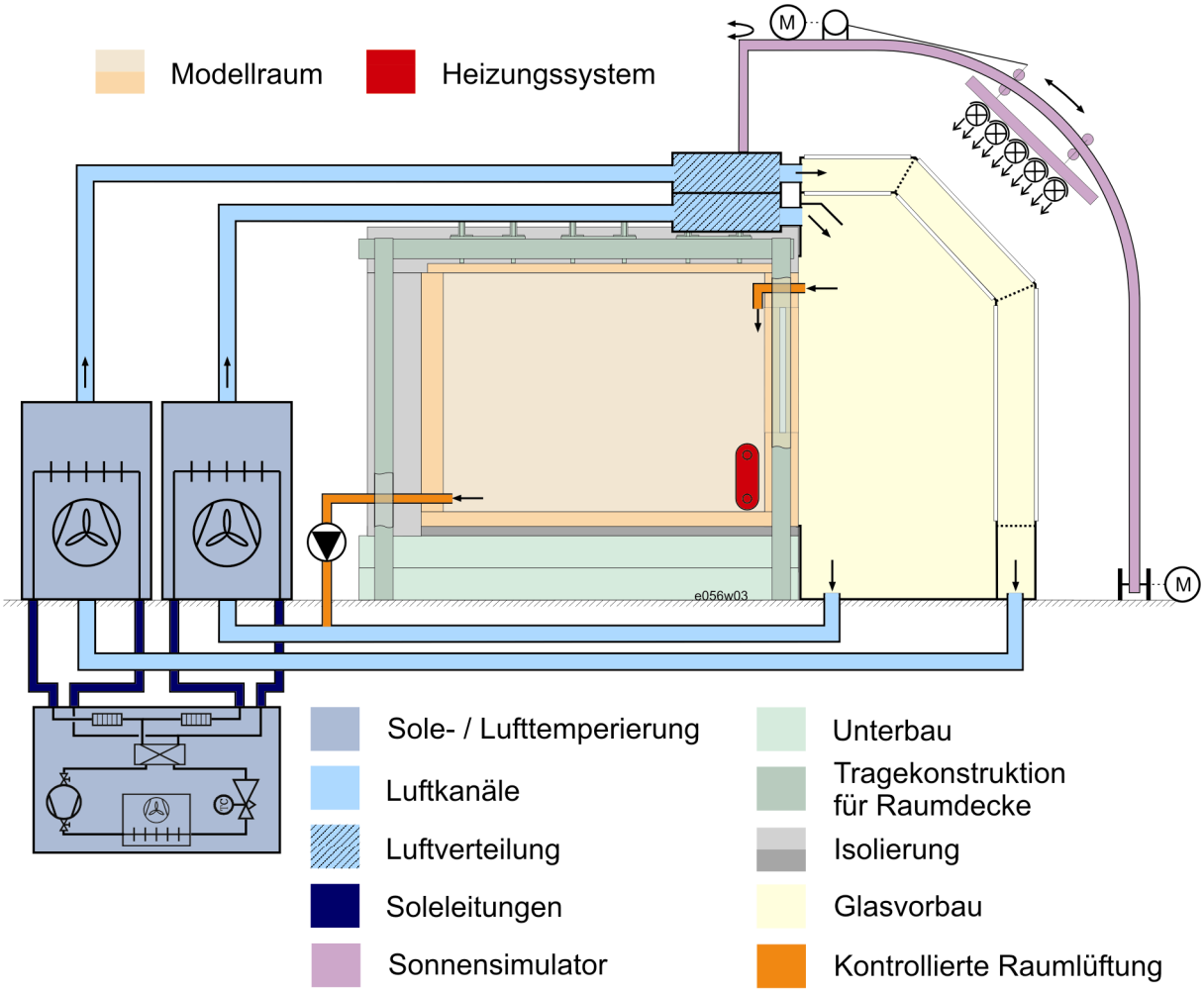

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Anordnung und Funktion des Modellraums und einiger Prüfstandskomponenten.

Die in der Realität auftretenden und auf ein Gebäude einwirkenden klimatischen Einflussfaktoren wie Außenlufttemperatur und solare Einstrahlung werden durch Prüfstandseinrichtungen nachgebildet, die diese Einflussfaktoren dynamisch simulieren. Um vor der Modellraumfassade Außenlufttemperaturprofile realisieren zu können, muss hier ein geschlossenes Luftvolumen abgegrenzt werden, das entsprechend temperiert werden kann. Dazu ist ein Vorbau vor der Fassade zu konzipieren, der diese ganz umschließt und luftdicht mit ihr abschließt (Abschnitt 4.2.1). Außerdem ist dieser weitestgehend transparent auszuführen, da die Simulationseinrichtung für die solare Einstrahlung vor allem aus thermischen Gründen außerhalb des Vorbaus vorgesehen ist. Zur Nachbildung von realen Außentemperaturverläufen ist der Vor-

bau im Umluftverfahren zu betreiben. Die Temperierung der Luft erfolgt dabei mittels eines Wärmetauschers durch ein Aggregat mit Kälte- sowie Heizeinrichtungen (Abschnitt 4.2.3). Auf diese Weise kann die Fassade mit niedrigen bis hin zu sommerlichen Temperaturen beaufschlagt werden.

Für eine homogene Temperaturverteilung vor der Modellraumfassade ist die Zu- und Abluftführung in und aus dem Glasvorbau über die gesamte Breite der Fassade zu konzipieren. Die Verteilung der Zuluft erfolgt über eine zu entwickelnde Einrichtung, die gleichzeitig die passenden Anschlussmöglichkeiten an den Vorbau beinhaltet (Abschnitt 4.2.2). Für die Absaugung der Luft aus dem Vorbau ist eine Einrichtung unterhalb der Fassade vorzusehen. Wie in Abbildung 2-1 erkennbar, ist der Vorbau vor der Modellraumfassade zweischalig vorzusehen und großflächig mit Glasscheiben auszuführen. Der Grund für die transparente Ausführung ist, wie oben genannt, der außerhalb geplante Sonnensimulator. Der Zwischenraum zwischen den zwei Schalen soll über einen zweiten, separaten Luftkreis gekühlt werden. Damit lassen sich die inneren, der Fassade zugewandten Oberflächen des Vorbaus zusätzlich kühlen, um auch die kalte atmosphärische Strahlung nachbilden zu können.

Die Simulation solarer Einstrahlung soll neben der Strahlungsleistung und dem Spektrum der realen Sonne auch die Einstrahlungsrichtung bzw. den Sonnenstand richtig nachbilden können (Abschnitt 5). Dafür ist eine bewegliche Simulationseinrichtung notwendig, die einen Bewegungsbereich von horizontal bis zu 180° und vertikal bis zu 90° aufweist. Die Bestrahlungseinrichtung ist von ihren Abmessungen und ihrer Leistung so zu konzipieren, dass das Fenster der Modellraumfassade bestrahlt werden kann. Eine Bestrahlung der gesamten Fassade ist nicht vorgesehen.

Die Einrichtung zur kontrollierten Raumlüftung (Abschnitt 3.4) ist einerseits eine Prüfstandskomponente, lässt sich jedoch je nach Betriebsweise und Konfiguration auch als weiterer Prüfling betrachten. Ihre Aufgabe besteht vor allem darin, den in realen Gebäuden auftretenden Luftaustausch mit der Außenluft durch Baufugen und Undichtigkeiten kontrolliert und regelbar nachzubilden. Darüber hinaus sollen hiermit auch regelbare Luftwechselzahlen unter Berücksichtigung von Fensterlüftung realisiert werden. Dazu muss eine regelbare Luftströmung aus dem Vorbau in den Modellraum ermöglicht werden, dementsprechend ist ein Luftvolumen aus dem Modellraum abzuführen. Wie in Abbildung 2-1 erkennbar, wird der Luftkreis geschlossen, indem die aus dem Raum abgesaugte Luft in den Hauptluftkreis der Außentemperatursimulation zurückgeführt wird.

Der Betrieb des gesamten Prüfstands erfordert umfangreiche Mess-, Regel- und Steuerungstechnik (Abschnitt 3.6). Dabei ist das Verhalten des Raums mit zahlreichen Temperaturmessstellen in den Raumbegrenzungsflächen, deren inneren Oberflächen sowie der Raumluft zu erfassen. Zur Regelung oder Steuerung der verschiedenen Prüfstandskomponenten sind entsprechende Größen zu messen (Temperaturen, Volumenströme, Winkel/Positionierung, ...)

und Hard- und Software zum Betrieb zu entwickeln. Ein Augenmerk ist dabei auch auf den sicheren Betrieb des Prüfstands ohne Beaufsichtigung über längere Zeiträume zu legen. Die für kontinuierlichen Betrieb des Prüfstands notwendige Steuerung der Prüfstandskomponenten soll über entsprechende Programmfahrpläne mit zeitlichen Auflösungen von maximal einer Stunde erfolgen. Die Fahrpläne können dabei für unterschiedlich lange Zeitperioden erstellt werden, vom Tagesgang bis zu mehrtägigen Perioden. Durch das gezielte Herstellen der gewünschten klimatischen Bedingungen für den Modellraum werden zeitlich und saisonal unabhängige Versuchsreihen ermöglicht. Dies stellt einen entscheidenden Vorteil gegenüber entsprechenden Feldversuchen dar.

Der Modellraumprüfstand bietet in dieser Form die Möglichkeit, verschiedene Heizungssysteme (sowohl wassergestützte als auch elektrische) unter reproduzierbaren klimatischen Bedingungen bei vergleichbaren bauphysikalischen Einflüssen zu testen. Die Ergebnisse werden damit direkt vergleichbar. Weiterhin können auch die gleichen Heizungssysteme unter verschiedenen bauphysikalischen Rahmenbedingungen und damit unterschiedlichem thermischem Verhalten des Modellraums untersucht werden.

3 Anforderungen an die Prüfstandskomponenten und deren Realisierung

3.1 Rahmenbedingungen für die Prüfstandkonzeption

Der Modellraumprüfstand ist in einer Laborhalle des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TU München aufgebaut, deren bauliche und räumliche Gegebenheiten bei der Konzeption des Prüfstands zu berücksichtigen waren. Ein weiteres wichtiges Kriterium war die zerleg- und transportierbare Konstruktion. Die Laborhalle wird durch tragende Säulen in zwei Hälften geteilt, die jeweils mit einem Portalkran ausgerüstet sind. Nur einer dieser Kräne hat mit 4 Tonnen eine Tragfähigkeit, die ausreichend ist, um größere Elemente des Modelraums wie Wand- oder Geschossdeckenelemente zu bewegen.

Ein weiteres Kriterium, das bei der Konstruktion des Prüfstands zu beachten war, ist die Flächenbelastbarkeit des Bodens der Laborhalle. Sie beträgt 1 t/m², was selbst bei flächiger Belastung durch einen Raumaufbau mit schweren Materialen problematisch ist. So kann das Gewicht eines Raums mit 15 m², der geplanten Größe des Modellraums, bei schwerer Bauweise deutlich über 15 t liegen. Der Hallenboden weist jedoch auch Bereiche auf, die deutlich höher belastbar sind. Diese Bereiche liegen über tragenden Wänden oder baulichen Verstärkungen in der unter der Halle liegenden Tiefgarage. Daher musste die Konstruktion des Prüfstands so vorgenommen werden, dass das Gewicht des Modellraums, der Hauptanteil des Gesamtgewichtes, auf eine größere Fläche verteilt wird oder weitgehend lediglich die tragfähigen Bereiche der Halle belastet. Die dazu notwendige Konstruktion eines Unterbaus ist im folgenden Abschnitt beschrieben.

3.2 Unterbau und Deckentragekonstruktion

3.2.1 Unterbau

Der Unterbau des Modellraums besteht aus einer Stahlträgerkonstruktion und nimmt insgesamt eine Fläche von etwa 29 m² ein (**Abbildung 3-1**). Er erfüllt die statischen Anforderungen der Laborhalle, die eine Belastung des Hallenbodens mit dem hohen Gewicht des Modellraums nur in bestimmten Bereichen zulässt (schraffierte Bereiche in Abbildung 3-1), und garantiert zudem eine ausreichende Zugänglichkeit. Die Bodenplatte des Raums muss auf ihrer Unterseite zugänglich sein, um eine Wärmedämmung sowie messtechnische Ausstattung anbringen zu können.

Die realisierte Konstruktion basiert auf einem einfachen ’Baukastenprinzip’. Sie ist aus Breitflansch-TT-Stahlprofilträgern vom Typ HEA360 aufgebaut. Jeder Träger ist 35 cm hoch und

30 cm breit. Dieser Typ wurde ausgewählt, da mit diesem eine ausreichend breite Auflagefläche und, mit zwei Trägern übereinander, die gewünschte lichte Höhe von ca. 70 cm zwischen Hallenboden und Bodenplatte erreicht wird. Die Konstruktion besteht demnach aus zwei übereinander gelegten und verschraubten Lagen der genannten Stahlträger, die an den Ecken jeweils über Kreuz verbunden sind. Zusätzlich zu den Stahlträgern am Rand der Bodenplatte wird diese durch einen quer zur Längsrichtung der Bodenplattensegmente spannenden Träger in der oberen Lage unterstützt. Er ist, wie in Abbildung 3-1 zu erkennen, länger als die restliche Konstruktion und endet auch über einem höher belastbaren Bereich des Hallenbodens. Um eventuell vorhandene Unebenheiten des Hallenbodens auszugleichen, wurde die gesamte Stahlkonstruktion auf eine 1,9 mm starke, geschlossenporige Moosgummiunterlage gestellt.

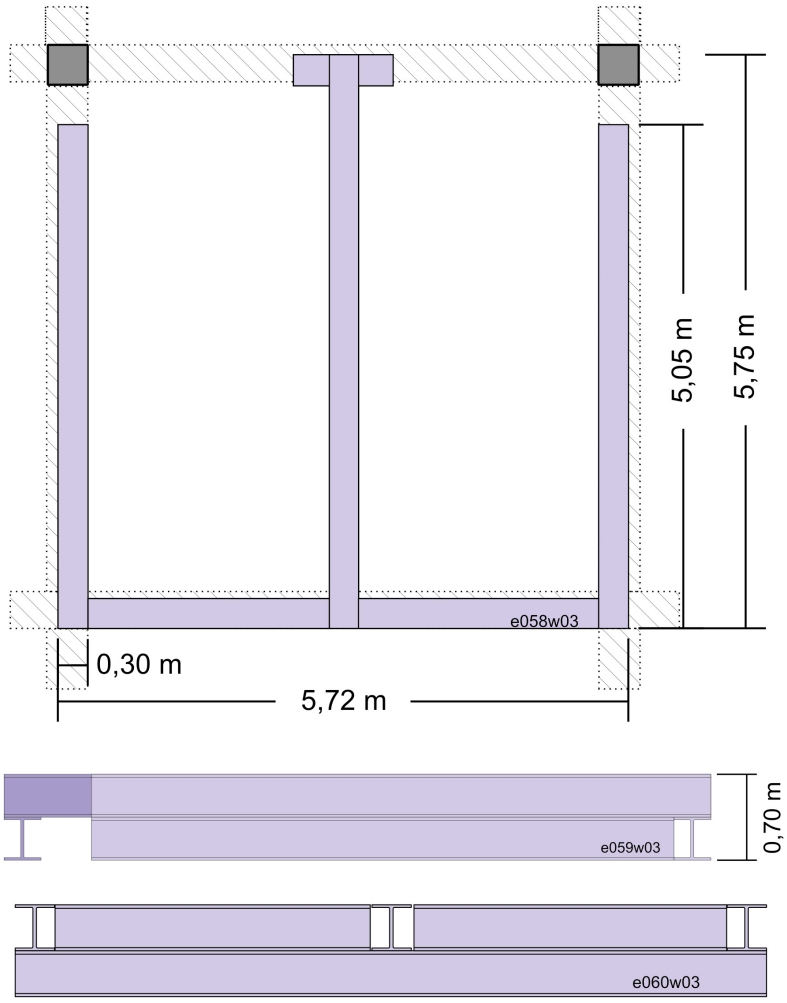

Abbildung 3-1: Aufbau und Abmessungen des Unterbaus; Grundriss, Seiten- und Frontansicht.

Die beschriebene Unterbau-Konstruktion hat eine Höhe von 0,70 m und stellt die Basis für den darauf aufzubauenden Modellraum dar. Die Stahlträger dienen weiterhin als Fundament

für die Tragkonstruktion der Raumdecke, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

3.2.2 Deckentragekonstruktion

Bei realen Gebäuden übernehmen die tragenden Wände die Aufgabe, die Belastung der darüber liegenden Geschosse aufzunehmen. Genau so verhält es sich auch mit dem Modellraum. Ist er aus tragfähigen Wänden aufgebaut, so können diese selbstverständlich das Gewicht der darüber liegenden Geschossdecke aufnehmen. Um jedoch die Möglichkeit zu erhalten, den Modellraum auch mit leichten, nicht tragenden Wandaufbauten auszustatten, musste der Prüfstand so konzipiert werden, dass er das Gewicht der Geschossdecke des Raums aufnehmen kann. Die aus diesen Überlegungen resultierende Stahlkonstruktion eines Tragegerüsts für die Raumdecke ist in **Abbildung 3-2** zusammen mit dem im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Unterbau in zwei Ansichten dargestellt.

Die Raumdecke wurde aus Gewichts- und Transportgründen ebenso wie die Bodenplatte jeweils in drei Betonplatten aufgeteilt. Gleichzeitig mit der Planung der Raumdecke wurden die Tragegestelle für die einzelnen Segmente entwickelt. In jedes Deckenplattensegment wurden dazu vier Gewindehülsen eingegossen, an denen sie mittels Stahlseilschlaufen aufgehängt werden können. Für jedes Plattensegment wurde ein Gestell gefertigt, das die Seilschlaufen aufnimmt und eine spannungsfreie Aufhängung gewährleistet (Abbildung 3-2 und **Abbildung 3-3**). Jedes Gestell bildet jeweils mit einer Betonplatte zusammen ein Deckenelement. Über vier Gewindestangen an den Enden des Gestells kann jedes Deckenelement gezielt und maßgenau auf die darunter liegenden Wände abgesenkt werden.

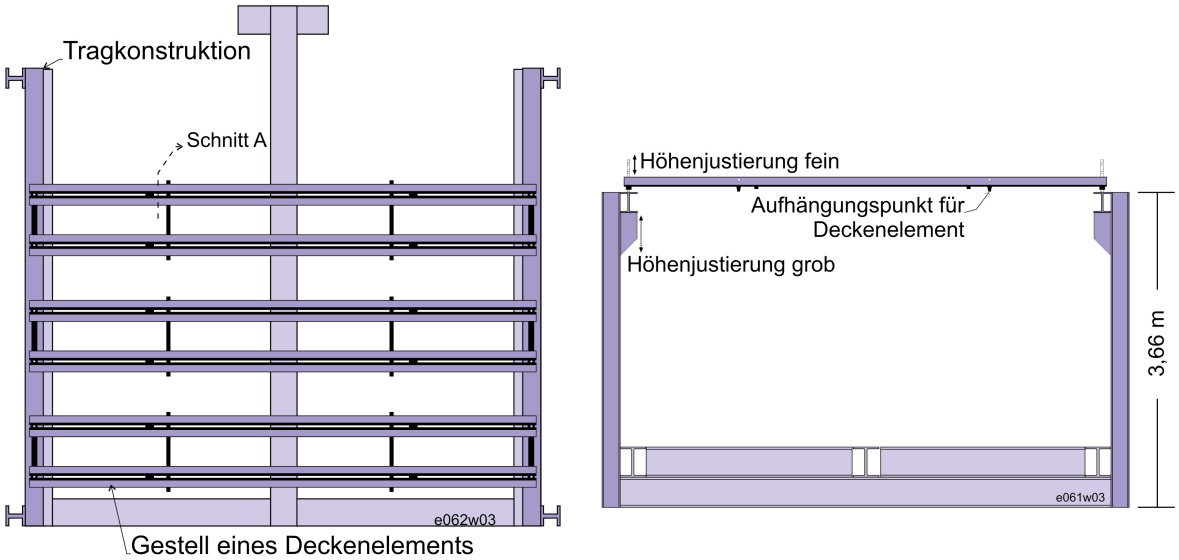

Abbildung 3-2: Aufbau des Deckentragwerks; Draufsicht und Frontansicht.

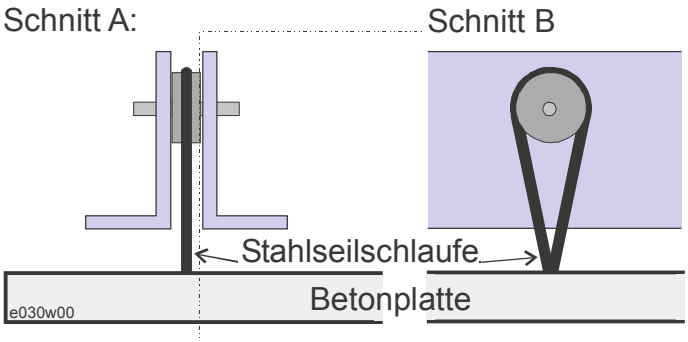

Abbildung 3-3: Schnittansichten des Gestells der Deckenelemente.

Die Deckenelemente ruhen wiederum auf einer mit dem Unterbau fest verbundenen Tragkonstruktion. Sie besteht aus vier senkrechten Stahlträgern, die seitlich an den Ecken des Unterbaus befestigt sind. An jeweils zwei senkrechten Trägern ist parallel zu den seitlichen Wänden ein horizontaler Stahlträger angeflanscht. Die Befestigung ist so ausgeführt, dass hier bereits eine grobe Höhenanpassung vorgenommen werden kann. Die beiden waagrechten Träger bilden die Auflageflächen für die Deckenelemente und alle oberhalb der Raumdecke zu montierenden Komponenten. Durch die Art der Konstruktion ist sichergestellt, dass der Unterbau alle Belastungen aufnimmt und weiterverteilt.

Die ganze Konstruktion ist auch darauf ausgelegt, möglichst einfach auf verschiedene Abmessungen des Raums und seiner Decke angepasst werden zu können. Raumhöhen bis zu 3,10 m (einschließlich der Dicke der Geschossdecken) sind durch Versetzen der Auflageköpfe an den senkrechten Stahlträgern möglich. Längs der Auflageträger können die Deckenelemente frei verschoben werden. Der Raum muss jedoch mittig zwischen den beiden Tragekonstruktionen angeordnet sein, da die Positionen der Aufhängungspunkte für die Deckenplattensegmente innerhalb der Tragegestelle nur durch bauliche Maßnahmen veränderbar wären und somit als feste Größe zu betrachten sind.

3.3 Wärmedämmung zur Laborhalle

Der Modellraum soll entsprechend seiner Konzeption lediglich eine an das variierbare Außenklima grenzende Wand besitzen; alle anderen Umschließungsflächen grenzen an beheizte Bereiche eines fiktiven Gebäudes. Für diese angrenzenden Räume wird dabei die Annahme getroffen, dass sie sich immer auf gleichem Temperaturniveau befinden sollen. Das bedeutet, es findet kein Wärmeaustausch mit diesen Räumen statt. In der Realität des Prüfstands ist die Laborhalle der angrenzende Bereich für die Umschließungsflächen des Modellraums. Da die Halle keine Möglichkeit zu Klimatisierung bietet, ist hier keine Möglichkeit vorhanden, die Temperatur um den Modellraum zu regulieren und auf dessen Innentemperatur einzuregeln. Um einen Wärmeaustausch zwischen der Laborhalle und dem Modellraum weitgehend zu unterbinden, wird dieser thermisch isoliert. Für die Wärmedämmung kann dabei auf handels-

üblichen Polystyrol (PS)-Hartschaum zurückgegriffen werden. Dieser ist in verschiedenen Materialeigenschaften erhältlich. Wegen einer etwas höheren Druck- und Abriebfestigkeit werden PS-Hartschaumplatten mit einer Dichte von 30 kg/m³ verwendet. Der Wärmeleitwert λ dieser Platten beträgt 0,04 W/(m·K). Mit der gewählten Isolierstärke von 40 cm kann hiermit der Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Laborhalle und Modellraum auf ca. 0,1 W/(m²·K) reduziert werden. Für eine weitere Minderung des Wärmeflusses wären unvertretbar hohe Dämmstärken erforderlich, die aufgrund des zur Verfügung stehenden Raums für den Prüfstand nicht mehr realisierbar wären.

Die Isolierung der Bodenplatten zur umgebenden Laborhalle sollte durchgehend an allen Seiten möglich sein. An den frei zugänglichen Stellen kann dies mit Polystyrol-Platten erfolgen. Um auch eine thermische Entkopplung der Betonplatten von der Stahlträgerkonstruktion zu gewährleisten, wurde ein geeignetes Material gesucht, das eine geringe Wärmeleitung bei einer ausreichenden Belastbarkeit besitzt. Die schon verwendeten Moosgummiplatten wären zwar ausreichend belastbar, besitzen aber nicht die gewünschte Dämmfähigkeit. Das letztlich eingesetzte 10 cm starke Schaumglas erfüllt mit einer Belastbarkeit von ca. 48 t/m² und einem Wärmeleitwert von 0,05 W/(m·K) alle Anforderungen.

3.4 Kontrollierte Raumlüftung

Gebäude normaler Bauart sind fast immer in begrenztem Rahmen luftdurchlässig. Die maßgeblichen Bauteile für die Luftdurchlässigkeit sind dabei Fenster und Türen. Betroffen sind hier die Schließfugen sowie die Einbaufugen zwischen Rahmen und Wand. Weitere, nicht luftdichte Fugen können bei vorgefertigten Bauteilen an den Grenzen zwischen Außenwandelementen auftreten. Die durch diese Fugen eindringende Außenluft muss auf Raumlufttemperatur erwärmt werden, wodurch eine zusätzliche Heizlast entsteht.

Entscheidende Größe für die Höhe des Volumenstroms, der durch Fugen in ein Gebäude eindringt, ist die Differenz zwischen dem Luftdruck innerhalb und außerhalb des Gebäudes. Hauptursache für die Entstehung einer solchen Druckdifferenz ist die Windanströmung eines Gebäudes. Wird eine Fassade vom Wind angeströmt, entsteht im allgemeinen vor ihr ein Überdruck (Staudruck) gegenüber der Umgebung und dem Gebäudeinneren. Die Höhe des Überdrucks ist von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung, der Gebäudeorientierung und der Gebäudeform abhängig.

Am Modellraumprüfstand ist die Nachbildung von Windanströmungen auf die Modellraumfassade explizit nicht vorgesehen. Durch die Anlagen zur Simulation der Außenlufttemperatur wird jedoch auch eine Luftströmung vor der Fassade erzeugt. Um kein unkontrolliertes Eindringen der Luft in den Modellraum zu ermöglichen, wurde bei dessen Realisierung darauf geachtet, die genannten Fugen abzudichten. Schließlich sollte die Luftdurchlässigkeit von

Gebäuden durch die Entwicklung einer Anlage zur kontrollierten Raumlüftung regelbar nachgebildet werden. Für deren Auslegung war zuerst zu ermitteln, wie hoch der Volumenstrom aus Undichtigkeiten bei normalen Gebäuden sein kann.

Ein einfacher Ansatz zur Berechnung des Luftvolumenstroms $\dot{V}$ nach /4701-1/ lautet:

$$\dot{V} = \sum \left(a_{Fu} \cdot l_{Fu} \right) \cdot \frac{\varepsilon_h \cdot H \cdot r}{c_L \cdot \rho_L} \qquad [\mathrm{m^3/h}] \qquad (3\text{-}1)$$

mit	a_{Fu}	[m³/(m·h·Pa$^{2/3}$)] :	Fugendurchlasskoeffizient
	l_{Fu}	[m] :	Fugenlänge
	ε_h	[-] :	Höhenkorrekturfaktor
	H	[Wh Pa$^{2/3}$/(m³·K)] :	Hauskenngröße
	r	[-] :	Raumkennzahl
	ρ_L	[kg/m³] :	Dichte (Luft)
	c_L	[Wh/(kg·K)] :	Spezifische Wärmekapazität (Luft)

Für die Berechnung des Volumenstroms müssen einige Annahmen für das fiktive Gebäude, das den Modellraum beinhalten soll, getroffen werden. Es soll sich dabei um ein Einzelhaus mit drei Geschossen handeln, mit dem Modellraumausschnitt im mittleren Geschoss. Die Lage, entsprechend DIN 4701, ist normal, was keine deutlich erhöhten Windstärken einbezieht. Das Gebäude befindet sich in Süddeutschland, was in der Norm einem windschwachen Gebiet entspricht. Die Berechnung bezieht sich auf den Geschosstyp der Norm, so dass nur Windeinflüsse berücksichtigt werden müssen, Auftriebskräfte treten hier nicht auf. Die relevanten Fugen der Modellraumfassade, die als angeströmte Gebäudeseite angenommen wird, umfassen die Einbau- und Schließfugen des Fensters. Deren Länge beträgt bei einer Fensterfläche von 2 m² mindestens 5,7 m. Der Fugendurchlasskoeffizient a nach /4701-2/ für ein normales, zu öffnendes Fenster beträgt 0,6 m³/(m·h·Pa$^{2/3}$), die windabhängige Hauskenngröße H beträgt bei den getroffenen Rahmenbedingungen 0,72 W·h·Pa$^{2/3}$/(m³·K) und der Höhenkorrekturfaktor ε_h 1,0. Die Raumkennzahl r, die als Reduktionsfaktor die Verminderung der Gebäudedurchströmung durch Innenwände und Türen berücksichtigt, beträgt in diesem Fall 0,9. Damit errechnet sich ein Luftvolumenstrom von 6,7 m³/h. Die zugrunde gelegte Hauskenngröße bezieht sich dabei auf eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2 m/s. Bei einer höheren Windgeschwindigkeit von 4 m/s steigt der Volumenstrom auf 16,7 m³/h. Für den geplanten Modellraum mit ca. 34 m³ Luftvolumen führen diese Werte zu Luftwechselraten von 0,2 1/h bis 0,5 1/h.

Eine zweite Größe zur Bestimmung des minimal erforderlichen Volumenstroms der Anlage bieten die gesetzlichen Vorschriften für den Mindestluftwechsel, der als Planungsgrundlage bei Gebäuden anzusetzen ist. Die, inzwischen nicht mehr gültige, Wärmeschutzverordnung in der Fassung von 1994 gibt eine mindestens erforderliche Luftwechselrate von 0,5 1/h vor

/WSV 95/. Die aktuell gültige Energieeinsparverordnung /EnEV/ bezieht sich in dieser Frage nur auf den Stand der Technik, der in /4108-6/ beschrieben ist. Dort wird als Berechnungsgrundlage eine Standard-Luftwechselrate von 0,6 1/h angegeben. Beide Angaben beziehen sich jedoch nicht allein auf Luftwechsel durch Gebäude-Undichtigkeiten, sondern sind als mittlerer bzw. mindestens erforderlicher Luftwechsel einschließlich Fensterlüftung zu verstehen.

Als Auslegungsgrundlage für die kontrollierte Raumlüftung des Prüfstands wird auf Basis der oben beschriebenen Werte eine maximale Luftwechselrate von 1,0 1/h herangezogen. Damit lassen sich der Einfluss von Baufugen wie auch typische mittlere Luftwechselraten sicher nachbilden. Der Aufbau der Anlage zur kontrollierten Raumlüftung sowie deren Messstellen sind in **Abbildung 3-4** dargestellt. In die Fassade des Modellraums ist ein Rohr integriert, durch das direkt Luft mit Außentemperatur aus dem Vorbau einströmen kann. Sie wird mit Hilfe eines unmittelbar oberhalb des Fenster angeordneten schwenkbaren Verteilrohrs über die gesamte Breite des Fensters verteilt. Die Öffnungen des Verteilrohrs sind dabei in der Regel nach unten gerichtet. Mit dieser Anordnung wird die Außenluft, bei variablem Luftwechsel, sehr realitätsnah in den Raum eingebracht.

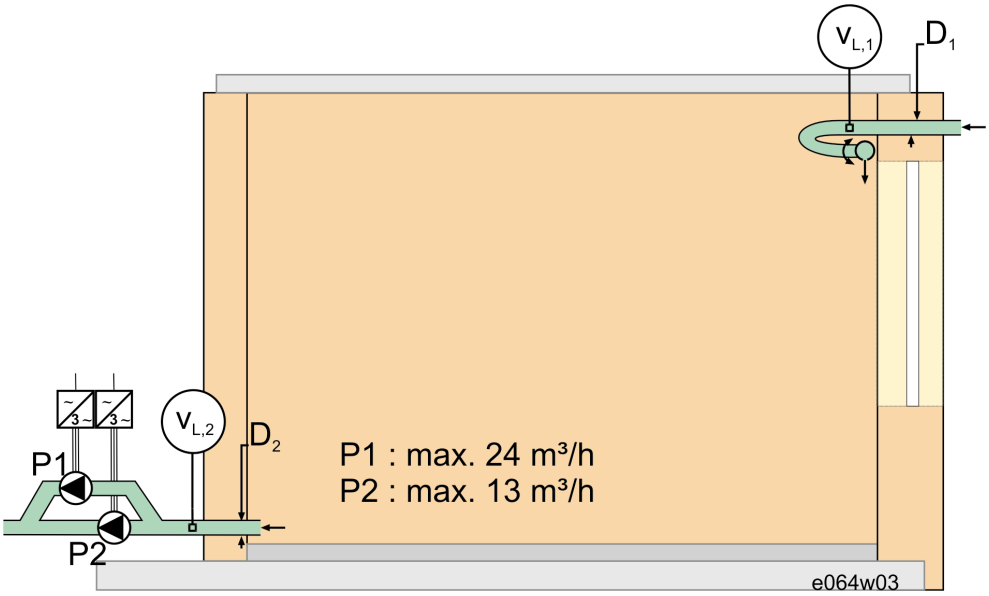

Abbildung 3-4: Funktionsschema und Messstellen der kontrollierten Raumlüftung.

Auf der gegenüberliegenden Seite des Raums ist in der Türschwelle eine weitere Rohrstrecke platziert, durch die mittels zweier geregelter Pumpen Luft aus dem Raum abgeführt wird. Dadurch wird zwischen dem Rauminneren und dem Vorbau vor der Fassade eine Druckdifferenz aufgebaut, die einen Luftstrom in den Raum bewirkt. Das Konzept dieser Anlage bedingt eine möglichst luftdichte Ausführung des Modellraums, vor allem die Fugen des Fensters müssen abgedichtet sein, da sich ansonsten ein zweiter Luftstrom entwickelt, der durch die Messung nicht erfasst wird. Eine Alternative zu diesem Konzept wäre gewesen, die Luft aus dem Vor-

bau in den Raum zu pumpen. Durch den Pumpvorgang würde sich diese Luft jedoch erwärmen, so dass sie vor dem Eintritt in den Raum erneut temperiert werden müsste. Wegen des damit verbundenen anlagentechnischen Aufwands wurde diese Überlegung verworfen.

Zum Absaugen der Luft aus dem Raum kommen, wie in Abbildung 3-4 gezeigt, zwei verschieden große Pumpen in paralleler Anordnung zum Einsatz. Die größere Pumpe P1 hat ein maximales Fördervolumen von 24 m³/h, die Pumpe P2 von 13 m³/h. Die Aufteilung und Stufung der Förderleistung auf zwei Pumpen wurde vorgenommen, um eine verbesserte Regelbarkeit des Volumenstroms zu erreichen. Beide Pumpen werden jeweils mit einem eigenen Frequenzumrichter betrieben, wodurch sie stufenlos regelbar sind. An beiden Durchführungen zum Modellraum sind Messungen der Strömungsgeschwindigkeit installiert ($v_{L,1}$ und $v_{L,2}$ in Abbildung 3-4). Aus der Strömungsgeschwindigkeit und dem jeweiligen Durchmesser der Rohre (D_1, D_2) kann der Volumenstrom bestimmt werden.

Für die Simulation von Undichtigkeiten und Fensterlüftung ist die Öffnung in der Fassade entscheidend. Die Anlage wird mit Sollwertvorgaben für den dort erforderlichen Volumenstrom betrieben. Für die Regelung der Pumpen ist somit die Messung am Fenster entscheidend. **Abbildung 3-5** zeigt den Aufbau dieser Strömungsgeschwindigkeitsmessung mit einem Staudruckrohr und die sich daran anschließende Regeleinrichtung für die Pumpen.

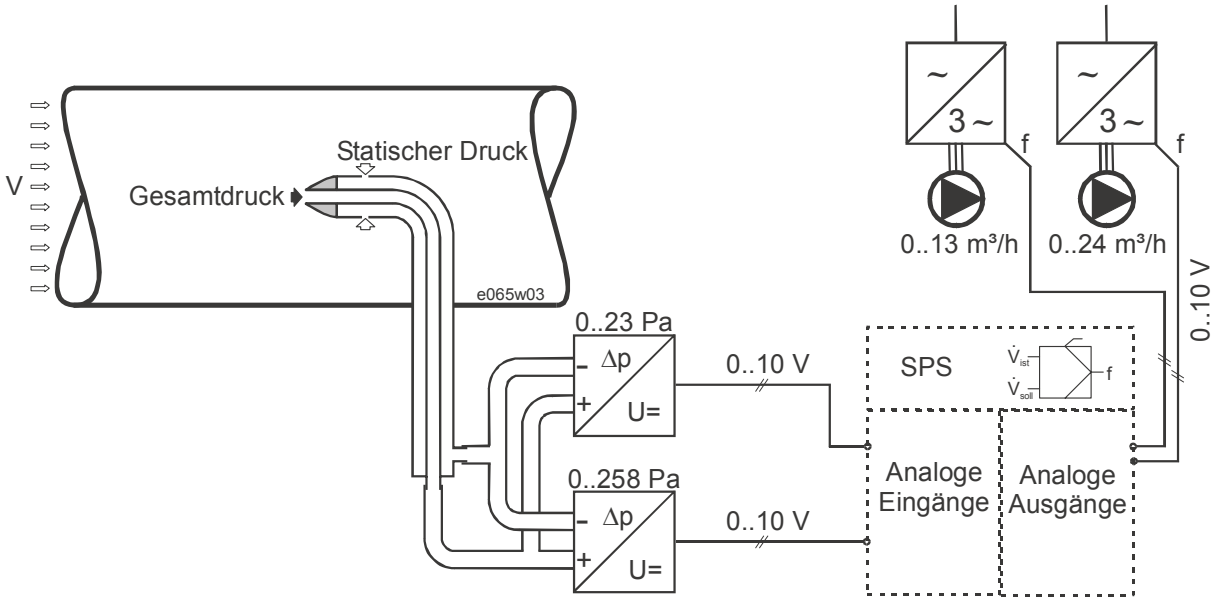

Abbildung 3-5: Messung der Strömungsgeschwindigkeit und Schaltschema der Regeleinrichtung.

Die vordere Öffnung des Staudruckrohrs, die dem Luftstrom entgegengerichtet ist, erfasst den Gesamtdruck im Kanal, der sich aus dem statischen Druck und dem Staudruck zusammensetzt. Seitliche Öffnungen am Staudruckrohr erfassen nur den statischen Druck. Die eingesetzten Druckmessumformer bilden die Differenz beider Drücke und messen somit nur den Stau-

druck, ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten werden zwei Umformer mit verschiedenen Messbereichen eingesetzt.

An den Ausgängen der Druckmessumformer kann eine dem Staudruck proportionale Spannung gemessen werden. Diese lässt sich nach dem physikalischen Zusammenhang von Staudruck und Strömungsgeschwindigkeit in einen Volumenstrom umrechnen:

$$\dot{V} = \frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot \sqrt{p_{SD} \cdot \frac{2}{\rho_L}} \cdot 3600 \qquad (3\text{-}2)$$

wobei $p_{SD} = \frac{U}{U_{\max}} \cdot p_{\max}$

mit	$\dot{V}$	[m³/h] :	Volumenstrom
	D	[m] :	Durchmesser des Kanals
	ρ_L	[kg/m³] :	Dichte Luft
	U	[V] :	Gemessene Spannung
	U_{max}	[V] :	Max. Ausgangsspannung (10 V)
	p_{max}	[Pa] :	Messbereichsendwert (23 Pa / 258 Pa)
	p_{SD}	[Pa] :	Staudruck

Die Regelung und Steuerung der Pumpen erfolgt durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS, Abschnitt 3.6). Durch die SPS wird die beschriebene Berechnung des aktuellen Volumenstroms vorgenommen und die Abweichung zur Soll-Vorgabe ermittelt. Das Regelmodul der SPS-Software bestimmt daraus die Frequenzvorgaben für die Umrichter der Pumpen. Die Ansteuerung der Frequenzumrichter erfolgt mit einer zur Frequenz proportionalen Gleichspannung am entsprechenden Analogausgang der SPS. Die maximale Frequenz, mit der die Pumpen betrieben werden dürfen, beträgt 100 Hz. Die eigentliche Regelung des Volumenstroms erfolgt dabei ausschließlich über die kleinere der beiden Pumpen. Bei Erreichen der oberen oder unteren Frequenzgrenze wird die größere Pumpe um einen festen Wert nachgestellt. Diese Strategie ermöglicht eine einfache und stabile Regelung des Volumenstroms über den gesamten Bereich beider Pumpen von 0 m³/h bis 37 m³/h. Die Anlage zur kontrollierten Raumlüftung kann so mit konstanten wie auch mit dynamischen Volumenstromprofilen betrieben werden.

3.5 Simulation von Außenlufttemperatur und solarer Einstrahlung

Die Prüfstandskomponenten zur Simulation der klimatischen Einflussfaktoren Außenlufttemperatur und solare Einstrahlung sollen die dynamische Nachbildung typischer Tages- bzw.

Mehrtagesverläufe ermöglichen, um so für den Modellraum und seine Fassade realitätsnahe Bedingungen herzustellen. Die für diese Aufgabe entwickelten Anlagen stellen einen Schwerpunkt innerhalb des Prüfstands dar. Aus diesem Grund erfolgt die detaillierte Darstellung der Grundlagen, Konzeption und Realisierung dieser Komponenten in eigenen Abschnitten. Die Simulationsanlagen für die Außenlufttemperatur werden in Abschnitt 4 beschrieben, die Simulation der solaren Einstrahlung in Abschnitt 5.

3.6 Prüfstandssteuerung und -regelung

Der Betrieb des gesamten Prüfstands erfordert mehrere Komponenten zur Steuerung sowie Regelung und zur Aufnahme der Messwerte. **Abbildung 3-6** zeigt dazu in einer schematischen Darstellung die Prüfstandskomponenten und die Prüflinge sowie die jeweiligen Einheiten der Regel-, Steuer- und Messtechnik. Die Kommunikation dieser Einheiten mit den jeweiligen Computern erfolgt bidirektional über serielle RS232-Schnittstellen. Die PCs wiederum sind an das lokale Netzwerk des Lehrstuhls angeschlossen und können über ein eigenes Protokoll Daten austauschen. Bei der Entwicklung des Protokolls wurde darauf Wert gelegt, dass ein unbefugter Zugriff auf die Prüfstandsrechner aus dem Netzwerk mit hoher Sicherheit ausgeschlossen ist. Die Netzwerkanbindung des Prüfstands ermöglicht weiterhin die Online-Überwachung und -Visualisierung von Versuchsabläufen ohne direkt vor Ort sein zu müssen.

Mit der Messwerterfassungsanlage werden zentral alle Temperaturmessungen im und am Modellraum durchgeführt sowie Temperatursensoren einiger Prüfstandskomponenten erfasst. Eine genauere Beschreibung der messtechnischen Ausstattung des Modellraums erfolgt in Abschnitt 6.2. Die Messwerterfassungsanlage besteht aus zwei Einheiten, die jeweils bis zu 140 Messkanäle mit Taktraten von 1 Sekunde erfassen können. Die Daten werden jedoch nicht in den Geräten gespeichert, sondern von einem PC abgerufen. Dies erfolgt mit einem Zeitintervall von 5 Sekunden. Die Kommunikation erfolgt dabei jeweils über eine serielle RS232-Schnittstelle. Die Messsoftware des PCs führt eine Plausibilitätsprüfung der erhaltenen Daten durch, fügt einen sekundengenauen Zeitstempel hinzu und speichert sie.

Die Temperieranlage zur Außenlufttemperatursimulation ist mit einem einfachen Prozessrechner ausgestattet. Er steuert und überwacht den Prozessablauf der Anlage. Der normale Betrieb der Anlage erfolgt durch Steuerung und Regelung mit einem PC, dessen Software einen manuellen Betrieb sowie den automatisierten Programmablauf ermöglicht. Dabei werden Temperaturvorgaben zum Prozessrechner übermittelt und der Ist-Zustand der Anlage abgefragt und laufend gespeichert. Für die Regelung werden weiterhin Messwerte vom PC der Messwerterfassung abgerufen.

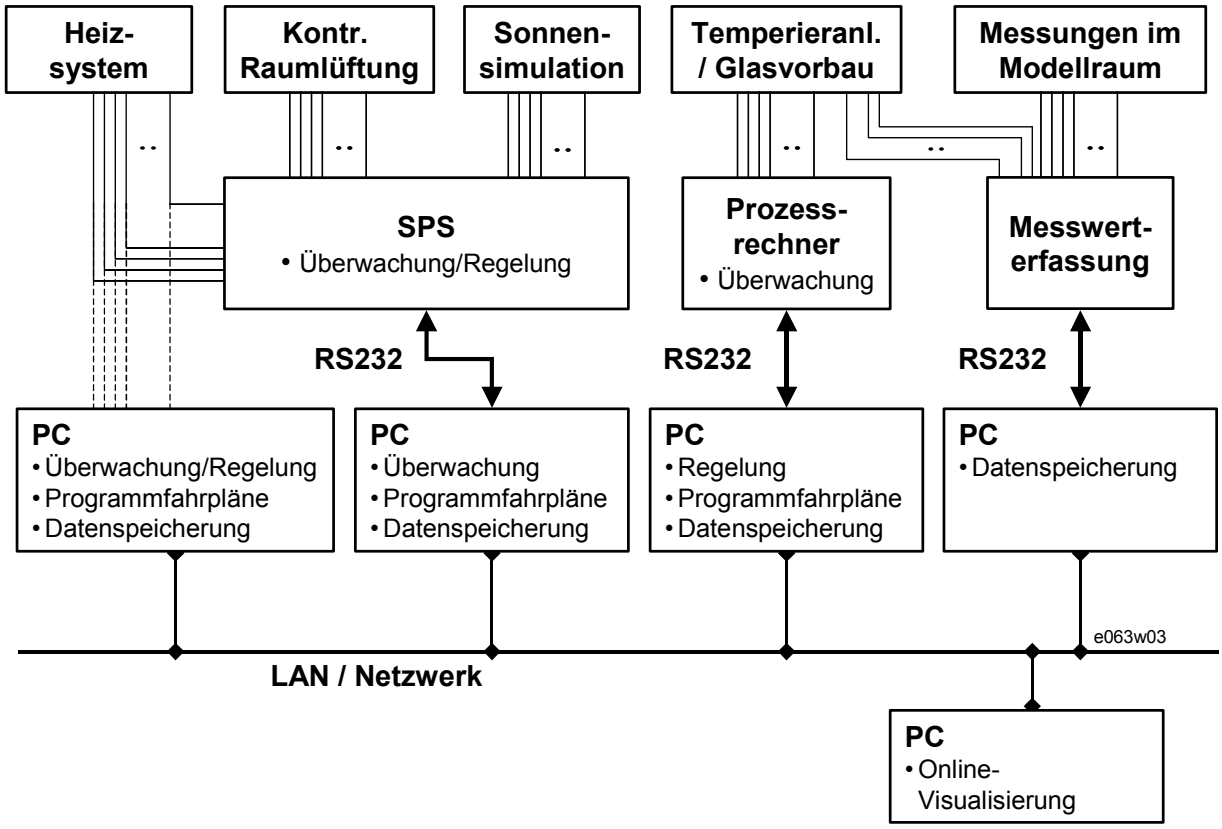

Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der Mess-, Steuer- und Regelkomponenten sowie deren Verbindungen untereinander zur Kommunikation.

Der Sonnensimulator wird von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) kontrolliert und gesteuert. Diese ist dabei mit der Positionierung der Bewegungsmechanik wie auch mit der Schaltung der einzelnen Strahlersysteme der Plattform betraut. Gleichzeitig überwacht die SPS die Anlage und beinhaltet eine Not-Aus-Funktion, die an der Anlage direkt auslösbar ist. Eine weitere Aufgabe der SPS besteht, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben, in der Regelung der kontrollierten Raumlüftung. Mit dem Steuerungsprogramm des vorgelagerten Rechners lassen sich beide Anlagen manuell bedienen; es werden automatisierte Programmläufe durchgeführt und alle Anlagendaten werden kontinuierlich gespeichert.

Neben den dargestellten Prüfstandskomponenten wird auch das im Rahmen dieser Arbeit installierte elektrische Heizsystem (Abschnitt 6.4) über die SPS geregelt. Die Regelgröße der Raumtemperatur wird dazu vom Steuerungsrechner über das Netzwerk von der Messwerterfassung abgerufen und der SPS zusammen mit der Solltemperatur übergeben. Die SPS regelt mit diesen Daten die Leistung der Heizung und überwacht sie gleichzeitig. Alle relevanten Daten werden wiederum an den PC zur Speicherung übergeben. Die Software, die auf den Computern sowie der SPS eingesetzt wird, wurde selbst konzipiert und entwickelt. Eine Erweiterung oder Änderung der Steuer- und Regelkomponenten, beispielsweise die Ergänzung um einen PC zur Regelung eines anderen Heizsystems, ist somit leicht umsetzbar.

Für die Durchführung von Versuchen über längere Zeiträume verfügen die Programme der Steuerungscomputer über Befehlsspeicher. In diese werden vor Versuchsbeginn die Fahrpläne mit den Vorgabewerten der jeweiligen Anlagen hinterlegt. Jeder Befehl beinhaltet dabei neben den Steuerkommandos und den Sollvorgaben jeweils Datum und Uhrzeit, zu dem er ausgeführt werden soll. Da PC-Uhren keine hohe Ganggenauigkeit besitzen, werden die Uhren der an der Steuerung beteiligten Rechner permanent mit einem zentralen Zeitserver abgeglichen. Damit wird gewährleistet, dass die Steuerungscomputer und die gespeicherten Versuchsdaten immer zeitsynchron sind.

Die in Abbildung 3-6 dargestellte Online-Visualisierung ermöglicht die Versuchsüberwachung und -visualisierung an einem eigenen Computer, der sich nicht direkt am Prüfstand befinden muss. Das Programm sammelt dazu kontinuierlich von den Prüfstandsrechnern alle relevanten Daten und stellt diese auf der Programmoberfläche dar. Dabei werden die Daten entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den Prüfstandskomponenten oder den Prüflingen gegliedert, um eine möglichst hohe Übersichtlichkeit zu gewährleisten. Für alle Messdaten kann zusätzlich ein Diagramm aufgerufen werden, das den zeitlichen Verlauf wiedergibt. Mit diesem Programm ist somit während des Prüfstandbetriebs jederzeit eine Übersicht über alle Messwerte und die wichtigsten Zustandsdaten der Prüfstandsanlagen gegeben.

4 Simulation der Außenlufttemperatur

4.1 Tagesgänge von Außenlufttemperatur und solarer Einstrahlung

Für den Betrieb der Simulationseinrichtungen zur Nachbildung der klimatischen Einflussfaktoren Außenlufttemperatur und solare Einstrahlung werden Daten über die Temperatur sowie die Bestrahlungsstärke auf der Erdoberfläche durch direkte und diffuse Sonnenstrahlung benötigt. Diese können zum einen aus eigenen Messungen gewonnen werden, der praktische Weg führt jedoch in der Regel über Klimadatenarchive, zum Beispiel sogenannte Testreferenzjahre (TRY) für verschiedene Klimaregionen Deutschlands /BIN/. Ein TRY beschreibt anhand der wichtigsten Parameter den charakteristischen Wetterverlauf einer Klimaregion mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde. Für das fiktive Gebäude mit dem ausschnittsweisen Modellraum wird die entsprechende Klimaregion 8 (Süddeutschland) der Testreferenzjahre (TRY8), Donaubecken und Alpenvorland, als Datenbasis verwendet.

Geeignete Tagesgänge zum Betrieb der Simulationseinrichtungen können durch Analyse der vorliegenden Daten des TRY ermittelt werden, indem typische Tage für die Heizperiode (Winter und Übergangszeit) bestimmt werden. Deren Tagesgänge sollen jeweils einen durchschnittlichen Tag einer Periode hinsichtlich Temperaturverlauf und Einstrahlungswerten repräsentieren. Dabei ist zusätzlich nach sonnigen und trüben Tagen zu unterscheiden, weil für den Wärmebedarf eines Gebäudes und dessen thermisches Verhalten die direkte Sonneneinstrahlung von erheblicher Bedeutung ist.

Als Kriterium für einen Wintertag wird eine Tagesmitteltemperatur $\vartheta_{A,tm}$ von unter 5 °C herangezogen, ein Tag der Übergangszeit ist charakterisiert durch eine Tagesmitteltemperatur zwischen 5 °C und 15 °C /MÜH/. Alle anderen Tage sind der Sommerperiode zuzurechnen. Die so ermittelten Tage sind weiter in sonnige und trübe Tage zu unterscheiden. Hierzu bietet /4710/ mit dem Tagesmittel des Bedeckungsgrades des Himmels (N) Anhaltswerte für ein Unterscheidungskriterium. Bei einem Wert für N von über 0,8 gilt ein Tag als bedeckt, unterhalb dieses Wertes liegen bewölkte oder heitere Tage vor. Bei der Anwendung dieser Kriterien auf das TRY 8 fällt jedoch auf, dass einige als bewölkt eingestufte Tage keine direkte Sonneneinstrahlung aufweisen, während im Gegensatz dazu bedeckte Tage mit mehreren Sonnenstunden zu finden sind. Der Grund hierfür ist die Verwendung des Tagesmittelwerts der Bedeckung, der Unterschiede in der Bedeckung zwischen den Hell- und Dunkelstunden eines Tages nicht berücksichtigt. So können Tage, die eine klare Nacht haben, tagsüber aber bedeckt sind, als bedeckt gewertet werden. Um dieses Problem zu vermeiden, wird zur Klassifizierung der Tagesgänge in dieser Arbeit die mittlere Bedeckung während der Hellstunden (N_H) als Unterscheidungskriterium eingeführt. Die Hellstunden eines Tages werden dabei

durch Summation der Stunden mit diffuser Einstrahlung ermittelt. Die damit klassifizierbaren Tagtypen werden als sonnig ($N_H \leq 0{,}8$) und trüb ($N_H > 0{,}8$) bezeichnet.

Aus den einzelnen Gruppen von Tagesgängen kann jeweils ein repräsentativer Tag über die folgenden Bedingungen ermittelt werden:

- Minimale Abweichung der Tagesmitteltemperatur vom Durchschnitt der Gruppe,
- Minimale Abweichung der Tagessumme der Globalstrahlung vom Durchschnitt der Gruppe,
- Kleine Temperaturdifferenz zwischen Tagesende und –beginn und typischer Tagesverlauf der Temperatur.

Die ersten beiden Kriterien charakterisieren einen Tag als durchschnittlich innerhalb seiner Klasse. Die dritte Bedingung stellt sicher, dass ein Tag einen normalen typischen Tagesgang hat und keine kontinuierlich steigende oder sinkende Temperatur. Nur Tagesgänge mit kleiner Temperaturdifferenz zwischen Tagesende und -beginn sind für einen kontinuierlichen Betrieb des Prüfstands mit einem wiederholt ablaufenden eintägigen Tagesgang geeignet.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Prüfstandsversuche wurde mit der beschriebenen Methodik die Winterperiode analysiert. Einen Überblick der Charakteristik der sonnigen und trüben Wintertage im TRY8 gibt **Tabelle 4-1**.

Tabelle 4-1: Charakteristik der sonnigen und trüben Wintertage des Testreferenzjahres 8 und der ausgewählten repräsentativen Tage.

Wintertage Tagesmitteltemperatur < 5 °C	**Einheit**	**sonnig**	**trüb**
Anzahl der Tage		55	85
Durchschnittstemperatur	°C	-0,71	0,64
Durchschnittliche Globalstrahlung	kWh/(m²·d)	2,12	0,82
Durchschnittliche Direktstrahlung	kWh/(m²·d)	1,16	0,02
Repräsentativer Tag:			
Durchschnittstemperatur	°C	-0,53	0,78
Globalstrahlung	kWh/(m²·d)	2,03	0,65
Direktstrahlung	kWh/(m²·d)	0,97	0,01

In **Abbildung 4-1** ist der Tagesgang der Außentemperatur des repräsentativen sonnigen Wintertags dargestellt. Er weist den für sonnige Tage typischen sinusähnlichen Gang mit einer Temperaturspreizung von über 10 °C auf. Im Gegensatz dazu ist der Tagesgang des trüben

Wintertags (**Abbildung 4-2**) deutlich flacher. An diesem Tag ist die zeitliche Zuordnung des Temperaturanstiegs zum Beginn der Sonneneinstrahlung nicht so eindeutig gegeben wie am sonnigen Wintertag, was auf die Verwendung des Testreferenzjahres zurückzuführen ist. Der sonnige Tag besitzt mit 5 Sonnenstunden (Stunden mit direkter Einstrahlung) 2 Stunden weniger als der Durchschnitt seiner Klasse. Wintertage mit wechselnder Sonneneinstrahlung sind als typisch anzusehen und gerade in Bezug auf Untersuchungen zur Dynamik von Heizungssystemen besonders interessant.

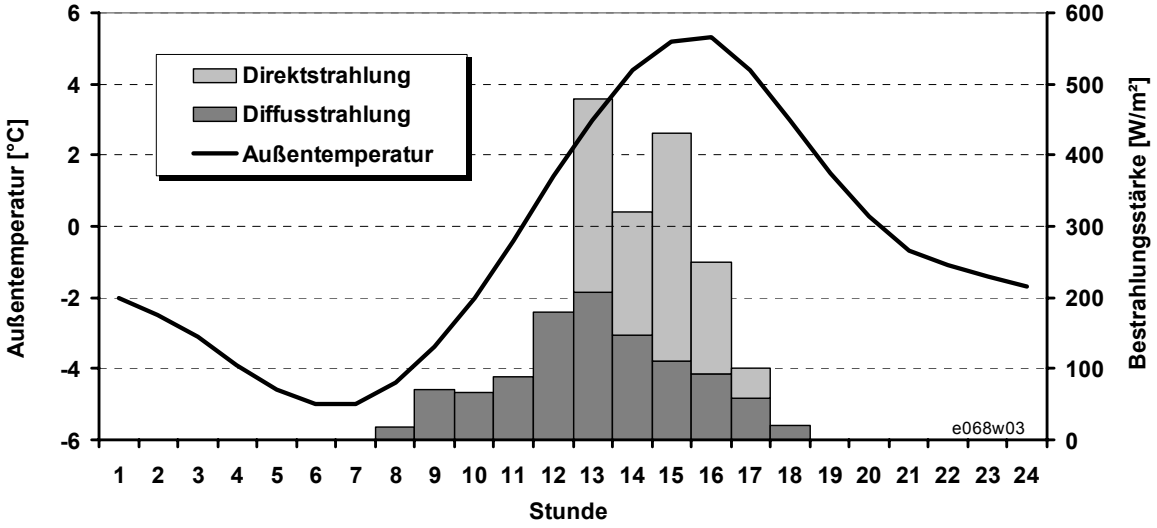

Abbildung 4-1: Tagesgänge von Außentemperatur sowie direkter und diffuser Einstrahlung des sonnigen Wintertages.

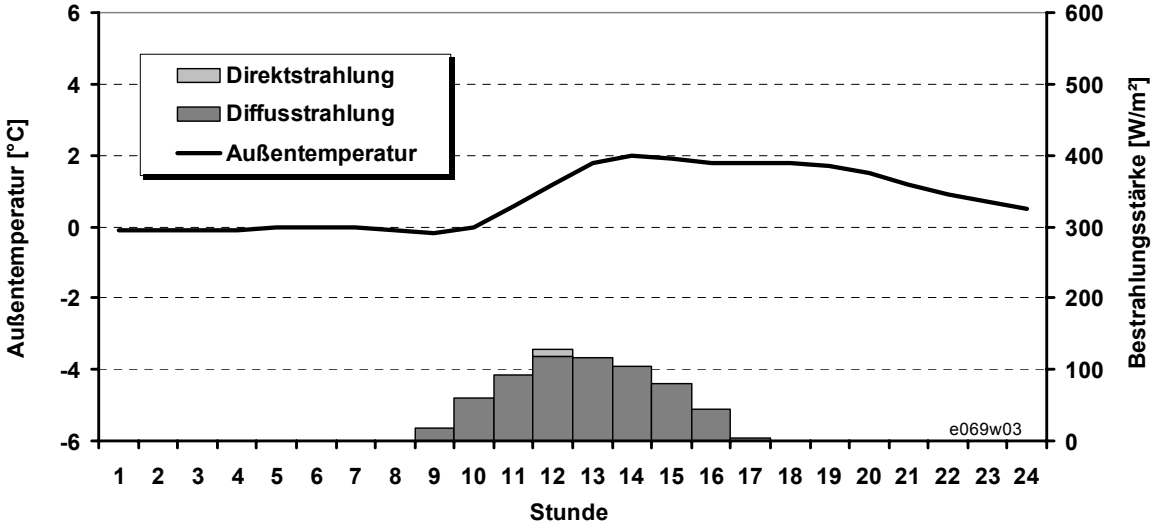

Abbildung 4-2: Tagesgänge von Außentemperatur sowie direkter und diffuser Einstrahlung des trüben Wintertages.

4.2 Prüfstandseinrichtungen

Durch die Anlage zur Außenlufttemperierung (**Abbildung 4-3**) wird die Fassade des Modellraums realitätsnahen Temperaturverläufen ausgesetzt. Das dazu erforderliche, gegenüber der Laborhalle abgeschlossene Luftvolumen wird durch einen verglasten Vorbau vor der Außenfassade hergestellt. Die Temperierung der Luft erfolgt durch die Prüfstandsanlage im Umluftverfahren über einen geschlossenen Luftkreis. Temperaturen im Bereich von –5 °C bis zu +30 °C sind hier möglich. Ein zweiter Luftkreis führt durch den Zwischenraum zwischen den Glasscheiben des doppelschalig ausgeführten Glasvorbaus. Dadurch wird eine weitere Unterkühlung der inneren, der Fassade zugewandten Scheiben um bis zu 5 K unter die aktuelle Außenlufttemperatur erreicht. Ziel dieser Unterkühlung ist die Nachbildung der kalten Atmosphäre. Ohne die doppelschalige Ausbildung des Glasvorbaus würden sich die Glasscheiben aufgrund der Umgebungstemperatur der Laborhalle und der Einstrahlung des Sonnensimulators unzulässig erwärmen.

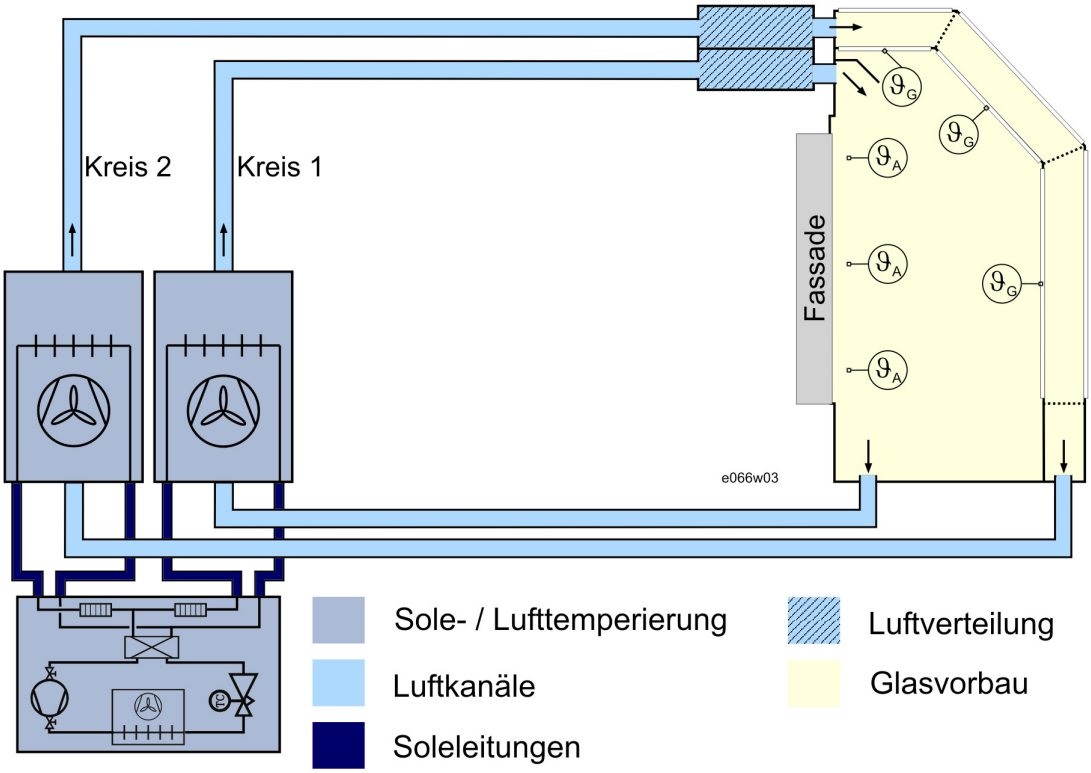

Abbildung 4-3: Funktionsschema der Außenluftsimulationsanlagen.

4.2.1 Verglaster Vorbau

Bei der Konstruktion des verglasten Vorbaus mussten mehrere Bedingungen umgesetzt werden, die dessen Handhabung am Prüfstand gewährleisten und auch die Konstruktion sowie Auslegung des Sonnensimulators berücksichtigen. Um Bauarbeiten am Modellraum, speziell

an dessen Fassade, nicht zu behindern, ist der Vorbau als komplett selbsttragende Konstruktion realisiert, die als eine Einheit bewegt werden kann. Er besitzt minimale opake Flächen, um eine unnötige Verschattung des außerhalb befindlichen Sonnensimulators zu vermeiden. Durch die Nachbildung der natürlichen Sonnenbewegung durch den Sonnensimulator ist die geometrische Form des Vorbaus zur Reduzierung von Reflexionen an den transparenten Flächen einer Viertelkugel angenähert.

Die tatsächliche Geometrie des Vorbaus ist ein Kompromiss zwischen der Idealform, der konstruktiv realisierbaren Form sowie dem vorhandenen, nutzbaren Raum in der Laborhalle. Im Grundriss ist die ideale Kugelform durch einen Ausschnitt von fünf Segmenten eines regelmäßigen Zwölfecks angenähert, dessen Mittelpunkt zur Verringerung der Bautiefe ca. 80 cm hinter der Modellraumfassade liegt. Im Seitenriss erfolgt die Annäherung durch drei Segmente, wobei das senkrechte Segment wiederum zur Begrenzung der Bautiefe deutlich größer ist. Aus den Anforderungen, die Fassade vollkommen einzuhausen und einen möglichst großen Abstand zwischen Sonnensimulator und Vorbauaußenfläche zu erreichen, wurde die in **Abbildung 4-4** dargestellte Form des Vorbaus gewählt. Seine maximalen Außenabmessungen sind ca. 6 m Breite und 2,2 m Tiefe bei einer Höhe von bis zu 4,4 m.

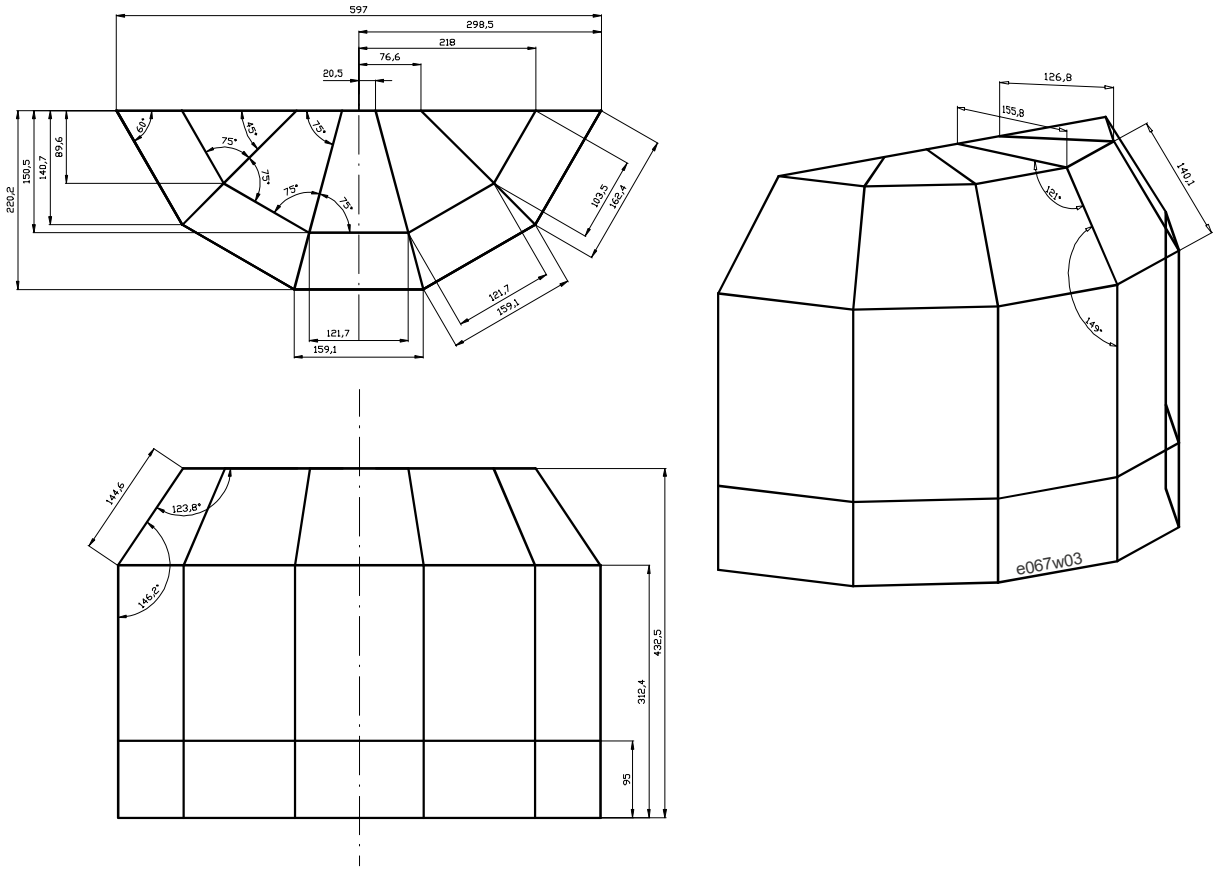

Abbildung 4-4: Konstruktionszeichnung der Außenschale des Glasvorbaus.

Die innere Schale hat einen Abstand von 10 cm zur Außenschale. Beide Schalen bilden zusammen mit dem Rahmen eine Einheit. Der transparente Teil endet in Höhe der Unterkante der Modellraumfassade, darunter schließt sich ein opak verkleideter Rahmen an, der die Höhe des Unterbaus überbrückt und gleichzeitig als Sammelkanal für die Luft aus dem Raum zwischen beiden Schalen dient. Um die benötigte filigrane Rahmenkonstruktion realisieren zu können, wurde eine, speziell im PKW- und Omnibusbau als Stand der Technik eingesetzte Methode gewählt. Dabei werden die Glasscheiben für die transparenten Flächen mit den Stahlprofilen des Tragrahmens verklebt, wodurch ein steifes, selbsttragendes Bauteil entsteht. Der Vorteil dieser Technik besteht darin, dass sowohl der Rahmen als auch die Glasscheiben zur Stabilität der Konstruktion beitragen. Das ermöglichte die Verwendung leichterer und schmalerer Rahmenprofile.

Der Rahmen des Glasvorbaus ist aus doppelten U-Stahlprofilen (3 mm Materialstärke) mit einer Breite von 10 cm gefertigt. Ein Schenkel mit 2 cm Höhe ist als Klebefläche für eine kraftschlüssige Verbindung ausreichend. Auf die beiden Schenkel eines Profils sind jeweils eine Scheibe der Innen- und Außenschale aufgeklebt. **Abbildung 4-5** zeigt einen Schnitt durch den Rahmen mit aufgeklebten Glasscheiben. Die Breite der nichttransparenten Rahmenteile beträgt lediglich etwa 6 cm, wodurch nur eine minimale Verschattung verursacht wird.

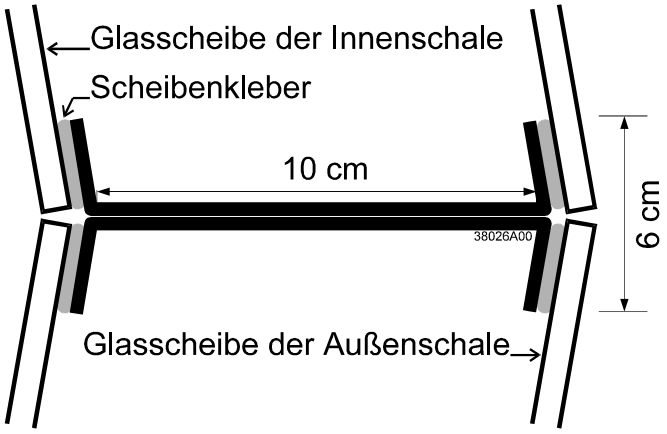

Abbildung 4-5: Detailskizze zur Bauweise des Glasvorbaus, Stegverbindung.

Der verwendete Spezialklebstoff ist ein Polyurethan-Polymer, das nach vollständiger Aushärtung ausreichend Flexibilität aufweist, um Materialdehnung auszugleichen, die aufgrund der thermischen Belastung des Vorbaus durch den Sonnensimulator zu erwarten sind. Die verwendeten Glasscheiben bestehen aus Sicherheitsglas, das zur Minimierung der Verletzungsgefahr im Falle einer Beschädigung des Glasvorbaus gewählt wurde. Für eine ausreichende Stabilität bei den gegebenen Abmessungen ist eine Scheibenstärke von 6 mm erforderlich.

Die horizontalen Stege des Rahmens sind für die gewünschte Luftführung mit Bohrungen versehen. Somit bilden jeweils drei übereinander liegende Segmente einen Luftkanal, der von oben nach unten durchströmt wird (in **Abbildung 4-6** für zwei Kanäle mit blauen Pfeilen dargestellt). Zugeführt wird die Luft über zwei Öffnungen mit jeweils 9,5 cm Durchmesser im oberen Rahmen. Die unterste Segmentreihe ist mit feuchteresistentem Holz luftdicht verkleidet und fungiert als Luftsammelkanal für den Scheibenzwischenraum (in Abbildung 4-6 blautransparent dargestellt). Hier sind die vertikalen Rahmenstege mit Bohrungen versehen. Die zentrale Absaugung und Rückführung der Luft zum Wärmetauschermodul der Temperieranlage erfolgt seitlich. Um eine gleichmäßige Durchströmung aller Kanäle zu ermöglichen, besteht zwischen den außenliegenden Segmenten des Luftsammelkanals eine zusätzliche Querverbindung durch einen Luftschlauch.

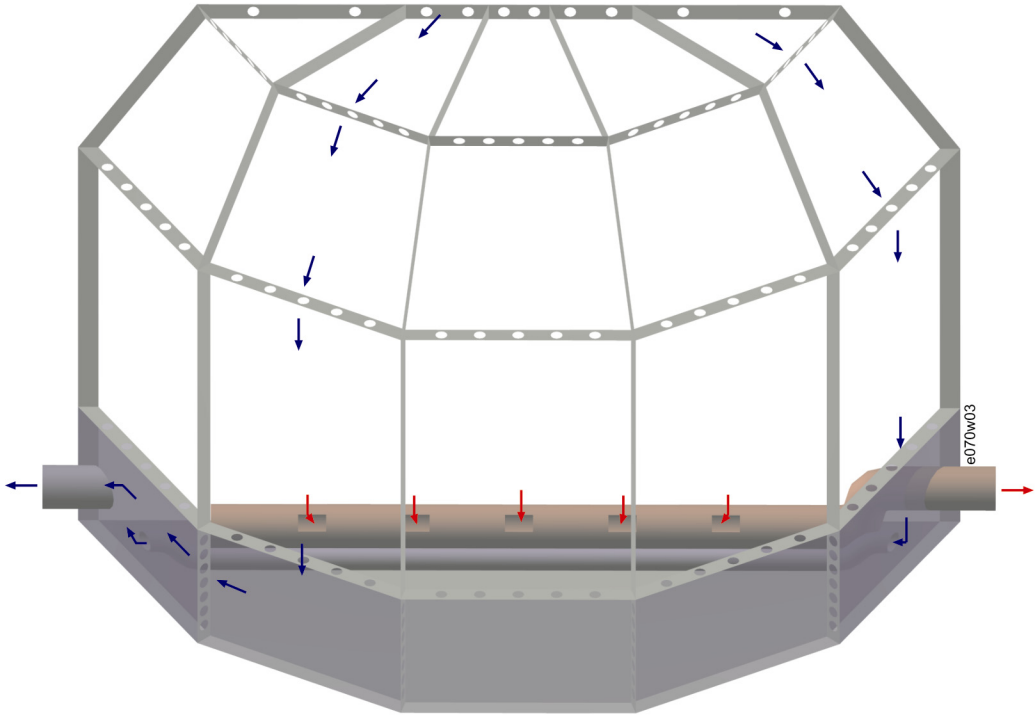

Abbildung 4-6: Luftführung im Scheibenzwischenraum (blau) und Absaugung aus dem Innenraum (rot) des Vorbaus; Darstellung ohne Glasscheiben.

Der Innenraum des Glasvorbaus hat einen begehbaren, luftdichten und feuchteresistenten Holzboden. Um ein abgeschlossenes Luftvolumen vor der Modellraumfassade zu erhalten, sind freie Flächen zwischen Glasvorbau und Fassade mit 1 mm starker PVC-Folie abgedichtet. Der gesamte Vorbau ist auf Rollen montiert, wodurch er nach Auftrennen der Luftanschlüsse für Montagearbeiten, Mess- und Justieraufgaben sowie Wartungsarbeiten leicht verschoben werden kann.

4.2.2 Luftverteilung

Die Luftzuführung in das Innere des Glasvorbaus erfolgt oberhalb der Modellraumfassade durch den Anschlusskasten der Lüftungsbrücke. In diesem sind sieben Einblasöffnungen mit jeweils 15 cm Durchmesser angebracht. Die Absaugung der Luft aus dem Innenraum erfolgt durch einen Luftkanal unterhalb der Fassade, der mit Öffnungen versehen ist, welche über die Breite des Vorbaus verteilt sind (in Abbildung 4-6 rot dargestellt).

Die Lüftungsbrücke (**Abbildung 4-7**) besteht aus dem Anschlusskasten, dessen Vorderfront mit der Fassade fluchtet, und dem dahinter stehenden Verteilerkasten. Beide Kästen sind starr miteinander verbunden und können als Einheit abgehoben werden. Sie stehen auf den horizontalen Stahlträgern, die auch die Deckenplatten tragen, und spannen frei über die gesamte Breite der Tragkonstruktion. Die Deckenplatten können dadurch immer noch weitgehend frei positioniert werden. Der mittlere, erhöhte Bereich der Lüftungsbrücke trägt den Drehpunkt des Sonnensimulators.

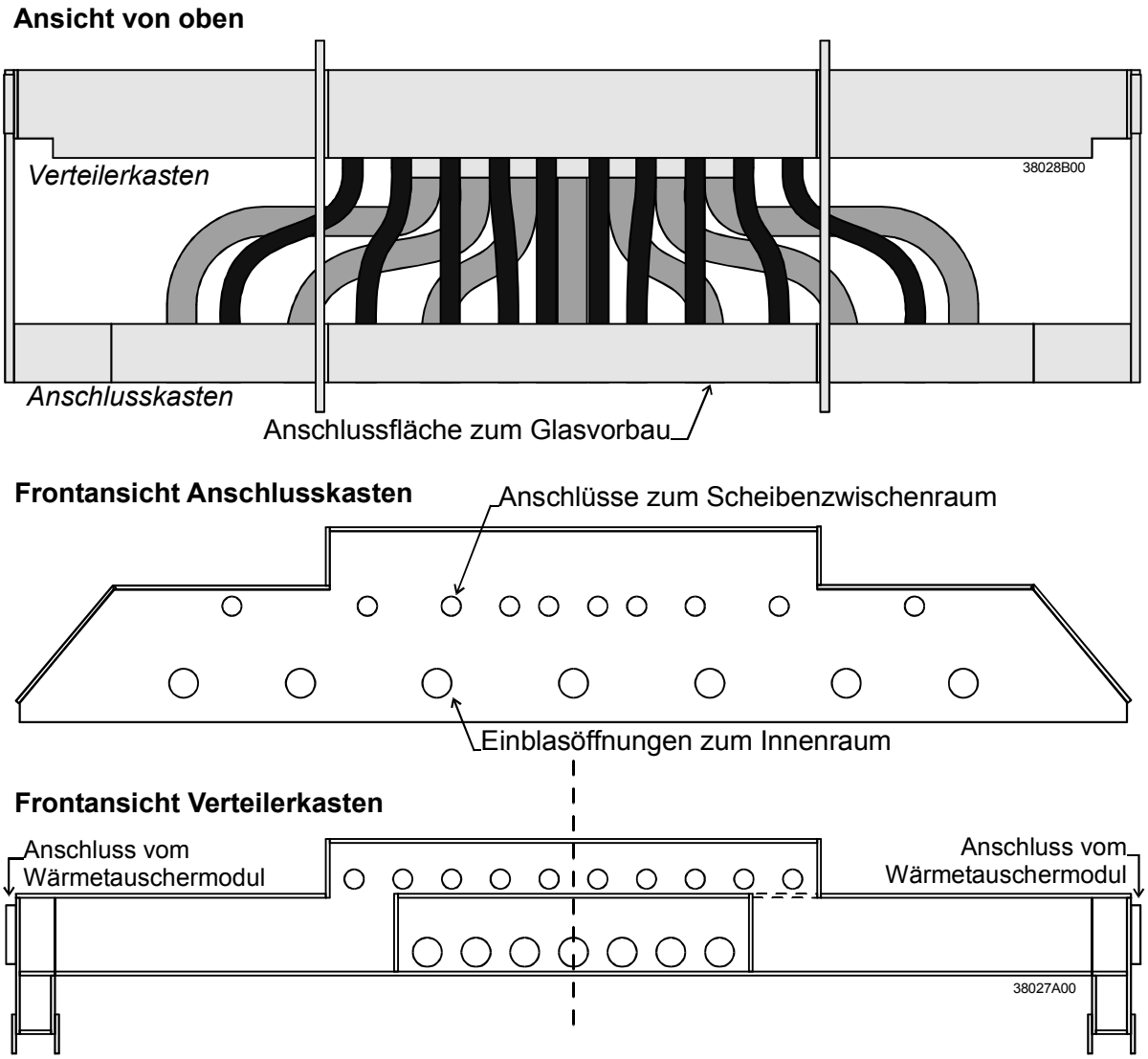

Abbildung 4-7: Ansichten der Kästen der Lüftungsbrücke.

Die Aufgabe des Verteilerkastens ist es, die ihm zugeführten Luftströme für den Scheibenzwischenraum und den Innenraum auf mehrere kleinere Querschnitte aufzuteilen. Die Zuführung erfolgt seitlich von den unterhalb stehenden Ventilator-Wärmetauschermodulen. Sowohl die zehn Auslassöffnungen, die den Luftkreis des Scheibenzwischenraums versorgen, als auch die sieben Auslassöffnungen für den Innenraum können über Schieber im Querschnitt verändert werden. Dadurch ist es möglich, die fünf Kanäle des Zwischenraums gleichmäßig zu durchströmen und eine homogene Luftverteilung an der Fassade des Modellraums sicherzustellen.

Der Anschlusskasten enthält die Einblasöffnungen für den Innenraum des Glasvorbaus. Diese sind über isolierte Luftschläuche mit dem Verteilerkasten verbunden. Er dient weiterhin der Führung der Luftschläuche, die den Verteilerkasten mit dem Scheibenzwischenraum verbinden. Zum Anschluss an den Glasvorbau münden diese Luftschläuche in Rohrstücke, die entsprechend abgedichtet in die im oberen Rahmenteil befindlichen Öffnungen des Glasvorbaus eingesteckt werden.

4.2.3 Temperieranlage

Die Anlage zur Temperierung der Luft besteht aus der zentralen Sole-Temperiereinheit sowie zwei Ventilator-Wärmetauscher-Einheiten (Abbildung 11-1), die zu beiden Seiten neben dem Modellraum stehen und jeweils einen Luftkreis versorgen. Die Ventilator-Wärmetauscher-Module sind funktionell identisch aufgebaut. Die Luftaustrittsöffnungen befinden sich auf der Oberseite der Module, über die sie durch isolierte Aluminium-Luftschläuche (Durchmesser 30 cm) direkt an den Verteilerkasten angeschlossen sind. Die Ventilatoren können über einen Frequenzumrichter in ihrer Drehzahl geregelt werden, um den Volumenstrom anzupassen. Sie sind entsprechend Abbildung 4-3 im Luftkreis vor dem Wärmetauscher angeordnet, wodurch ihre Wärmeentwicklung kompensiert wird. Als Wärmetauscher kommen Sole-Luft-Plattenwärmetauscher zum Einsatz. Beide Module sind über Sole-Druckschläuche an der zentralen Temperiereinheit angeschlossen. Diese besitzt einen internen Solekreislauf mit einem Pufferspeicher, um ein zu häufiges Takten des Kälteaggregats zu vermeiden. Die beiden Solekreisläufe können unabhängig voneinander vom internen Speicher durch Zumischung temperiert werden. Positive Temperaturgradienten bzw. Lufttemperaturen oberhalb der Umgebungstemperatur werden von der Anlage durch Aufheizen des jeweiligen Solekreises realisiert. Dazu befindet sich in jedem Solekreis ein Rohrheizkörper mit einer Heizleistung von jeweils 3 kW. Der Kompressor der Kälteanlage wird mit einem Frequenzumrichter drehzahlgeregelt betrieben. Im Montagerahmen der Temperieranlage sind zudem der luftgekühlte Kondensator sowie die elektrischen und regelungstechnischen Einrichtungen untergebracht. Die maximale Kälteleistung der Anlage beträgt 13 kW, die sich je nach Betriebszustand auf die beiden Kreise aufteilt. Ein integrierter Prozessrechner steuert die gesamte Anlage einschließlich der Ventilatormodule und steuert die Einhaltung der ihm vorgegebenen Temperatursollwerte. Die Überwachung der Anlage sowie die Regelung und Sollwertvorgabe beider

Luftkreise für den Prozessrechner erfolgt über eine serielle Schnittstelle durch einen externen Computer.

Die Steuerungssoftware besitzt jeweils einen Regelkreis für die beiden Luft- bzw. Solekreise der Anlage, die somit unabhängig voneinander geregelt werden können. Die Führungsgrößen dieser Regelung sind die Temperaturvorgaben des letzten Befehls beziehungsweise des aktuell auszuführenden Befehls, der dem Regelmodul aus dem Befehlsspeicher des Programms übergeben wird (Abschnitt 3.6). Die Regelgröße für den Luftkreis 1 ist die mittlere Lufttemperatur vor der Modellraumfassade. Der Mittelwert wird dabei aus den Messwerten von fünf über die Fassadenfläche verteilten Messstellen (ϑ_A in Abbildung 4-3) gebildet. Die Regelgröße für den Luftkreis 2, zwischen den Glasscheiben des Vorbaus, ist die mittlere Temperatur der inneren (der Fassade zugewandten) Glasscheibenoberflächen. Jede Scheibe ist dafür in der Mitte ihrer Fläche mit einer Messstelle versehen (ϑ_G in Abbildung 4-3), zur Berechnung des Mittelwertes werden die gemessenen Werte jeweils mit der entsprechenden Scheibenfläche gewichtet. Der Regelalgorithmus bestimmt aus diesen Eingangsgrößen als Stellgröße die Temperaturvorgaben, die dem Prozessrechner der Temperieranlage übergeben werden. Um trotz eventueller Störungen in der Datenübermittlung einen weiteren Betrieb der Anlage zu gewährleisten, ist jeweils eine redundante Messstelle in beiden Luftkreisen installiert, auf die der Prozessrechner direkt zugreifen kann. Ein geregelter Fahrplanbetrieb ist so zwar nicht möglich, bei schneller Behebung der Störung können Versuchsreihen jedoch weitergeführt werden. Aus Gründen der Betriebssicherheit werden Störungen der Anlage, die zur Abschaltung führen, neben der Übermittlung an die Prüfstandssoftware auch direkt über Signalleitungen an die Steuerung des Sonnensimulators geleitet. Damit wird sichergestellt, dass dieser ebenfalls abgeschaltet wird, um eine Beschädigung des Vorbaus aufgrund fehlender Kühlung zu vermeiden.

Um bei längerem, durchgehendem Betrieb der Temperieranlage mit Sole-Temperaturen unter dem Gefrierpunkt einen Leistungsverlust durch zunehmende Vereisung der Wärmetauscher zu vermeiden, ist in die Anlagensteuerung ein spezieller Abtauzyklus integriert. Während dieses Zyklus werden die Ventilatoren abgestellt und die Wärmetauscher enteist, indem die Solekreise mittels der integrierten Heizeinrichtung auf über 5 °C erwärmt werden. Das ablaufende Wasser wird über einen Kondensatablauf abgeführt. Der interne Speicherkreis wird dabei weiterhin gekühlt, um nach Beendigung des Abtauzyklus die eingestellten Temperaturvorgaben möglichst schnell wieder zu erreichen. Die Anlage ermöglicht in dieser Konfiguration den kontinuierlichen Betrieb mit dynamischen Temperaturverläufen für die Außenluftsimulation im Bereich von –5 °C bis zu +30 °C. Der maximale Temperaturgradient liegt bei etwa 0,2 K/min. Die Temperatur des Scheibenzwischenraums kann durch Vorgabe einer Temperaturdifferenz um bis zu 5 K niedriger eingestellt werden.

5 Sonnensimulation

Die solare Einstrahlung auf die Erdoberfläche ist von verschiedenen Einflussparametern abhängig, angefangen von astronomischen Parametern wie der Ekliptik, der Stellung der Erdachse, der Bahngeschwindigkeit bis hin zu örtlichen, wetterabhängigen Einflüssen wie zum Beispiel der aktuellen Bedeckung des Himmels. Dabei sind die astronomischen Einflüsse hinreichend genau bekannt und rechnerisch bestimmbar. Über Eingangsparameter, die den Tag im Jahr und die Stunde des Tages bestimmen sowie geographische Daten über den nachzubildenden Standort lassen sich die genauen Positionierungswerte eines Sonnensimulators bestimmen.

Die globale Einstrahlung ist weiterhin zu unterscheiden in direkte Strahlung von der Sonne und die diffuse Himmelsstrahlung. Beide Strahlungsarten unterscheiden sich im wesentlichen in zwei physikalischen Merkmalen. Die direkte Sonnenstrahlung ist gerichtet, d.h. sie kommt immer genau aus Richtung der Sonne und kann als Parallelstrahlung betrachtet werden. Weiterhin umfasst ihr Spektrum neben den hohen Leistungsanteilen im sichtbaren Wellenlängenbereich auch wesentliche Anteile im Infrarot- (langwellig) und UV-Bereich (kurzwellig). Die ungerichtete Himmelsstrahlung hingegen hat ihren Ursprung in der gesamten einsehbaren Halbkugel des Himmels und beinhaltet damit alle möglichen Einstrahlungsrichtungen zu gleichen Teilen. Ihr Spektrum konzentriert sich im wesentlichen auf den kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums. Daten über die Höhe der direkten und diffusen Einstrahlung sind nicht berechenbar, sondern müssen über Klimadatenarchive oder Messungen erhoben werden. Eine übliche Quelle für wissenschaftliche Belange, bei denen klimatische Daten benötigt werden sind die Testreferenzjahre /BIN/.

5.1 Grundlagen zur Simulation direkter Sonnenstrahlung

Die dynamische Nachbildung der direkten Sonneneinstrahlung mittels einer Simulationseinrichtung erfordert die Zusammenführung energietechnischer, physikalischer, meteorologischer sowie astronomischer Informationen. Die Berechnungsgrundlagen des Sonnenstands, die zur Positionierung des Simulators notwendig sind, basieren auf astronomischen Zusammenhängen. Aufgrund eines Sonnenstands und der zu diesem Zeitpunkt erforderlichen Bestrahlungsstärke kann die jeweilige Bestrahlungsleistung der Simulationseinrichtung ermittelt werden. Diese muss unter Berücksichtigung der spektralen Bestrahlungsstärkeverteilung von der Strahlerplattform abgegeben werden. Unter Strahlerplattform versteht sich eine Bestrahlungsebene von 1,5 m², die ein sonnenähnliches Spektrum variabel von Ort und Zeit erzeugen kann (Abschnitt 5.3.2).

5.1.1 Sonnenstandsberechnung

Für den Betrieb des Sonnensimulators müssen die Positionierungsdaten für die Strahlerplattform dynamisch berechnet werden. Die Grundlagen der Berechnung bilden dabei astronomische Algorithmen, die eine genaue Sonnenstandsberechnung für jeden Ort der Welt und beliebige Zeitpunkte ermöglichen. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Berechnungen basieren größtenteils auf den Quellen /MEU/ sowie /DUF/. Zum Verständnis werden im Folgenden die wichtigsten Größen definiert, relevante Größen sind in **Abbildung 5-1** dargestellt:

- θ [°] : Einstrahlungswinkel der direkten Sonnenstrahlung, gemessen zwischen dem einfallenden Strahl der Sonne und der Normalen der bestrahlten Fläche.
- α_S [°] : Azimut der Sonne; Winkelabweichung der auf die Horizontale projizierten Einstrahlrichtung der Sonne von Süden (Zählung Richtung Westen positiv).
- α [°] : Azimut der bestrahlten Fläche; Winkelabweichung der auf die Horizontale projizierten Flächennormalen zur Südrichtung (Zählung Richtung Westen positiv).
- γ_S [°] : Elevation der Sonne; Winkel zwischen Einstrahlrichtung und der Horizontalen.
- β [°]: Neigung der bestrahlten Fläche gegenüber der Horizontalen.
- δ [°] : Deklination; Winkel zwischen Sonne bei Höchststand und der Äquatorebene.
- φ [°] : Geographischer Breitengrad (Nord positiv).
- λ_L [°] : Geographischer Längengrad (West positiv)
- t_S [h] : Sonnenzeit; Zeit basierend auf der scheinbaren Umdrehung der Sonne um die Erde, gemessen zwischen zwei Meridiandurchgängen der Sonne.
- t_L [h] : Lokale Zeit.
- ω_S [°] : Stundenwinkel; Winkelabweichung der Sonne östlich (negativ) oder westlich (positiv) vom lokalen Meridian durch die Erdrotation mit 15° pro Stunde (bezogen auf Sonnenzeit).

Der erste Schritt zur Berechnung des Sonnenstands ist die Umrechnung der lokalen Zeit in Sonnenzeit, welche die Grundlage aller Berechnung darstellt. Die Sonnenzeit orientiert sich an der Dauer der scheinbaren Umdrehung der Sonne um die Erde. Als Sonnentag wird die Zeitdauer zwischen zwei Meridiandurchgängen der Sonne bezeichnet. Vereinbarungsgemäß gilt, dass der Meridiandurchgang um 12 Uhr Sonnenzeit erfolgt, entsprechend beträgt der Stundenwinkel $\omega_S = 0°$. Die Erde dreht sich in einem Jahr (365 Tage) 366 mal um ihre eigene Achse, woraus sich im Mittel eine tägliche Drehung von ungefähr 361° ergibt . Die Dauer eines Sonnentages ist jedoch während eines Jahres periodischen Schwankungen unterworfen, die hauptsächlich auf die elliptische Bahn der Erde um die Sonne und die Neigung der Erd-

achse zurückzuführen sind. Als Basis für unser Zeitsystem wird daher eine fiktive mittlere Sonnenzeit definiert, die von einer Kreisbahn um die Sonne und einer senkrechten Erdachse ausgeht, so dass der mittlere Sonnentag immer gleich lang ist.

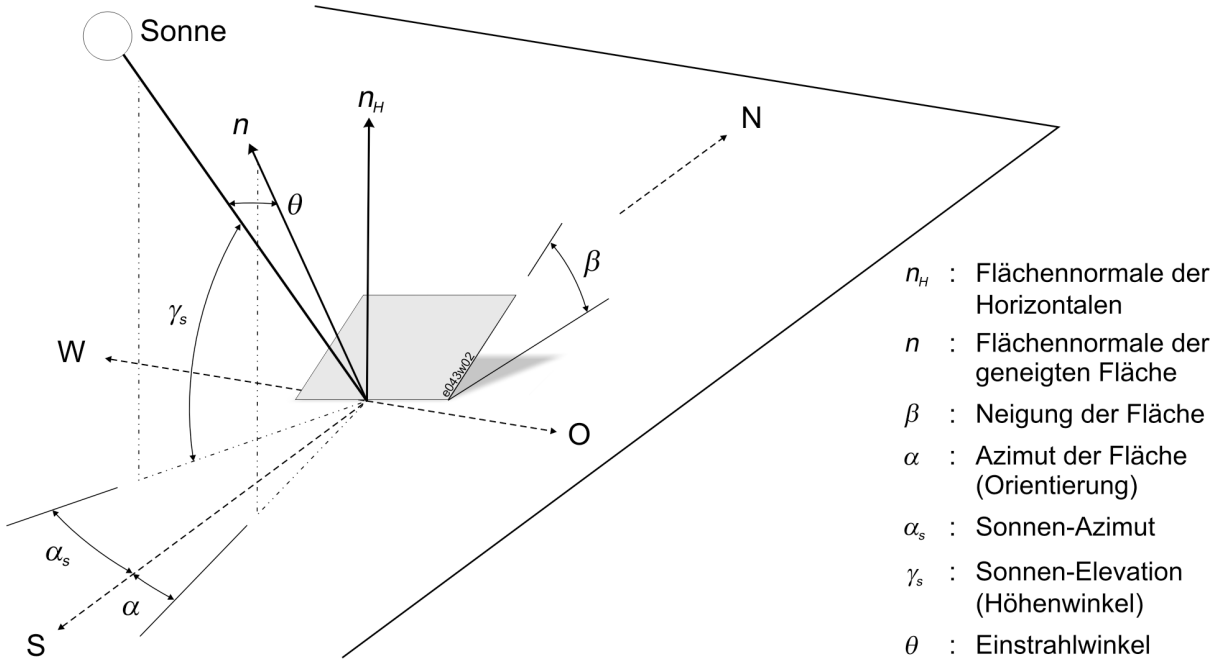

Abbildung 5-1: Winkeldefinitionen zur Sonnenstandsberechnung

Die elliptische Umlaufbahn der Erde um die Sonne bewirkt eine ungleichmäßige Bahngeschwindigkeit, die im Winter der nördlichen Hemisphäre, wenn die Erde der Sonne am nächsten kommt, höher ist als im Sommer. Das hat zur Folge, dass die Erde während einer eigenen Umdrehung unterschiedlich lange Wege auf ihrer Bahn um die Sonne zurücklegt. Dementsprechend variiert die Dauer bis zum nächsten Meridiandurchgang. Selbst wenn sich die Erde in einer exakten Kreisbahn um die Sonne bewegen würde, wäre die Dauer eines Sonnentages über ein Jahr betrachtet periodischen Schwankungen unterworfen. Durch die Neigung der Erdachse bewegt sich die Sonne von Tag zu Tag betrachtet im Frühjahr und Herbst schräg zum Äquator, die auf den Äquator projizierte Bewegung ist folglich reduziert. Im Winter und Sommer dagegen bewegt sich die Sonne in der Nähe des nördlichen und südlichen Wendekreise nahezu parallel zum Äquator. Die auf den Äquator projizierte Bewegung ist schneller als im Frühjahr und Sommer, zusätzlich verstärkt durch die in diesen Breitengraden dichteren Längengrade.

Die Überlagerung beider Effekte führt zu einer periodischen Differenz zwischen der wahren und der mittleren Sonnenzeit. Die Differenz kann für jeden Zeitpunkt im Jahr über die Zeitgleichung Z berechnet werden:

$$Z = 229{,}2 \cdot \left(0{,}000075 + 0{,}001868 \cdot \cos B - 0{,}032077 \cdot \sin B - \right.$$
$$\left. - 0{,}014615 \cdot \cos(2 \cdot B) - 0{,}04089 \cdot \sin(2 \cdot B)\right) \quad \text{[min]} \qquad (5\text{-}1)$$

wobei

$$B = (n-1) \cdot \frac{360}{365} \qquad (5\text{-}2)$$

mit n [-]: Tag des Jahres; $1 \leq n \leq 365$

Der Verlauf der Zeitgleichung über ein Jahr ist in **Abbildung 5-2** dargestellt. Sie hat in der Nähe des 1. November ein absolutes Maximum sowie ein absolutes Minimum um den 14. Februar. In den Wintermonaten zwischen diesen Zeiträumen ist die Änderung der Differenz zwischen wahrer und mittlerer Sonnenzeit am größten. Die Zeitgleichung ist weiterhin dafür verantwortlich, dass Sonnenauf- und -untergangszeiten sich asymmetrisch von Tag zu Tag ändern.

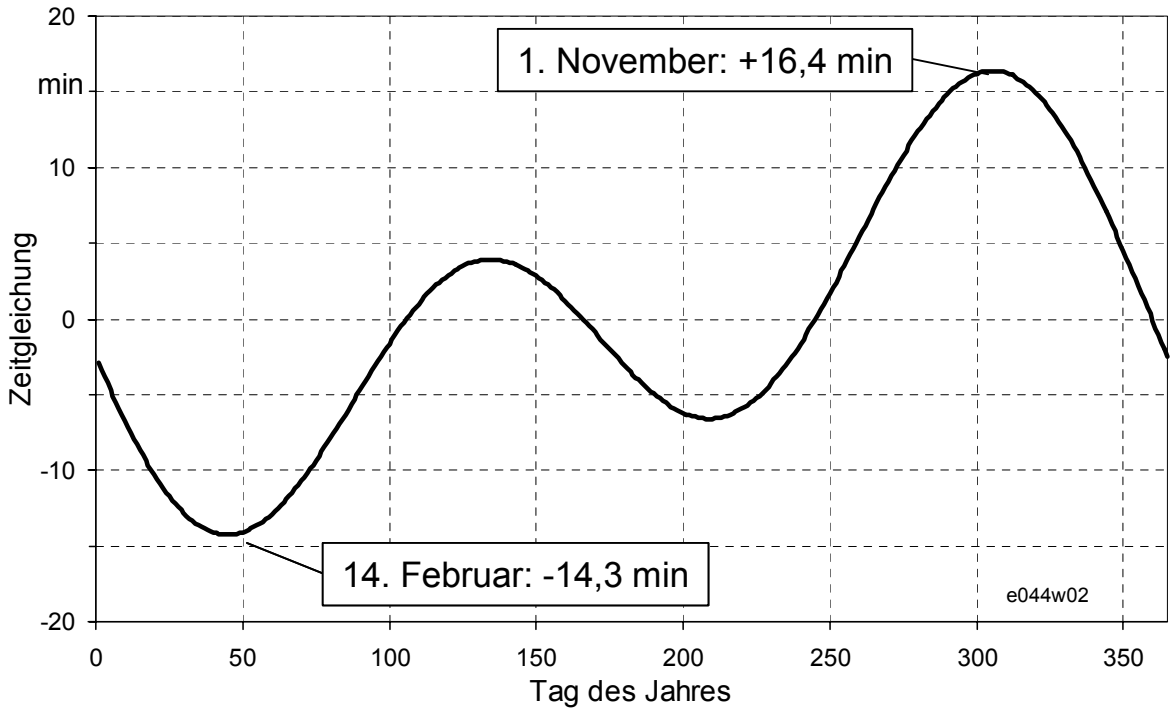

Abbildung 5-2: Verlauf der Zeitgleichung über ein Jahr.

Die Umrechnung der lokalen Zeit t_L, die als Zeitbasis bei den Simulationsanlagen angewendet wird, auf die Sonnenzeit t_S erfolgt dann unter Berücksichtigung der jeweiligen Zeitzone des betrachteten Standorts mit folgender Gleichung:

$$t_S = t_L + (\lambda_{ZZ} - \lambda_L) \cdot \frac{60\,\text{min}}{15°} + Z \qquad [\text{min}] \qquad (5\text{-}3)$$

mit t_L [min] : Lokale Zeit am betrachteten Standort

λ_{ZZ} [°] : Bezugslängengrad der Zeitzone

λ_L [°] : Längengrad des Standorts

Bei der Anwendung dieser Umrechnung muss beachtet werden, dass eine eventuell vorhandene Zeitverschiebung durch Sommerzeit zusätzlich zu berücksichtigen ist. Die Bewertung der Längengrade mit 60 Minuten pro 15° entspricht der Festlegung der Zeitzonen der Erde.

Aus der Sonnenzeit kann im Folgenden der Stundenwinkel der Sonne ω_S zu einer gegebenen lokalen Zeit ermittelt werden.

$$\omega_S = (t_S + 720\,\text{min}) \cdot \frac{0{,}25°}{1\,\text{min}} \qquad (5\text{-}4)$$

mit ω_S [°] : Stundenwinkel der Sonne;

$-180° \leq \omega_S \leq +180°$

Die Verschiebung der Sonnenzeit um 720 Minuten oder 12 Stunden ergibt sich aus der Definition des Stundenwinkels, der zum Meridiandurchgang der wahren Sonne 0° betragen soll, während die Sonnenzeit eine über den Tag anwachsende Größe ist.

Eine weitere Eingangsgröße neben dem Stundenwinkel, die für die weiteren Berechnungen benötigt wird, ist die Deklination. Die Deklination ist bedingt durch die Neigung der Erdachse um 23,45° und ist die Ursache der unterschiedlichen Jahreszeiten auf der Erde. Sie kann nach folgender Formel berechnet werden:

$$\delta = 23{,}45° \cdot \sin\left(360° \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \qquad (5\text{-}5)$$

mit δ [°] : Deklination; $-23{,}45° \leq \delta \leq +23{,}45°$

n [-] : Tag des Jahres; $1 \leq n \leq 365$

Der Einstrahlwinkel θ der Sonne kann nun allgemein für einen Standort und eine beliebig geneigte und orientierte Fläche nach folgender Formel berechnet werden:

$$\begin{aligned}\cos\theta = {} & \sin\delta\cdot\sin\varphi\cdot\cos\beta - \\ & -\sin\delta\cdot\cos\varphi\cdot\sin\beta\cdot\cos\alpha + \\ & +\cos\delta\cdot\cos\varphi\cdot\cos\beta\cdot\cos\omega_S + \\ & +\cos\delta\cdot\sin\varphi\cdot\sin\beta\cdot\cos\alpha\cdot\cos\omega_S + \\ & +\cos\delta\cdot\sin\beta\cdot\sin\alpha\cdot\sin\omega_S\end{aligned} \tag{5-6}$$

Für die Sonnenstandsberechnung ist die Bezugsfläche natürlich die horizontale Fläche. Der Einstrahlwinkel auf eine horizontale Fläche θ_{hor} kann nur Werte zwischen 0° und 90° annehmen. Damit gilt, wie aus Abbildung 5-1 leicht abgeleitet werden kann:

$$\gamma_S = 90 - \theta_{hor}$$

Somit lässt sich die Elevation, der Höhenwinkel der Sonne über dem Horizont, aus der mit $\beta = 0$ vereinfachten Gleichung 5-6 berechnen zu:

$$\sin\gamma_S = \sin\delta\cdot\sin\varphi + \cos\delta\cdot\cos\varphi\cdot\cos\omega_S \tag{5-7}$$

Auch die Elevation γ_S kann wiederum nur Werte zwischen 0° und 90° annehmen.

Neben der Elevation ist der Azimut der Sonne die zweite für die Positionierung der Strahlerplattform des Sonnensimulators entscheidende Größe. Er kann nach folgenden Formeln bestimmt werden:

$$\alpha_S = C_1\cdot C_2\cdot\arcsin\left(\frac{\sin\omega_S\cdot\cos\delta}{\cos\gamma_S}\right) + C_3\cdot\left(\frac{1 - C_1\cdot C_2}{2}\right)\cdot 180° \tag{5-8}$$

wobei $C_1 = \begin{cases} +1 \text{ für } |\omega_S| \le \omega_E \\ -1 \text{ für } |\omega_S| > \omega_E \end{cases}$; $C_2 = \begin{cases} +1 \text{ für } (\varphi - \delta) \ge 0 \\ -1 \text{ für } (\varphi - \delta) < 0 \end{cases}$; $C_3 = \begin{cases} +1 \text{ für } \omega_S \ge 0 \\ -1 \text{ für } \omega_S < 0 \end{cases}$

mit $\omega_E = \dfrac{\tan\delta}{\tan\varphi}$

Die Größe ω_E gibt den Betrag des Stundenwinkels wieder, zu dem die Sonne vom Betrachter aus gesehen genau in Ost- oder Westrichtung steht. Der Azimutwinkel kann nur aufgrund der Fallunterscheidungen eindeutig bestimmt werden, da der Arcussinus keine eindeutigen Ergebnisse liefert.

Am Beispiel von München mit den Koordinaten 11°30’ Ost und 48°10’ Nord ist das Ergebnis einer Berechnung in **Abbildung 5-3** dargestellt. Das Diagramm zeigt die Elevation der Sonne über dem Azimut für drei exemplarische Tage (der 20.02. ist der in Abschnitt 4.1 beschriebene sonnige Wintertag).

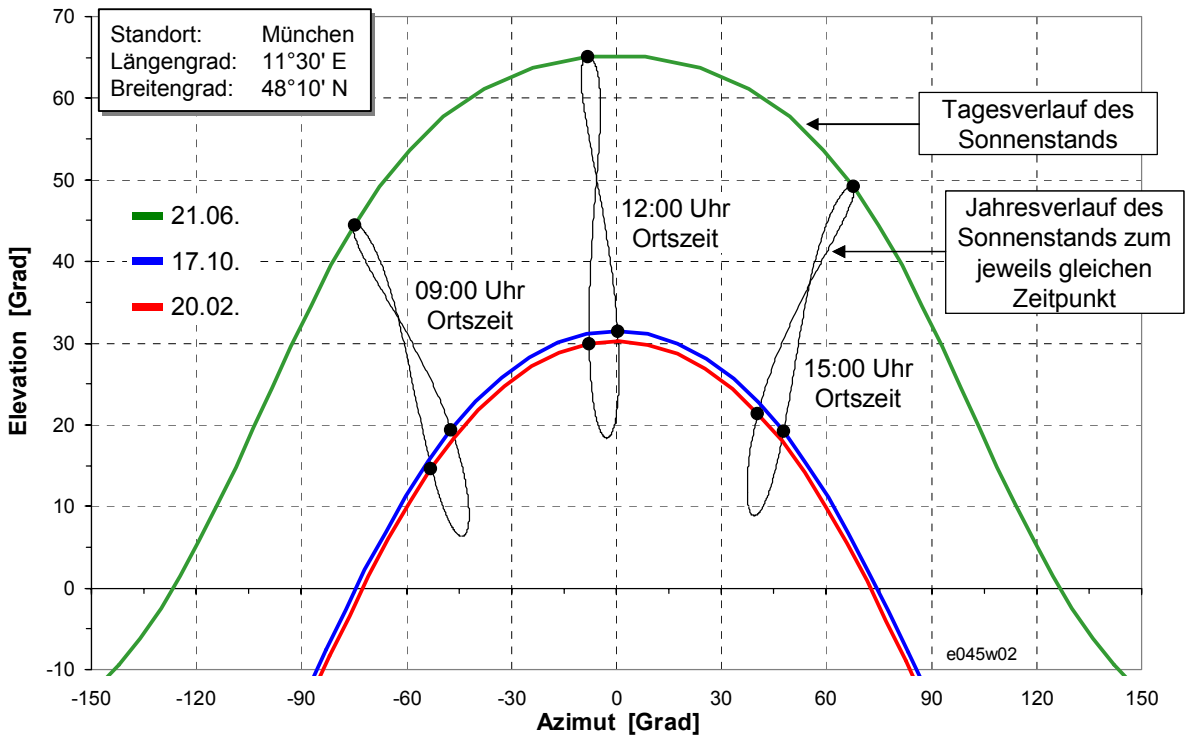

Abbildung 5-3: Beispielberechnungen des Sonnenstands für den Standort München.

Neben der jeweiligen Sonnenbahn des Tages kann man hier auch die Zeitverschiebungen aufgrund der Zeitgleichung wie auch der Lage des Standorts innerhalb der Zeitzone erkennen. Die schwarzen Schleifen geben dabei den Verlauf des Sonnenstands über ein ganzes Jahr jeweils zum gleichen Zeitpunkt bezogen auf lokale Zeiten wieder. Die Verschiebung zwischen Februar und Oktober beträgt zeitlich gesehen rund eine halbe Stunde. Ende Oktober heben sich dabei die Wirkung der Zeitgleichung und die Längengradverschiebung in der Zeitzone nahezu auf, so dass der Sonnenhöchststand ungefähr um 12 Uhr Ortszeit erfolgt. Dementsprechend sind die Sonnenauf- und Sonnenuntergangszeiten symmetrisch zur Tagesmitte.

Mit diesen Algorithmen, die bei der Berechnung der Fahrplandaten für den Sonnensimulator verwendet werden, ist sichergestellt, dass die direkte Sonneneinstrahlung auch in ihrer Wirkungsrichtung dem Tag entspricht, der aufgrund seines Bestrahlungsstärkeprofils auf dem Prüfstand simuliert wird.

5.1.2 Berechnung der zu erzeugenden Bestrahlungsstärke

Die physikalische Einheit für die Leistung, die pro Flächenelement einer Empfangsfläche eingestrahlt wird, ist die Bestrahlungsstärke. Dabei handelt es sich um eine strahlungsphysikalische Größe. Sie kann aus folgender Gleichung, dem Photometrischen Grundgesetz, abgeleitet werden /HEN/:

$$\phi_e = \int_{\Omega}\int_{A} L_e \cdot \mathrm{d}A \cdot \cos\theta \cdot \mathrm{d}\Omega \tag{5-9}$$

mit ϕ_e [W] : Strahlungsfluss
L_e [W/(m²·sr)] : Strahldichte
$\mathrm{d}A$ [m²] : Bestrahltes Flächenelement
$\mathrm{d}\Omega$ [sr] : Raumwinkelelement

Berücksichtigt man die geometrischen Verhältnisse zwischen der Sonne und der Erde, kann man bei der auf der Erdoberfläche ankommenden Direktstrahlung von einer konstanten Strahldichte über der Fläche und den Raumwinkel ausgehen. Damit kann Gleichung 5-9 vereinfacht ausgedrückt werden:

$$\phi_e = L_e \cdot A \cdot \cos\theta \cdot \Omega_0 \tag{5-10}$$

mit Ω_0 [1 sr] : Einheitsraumwinkel

Die Bestrahlungsstärke auf einer Fläche ist dann definiert als Strahlungsfluss pro Flächenelement:

$$E_e = \frac{\phi_e}{A} = L_e \cdot \cos\theta \cdot \Omega_0 \tag{5-11}$$

mit E_e [W/m²] : Bestrahlungsstärke

Damit ist die Bestrahlungsstärke auf einer Empfängerfläche nur noch vom Einstrahlungswinkel, also dem Winkel zwischen der Flächennormalen der Empfängerfläche und der Einstrahlrichtung, abhängig.

Die zum Betrieb des Sonnensimulators notwendigen Daten über die Bestrahlungsstärke auf der Erdoberfläche durch direkte Sonnenstrahlung basieren, wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, auf einem Testreferenzjahr. Einem TRY können dabei Bestrahlungsstärkewerte für die direkte Sonnenstrahlung in einstündiger Auflösung entnommen werden. Diese Werte sind immer auf eine horizontale Fläche bezogen. Damit berücksichtigen diese Daten neben den atmosphärischen Einflüssen und der Bedeckung des Himmels durch Wolken oder Nebel auch die sonnenstandsabhängige Veränderung des Einstrahlwinkels auf die Bezugsfläche.

Um diese Daten für den Betrieb des Sonnensimulators verwenden zu können, muss eine Umrechnung auf die mit der Strahlerplattform zu erzeugende Bestrahlungsstärke erfolgen. Dies geschieht durch die Transformation der Bezugsfläche von einer horizontalen Ausrichtung auf eine Fläche mit Normalenrichtung in Einstrahlungsrichtung. Aus Gleichung 5-11 kann diese Umrechnung leicht abgeleitet werden:

$$E_{e,SP} = \frac{E_{e,hor}}{\cos\theta} \tag{5-12}$$

mit $E_{e,dir,SP}$ [W/m²] : Bestrahlungsstärke durch Plattform (Direktanteil)
$E_{e,dir,hor}$ [W/m²] : Bestrahlungsstärke auf Horizontale (Direktanteil)
θ [°] : Einstrahlungswinkel

Zu jedem Wert der horizontalen Bestrahlungsstärke aus den Klimadaten ist für den entsprechenden Tag und die jeweilige Uhrzeit der Einstrahlungswinkel auf die Horizontale zu berechnen (s. Abschnitt 5.1.1). Der Wert für $E_{e,SP}$ ergibt dann die an der Fassade ankommende und durch die Simulationsanlage zu erzeugende Bestrahlungsstärke bei senkrechter Einstrahlung. Diese Größe kann bei der Auslegung der Anlage leicht gemessen werden.

5.1.3 Spektrum direkter Sonnenstrahlung

Neben der energetischen Bewertung der Sonnenstrahlung ist es außerdem von Bedeutung, die spektrale Zusammensetzung zu kennen. Aufgrund des unterschiedlichen spektralen Absorptionsvermögens von Stoffen ist es für die Sonnensimulation und die Wirkung der Strahlung im Modellraum wichtig, die Strahlungsenergie weitgehend mit dem richtigen Spektrum zu erzeugen. Daher ist notwendig, zuerst das Spektrum der Sonnenstrahlung näher zu analysieren und zu bewerten. Die dafür verwendeten Daten wurden mit dem Programm HELIONDA /HEL/ berechnet. Dieses Programm dient unter anderem zur Berechnung der terrestrischen spektralen Bestrahlungsstärke der Sonne unter Berücksichtigung von geographischen, klimatologischen und meteorologischen Parametern. Es gibt neben der Globalstrahlung auch den direkten sowie diffusen Strahlungsanteil im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 4000 nm aus.

Bei den strahlungsphysikalischen Größen, wie sie im vorhergehenden Abschnitt definiert wurden, handelt es sich genau genommen um die Summenwerte der entsprechenden wellenlängenabhängigen Größen. Für die Bestrahlungsstärke gilt:

$$E_e = \int_{\lambda} E_{e\lambda} \cdot \mathrm{d}\lambda$$

mit λ [µm] : Wellenlänge
$E_{e\lambda}$ [W/(m²·µm)] : spektrale Bestrahlungsstärke

In **Abbildung 5-4** ist die spektrale Bestrahlungsstärkeverteilung der terrestrischen Globalstrahlung sowie der direkten und diffusen Strahlungsanteile, wie sie vom Programm HELIONDA errechnet werden, für einen Sommertag um 12:00 Uhr dargestellt. Die Globalstrahlung ergibt sich dabei aus der Addition von Direkt- und Diffusstrahlung. Weiterhin sind in der Abbildung die Wellenlängenbereiche der optischen Strahlung markiert /DIN 5031-7/:

– Ultraviolette Strahlung (UV;100 nm – 380 nm); für den Menschen nicht sichtbare kurzwellige Strahlung,

– Sichtbare Strahlung, Licht (VIS; 380 nm – 780 nm); für den Menschen sichtbarer Strahlungsbereich,

– Infrarotstrahlung (IR-A, IR-B, 780 nm – 3000 nm); nicht sichtbare langwellige Strahlung.

Darüber hinaus gibt es von 3000 nm – 10000 nm noch den Bereich IR-C, der jedoch bei der folgenden energetischen Betrachtung der Wellenlängenbereiche nicht mehr berücksichtigt wird.

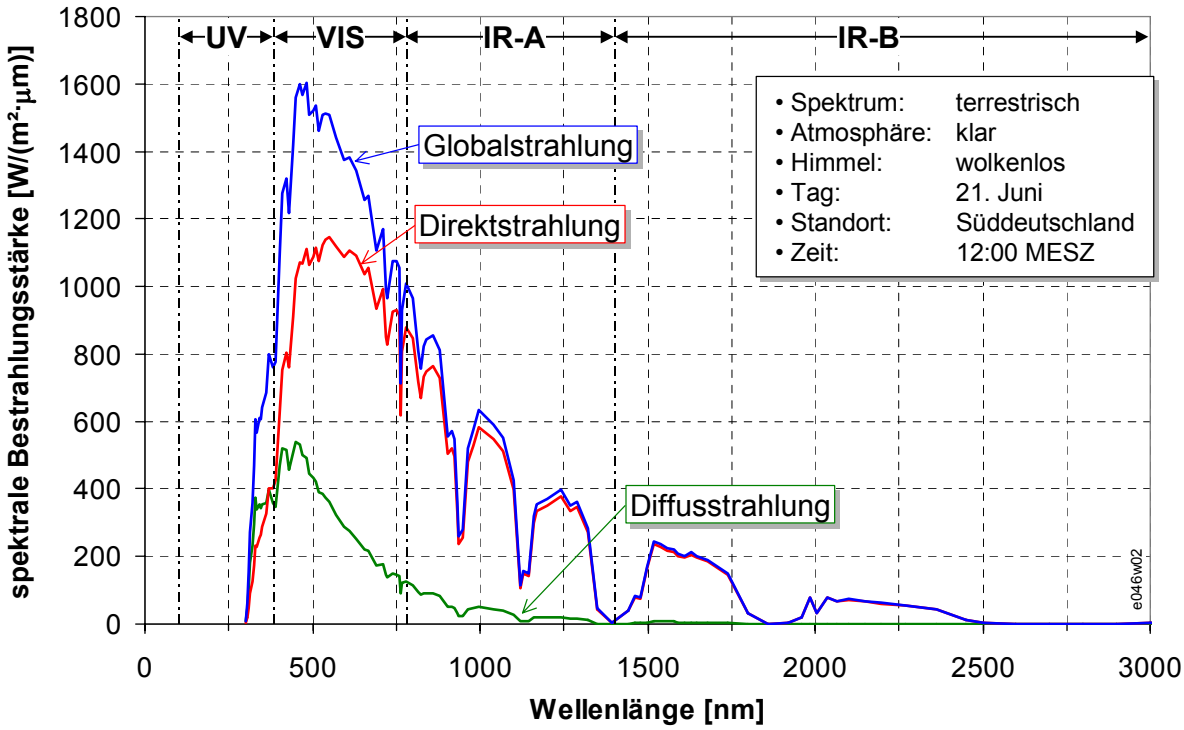

Abbildung 5-4: Spektrum der terrestrischen Globalstrahlung sowie des direkten und diffusen Strahlungsanteils für den Mittag des 21. Juni in Süddeutschland.

In Abbildung 5-4 lässt sich erkennen, dass die Diffusstrahlung gegenüber der Direktstrahlung ein markant kurzwelliges Spektrum besitzt („blauer Himmel“), wodurch sie nur im ultravioletten und sichtbaren Wellenlängenbereich wesentlich zur Globalstrahlung beiträgt, die weitgehend von der direkten Sonnenstrahlung geprägt ist. Das dargestellte terrestrische Spektrum ist das Ergebnis von Veränderungen, welche die von der Sonne ausgehende Strahlung vor allem beim Durchgang durch die Erdatmosphäre erfährt. Hervorgerufen werden diese Veränderungen durch Absorption und Streuung der Strahlung in der Ozonschicht, durch atmosphärische Schwebstoffe (Aerosole) und Wasserdampf. So werden die Einschnitte im Spektrum der Globalstrahlung bei 940 nm, 1130 nm und 1400 nm vor allem durch Absorption durch

Wasserdampf verursacht. Bei dem hier dargestellten Tag wurde bei der Berechnung eine relative Luftfeuchte von 75 % berücksichtigt, die einer durchstrahlten Wasserschicht von 2,5 cm entspricht. Entscheidend für den Grad der Veränderung ist dabei die sogenannte 'Air Mass' (AM), ein Faktor der die Weglänge der Strahlung durch die Atmosphäre und die Luftmassen beschreibt und vom Sonnenstand abhängig ist. Ein Wert von AM = 0 beschreibt die extraterrestrische Sonnenstrahlung, AM = 1 die Einstrahlung auf Meereshöhe bei senkrechtem Strahlungseinfall auf die Horizontale. /WAG/

Inwieweit sich die spektrale Bestrahlungsstärke der Globalstrahlung auf die direkten und diffusen Strahlungsanteile aufteilt, zeigt **Tabelle 5-1**. Weiterhin sind dort Summen der spektralen Bestrahlungsstärke für die Wellenlängenbereiche UV, VIS und IR angegeben. Somit ergibt sich für die direkte Sonnenstrahlung eine spektrale Zusammensetzung aus großen Anteilen im visuellen (52 %) wie im infraroten Bereich (45 %) sowie einem geringen Anteil an ultravioletter Strahlung (3 %). Da die sichtbare Strahlung einen wesentlich geringeren Wellenlängenbereich umfasst als die Infrarotstrahlung, sind hier deutlich höhere spektrale Bestrahlungsstärkewerte zu finden, wie Abbildung 5-4 zeigt.

Tabelle 5-1: Aufteilung der spektralen Bestrahlungsstärke auf Direkt- und Diffusstrahlung sowie die Teilsummen für verschiedene Wellenlängenbereiche für den 21. Juni, 12:00 Uhr in Süddeutschland.

	Einheit	**Wellenlängenbereich**			
		Gesamt	**UV**	**VIS**	**IR**
Wellenlänge	[nm]	300 – 3000	300 – 380	380 - 780	780 - 3000
Globalstrahlung	[W/m²]	930	46	523	361
Direktstrahlung	[%]	81	45	76	93
Diffusstrahlung	[%]	19	55	24	7
Direktstrahlung	[W/m²]	754	21	396	337
	[%]	*100*	*3*	*52*	*45*
Diffusstrahlung	[W/m²]	176	25	127	24
	[%]	*100*	*14*	*72*	*14*

Da die Air Mass und damit das Spektrum der direkten Sonnenstrahlung vom Sonnenstand abhängig ist, wird nachfolgend analysiert, wie sich über das Jahr sowie während eines Tages das Spektrum verändert. In **Abbildung 5-5** ist dazu für mehrere Stunden eines Wintertages die relative spektrale Bestrahlungsstärke der Direktstrahlung, verstanden als spektrale Bestrahlungsstärke eines Zeitpunkts bezogen auf die spektrale Bestrahlungsstärke von 12:00 Uhr, dargestellt. Die Zunahme der Bestrahlungsstärke von 9:00 Uhr bis 12:00 Uhr er-

folgt dabei nicht gleichmäßig über den gesamten Wellenlängenbereich. Durch den zu Beginn des Tages längeren Weg der Strahlung durch die Atmosphäre erfolgt eine stärkere Absorption vor allem kurzwelliger Strahlungsanteile unter 800 nm. Eine „Rotverschiebung“ des Spektrums ist die Folge, die auch vom Menschen optisch wahrgenommen wird. Im Infrarotbereich sind weiterhin die schon genannten Wellenlängenbereiche um 940 nm und 1130 nm mit erhöhter Absorption durch den Wasserdampf zu erkennen.

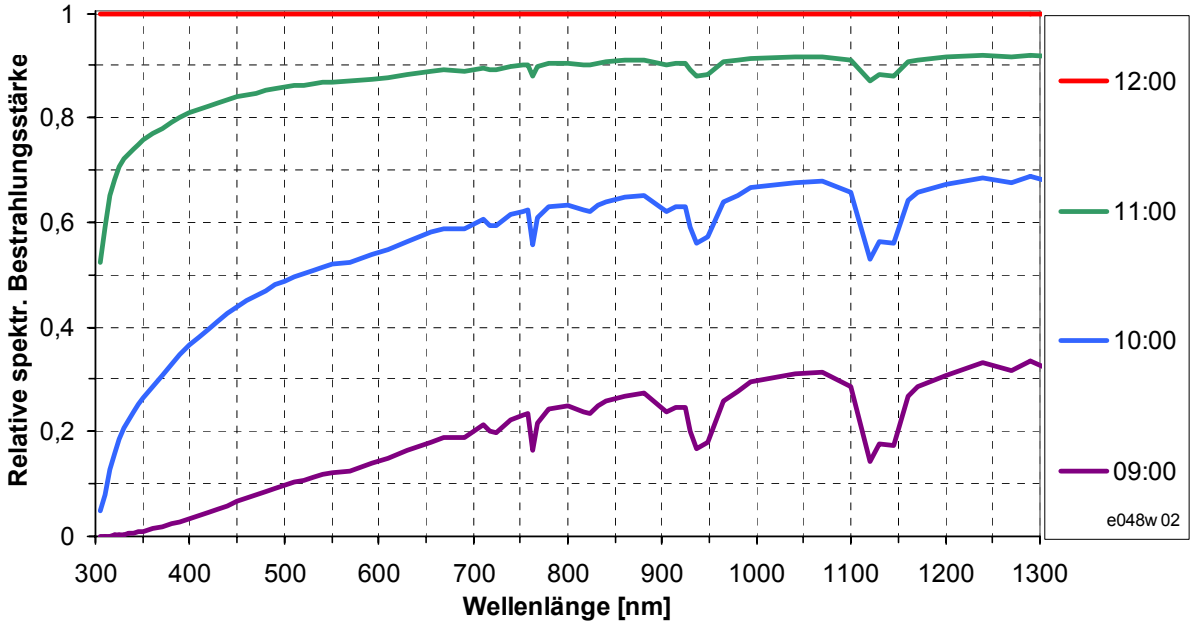

Abbildung 5-5: Relative spektrale Bestrahlungsstärke der Direktstrahlung (bezogen auf das Spektrum von 12:00 Uhr) für einen klaren Wintertag in Süddeutschland.

Für den Betrieb des Sonnensimulators ist nun vor allem von Interesse, inwiefern sich die Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche über einen Tag verändern. **Abbildung 5-6** zeigt dies für den Sommer- und Wintertag; zusätzlich ist der jeweilige Wert der Air Mass für jeden Zeitpunkt aufgetragen. Dargestellt ist jeweils die erste Tageshälfte, die Verläufe über einen ganzen Tag sind dabei symmetrisch zur Tagesmitte. Der Anteil der Infrarotstrahlung an der gesamten direkten Bestrahlungsstärke zum jeweiligen Zeitpunkt nimmt, wie Abbildung 5-6 zeigt, mit steigender Air Mass zu. Im Winter ist dabei der Anteil der Infrarotstrahlung grundsätzlich höher als im Sommer, was durch die tiefer stehende Sonne und damit größerer Air Mass begründet ist. Die beiden dargestellten Tage, Sommer- und Wintersonnwende, stellen gleichzeitig die Grenzen für die Anteile der Wellenlängenbereiche bezüglich der Mittagsstunden dar.

Für die Konzeption der Strahlerplattform des Sonnensimulators bedeutet dies, dass eine begrenzte Veränderbarkeit des erzeugten Spektrums vorgesehen werden sollte. Ausgehend von einer Verteilung der Strahlungsleistung von ca. 50 % im visuellen und 50 % im infraroten

Bereich sollte zur Anpassung des Spektrums eine Verlagerung von Strahlungsleistung in den IR-Bereich möglich sein. Für die Nachbildung von Tagesgängen der direkten Sonnenstrahlung mit der Simulationseinrichtung kann dann für den jeweils ausgewählten Tag die spektrale Bestrahlungsstärke mit der benötigten zeitlichen Auflösung berechnet und die Verteilung der Strahlungsleistung auf die Wellenlängenbereiche ermittelt werden.

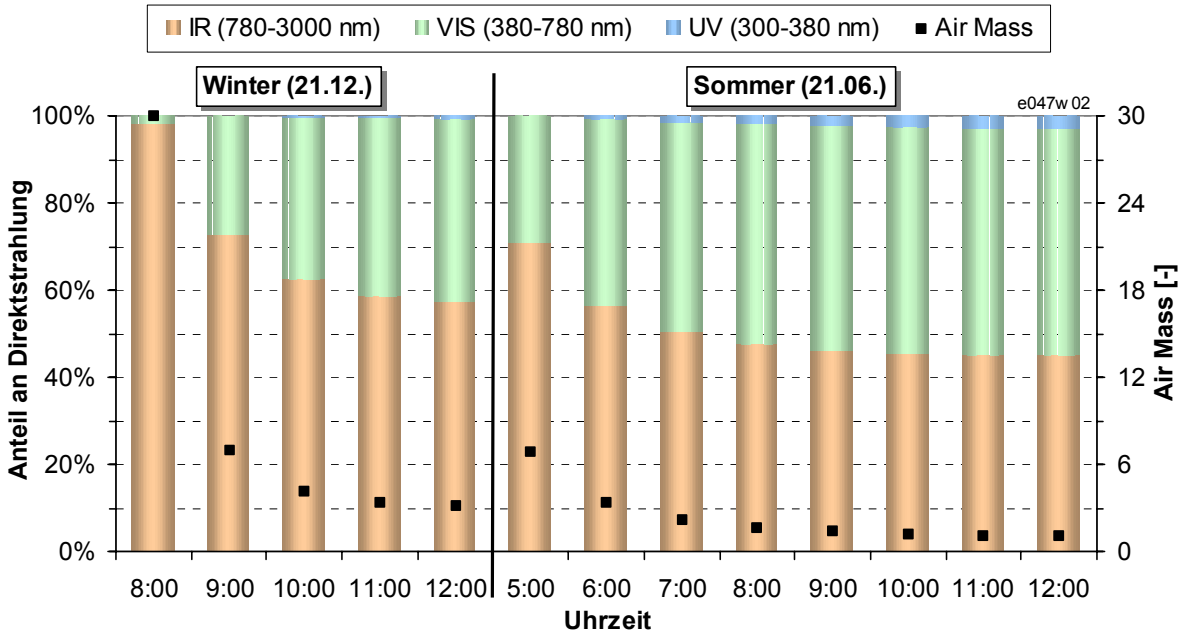

Abbildung 5-6: Verlauf der prozentualen Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der gesamten Direktstrahlung sowie die jeweilige Air Mass für die erste Tageshälfte eines Winter- und Sommertags in Süddeutschland.

5.2 Grundlagen zur Simulation diffuser Himmelsstrahlung

5.2.1 Berechnung der zu erzeugenden Bestrahlungsstärke

Die diffuse Himmelsstrahlung hat, wie auch die direkte Sonnenstrahlung, ihren Ursprung in der von der Sonne emittierten Strahlung. Im Gegensatz zur direkten Sonnenstrahlung handelt es sich jedoch um die beim Durchgang durch die Erdatmosphäre gestreute Strahlung. Sie trifft daher ohne Vorzugsrichtung auf dem Erdboden auf, d.h. alle Einstrahlungsrichtungen können zu gleichen Anteilen angenommen werden.

Für eine horizontale Fläche auf der Erde bedeutet dies, dass die diffuse Strahlung aus dem gesamten einsehbaren Bereich des Himmels kommt, der in seiner maximalen Ausdehnung eine Halbkugel mit dem Horizont als Begrenzung ist. In der Realität ist der einsehbare Bereich des Himmels oft deutlich kleiner als eine Halbkugel, verursacht wird dies durch Geländetopologie, Bebauung der Umgebung und Bewuchs. Aus dem photometrischen Grundgesetz (Gleichung 5-9) kann eine Formel hergeleitet werden, die die Umrechnung von Daten für geneigte

Flächen aus Daten, die auf horizontale Flächen bezogen sind, beschreibt. Unter der Annahme einer konstanten Strahldichte über alle Einstrahlungswinkel und über der bestrahlten Fläche ergibt sich aus Gleichung 5-9:

$$\phi_e = L_e \cdot A \cdot \int_{\Omega} \cos\theta \cdot \mathrm{d}\Omega \tag{5-13}$$

Für eine horizontale Fläche mit unbeschränktem Sichtbereich ist das Raumwinkelintegral über eine Halbkugel zu bilden, somit ergibt sich für den Strahlungsfluss:

$$\phi_{e,diff,hor} = L_{e,diff} \cdot A \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Omega_0 \tag{5-14}$$

mit	$\phi_{e,diff,hor}$	[W] :	Diffuser Strahlungsfluss auf die Horizontale
	$L_{e,diff}$	[W/(m²·sr)] :	Diffuse Strahlungsdichte
	Ω_0	[sr] :	Einheitsraumwinkel

Für eine geneigte Fläche folgt für den Strahlungsfluss aus Gleichung 5-13:

$$\begin{aligned}\phi_{e,diff,ng} &= L_{e,diff} \cdot A \cdot \int_{\varphi=0}^{\pi} \mathrm{d}\varphi \cdot \left(\int_{\vartheta=0}^{\frac{\pi}{2}} \sin\vartheta \cdot \mathrm{d}\vartheta + \int_{\vartheta=\theta}^{\frac{\pi}{2}} \sin\vartheta \cdot \mathrm{d}\vartheta \right) \cdot \Omega_0 = \\ &= L_{e,diff} \cdot A \cdot \pi \cdot (1 + \cos\theta) \cdot \Omega_0\end{aligned} \tag{5-15}$$

mit	$\phi_{e,diff,ng}$	[W] :	Diffuser Strahlungsfluss auf eine geneigte Fläche

Damit ist die diffuse Bestrahlungsstärke auf eine geneigte Fläche:

$$E_{e,dif,ng} = E_{e,dif,hor} \cdot \frac{1 + \cos\theta}{2} \tag{5-16}$$

Für den am Prüfstand relevanten Fall einer senkrechten Gebäudefassade mit Fenster ($\theta = 90°$) gilt folglich, dass maximal nur die Hälfte der diffusen Bestrahlungsstärke, die eine horizontale Fläche erreicht, für ein senkrechtes Fenster wirksam wird.

Da für die Erzeugung von diffuser Strahlung keine eigene Komponente für den Modellraumprüfstand realisiert wurde, muss diese vom Sonnensimulator zusätzlich zur direkten Sonnenstrahlung erzeugt werden. Dazu ist es notwendig, die erforderliche zu erzeugende gerichtete Bestrahlungsstärke zu ermitteln, deren Leistungsfluss durch das Fenster dem einer realen Diffusstrahlung entspricht. Berechnet werden kann dies mit Hilfe des relativen Transmissionsgrades $\tau_{rel}(\theta)$ von Glas. Dieser ist definiert als Quotient aus dem Transmissionsgrad unter einem bestimmten Einstrahlungswinkel und dem Transmissionsgrad bei senkrechter Einstrahlung. **Abbildung 5-7** zeigt den Verlauf des relativen Transmissionsgrads in Abhängigkeit

vom Einstrahlwinkel für Doppelscheiben aus normalem Glas. Unter der bereits genannten Annahme, dass die Strahldichte der Diffusstrahlung über alle Einstrahlwinkel konstant ist, kann aus geometrischen Zusammenhängen eine Mehrfachintegration hergeleitet werden, durch die der mittlere relative Transmissionsgrad $\overline{\tau_{rel}}$ des Modellraumfensters bei diffuser Einstrahlung berechnet werden kann:

$$\overline{\tau_{rel}}(x,y) = \frac{1}{\gamma_1(y)\cdot(\alpha_1(x)-\alpha_0(x))}\cdot\int_0^{\gamma_1(y)}\int_{\alpha_0(x)}^{\alpha_1(x)}\tau_{rel}(\theta)\,\mathrm{d}\gamma\,\mathrm{d}\alpha \qquad (5\text{-}17)$$

$$\overline{\tau_{rel}} = \frac{1}{A}\cdot\iint_{(A)}\overline{\tau_{rel}}(x,y)\,\mathrm{d}A \qquad (5\text{-}18)$$

mit	α, γ	[°] :	Azimut (α), Elevation (γ) der Einstrahlung
	$\theta(\alpha, \gamma)$	[°] :	Einstrahlrichtung auf das Fenster (Abweichung zur Flächennormalen des Fensters); Funktion von Azimut und Elevation
	x, y	[m] :	Koordinaten auf der Glasfläche; Ursprung horizontal (x = 0) in Flächenmitte vertikal (y = 0) am unteren Flächenrand
	A	[m²] :	Glasfläche des Fensters

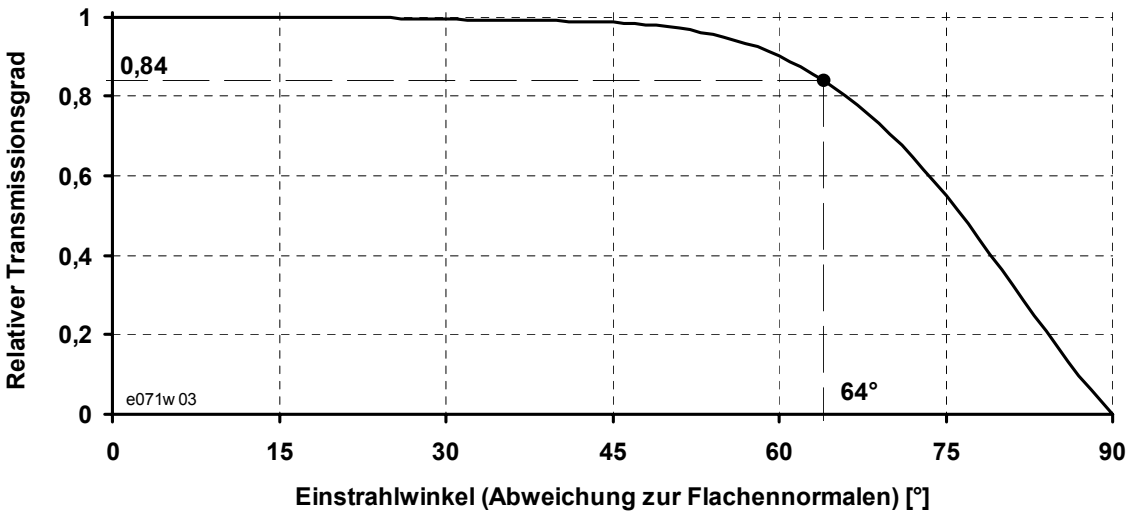

Abbildung 5-7: Abhängigkeit des Transmissionsgrads von Glasscheiben (Doppelscheiben) vom Einstrahlwinkel /DUF/.

Das Doppelintegral in Gleichung 5-17 wird über alle möglichen Einstrahlwinkel der Diffusstrahlung für jeweils einen Punkt auf der Glasfläche des Fensters berechnet. Bei den Integrationsgrenzen werden dabei die Einschränkungen aufgrund des vorstehenden Mauerwerks seitlich und oberhalb des Fensters berücksichtigt, die sich in Abhängigkeit von der Position auf

der Glasfläche ergeben. Das Ergebnis der Gleichung ist die Funktion für den mittleren relativen Transmissionsgrad eines Punktes auf der Glasfläche in Abhängigkeit von den Koordinaten x und y des Punktes auf der Fläche bei diffuser Strahlung. Mit dieser Funktion wird in Gleichung 5-18 durch Integration über der Glasfläche der mittlere relative Transmissionsgrad $\overline{\tau_{rel}}$ berechnet. Die numerische Lösung dieser Gleichungen ergibt einen Wert von 0,84. Das bedeutet, dass die Diffusstrahlung durch gerichtete Strahlung mit einem Einstrahlwinkel von 64° nachgebildet werden kann, wie aus Abbildung 5-7 ersichtlich ist ($\tau_{rel}(64°) = 0{,}84$).

5.2.2 Spektrum diffuser Himmelsstrahlung

Das Spektrum der diffusen Himmelsstrahlung, wie in Abbildung 5-4, Abschnitt 5.1.3 zu erkennen, ist im Vergleich mit dem Spektrum der direkten Sonnenstrahlung deutlich zu kürzeren Wellenlängen hin verschoben. An klaren Tagen ist das an der markant blauen Färbung des Himmels zu erkennen. In Tabelle 5-1, Abschnitt 5.1.3 ist die Aufteilung der diffusen Bestrahlungsstärke auf die verschiedenen Wellenlängenbereiche UV, VIS und IR für den 21. Juni dargestellt. Die Tabelle zeigt, dass die Diffusstrahlung im Gegensatz zur direkten Sonnenstrahlung zum größten Teil (72 %) aus sichtbarer Strahlung besteht, der Rest verteilt sich zu gleichen Teilen auf ultraviolette und infrarote Strahlung.

Wie bereits bei der Analyse der Direktstrahlung ausgeführt, ist auch das Spektrum der Diffusstrahlung über einen Tag nicht konstant. Wie **Abbildung 5-8** zeigt, nimmt die spektrale Bestrahlungsstärke bis zum Mittag nicht gleichmäßig über der Wellenlänge zu. In Bezug auf das Spektrum von 12:00 Uhr ist auch bei der Diffusstrahlung am Morgen (und Abend) eine Verschiebung des Spektrums zu längeren Wellenlängen feststellbar.

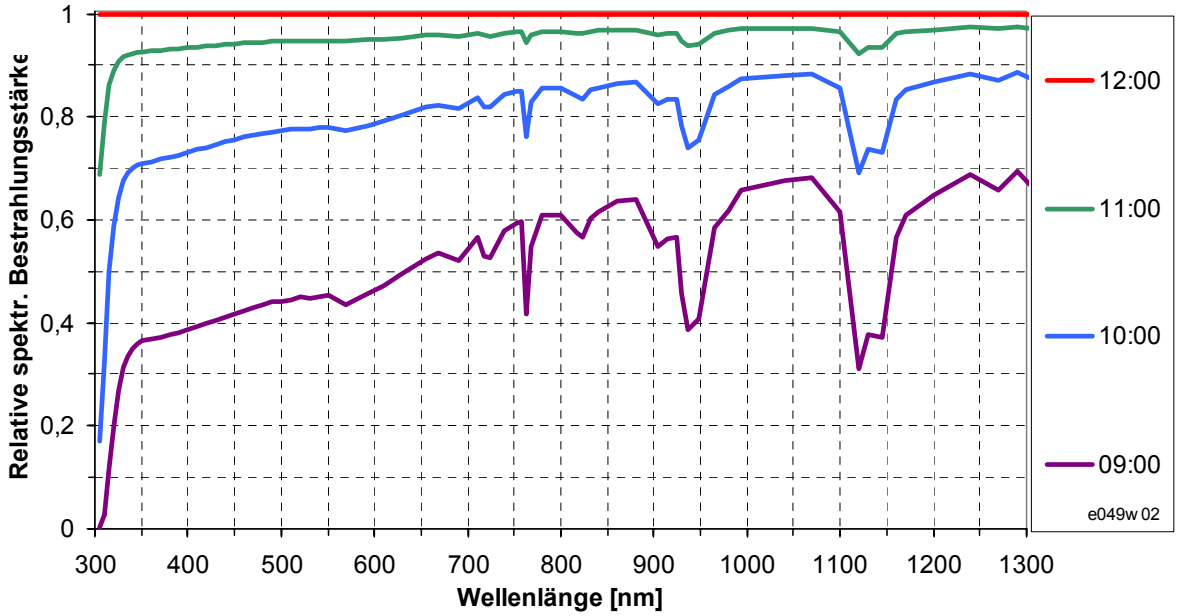

Abbildung 5-8: Relative spektrale Bestrahlungsstärke der Diffusstrahlung bezogen auf das Spektrum von 12:00 Uhr für einen klaren Wintertag in Süddeutschland.

Die Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche im Verlauf der ersten Tageshälften sind in **Abbildung 5-9** für den Tag der Sommer- und Wintersonnwende dargestellt, die Verläufe über einen ganzen Tag sind dabei symmetrisch zur Tagesmitte. Der visuelle Spektralbereich bleibt über den ganzen Tag der dominierende Anteil, nur am Tagesrand steigt der Anteil der Infrarotstrahlung auf über 20 %. Im Gegensatz dazu lassen sich bei bewölkten Tagen keine Veränderungen des Spektrums der Diffusstrahlung über den Tag feststellen. **Abbildung 5-10** zeigt dieses für die gleichen Tage, nur wurden hier mit HELIONDA die Werte für bewölkte Tage berechnet. Neben dem konstanten Spektrum über den Tag fällt zudem der geringe Unterschied zwischen Sommer- und Wintertag auf. Im Gegensatz zu klaren Tagen ist das Spektrum hier auch deutlich langwelliger.

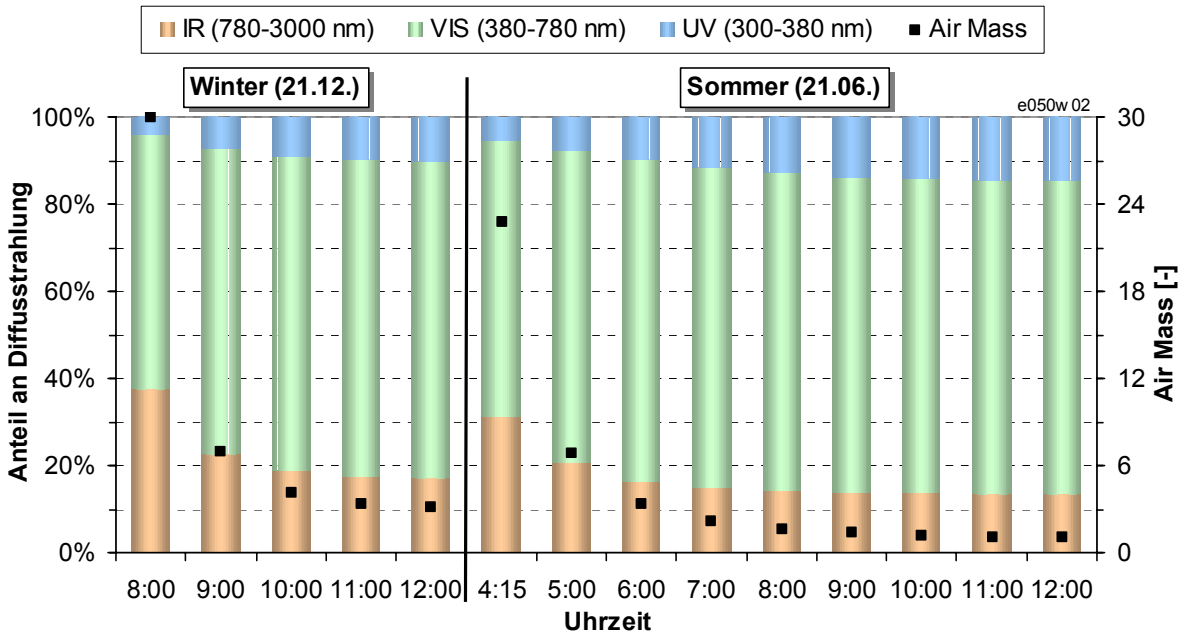

Abbildung 5-9: Verlauf der prozentualen Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der gesamten Diffusstrahlung sowie die jeweilige Air Mass für die erste Tageshälfte eines klaren Winter- und Sommertags in Süddeutschland.

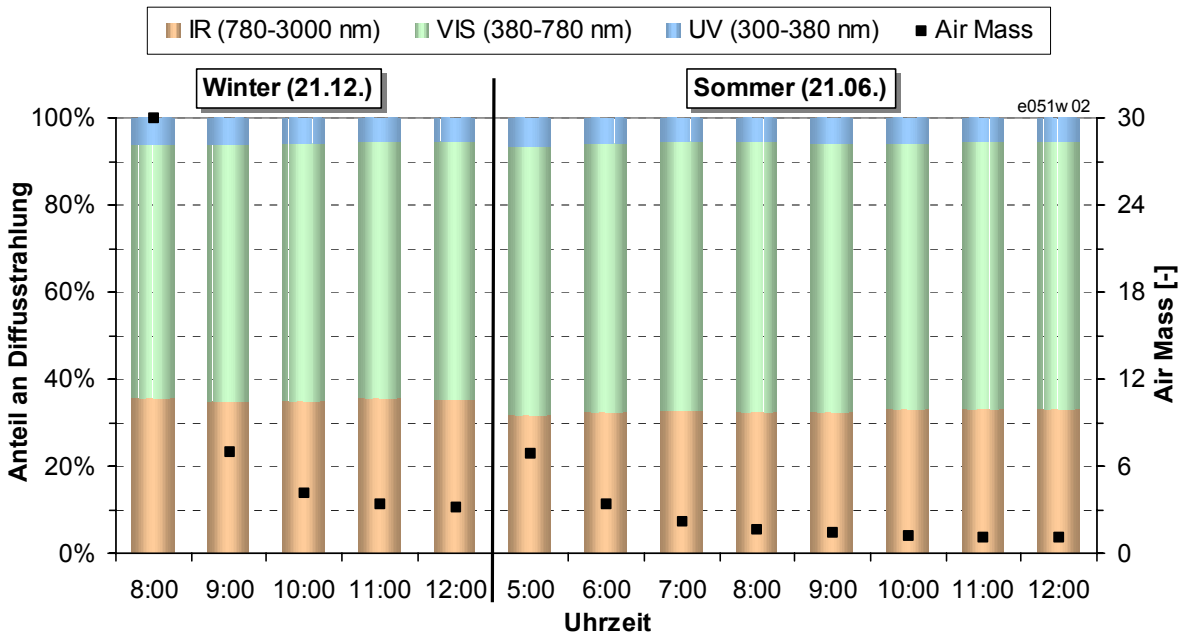

Abbildung 5-10: Verlauf der prozentualen Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der gesamten Diffusstrahlung sowie die jeweilige Air Mass für die erste Tageshälfte eines bewölkten Winter- und Sommertags in Süddeutschland.

5.3 Sonnensimulator

Der Sonnensimulator ist die Prüfstandskomponente zur Nachbildung der solaren Einstrahlung (Abbildung 11-3). Er besteht im wesentlichen aus drei Komponenten:

- der Strahlerplattform, auf der die Leuchtensysteme montiert sind,
- der Bewegungsmechanik, die zur Ausrichtung der Plattform je nach Sonnenstand dient,
- der SPS-Steuerung, die einen automatisierten Betrieb des Sonnensimulators ermöglicht.

5.3.1 Auswahl und Dimensionierung der Lampen und Reflektoren

Die auf der Erde ankommende solare Strahlung kann aufgrund der großen Entfernung zwischen Sonne und Erde praktisch als Parallelstrahlung betrachtet werden. Daher ist die Simulationsanlage, um ebenfalls nahezu parallele Strahlung erzeugen zu können, als flächiger Strahler konzipiert. Dies wird erreicht, indem mehrere einzelne Strahlersysteme gleichmäßig auf einer Fläche verteilt sind, die der zu bestrahlenden Fläche entspricht. Durch Reflektoren mit geringen Öffnungswinkeln wird gleichzeitig eine gute Strahlungsbündelung der einzelnen Lampen erreicht.

Durch die Bewegung der Strahlerplattform können für den Sonnensimulator nur Lampen verwendet werden, die in verschiedenen Stellungen betrieben werden dürfen. Während des Be-

triebs des Simulators können dabei beliebige Lampenstellungen zwischen waagrecht und senkrecht (mit Sockel oben) auftreten. Weiterhin sollten die Lampen eine ausreichende Lebensdauer (> 1000 h) aufweisen.

Die Auswahl der eingesetzten Lampentypen beruht auf der Vorgabe, das Sonnenspektrum nachzubilden und dabei eine Veränderbarkeit des erzeugten Spektrums nach den in den Abschnitten 5.1.3 und 5.2.2 beschriebenen Grundlagen vorzusehen. Dies wird durch eine Kombination zweier Lampentypen realisiert, die sich in ihrem Spektrum unterscheiden. Die verwendeten Halogen-Metalldampflampen (HQI) mit sogenanntem „Tageslichtspektrum“ bilden dabei vor allem das solare Spektrum im sichtbaren Wellenlängenbereich nach. Für eine ausreichende Bestrahlungsstärke im langwelligen Spektralbereich, der von den Halogen-Metalldampflampen nicht abgedeckt wird, werden als zweiter Lampentyp Halogenglühlampen (im weiteren als „Halogen“/“Halogenlampen“ bezeichnet) eingesetzt. In **Abbildung 5-11** ist die spektrale Bestrahlungsstärke jeweils einer Lampe der beiden installierten Typen im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 1000 nm dargestellt, normiert auf den höchsten vorkommenden Wert (HQI bei 530 nm).

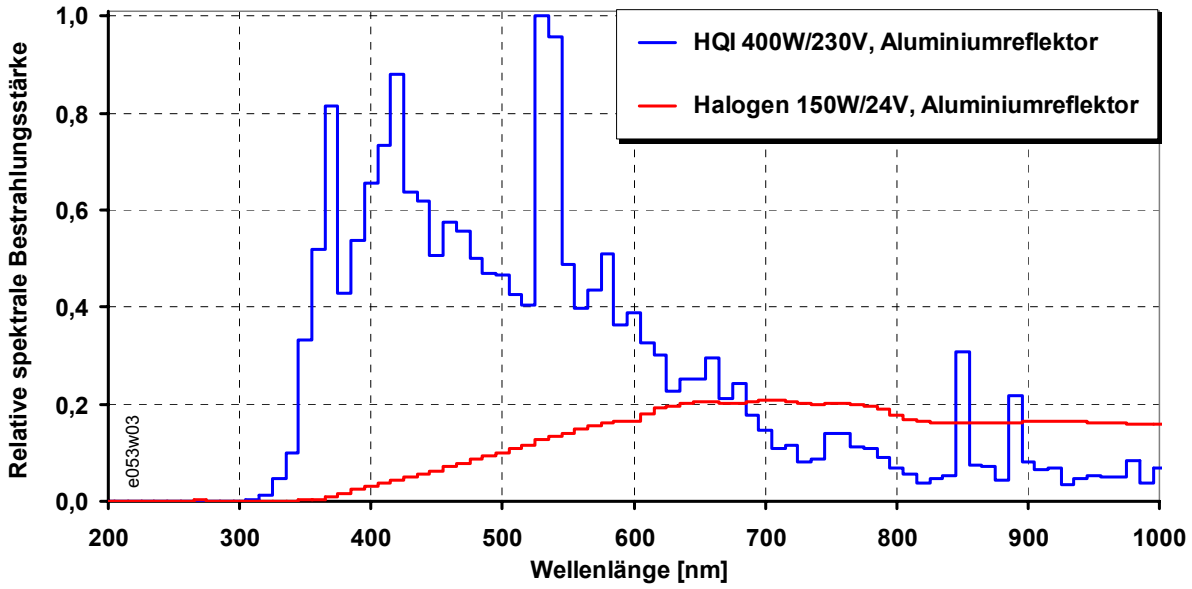

Abbildung 5-11: Relative spektrale Bestrahlungsstärke (bezogen auf den höchsten Wert) jeweils eines HQI- und Halogensystems im Vergleich.

Durch geeignete Mischung beider Lampentypen im Betrieb kann das Sonnenspektrum unterschiedlicher Tages- und Jahreszeiten in guter Näherung nachgebildet werden. In **Abbildung 5-12** und **Abbildung 5-13** ist dies beispielhaft für das Sonnenspektrum am Mittag eines Sommer- sowie Wintertags dargestellt.

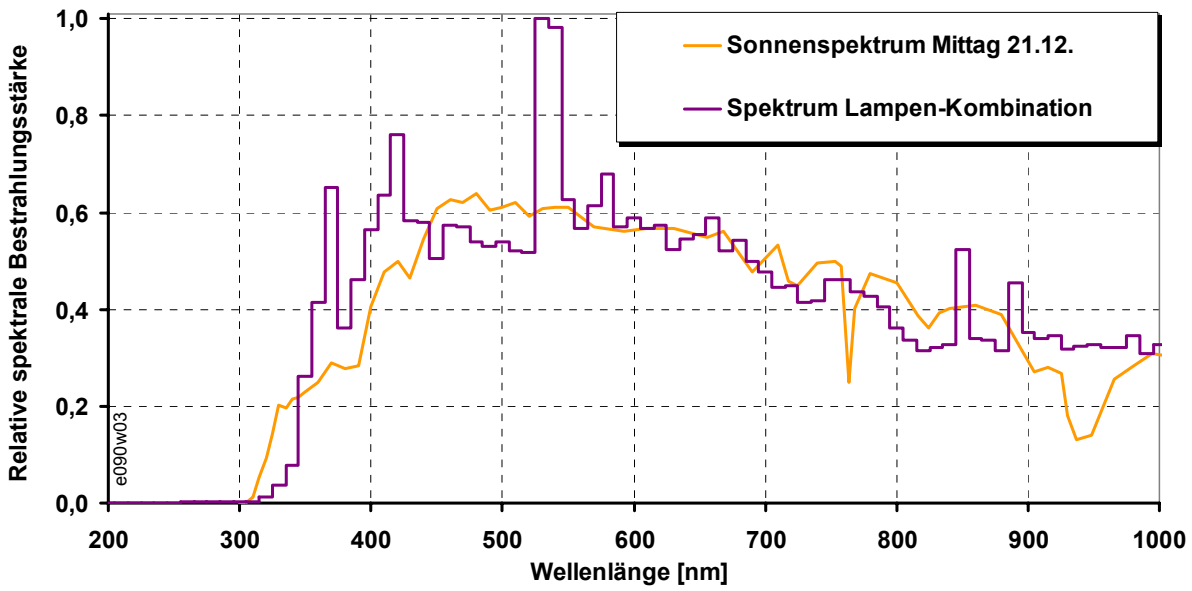

Abbildung 5-12: Relative spektrale Bestrahlungsstärke (bezogen auf den höchsten Wert) einer Kombination aus HQI- und Halogenlampen im Vergleich zum Sonnenspektrum eines Wintertages.

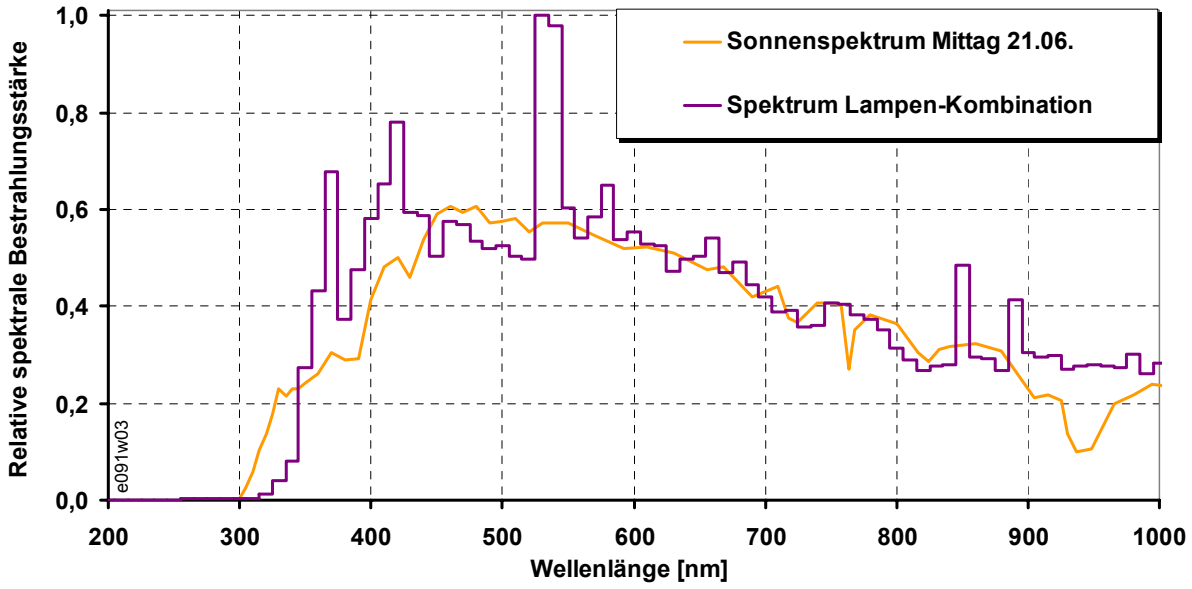

Abbildung 5-13: Relative spektrale Bestrahlungsstärke (bezogen auf den höchsten Wert) einer Kombination aus HQI- und Halogenlampen im Vergleich zum Sonnenspektrum eines Sommertages.

Die Anordnung der Strahlersysteme auf der Plattform zeigt **Abbildung 5-14**. Die Außenabmessungen des Lampenfelds mit einer Breite von 147 cm und einer Höhe von 136 cm entspricht der Größe des Modellraumfensters. Auf dieser Fläche sind 26 HQI-Systeme mit

400 W-Lampen und Aluminiumreflektoren sowie 80 Halogen-Systeme mit 150 W-Lampen verteilt.

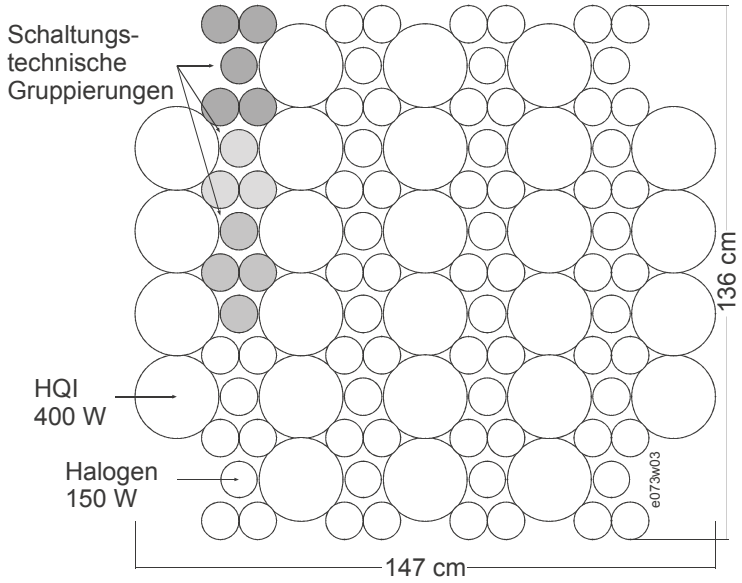

Abbildung 5-14: Realisierte Anordnung der HQI- und Halogensysteme auf der Strahlerplattform; Dargestellt sind die Außenabmessungen der Reflektoren.

Die HQI-Lampen können alle einzeln geschaltet werden. Die Halogenlampen sind zu Gruppen zusammengefasst, jede Gruppe ist separat schaltbar. Alle Halogenlampen zusammen können zudem stufenlos gedimmt werden. Die Aufteilung der installierten Leistung auf eine größere Anzahl einzelner Lampen hat durch ihre Überlagerung eine gleichmäßigere Verteilung der Bestrahlungsstärke auf der bestrahlten Fläche zur Folge. Zudem kann die Leistung besser eingestellt werden. Bei den verschiedenen Sonnenpositionen im Laufe eines simulierten Tages ist gerade bei großen Einstrahlwinkeln die projizierte Fensterfläche deutlich kleiner, die benötigte Bestrahlungsstärke aber unvermindert hoch. Die Strahlungsleistung darf dabei nur durch einen Teil der installierten Strahlersysteme erbracht werden, da durch die Verringerung der zu bestrahlenden Fläche die restlichen Systeme nicht das Fenster, sondern die Modellraumfassade bestrahlen würden. Mit der realisierten Konfiguration kann auch bei diesen Betriebszuständen eine ausreichende Bestrahlungsstärke erzielt werden.

Für die Dimensionierung der Lampen und Auswahl der Reflektoren wurden zuerst einzelne Lampen-Reflektor-Kombinationen vor Ort auf der Strahlerplattform vermessen. Neben den installierten Halogen-Metalldampflampen mit einer elektrischen Leistung von 400 W wurde auch die Verwendung von Lampen mit 250 W geprüft. Weiterhin standen zwei verschiedene, für diese Lampen geeignete Reflektortypen (Glas und Aluminium) zur Messung zur Verfügung.

Bei den Messungen wurde jeweils die Bestrahlungsstärkeverteilungskurve in der Ebene des Modellraumfensters bei senkrechter Einstrahlung ermittelt. Der Einfluss des Glasvorbaus durch die absorbierende und reflektierende Wirkung der Glasscheiben wurde dabei mit berücksichtigt. Die Messungen wurden mit einem Pyranometer durchgeführt, das eine zur Bestrahlungsstärke proportionale Ausgangsspannung liefert. Das verwendete Pyranometer erfasst dabei einen Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2800 nm. In **Abbildung 5-15** ist das Ergebnis dieser Messungen für die Kombinationen HQI 250 W und einem Glasreflektor sowie der HQI 400 W und einem Aluminiumreflektor dargestellt.

Die Abbildung zeigt die gemessene Kurve der Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit vom Abstand zum Mittelpunkt der Verteilungskurve. Der Mittelpunkt ist dabei als der Punkt mit dem höchsten Wert der Bestrahlungsstärke zu verstehen. Die Messung erfolgt von diesem Punkt ausgehend in radialer Richtung. Auffallend ist der große Unterschied der Bestrahlungsstärke im Mittelpunkt (0 cm) zwischen den beiden Systemen. Dies kann nicht nur auf die unterschiedlichen Leistungen der beiden Lampen zurückgeführt werden, sondern liegt auch an der geringeren Bündelung durch den Glasreflektor.

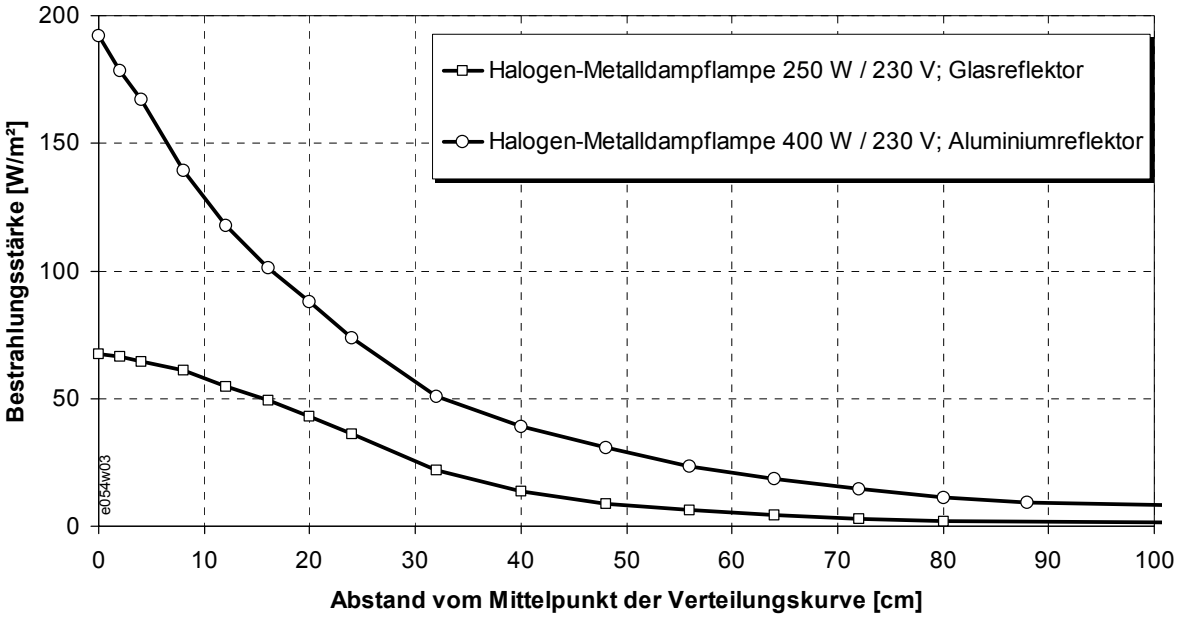

Abbildung 5-15: Gemessene Bestrahlungsstärkeverteilung von zwei Lampen-Reflektor-Kombinationen mit Halogen-Metalldampflampen.

Neben den HQI-Systemen mit ihren großen Reflektoren können nur Halogensysteme mit kleinen Reflektordurchmessern auf der Plattform untergebracht werden. Hier werden Niedervolt-Halogenlampen mit einer Versorgungsspannung von 24 V eingesetzt. Neben den installierten Lampen mit 150 W Leistung wurden dabei auch 100 W Lampen vermessen. Beide können mit Reflektoren mit einem Öffnungswinkel von 8° bezogen werden. Auch diese Systeme wurden auf die Plattform montiert und vermessen. **Abbildung 5-16** zeigt wiederum die ermittelte

Verteilungskurve der Bestrahlungsstärke in der Ebene des Modellraumfensters. Da jeweils die gleiche Reflektorbauart verwendet wurde, sind die Unterschiede in den Verteilungskurven auf die unterschiedlichen Leistungen der Lampen zurückzuführen.

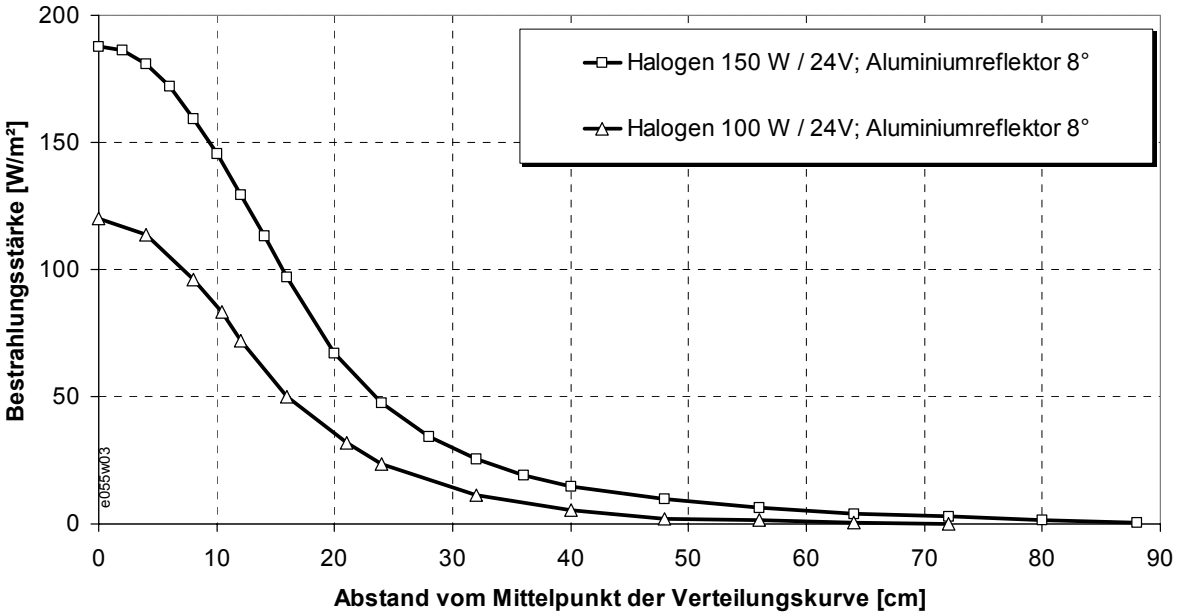

Abbildung 5-16: Gemessene Bestrahlungsstärkeverteilung von zwei Lampen-Reflektor-Kombinationen mit Halogenlampen.

Die beschriebenen Messungen bilden wiederum Eingangsdaten für die Berechnung der Bestrahlungsstärke sowie deren Verteilung an der Fensterfläche der Modellraumfassade. Dabei werden die einzelnen Verteilungskurven der Lampen entsprechend ihrer Positionierung auf der Strahlerplattform überlagert. Eine genaue Beschreibung dieses Berechnungsprogramms erfolgt in Abschnitt 5.4. Die für die installierten Strahlersysteme und deren Anordnung berechnete maximal erzeugbare Bestrahlungsstärke am Modellraumfenster ist in **Abbildung 5-17** dargestellt. Die Berechnung bezieht sich auf senkrechte Einstrahlung und Betrieb aller Lampen unter Berücksichtigung der Verluste durch die Glasscheiben des Vorbaus. Die Abbildung zeigt die Verteilung der Bestrahlungsstärke über der Glasfläche des Fensters. Die höchsten Werte konzentrieren sich auf die Flächenmitte. Zum Rand der Glasfläche nimmt die Bestrahlungsstärke stark ab, so dass die Fassade um das Fenster nur geringen Bestrahlungsstärken ausgesetzt wird. Die mittlere Bestrahlungsstärke auf der Fläche beträgt für diesen Fall 2170 W/m². Diese scheinbare Überdimensionierung ist notwendig, um auch bei ungünstigen Plattformpositionen, bei denen nur ein geringer Teil der installierten Strahler verwendet werden darf, eine hohe Bestrahlungsstärke erzeugen zu können. Weiterhin wird eine Leistungsreserve bei den HQI- wie auch den Halogenlampen benötigt, um die spektrale Mischung beider Lampentypen zu ermöglichen.

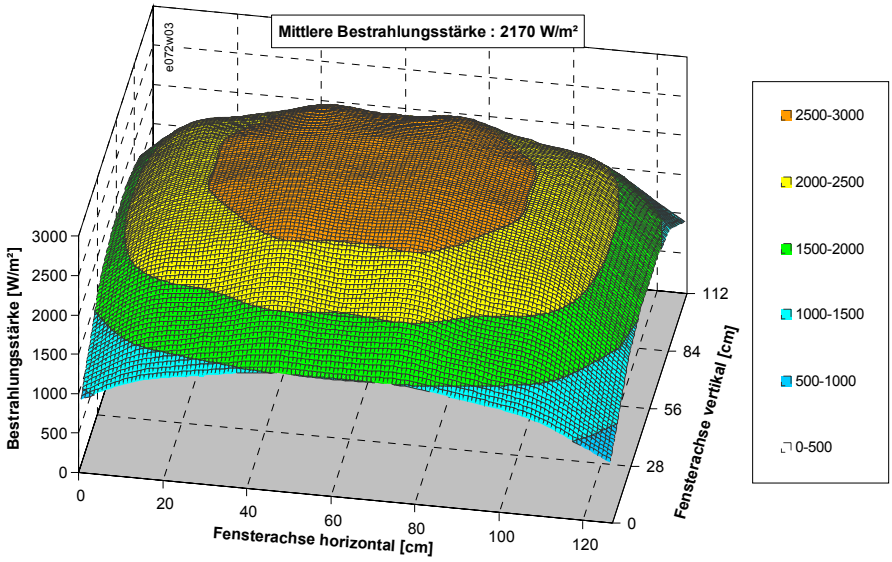

Abbildung 5-17: Berechnete Bestrahlungsstärkeverteilung über der Fensterfläche bei senkrechter Einstrahlung für die realisierte Konfiguration mit 26 HQI-Systemen (je 400 W) sowie 80 Halogensystemen (je 150 W).

Ein Vergleich der Ergebnisse mehrerer Berechnungen für verschiedene Tages- und Jahreszeiten sowie Fassadenorientierungen mit den jeweils erforderlichen Bestrahlungsstärken bildete letztendlich die Grundlage für die Auswahl der Lampen und Reflektoren.

5.3.2 Strahlerplattform

Die Strahlerplattform (Abbildung 11-4 im Anhang) besteht aus gitterförmig angeordneten Aluminium-Profilen als Träger der Strahlereinheiten. Die Plattform ist größer als das Fenster der Modellraumfassade, so dass die darauf zu montierenden Strahler entsprechend der Form des Fensters angeordnet werden können. Durch einen gleichmäßigen Gitterabstand wird ein Raster gebildet, in das die vormontierten Strahlereinheiten leicht eingesetzt werden können. Die Strahlereinheiten bestehen dabei jeweils aus einem Trägerrahmen, der die Fassungen, Reflektoren sowie elektrischen Anschlüsse aufnimmt. Bei den HQI-Systemen ist zusätzlich das Zündgerät auf der Trägereinheit untergebracht. Eine Strahlereinheit der Halogensysteme beinhaltet immer eine komplette Gruppe von Halogenlampen, wie sie in Abbildung 5-14 dargestellt sind. Zusätzlich ist hier jeweils ein Transformator untergebracht, der auf die jeweilige Gruppenleistung ausgelegt ist. Alle Steuer- und Stromleitungen für die Strahlerplattform werden mittels einer Kabelraupe über die Leiter der Bewegungsmechanik geführt, so dass eine freie Bewegung sichergestellt ist. Die Befestigung der Plattform am Schlitten der Bewegungsmechanik erfolgt über ein horizontales Gelenk, um die Plattform in ihrer Neigung verändern und justieren zu können.

5.3.3 Bewegungsmechanik

Die Bewegungs- oder auch Fahrmechanik des Sonnensimulators ist darauf ausgelegt, die Ausrichtung der Strahlerplattform (Abschnitt 5.3.2) entsprechend realer Tagesgänge des Sonnenstands relativ zum Fenster der Modellraumaußenfassade zu ermöglichen. Darunter ist die dynamische Positionierung im Laufe eines Tages sowie für alle Tage eines Jahres unter Berücksichtigung der Fassadenausrichtung und der angenommen geographischen Breite des Modellraums zu verstehen. Entscheidende Größen sind hierbei der jeweilige Sonnen-Azimut bezogen auf die Fassadenausrichtung sowie die Elevation.

Aufgrund dieser Angaben wurde eine Bewegungsmechanik entworfen, die einen symmetrischen horizontalen Bewegungsbereich von 170° um die Modellraumfassade und einen vertikalen Bereich von 85° aufweist. Die Strahlerplattform ist darauf ausgelegt, nur das Fenster der Modellraumfassade zu bestrahlen. Damit ist durch die Fahrmechanik eine ständige Ausrichtung der Plattform auf die Fenstermitte zu gewährleisten, die über eine Bewegung auf kreisförmigen Bahnen um die Modellraumfassade realisiert wird. Die Mittelpunkte für beide Bewegungskreise (horizontal sowie vertikal) sollten sich demnach in der jeweiligen Mitte des Fensters der Modellraumfassade befinden. Bei der Planung der beiden entsprechenden Bewegungskreisabschnitte mussten neben den geometrischen Abmessungen des Modellraums sowie des Glasvorbaus weiterhin die räumlichen Gegebenheiten der Laborhalle berücksichtigt werden. In **Abbildung 5-18** ist eine Teilansicht des Prüfstands von oben und der begrenzende Bereich der Laborhalle dargestellt.

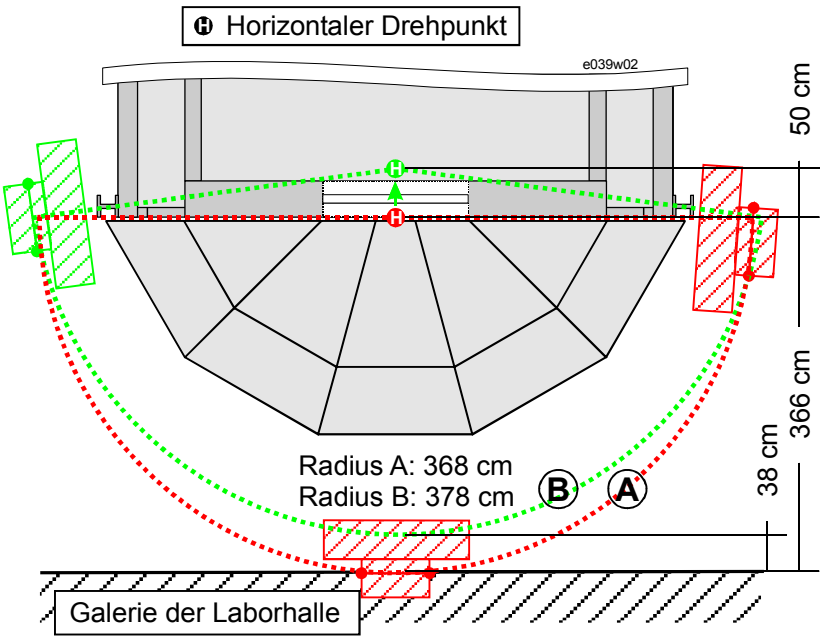

Abbildung 5-18: Teilansicht des Prüfstands von oben; Horizontaler Bewegungsbereich der Fahrmechanik.

Der rote Bewegungshalbkreis A ergibt sich ausgehend vom Mittelpunkt in der Fenstermitte. Seinen Radius von 3,68 m erhält man unter Berücksichtigung der Bautiefe der Strahlerplattform, die von der Fahrmechanik bewegt werden soll, sowie den Abmessungen des Prüfstands. Der geringste Abstand zum restlichen Prüfstand ist dabei im seitlichen Bereich (max. horizontaler Drehwinkel) zu den dortigen senkrechten Stahlträgern der Deckentragekonstruktion zu finden. Der Halbkreis A besitzt somit den kleinsten möglichen Radius für die horizontale Bewegung. Durch die eingeschränkten Platzverhältnisse in der Laborhalle konnte dieser Bewegungskreis jedoch nicht umgesetzt werden. Im Scheitelpunkt des Halbkreises behindert hier eine Galerie der Laborhalle die Bewegung. Um einen ausreichenden Abstand zur Galerie zu gewinnen, musste der Mittelpunkt des Drehkreises um 50 cm nach hinten versetzt werden. Bei gleichzeitiger Vergrößerung des Radius, um den seitlichen Abstand wieder zu gewährleisten, ergibt sich der in Abbildung 5-18 dargestellte Bewegungskreis B mit einem Radius von 3,78 m.

Die Verschiebung des horizontalen Drehpunktes hat direkte Auswirkung auf den vertikalen Bewegungsbereich der Fahrmechanik, wie in **Abbildung 5-19** dargestellt. Die Abbildung zeigt eine Seitenansicht des relevanten Teils des Prüfstands. Da der vertikale Drehpunkt nicht mit verschoben werden soll und somit weiterhin in der Fenstermitte verbleibt, verkleinert sich durch die Verschiebung des horizontalen Drehpunktes der Radius des vertikalen Bewegungskreises. Der resultierende Drehkreis C in Abbildung 5-19 weist keine weiteren Konfliktpunkte mit dem Prüfstand und der Galerie auf; es verbleibt in jeder Position ein ausreichender Abstand.

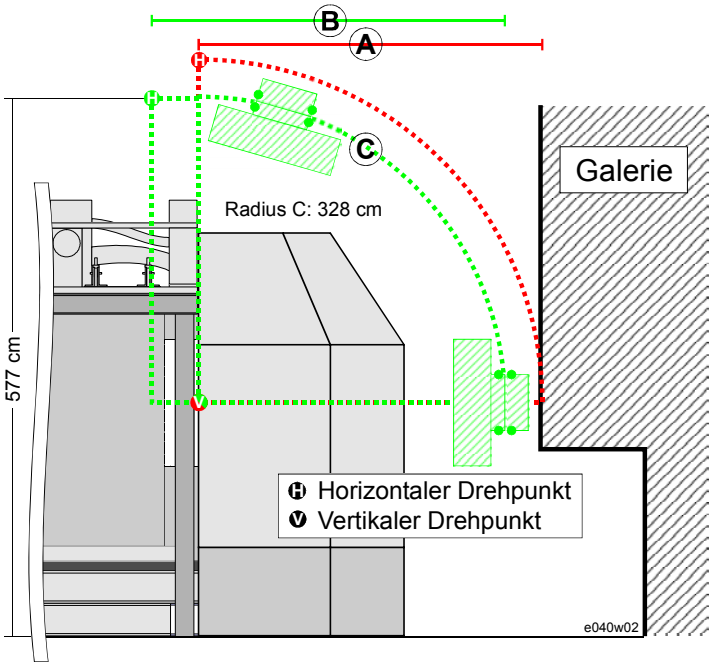

Abbildung 5-19: Teilansicht des Prüfstands von der Seite; Vertikaler Bewegungsbereich der Fahrmechanik.

Die Fahrmechanik ist in einer leiterartigen Rohrgerüstkonstruktion ausgeführt, auf der sich ein Schlitten bewegen kann. Dieser Schlitten trägt letztendlich die Strahlerplattform. In **Abbildung 5-20** ist die obere Hälfte des Rohrgerüsts mit dem horizontalen Drehgelenk zu erkennen. Das Drehgelenk ist in einem pyramidenförmigen Stahlgestell befestigt, das wiederum auf der Lüftungsbrücke montiert ist. Das Drehgelenk befindet sich damit auf der, in Abbildung 5-19 ermittelten Höhe von 5,77 m über dem Hallenboden. Das Rohrgerüst formt einen 90°-Bogen mit einem Radius von 3,28 m entsprechend dem ermittelten vertikalen Drehradius, und reicht im weiteren Verlauf tangential bis zum Hallenboden, wo es auf zwei Rädern gelagert ist (Abbildung 2-1).

Abbildung 5-20: Teilansicht Sonnenfahrmechanik im Bauzustand; Rohrleiter, horizontales Drehgelenk und oberer Auflagepunkt.

Der Antrieb für die Drehbewegung der Leiter befindet sich ebenfalls am unteren Ende. Ein Elektromotor treibt hier über ein Getriebe eines der Räder an. Der Motor bildet dabei mit dem Getriebe und dem Rad eine im Leitergerüst dreh- und justierbare Einheit. Da am Hallenboden keine Führungseinrichtung angebracht werden konnte, sind die Räder entsprechend der Kreisbahn ausgerichtet, um die „Spurtreue“ der Fahrmechanik zu gewährleisten. Vor allem bei der Bewegung im Uhrzeigersinn, entsprechend der Bahnrichtung der realen Sonne, würde eine Abweichung von der geplanten Fahrbahn eine vertikale Dejustierung der Einstrahlungsrichtung nach sich ziehen. Die horizontale Position der Leiter wird mittels eines Winkelgebers

erfasst, der direkt am Drehgelenk angebracht ist. Dieser liefert ein dem Winkel proportionales elektrisches Signal, das der Steuerung zugeführt wird. Mechanische Endschalter am Drehgelenk verhindern ein Überfahren der maximalen seitlichen Positionen und damit eine Kollision mit dem Prüfstand. Diese Endschalter sind zusätzlich zur Positionsüberwachung der Steuerung als redundante Sicherheitseinrichtung angebracht.

Der Schlitten für die vertikale Bewegung der Strahlerplattform hängt an der Rohrleiter und ist ähnlich wie ein Achterbahnwagen montiert. Die Aufhängung des Schlittens erfolgt durch jeweils zwei konkav geformte Rollen pro Aufhängungspunkt, die jeweils ein Rohr der Leiter umfassen. Die Bewegung und Positionierung des Schlittens erfolgt durch eine Seilwinde am oberen Ende der Leiter. Die Position wird mittels eines Seillängengebers ermittelt, der über dem oberen Ende der Leiter angebracht ist. Dessen Messseil ist am Schlitten angehängt und über den Bogen der Leiter geführt. Die Seillänge entspricht somit der Länge des Kreisbogens und ist ein Maß für den Höhenwinkel. An den Enden der Rohrleiter sind wieder jeweils mechanische Endschalter angebracht, die redundant zur Steuerung ein Überfahren der maximalen Positionen verhindern.

5.3.4 Steuerung

Die Steuerung des Sonnensimulators wird zentral von einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) übernommen, die ihre auszuführenden Befehle, wie in Abschnitt 3.6 beschrieben, von einem Computer über eine serielle Schnittstelle (RS232) erhält. In den Schaltschränken der Sonnensteuerung ist neben den steuerungstechnischen Bauelementen weiterhin die gesamte elektrische Anbindung untergebracht, soweit diese nicht direkt an der Bewegungsmechanik und der Strahlerplattform installiert ist.

Für die Positionierung der Plattform werden der SPS der Azimut und die Elevation des geforderten Sonnenstands vom PC übertragen. Unterschiedliche Orientierungen der Modellraumfassade sind dabei bereits bei der Berechnung der Fahrplandaten zu berücksichtigen. Die im Abschnitt 5.3.3 beschriebenen Messeinrichtungen der Plattformposition sind an der SPS angeschlossen. Diese berechnet aus den Spannungssignalen den jeweiligen aktuellen Winkel. Durch einen kontinuierlichen Vergleich von Soll- und Ist-Position werden die notwendigen Bewegungen ermittelt und entsprechend die Motoren der Bewegungsmechanik angesteuert. Die Begrenzung der Bewegungsbereiche ist zusätzlich in der SPS-Software hinterlegt, so dass redundant zu den mechanischen Endschaltern die Einhaltung dieser Grenzen sichergestellt ist. Somit ist die SPS selbständig in der Lage, den vom PC vorgegeben Sonnenstand zuverlässig einzustellen.

Die SPS steuert und überwacht darüber hinaus auch die Lampen sowie Lampengruppen der Strahlerplattform. Das Schalt- und Anschlussschema für jeweils eine HQI-Lampe und eine Halogen-Lampengruppe ist in **Abbildung 5-21** dargestellt. Für jede Halogen-Gruppe befindet

sich auf der Plattform ein 220 V / 24 V-Transformator. Sein Übersetzungsverhältnis kompensiert dabei den Spannungsfall auf den langen Leitungen zwischen Plattform und Steuerungsschrank. Über einen Dimmer, der von der SPS gesteuert wird, kann die Leistung der Halogenlampengruppen stufenlos eingestellt werden. Die Schaltung der einzelnen Gruppen erfolgt über mechanische Relais, die von Digitalausgängen der SPS angesteuert werden.

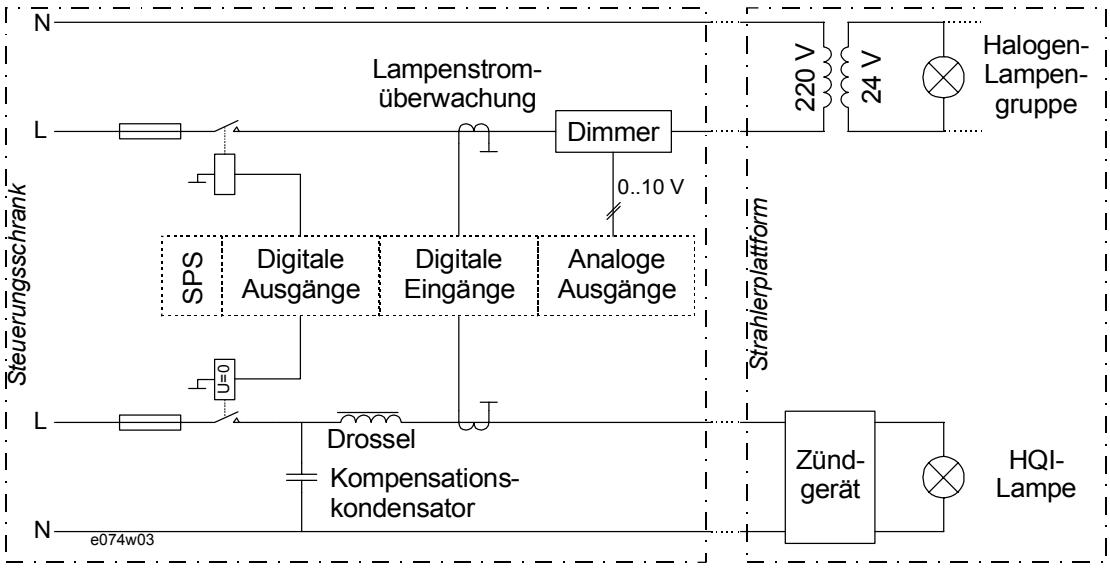

Abbildung 5-21: Schalt- und Anschlussschema jeweils einer HQI-Lampe und einer Halogenlampengruppe.

Zum Betrieb der HQI-Lampen ist neben dem Zündgerät auf der Strahlerplattform eine Drossel zur Begrenzung des Lampenstroms sowie eine Blindstromkompensation durch einen Kondensator notwendig. Die Schaltung der Lampen erfolgt durch elektronische Nullspannungsrelais. Die in Abbildung 5-21 dargestellte Lampenstromüberwachung besteht aus einem Stromwandler, der durch seine Auslegung am digitalen Eingang der SPS den Betriebszustand der jeweiligen Lampe anzeigt. Sie dient zur Kontrolle des Lampenbetriebs sowie zur Feststellung von ausgefallenen Lampen. Das Signal der Lampenstromüberwachung ist Teil der Zustandsdaten, die von der SPS an den steuernden PC kontinuierlich übermittelt werden. Zu diesen Daten gehören weiterhin die aktuell verwendeten Sollwert-Vorgaben, die Schaltzustände der Lampen und Lampengruppen, die Ansteuerung der Dimmer sowie die Position der Plattform. Die SPS führt einen einmal erhaltenen Befehl so lange aus, bis sie neue Vorgaben erhält. Ein Beispiel für einen Fahrplanbefehl, wie er im Befehlsspeicher der PC-Software hinterlegt wird (Abschnitt 3.6), zeigt **Tabelle 5-2**. Der 'Zeitpunkt der Ausführung' gibt an, wann die Daten an die SPS zu übergeben sind und entspricht dabei nicht dem Zeitpunkt des simulierten Tags. Es folgen Elevation und Azimut für die Positionierung der Plattform (in °; die Angabe zum Azimut ist dabei relativ zur Fassadenorientierung), sowie die Vorgabe für die Dimmer der Halogenlampengruppen (in % bezogen auf die analoge Steuerspannung, 100 % bedeutet unge-

dimmter Betrieb). Bei den Angaben zu den Lampenfeldern steht jede Ziffer für eine Lampe beziehungsweise Lampengruppe und beinhaltet die binäre Vorgabe des Schaltzustands. In einer entsprechenden Form erhält der Steuerungscomputer den Anlagenzustand von der SPS übermittelt und protokolliert diese Daten.

Tabelle 5-2: Beispiel eines Fahrplanbefehls für den Sonnensimulator.

Zeitpunkt der Ausführung	Elevation	Azimut	Dimmung Halogen	HQI-Feld	Halogen-Feld
05.04.02 12:30:00	30	93	75	000001111010111 110111110000010	0000110000 0111010000

Eine weitere Komponente der elektrischen Anbindung des Sonnensimulators beinhaltet eine kontinuierliche Spannungsmessung aller drei Phasen am zentralen Stromanschluss. Die Messwerte werden über die SPS dem Steuerungscomputer zugeführt, der sie protokolliert. Die Messung der Spannung ist notwendig, da die Betriebsdaten der Halogen- wie auch der HQI-Lampen erheblich von der Betriebsspannung abhängig sind. Die im Netz der Laborhalle festgestellten Spannungsschwankungen betragen teilweise bis zu 6 % bezogen auf die Nennspannung von 230 V. Da die Betriebsdaten des Sonnensimulators für eine Versuchsdurchführung (Abschnitt 5.4) auf eine einheitliche Spannung bezogen werden, ist die Kenntnis der tatsächlichen Spannung während des Versuchs zur Auswertung notwendig.

In der beschriebenen Form ermöglicht die Steuerung einen kontinuierlichen Betrieb des Sonnensimulators auch über längere Zeiträume. Alle relevanten Daten stehen für eine unmittelbare oder zeitversetzte Auswertung zur Verfügung. Durch die integrierten Sicherheits- und Meldeeinrichtungen kann auf unerwartete Störungen des Betriebs schnell reagiert werden, bei gleichzeitiger Vermeidung eventueller Beschädigung des Prüfstands.

5.4 Berechnung der Betriebsdaten für den Sonnensimulator

Ein wichtiger Arbeitsschritt für die Durchführung von Prüfstandsversuchen ist die Erstellung der Fahrplandaten für den Sonnensimulator zur Simulation ganzer Tages- oder Mehrtagesgänge. Wie aus Abbildung 5-17 (Abschnitt 5.3.1) ersichtlich ist, ist die durch die Strahlerplattform erzeugte Bestrahlungsstärke am Modellraumfenster nicht konstant über der Fläche. Um während des Betriebs eine kontinuierliche Messung der Bestrahlungsstärke durchführen zu können, müsste ein Raster aus Sensoren auf der Fensterfläche verteilt werden, aus deren Messwerten die mittlere Bestrahlungsstärke auf der Fläche ermittelt werden könnte. Aufgrund der unvermeidbaren Abschattung durch die Sensoren und des technischen Aufwands wurde diese Methode nicht realisiert. Statt dessen wird die zu erzeugende Bestrahlungsstärke für die

gesamte Versuchsdauer vorher berechnet und ein entsprechender Fahrplan für die Steuerung der Lampen erstellt. Eine Übersicht der Methodik zur Berechnung der Fahrplandaten für den Simulator aus Standort- und Klimadaten zeigt **Abbildung 5-22**.

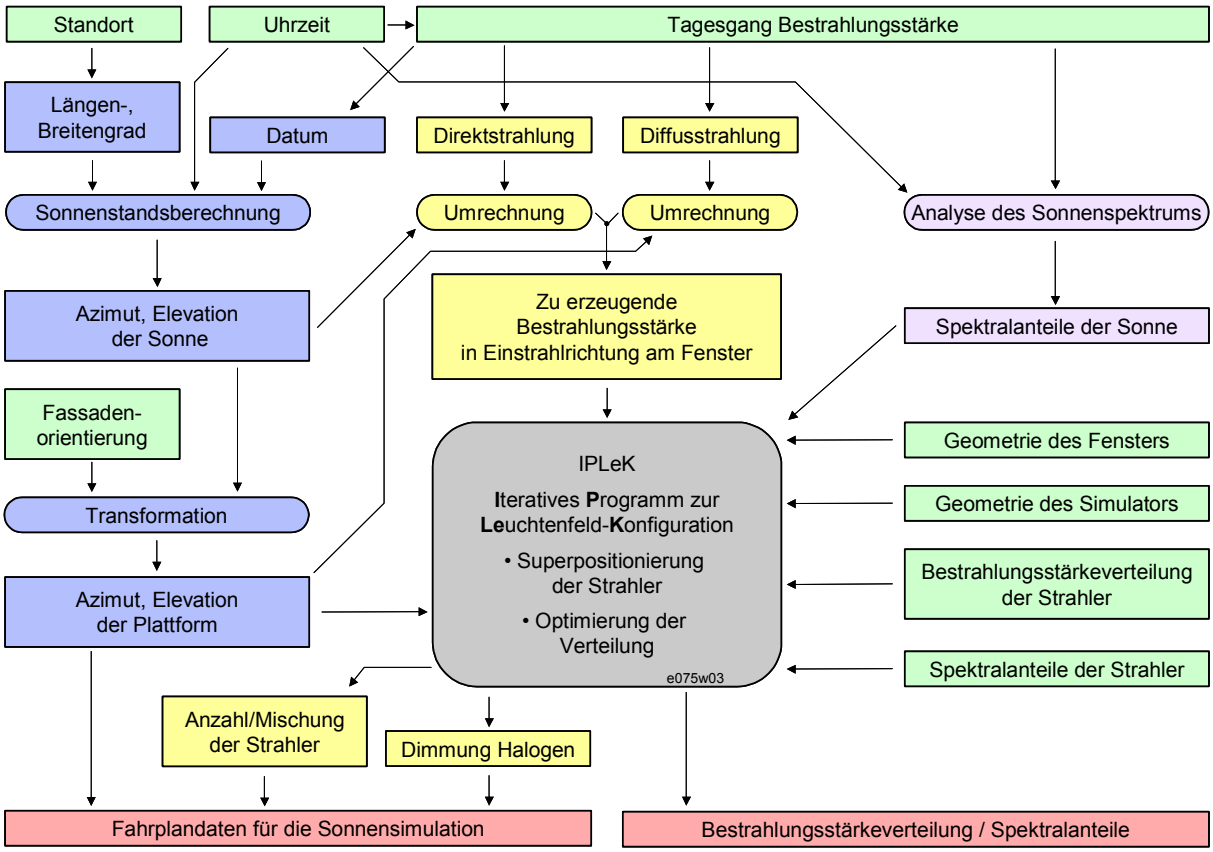

Abbildung 5-22: Übersicht zur Berechnungsmethodik der Betriebsdaten für den Sonnensimulator.

Ausgangsbasis für die Berechnung von Fahrplandaten für den Simulator sind ein bestimmter Tagesgang der Bestrahlungsstärke (Direkt- und Diffusstrahlung) sowie Daten des entsprechenden Standorts. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Prüfstandsversuche wurde der im Abschnitt 4.1 beschriebene Tagesgang des sonnigen Wintertages verwendet. Das Datum dieses Tages, das als Eingangswert für die Berechnung benötigt wird, ist der 20. Februar beziehungsweise Tag 51 im Jahr. Der Standort ist München mit einem Längengrad λ_L von 011°30' Ost sowie einem Breitengrad φ von 48°10' Nord. Für die Berechnung der Betriebsdaten eines Tagesfahrplans sind die in Abbildung 5-22 dargestellten Berechnungsschritte für jeden Zeitschritt durchzuführen. Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein 15-Minuten Intervall verwendet. Zuerst erfolgt die Ermittlung der Positionierungsdaten für die Strahlerplattform (in Abbildung 5-22 blau dargestellt). Anschließend werden die Eingangsdaten der Bestrahlungsstärke (gelb) sowie die Spektralanteile der Sonne (violett) berechnet, die im Konfigurationsprogramm IPLeK (grau) benötigt werden. Ergebnis dieser Be-

rechnungen sind die Fahrplandaten für die Steuerung des Sonnensimulators sowie die Bestrahlungsstärke und ihre Verteilung am Modellraumfenster.

Zu Beginn der Berechnung sind die Positionierungsdaten für die Strahlerplattform zu ermitteln. Mit den in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Grundlagen zur Sonnenstandsberechnung erhält man den Azimut α_S und die Elevation γ_S der Sonne zum betrachteten Zeitpunkt. Diese Werte müssen im nächsten Schritt unter Berücksichtigung der Fassadenorientierung ins Koordinatensystem des Simulators transformiert werden. Für den Azimut der Plattform α_{SP} erfolgt diese Umrechnung nach folgendem Zusammenhang:

$$\alpha_{SP} = \alpha_S - \alpha_{Fa} + 90° \qquad [°] \qquad (5\text{-}19)$$

mit α_{Fa} [°] : Azimut der Fassade ($-180° < \alpha_{Fa} \leq 180°$)

Der gültige Wertebereich für α_{SP} liegt zwischen 0° und 180°. Werte außerhalb dieses Bereichs werden von der SPS zwar angenommen, aufgrund des Bewegungsbereichs jedoch nicht ausgeführt. Die Elevation der Plattform entspricht der Sonnen-Elevation, hier ist keine weitere Berechnung notwendig.

Für den Betrieb des Simulators muss aus der, auf eine horizontale Fläche bezogenen, Bestrahlungsstärke des Tagesgangs die zu erzeugende Bestrahlungsstärke berechnet werden. Für den Anteil aus direkter Sonnenstrahlung ist diese Berechnung in Abschnitt 5.1.2 beschrieben (Gleichung 5-12). Der Anteil aus diffuser Himmelsstrahlung kann auch, wie in Abschnitt 5.2.1 dargestellt, durch die Strahlerplattform als direkte Strahlung erzeugt werden. Geht man von einem freien Horizont aus, so wird auf einer senkrechten Fassade nach Gleichung 5-16 die Hälfte der Diffusstrahlung der horizontalen Bezugsfläche wirksam. Diese kann wirkungsgleich als direkte Strahlung mit einem Einstrahlwinkel von 64° auf die Fensterfläche von der Plattform erzeugt werden. Unter der Annahme, die Plattform befände sich in einer Position, die diesen Einstrahlwinkel mit dem Fenster ergibt, kann die dafür notwendige zu erzeugende Bestrahlungsstärke $E'_{e,diff,SP}$ über nachfolgende Gleichung berechnet werden:

$$E'_{e,diff,SP} = \frac{E_{e,diff,hor}}{2 \cdot \cos 64°} \qquad [\text{W/m}^2] \qquad (5\text{-}20)$$

Da die Plattform jedoch entsprechend dem realen Sonnenstand bewegt wird, muss die zu erzeugende Bestrahlungsstärke entsprechend dem jeweils auftretenden Einstrahlwinkel auf die Fensterfläche angepasst werden. Unter Einbeziehung von Gleichung 5-20 folgt für die dem Sonnenstand angepasste Bestrahlungsstärke $E''_{e,diff,SP}$:

$$E''_{e,diff,SP} = E'_{e,diff,SP} \cdot \frac{\cos 64°}{\cos \theta_{Fe}} = \frac{E_{e,diff,hor}}{2 \cdot \cos \theta_{Fe}} \qquad [\text{W/m}^2] \qquad (5\text{-}21)$$

Bei der Einstrahlung auf das Fenster mit variierenden Einstrahlwinkeln muss die zu erzeugende Bestrahlungsstärke weiterhin auf das sich ändernde Transmissionsverhalten der Glasscheiben angepasst werden, um wieder die energetische Wirkung einer realen Diffusstrahlung zu erzielen. Dies erfolgt über den in Abschnitt 5.2.1 definierten relativen Transmissionsgrad τ_{rel}. Damit ergibt sich schließlich der erforderliche, von der Strahlerplattform als Direktstrahlung zu erzeugende Diffusstrahlungsanteil der Bestrahlungsstärke bezogen auf die Einstrahlrichtung ($E_{e,diff,SP}$) über folgende Berechnung:

$$E_{e,diff,SP} = E''_{e,diff,SP} \cdot \frac{\tau_{rel}(64°)}{\tau_{rel}(\theta_{Fe})} \qquad [\mathrm{W/m^2}] \qquad (5\text{-}22)$$

Als Eingangsgröße für das Programm zur Leuchtenfeldkonfiguration ist daraus die Summe aus den Anteilen der direkten und diffusen Bestrahlungsstärke zu bilden. Für den Tagesgang des sonnigen Wintertages ist in **Abbildung 5-23** das Ergebnis der Berechnungen dargestellt.

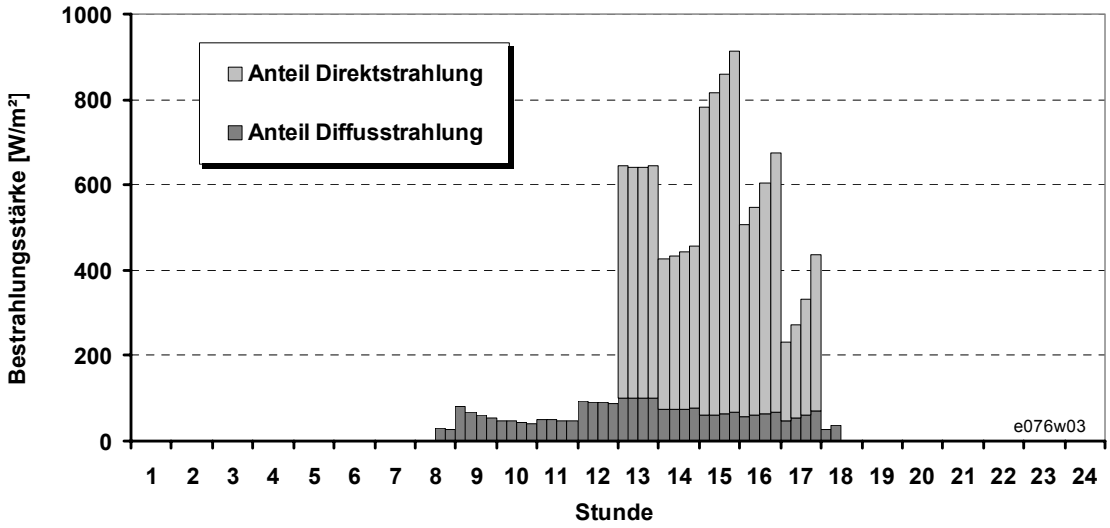

Abbildung 5-23: Tagesgang der von der Strahlerplattform am Modellraumfenster zu erzeugenden Bestrahlungsstärke (Bezugsfläche in Einstrahlrichtung) des sonnigen Wintertages.

Obwohl die Bestrahlungsstärke aus dem TRY8 eine zeitliche Auflösung von einer Stunde besitzt, treten ansteigende Werte innerhalb einer Stunde auf, da die Bestrahlungsstärke wegen der Bewegung der Sonne in 15 Minuten-Intervallen angepasst wird. Aufgrund des insgesamt „flachen“ Sonnenstands im Winter sind die zu erzeugenden Bestrahlungsstärken deutlich höher als die auf die Horizontale bezogenen Werte. Eine zu erzeugende Bestrahlungsstärke deutlich über 1000 W/m² kann jedoch nicht auftreten, weil aufgrund der Konzeption des Sonnensimulators der Anteil der Direktstrahlung an der erzeugten Strahlung dem der realen Sonne entspricht.

Eine weitere Eingangsgröße für die Leuchtenfeldkonfiguration ist die Aufteilung der globalen Bestrahlungsstärke in die Wellenlängenbereiche der ultravioletten, sichtbaren sowie infraroten Strahlung im Spektrum der Sonne. Die Analyse eines Tages erfolgt dabei separat für Direkt- und Diffusstrahlung nach der in den Abschnitten 5.1.3 und 5.2.2 beschriebenen Methodik. Durch Gewichtung dieser Ergebnisse mit der jeweiligen Bestrahlungsstärke aus den Klimadaten wird die für die Konfiguration des Leuchtenfelds notwendige spektrale Zusammensetzung der Globalstrahlung berechnet. **Abbildung 5-24** zeigt das Ergebnis dieser Berechnung im Tagesverlauf für den sonnigen Wintertag.

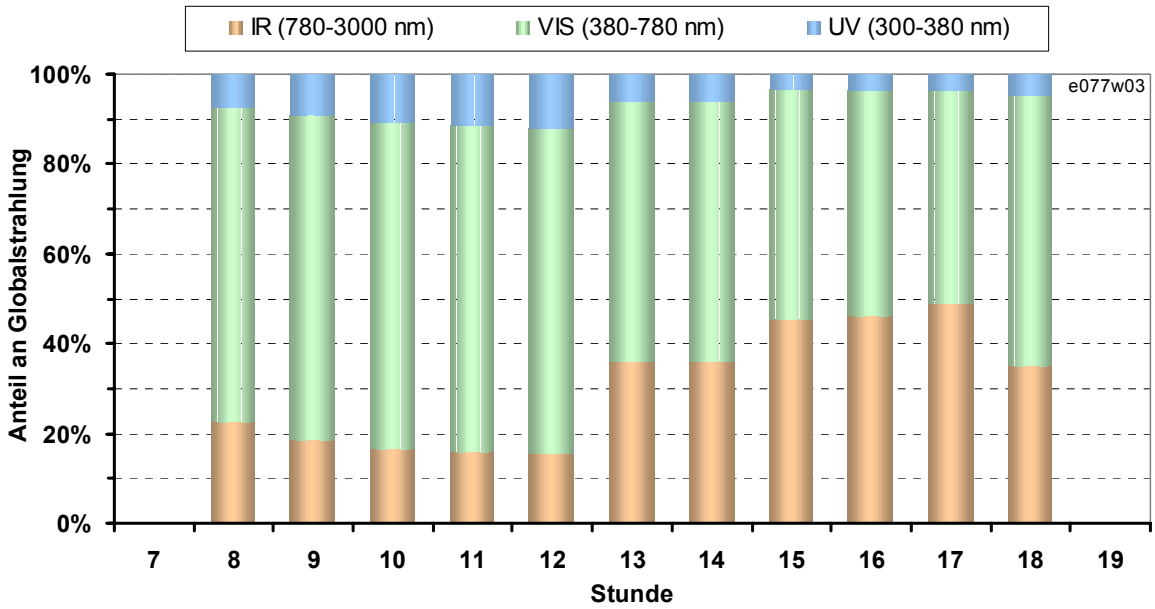

Abbildung 5-24: Tagesverlauf der prozentualen Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der Globalstrahlung für den sonnigen Wintertag.

In den ersten Hellstunden des Tages tritt lediglich Diffusstrahlung auf, daher ist der Anteil der Infrarotstrahlung entsprechend gering. Mit Einsetzen der direkten Sonneneinstrahlung verschiebt sich das Spektrum deutlich hin zu längeren Wellenlängen.

Neben den beschriebenen zeitabhängigen Daten sind im Konfigurationsprogramm *IPLeK* geometrische Angaben zum Modellraumfenster und dem Sonnensimulator hinterlegt. Sie dienen zusammen mit den Positionsdaten der Plattform zur Berechnung der Größe der projizierten Fensterfläche. Diese wird nicht nur aufgrund der Projektion in Einstrahlungsrichtung bestimmt, sondern erfährt zudem eine Reduzierung durch die Abschattung durch das Mauerwerk. **Abbildung 5-25** verdeutlicht diesen Zusammenhang. Weiterhin wird aus diesen Daten der nutzbare Bereich der Plattform ermittelt. Nur die Strahler in diesem Bereich treffen bei der entsprechenden Position der Plattform das Fenster der Modellraumfassade. Durch den zurückgesetzten horizontalen Drehpunkt der Fahrmechanik ist der nutzbare Bereich, wie in

Abbildung 5-25 dargestellt, nicht symmetrisch zur Plattformmitte. Bei der vertikalen Bewegung der Plattform ist dies allerdings der Fall.

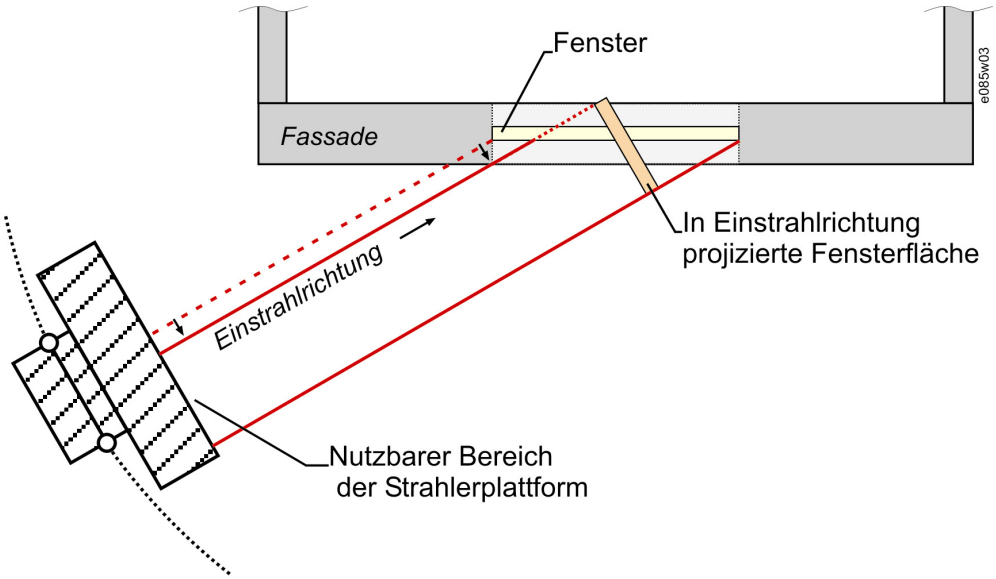

Abbildung 5-25: Projektion der Fensterfläche und nutzbarer Bereich der Strahlerplattform bei horizontaler Bewegung.

Die schließlich noch benötigten Konfigurationsdaten der einzelnen Strahler sind Auswertungsergebnisse zahlreicher Messungen an der fertig montierten Strahlerplattform. Um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, werden alle Ergebnisse auf eine Nennspannung von 230 V bezogen. Die Ermittlung der Spannungsabhängigkeit der Bestrahlungsstärke am Modellraumfenster erfolgte durch Messungen, bei denen die entsprechenden Komponenten über eine Konstantspannungsquelle betrieben wurden. Normiert man die Messwerte verschiedener Lampen auf den jeweiligen Wert bei Nennspannung, so erhält man die in **Abbildung 5-26** dargestellten Zusammenhänge für die HQI- sowie Halogenlampen. Innerhalb der Bandbreite der Spannungsschwankungen im Versorgungsnetz der Laborhalle besteht eine nahezu lineare Abhängigkeit, die bei den HQI-Lampen geringfügig stärker ausgeprägt ist. Bei gedimmtem Betrieb der Halogenlampen ergibt sich ebenfalls die gleiche Abhängigkeit. Dies erklärt sich durch die Bauart der eingesetzten Dimmer, die mit einer Phasenanschnittsteuerung arbeiten, deren Schaltzeitpunkt nur vom Phasenwinkel und nicht von der Höhe der Spannung abhängig ist.

Die Messung der geometrischen Bestrahlungsstärkeverteilung verschiedener Strahlereinheiten zeigte, dass die Höhe der Bestrahlungsstärke der HQI-Lampen eine Streuung von bis zu 10 % aufweist. Durch Normierung der einzelnen gemessenen Verteilungskurven auf ihren jeweiligen Maximalwert können diese jedoch auf eine, in **Abbildung 5-27** dargestellte, einheitliche Kurve zurückgeführt werden. Die normierte Bestrahlungsstärkeverteilung enthält somit nur

noch die Abhängigkeit von der Geometrie der Leuchte und ist für alle Systeme in sehr guter Näherung identisch. Sie ist zudem radialsymmetrisch zu ihrem Mittelpunkt.

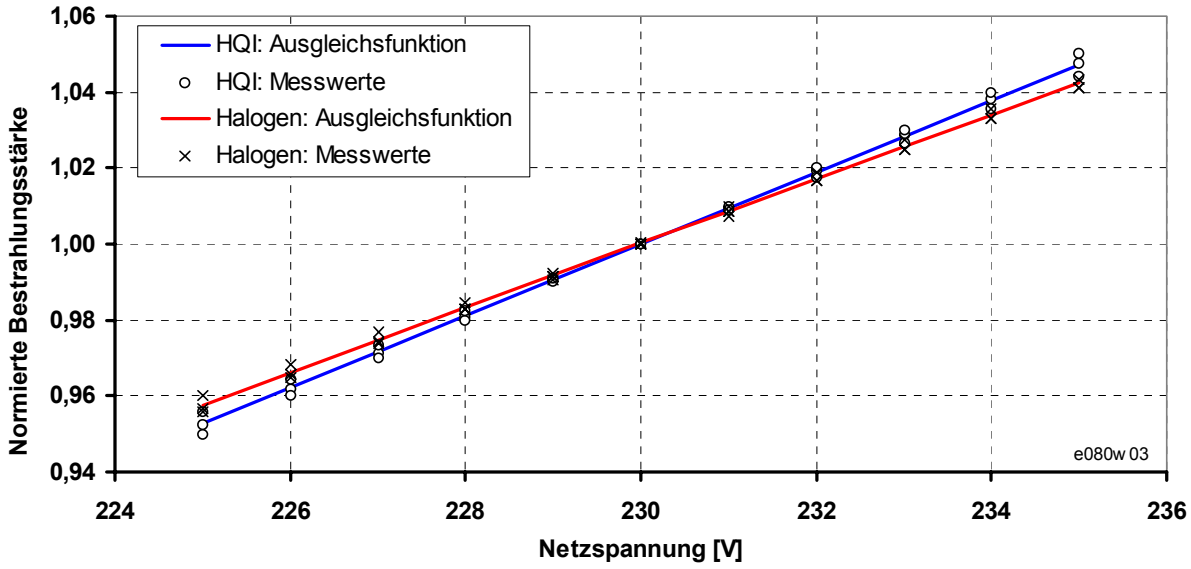

Abbildung 5-26: Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke der HQI- und Halogenlampen von der Netzspannung normiert auf die Bestrahlungsstärke bei Nennspannung (230 V).

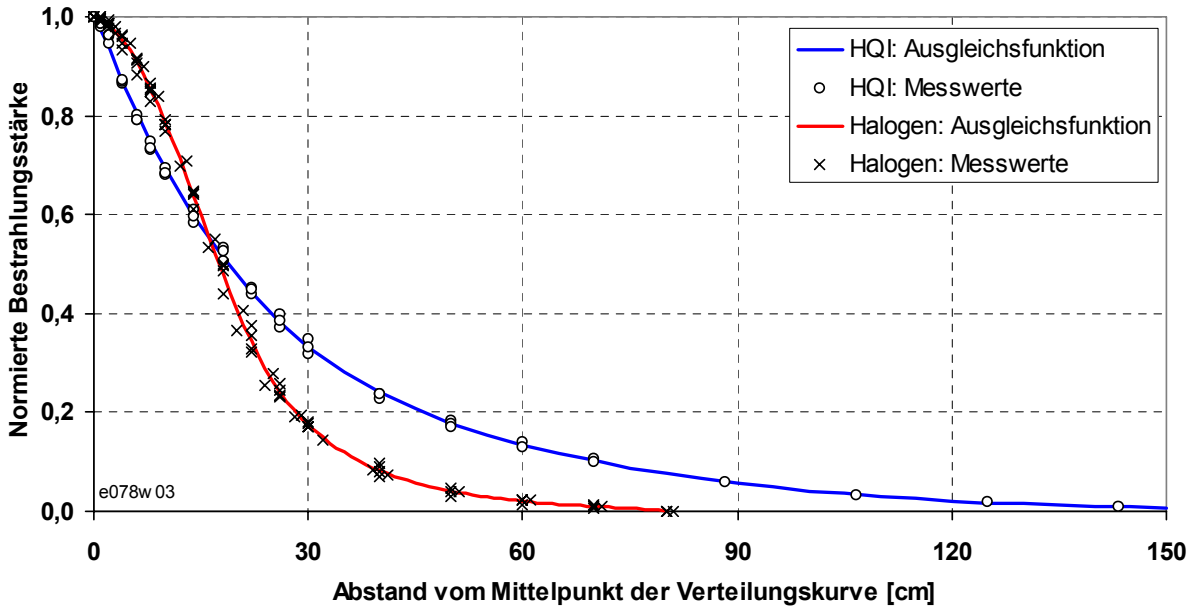

Abbildung 5-27: Geometrische Bestrahlungsstärkeverteilung der HQI- und Halogenleuchten normiert auf den Maximalwert bei 0 cm.

Bei den Halogenlampen ist die Streubreite deutlich geringer, doch auch hier wird eine gemeinsame normierte Bestrahlungsstärkeverteilung berechnet. Damit reduziert sich auch der

Aufwand zur Vermessung der Strahlerplattform, weil lediglich der Maximalwert der Bestrahlungsstärke im Mittelpunkt der Verteilungskurve von allen Lampen gemessen werden muss. Um Veränderungen durch die Alterung der Lampen bei Berechnungen berücksichtigen zu können, ist der Maximalwert der Bestrahlungsstärke zudem durch regelmäßige Messungen zu überprüfen.

Die Anpassung des Spektrums der von der Plattform erzeugten Strahlung erfolgt durch Mischung der beiden Lampentypen. Die mit einem Spektroradiometer gemessenen Spektren der Lampen wurden analog zur Vorgehensweise beim Sonnenspektrum analysiert, um für die drei Wellenlängenbereiche der infraroten, sichtbaren und ultravioletten Strahlung die prozentualen Anteile an der Bestrahlungsstärke zu ermitteln. Wie in **Abbildung 5-28** zu erkennen ist, erzeugen die HQI-Lampen den Hauptanteil im sichtbaren Spektralbereich. Das Spektrum der Halogenlampen ist, durch die Möglichkeit sie zu dimmen, von der Dimmstufe abhängig. Bei voller Leistung liegt der Hauptanteil ihrer Strahlung im langwelligen Infrarotbereich, weshalb sie als Ergänzung zu den HQI-Lampen mit Tageslichtspektrum dienen. Durch Dimmung der Halogenlampen verschiebt sich ihr Spektrum immer weiter in den Infrarotbereich, was bei der Berechnung der Betriebsdaten der Strahlerplattform zu berücksichtigen ist.

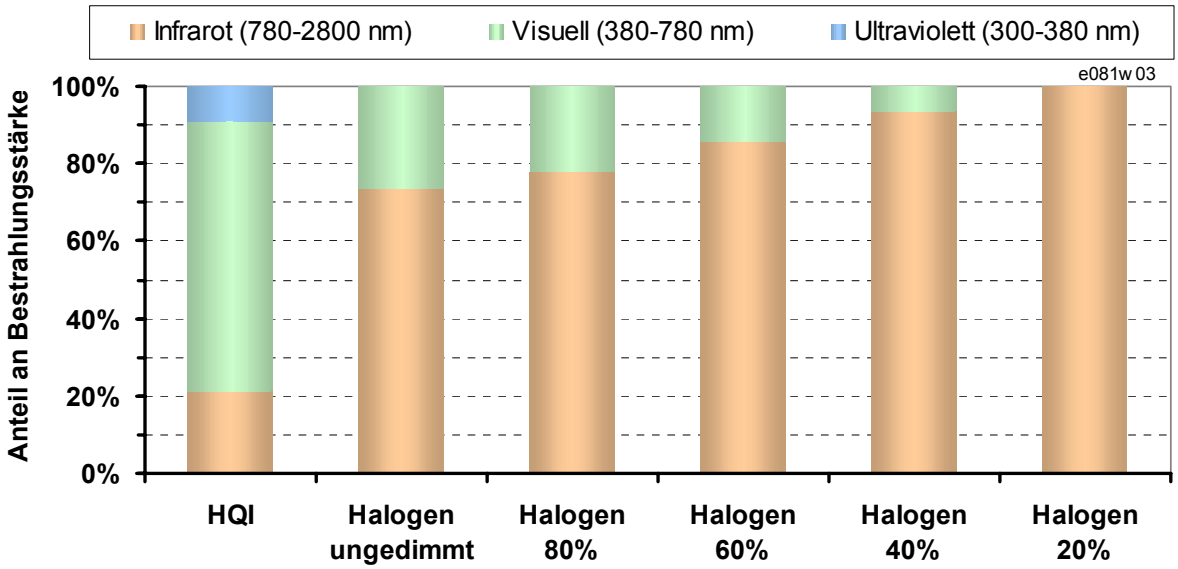

Abbildung 5-28: Prozentuale Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der erzeugten Bestrahlungsstärke der HQI-Lampen sowie der Halogenlampen in verschiedenen Dimmungsstufen.

Das Berechnungsprogramm beginnt nach dem Einlesen aller Daten zuerst mit der geometrischen Konfiguration und der Ermittlung der in der Plattformposition nutzbaren Strahler. Auf Basis der geforderten Soll-Bestrahlungsstärke und der spektralen Zusammensetzung beginnt darauf hin der iterative Konfigurationsprozess. Dabei wird zuerst eine mögliche Strahler-

Kombination ermittelt, mit der die Soll-Bestrahlungsstärke erreicht wird. Anschließend wird diese Konfiguration durch Berechnung verschiedener Variationsmöglichkeiten (z.B. Austausch einzelner Systeme) hinsichtlich der geforderten spektralen Anteile sowie der Vergleichmäßigung der Bestrahlungsstärkeverteilung auf der projizierten Glasfläche optimiert. Die Darstellung der Berechnungsergebnisse auf einer Oberfläche in *Microsoft® Excel®* ist in **Abbildung 5-29** dargestellt. Das Diagramm zeigt die Verteilung der Bestrahlungsstärke auf der bestrahlten Fläche, die Diagrammfläche entspricht der unprojizierten Glasfläche des Fensters, die lediglich als Bezugsfläche für die Darstellung verwendet wird. Der rote Rahmen markiert die ermittelte, in Einstrahlrichtung projizierte Fläche, auf die sich die Berechnungen beziehen.

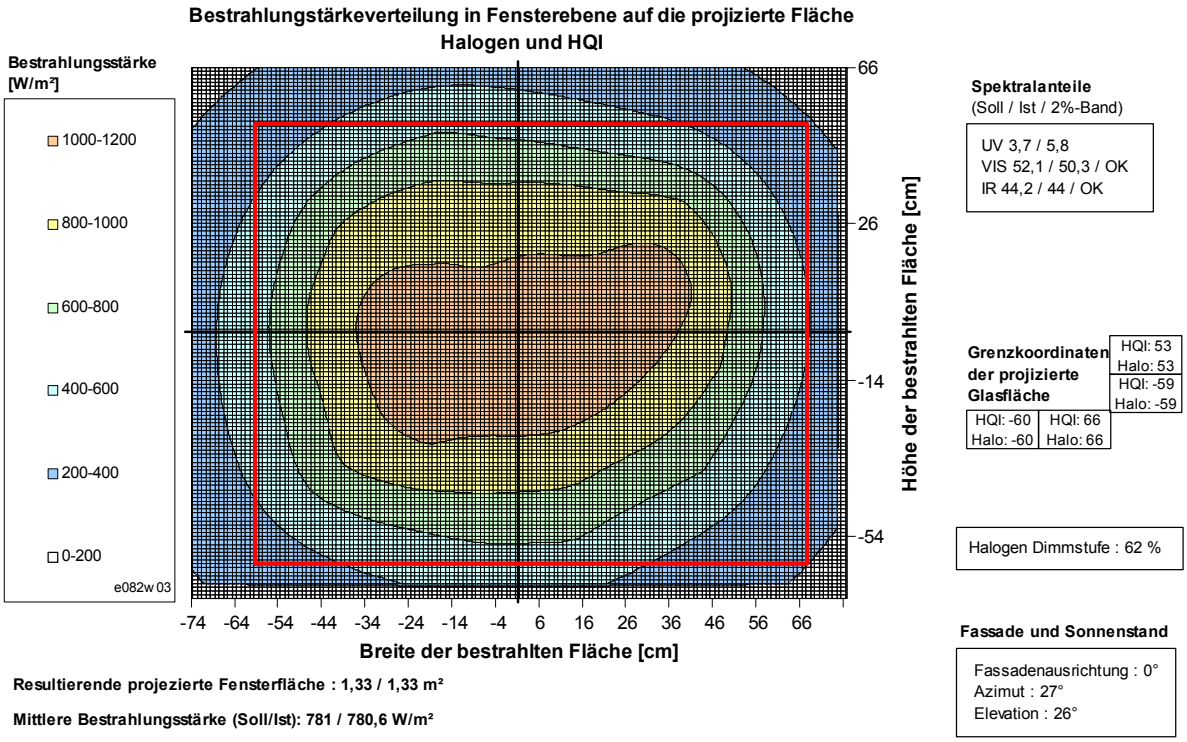

Abbildung 5-29: Darstellung der Berechnungsdaten des Konfigurationsprogramms auf einer Oberfläche in *Microsoft® Excel®*.

Für die Berechnung der Bestrahlungsstärkeverteilung auf der bestrahlten Fläche ist diese mit dem in Abbildung 5-29 erkennbaren Koordinatensystem versehen. Dem Mittelpunkt jeder Verteilungskurve der einzelnen Strahler ist eine Koordinate ($x_{s,j}$, $y_{s,j}$) auf der Fläche zugeordnet, die aus den Positionen im Strahlerfeld sowie einer horizontalen Verschiebung aufgrund der Plattformposition berechnet wird. Die horizontale Koordinatenverschiebung ist dabei wegen des zurückgesetzten horizontalen Drehpunkts der Bewegungsmechanik notwendig. Die Koordinaten der für die weitere Berechnung nutzbaren Strahler müssen dementsprechend innerhalb des roten Rahmens (Abbildung 5-29) liegen. Die Bestrahlungsstärke $E_e(x,y)$ für einen

Punkt der Fläche mit den Koordinaten x und y berechnet sich damit aus einer Überlagerung der einzelnen Verteilungskurven aller aktiven Strahler nach folgender Formel:

$$E_e(x,y) = \sum_{j=1}^{26}\left(a_j \cdot E_{e,HQI,j} \cdot E_{e,n,HQI}(r_j)\right) + \sum_{j=1}^{80}\left(a_j \cdot E_{e,Ha,j} \cdot E_{e,n,Ha}(r_j) \cdot E_{e,n,d,Ha}(d_{Ha})\right) \quad [\mathrm{W/m^2}] \qquad (5\text{-}23)$$

wobei

$$r_j = \sqrt{\left(x - x_{S,j}\right)^2 + \left(y - y_{S,j}\right)^2}$$

mit	a_j	[-] :	0: Strahler nicht nutzbar oder inaktiv; 1: Strahler nutzbar und aktiv
	$E_{e,HQI,j}$, $E_{e,Ha,j}$	[W/m²] :	Absolute Bestrahlungsstärke eines Strahlers im Mittelpunkt der Verteilungskurve
	$E_{e,n,HQI}$, $E_{e,n,Ha}$	[-] :	Normierte geometrische Bestrahlungsstärke-verteilung (= f(r))
	$E_{e,n,d,Ha}$	[-] :	Normierte Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit der Dimmstufe (=f(δ))
	d_{Ha}	[%] :	Dimmstufe Halogen

Die Berechnungen für die ganze Fläche werden in diskreten Schritten mit einer Rasterweite von 1 cm durchgeführt, so dass bei begrenztem Rechenaufwand alle Bereiche auch zwischen den einzelnen Lampenpositionen gut abgebildet werden. Die mittlere Bestrahlungsstärke, die für den Vergleich mit dem Sollwert relevant ist, ergibt sich folglich als Mittelwert der berechneten punktuellen Werte innerhalb der resultierenden projizierten Glasfläche. Als Kriterium für die Gleichmäßigkeit der Bestrahlungsstärke über der Fläche wird das Verhältnis aus dem Maximal- und Minimalwert gebildet. Während der Optimierungsschritte wird hier ein möglichst kleiner Wert angestrebt. Die prozentualen Anteile der Wellenlängenbereiche ergeben sich aus den Spektralanteilen der HQI- und Halogenlampen sowie deren Anteil an der erzeugten Bestrahlungsstärke. In den Optimierungsschritten werden nur die prozentualen Anteile der Infrarotstrahlung und der sichtbaren Strahlung berücksichtigt, für die eine Bandbreite von 2 %-Punkten um den jeweiligen Sollwert als Zielkriterium verwendet wird. Als Ergebnis dieser Berechnung gehen die Nummern der zu verwendenden Strahler sowie die einzustellende Dimmstufe in einen Steuerbefehl für den Sonnensimulator ein.

Bei der Erstellung des Fahrplans für einen kompletten Tagesgang ist die zeitliche Abfolge der Befehle zu beachten. Das verwendete Zeitintervall bei der Positionierung der Strahlerplattform beträgt 15 Minuten. Innerhalb eines Intervalls ist die Bestrahlungsstärke aus dem Tages-

gang konstant. Um die mittlere Sonnenposition für ein Intervall zu erhalten, erfolgen die Berechnungen der Betriebsdaten jeweils für den Zeitpunkt der Mitte eines Intervalls. Der Ausführungszeitpunkt des Befehls im Fahrplan ist dann jedoch die Anfangszeit des Intervalls. Bei der Festlegung des Ausführungszeitpunkts kann zusätzlich noch eine Zeitverschiebung berücksichtigt werden, falls bei der Versuchdurchführung die Simulationszeit nicht synchron zur realen Zeit ablaufen soll. **Abbildung 5-30** verdeutlicht dies für einen Fahrplan ohne zusätzliche Zeitverschiebung.

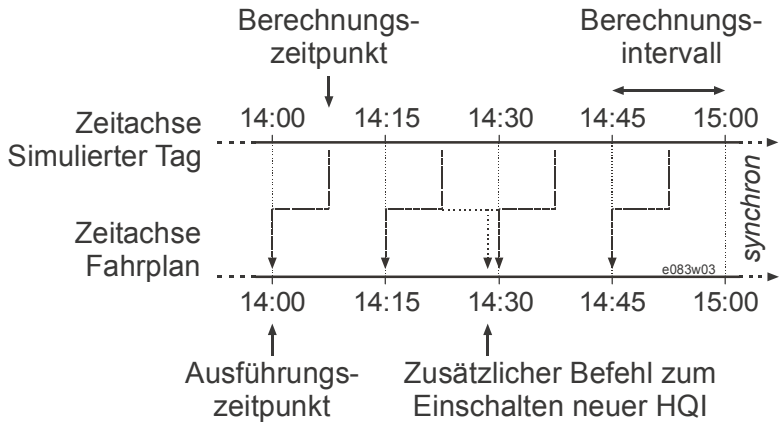

Abbildung 5-30: Ausschnitt aus einem zeitlichen Fahrplanablauf.

Darüber hinaus wird bei der Fahrplanerstellung berücksichtigt, dass eine HQI-Lampe nach dem Einschalten etwa drei Minuten benötigt, bis sie ihre volle Leistung erreicht. Während der ersten 1,5 Minuten dieses Zeitraums ist dabei am Modellraumfenster keine Bestrahlungsstärke messbar. Sind in der Fahrplanabfolge in einem Befehl 'A' HQI-Lampen zum Einschalten vorgesehen, so wird ein zusätzlicher Befehl eingefügt, der die Daten des vorhergehenden Befehls enthält, ergänzt um die neu hinzukommenden HQI-Lampen des Befehls 'A'. Der Ausführungszeitpunkt dieses zusätzlichen Befehls liegt 1,5 Minuten vor Befehl 'A'. Die Erstellung längerer Fahrpläne kann durch ein zusätzliches Programm-Modul, das die berechneten Betriebsdaten nach den genannten Gesichtspunkten analysiert, automatisiert durchgeführt werden. Eine Zeitverschiebung zur realen Zeit ist dabei ebenso integrierbar wie auch die Möglichkeit eines „Zeitrafferbetriebs" zu Demonstrationszwecken.

6 Modellraum und Referenzheizsystem

Der Modellraumprüfstand beinhaltet nach den in Abschnitt 2 getroffenen Festlegungen zwei Untersuchungsobjekte, im weiteren Prüflinge genannt. Dabei handelt es sich einmal um den eigentlichen Modellraum, einen hinsichtlich Transmissionsverlusten und Speicherverhalten variablen Prüfraum mit realen Abmessungen, sowie um ein im Modellraum installiertes Heizungssystem.

6.1 Variabler Modellraum

Der Modellraum mit seinen Geschossdecken, Innenwänden und einer Außenfassade stellt einen Ausschnitt aus dem zentralen Bereich eines Gebäudes dar. Durch seinen modularen Aufbau kann der Raum variabel gestaltet werden, indem einzelne Wände sowie die Raumdecke ausgetauscht werden. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Fassadengestaltungen und Wände mit unterschiedlichen Wärmespeicherkapazitäten realisieren. Da die Deckenelemente an der Tragekonstruktion (Abschnitt 3.2.2) aufgehängt sind, können auch nicht tragende Wandaufbauten untersucht werden. Die Bodenplatte kann grundsätzlich auch ausgetauscht werden; dies bedingt jedoch eine komplette Demontage der restlichen Bauelemente des Raums. Die Dimensionen des Raums sind durch die Konzeption und den gesamten Prüfstandsaufbau weitgehend festgelegt, seine genauen Abmessungen sind jedoch innerhalb einer gewissen Bandbreite veränderbar. Die Innenmaße des zur Zeit aufgebauten Modellraums betragen 4,0 m in der Breite, 3,5 m in der Tiefe sowie 2,6 m Raumhöhe.

Zusätzlich zur Bodenplatte besitzt der Modellraum einen variablen Fußbodenaufbau aus einer Trittschalldämmung und einem Estrich. Die Trittschalldämmung besteht aus einer 7 cm starken Schicht mit Polystyrol-Hartschaumplatten. Darauf wurde ein Estrich aus handelsüblichen Trockenunterboden-Elementen verlegt. Der gesamte Fußbodenaufbau ist somit bei Bedarf demontierbar, um beispielsweise eine Fußbodenheizung zu installieren.

6.1.1 Boden- und Deckenelemente

Die Bodenplatte bildet die untere Geschossdecke des Modellraums. Sie ist aus Stahlbeton B45 mit doppelter Bewehrung gefertigt und entspricht damit einer im Hochbau üblichen Geschossdecke. Aus Gewichtsgründen wurde sie in drei Segmente aufgeteilt. Jede der Einzelplatten hat eine Länge von 5,72 m, eine Breite von 1,53 m und eine Stärke von 16 cm. Daraus ergibt sich ein Gewicht von 3,5 t je Plattensegment. Die statische Belastbarkeit der Platten wurde in Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma so ausgelegt, dass auch schwerste Ausführungen von Raumwänden auf ihnen aufgebaut werden können. Um eine Möglichkeit der gezielten Temperierung der Bodenplattensegmente zu schaffen, wurden bei der Fertigung der

Platten Kupferrohre mit eingegossen. Die Rohre sind auf halber Plattenhöhe in einem Abstand von 22 cm zueinander positioniert, und können variabel verschaltet werden. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die als Geschossdecke konzipierten Platten auch als Kellerdecke zu verwenden.

Die Deckenelemente des Modellraums sind ebenso wie die Bodenplatte aus Beton B45 mit Stahlbewehrung ausgeführt. Auch die Raumdecke musste aus Gewichts- und Handhabungsgründen in drei Segmente aufgeteilt werden. Jedes Segment hat eine Breite von 1,26 m und spannt mit einer Länge von 4,3 m quer über den Modellraum. Die Plattenstärke von 10 cm bildet eine Geschossdecke für durchschnittliche Belastungen nach. In jedes Plattensegment sind vier Gewindehülsen eingegossen, an denen sie mittels Stahlseilschlaufen aufgehängt werden. Die Deckenplatte ist mit ihren Abmessungen so ausgelegt, dass sie bei der gegebenen Raumgröße von 4,0 m x 3,5 m die Wände bis zur Hälfte überdeckt. Ihre Position kann parallel zu den Seitenwänden des Modellraums veränderten Wandaufbauten angepasst werden.

6.1.2 Wände

Aufgrund der Konzeption des Modellraums als Ausschnitt aus einem Gebäude besitzt er eine Außenfassade und drei Innenwände, die als Trennwände zu gleich temperierten Räumen aufzufassen sind. Um die Austauschbarkeit aller Wände zu ermöglichen, sind sie weder mit den Geschossdecken noch untereinander fest, jedoch luftdicht verbunden. Die Anordnung der Wände ist in **Abbildung 6-1** dargestellt. Die Fassade umschließt mit ihrer Außenseite dabei die Stirnseite der um 10 cm zurückgesetzten Bodenplatte. Bei der Anordnung der Innenwände wurde berücksichtigt, dass beim Austausch von Wänden mit unterschiedlichen Wandstärken die Innenmaße des Raums erhalten bleiben. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist dies auf jeden Fall zu beachten.

Alle Wände des aktuellen Modellraums sind einheitlich aus Leichthochlochziegeln aufgebaut (Abbildung 11-2). Diese zeichnen sich durch einen sehr geringen Wärmeleitwert von 0,16 W/(m·K) für die Außenwandziegel und 0,18 W/(m·K) für die Innenwandziegel aus. Die Wandstärken betragen bei der Außenwand 36,5 cm, bei den seitlichen Wänden 17 cm und bei der hinteren Wand 24 cm. Die genauen Abmessungen der einzelnen Wände, jeweils als Rohbaumaß ohne Putz, können auch **Abbildung 6-2** entnommen werden. Das Mauern der Wände erfolgte im sogenannten „Dünnbettmörtelverfahren“. Dabei werden maßgenau plangeschliffene Ziegel mit einer nur wenige Millimeter starken Schicht Klebemörtel verbunden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist ein sehr homogener Wandaufbau ohne Mörtelfugen. Der Außenputz der Modellraumfassade besteht aus zwei Schichten. Als Grundputz wurde ein wärmedämmender Faser-Leichtputz aufgetragen, der speziell für Mauerwerke mit geringem Wärmeleitwert vorgesehen ist. Die Schichtdicke des Putzes beträgt ca. 10 mm, sein Wärmeleitwert 0,22 W/(m·K). Zur Herstellung einer ansprechenden Fassadenoptik, die ein Grundputz nicht

gewährleistet, wird auf diesen in der Regel ein Oberputz von wenigen Millimetern Stärke aufgebracht. An der Modellraumfassade wurde hierfür ein weißer Strukturedelputz verwendet, auf einen zusätzlichen Anstrich wurde verzichtet. Die Innenwandflächen des Modellraums sowie die Außenseiten der „Innenwände“ sind mit einem mineralischen Gips-Kalk-Putz nach DIN 1168 versehen, einem Standardputz für Innenwandflächen. Die Schichtdicke beträgt hier 5 mm.

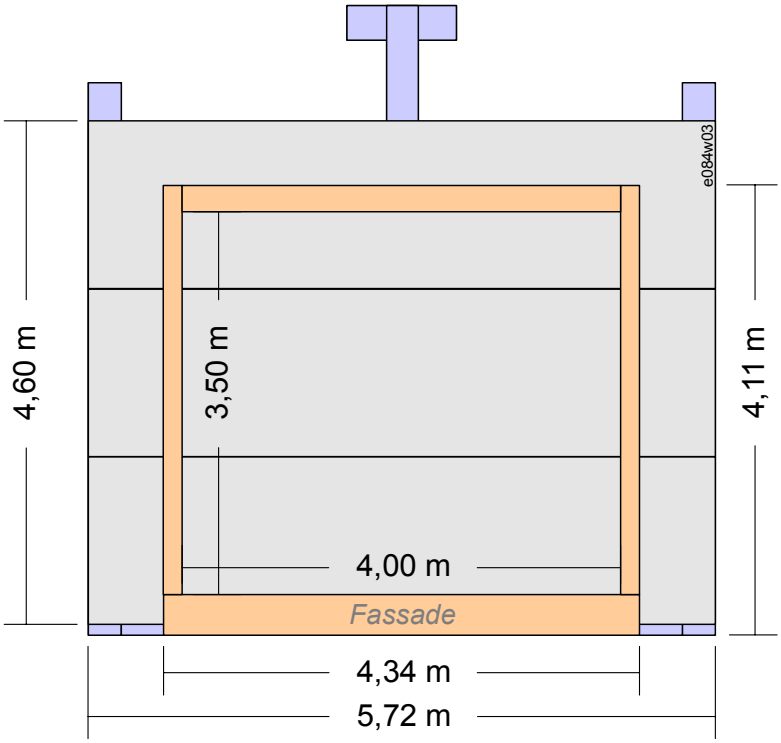

Abbildung 6-1: Abmessungen des Modellraums und Anordnung der Wände, Grundriss.

Die Fensterlaibung in der Außenfassade hat eine Fläche von 2,04 m², die genauen Abmessungen sind in Abbildung 6-2 dargestellt. Das dort eingebaute handelsübliche Fenster mit Kunststoffrahmen und Isolierverglasung besitzt einen U_F-Wert von 1,2 W/(m²·K). Die für die solare Einstrahlung wirksame effektive Glasfläche beträgt 1,33 m². Vervollständigt wird das Fenster außen durch ein Aluminiumfensterbrett sowie innen durch eine Fensterbank aus Marmorstein. In der rückwärtigen Wand des Modellraums befindet sich weiterhin eine normale Zimmertür. Entgegen der üblichen Einbauart geht diese Tür nach außen auf, da der Schwenkbereich der Tür im Rauminneren durch Mess-Sensoren belegt ist. Die Höhe der Tür mit ihrem Rahmen beträgt 2,01 m, die der Türschwelle beträgt 11 cm. In der Türschwelle befinden sich neben dem Abluftkanal der Anlage zur kontrollierten Raumlüftung (Abschnitt 3.4) auch die Durchführungen für alle in den Raum führenden elektrischen Mess- und Versorgungsleitungen. Um die Undichtigkeiten eines normalen Gebäudes ausschließlich mit der Lüftungsanlage nachbil-

den zu können sind alle Baufugen des Modellraums am Fenster und der Tür sowie die Kontaktfugen der Wände luftdicht versiegelt.

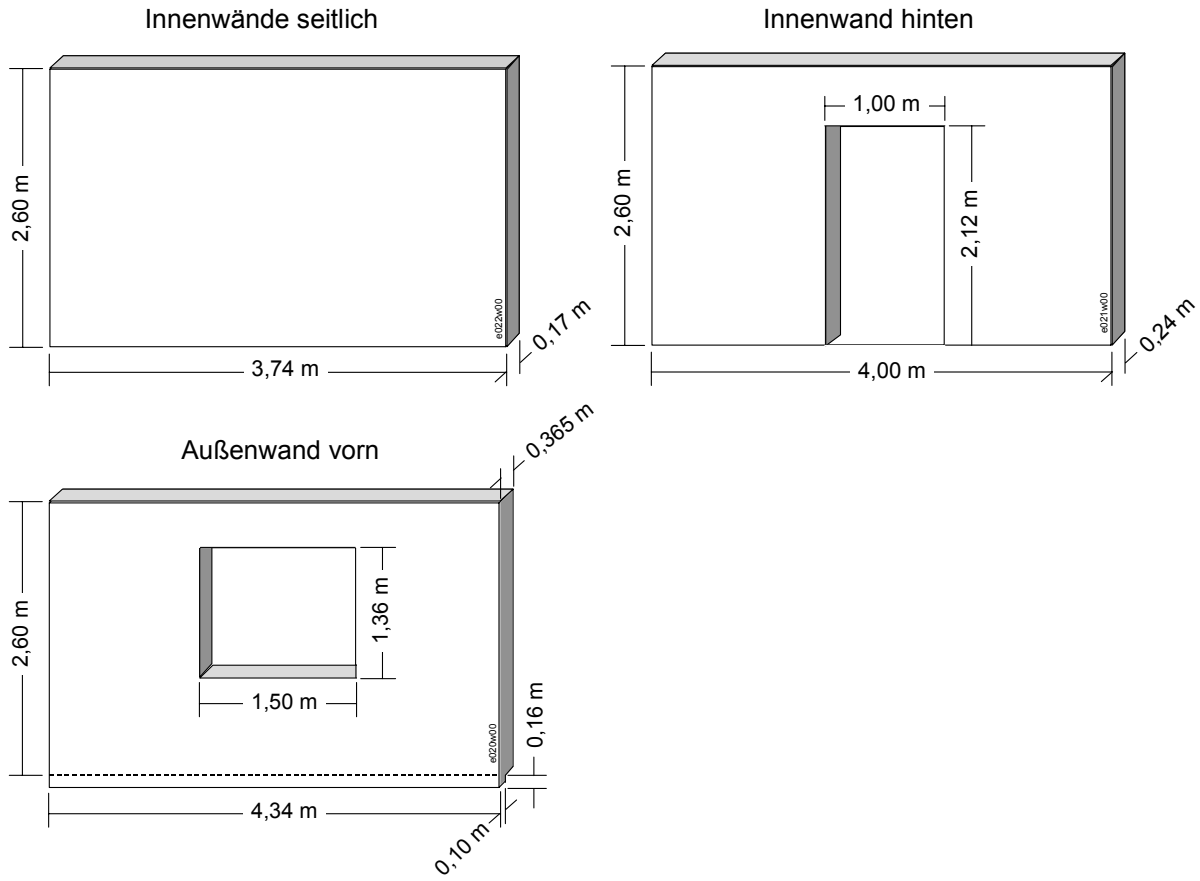

Abbildung 6-2: Abmessungen der Wände des Modellraums.

6.2 Messtechnische Ausstattung des Modellraums

Für die Analyse des energetischen Verhaltens des Modellraums und der raumklimatischen Bedingungen ist die messtechnische Erfassung der Raumlufttemperatur und der Temperaturen der Umschließungsflächen sowie der Speichermassen notwendig. Um darüber hinaus eine Abbildung der Temperaturverteilungen zu ermöglichen, wurden zahlreiche punktuelle Messstellen rasterförmig angeordnet.

Die Messung der Raumlufttemperatur erfolgt an insgesamt 27 Stellen, die in einem regelmäßigen Gitter im Raum verteilt sind. Durch dieses Raster kann die Ausbildung von Bereichen mit unterschiedlicher Temperatur im Raum wie auch die durch ein Heizungssystems im Raum hervorgerufene Wärmeverteilung erfasst werden. Die installierten Pt100-Temperatursensoren wurden zusätzlich gegen direkte Strahlung abgeschirmt, um eine Beeinflussung der Messung durch die Erwärmung der Sensoren zu verhindern. Für das Temperaturempfinden des Menschen sind jedoch nicht nur die Lufttemperaturen in einem Raum ausschlaggebend, sondern

auch die Temperaturen der Wandoberflächen. Die Messung dieser Oberflächentemperaturen aller sechs Raumumschließungsflächen erfolgt ebenfalls mit Pt100-Sensoren, die direkt wärmeleitend an den Oberflächen montiert und wiederum gegen Einstrahlung abgeschirmt sind. Die Verteilung der Messstellen zeigt **Abbildung 6-3** am Beispiel der seitlichen Modellraumwand. Ausgehend von einem Raster zur Erfassung des Temperaturverlaufs über der Wandfläche, wurden bei der Anordnung der Messstellen ferner die Randbereiche zu den angrenzenden Bauteilen einbezogen.

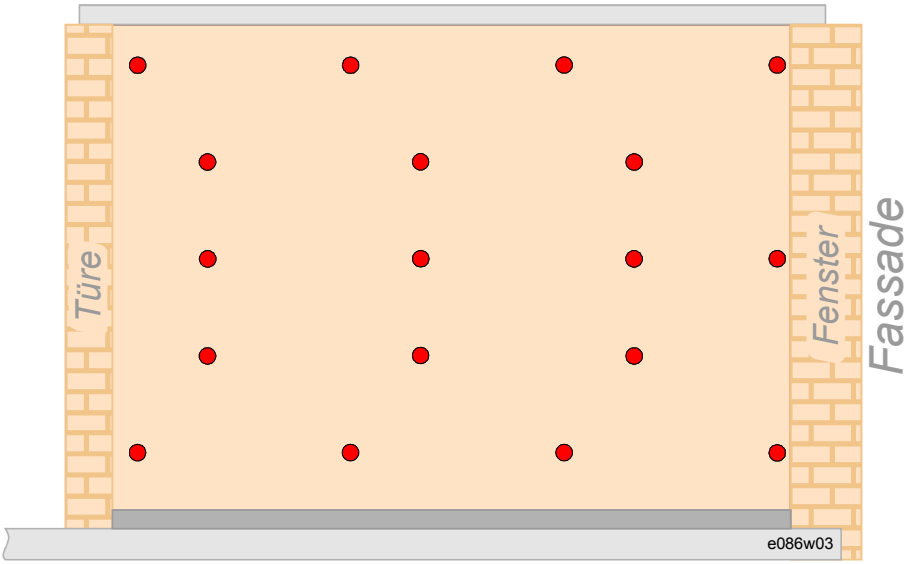

Abbildung 6-3: Verteilung der Messstellen für Oberflächen- und Kerntemperatur an einer Seitenwand.

An den gleichen Stellen befinden sich auch die Temperatursensoren zur Messung der Kerntemperaturen, die jeweils in der Mitte der Wand beziehungsweise Boden- und Deckenplatten installiert sind. **Abbildung 6-4** zeigt schematisch einen in einer Wand installierten Temperatursensor. Um den Wärmestrom durch die Wand durch den eingebauten Sensor nicht zu unterbrechen, ist die Montagebohrung schräg in die Wand eingebracht. Der eigentliche Temperatursensor, ein kunststoffummantelter Pt100-Sensor, befindet sich am Ende der Bohrung in der Mitte der Wand. Seine Anschlussleitung wurde in einen Keramikzylinder eingegossen. Durch diesen wird die Bohrung in der Wand verschlossen, so dass sich zwischen den Kammern des Hochlochziegels keine ungewollte Luftströmung ausbilden kann.

Insgesamt sind somit jeweils 96 Temperatursensoren für die Messung der Oberflächen- und Kerntemperaturen montiert. Mit Ausnahme der Fassade sind alle Kerntemperatursensoren von der Außenseite installiert, so dass deren Anschlussleitungen nicht aus dem Modellraum herausgeführt werden müssen. Für im Raum installierte Sensoren stehen insgesamt 180 Anschlüsse zur Verfügung, die über eine luftdichte Durchführung in der Türschwelle in den

Raum geführt sind. Damit sind rund 30 redundante Leitungen vorhanden, so dass zusätzliche Messstellen oder der Ersatz von schadhaften Leitungen problemlos möglich ist. Der Anschluss aller Temperatursensoren an die zentrale Messwerterfassungsanlage ist in Vierleitertechnik ausgeführt, so dass der Einfluss der Anschlussleitungen kompensiert wird. Die Anlage besitzt insgesamt 280 Messkanäle, die von einem PC in einem Zeitintervall von 5 Sekunden abgefragt werden.

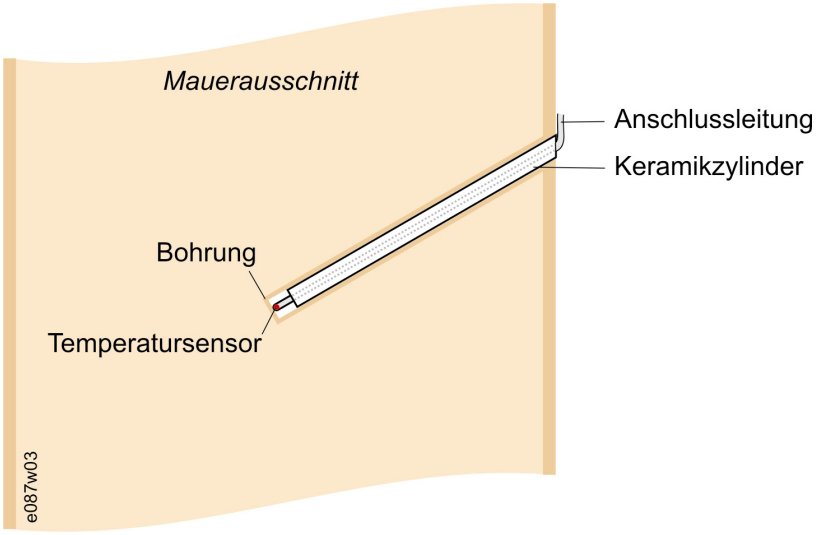

Abbildung 6-4: Schematische Darstellung der Montagemethode eines Kerntemperatursensors in einer Wand.

Zusätzlich zu den im Modellraum installierten Temperatursensoren wird an mehreren Stellen um den Raum die Temperatur der umgebenden Laborhalle gemessen. Hier werden die gleichen Sensoren eingesetzt wie zur Messung der Raumlufttemperatur.

6.3 Kriterien für ein Referenzheizsystem

Im Rahmen dieser Arbeit werden als Heizsysteme die Anlagen oder Anlagenteile verstanden, die der Wärmeübertragung in einen Raum dienen. Bei konventionellen zentralen Heizungsanlagen mit Wasser als Wärmeträger sind dies nur die Konvektoren und Radiatoren, der Wärmeerzeuger wird hier nicht mit betrachtet. Bei dezentralen, elektrischen Heizungssystemen wird die Wärme dagegen direkt von den im Raum installierten Komponenten erzeugt. Die Aufgabe eines Heizsystems besteht darin, in den Räumen eines Gebäudes für die Bewohner thermisch behagliche Zustände zu schaffen /2067-20/. Zur Erfüllung dieser Aufgabe müssen die außentemperaturabhängigen Wärmeverluste eines Raums ausgeglichen werden, bei gleichzeitiger Einhaltung von vorgegebenen Raumtemperaturprofilen mit gegebenenfalls zeitlich unterschiedlichen Temperaturanforderungen. Dabei muss das Heizsystem im Betrieb auf wechselnde Umgebungsbedingungen (Störgrößen) reagieren, die durch Sonneneinstrahlung,

Windgeschwindigkeit und -richtung sowie innere Wärmequellen beeinflusst werden. Gleichzeitig werden Heizsysteme auch bezüglich ihrer energetischen Effizienz bewertet, mit der die Wärmezufuhr in den Raum unter verschiedensten Betriebsbedingungen erfolgt. Aus diesen Überlegungen lassen sich Kriterien ableiten, die ein Referenzheizsystem beschreiben:

- Gleichmäßige Temperaturverteilung im Raum,
- Konvektive Wärmeabgabe,
- Trägheitslose sowie stufenlose Regulierbarkeit (bis zu kleinsten Leistungen),
- Erhaltung der thermischen Behaglichkeit für die Bewohner.

Das thermische Behaglichkeitsempfinden des Menschen ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Dazu gehören unter anderem die Raumlufttemperatur und die Temperatur der umgebenden Flächen. Ein Heizsystem sollte durch eine überwiegend konvektive Wärmeabgabe und -verteilung eine gleichmäßige Lufttemperatur in allen Bereichen eines Raumes bewirken. Dabei ist jedoch auf eine geringe Bewegungsgeschwindigkeit der Raumluft zu achten. Abhängig von der Lufttemperatur wird eine zu starke Luftbewegung aufgrund erhöhter Konvektion und Verdunstung auf der Haut vom Menschen als unangenehm empfunden /ROU/. Die Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen dürfen dabei aufgrund des Temperaturempfindens des Menschen, in das auch der Strahlungsaustausch mit der Umgebung eingeht, nur geringfügig von der Raumlufttemperatur abweichen, um nicht als unbehaglich empfunden zu werden. Das betrifft vor allem kältere Oberflächen wie die Außenfassade, aber auch warme Strahlungsquellen mit zu hohen Oberflächentemperaturen werden als unangenehm empfunden. Deshalb soll das Referenzheizsystem keine hohe Wärmestrahlung besitzen. Innere oder äußere Wärmelasten (z.B. Sonneneinstrahlung) führen oftmals, vor allem bei plötzlichem Auftreten, zu einer weiteren Erwärmung eines Raums. Hier sollte ein Referenzheizsystem ohne Verzögerung und thermische Trägheit regelbar sein, um eine über den Bedarf hinausgehende Wärmeabgabe an den Raum zu vermeiden. Bei idealer Regelung gibt damit ein System zu jeder Zeit nur die zum Erhalt der geforderten Raumtemperatur notwendige Wärmemenge ab.

Reale Heizsysteme können diese Kriterien nur teilweise erfüllen. Konventionelle hydraulische Heizungssysteme besitzen durch ihren Wasserinhalt eine thermische Trägheit, so dass auch nach dem Schließen des Regelventils noch Wärme abgegeben wird. Auch elektrische Heizsysteme weisen trotz einfach regelbarer Leistung abhängig von ihrer Bauart teilweise Speichermassen auf, die zu einer nicht idealen Regelbarkeit führen. Dies kann in Verbindung mit variierenden Wärmelasten zu einem unerwünschten Anstieg der Raumtemperatur führen, dem der Bewohner im ungünstigsten Fall mit zusätzlicher Fensterlüftung entgegenwirkt. Daraus folgen zusätzliche energetische Verluste.

6.4 Integration des Heizsystems

Das im Modellraum installierte Referenzheizsystem ist ein konvektives, elektrisches Direktheizsystem. Es basiert auf einem handelsüblichen Heizlüfter, bestehend aus einem Heizelement und einem Axialventilator, der um eine externe Regelung ergänzt wurde. Das Regel- und Anschlussschema des Heizsystems ist in **Abbildung 6-5** dargestellt. Um die Heizleistung regeln zu können, werden der Ventilator und die Heizspirale elektrisch unabhängig voneinander versorgt. Das Heizsystem selbst ist in der Mitte des Modellraums, etwa 50 cm über dem Fußboden montiert. Um eine möglichst gleichmäßige Wärmeverteilung im Raum zu erreichen, ist die Luftströmung des Ventilators dabei nach unten gerichtet. Damit wirkt der Lüfter der natürlichen Konvektion entgegen und sorgt für eine schnelle Durchmischung von erwärmter Luft und Raumluft. Die Drehzahl des Lüfters ist dabei nicht einstellbar, da eine Reduzierung des Volumenstroms bei höherer Heizleistung zu einer Beschädigung der Heizspiralen führen würde.

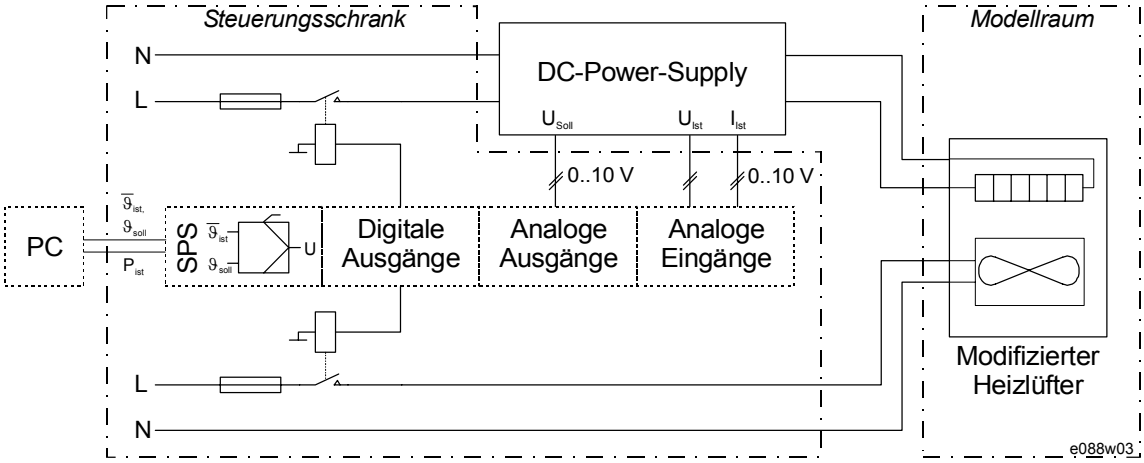

Abbildung 6-5: Schalt- und Anschlussschema des Referenzheizsystems.

Das Heizelement des Systems besteht aus Heizspiralen und besitzt praktisch keine thermische Trägheit. Die Heizleistung dieses „Heizwiderstands“ wird über die Betriebsspannung geregelt, die maximale Leistung beträgt 2000 Watt. Die elektrische Versorgung erfolgt über eine steuerbare Gleichspannungsquelle mit einer maximalen Ausgangsleistung von 2,5 kW. Die Regelung des Heizsystems ist in der SPS der Sonnensimulatorsteuerung integriert, die Software des vorgelagerten Steuerungscomputers enthält weiterhin ein Programmmodul zur manuellen Bedienung des Heizsystems. Führungsgröße der Regelung ist der Vorgabewert für die Raumlufttemperatur, die der SPS vom vorgelagerten PC übergeben wird. Die Regelgröße ist dementsprechend die Ist-Temperatur der Raumluft. Für die Erfassung der Regelgröße wird die Raumlufttemperatur nicht wie bei herkömmlichen Heizsystemen an einem Punkt im Raum gemessen, sondern als Mitteltemperatur aus den Messwerten der installierten Raumlufttemperatur-

sensoren im Modellraum gebildet. Das in der SPS-Software integrierte Regelmodul für das Heizsystem ermittelt als Stellgröße eine Vorgabe für die Ausgangsspannung der Gleichspannungsquelle. Die Ansteuerung erfolgt dabei mit einer zur Ausgangsspannung proportionalen Gleichspannung am entsprechenden Analogausgang der SPS. Die maximale Spannung der Gleichspannungsquelle beträgt dabei 250 Volt. Die aktuelle Ausgangsleistung der Gleichspannungsquelle kann über die Strom- und Spannungswerte an ihrem Monitor-Ausgang ermittelt werden. Die entsprechenden proportionalen Spannungssignale werden an den Analogeingängen der SPS gemessen und daraus wird die Ist-Leistung des Heizsystems berechnet.

Die in der SPS-Software implementierte Regelung des Referenzheizsystems basiert auf einer Proportionalregelung mit Totzeitglied. Sie ist jedoch zusätzlich darauf ausgelegt, dass die Raumtemperatur durch das Heizsystem nicht über die Solltemperatur hinaus angehoben werden kann. Das in **Abbildung 6-6** dargestellte Beispiel verdeutlicht die Regelstrategie. Überschreitet die mittlere Raumtemperatur die Solltemperatur (im Beispiel 20 °C), wird die Heizung abgeschaltet. Damit wird eine weitere Wärmezufuhr in den Raum unterbunden, so dass die Raumtemperatur durch das Heizsystem nicht weiter angehoben werden kann. Unterschreitet die Raumtemperatur wieder den Sollwert, setzt sofort wieder der geregelte Heizbetrieb ein, jedoch mit reduzierter Anfangsleistung. Der Ventilator des Heizsystems dagegen ist auch bei Taktung der Heizelemente durchgehend in Betrieb. Er verhindert durch seine fortwährende Umwälzung der Raumluft die Ausbildung unterschiedlicher Temperaturzonen. Die elektrische Leistungsaufnahme des Ventilators ist damit jedoch als Wärmeeintrag in den Raum zu berücksichtigen.

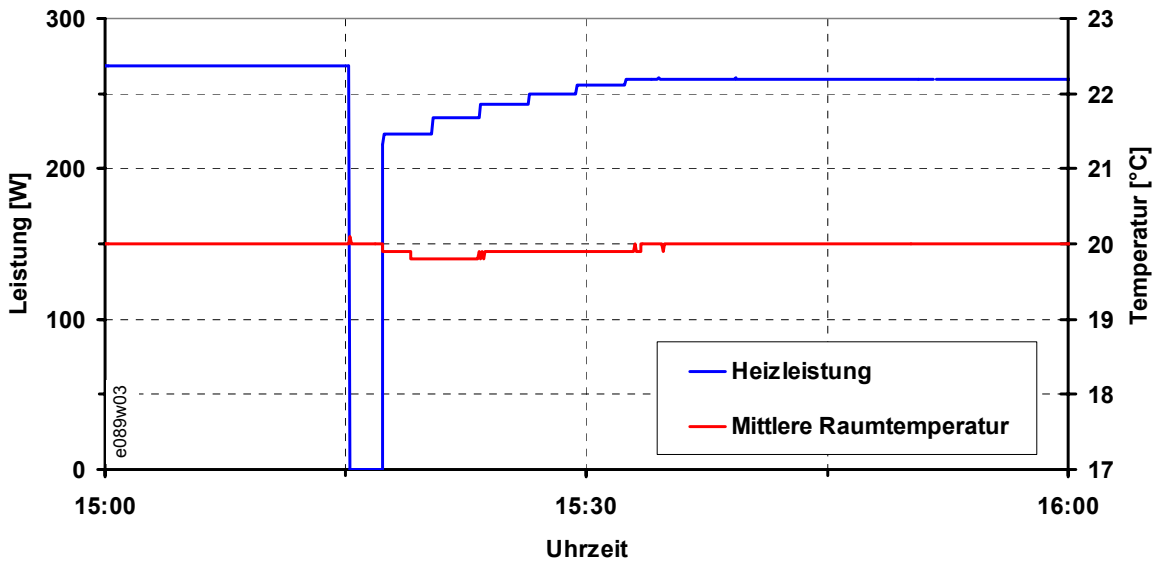

Abbildung 6-6: Beispielausschnitt aus einem Versuchslauf zur Verdeutlichung der Regelstrategie des Referenzheizsystems.

Durch seine angepasste Regelung, die auch auf die messtechnische Ausstattung des Modellraums zurückgreift, ist das installierte Referenzheizsystem sehr schnell und genau regelbar. Darüber hinaus besitzt es als konvektives Direktheizsystem keine Speichermassen. Die Wärmestrahlung des Heizelements wird durch ein Kunststoffgehäuse weitgehend abgeschirmt. In dieser Form kommt es den im vorangegangenen Abschnitt definierten Eigenschaften eines idealen Heizsystems sehr nahe. Es kann somit als Basis für den Vergleich verschiedener Heizsysteme im Rahmen von Prüfstandsuntersuchungen verwendet werden.

7 Validierung des Modellraums und Prüfstandsbetrieb

7.1 Nachbildung von Tagesgängen der Außenlufttemperatur

Grundlage für die durchgeführten Versuchsläufe und den Betrieb der Anlage zur Außenlufttemperatursimulation bildet der Tagesgang 'Wintertag sonnig', wie er in Abschnitt 4.1 beschrieben ist. Der Tagesgang liegt dabei in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde vor, die Fahrplanvorgabe für die Anlage erfolgt entsprechend auch in Stundenwerten. Die Umsetzung dieser Vorgaben am Prüfstand zeigt **Abbildung 7-1**, dargestellt ist ein Ausschnitt aus einem mehrtägigen Versuchslauf.

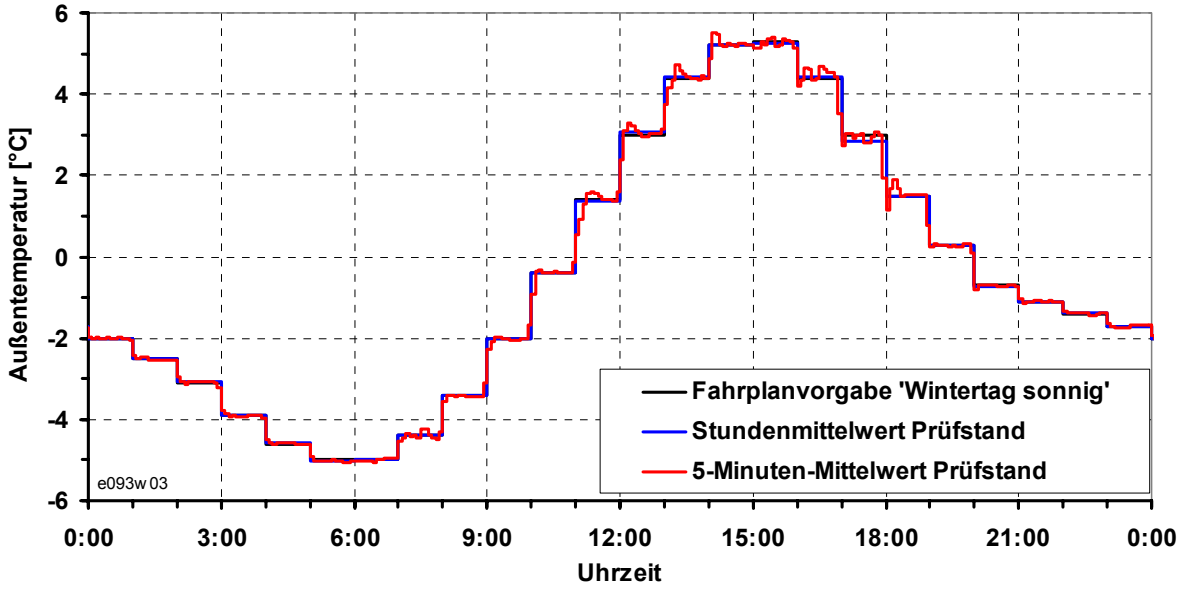

Abbildung 7-1: Tagesverlauf der Außentemperatur am Prüfstand.

Die mit ‚Prüfstand' gekennzeichneten Reihen sind zeitliche Mittelwerte aus den im 5-Sekunden-Takt aufgezeichneten Messwerten der Außentemperatur vor der Modellraumfassade. Aus den sechs installierten Messstellen wurde dazu die mittlere Außentemperatur gebildet, wie sie auch für die Regelung der Anlage verwendet wird. Die Stundenmittelwerte stimmen sehr genau mit den Vorgabewerten überein, wie auch am Verlauf der 5-Minuten-Mittelwerte erkennbar ist. In den Nachmittagsstunden ist hier auch der Einfluss des Sonnensimulators zu erkennen, der für die Regelung der Temperieranlage prinzipiell als Störgröße wirkt. Zur Verdeutlichung dieses Einflusses zeigt **Abbildung 7-2** einen Vergleich des Außentemperaturverlaufs mit und ohne Betrieb des Sonnensimulators. Der im Gang des Wintertags auftretende starke Temperaturanstieg zwischen 12:00 Uhr und 14:00 Uhr kann von der Anlage ohne Einfluss von Sonneneinstrahlung teilweise nur verzögert umgesetzt werden. Die Anlage er-

reicht in diesen Betriebspunkten die Grenze ihrer Heizleistung. Durch die veränderten Betriebsbedingungen bei gleichzeitiger Sonneneinstrahlung werden die vorgegebenen Temperaturen teilweise deutlich schneller erreicht. Es ist jedoch auch ein erhöhter Regelungsaufwand erkennbar, um die Einhaltung der Temperaturvorgaben zu erreichen. Die Temperaturverteilung vor der Fassade ist in **Abbildung 7-3** dargestellt. Während der Nachtstunden und bei der nur geringen Sonneneinstrahlung während des Vormittags ist eine sehr homogene Temperaturverteilung zu erkennen.

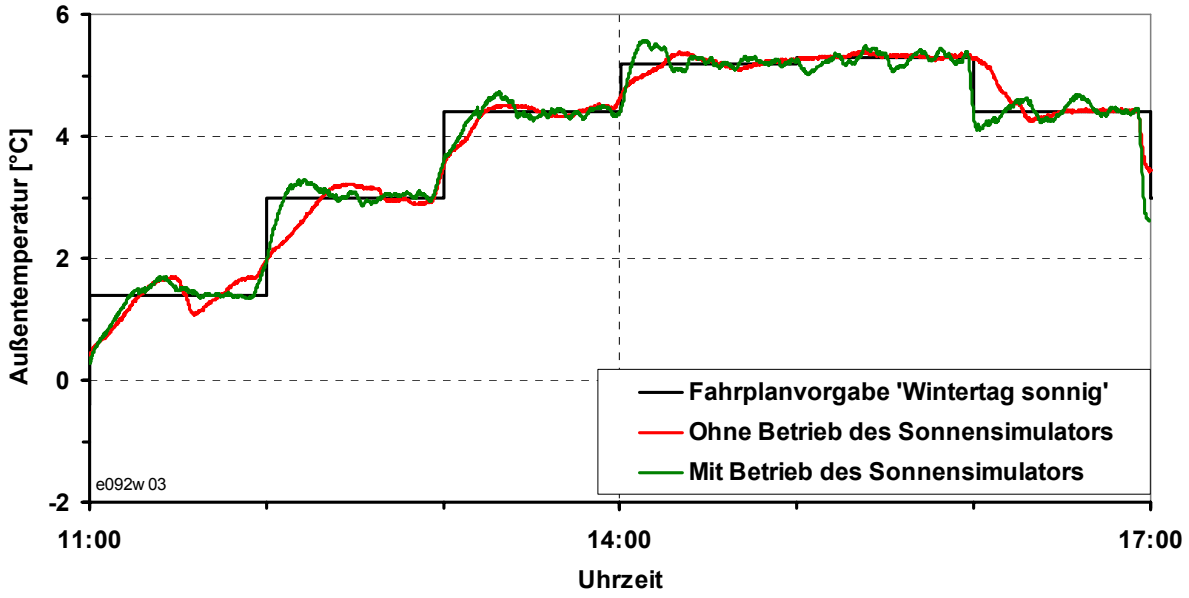

Abbildung 7-2: Vergleich des Außentemperaturverlaufs am Prüfstand mit und ohne Betrieb des Sonnensimulators.

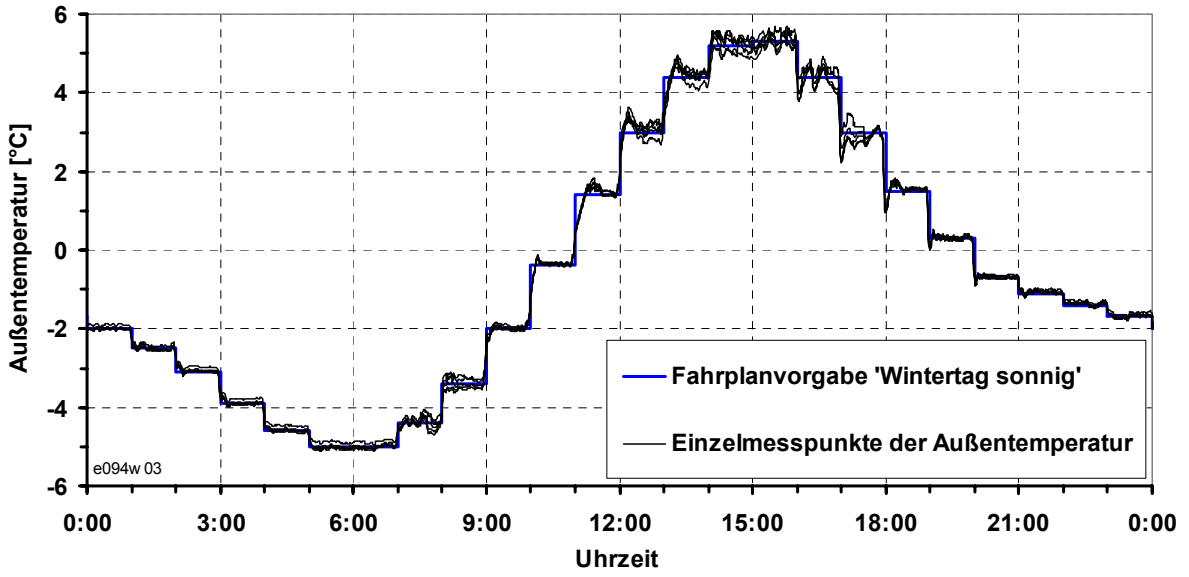

Abbildung 7-3: Temperaturverlauf vor der Modellraumfassade an den einzelnen Messstellen der Außentemperatur.

Nur zu Zeiten hoher Bestrahlungsstärke durch den Sonnensimulator tritt eine geringe Bandbreite zwischen den einzelnen Temperaturmessstellen von bis zu 0,8 K auf. Dies ist durch lokale Erwärmung des Bereichs nahe der Fassade durch die vorhandene Streustrahlung des Sonnensimulators zu erklären. Dieser Bereich wird von der Luftumwälzung im Glasvorbau nicht direkt angeströmt, sondern es findet nur eine Verwirbelung der Luft statt.

Der zweite Luftkreis der Anlage dient der Kühlung der Glasscheiben des Vorbaus, so dass die innere, der Fassade zugewandte Oberfläche der Scheiben bis zu 5 K unter der Außentemperatur liegt. **Abbildung 7-4** zeigt die an den Scheibenoberflächen gemessenen Temperaturverläufe sowie den entsprechenden Tagesgang der Außentemperatur. Die Bezeichnungen der Datenreihen (oben, mitte und unten) beziehen sich auf die jeweiligen Segmente entlang der Strömungsrichtung in den Luftkanälen der Vorbaus (Abschnitt 4.2.1).

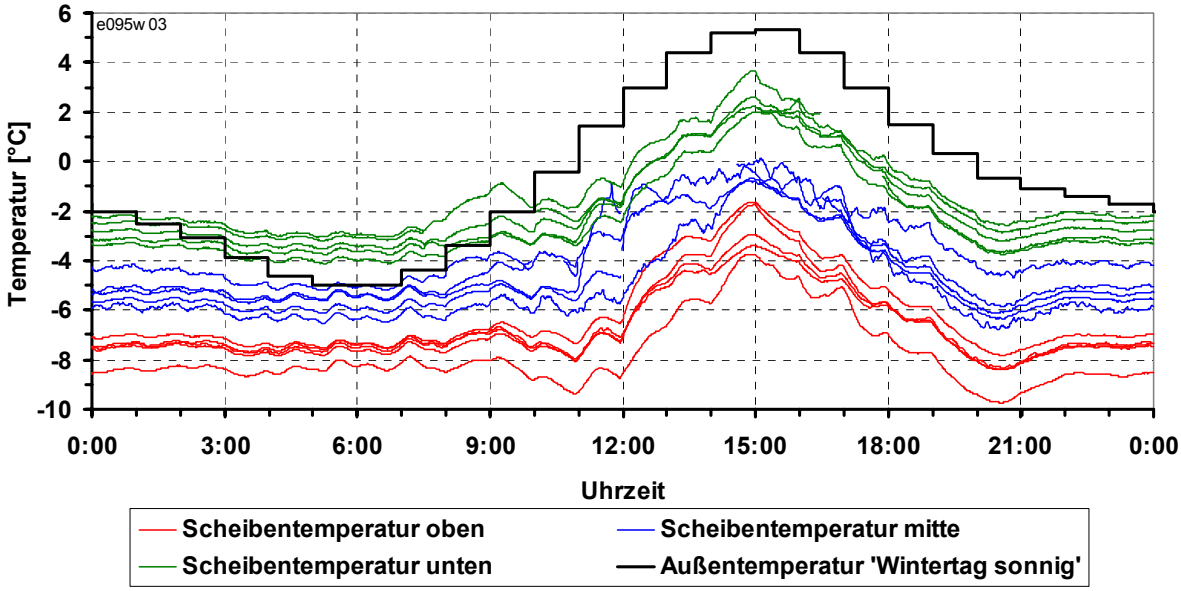

Abbildung 7-4: Temperaturverlauf an den der Fassade zugewandten Oberflächen der Glasscheiben des Vorbaus.

Entsprechend der Segmentierung der Vorbaus nimmt die Scheibentemperatur vom obersten Segment, das direkt an den Einströmöffnungen liegt, bis zum Absaugkanal im unteren Bereich stetig zu. Ursache hierfür sind neben dem begrenzten Querschnitt für die Luftströmung zwischen den Glasscheiben die großen wärmeübertragenden Glasflächen zur Laborhalle und dem Innenraum des Vorbaus. Die Temperierung der Glasflächen auf Werte unterhalb der jeweiligen Temperatur im Vorbau wird jedoch bis auf den Zeitraum der tiefsten Außentemperaturen zuverlässig erreicht. Der zweite Luftkreis fungiert jedoch auch als wärmetechnische Isolierung des Innenbereichs des Vorbaus zur umgebenden Laborhalle und ermöglicht dadurch die gute Nachbildung der Außentemperaturverläufe für den Modellraum.

7.2 Kontrollierte Raumlüftung

Die Aufgabe der Anlage zur kontrollierten Raumlüftung besteht in der Erzeugung eines regelbaren Luftwechsels im Modellraum, um die Infiltration von Luft mit Außentemperatur in den Raum entsprechend den Undichtigkeiten von realen Gebäuden nachzubilden. Die Funktion der Anlage basiert, wie im Abschnitt 3.4 beschrieben, auf einer Druckdifferenz zwischen dem Inneren des Modellraums und dem verglasten Vorbau vor der Fassade. Aufgrund der Druckdifferenz strömt Luft aus dem temperierten Vorbau durch die installierte Öffnung über die Verteileinrichtung in den Raum. Die Regelung dieses Volumenstroms erfolgt über die Veränderung des Volumenstroms der Luftabsaugung aus dem Raum, wodurch die Druckverhältnisse im Raum beeinflusst werden. **Abbildung 7-5** zeigt dazu die Abhängigkeit der Luftvolumenströme der Absaugung an der Tür und der Einströmung an der Fassade von der Stellgröße der Pumpenregelung, der Frequenzvorgabe für die Frequenzumrichter der Pumpen. Zusätzlich ist der Verlauf des Unterdrucks im Modellraum gegenüber dem Luftdruck der umgebenden Laborhalle dargestellt. Für den Modellraum ist zusätzlich zum Volumenstrom auch der zugehörige Luftwechsel ausgewiesen.

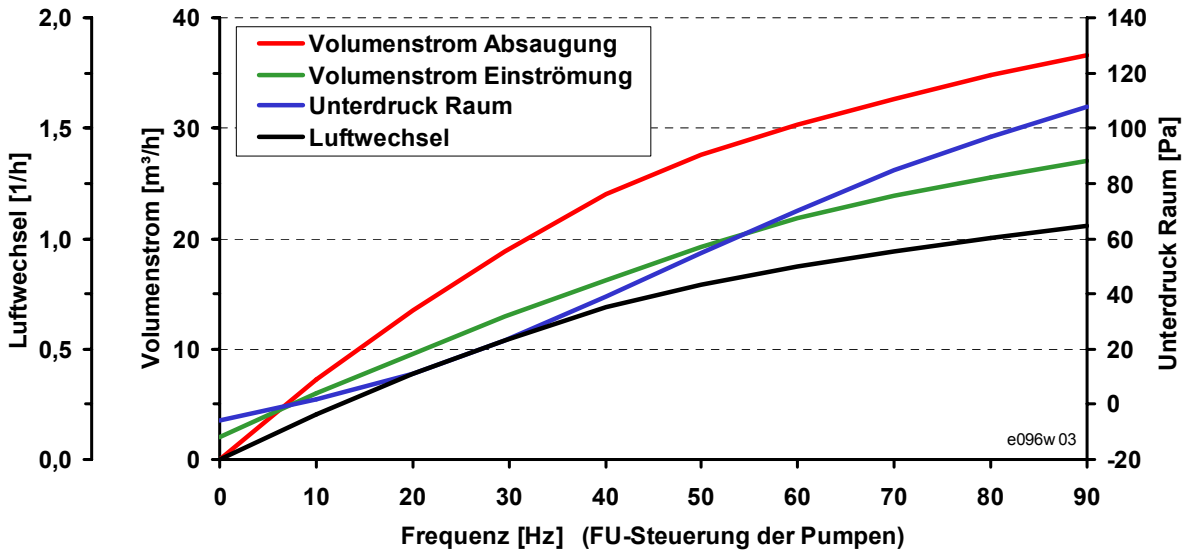

Abbildung 7-5: Abhängigkeit der Volumenströme und des Luftdrucks im Modellraum (Unterdruck gegenüber Umgebung) von der Stellgröße der Pumpenregelung.

Bei Stillstand der Pumpen (Frequenz 0 Hz) stellt sich ein leichter Überdruck und damit verbunden ein geringer einströmender Volumenstrom ein. Dies resultiert aus dem Betrieb der Anlage zur Außentemperatursimulation, die im Vorbau einen leichten Überdruck gegenüber der Laborhalle erzeugt. Auffallend ist jedoch die mit steigendem Unterdruck im Raum anwachsende Differenz zwischen dem abgesaugten Volumenstrom und dem der nachströmenden Luft. Trotz mehrfacher Abdichtung aller Baufugen weist der Modellraum Undichtigkeiten

auf, durch die abhängig vom Unterdruck im Raum Luft einströmt. Bei der Untersuchung der Quelle dieses Luftstroms stellte sich heraus, dass die aus Hohllochziegeln gefertigten Wände selbst die Ursache sind, indem Luft direkt durch die Wände diffundiert. Begünstigt wird dies durch die Bauweise der Wände im Dünnbettmörtelverfahren. Dabei weisen die vertikalen Ziegelstöße lediglich eine Verzahnung auf, so dass nur der aufgebrachte Putz eine Luftströmung vermeiden kann. Aufgrund der Porosität von normalem Innenputz ist das nur begrenzt der Fall. Zusätzlich bilden die Hohlziegel durch das fehlende Mörtelbett vertikale Luftkanäle, die sich über die gesamte Wandhöhe erstrecken können und dadurch die Luftdurchlässigkeit begünstigen.

Bei den durchgeführten Versuchsläufen mit dem Prüfstand wurde jeweils ein konstanter Außenluftwechsel vorgegeben. Durch die beschriebenen Einflüsse muss dazu eine entsprechend größere Luftmenge aus dem Raum abgeführt werden. **Abbildung 7-6** zeigt einen Tagesverlauf der gemessenen Volumenströme an der Absaugung und dem Lufteinlass.

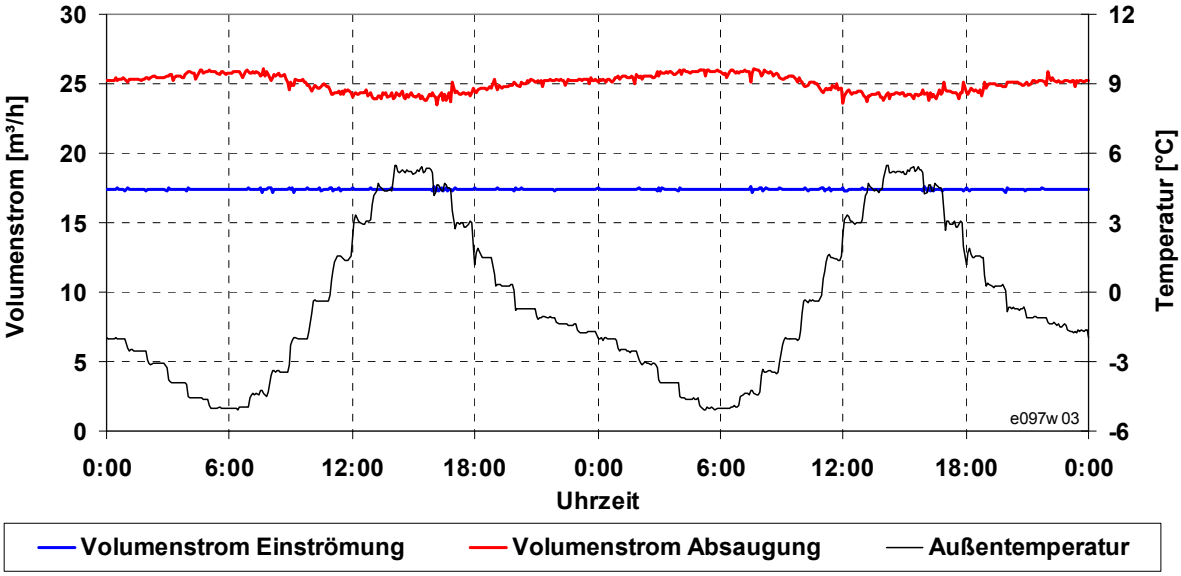

Abbildung 7-6: Außentemperaturverlauf und Volumenstromverläufe der Lüftungsanlage bei konstantem Außenluftwechsel (5-Minuten-Mittelwerte).

Der als Regelgröße verwendete Volumenstrom der Einströmung an der Fassade wird sehr konstant auf den Vorgabewert von 17 m³/h geregelt, was einem Außenluftwechsel von 0,5 h^{-1} entspricht. Der Volumenstrom an der Luftabsaugung ist mit 25 m³/h nicht nur entsprechend höher, er folgt auch einem sich wiederholenden Tagesgang, der sehr gut mit der Außentemperatur im Vorbau korreliert. Der Einfluss auf die Lüftungsanlage erfolgt hier über die sich ändernden Druckverhältnisse im Luftkreis der Außentemperatursimulation, der den verglasten Vorbau versorgt. In **Abbildung 7-7** ist ein weiterer, jedoch kurzfristig wirkender Einflussfak-

tor erkennbar. Dargestellt ist der Volumenstrom an der Einströmöffnung in hoher zeitlicher Auflösung sowie die Heizleistung des Referenzheizsystems.

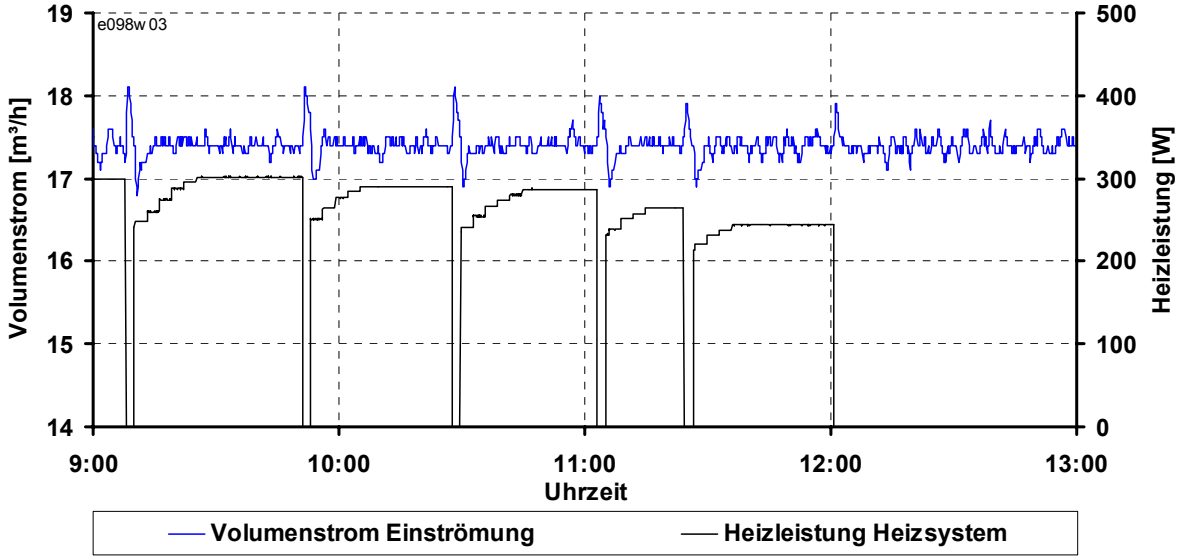

Abbildung 7-7: Einfluss des Referenzheizsystems auf den Volumenstrom am Lufteinlass an der Modellraumfassade.

Es ist zu erkennen, dass jeder Schaltvorgang des Heizsystems, bei dem die Heizleistung an- oder abgeschaltet wird, zu einer Störung des Luftstroms führt. Ursache hierfür sind kurzfristige Luftdruckschwankungen im Raum, die sich direkt auf den Volumenstrom an der Einströmöffnung auswirken, der auf einer Druckdifferenz zwischen dem Vorbau und Modellraum basiert. Das Einschalten der Heizleistung führt durch die schnelle Erwärmung der Luft bei den Heizelementen zu einem Anstieg des Luftdrucks im Raum. Dadurch verringert sich die Druckdifferenz zum Vorbau und der einströmende Volumenstrom sinkt ebenfalls. Zwischen dem Schaltzeitpunkt des Heizsystems und der Änderung des Volumenstroms liegt dabei eine Zeitverzögerung von bis zu 10 Sekunden. Beim Abschalten der Heizleistung tritt der entsprechende Effekt mit umgekehrter Wirkung auf. Die Störungen werden jedoch von der Regelung der Lüftungsanlage sehr schnell kompensiert, so dass sie zu keiner dauerhaften Beeinflussung des vorgegebenen Volumenstroms führen.

7.3 Energetisches Verhalten und Kennzahlen des Modellraums

Der Modellraum ist einerseits Untersuchungsobjekt des Prüfstands, andererseits beeinflusst sein energetisches Verhalten jedoch auch den Betrieb eines integrierten Heizsystems. Die Kenntnis der bauphysikalischen Kennwerte des Modellraums bildet dabei die Grundlage für seine energetische Bewertung. **Tabelle 7-1** zeigt eine Übersicht des Aufbaus der Wände, der Decke und des Bodens des Modellraums sowie die Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme-

kapazität und Dichte der jeweiligen Baustoffe. Die Reihenfolge der Bauteilschichten ist dabei ausgehend vom Rauminneren nach außen angegeben. Die Quellen der Daten sind, soweit verfügbar, Herstellerangaben ergänzt um Werte des VDI-Wärmeatlas /VDI WA/.

Tabelle 7-1: Materialkennwerte und Aufbau der Modellraumwände, -boden und -decke.

Wandaufbauten	**Schicht-dicke**	**Wärme-leitwert**	**Spez. Wärme-kapazität**[1]	**Dichte**
Einheit	cm	W/(m·K)	Wh/(kg·K)	kg/m³
Fassade				
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7 [1]	0,28	1400 [1]
Leicht-Hochlochziegel 1	36,5	0,18 [2]	0,23	800 [2]
Dämmputz	1,5	0,22 [2]	0,28	740 [2]
Edelputz	0,5	0,7 [1]	0,28	1000 [1]
Seitenwände				
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7 [1]	0,28	1400 [1]
Leicht-Hochlochziegel 2	17,0	0,16 [2]	0,23	800 [2]
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7 [1]	0,28	1400 [1]
Polystyrol-Isolierung	40,0	0,04 [2]	0,42	30 [2]
Rückwand				
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7 [1]	0,28	1400 [1]
Leicht-Hochlochziegel 2	24,0	0,16 [2]	0,23	800 [2]
Gips-Kalk-Putz	0,5	0,7 [1]	0,28	1400 [1]
Polystyrol-Isolierung	40,0	0,04 [2]	0,42	30 [2]
Raumdecke				
Stahlbeton	10,0	2,1 [1]	0,24	2670 [1]
Polystyrol-Isolierung	40,0	0,04 [2]	0,42	30 [2]
Boden				
Trockenestrich	2,5	0,29 [2]	0,28	120 [2]
Polystyrol-Trittschalldämmung	7,0	0,04 [2]	0,42	30 [2]
Stahlbeton	16,0	2,1 [1]	0,24	2670 [1]
Polystyrol-Isolierung	40,0	0,04 [2]	0,42	30 [2]

[1] Quelle: VDI-Wärmeatlas
[2] Quelle: Herstellerangabe

Mit den Materialkennwerten und den Abmessungen der einzelne Wand- und Geschossbauteilen des Modellraums können die in Tabelle 7-2 zusammengefassten Wärmedurchgangskoeffizienten U und Wärmespeicherkapazitäten C_{th} berechnet werden.

$$U = \frac{1}{\alpha_i + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_{th,j}} + \alpha_a} \qquad [\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}] \qquad (7\text{-}1)$$

mit α_i [W/(m²·K)] : Wärmeübergangskoeffizient innen
α_a [W/(m²·K)] : Wärmeübergangskoeffizient außen
d_j [m] : Dicke einer Bauteilschicht
$\lambda_{th,j}$ [W/(m·K)] : Wärmeleitwert einer Bauteilschicht

$$C_{th} = \sum_j V_j \cdot \rho_j \cdot c_j \qquad [\mathrm{Wh/K}] \qquad (7\text{-}2)$$

mit V_j [m³] : Volumen einer Bauteilschicht
ρ_j [kg/m³] : Dichte einer Bauteilschicht
c_j [Wh/(kg·K)] : Spezifische Wärmekapazität einer Bauteilschicht

Die für die Berechnungen verwendeten Wärmeübergangskoeffizienten α_i und α_a entsprechen den Werten für ebene Oberflächen in DIN EN 6946 /6946/. Die Fassade erfüllt durch die verwendeten Materialien mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,44 W/(m²·K) bereits die Anforderungen der Energieeinsparverordnung /EnEV/, die für Außenwände einen Höchstwert von 0,45 W/(m²·K) vorgibt. Auch das Fenster erfüllt die Anforderung der EnEV, hier liegt der Höchstwert bei 1,7 W/(m²·K).

Tabelle 7-2: Wärmedurchgangskoeffizienten und Speicherkapazitäten der Bauteile.

Materialkennwerte	**Wärmedurchgangs-koeffizient**	**Wärmespeicherkapazität**
Einheit	W/(m²·K)	Wh/K
Fassade (Mauerwerk)	0,44	684
Fenster	1,40	-
Seitenwände	0,09	343
Rückwand	0,08	398
Raumdecke	0,10	925
Boden	0,08	2437

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der weiteren Bauteile beziehen sich jeweils auf Wärmeströme vom Raum zur umgebenden Laborhalle und beinhalten die vorhandene Wärmedämmung des Prüfstands. Das vordere, fassadennahe Segment der Raumdecke weist zusätzlich einen Bereich auf, in dem konstruktiv bedingt die den Modellraum umfassende Isolierung reduziert ist. In diesem Bereich, unterhalb der Luftverteilung der Außentemperatursimulationsanlage, beträgt der Wärmedurchgangskoeffizient 0,55 W/(m²·K). Die sehr hohe Speicherkapazität des Modellraumbodens ergibt sich aus den großen Betonelementen. Durch den Fußbodenaufbau des Raums mit einer Trittschalldämmung, die als wärmetechnische Isolierung wirkt, werden die Speichermassen der Betonplatten nur begrenzt wirksam. Zu erkennen ist dies auch an dem in **Abbildung 7-8** dargestellten mehrtägigen Temperaturverlauf ausgewählter Messstellen im Betonkern des Bodens, der Decke und einer Seitenwand sowie der mittleren Raumtemperatur im Vergleich. Die dargestellten Messwerte entstammen einem Versuchslauf mit dem Tagesprofil 'Wintertag sonnig' und Heizbetrieb mit Nachtabsenkung.

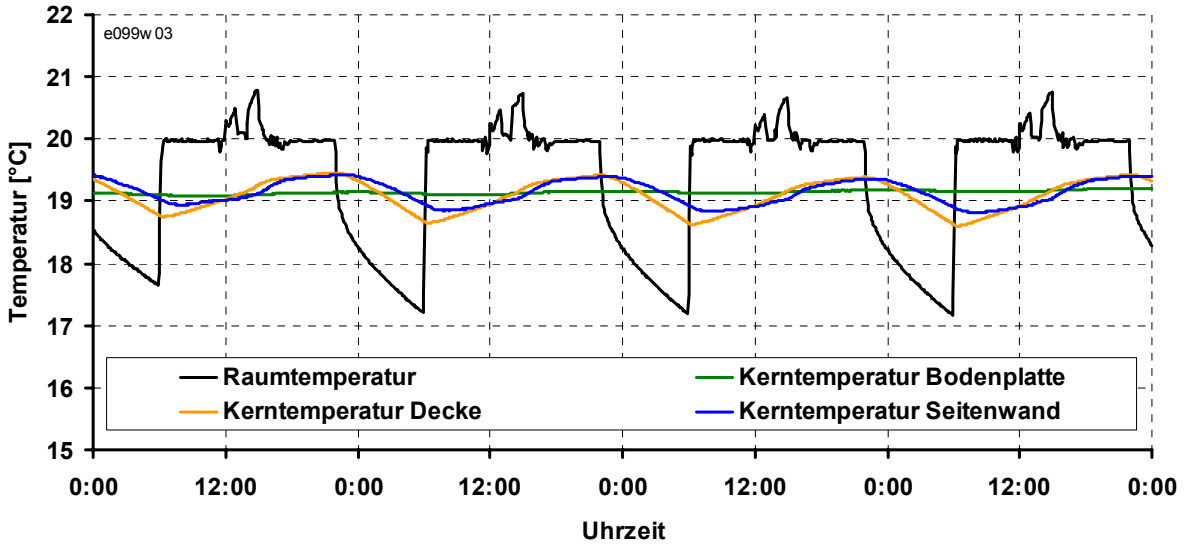

Abbildung 7-8: Mehrtägiger Verlauf von Raumtemperatur, Wand- Decken- sowie Bodenkerntemperatur bei Heizbetrieb mit Nachtabsenkung im Vergleich.

Es ist gut erkennbar, dass die Modellraumwand und die Decke als Speichermassen während der Nachtabsenkung entspeichert werden und während des Tages wiederum Energie aufnehmen. Die feststellbaren Temperaturschwankungen im Laufe eines Tages betragen dabei bis zu 0,7 K, wobei die größte Energiemenge in den Betonelementen der Raumdecke umgesetzt wird. Die Schwankungsbreite der Kerntemperatur des Bodens liegt dagegen unter 0,1 K, und damit im Bereich der Messgenauigkeit. Aufgrund der höheren Speicherkapazität und den durch die isolierende Trittschalldämmung reduzierten Wärmestrom ist hier praktisch keine Temperaturänderung vorhanden. Auf die in diesem Versuch zyklisch wiederkehrenden tägli-

chen Temperaturänderungen im Raum, bedingt durch die Nachtabsenkung, die Heizung sowie die zur Mittagszeit aufkommende Sonneneinstrahlung, wirken somit hauptsächlich die Wände und die Decke des Raums als ausgleichende Speicherelemente, während der Boden einen deutlich geringeren Anteil hat.

Eine Beurteilung des energetischen Verhaltens des Modellraums und seiner Speichermassen ist auch durch die Auskühlzeitkonstante möglich, die als Verhältnis der wirksamen Speichermassen zum stationären Wärmeverlust definiert ist /3808//ROU/. Sie kann näherungsweise auch messtechnisch ermittelt werden. Dabei wird ausgehend von stationären Verhältnissen eine Abkühlung des Raumes durchgeführt, indem bei Konstanz von Außentemperatur und Luftwechsel die Raumheizung abgeschaltet wird. In **Abbildung 7-9** ist das Ergebnis eines nach dieser Vorgehensweise durchgeführten Versuchs dargestellt. Bei einer Außentemperatur von 10 °C und einem Außenluftwechsel von 0,5 h^{-1} wurde der Raum in einen stationären Zustand mit 25 °C Raumtemperatur gebracht. Nach Abschaltung der Heizung beginnt der Abkühlvorgang des Raums. Dabei sinkt die Temperatur der Raumdecke trotz ihrer höheren Wärmekapazität geringfügig schneller als die der Wände, was auf die höhere Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen ist.

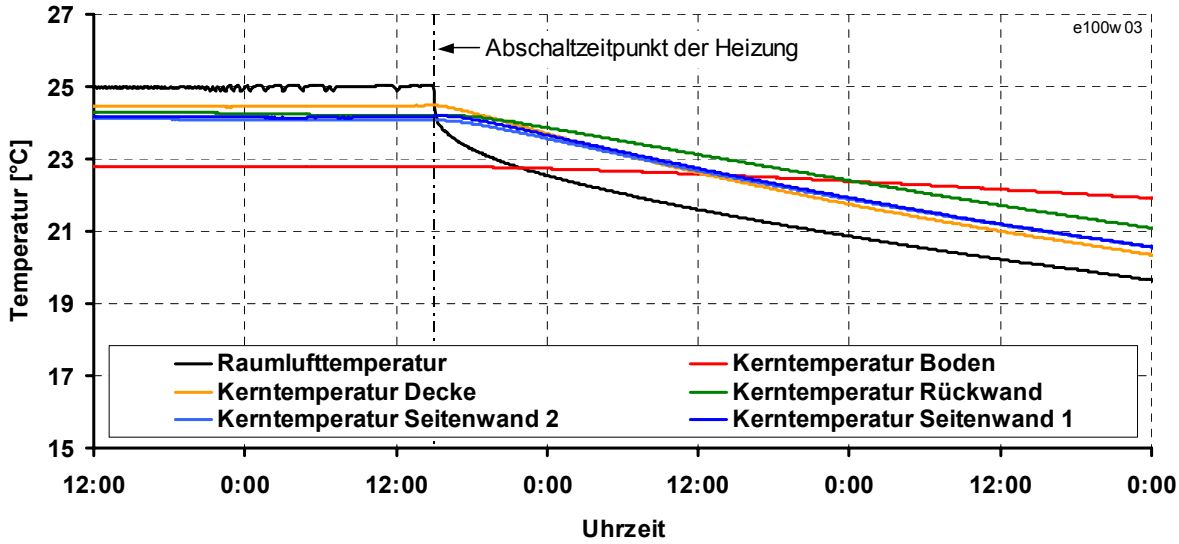

Abbildung 7-9: Abkühlung des Modellraums durch Abschalten der Heizung bei konstanter Außentemperatur (10 °C) und konstantem Außenluftwechsel (0,5 h^{-1}).

Die Raumtemperatur folgt während der Abkühlung in erster Näherung einem exponentiellen Verlauf; somit kann die Zeitkonstante τ nach folgendem Zusammenhang bestimmt werden:

$$\tau = \frac{t_1 - t_0}{\ln \frac{\vartheta_R(t_0) - \vartheta_A}{\vartheta_R(t_1) - \vartheta_A}} \quad [\mathrm{h}] \qquad (7\text{-}3)$$

mit t_0, t_1 [h] : Zeitpunkt nach dem Abschalten des Heizsystems, wobei $t_1 > t_0$

ϑ_A [°C] : Außentemperatur

ϑ_R [°C] : Raumtemperatur

Die Wahl der Zeitpunkte t_0 und t_1 hat bei der Berechnung entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis; nach /3808/ und /ROU/ sollte die Zeitkonstante aus den ersten 8 bis 15 Stunden nach Beginn der Auskühlung bestimmt werden. Bei dem in Abbildung 7-9 dargestellten Versuch sinkt die Raumtemperatur nach Abschaltung der Heizung durch die etwas niedrigeren Wandtemperaturen in den ersten 15 Minuten sehr schnell ab. Erst nach Unterschreiten der Wandkerntemperaturen beginnt ein exponentiell verlaufender Abkühlvorgang, daher wird der Zeitpunkt dieses Unterschreitens als t_0 verwendet, die Raumtemperatur beträgt dabei 24,1°C. Die Ergebnisse der Berechnung der Zeitkonstanten τ nach Gleichung 7-3 für eine Abkühldauer ($t_1 - t_0$) zwischen 8 und 24 Stunden sind in **Tabelle 7-3** zusammengefasst.

Tabelle 7-3: Berechnete Abkühlzeitkonstante τ des Modellraums für den Zeitraum 8-24 Stunden nach Abkühlbeginn.

Abkühldauer ($t_1 - t_0$)	**Raumtemperatur für t_1**	**Abkühlzeitkonstante**
h	°C	h
8	22,61	72
12	22,26	86
16	21,94	96
20	21,66	105
24	21,39	113

Die Raumtemperatur unterschreitet bei dem durchgeführten Versuch, wie in Abbildung 7-9 zu erkennen, erst nach etwa 7 Stunden die Kerntemperatur der Bodenelemente. Damit ist die berechnete Zeitkonstante aus den ersten 12 Stunden des Abkühlvorgangs als zu niedrig zu erachten, da hier die Entspeicherung des Bodenelements nicht ausreichend eingeht. Verschiebt man das Berechnungsintervall um die genannten 7 Stunden auf eine Abkühldauer von 15 bis 22 Stunden, so ergibt sich eine Abkühlzeitkonstante für den Modellraum zwischen 95 Stunden und 110 Stunden. Diese Werte kennzeichnen den Modellraum als überdurchschnittlich gut wärmespeichernd. Der Grund hierfür liegt in seinem konstruktiven Aufbau,

wodurch dem Raum die gesamte Wärmespeicherfähigkeit der Innenwände zur Verfügung steht. Die Speichermassen in Gebäuden werden dagegen von allen angrenzenden Räumen beeinflusst. Das bedeutet, dass im Modellraum bei langfristigen thermischen Einflüssen eine höhere Wärmespeicherkapazität wirksam wird als in einem vergleichbaren Raum innerhalb eines Gebäudes.

Die quantitative Bestimmung der Wärmeströme, die das wärmetechnische Verhalten des Modellraums kennzeichnen, ist die Grundlage für eine energetische Bilanzierung sowie die Bewertung des wärmetechnischen Verhaltens des Raums und eines Heizsystems unter definierten Rahmenbedingungen. Das hier verwendete Bilanzierungsverfahren, das nachfolgend beschrieben wird, bietet dabei auch eine gute Möglichkeit der Überprüfung der verwendeten Materialkennwerte. Die Bilanzgrenze dieser Bilanzierungsmethodik umfasst den gesamten Modellraum. Alle Wärmeströme, die über diese Grenze führen, sind somit für eine energetische Bilanzierung zu erfassen. **Abbildung 7-10** zeigt schematisch den Modellraum sowie die einzelnen bilanzierten Wärmeströme. Nicht berücksichtigt werden dabei Randeffekte an den Übergängen zwischen den Bauteilen.

Wie in realen Gebäuden tritt am Modellraum ein Wärmestrom aufgrund von Transmission an der Fassade ($Q_{Tr,Fa}$) sowie durch das Fenster ($Q_{Tr,Fe}$) auf. Weiterhin ist für die durch die Lüftungsanlage nachgebildeten Undichtigkeiten eines Gebäudes ein Wärmestrom aufgrund des Luftvolumenstroms ($Q_{Lu,Fa}$) zu berücksichtigen, wenn die Anlage betrieben wird. Die Richtung dieser Wärmeströme ist von der Außentemperatur ϑ_A vor der Fassade sowie der Raumtemperatur ϑ_R und Kerntemperatur der Fassade $\vartheta_{K,Fa}$ abhängig. Die Bodenplatte des Modellraums ist in drei Segmente unterteilt, wobei das erste Segment (an der Fassade) gegenüber dem Vorbau nur durch eine Ziegelschicht von 10 cm getrennt ist. Die Folge ist ein zusätzlich zu berücksichtigender Wärmestrom ($Q_{Tr,Bo,A}$) zwischen diesem Bodensegment und dem Vorbau. Direkte und diffuse Strahlung durch das Fenster, auch als äußere Wärmelast bezeichnet, führen zu einem Wärmestrom ($Q_{Str,Fa}$) in den Raum. Das Heizsystem im Raum ist als Wärmequelle mit der Heizleistung P_H einzubeziehen. Alle Bauteile des Raums werden in einer Bilanzierung mit der Änderung ihrer gespeicherten Wärme ΔQ als Differenz zwischen Anfang und Ende des Bilanzzeitraums erfasst.

Zusätzlich zu den genannten Bilanzposten sind speziell am Modellraum weitere Wärmeströme zu berücksichtigen. Aufgrund der durch den Betrieb der Lüftungsanlage durch die Wände diffundierenden Luftmenge ist hier ein Wärmestrom ($Q_{Lu,W}$) zwischen dem Raum und der umgebenden Laborhalle einzubeziehen. Die Richtung dieses Wärmestroms ergibt sich aus der Temperaturdifferenz zwischen der Raumluft und der Halle. Die als Innenwände konzipierten Bauteile des Raums wie auch die Raumdecke und -boden sind gegenüber der umgebenden Laborhalle mit einer starken wärmetechnischen Isolierung versehen. Da eine Isolierung einen Wärmestrom nicht unterbindet sondern nur vermindern kann, verbleiben hier zu berücksichti-

gende Transmissionswärmeströme zwischen dem Raum und der Laborhalle über die entsprechenden Bauteile ($\dot{Q}_{Tr,WL}$, $\dot{Q}_{Tr,WR}$, $\dot{Q}_{Tr,WH}$, $\dot{Q}_{Tr,Bo}$, $\dot{Q}_{Tr,De}$).

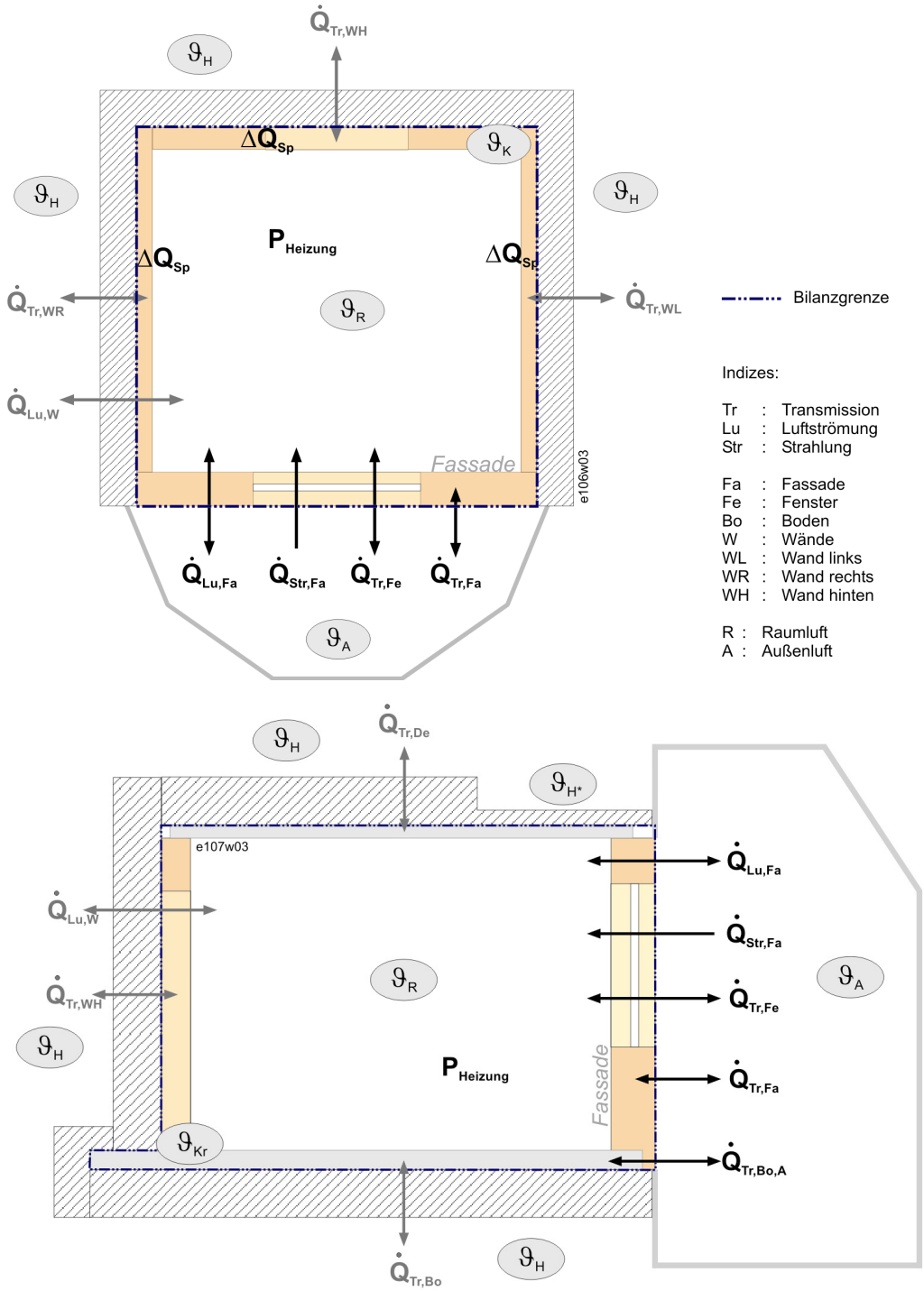

Abbildung 7-10: Wärmeströme am Modellraum (Draufsicht und Seitenansicht).

Die Berechnung dieser Wärmeströme und ihre Bilanzierung über einen definierten Zeitraum erfolgt mit den Kennwerten der entsprechenden Bauteile und den zeitlichen Verläufen der messtechnisch erfassten Größen. Die Wärmemengen durch Transmissionswärmeströme Q_{Tr} berechnen sich dabei nach folgendem Zusammenhang:

$$Q_{Tr,x} = \int_{t_0}^{t_1} \dot{Q}_{Tr,x}(t)\,dt = U_x^* \cdot A_x \cdot \int_{t_0}^{t_1} \left(\vartheta_{K,x}(t) - \vartheta_{a,x}(t)\right) dt \qquad \text{[Wh]} \qquad (7\text{-}4)$$

mit x : Index des entsprechenden Bauteils

t_0, t_1 [h] : Beginn und Ende des Bilanzzeitraums

A_x [m²] : Wärmeübertragende Fläche des jeweiligen Bauteils

$\vartheta_{a,x}$ [°C] : Bezugstemperatur außerhalb des Raums; Abhängig von der Lage des Bauteils

$\vartheta_{K,x}$ [°C] : Kerntemperatur des Bauteils

U_x^* [W/(m²·K)] : Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils

Der Wärmedurchgangskoeffizient U^* wird dabei entsprechend Gleichung 7-1 jeweils für eine Strecke ausgehend von der Mitte der Bauteile (bezogen auf die Dicke) über die Bilanzgrenze zur umgebenden Hallenluft berechnet. Der Wärmeübergangskoeffizient α_i entfällt dabei. Für die Fassade und das Fenster des Modellraums ist die äußere Bezugstemperatur der Berechnung die Außentemperatur, die im verglasten Vorbau gemessen wird, für alle weiteren Bauteile des Raums ist es die Temperatur der Laborhalle. Diese wird an allen Seiten des Prüfstands gemessen. Die Kerntemperatur eines Bauteils kann aufgrund der gleichmäßigen Verteilung der einzelnen Messstellen jeweils als einfacher Mittelwert aus den Messwerten berechnet werden.

Für die Berechnung der Wärmemengen Q_{Lu} aufgrund der Luftvolumenströme gilt folgende Gleichung:

$$Q_{Lu,x} = \int_{t_0}^{t_1} \dot{Q}_{Lu,x}(t)\,dt = \rho_{Lu} \cdot c_{Lu} \cdot \int_{t_0}^{t_1} \left(\dot{V}_x(t) \cdot \left(\vartheta_R(t) - \vartheta_{a,x}(t)\right)\right) dt \qquad \text{[Wh]} \qquad (7\text{-}5)$$

mit : $\dot{V}_x$ [m³/h] : Volumenstrom

$\vartheta_{a,x}$ [°C] : Bezugstemperatur außerhalb des Raums; abhängig vom Ort des Volumenstroms

Der für die Berechnung des Lüftungswärmestroms $\dot{Q}_{Lu,Fa}$ benötigte Volumenstrom an der Durchführung durch die Fassade wird kontinuierlich messtechnisch erfasst. Die Höhe der Luftströmung durch die Wände kann aus der Differenz der an der Modellraumtür abgesaugten Luftmenge und der an der Fassade nachströmenden Menge berechnet werden. Der sich daraus ergebende Volumenstrom geht in die Berechnung des Wärmestrom $\dot{Q}_{Lu,W}$ ein.

Für die Berechnung der Wärmemenge $Q_{Str,Fa}$, die durch die Einstrahlung des Sonnensimulators in den Raum eingebracht wird, gilt folgende Gleichung:

$$Q_{Str,Fa} = \int_{t_0}^{t_1} \dot{Q}_{Str,Fa}(t)\,dt = g_{Fe} \cdot A_{Gl} \cdot \int_{t_0}^{t_1} \left(E_{e,SP}(t) \cdot \cos(\theta_{Fe}(t))\right) dt \quad \text{[Wh]} \qquad (7\text{-}6)$$

mit g_{Fe} [-] : Gesamtenergiedurchlassgrad

A_{Gl} [m²] : Glasfläche des Fensters

$E_{e,SP}$ [W/m²] : Bestrahlungsstärke des Sonnensimulators bezogen auf die Einstrahlrichtung

θ_{Fe} [°] : Einstrahlrichtung der Sonne auf das Fenster

Die vom Sonnensimulator erzeugte Bestrahlungsstärke wird aus den in Abschnitt 5.4 beschriebenen Berechnungen ermittelt. Dabei wird eine Korrektur der für die Fahrplanerstellung berechneten Bestrahlungsstärkewerte mit der während der Versuchsdurchführung gemessenen Versorgungsspannung durchgeführt. Dadurch werden die Auswirkungen der Spannungsschwankungen im Versorgungsnetz auf die Bestrahlungsstärke berücksichtigt. Der Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung beträgt nach Herstellerangaben 0,57. Da das Spektrum des Sonnensimulators näherungsweise dem Sonnenspektrum entspricht, kann diese Angabe auch für die Einstrahlung des Sonnensimulators angewendet werden.

Bei der Bilanzierung eines durchgeführten Versuchslaufs über einen ausgewählten Zeitraum muss die Veränderung der Energieinhalte der wärmespeichernden Bauteile des Modellraums sowie der Raumluft der Summe aller Wärmeströme über die Bilanzgrenze sowie der inneren Wärmequellen innerhalb dieses Zeitraums entsprechen. Für den in Abbildung 7-9 dargestellten Versuch einer Abkühlung des Modellraums nach der Abschaltung des Heizsystems ist in **Abbildung 7-11** die Energiebilanz dargestellt. Der Bilanzzeitraum erstreckt sich über 48 Stunden nach der Heizungsabschaltung.

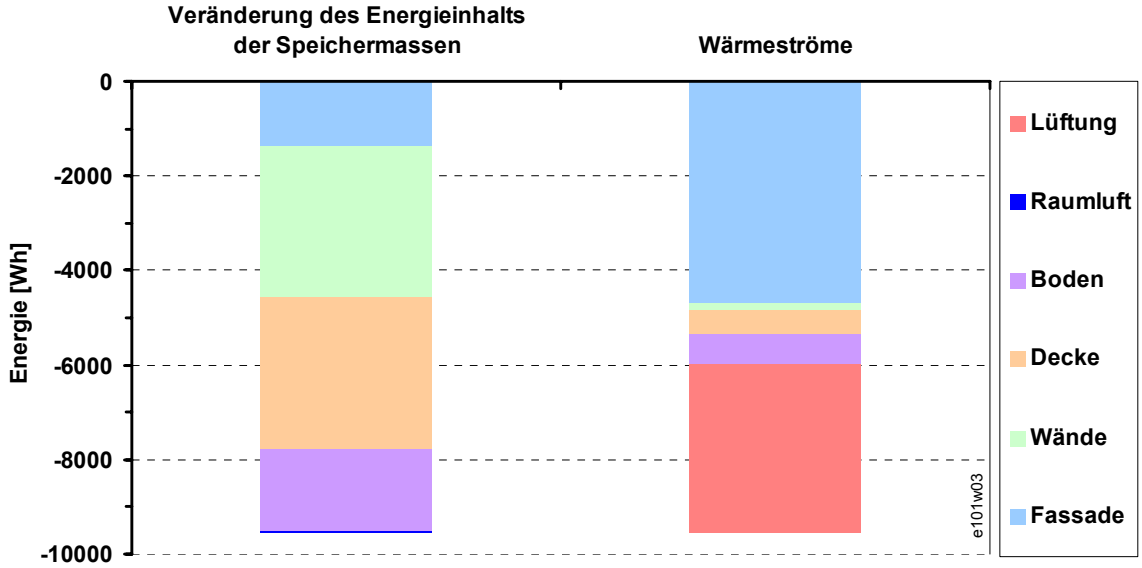

Abbildung 7-11: Energiebilanz des Abkühlversuchs (Abbildung 7-9) über einen Bilanzzeitraum von 48 Stunden nach Abschalten der Heizung.

Dargestellt ist in der linken Säule die Veränderung des Energieinhalts der Speichermassen des Raums zwischen Beginn und Ende des Bilanzzeitraums, aufgeteilt nach den einzelnen Bauteilen. Den größten Anteil mit jeweils 34 % haben hier die drei Innenwände des Raums sowie die Deckenelemente. Die rechte Säule zeigt die über den gleichen Zeitraum aufsummierten Wärmeströme. Hier treten erwartungsgemäß die höchsten Wärmeverluste an der Fassade, mit einem Anteil von 49 % an den gesamten Wärmeströmen, auf. Der Betrieb der kontrollierten Raumlüftung mit einem konstanten Außenluftwechsel von 0,5 h^{-1} ist für 37 % der Wärmeverluste verantwortlich. Dabei ist der Wärmestrom, der auf der Diffusion von Luft durch die Modellraumwände basiert, mit einbezogen. Der Wärmeverlust über die Bodenelemente basiert hauptsächlich auf dem Transmissionswärmestrom des fassadennächsten Elements zum Vorbau vor der Fassade. Der Wärmestrom zur Laborhalle spielt wie bei den Wänden nur eine untergeordnete Rolle, da die Temperaturdifferenz zur Laborhalle im Versuchszeitraum sehr gering ist.

Bei den in **Abbildung 7-12** sowie **Tabelle 7-5** dargestellten Bilanzierungen von drei Versuchsläufen wurde der Modellraum jeweils mehrere Tage mit dem in Abschnitt 4.1 beschriebenen Tagesgang ’Wintertag sonnig’ beaufschlagt. Ein weiterer gemeinsamer Versuchsparameter ist ein konstanter Außenluftwechsel von 0,5 h^{-1} sowie der Betrieb des Referenzheizsystems als Raumheizung. **Tabelle 7-4** gibt eine Übersicht zu den wichtigsten Rahmenbedingungen der drei Versuche. Die Versuche 1 und 2 wurden bei durchgehendem Heizbetrieb mit einer Raumsolltemperatur von 20 °C durchgeführt, Versuch 1 jedoch ohne direkte und diffuse Einstrahlung. Versuch 3 wurde wie auch Versuch 2 mit der vollständigen Einstrahlung des Tagesgangs durchgeführt. Im Heizbetrieb des dritten Versuchs wurde zusätzlich eine Nachtabsenkung von 22 bis 6 Uhr programmiert, mit einer zulässigen Mindestraumtemperatur von 17 °C.

Tabelle 7-4: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter von drei ausgewählten Prüfstandsversuchen mit Variationen einzelner Parameter.

Versuchsparameter	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Außentemperatur	Tagesgang ’Wintertag sonnig’ Tagesmitteltemperatur -0,53 °C		
Sonneneinstrahlung	keine Sonneneinstrahlung	Tagesgang ’Wintertag sonnig’	
Außenluftwechsel	0,5 h^{-1} (konstant)		
Raumheizung	Referenzheizsystem		
Raumsolltemperatur	20 °C (0-24 Uhr)		20 °C (6-22 Uhr) 17 °C (22-6 Uhr)

Die energetische Bilanzierung dieser drei Prüfstandsversuche ist in Abbildung 7-12 dargestellt. Der Bilanzzeitraum beträgt jeweils 24 Stunden von 0 Uhr bis 24 Uhr eines aus den mehrtägigen Versuchen ausgewählten Tages.

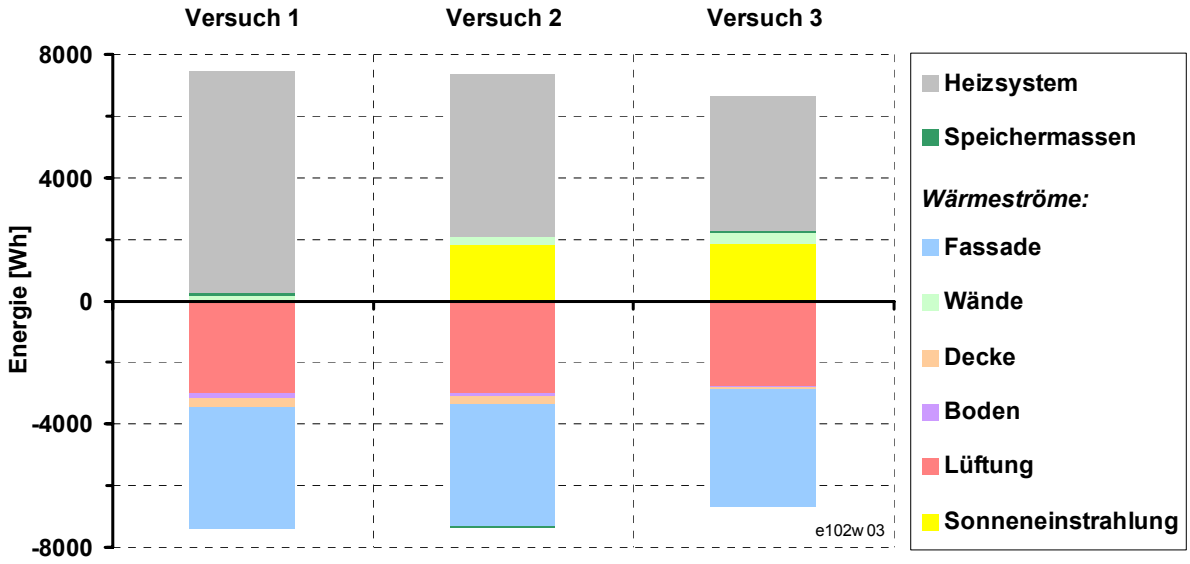

Abbildung 7-12: Energiebilanzen von Versuchen mit dem Tagesprofil ‚Wintertag sonnig' über einen Bilanzzeitraum von jeweils 24 Stunden.

Tabelle 7-5: Energiebilanzen von Versuchen mit dem Tagesprofil ‚Wintertag sonnig' über einen Bilanzzeitraum von jeweils 24 Stunden.

Bilanzposten	**Versuch 1**	**Versuch 2**	**Versuch 3**
Einheit	Wh/d	Wh/d	Wh/d
Bilanz der Wärmeströme:			
Fassade	-3972	-4002	-3824
Wände	185	216	362
Decke	-316	-245	-62
Boden	-135	-93	-11
Lüftung	-3009	-2993	-2782
Sonneneinstrahlung		1854	1848
Heizsystem	7157	5274	4368
Summe (Saldo)	-90	11	-101
Veränderung des Energieinhalts der Speichermassen	-107	53	-73

Dargestellt sind jeweils die über den Bilanzzeitraum summierten Wärmeströme, die Veränderung des Energieinhalts der Speichermassen sowie der Energieeintrag durch das Heizsystem. Beim ersten Versuch deckt das Heizsystem als einzige Wärmequelle die gesamten Wärmeverluste des Raums, die fast ausschließlich durch die Fassade und die Raumlüftung verursacht werden. Die Bilanz des unter den gleichen Rahmenbedingungen, jedoch mit Sonneneinstrahlung, durchgeführten Versuchs 2 zeigt unverändert hohe Wärmeverluste. Diese werden nun jedoch durch den Energieeintrag der Sonneneinstrahlung und des Heizsystems ausgeglichen. Die vom Heizsystem eingebrachte Energie reduziert sich dabei im Vergleich zu Versuch 1 um den gleichen Betrag, der durch die Einstrahlung in den Raum gelangt. Das bedeutet, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen die von der Sonne eingestrahlte Energie nahezu vollständig zur Deckung der Wärmeverluste des Raums genutzt wird. Zu erkennen ist dies auch an den Tagesverläufen der Raumtemperatur, die für die drei Versuche in **Abbildung 7-13** dargestellt sind.

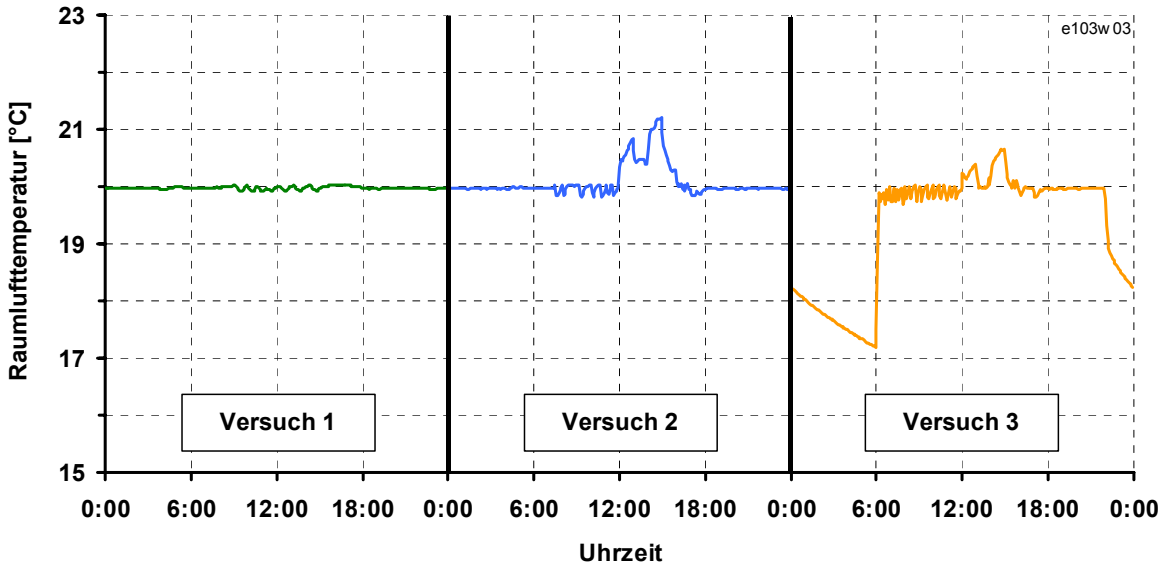

Abbildung 7-13: Tagesverläufe der Raumlufttemperatur.

Während bei Versuch 1 die Raumtemperatur allein durch das geregelte Heizsystem bestimmt wird, tritt bei Versuch 2 durch die um 12:00 Uhr einsetzende direkte Sonneneinstrahlung eine geringfügige Erwärmung der Raumluft ein. Wie auch beim dritten Versuch ist diese Erwärmung auch durch die schnelle Heizungsregelung nur sehr gering, so dass die Sonneneinstrahlung lediglich Heizenergie substituiert. Der dritte Versuch beinhaltet eine zusätzliche Absenkung der Raumsolltemperatur auf 17 °C von 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr. Während dieser Zeit sinkt die Raumtemperatur, erreicht aber nicht die Mindesttemperatur, so dass das Heizsystem während dieser Zeit nicht in Heizbetrieb geht. Mit der Nachtabsenkung sind auch geringere Wärmeverluste verbunden, wie in Abbildung 7-12 ersichtlich ist. Die Sonneneinstrahlung, die

nur während der Tagstunden auftritt, dient wie auch in Versuch 2 fast vollständig zur Deckung der Wärmeverluste, so dass es zu einem weiteren Rückgang der notwendigen Heizenergie kommt.

Die Nutzung der Speichermassen lässt sich am Beispiel der Temperaturverläufe im Kern einer Seitenwand erkennen (**Abbildung 7-14)**. Es sind jeweils Temperaturverläufe über zwei Tage der beschriebenen Versuche dargestellt, gemessen im Kern einer Seitenwand in verschiedenen Abständen zur Fassade des Modellraums. Ab den Messstellen mit einem Abstand von 180 cm zur Fassade und weiter bis zur Rückwand des Modellraums sind die Temperaturverläufe nahezu identisch. Es ist deutlich zu erkennen, dass die seitlichen Wände durch ihre wärmeleitende Verbindung zur Fassade bis zu einer Tiefe von über einem Meter eine niedrigere Temperatur aufweisen. Ansatzweise ist hier (Versuch 1) auch zeitverzögert der Tagesgang der Außentemperatur erkennbar.

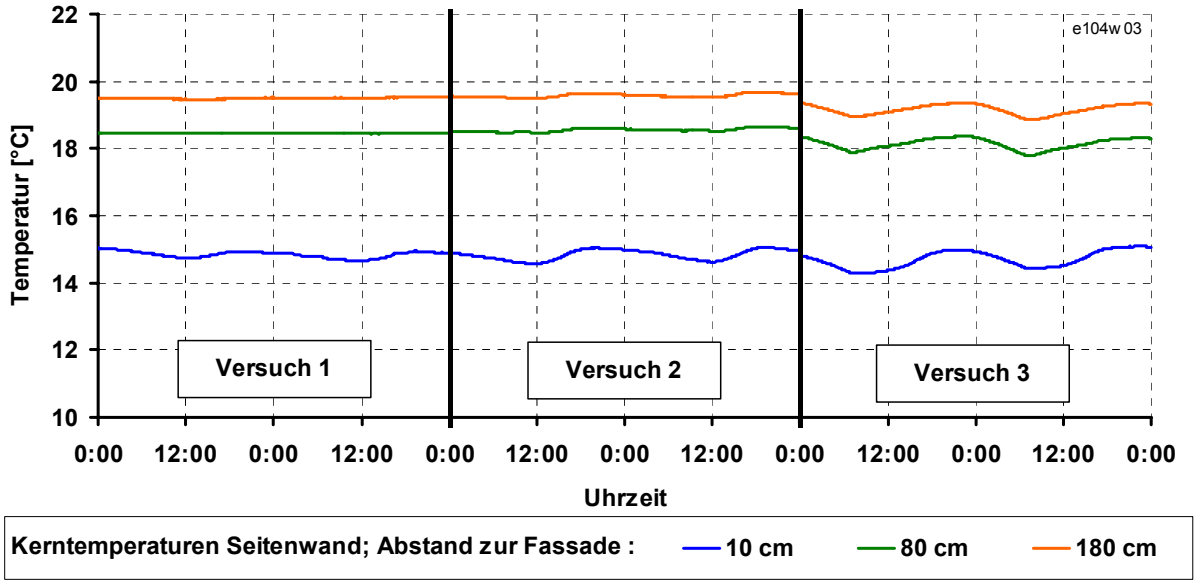

Abbildung 7-14: Verläufe der Kerntemperaturen einer Seitenwand in verschiedenem Abstand zur Fassade (Raumtiefe 350 cm).

In den Versuchen 2 und 3 sind die Auswirkungen des Wärmeeintrags durch die Sonne sowie der Raumtemperaturabsenkung in der Nacht erkennbar. Im zweiten Versuch führt die vor allem in der Mittagszeit durch die Sonneneinstrahlung in den Raum eingebrachte Energie nur zu einer sehr geringen Erwärmung der Speichermassen. Dies ist auf den sehr hohen Anteil der direkt zur Substitution von Heizenergie genutzten Sonneneinstrahlung zurückzuführen. Wesentlich deutlichere Auswirkungen sind durch die nächtliche Absenkung der Raumtemperatur in Versuch 3 erkennbar. Die Temperatur der Speichermassen liegt hier im Tagesdurchschnitt etwas niedriger, während eine zyklische Abkühlung und Erwärmung erkennbar ist. Die Abkühlung ist das Resultat der nächtlichen Absenkung der Raumsolltemperatur. Auf die Kern-

temperatur der Speichermassen wirkt sich dieser Vorgang zeitverzögert aus, bei der in Abbildung 7-14 dargestellten Seitenwand des Modellraums beträgt die Verzögerung etwa 2 Stunden. Im Laufe des Tages nehmen die Speichermassen die in der Nacht abgegebene E-nergie wieder auf.

Ein Einfluss der Einstrahlrichtung der Sonneneinstrahlung auf die Temperatur der Seitenwände kann, wie in **Abbildung 7-15** ersichtlich, unter den Rahmenbedingungen der beschriebenen Versuche nicht eindeutig festgestellt werden. Die Abbildung zeigt einen Vergleich der Kerntemperaturen der beiden Seitenwände des Modellraums. Aufgrund des Profils des in den Versuchen verwendeten Tages und des entsprechenden Sonnenstands trifft die in den Mittagsstunden einsetzende direkte Sonnenstrahlung am Nachmittag die linke Seitenwand. Trotzdem ergeben sich nur sehr geringe Temperaturunterschiede zwischen den beiden Wänden bei den Versuchen 2 und 3 (bei Versuch 1 ohne Sonneneinstrahlung sind die Temperaturen nahezu gleich). Dies ist vor allem auf den geringen Absorptionsgrad des weißen Wandanstrichs und die hohe Wärmespeicherkapazität der Wände zurückzuführen. Durch die Reflektion der Sonneneinstrahlung im Raum führt die eingebrachte Energie zu einer geringeren Erwärmung aller Umschließungsflächen. Bei einer dunkleren Wandfarbe und geringerer Speicherfähigkeit wäre hier eine deutlichere Erwärmung der direkt bestrahlten Wand feststellbar.

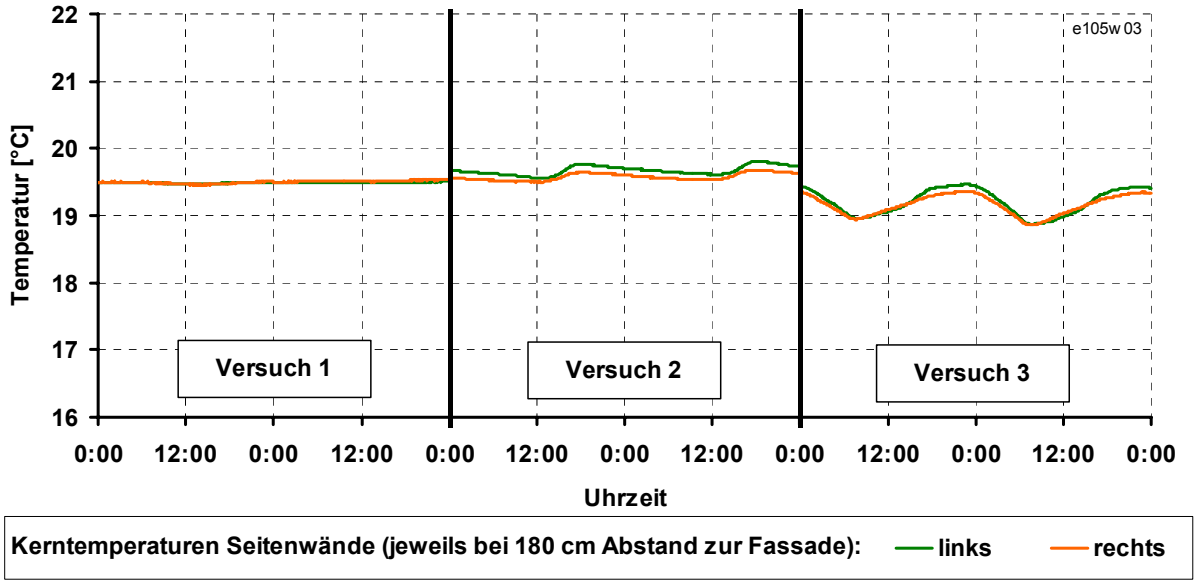

Abbildung 7-15: Verläufe zweier Kerntemperaturen der Seitenwand im Vergleich (Abstand zur Fassade 180 cm).

Der Einfluss der in den Versuchen variierten Parameter auf die thermische Behaglichkeit im Raum wird im nachfolgenden Abschnitt dargestellt, da hierbei ein direkter Zusammenhang mit dem installierten Heizsystem besteht. Der Modellraum weist jedoch unabhängig davon bei vergleichsweise geringen Wärmeverlusten über die Fassade eine hohe Wärmespeicherfähig-

keit auf, die eine vergleichmäßigende Wirkung auf die Raumtemperatur besitzen. Entsprechend kommt den Lüftungsverlusten eine höhere Bedeutung zu. Durch die gute Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen, vor allem der klimatischen Einflussfaktoren, können durch Variationen einzelner Versuchsparameter die Auswirkungen auf den Raum sehr gut ermittelt werden. Mit dem Prüfstand und dem Modellraum stehen somit realitätsnahe Bedingungen für die Untersuchung von Heizsystemen zur Verfügung.

8 Ergebnisse für das Referenzheizsystem

Das im Rahmen dieser Arbeit für Versuchsdurchführungen am Prüfstand verwendete Referenzheizsystem im Modellraum ist, wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, mit einer schnell reagierenden Regelung ausgestattet, die auf die Temperaturmessung der Raumluft im Modellraum zurückgreift. Als Referenzsystem hinsichtlich den im Abschnitt 6.3 definierten Kriterien dient es mit seinem Betriebsverhalten und Einfluss auf die thermische Behaglichkeit im Modellraum als Vergleichsbasis für herkömmliche Heizsysteme.

8.1 Betriebsverhalten des Referenzheizsystems

Die Regelung des Referenzheizsystems ist darauf ausgelegt, eine Überheizung sowie Unterkühlung des Raums zu vermeiden. Durch die Möglichkeit, die Heizleistung über einen großen Leistungsbereich schnell zu regeln sowie abzuschalten, kann dieses Systems auf andere auftretende Wärmequellen flexibel reagieren. Ein Energieaufwand über den zur Einhaltung der Raumsolltemperatur notwendigen hinaus ist somit praktisch nicht gegeben. Das Betriebsverhalten im einzelnen zeigen die **Abbildungen 8-1**, **8-2** und **8-3**. Hier ist jeweils der Verlauf der Heizleistung, der Raumtemperatur sowie der Außentemperatur über mehrere Versuchstage der in Abschnitt 7.3 beschriebenen Versuche als 5-Minuten-Mittelwerte dargestellt. Das hat zur Folge, dass in den Datenreihen der Heizleistung in den Abbildungen eine kurzfristige Abschaltung der Heizung lediglich als nach unten gerichtete Spitze zu erkennen ist und nicht bis zur Nulllinie reicht.

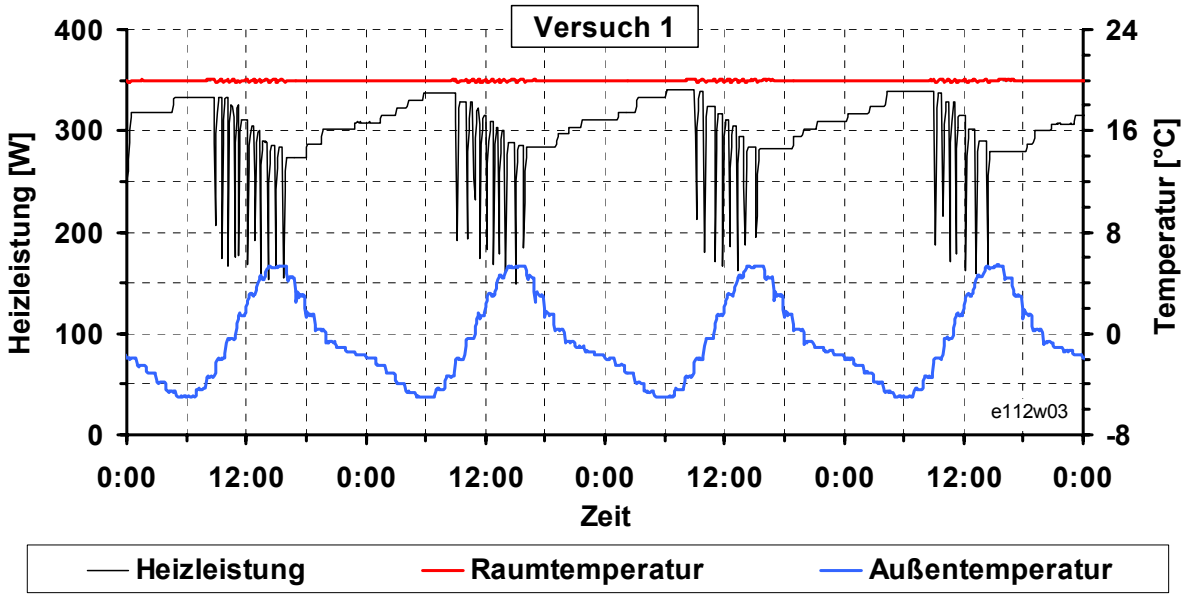

Abbildung 8-1: Verlauf von Raumtemperatur, Außentemperatur und Heizleistung des Referenzsystems über mehrere Versuchtage bei Versuch 1.

In Versuch 1 (Abbildung 8-1) traten keine Wärmelasten auf, da dieser nur mit dem Außentemperaturverlauf des ‚Wintertag sonnig' als variierende Größe und ohne Sonneneinstrahlung durchgeführt wurde. So folgt die Heizleistung mit geringem zeitlichem Verzug dem Verlauf der Außentemperatur, die den Lüftungswärmebedarf prägt. Es sind dabei deutlich zwei unterschiedliche Bereiche im Betriebsverhalten des Heizsystems zu erkennen. In Phasen steigenden Wärmebedarfs wird die Heizleistung in kleinen diskreten Regelschritten angepasst. Die kleinstmögliche Schrittweite beträgt hierbei etwa 6 W. Im Gegensatz dazu ist die Regelstrategie bei sinkendem Wärmebedarf nicht durch kontinuierliches Nachregeln, sondern durch ein sofortiges Abschalten der Heizleistung bei Überschreiten der Raumsolltemperatur geprägt. Damit wird verhindert, dass das Heizsystem selbst die Ursache für eine über dem Sollwert liegende Raumtemperatur ist.

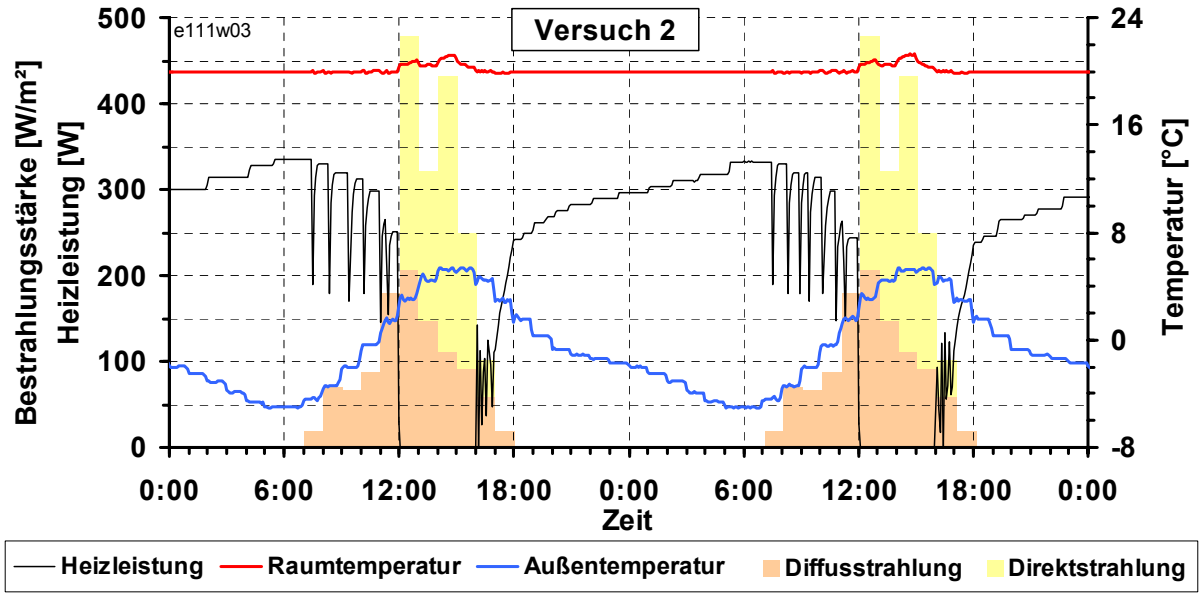

Abbildung 8-2: Verlauf von Raumtemperatur, Außentemperatur und Heizleistung des Referenzsystem über zwei Versuchtage bei Versuch 2 (mit Sonneneinstrahlung).

Bei Versuch 2 (Abbildung 8-2) wurde zusätzlich die Sonneneinstrahlung des Tages nachgebildet. Der Verlauf der Heizleistung zwischen 18 Uhr abends und 7 Uhr morgens ist im Vergleich zu Versuch 1 sehr ähnlich, wie auch die absolute Leistung weitgehend identisch ist. Während der Hellstunden des Tages ist jedoch sehr deutlich der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die benötigte Heizleistung zu erkennen. Zwischen 7 Uhr und 12 Uhr weist der Tagesgang nur diffuse Strahlung auf, die lediglich zu einer sehr geringen Reduzierung der Heizleistung führt. Mit Beginn der direkten Sonneneinstrahlung um 12 Uhr erwärmt sich die Raumluft über die vorgegebene Solltemperatur, wodurch das Heizsystem unmittelbar abschaltet. Am Nachmittag geht die Bestrahlungsstärke der Sonneneinstrahlung zurück und somit

sinkt die Raumtemperatur. Sobald der geforderte Sollwert unterschritten wird, beginnt sofort wieder das Heizsystem mit angepasster Leistung zur Einhaltung der Temperaturvorgabe.

Auffallend an den Verläufen der Heizleistung beider beschriebener Versuche ist das teilweise unterschiedliche Regelverhalten des Heizsystems im Zeitbereich zwischen 0 Uhr und 6 Uhr. Bei sinkender Außentemperatur erfolgt die Nachregelung der Heizleistung teilweise in größeren Zeitabständen, wobei in einigen Fällen dann zwei Regelschritte innerhalb kurzer Zeit erfolgen. Dieses Verhalten ist vor allem durch die Trägheit der gesamten Regelstrecke sowie einer, wenn auch geringen, Regelhysterese symmetrisch um den Sollwert bedingt, innerhalb der kein Regeleingriff erfolgt. Die Hysterese ergibt sich aus dem Umstand, dass die Regelungsgröße Raumtemperatur als Mittelwert aus den Werten der im Modellraum verteilt installierten Temperaturmessstellen berechnet und auf eine Genauigkeit von 0,1 K gerundet wird. Geht die Außentemperatur zurück, sinkt mit einer kurzen Zeitverzögerung auch die berechnete mittlere Raumtemperatur. Unterschreitet diese dabei die Grenze der Regelhysterese, so ist die Heizleistung nicht mehr ausreichend und ein Regelungseingriff notwendig. Dabei ist teilweise mehr als ein Regelschritt notwendig, um die Raumtemperatur wieder bis in das Band der Regelhysterese anzuheben. Durch die minimale Leistungsschrittweite von 6 W kann die Raumtemperatur durch einen Regeleingriff aber auch bis an die obere Grenze der Hysterse angehoben werden, so dass in der Folge bei nur langsam sinkender Außentemperatur über einen längeren Zeitraum keine Nachregelung notwendig wird.

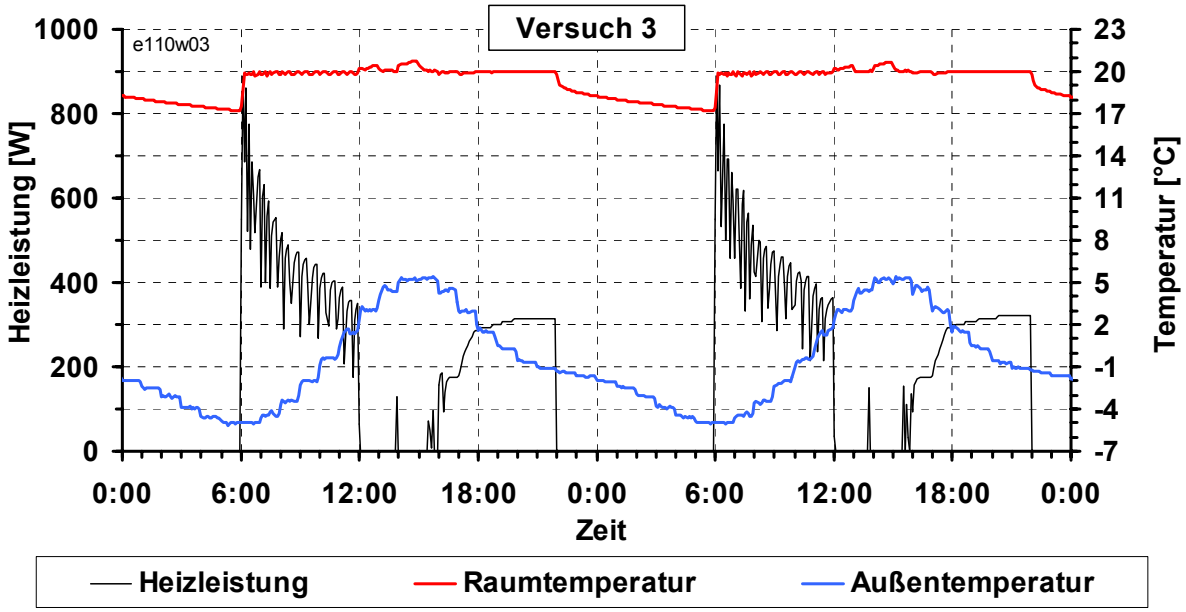

Abbildung 8-3: Verlauf von Raumtemperatur, Außentemperatur und Heizleistung des Referenzsystem über zwei Versuchtage bei Versuch 3.

Ein markant unterschiedlicher Verlauf der Heizleistung ist bei Versuch 3 in Abbildung 8-3 erkennbar. Hier wurde gegenüber Versuch 2 zusätzlich eine Nachtabsenkung von 22 Uhr bis

6 Uhr durchgeführt. Die zulässige minimale Raumtemperatur in diesem Zeitraum beträgt 17 °C. Durch die wirksamen Speichermassen erreicht die mittlere Raumtemperatur innerhalb der Absenkungszeit die Grenztemperatur nicht. Zu Beginn des Normalbetriebs ist es die Aufgabe des Heizsystems, den Raum möglichst schnell wieder auf die geforderte Solltemperatur zu erwärmen. Hier zeichnet sich das Referenzsystem durch einen hohen Leistungsgradienten aus. Im Zusammenspiel mit der Regelung erreicht das System bei dem dargestellten Versuch einen Temperaturgradienten von 0,2 K/min, so dass die Raumluft nach bereits 12 Minuten wieder die vorgegebene Solltemperatur von 20 °C besitzt. Dabei wird vom Heizsystem kurzfristig eine Leistung von 1000 W abgegeben, ohne dass es zu einer Überschreitung der vorgegebenen Temperatur kommt. In den nachfolgenden Stunden wird die Heizleistung stetig gesenkt und an den Bedarf angepasst, bis um 12 Uhr wie auch bei Versuch 2 durch die einsetzende Sonneneinstrahlung die Raumtemperatur steigt und das Heizsystem abschaltet. Einen direkten Vergleich des Heizenergieverbrauchs mit und ohne Nachtabsenkung im Heizbetrieb bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen zeigt **Abbildung 8-4**. Dargestellt ist der stündliche Heizenergieverbrauch über zwei Versuchstage.

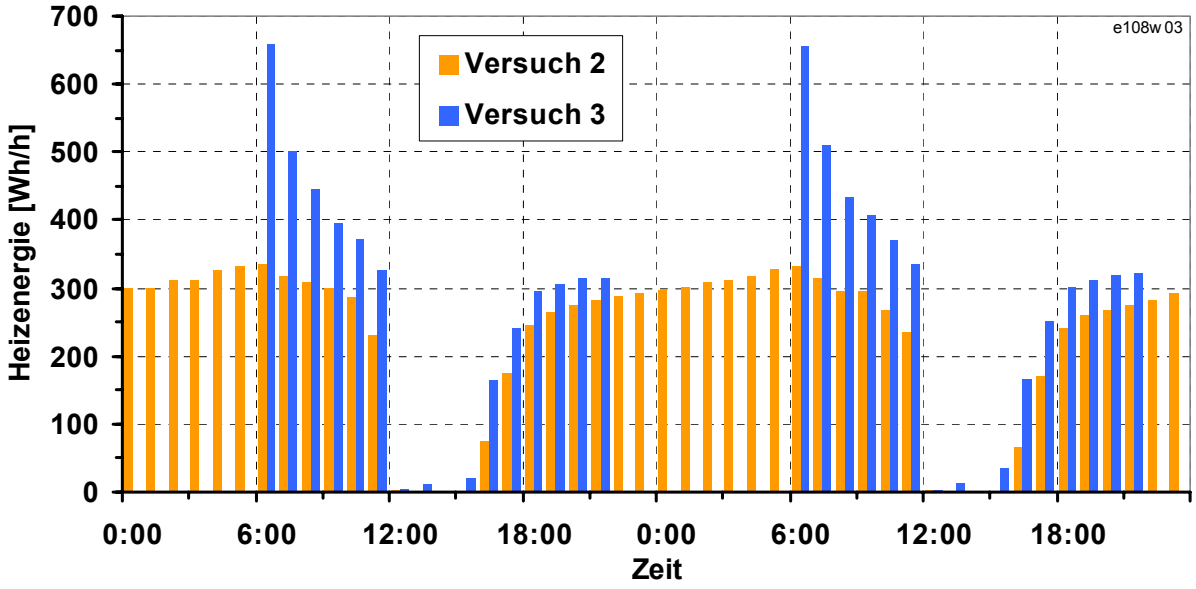

Abbildung 8-4: Verlauf des Heizenergieverbrauchs bei durchgehendem Heizbetrieb im Vergleich zum Heizbetrieb mit Nachtabsenkung.

Es lässt sich sehr gut erkennen, dass bei abgesenkter Raumsolltemperatur in den Nachtstunden der Heizenergieverbrauch während der Zeit mit normaler Raumtemperatur immer höher ist als bei durchgehendem Heizbetrieb ohne Absenkung. Verursacht wird dies durch die Speichermassen des Raums, die während der Nachtabsenkung auskühlen. Diese nehmen über den gesamten Tag die abgegebene Energie wieder auf, die vom Heizsystem zusätzlich zu den Wärmeverlusten des Raums aufgebracht werden muss. Markant ist auch die hohe Verbrauchs-

spitze zu Beginn des normalen Heizbetriebs um 6 Uhr durch die Wiederaufheizung des Raums auf 20 °C. Die bei dem angewendeten Tagesgang des sonnigen Wintertags um 12 Uhr einsetzende direkte Sonneneinstrahlung ist bei Versuch 2 ausreichend, um die benötigte Heizleistung zu ersetzen. Bei Versuch 3 ist durch die zusätzlich zu erwärmenden Speichermassen kurzzeitig die Unterstützung der Heizung notwendig. Weiterhin wird das Heizsystem am Nachmittag bei geringer werdender Sonneneinstrahlung bereits eine halbe Stunde früher wieder benötigt, um die Wärmeverluste auszugleichen und die geforderte Raumtemperatur zu erhalten.

Der tägliche Heizenergieverbrauch sowie die maximale und mittlere Heizleistung der Versuche ist in **Tabelle 8-1** zusammengefasst. Weiterhin sind in **Abbildung 8-5** der Heizenergieverbrauch und die maximale Heizleistung gegenübergestellt. Die Differenz des Heizenergieverbrauchs zwischen den Versuchen 1 und 2 beruht, wie bereits in Abschnitt 7.3 beschrieben, auf der Nutzung der Sonneneinstrahlung. Dagegen ist der geringere Verbrauch in Versuch 3 als Einsparung durch Absenkung der Raumsolltemperatur in der Nacht zu bewerten. Bei den gegebenen Versuchsbedingungen beträgt diese Einsparung 17 % gegenüber durchgehendem Heizbetrieb.

Tabelle 8-1: Heizenergieverbrauch und Heizleistungen der Versuche im Vergleich.

	Einheit	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Heizenergieverbrauch	Wh/d	7157	5274	4368
Mittlere spezifische Heizleistung	W/m²	21	16	13
Max. Heizleistung[3]	W	338	335	890
Mittlere Heizleistung[4]	W	298	273	349
Anzahl Stunden im Heizbetrieb	h	24	19,3	12,5

Die in Tabelle 8-1 angegebene maximale Heizleistung ist der höchste während eines Tages auftretende 5-Minuten-Mittelwert der gemessenen Leistung des Heizsystems. Der höchste Heizleistungsbedarf besteht bei den ersten beiden Versuchen am frühen Morgen noch vor Sonnenaufgang, so dass diese mit 338 W bzw. 335 W annähernd gleiche Werte aufweisen. Bei Versuch 3 tritt dagegen, trotz des geringsten Heizenergieverbrauchs, die höchste maximale Heizleistung auf, wie Abbildung 8-5 verdeutlicht. Ausschlaggebend für den hohen Wert von 890 W ist die notwendige Wiederaufheizung des Raums und der verfügbare Leistungsbe-

[3] 5-Minuten-Mittelwerte
[4] Für Zeiten mit Raumisttemperatur ≤ Raumsolltemperatur

reich des Heizsystems. Die veränderte Anforderung an das Heizsystem bei diesem Versuch zeigt sich auch bei der mit 349 W am höchsten liegenden mittleren Heizleistung über lediglich 12,5 Stunden am Tag. Die mittlere Heizleistung ist jeweils aus den Zeitbereichen mit einer Raumtemperatur kleiner oder gleich dem Sollwert berechnet.

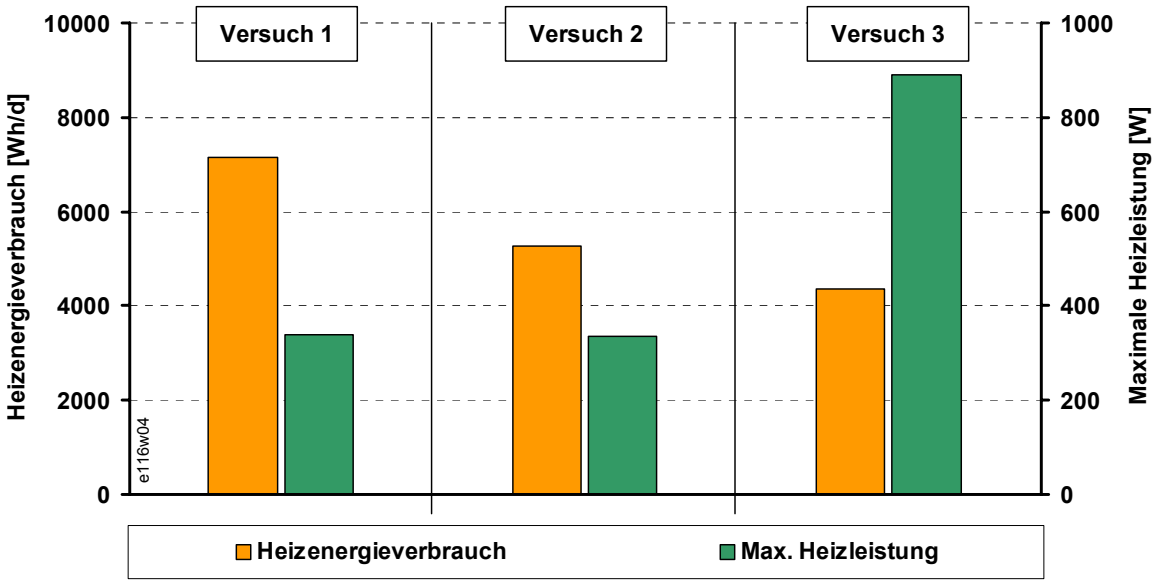

Abbildung 8-5: Heizenergieverbrauch und maximale Heizleistung (5-Minuten-Mittelwerte) der Versuche im Vergleich.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Referenzheizsystem sehr gut auf die dynamischen Anforderungen im Raum reagiert und eine genaue Einhaltung der geforderten Raumtemperatur ermöglicht. Mit seiner Leistung von bis zu 1500 W, die in kürzester Zeit abrufbar ist, kann eine sehr schnelle Erwärmung des Raums nach Zeiträumen mit abgesenkter Raumtemperatur gewährleistet werden. Im Vergleich zum Referenzheizsystem besitzen konventionelle Systeme aufgrund ihrer thermischen Trägheit eine geringere Dynamik und damit eine langsamere Leistungsregelung sowie eine ungenauere Einhaltung der Solltemperatur. Gegenüber dem ausgewiesenen Heizenergieverbrauch des Referenzsystem sind damit höhere Werte zu erwarten.

8.2 Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit für den Menschen ist vor allem von seinem Temperaturempfinden abhängig. Dieses wird unter anderem von der Raumlufttemperatur und der Temperatur der umgebenden Flächen beeinflusst. Weitere Faktoren für die thermische Behaglichkeit sind etwa die Luftfeuchtigkeit sowie die Luftbewegung im Raum, die jedoch am Prüfstand nicht messtechnisch erfasst werden. Neben der Einhaltung der vom Nutzer gewünschten Temperatur ist auch die Temperaturverteilung der Raumluft zu berücksichtigen. Vor allem eine verti-

kale Temperaturschichtung kann als unangenehm empfunden werden, wenn hier größere Temperaturunterschiede auftreten /7030/. Das Heizsystem eines Raums hat hier durch seine Art der Wärmeabgabe und seinen Standort einen großen Einfluss. **Abbildung 8-6** zeigt die Temperaturverteilung im Modellraum bei Betrieb des Referenzheizsystems über zwei Tage für den in Abschnitt 7.3 beschriebenen Versuch 2.

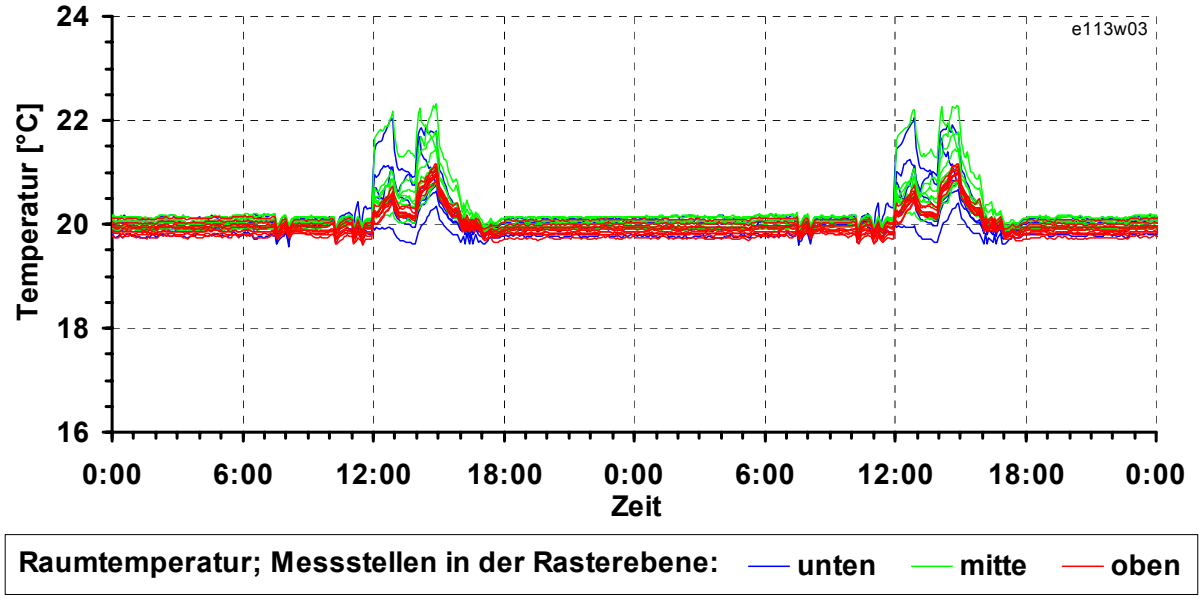

Abbildung 8-6: Verlauf der Raumlufttemperatur an den einzelnen Messstellen über zwei Tage bei Versuch 2.

Dargestellt sind die Messwerte aller Temperatursensoren, wobei eine Rasterebene aus 9 Messfühlern besteht, die gleichmäßig über der Fläche des Raums verteilt sind. Deutlich zu erkennen ist die geringe Bandbreite innerhalb der gemessenen Temperaturen während der Zeitbereiche ohne Sonneneinstrahlung. Hier ist das Heizsystem die einzige Wärmequelle im Raum und erreicht durch seine kontinuierliche Luftumwälzung eine sehr ausgeglichene Temperaturverteilung. Während der Stunden mit direkter Sonneneinstrahlung tritt dagegen eine generelle Erhöhung der Raumtemperatur auf. Einzelne Messstellen, die im Bereich der direkten Strahlung sind, weisen dabei nochmals erhöhte Temperatur auf. Somit stellt sich in diesem Zeitraum eine etwas ungleichmäßigere Temperaturverteilung ein.

Für die thermische Behaglichkeit sind jedoch neben der Raumlufttemperatur auch die Temperaturen der Raumumschließungsflächen von Bedeutung. Analog zu Abbildung 7-14 sind in **Abbildung 8-7** die Verläufe der Oberflächentemperaturen am Beispiel der linken Seitenwand dargestellt. Wie an den Kurven der Versuchsläufe erkennbar ist, wirkt sich das Temperaturprofil im Kern der Wand auch auf die Oberflächentemperaturen aus. Im Bereich nahe der Fassade ist diese dementsprechend deutlich niedriger. Im Falle von direkter Sonneneinstrahlung durch das Fenster in den Raum (Versuch 2 und 3) kommt es an der linken Seitenwand, die

hier im Verlauf des Nachmittags bestrahlt wird, zu lokalen Erwärmungen der Wandoberfläche. Die dargestellten Temperaturverläufe (110 cm und 280 cm Abstand zur Fassade) zeigen dabei auch eine zeitliche Differenz zwischen ihren Maximalwerten, deren Ursache die Bewegung der Sonne und damit die Veränderung der bestrahlten Fläche ist. Die nicht direkt bestrahlten Bereiche der Wand (Datenreihe '10cm') sowie auch die restlichen Oberflächen im Raum weisen im Zeitraum der höchsten Sonneneinstrahlung eine nur geringfügig höhere Temperatur auf, was auf die höhere Raumtemperatur zurückzuführen ist.

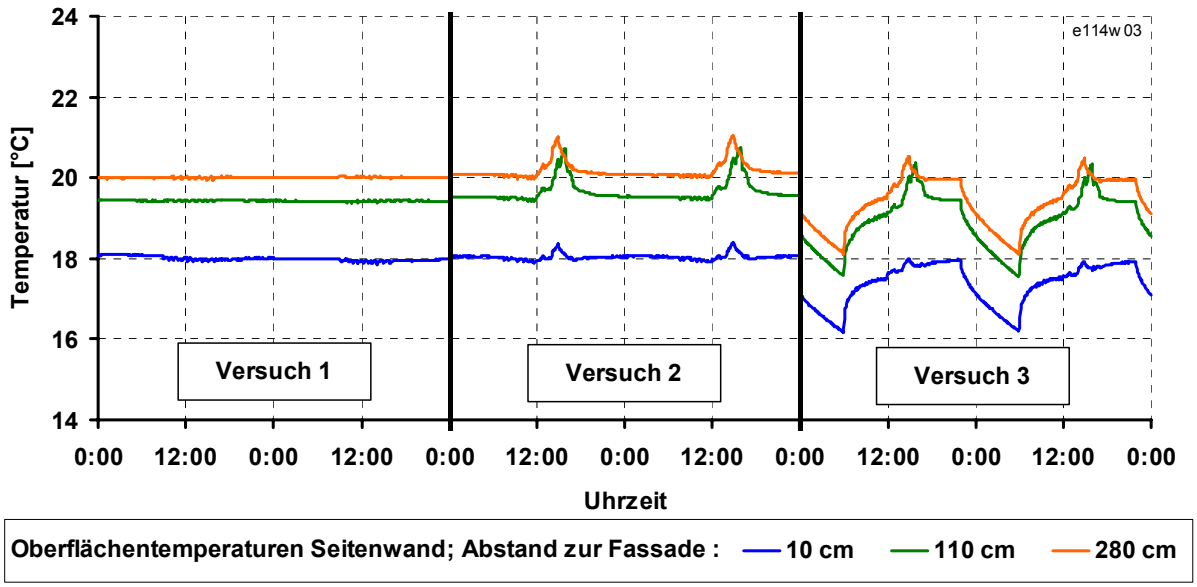

Abbildung 8-7: Verläufe der Oberflächentemperaturen der linken Seitenwand in verschiedenem Abstand zur Fassade (Raumtiefe 350 cm).

Für das Behaglichkeitsempfinden des Menschen kann aus der Raumlufttemperatur sowie den Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen die sogenannte empfundene Raumtemperatur berechnet werden /ROU/. Diese berücksichtigt neben dem konvektiven Wärmeaustausch mit der Raumluft auch die Sensibilität der menschlichen Haut gegenüber Strahlungsaustausch mit den umgebenden Oberflächen eines Raums. Die berechnete empfundene Raumtemperatur $\vartheta_{R,e}$ ist dabei eine angenäherte Bewertungsgröße für die vom Menschen in einem Raum gefühlte Temperatur:

$$\vartheta_{R,e} = \frac{1}{2} \cdot \left(\vartheta_{RL} + \frac{\sum_i \overline{\vartheta}_{O,i} \cdot A_i}{\sum_i A_i} \right) \qquad [°C] \qquad (8\text{-}1)$$

mit $\overline{\vartheta}_{O,i}$ [°C] : Mittlere Oberflächentemperatur einer Umschließungsfläche des Raums

A_i [m²] : Fläche der Umschließungsfläche

Den Verlauf der empfundenen Temperatur für die in Abschnitt 7.3 beschriebenen Versuche zeigt **Abbildung 8-8**. Weiterhin sind hier die Raumlufttemperatur sowie die mittlere Oberflächentemperatur der Raumumschließungsflächen dargestellt.

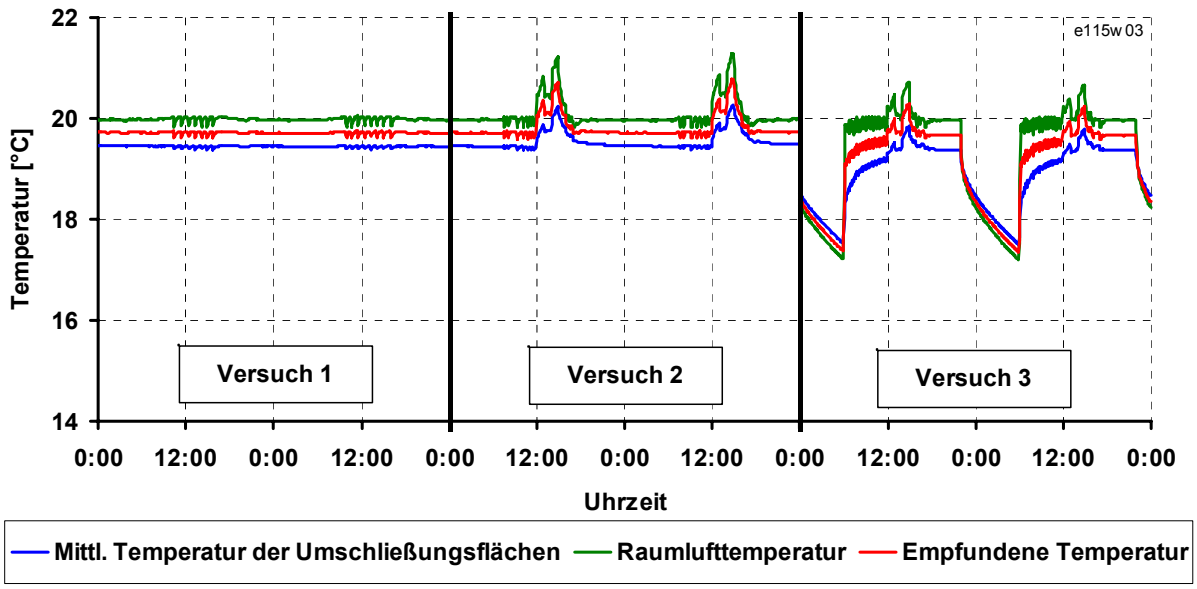

Abbildung 8-8: Verlauf von empfundenen Temperatur, Raumlufttemperatur sowie mittlerer Oberflächentemperatur.

Die mittlere Oberflächentemperatur berechnet sich aus den einzelnen Messwerten der Raumwände, Boden und Decke. Nicht berücksichtigt sind dabei die Tür sowie das Fenster des Modellraums, deren Temperaturen nicht erfasst werden. Bei ununterbrochenem normalem Heizbetrieb (Versuch 1 und 2) liegt die Temperatur der Umschließungsflächen durchgehend lediglich etwa 0,7 K unterhalb der Raumlufttemperatur, trotz des geringeren Temperaturniveaus der Fassade und der fassadennahen Wandbereiche. So liegt auch die empfundene Raumtemperatur sehr nahe an der Raumlufttemperatur und der vorgegebenen Solltemperatur von 20 °C. Bei Versuch 3 mit nächtlich abgesenkter Raumsolltemperatur treten kurzzeitig größere Differenzen auf. Zu Beginn des Heizbetriebs mit normaler Raumsolltemperatur um 6:00 Uhr wird die Raumluft durch das Heizsystem sehr schnell erwärmt. Durch die in der Nacht ausgekühlten Speichermassen steigt die Oberflächentemperatur im Raum jedoch nur langsam an. Dementsprechend beträgt die empfundene Temperatur trotz einer Lufttemperatur von 20 °C zu Beginn dieser Phase etwa 19 °C und steigt bis zum Mittag auch nur geringfügig an. Während der nächtlichen Abkühlung des Raums kehren sich die wärmetechnischen Verhältnisse um, so dass die Raumlufttemperatur geringfügig unterhalb der Oberflächentemperatur liegt. Dieser Zeitraum ist für die Beurteilung der Behaglichkeit jedoch nicht heranzuziehen, da hier eine gewollte Abkühlung des Raums vorliegt.

Insgesamt liegt bei allen drei Versuchen die Differenz zwischen Raumluft- und mittlerer Oberflächentemperatur immer unterhalb eines als Behaglichkeitsgrenze eingestuften Wertes von 2 K /ROU/. Zusammen mit der guten Temperaturverteilung und der zuverlässigen Einhaltung der vorgegebenen Raumlufttemperatur liegen bei Betrieb des Referenzheizsystems durchgehend thermisch behagliche Bedingungen im Modellraum vor. Die etwas unterhalb des gewünschten Sollwerts liegende empfundene Temperatur könnte in den meisten Fällen beispielsweise durch Anhebung der Raumlufttemperatur ausgeglichen werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Senkung des Energieverbrauchs für die Raumheizung kann ein erheblicher Beitrag zur Reduzierung der Emissionen klimarelevanter Gase geleistet werden. Bei Neubau und bei der Sanierung von Altbauten wird dabei durch entsprechende Verordnungen des Gesetzgebers der Standard der Wärmedämmung sukzessive erhöht. Damit steigt die Bedeutung von äußeren und inneren Wärmequellen für den Energiehaushalt eines Gebäudes. Durch die höhere Dynamik dieser Parameter gegenüber den Transmissionsverlusten steigen auch die Anforderungen an ein Heizsystem und seine Regelung, um eine behagliche Raumtemperatur einzuhalten sowie energetisch effizient zu arbeiten. Zur geeigneten Auswahl und Auslegung eines Heizsystems für ein Gebäude sind dabei Erkenntnisse zum Betriebsverhalten verschiedener Raumheizsysteme unter identischen Bedingungen notwendig.

Die vorliegende Arbeit beschreibt einen Modellraumprüfstand und seine Anwendung für die Untersuchung des dynamischen Betriebsverhaltens von Heizsystemen. Der aus Ziegeln gemauerte Modellraum mit den praxisnahen Abmessungen von 4,0 m Breite, 3,5 m Tiefe und einer Raumhöhe von 2,6 m besitzt eine Außenfassade mit Fenster. In den Modellraum können verschiedene Raumheizsysteme installiert und unter identischen bauphysikalischen Rahmenbedingungen messtechnisch untersucht werden. Einen entscheidenden Vorteil gegenüber Feldversuchen bietet der Prüfstand durch Versuchsreihen, die unabhängig von der natürlichen Witterung durchgeführt werden können. Durch die dynamische Nachbildung der auf ein Gebäude einwirkenden Klimafaktoren Außenlufttemperatur und solare Einstrahlung werden reproduzierbare Untersuchungen bei definierten Bedingungen ermöglicht. Dabei können einzelne Tagesprofile wie auch mehrtägige Verläufe für verschiedenste Standorte nachgebildet werden. Der Bereich für die Simulation von Außentemperaturverläufen erstreckt sich von -5 °C bis zu +30 °C, so dass neben der Heizperiode mit mittleren Wintertagen und Übergangstagen auch sommerliche Temperaturen nachgebildet werden können. Die Simulation solarer Einstrahlung auf die Fensterfläche wurde durch eine bewegliche Strahlerplattform realisiert. Sonnensimulator weist einen horizontalen Bewegungsbereich von 170° sowie einen vertikalen von 70° auf, und kann somit beliebige Tagesverläufe des Sonnenstands eines Jahres für einen Standort innerhalb Deutschlands nachbilden. Zur Erzeugung der benötigten Bestrahlungsstärke für das Fenster des Modellraums sind auf der beweglichen Plattform Halogen-Metalldampf- sowie Halogenlampen mit einer gesamten Anschlussleistung von 23 kW installiert. Die Halogen-Metalldampflampen sind einzeln schaltbar, die Halogenlampen lassen sich in Gruppen schalten und dimmen. Unterschiedliche Kombinationen der Lampentypen sowie die Aufteilung auf 46 einzeln zu schaltende Lampen und Lampengruppen ermöglicht dabei eine Anpassung der spektralen Zusammensetzung des erzeugten Lichts sowie der Bestrahlungsstärke an reale Tagesverläufe der Sonneneinstrahlung.

Der in der vorliegenden Arbeit beschriebene und untersuchte Modellraum ist aus Leicht-Hochlochziegeln aufgebaut, so dass die Fassade in Kombination mit wärmedämmendem Außenputz einen sehr geringen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,44 W/(m²·K) besitzt. Damit entspricht die Fassade dem für heutige Neubauten gesetzlich vorgeschriebenen Wärmedämmstandard. Durch die damit verbundenen geringen Transmissionswärmeverluste ist der durch ein Heizsystem zu deckende Wärmebedarf auch erheblich von den Lüftungswärmeverlusten abhängig. Bei den durchgeführten Versuchen mit dem Klimaprofil eines mittleren sonnigen Wintertags (Tagesmitteltemperatur -0,5 °C) und einem konstanten Außenluftwechsel von 0,5 h^{-1} betragen die gesamten Wärmeverluste rund 7,1 kWh/d, bei einem Anteil der Lüftungswärmeverluste von annähernd 40%. Die Höhe dieser Verluste ist jedoch neben der Raum- und Außentemperatur wesentlich durch die Luftwechselrate geprägt. Mit den vorhandenen Einrichtungen könnten bei Bedarf anstelle der gewählten konstanten Luftwechselrate auch dynamische Tagesprofile realisiert werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte und untersuchte Heizsystem erfüllt die definierten Kriterien für ein Referenzsystem in bester Weise. Die Kriterien umfassen dabei neben energetischen und regelungstechnischen Aspekten auch die Anforderungen des Menschen an die thermische Behaglichkeit. Im Vordergrund stehen dabei ein geringer Energieverbrauch zur Beheizung des Raums sowie eine behagliche Temperaturverteilung der Raumluft. Beim hier entwickelten Referenzheizsystem handelt es sich um ein elektrisches Direktheizsystem mit konvektiver Wärmeverteilung. Die für das System entwickelte „schnelle“ Regelung greift auf Werte der messtechnischen Ausstattung des Modellraums zurück. Dem Raum wird durch dieses Heizsystem praktisch keine über den Bedarf zur Einhaltung der Solltemperatur hinausgehende Wärme zugeführt, wobei Überheizung vermieden und eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung erreicht wird. Der bei den durchgeführten Untersuchungen gemessene Tagesheizenergieverbrauch des Referenzsystems für den sonnigen Wintertag beträgt 5,3 kWh/d. Bezogen auf die gesamten Wärmeverluste des Modellraums (bei einem konstantem Außenluftwechsel von 0,5 h^{-1} und einer Raumluftsolltemperatur von 20 °C) liegt der Anteil des Heizsystems an der Deckung der Wärmeverluste bei 75%. Die verbleibenden Wärmeverluste werden durch die Wärmegewinne aus der Sonneneinstrahlung während des Tages ausgeglichen. Aufgrund seiner Funktion als Referenzheizsystem und der reproduzierbaren Versuchsbedingungen können die Ergebnisse für dieses System direkt als Vergleichsbasis für weitere zu untersuchende Heizsysteme herangezogen werden.

Aufgrund der modularen Bauweise des Modellraums besteht durch Austausch einzelner oder mehrerer Wände grundsätzlich die Möglichkeit, die bauphysikalischen Parameter und damit das thermische Verhalten des Modellraums zu verändern. Die praktische Durchführung ist jedoch mit einem erheblichen baulichen Aufwand und Eingriff in den Prüfstandsaufbau verbunden. Der Wechsel von Heizungssystemen gestaltet sich hier deutlich einfacher. Für elektri-

sche Systeme steht eine Energieversorgung sowie die mess- und regelungstechnische Infrastruktur bereits zur Verfügung. So sollten vor einem grundlegenden Austausch der Wandaufbauten die Untersuchungen mit den dafür vorgesehenen Heizungssystemen abgeschlossen werden.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen mit dem Referenzheizsystem wurden auch die Auswirkungen einer nächtlich abgesenkten Raumsolltemperatur untersucht. Dabei konnte unter den festgelegten Rahmenbedingungen eine Reduzierung des Tagesheizenergieverbrauchs von 17% ausgewiesen werden. Dieser Wert hängt jedoch sehr stark von dem Zeitraum der Absenkung, der abgesenkten Solltemperatur, den Lüftungswärmeverlusten sowie den hier nicht betrachteten inneren Wärmequellen ab. Der Modellraumprüfstand bietet die Möglichkeit, jeden dieser Parameter in Versuchsreihen einzeln zu verändern. Bei ansonsten identischen Bedingungen können daraus belastbare Aussagen über die Energieeffizienz verschiedener Heizsysteme abgeleitet werden. Weiterhin können die Ergebnisse, insbesondere von wasserführenden Heizsystemen, als Eingangsgrößen für weitergehende Untersuchung wie beispielsweise zum Betriebsverhalten von zentralen oder dezentralen Wärmeerzeugern dienen.

Neben der Betriebsführung von Raumheizsystemen können am Prüfstand auch Optimierungsmöglichkeiten für einzelne Komponenten untersucht werden. Interessante Fragestellungen sind beispielsweise die Auswirkungen unterschiedlicher Dimensionierung und Positionierung von Raumheizflächen auf die thermische Behaglichkeit im Raum sowie die Effizienz eines Systems. Für die Regelung eines Heizsystems wiederum ist die geeignete Positionierung der Temperaturerfassung entscheidend. Bei konventionellen Radiatoren, die üblicherweise unterhalb des Fensters eines Raums installiert sind, erfolgt die Messung der Raumlufttemperatur in der Regel direkt am Thermostatventil. Das Auftreten zusätzlicher Wärmelasten wird hier unter Umständen erst sehr verzögert registriert, was zu einer Überheizung des Raums führen kann. Auch hier bieten sich vergleichende messtechnische Untersuchungen am Modellraumprüfstand an, wodurch zuverlässige Aussagen über unterschiedliche Regeleinrichtungen, auch mit räumlich getrennter Temperaturmessung, und deren Auswirkungen auf den Heizenergieverbrauch sowie die thermische Behaglichkeit abgeleitet werden können.

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modellraumprüfstand steht somit ein Werkzeug zur Verfügung, das als Ergänzung zu Feldversuchen und Simulationsrechnungen vergleichende messtechnische Untersuchungen von Raumheizsystemen wie auch detailliertere Betrachtungen verschiedener Systemkonfigurationen unter reproduzierbaren klimatischen und bauphysikalischen Rahmenbedingungen ermöglicht.

10 Literatur

/BIN/ BINE Informationsdienst; Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.) : Testreferenzjahre – Meteorologische Grundlagen für technische Simulation von Heiz- und Raumlufttechnischen Anlagen. Bonn. 1991 (BINE Profi Info-Service : Nr. 1 / Oktober 1991)

/DUF/ Duffie, John A.; William A. Beckman: Solar engineering of thermal Processes. 2. Aufl. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1991

/HEN/ Hentschel, Hans-Jürgen (Hrsg.): Licht und Beleuchtung : Grundlagen und Anwendung der Lichttechnik. 5. Aufl. Heidelberg : HüthigVerlag, 2002

/HEL/ HELIONDA, Software for Spectral Solar Energy Assessment. Meteorologisches Institut der Universität München

/MEU/ Meeus, Jean: Astronomische Algorithmen. 2. Aufl. Leipzig : Barth, 1994

/MÜH/ Mühlbacher, Helmuth; U. Arndt; M. Schwärzer; Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Wärmeerzeuger für die Raumheizung und Warmwasserbereitung. München. 2002 – Forschungsbericht

/OSR/ OSRAM GmbH : Lichtprogramm 2002/2003. München. 2002. - Katalog

/ROU/ Rouvel, L.: Raumkonditionierung – Wege zum energetisch optimierten Gebäude. Berlin/Heidelberg 1978. (Band 12 der Schriftenreihe der Forschungsstelle für Energiewirtschaft)

/VDI WA/ VDI-Wärmeatlas. 6. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1991

/WAG/ Wagner, Ulrich: Nutzung regenerativer Energien. 8. Aufl. München: E&M Verlag, 1997 (Heft 1 der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik)

/2067-20/ VDI-Richtlinie 2067 Blatt 20 08.00

/3808/ VDI-Richtlinie 3808 01.93

/4701-1/ NORM DIN 4701 Teil 1 08.95

/4701-2/ NORM DIN 4701 Teil 2 08.95

/4108-6/ NORM DIN 4108 Teil 6 01.00

/4710/ NORM DIN 4710 11.82

/5031/ NORM DIN 5031 Teil 7 01.84

/6946/ NORM DIN EN ISO 6946 11.96

/7030/ NORM DIN EN ISO 7030 10.03

/EnEV/ Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden

/WSV 95/ Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (idF v. 16.8.1194)

11 Anhang

11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Anordnung und Funktion des Modellraums und einiger Prüfstandskomponenten. 4

Abbildung 3-1: Aufbau und Abmessungen des Unterbaus; Grundriss, Seiten- und Frontansicht. 8

Abbildung 3-2: Aufbau des Deckentragwerks; Draufsicht und Frontansicht. 9

Abbildung 3-3: Schnittansichten des Gestells der Deckenelemente. 10

Abbildung 3-4: Funktionsschema und Messstellen der kontrollierten Raumlüftung. 13

Abbildung 3-5: Messung der Strömungsgeschwindigkeit und Schaltschema der Regeleinrichtung. 14

Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der Mess-, Steuer- und Regelkomponenten sowie deren Verbindungen untereinander zur Kommunikation. 17

Abbildung 4-1: Tagesgänge von Außentemperatur sowie direkter und diffuser Einstrahlung des sonnigen Wintertages. 21

Abbildung 4-2: Tagesgänge von Außentemperatur sowie direkter und diffuser Einstrahlung des trüben Wintertages. 21

Abbildung 4-3: Funktionsschema der Außenluftsimulationsanlagen. 22

Abbildung 4-4: Konstruktionszeichnung der Außenschale des Glasvorbaus. 23

Abbildung 4-5: Detailskizze zur Bauweise des Glasvorbaus, Stegverbindung. 24

Abbildung 4-6: Luftführung im Scheibenzwischenraum (blau) und Absaugung aus dem Innenraum (rot) des Vorbaus; Darstellung ohne Glasscheiben. 25

Abbildung 4-7: Ansichten der Kästen der Lüftungsbrücke. 26

Abbildung 5-1: Winkeldefinitionen zur Sonnenstandsberechnung 31

Abbildung 5-2: Verlauf der Zeitgleichung über ein Jahr. 32

Abbildung 5-3: Beispielberechnungen des Sonnenstands für den Standort München. 35

Abbildung 5-4: Spektrum der terrestrischen Globalstrahlung sowie des direkten und diffusen Strahlungsanteils für den Mittag des 21. Juni in Süddeutschland. 38

Abbildung 5-5: Relative spektrale Bestrahlungsstärke der Direktstrahlung (bezogen auf das Spektrum von 12:00 Uhr) für einen klaren Wintertag in Süddeutschland. 40

Abbildung 5-6: Verlauf der prozentualen Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der gesamten Direktstrahlung sowie die jeweilige Air Mass für die erste Tageshälfte eines Winter- und Sommertags in Süddeutschland..... 41

Abbildung 5-7: Abhängigkeit des Transmissionsgrads von Glasscheiben (Doppelscheiben) vom Einstrahlwinkel /DUF/. 43

Abbildung 5-8: Relative spektrale Bestrahlungsstärke der Diffusstrahlung bezogen auf das Spektrum von 12:00 Uhr für einen klaren Wintertag in Süddeutschland. 44

Abbildung 5-9: Verlauf der prozentualen Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der gesamten Diffusstrahlung sowie die jeweilige Air Mass für die erste Tageshälfte eines klaren Winter- und Sommertags in Süddeutschland. 45

Abbildung 5-10: Verlauf der prozentualen Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der gesamten Diffusstrahlung sowie die jeweilige Air Mass für die erste Tageshälfte eines bewölkten Winter- und Sommertags in Süddeutschland. 46

Abbildung 5-11: Relative spektrale Bestrahlungsstärke (bezogen auf den höchsten Wert) jeweils eines HQI- und Halogensystems im Vergleich..... 47

Abbildung 5-12: Relative spektrale Bestrahlungsstärke (bezogen auf den höchsten Wert) einer Kombination aus HQI- und Halogenlampen im Vergleich zum Sonnenspektrum eines Wintertages..... 48

Abbildung 5-13: Relative spektrale Bestrahlungsstärke (bezogen auf den höchsten Wert) einer Kombination aus HQI- und Halogenlampen im Vergleich zum Sonnenspektrum eines Sommertages. 48

Abbildung 5-14: Realisierte Anordnung der HQI- und Halogensysteme auf der Strahlerplattform; Dargestellt sind die Außenabmessungen der Reflektoren. 49

Abbildung 5-15: Gemessene Bestrahlungsstärkeverteilung von zwei Lampen-Reflektor-Kombinationen mit Halogen-Metalldampflampen. 50

Abbildung 5-16: Gemessene Bestrahlungsstärkeverteilung von zwei Lampen-Reflektor-Kombinationen mit Halogenlampen. 51

Abbildung 5-17: Berechnete Bestrahlungsstärkeverteilung über der Fensterfläche bei senkrechter Einstrahlung für die realisierte Konfiguration mit 26 HQI-Systemen (je 400 W) sowie 80 Halogensystemen (je 150 W). 52

Abbildung 5-18: Teilansicht des Prüfstands von oben; Horizontaler Bewegungsbereich der Fahrmechanik. 53

Abbildung 5-19: Teilansicht des Prüfstands von der Seite; Planung des vertikalen Bewegungsbereichs der Fahrmechanik. 54

Abbildung 5-20: Teilansicht Sonnenfahrmechanik im Bauzustand; Rohrleiter, horizontales Drehgelenk und oberer Auflagepunkt. 55

Abbildung 5-21: Schalt- und Anschlussschema jeweils einer HQI-Lampe und einer Halogenlampengruppe. 57

Abbildung 5-22: Übersicht zur Berechnungsmethodik der Betriebsdaten für den Sonnensimulator. 59

Abbildung 5-23: Tagesgang der von der Strahlerplattform am Modellraumfenster zu erzeugenden Bestrahlungsstärke (Bezugsfläche in Einstrahlrichtung) des sonnigen Wintertages. 61

Abbildung 5-24: Tagesverlauf der prozentualen Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der Globalstrahlung für den sonnigen Wintertag. 62

Abbildung 5-25: Projektion der Fensterfläche und nutzbarer Bereich der Strahlerplattform bei horizontaler Bewegung. 63

Abbildung 5-26: Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke der HQI- und Halogenlampen von der Netzspannung normiert auf die Bestrahlungsstärke bei Nennspannung (230 V). 64

Abbildung 5-27: Geometrische Bestrahlungsstärkeverteilung der HQI- und Halogenleuchten normiert auf den Maximalwert bei 0 cm. 64

Abbildung 5-28: Prozentuale Leistungsanteile der Wellenlängenbereiche an der erzeugten Bestrahlungsstärke der HQI-Lampen sowie der Halogenlampen in verschiedenen Dimmungsstufen. 65

Abbildung 5-29: Darstellung der Berechnungsdaten des Konfigurationsprogramms auf einer Oberfläche in *Microsoft® Excel®*. 66

Abbildung 5-30: Ausschnitt aus einem zeitlichen Fahrplanablauf. 68

Abbildung 6-1: Abmessungen des Modellraums und Anordnung der Wände, Grundriss. .. 71

Abbildung 6-2: Abmessungen der Wände des Modellraums. 72

Abbildung 6-3: Verteilung der Messstellen für Oberflächen- und Kerntemperatur an einer Seitenwand. 73

Abbildung 6-4: Schematische Darstellung der Montagemethode eines Kerntemperatursensors in einer Wand. 74

Abbildung 6-5: Schalt- und Anschlussschema des Referenzheizsystems. 76

Abbildung 6-6: Beispielausschnitt aus einem Versuchslauf zur Verdeutlichung der Regelstrategie des Referenzheizsystems. 77

Abbildung 7-1: Tagesverlauf der Außentemperatur am Prüfstand. 79

Abbildung 7-2: Vergleich des Außentemperaturverlaufs am Prüfstand mit und ohne Betrieb des Sonnensimulators. 80

Abbildung 7-3: Temperaturverlauf vor der Modellraumfassade an den einzelnen Messstellen der Außentemperatur. 80

Abbildung 7-4: Temperaturverlauf an den der Fassade zugewandten Oberflächen der Glasscheiben des Vorbaus. 81

Abbildung 7-5: Abhängigkeit der Volumenströme und des Luftdrucks im Modellraum (Unterdruck gegenüber Umgebung) von der Stellgröße der Pumpenregelung. 82

Abbildung 7-6: Außentemperaturverlauf und Volumenstromverläufe der Lüftungsanlage bei konstantem Außenluftwechsel (5-Minuten-Mittelwerte). 83

Abbildung 7-7: Einfluss des Referenzheizsystems auf den Volumenstrom am Lufteinlass an der Modellraumfassade. 84

Abbildung 7-8: Mehrtägiger Verlauf von Raumtemperatur, Wand- Decken- sowie Bodenkerntemperatur bei Heizbetrieb mit Nachtabsenkung im Vergleich. 87

Abbildung 7-9: Abkühlung des Modellraums durch Abschalten der Heizung bei konstanter Außentemperatur (10 °C) und konstantem Außenluftwechsel (0,5 h^{-1}). 88

Abbildung 7-10: Wärmeströme am Modellraum (Draufsicht und Seitenansicht). 91

Abbildung 7-11: Energiebilanz des Abkühlversuchs (Abbildung 7-9) über einen Bilanzzeitraum von 48 Stunden nach Abschalten der Heizung. 93

Abbildung 7-12: Energiebilanzen von Versuchen mit dem Tagesprofil ‚Wintertag sonnig' über einen Bilanzzeitraum von jeweils 24 Stunden. 95

Abbildung 7-13: Tagesverläufe der Raumlufttemperatur. 96

Abbildung 7-14: Verläufe der Kerntemperaturen einer Seitenwand in verschiedenem Abstand zur Fassade (Raumtiefe 350 cm). 97

Abbildung 7-15: Verläufe zweier Kerntemperaturen der Seitenwand im Vergleich (Abstand zur Fassade 180 cm). 98

Abbildung 8-1: Verlauf von Raumtemperatur, Außentemperatur und Heizleistung des Referenzsystems über mehrere Versuchtage bei Versuch 1. 100

Abbildung 8-2: Verlauf von Raumtemperatur, Außentemperatur und Heizleistung des Referenzsystem über zwei Versuchtage bei Versuch 2 (mit Sonneneinstrahlung). 101

Abbildung 8-3: Verlauf von Raumtemperatur, Außentemperatur und Heizleistung des Referenzsystem über zwei Versuchtage bei Versuch 3. 102

Abbildung 8-4: Verlauf des Heizenergieverbrauchs bei durchgehendem Heizbetrieb im Vergleich zum Heizbetrieb mit Nachtabsenkung. 103

Abbildung 8-5: Heizenergieverbrauch und maximale Heizleistung (5-Minuten-Mittelwerte) der Versuche im Vergleich. 105

Abbildung 8-6: Verlauf der Raumlufttemperatur an den einzelnen Messstellen über zwei Tage bei Versuch 2. 106

Abbildung 8-7: Verläufe der Oberflächentemperaturen der linken Seitenwand in verschiedenem Abstand zur Fassade (Raumtiefe 350 cm). 107

Abbildung 8-8: Verlauf von empfundenen Temperatur, Raumlufttemperatur sowie mittlerer Oberflächentemperatur. 108

Abbildung 11-1: Ventilator-Wärmetauscher-Modul der Temperieranlage; oben der Anschluss an die Luftverteilung, vorn die Absaugung am Glasvorbau. .. 123

Abbildung 11-2: Modellraum aus Leicht-Hochlochziegeln im Rohbau. 124

Abbildung 11-3: Fassade des Modellraums, Glasvorbau und Sonnensimulator. 125

Abbildung 11-4: Strahlerplattform des Sonnensimulators. 126

11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Charakteristik der sonnigen und trüben Wintertage des Testreferenzjahres 8 und der ausgewählten repräsentativen Tage. 20

Tabelle 5-1: Aufteilung der spektralen Bestrahlungsstärke auf Direkt- und Diffusstrahlung sowie die Teilsummen für verschiedene Wellenlängenbereiche für den 21. Juni, 12:00 Uhr in Süddeutschland. 39

Tabelle 5-2: Beispiel eines Fahrplanbefehls für den Sonnensimulator. 58

Tabelle 7-1: Materialkennwerte und Aufbau der Modellraumwände, -boden und -decke. .. 85

Tabelle 7-2: Wärmedurchgangskoeffizienten und Speicherkapazitäten der Bauteile. 86

Tabelle 7-3: Berechnete Abkühlzeitkonstante τ des Modellraums für den Zeitraum 8-24 Stunden nach Abkühlbeginn. 89

Tabelle 7-4: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter von drei ausgewählten Prüfstandsversuchen mit Variationen einzelner Parameter. 94

Tabelle 7-5: Energiebilanzen von Versuchen mit dem Tagesprofil ‚Wintertag sonnig' über einen Bilanzzeitraum von jeweils 24 Stunden. 95

Tabelle 8-1: Heizenergieverbrauch und Heizleistungen der Versuche im Vergleich. 104

11.3 Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen

Indizes und Abkürzungen

Fa	Fassade
Fe	Fenster
W	Wand/Wände
WL	Seitenwand links des Modellraums
WR	Seitenwand rechts
WH	Rückwärtige Wand (mit Tür)
Bo	Boden (des Modellraums)
De	Decke
SP	Strahlerplattform (Sonnensimulator)
S	Sonne
L	Luft
Tr	Transmission
Lu	Luftvolumenstrom
Str	Strahlung
dir	Direktstrahlung
diff	Diffusstrahlung
hor	bezogen auf die Horizontale
ng	bezogen auf eine geneigte Fläche

Formelzeichen

a_{Fu}	Fugendurchlasskoeffizient	[m³/(m·h·Pa$^{2/3}$)]
l_{Fu}	Fugenlänge	[m]
ε_h	Höhenkorrekturfaktor	[-]
H	Hauskenngröße	[Wh Pa$^{2/3}$/(m³·K)]
r	Raumkennzahl	[-]
N	Tagesmittel des Bedeckungsgrades des Himmels	[-]
N_H	Mittlere Bedeckung während der Hellstunden	[-]
θ	Einstrahlungswinkel	[°]
α	Azimut	[°]
γ	Elevation	[°]
β	Neigung einer Fläche gegenüber der Horizontalen	[°]
δ	Deklination	[°]
φ	Geographischer Breitengrad (Nord positiv)	[°]

λ_L	Geographischer Längengrad (West positiv)	[°]
t_S	Sonnenzeit	[h]
t_L	Lokale Zeit	[h]
λ_{ZZ}	Bezugslängengrad der Zeitzone	[°]
ω_S	Stundenwinkel der Sonne	[°]
$\mathrm{d}\Omega$	Raumwinkelelement	[sr]
Ω_0	Einheitsraumwinkel	[1 sr]
ϕ_e	Strahlungsfluss	[W]
L_e	Strahldichte	[W/(m²·sr)]
E_e	Bestrahlungsstärke	[W/m²]
λ	Wellenlänge	[µm]
$E_{e\lambda}$	spektrale Bestrahlungsstärke	[W/(m²·µm)]
τ_{rel}	Relativer Transmissionsgrad von Glas	[-]
$E_{e,HQI,}$	Absolute Bestrahlungsstärke eines HQI-Strahlers im Mittelpunkt der Verteilungskurve	[W/m²]
$E_{e,Ha}$	Absolute Bestrahlungsstärke eines Halogen-Strahlers im Mittelpunkt der Verteilungskurve	[W/m²]
$E_{e,n,HQI}$	Normierte geometrische Bestrahlungsstärkeverteilung (HQI-Strahler)	[-]
$E_{e,n,Ha}$	Normierte geometrische Bestrahlungsstärkeverteilung (Halogenstrahler)	[-]
$E_{e,n,d,Ha}$	Normierte Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit der Dimmstufe (Halogenstrahler)	[-]
d_{Ha}	Dimmstufe Halogen	[%]
ρ	Dichte	[kg/m³]
c	Spezifische Wärmekapazität	[Wh/(kg·K)]
C_{th}	Wärmespeicherkapazität	[Wh/K]
α_i	Wärmeübergangskoeffizient innen	[W/(m²·K)]
α_a	Wärmeübergangskoeffizient außen	[W/(m²·K)]
λ_{th}	Wärmeleitwert	[W/(m·K)]
U	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m²·K)]
τ	Zeitkonstante	[h]
ϑ_A	Außenlufttemperatur	[°C]
ϑ_R	Raumlufttemperatur	[°C]
$\vartheta_{a,x}$	Bezugstemperatur außerhalb des Raums für ein Bauteil (x: Index des Bauteils)	[°C]
$\vartheta_{K,x}$	Kerntemperatur eines Bauteils (x: Index des Bauteils)	[°C]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W]
Q	Wärmemenge	[Wh]
$\vartheta_{R,e}$	Empfundene Raumtemperatur	[°C]
$\dot{V}$	Luftvolumenstrom	[m³/h]

11.4 Abbildungen

Abbildung 11-1: Ventilator-Wärmetauscher-Modul der Temperieranlage; oben der Anschluss an die Luftverteilung, vorn die Absaugung am Glasvorbau.

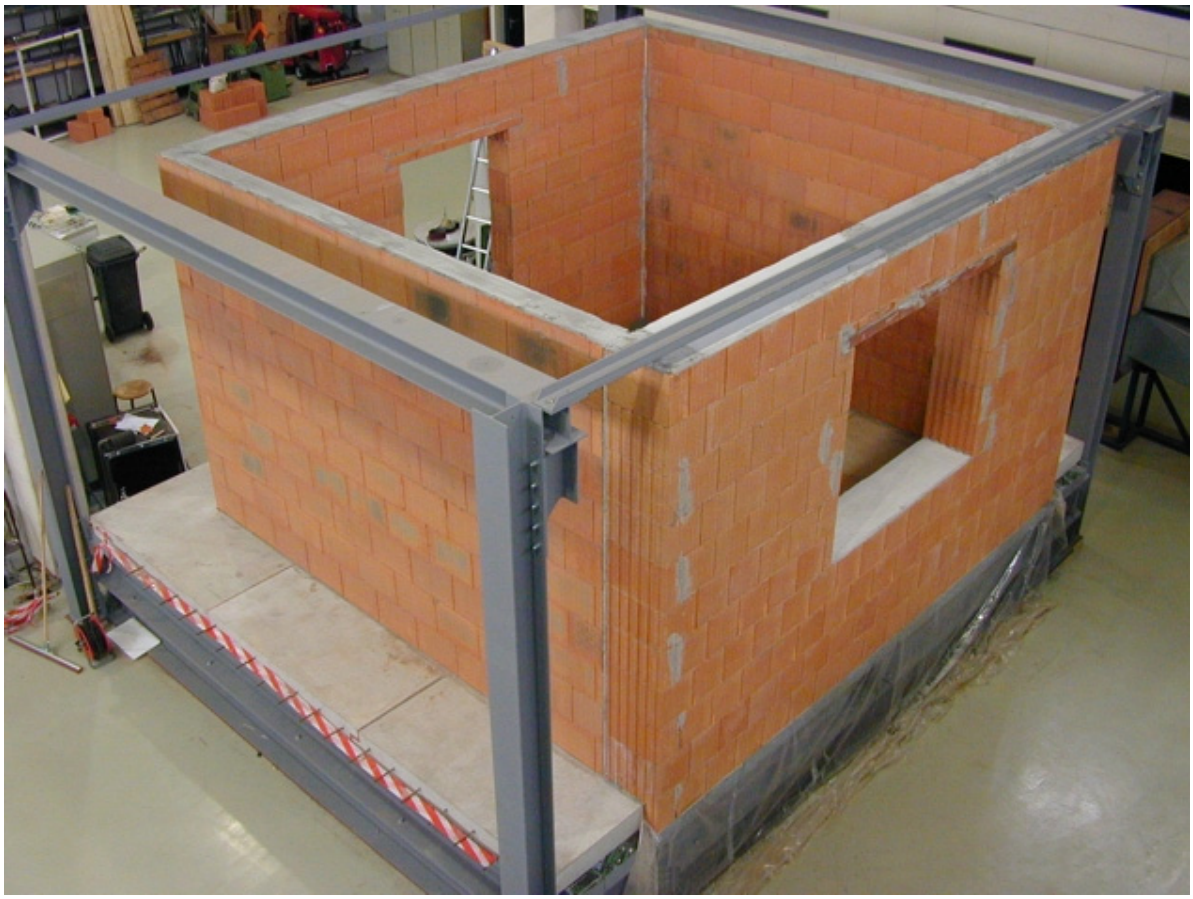

Abbildung 11-2: Modellraum aus Leicht-Hochlochziegeln im Rohbau.

Abbildung 11-3: Fassade des Modellraums, Glasvorbau und Sonnensimulator.

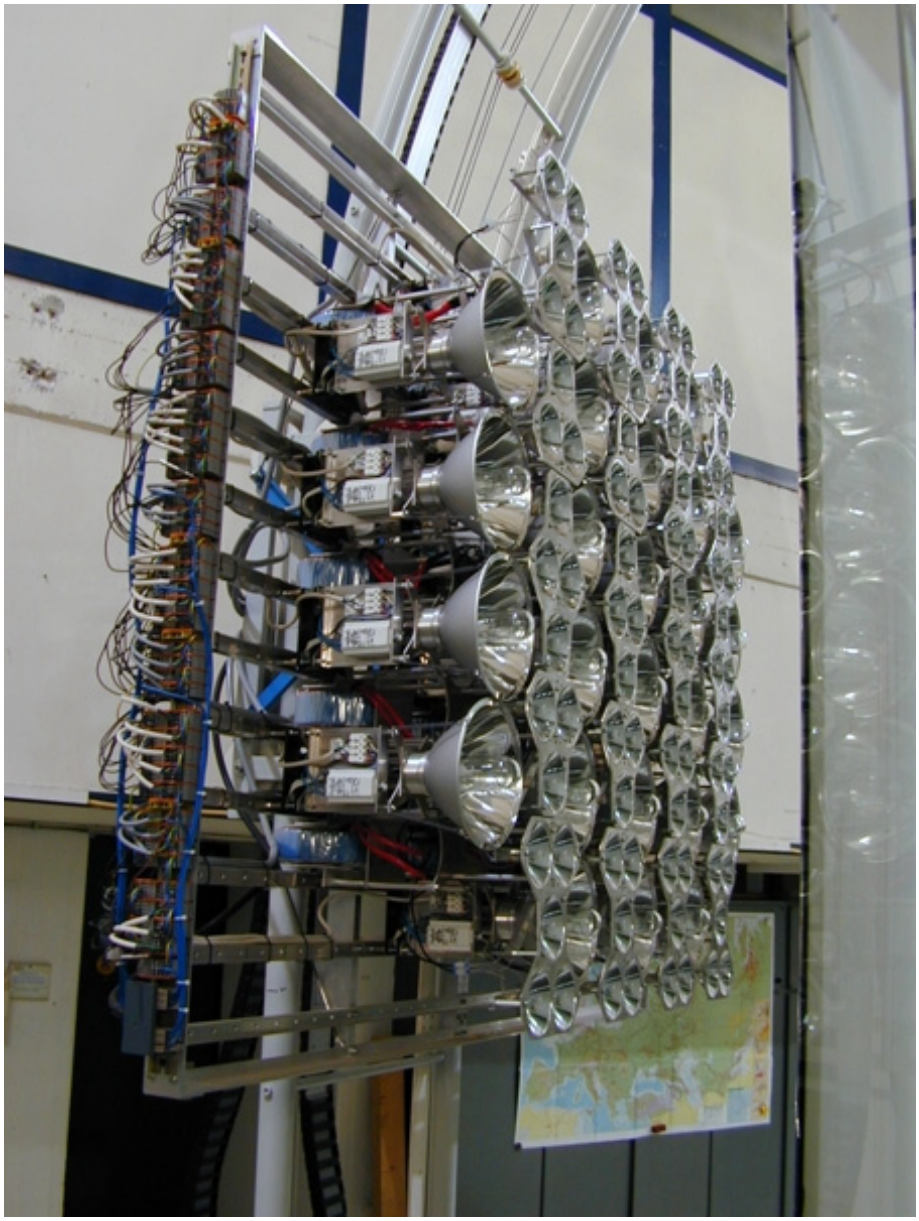

Abbildung 11-4: Strahlerplattform des Sonnensimulators.