INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK
Institute for Energy Systems and Thermodynamics

DIPLOMARBEIT

Reflektierende Beschichtungen als Lösungsansatz für das Problem sommerlicher Überwärmung von Gebäuden sowie ihre Auswirkung auf den Energiebedarf

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer

Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Ponweiser

E302

Institut für Energietechnik und Thermodynamik

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic

E207

Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Olga Rekova

Matr. Nr. 01129184

Erdbergstrasse 220/206B, 1110 Wien

Wien, im _____ _____

(Olga Rekova)

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, im _____ _____

(Olga Rekova)

Vorwort

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei dem Betreuer meiner Diplomarbeit, Herrn Ao Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Ponweiser, sowie der Mitbetreuerin, Frau Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic, bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und von denen ich immer Unterstützung bekommen habe.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Freundinnen und Freunden bedanken, die immer über die Dauer meines gesamten Studiums mit guten Ratschlägen zur Seite standen.

Kurzfassung

Die herkömmlichen Außenwand- und Dachbeschichtungen erreichen unter dem Einfluss von der Sonneneinstrahlung hohe Außeroberflächentemperaturen. Dadurch kann nicht nur ihre Lebensdauer verschlechtert sondern auch die thermische Behaglichkeit der Räume beeinträchtigt werden.

Dank moderner Technologien besteht die Möglichkeit, das solare Absorptionsvermögen der Beschichtungen senken, was zur Auskühlung der Außenoberflächen führt und das Raumklima vorteilhaft beeinflusst. In dieser Arbeit werden die bestehenden und die modernen Werkstoffe für die Sanierung und den Neubau von Dächern betrachtet. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die reflektierenden Anstriche gelegt, die für Außenwände und Außendachflächen angewendet werden können und in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung und zwar Pigmenten, Bindemittel, Zusatzstoffe die Überwärmung der Außenoberflächen deutlich reduzieren können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Bewertung der Auswirkung der reflektierenden Anstriche auf das Raumklima und auf die Außen-/Innenoberflächentemperaturen des Gebäudes und des Dachgeschoßes für das „Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium“ im 7. Bezirk von Wien durchgeführt, mit dem Ziel die thermische Behaglichkeit in der Schule zu optimieren.

Es wird das Basismodel des betrachteten Gebäudes für den Ist-Zustand erstellt und mit Hilfe von TRNSYS simuliert. Für die thermische Zone „Klassenzimmer“ werden zwei Lüftungskonzepte für die Fensterlüftung betrachtet und simuliert. Für die Zeitperiode von Mai bis August wird als Optimierungsmaßnahme der thermischen Behaglichkeit für diese Zone die Stoß-, Dauer- und Nachtlüftung betrachtet.

Die Auskühlung des Dachgeschoßes durch die reflektierenden Anstriche auf die Außenoberfläche des Daches wird untersucht und die Auswirkung der Nachtlüftung abgeschätzt. Das Ziel ist, die Überwärmung im Dachgeschoß im Sommer zu vermindern.

Der jährliche Heizwärmebedarf bei Anwendung der reflektierenden Anstriche, wird im Verglich zur ursprünglichen Beschichtungen des Gebäudes bewertet.

Abstract

The conventional coatings of exterior walls and roofs reach high surface temperatures due to solar radiation. In consequence their lifespan is shortened and the thermal comfort of the rooms is reduced.

Thanks to modern technologies it is possible to lower the solar absorptivity of the coatings which leads to cooler outer surfaces and this in turn improves the indoor climate. In this work the common and the modern materials used in renovation and new constructions of roofs are considered. Particular attention is given to solar reflective coatings which can be used for outer walls and roofs which can depending on their composition, namely pigments, binders, and additives significantly reduce the overheating of the exterior surfaces.

In the present work, the evaluation of the effect of solar reflective coatings on the indoor climate and on the exterior and interior surface temperatures of the building and the attic of the “Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium” in the 7th district of Vienna is presented. The goal is to optimise the thermal comfort in the school rooms.

The basic model of the current state of the considered building was created and simulated with TRNSYS. For the thermal zone “classroom” two ventilation concepts for window ventilation were taken into account and simulated. For the time period from May to August the thermal comfort is examined in the case of shock, continuous, and night ventilation aiming for optimisation.

The cooling effect of the attic due to solar reflective coatings on the outer surfaces of the roof is investigated. Moreover the effectiveness of night ventilation is estimated. The aim is to avoid overheating of the attic during the summer.

The annual heating demand in the case of using a solar reflective coating is compared to the one when using the original coatings.

Inhaltsverzeichnis

1 Theoretische Grundlagen ... 1

1.1 Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie ... 1

1.2 Energiebilanz der Erde ... 2

1.3 Spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung ... 3

1.4 Himmelsmodelle ... 5

1.5 Thermisches Verhalten von Außenbauteilen und Fenster ... 6

1.6 Absorption, Reflexion und Emission an Wänden ... 8

1.7 Solarer Absorptionsgrad, solarer Reflexionsgrad, solarer Transmissionsgrad ... 8

1.8 SRI-Wert, HBW und TSR-Wert ... 10

2 Herkömmliche und innovative Werkstoffe für Dächer und Dachsanierung ... 11

2.1 Reflektierende Anstriche ... 11

2.2 Kühlende Dachziegel ... 14

2.3 Kühlende wasserdichte Membranen ... 18

2.4 Natürliche Werkstoffe ... 18

2.5 Kunststoff ... 18

2.6 Bituminöse Stoffe ... 20

2.7 Flüssigabdichtung ... 21

2.8 Metalle ... 21

2.9 Die künstliche und natürliche Alterung von herkömmlichen und reflektierenden Beschichtungen ... 22

2.10 Datenbanken für die kühlenden Produkte ... 28

2.10.1 ECRC (European Cool Roofs Council) ... 28

2.10.2 CRRC (Cool Roof Rating Council) ... 30

2.10.3 ENERGY STAR und LEED ... 31

3 Hauptbestandteile von Anstrichstoffen ... 33

3.1 Farbmittel ... 33

3.2 Bindemittel ... 38

3.3 Füllstoffe ... 39

4 Modellbildung und Simulation des bestehenden Gebäudes ... 40

4.1 Allgemeine Beschreibung der Simulation mit TRNSYS ... 40

4.2 Beschreibung des Gebäudes ... 41

4.3 Erstellung des Gebäudemodells ... 46

4.3.1 Wetterbedingungen ... 47

4.3.2 Zonierung des Gebäudes ... 49

4.4 Beschreibung der Gebäudestruktur ... 51

4.4.1 Nutzerprofil der Schule ... 54

4.4.2 Innere Wärmegewinne ... 55
4.4.3 Thermische Behaglichkeit ... 57
4.5 Heizung ... 58
4.6 Lüftung ... 59
4.6.1 Infiltration ... 59
4.6.2 Fensterlüftung für die Zone „Klassenzimmer“ ... 60
4.7 Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der Gebäudesimulation ... 70
5 Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit des Gebäudes ... 76
5.1 Produktionsbeschreibung und Anwendungsbereiche ... 76
5.1.1 „Cool Dry“ ... 76
5.1.2 „White Reflex“ ... 77
5.1.3 „Alesta Cool“ ... 77
5.2 Grundlagen für den Algorithmus zur Berechnung der Wärmeströme und der Außen-/Innenoberflächen-Temperaturen eines Bauteils ... 78
5.3 Solarer Wärmegewinn durch die Außenbauteile ... 80
5.4 Thermische Sanierung – Input-Daten für TRNSYS ... 82
5.5 Ergebnisse der Variationen der Gebäudesimulation ... 84
5.5.1 Heizwärmebedarf des Gebäudes ... 84
5.5.2 Raumklima in der Zone „Klassenzimmer“ ... 85
5.5.3 Temperaturverlauf an der Außen-/Innenoberfläche der Außenwände für die Zone „Klassenzimmer“ ... 86
5.5.4 Raumklima in den Zonen „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum“ ... 90
5.5.5 Temperaturverlauf an der Außen-/Innendachfläche des Blechdaches für die Zone „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum" ... 92
5.5.6 Energieeinträge durch die Dachfläche des Blechdaches in die Zone „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum“ ... 95
5.6 Ergebnisse der Simulation des Dachgeschosses und zusätzliche Optimierungsmaßnahmen für das Raumklima im Dachgeschoss ... 98
5.6.1 Raumklima in der Zone „Dachgeschoss“ ... 101
5.6.2 Temperaturverlauf an der Außen-/Innendachfläche für die Zone „Dachgeschoss" ... 102
5.6.3 Wärmeeinträge durch die Dachfläche in die Zone „Dachgeschoss“ ... 106
6 Zusammenfassung und Fazit ... 109
7 Nomenklatur ... 112
8 Tabellenverzeichnis ... 115
9 Abbildungsverzeichnis ... 115
10 Literature ... 121

Anhang 127
A. Technische Datenblätter 127
B. Ergebnisse der Simulation der Zone „Sanitärraum“ 134
C. Abbildungen für die Zone „Dachgeschoss“ 137
D. Gebäudepläne 144

1 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Wechselwirkungen zwischen der Strahlung und der Materie, die Energiebilanz der Erde, Himmelmodelle und das thermische Verhalten der Außenbauteile und der Fenster unter der Wirkung der Sonnenstrahlung beschrieben. Die Begriffe wie SRI-Wert, HBW und TSR, die später für die Beschreibung der Eigenschaften der reflektierenden Anstriche notwendig sind, werden in diesem Teil der Diplomarbeit definiert und kurz erläutert.

1.1 Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie

Die Strahlung kann als Welle und Teilchen definiert werden. Am zweckmäßigsten ist die Strahlung als Teilchen zu betrachten, da es in diesem Fall die Wechselwirkung von Strahlung und Materie nachvollziehbarer ist. Bei einer solchen Auffassung wird ein Strahlungsteilchen als Photon bezeichnet. Wie die Wechselwirkung im konkreten Fall aussieht, ist von vielen Faktoren abhängig. Die Oberfläche bzw. Struktur der Materie, mit der die Strahlung in Wechselwirkung tritt, soll im Zusammenhang betrachtet werden, da die beiden Faktoren die Wechselwirkung beeinflussen.

Die Abbildung 1 zeigt die Arten der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie.

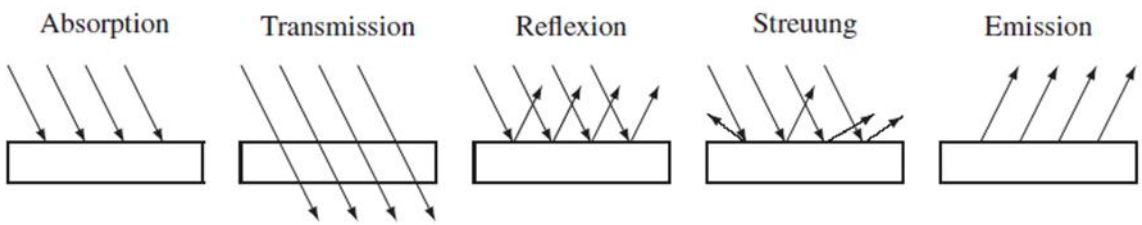


Abbildung 1: Arten der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie, aus Regenerative Energietechnik [1], Kapitel 3, s.111

Eine Haupteigenschaft eines Photons besteht darin, dass seine Energie „nur als Ganzes entstehen oder verschwinden kann“ [1].

Folgende Zusammenhänge sind festzustellen:

> *„Überträgt ein Photon seine Energie, so existiert es danach nicht mehr. Dieser Vorgang wird als Absorption bezeichnet.*
> *Findet kein Energieübertrag statt, so können zwei Arten von Wechselwirkung unterschieden werden: Das Photon durchdringt die Materie (Transmission) oder es wird an ihrer Oberfläche reflektiert. Steht die Reflexionsrichtung in keinem*

Zusammenhang mit der Einfallsrichtung des Photons, so spricht man von Streuung.
Die Emission von Photonen stellt eine Umkehrung der Absorptionsprozesse dar. Man unterscheidet die thermische Emission, bei der die Wärmebewegung der Atome dazu führt, dass Photonen mit einem von der Temperatur abhängigen Spektrum ausgesendet werden.", Auszug aus Regenerative Energietechnik [1], Kapitel 3, s.111.

1.2 Energiebilanz der Erde

In der Abbildung 2 ist eine Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Arten der Sonnenstrahlung und der Erde dargestellt. In jedem "Niveau" (Weltraum, Atmosphäre, Erde) bilanzieren sich die Strahlungsenergieflüsse zu Null. Als weiße Pfeilspitzen wird bei der kurzwelligen Sonnenstrahlung Reflexion dargestellt sowie „bei der langwelligen Strahlung Ausstrahlung in den Weltraum“ [2]. Absorption wird wiederum durch die schwarzen Pfeilspitzen abgebildet.

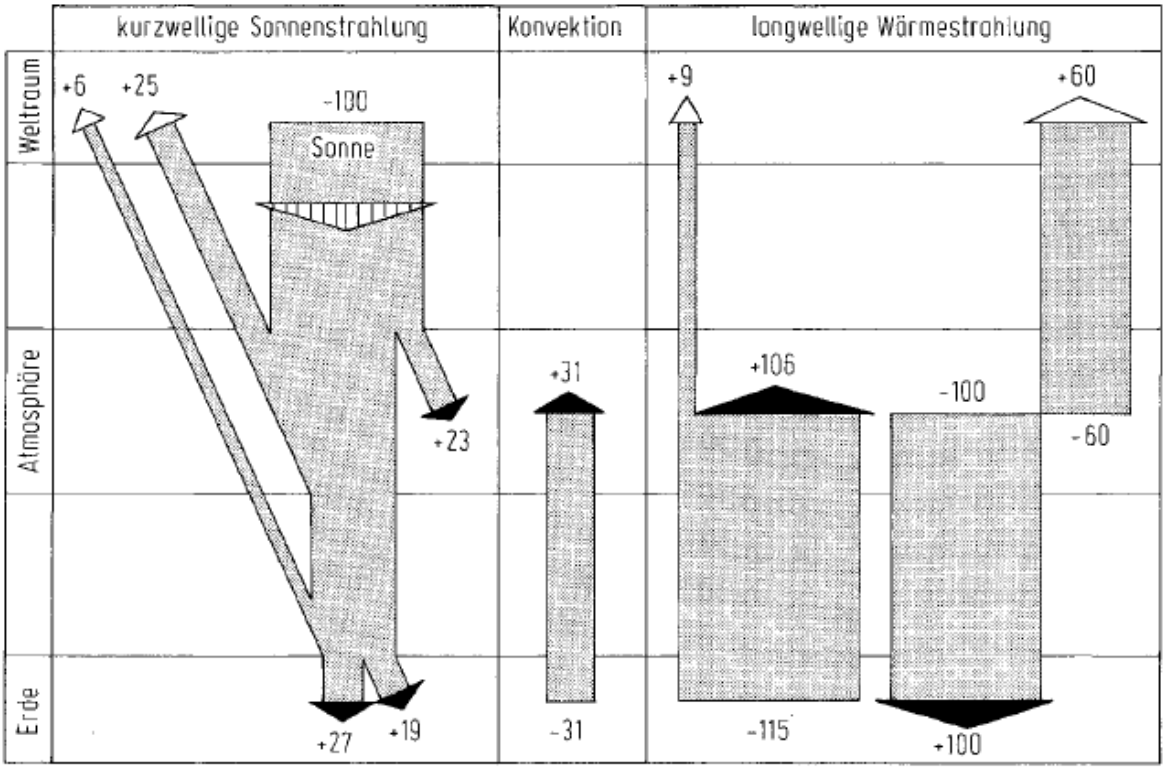


Abbildung 2: Die Energiebilanzen von Erdoberfläche, Atmosphäre und Obergrenze der Atmosphäre, aus Raumklimatechnik [2], Kapitel B, s.33

Die Wolkenoberfläche und die Erdoberfläche reflektieren die kurzwellige Strahlung zurück. Es wird ca.25% und 6% der einfallenden kurzwelligen Strahlung von den Wolkenoberflächen und an der Erdoberfläche in der entsprechenden Weise reflektiert. Das heißt, der

Gesamtverlust an anfallender kurzwelliger Strahlung beträgt ca.31% [2]. Der verbleibende Anteil von 69 % setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

> *„direkter Sonnenstrahlung, vorwärts gestreuter Streustrahlung, Strahlung, die an den Wolken nach unten reflektiert wird, und Strahlung zusammen, die die Wolken durchdringt.“, Auszug aus Raumklimatechnik [2], Kapitel B, s.32.*

Die Luftbestandteile absorbieren ca. 23% von der 69 % an der restlichen einfallenden kurzwelligen Sonnenstrahlung. Die Globalstrahlung (46%), die aus direkter (27%) und diffuser (19%) Strahlung besteht, wird an der Erdoberfläche absorbiert. Dadurch erwärmt sich die Erdoberfläche:

> *„Die Erwärmung der Erdoberflache führt zu einem vertikalen turbulenten Fluss von fühlbarer Warme und, nach Verdunstung von Wasser, zu einem entsprechenden Fluss von latenter Warme. Hierdurch werden bereits 31% der 46% an der Erdoberflache absorbierten Energie "verbraucht" und zunächst in die Atmosphäre transportiert.“, Auszug aus Raumklimatechnik [2], Kapitel B, s.32.*

Die Erdoberfläche emittiert die langwellige Strahlung (115%) entsprechend ihrer Oberflächentemperatur. Ca.9 % von der langwelligen Ausstrahlung der Erdoberfläche erreicht teilweise ungestört den Weltraum. Ein großer Anteil dieser Strahlung wird durch die Atmosphäre (106%) absorbiert. Die Bestandteile der Atmosphäre erzeugen zwei Strahlungsenergieflüsse: eine zur Erdoberfläche gerichtete Strahlung und eine andere in den Weltraum gerichtete Strahlung [2].

1.3 Spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung

In der Abbildung 3 wird das elektromagnetische Strahlungsspektrum in Abhängigkeit von Wellenlänge und Frequenz dargestellt und wie folgt eingeteilt:

Ultraviolettstrahlung (UV) $\lambda < 380$ nm

Sichtbares Licht $380 < \lambda < 780$ nm

Infrarotstrahlung (IR) $\lambda > 780$ nm

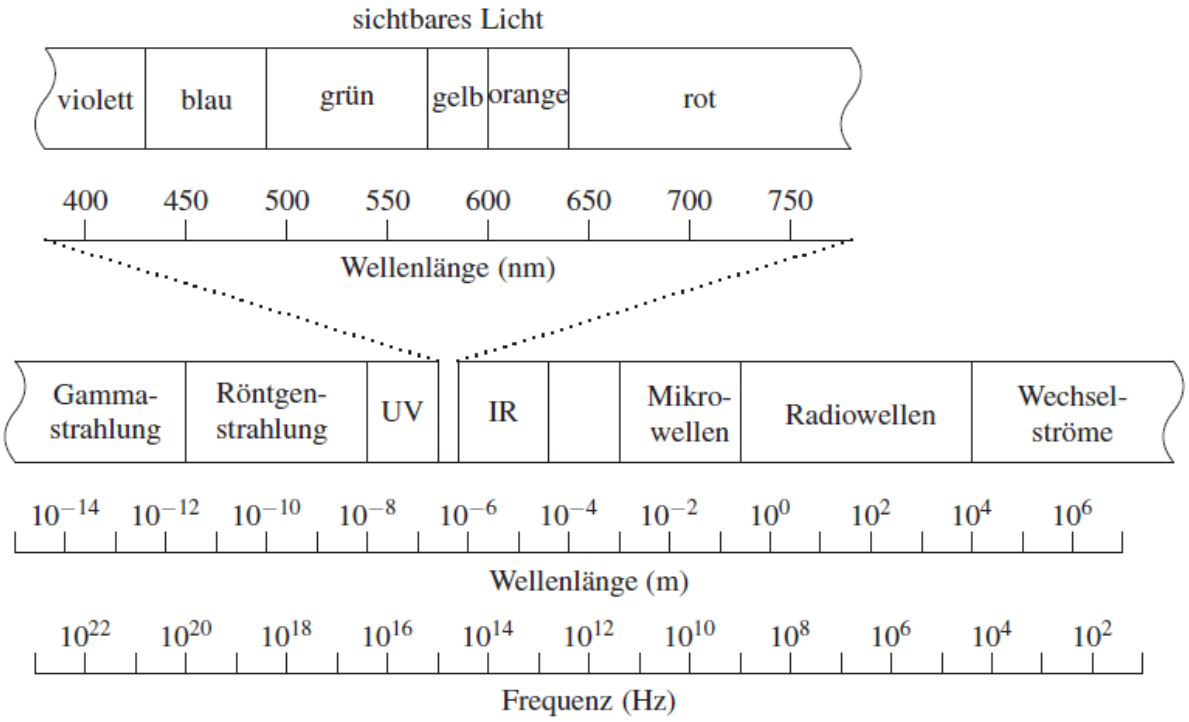


Abbildung 3: „Elektromagnetisches Strahlungsspektrum“, aus Regenerative Energietechnik [1], Kapitel 3, s. 112

Die Einteilung der Sonnenstrahlung nach dem Wellenlängenbereich wird in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Arten der Sonnenstrahlung

Art der Sonnenstrahlung	**Wellenlänge, in nm**	**Anteil an der gesamten Sonnenstrahlung, in %**
Ultraviolett	200 … 380	5,0
Sichtbar	380 … 780	43,0
Nahes Infrarot	780 … 3000	52,0

Nahe Infrarot-Strahlung kann weiter auch nach der Wellenlänge und dem Anteil an der gesamten NIR-Strahlung unterteilt werden [3], siehe Tabelle 2:

Tabelle 2: Einteilung der NIR-Strahlung

	Wellenlänge, in nm	**Anteil an der gesamten NIR-Strahlung, in %**
Nahes Infrarot	780 … 1000	50,0
	1000 … 1500	30,0
	1500 … 3000	20,0

Der Wellenlängenbereich der Sonnenstrahlung, der die Erde erreicht, liegt zwischen 200 und 3000 nm.

Die Abbildung 4 zeigt die Änderung der Intensität der Sonnenstrahlung aufgrund der verschiedenen Phänomene wie Streuung, Dunst und Staub.

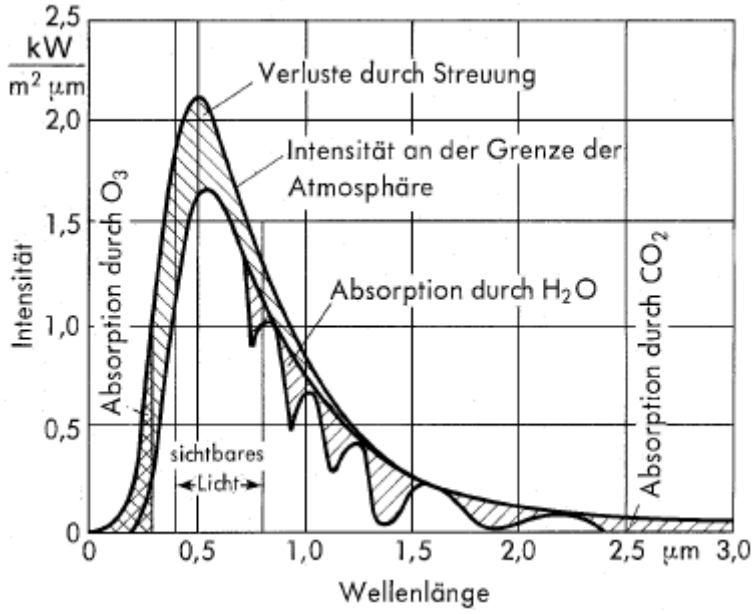


Abbildung 4: Sonnenstrahlungsintensität, aus Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik [4], Kapitel 1, s.46

1.4 Himmelsmodelle

Die Umrechnung der horizontalen Globalstrahlung auf die verschieden geneigten Flächen erfolgt separat für die direkte und diffuse Strahlung. Die Intensität der Direktstrahlung ist vom Einfallwinkel abhängig. Es gibt verschiedene Modelle, um die Diffusstrahlung umzurechnen. Eines davon wäre das isotrope Himmelsmodell. Dieses Modell geht davon aus, dass die diffuse Strahlung gleichmäßig über den gesamten Himmel verteilt ist. Die gesamte Himmelsfläche strahlt mit gleicher Intensität. Die Diffusstrahlung auf eine beliebig orientierte und geneigte Oberfläche ergibt sich aus dem Produkt der Diffusstrahlung auf die horizontale Fläche und dem Sichtfaktor zum Himmel [5].

Neben dem isotropen Himmelsmodell existiert ein so genanntes anisotropes Himmelsmodell. Bei diesem Modell besteht die diffuse Sonnenstrahlung aus drei Anteilen:

- dem isotropen Anteil vom Himmel,
- dem zirkumsolaren Anteil (die Aufhellung um die Sonne herum) und

- der Horizonterhellung.

Es kann zwischen den folgenden anisotropen Himmelsmodellen unterschieden werden:

- Das Hay und Davies Modell berücksichtigt eine isotrope und eine zirkumsolare Komponente der Diffusstrahlung. Die Horizontaufhellung wird nicht berücksichtigt.
- Das Reindl Modell besteht aus drei Komponenten der Diffusstrahlung. Dieses Modell erweitert das Modell von Hay und Davies. Beim Reindl Modell wird – im Gegensatz zum Hay und Davies Modell – der Faktor Horizontaufhellung berücksichtigt.
- Das Perez Modell ist ein komplexes Modell und berücksichtigt alle drei Diffusstrahlungsanteile, die aus empirisch abgeleiteten Koeffizienten von Messungen bestehen. Das Reindl Modell und das Modell von Hay und Davies haben die Anteile der Diffusstrahlung explizit voneinander getrennt betrachtet [5], [6].

1.5 Thermisches Verhalten von Außenbauteilen und Fenster

Auf die Außenbauteile wirken die folgenden Wärmeströme (Abbildung 5) ein:

- kurzwellige direkte Sonnenstrahlung
- kurzwellige diffuse Sonnenstrahlung
- langwellige Abstrahlung und
- langwellige Himmelsgegenstrahlung bzw. Umgebungsstrahlung

Diese Wärmestromdichten von Strahlungen senken in der Winterzeit den Heizwärmebedarf, führen aber im Sommer zu einer stärkeren Erhöhung der Innenraumtemperatur. Die Sonnenstrahlung verursacht eine Überwärmung der Außenoberflächen vom Gebäude, welche zu Schäden der Bauteiloberflächen führen kann [7].

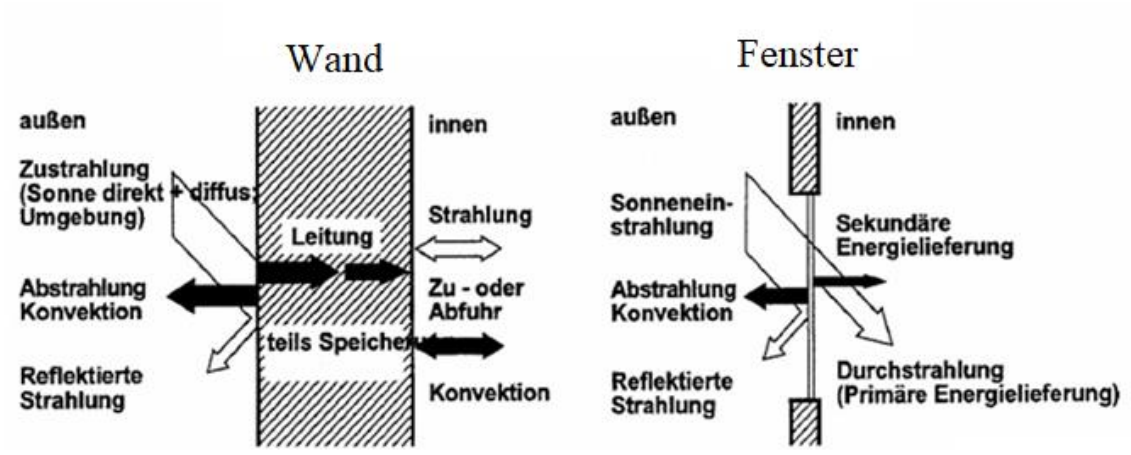


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Wärmeübertragungsvorgänge an opaken (eine Wand) und transparenten Bauteilen (ein Fenster), aus Skriptum „Lüftungs- und Klimatechnik“ [8], s. 26

Die kurzwellige Strahlung hat einen signifikanten Einfluss auf das thermische Verhalten des Gebäudes. Der Verglasungsanteil, die Sonnenschutzeinrichtungen wie Jalousien, Rollläden, Markisen und das Wärmespeichervermögen des Wand-/Dachmaterials sind dabei zu berücksichtigen. Der langwellige Strahlungsaustausch von Bauteiloberfläche und Umgebung entsteht zwischen Flächen mit Temperaturen von ca. 26℃ [7].

Strahlung, die auf ein Fenster auftritt, besteht aus drei Anteilen: der direkten, der diffusen Sonnenstrahlung und der von der Umgebung reflektierende Strahlung. Die direkte Strahlung ist richtungs- und zeitabhängig. Die diffuse und die reflektierende Strahlung sind nur zeitabhängig [7].

Ein wichtiger Unterschied der Fenster im Vergleich zu anderen Bauteilen ist die Transparenz der Verglasung. Die Bewertung der Strahlungsdurchlässigkeit der Verglasung wird durch den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) vorgenommen. Darunter wird der „gesamte transmittierte Anteil der einfallenden Solarstrahlung, bestehend aus direkt transmittierter Solarstrahlung und dem Anteil der absorbierten Solarstrahlung, der durch Konvektion und Wärmestrahlung in den Innenraum übertragen wird“, verstanden [9].

Die Tatsache, dass das Glas für kurzwellige Strahlung durchlässig und für langwellige Wärmestrahlung kaum durchlässig ist, ist auch der Grund für den Treibhauseffekt bei großflächig verglasten Gebäuden:

> *„Kurzwellige Strahlung transmittiert durch das Glas, trifft auf Bauteiloberflächen im Inneren des Gebäudes und wird in Wärme umgesetzt. Die erwärmten Oberflächen strahlen ihrerseits langwellige Wärmestrahlung ab, die durch das Glas nicht wieder nach außen hindurchgelassen werden. Es ist wichtig beim sommerlichen Wärmeschutz und bei der passiven Sonnenenergienutzung.“, Auszug aus Leitfaden Thermografie im Bauwesen [10], Kapitel 2, s.21.*

1.6 Absorption, Reflexion und Emission an Wänden

Da die auf eine Wand oder ein Fenster auftreffende Strahlung absorbiert (Absorptionsgrad), reflektiert (Reflexionsgrad) oder transmittiert (Transmissionsgrad) werden kann, wurde eine Beziehung zwischen diesen Größen festgelegt:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{1}$$

Dies bedeutet:

α	Absorptionsgrad
ρ	Reflexionsgrad
τ	Transmissionsgrad

In dieser Form kann diese Beziehung für die Fenster angewendet werden. Für die Wände ist $\tau = 0$ und es gilt somit $\alpha + \rho = 1$.

Unten werden die Begriffe Absorptions- bzw. Emissionsvermögen näher erläutert:

> *„Das Absorptionsvermögen α einer Oberfläche gibt an, welcher Anteil des auf eine Oberfläche in Form von Strahlung einfallenden Energiestroms von der Oberfläche absorbiert wird. Das Absorptionsvermögen hängt von der Oberfläche und der spektralen Verteilung der einfallenden Strahlung ab.*
> *Für eine nichtschwarze Wand wird nun ein Emissionsvermögen durch Vergleich mit einer schwarzen Wand definiert. Das Emissionsvermögen ist eine Materialeigenschaft, die nur vom thermodynamischen Zustand der Oberfläche abhängt.“, Auszug aus Skriptum „Wärmeübertragung“ [11], Kapitel 5, s. 150.*

1.7 Solarer Absorptionsgrad, solarer Reflexionsgrad, solarer Transmissionsgrad

Die Bestimmung des spektralen Absorptionsgrades und des spektralen Emissionsgrades erfolgt indirekt über die Messung des spektralen Reflexionsgrades mit einem speziellen Messgerät beispielsweise mit einem Zweistrahlspektrometer. Die Messung des spektralen Reflexionsgrades erfolgt in dem Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2500 nm. Bei den opaken Bauteilen kann der spektrale Absorptionsgrad aus dem spektralen Reflexionsgrad berechnet werden: $\alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$. Laut Kirchhoffsches Strahlungsgesetz gilt $\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$ [1].

Solarer Reflexionsgrad und solarer Absorptionsgrad der Außenoberflächen lassen sich mit der spektralen Strahldichte der Sonne I_λ durch Summenbildung bzw. über ein Faltungsintegral wie folgt berechnet [1]:

$$\alpha_{\mathrm{sol}} = \frac{\sum_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (\Delta I_{\lambda,\mathrm{AM}}\ \alpha_{\Delta\lambda})\Delta\lambda}{\sum_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (\Delta I_{\lambda,\mathrm{AM}})\Delta\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_{\mathrm{sol}} = \frac{\int_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (I_{\lambda,\mathrm{AM}}\ \alpha_{\lambda})\mathrm{d}\lambda}{\int_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (I_{\lambda,\mathrm{AM}})\ \mathrm{d}\lambda} \tag{2}$$

$$\rho_{\mathrm{sol}} = \frac{\sum_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (\Delta I_{\lambda,\mathrm{AM}}\ \rho_{\lambda})\Delta\lambda}{\sum_{300nm}^{2500\mathrm{nm}} (\Delta I_{\lambda,AM})\Delta\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \rho_{\mathrm{sol}} = \frac{\int_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (I_{\lambda,\mathrm{AM}}\ \rho_{\lambda})\mathrm{d}\lambda}{\int_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (I_{\lambda,\mathrm{AM}})\mathrm{d}\lambda} \tag{3}$$

$$\tau_{\mathrm{sol}} = \frac{\sum_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (\Delta I_{\lambda,\mathrm{AM}}\ \tau_{\lambda})\Delta\lambda}{\sum_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (\Delta I_{\lambda,\mathrm{AM}})\Delta\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \tau_{\mathrm{sol}} = \frac{\int_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (I_{\lambda,\mathrm{AM}}\ \tau_{\lambda})\mathrm{d}\lambda}{\int_{300\mathrm{nm}}^{2500\mathrm{nm}} (I_{\lambda,\mathrm{AM}})\mathrm{d}\lambda} \tag{4}$$

Es bedeutet:

$I_{\lambda,\mathrm{AM}}$	die spektrale Strahlungsintensität für AM 1,0, in W/(m^2 nm)
λ	Wellenlänge, in nm
$\Delta\lambda$	Wellenlängenintervall, in nm
α_{λ}	Spektraler Absorptionsgrad
ρ_{λ}	Spektraler Reflexionsgrad
α_{sol}	Solarer Absorptionsgrad
ρ_{sol}	Solarer Reflexionsgrad

Im Bauwesen wird der mit AM 1,0 der gewichtete Absorptionsgrad und Reflexionsgrad und in der Solarindustrie wird mit AM 1,5 der gewichtete Absorptionsgrad und Reflexionsgrad berechnet [1].

Die Air-Mass-Zahl AM kann als „ein Maß für die relative Weglänge der direkten Sonnenstrahlung durch die Erdatmosphäre“ definiert werden [12].

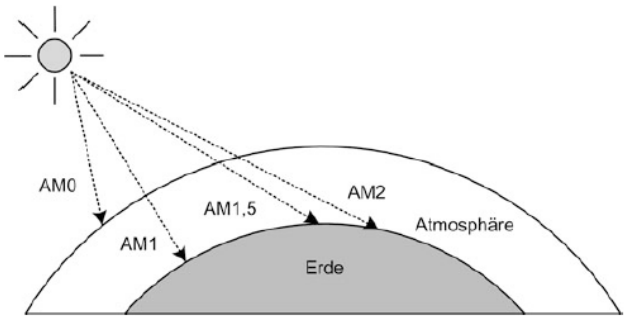


Abbildung 6: Erläuterung zum Terminus der Air-Mass-Zahl, aus Photovoltaik [12], Kapitel 2, s. 20

Die spektrale Strahlungsintensität außerhalb der Erdatmosphäre wird durch AM0 wiedergegeben. Wiederum zeigt AM1,0, dass die spektrale Strahlungsintensität durch die Erdatmosphäre senkrecht durchgeht. AMm wird auch auf der Abbildung 6 bei m-facher Weglänge im Vergleich zum senkrechten Durchgang dargestellt [12].

1.8 SRI-Wert, HBW und TSR-Wert

Der SRI-Wert (eng.: **s**olar **r**eflectance **i**ndex) ist ein Kennwert für Außenoberflächen der Gebäude. Er berücksichtigt sowohl den solaren Reflexionsgrad als auch den thermischen Emissionsgrad und kann Werte über 100 als auch negative Werte annehmen. Je höher der SRI-Wert ist, desto höher ist der solare Reflexionsgrad und desto geringer ist der solare Absorptionsgrad. Das bedeutet, dass sich mit dem steigenden SRI-Wert die Aufheizung der Außenoberfläche reduziert [13], [15].

Unter „Index des Reflexionsvermögens“ (SRI-Wert) wird verstanden:

> *„relative Temperatur einer Oberfläche in Bezug auf Standardweiß (SRI=100) und Standardschwarz (SRI=0) bei Normsonnenverhältnissen und Normumweltbedingungen.“, Auszug aus DIN EN 17190 [13], s.4.*

Der Hellbezugswert (HBW) beschreibt die Helligkeit einer Farbe im Vergleich zu dem Schwarzpunkt (HBW=0) und dem Weißpunkt (HBW=100). Der HBW berücksichtigt nur den sichtbaren Wellenlängenbereich, d.h. elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 – 780 nm und damit 43% der gesamten terrestrischen Solarstrahlung. Da für die thermische Aufheizung von Außenoberflächen der Gebäude die gesamte Sonnenstrahlung, die aus ca. 5% UV, ca. 43% sichtbarem Licht und 52% Infrarot besteht, berücksichtigt werden soll, gibt der Hellbezugswert über die Aufheizung der Oberflächen keine ausreichende Information [14].

Die Abkürzung „TSR“ (eng.: **t**otal **s**olar **r**eflectance) steht für den Grad der gesamten Solarstrahlung und beschreibt den solaren Reflexionsgrad einer pigmentierten Oberfläche. Er berücksichtigt die gesamte Solarstrahlung. Je größer der TSR-Wert ist, desto stärker wird die solare Strahlung reflektiert und desto geringer ist die thermische Aufheizung von Oberflächen (TSR = 100% totale Reflexion und TSR = 0 % totale Absorption) [14].

2 Herkömmliche und innovative Werkstoffe für Dächer und Dachsanierung

Die Kühlung von Dächern kann generell durch reflektierende Anstriche und Dichtungsbahnen durchgeführt und im Allgemeinen in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Dächer, hergestellt aus kühlenden Dachmaterialien
- Dächer, angestrichen mit reflektierenden Beschichtungen
- Gründächer

Heutzutage kommen verschiedene Dachmaterialien und Technologien für die Kühlung von Dächern zum Einsatz, in Abhängigkeit von Dachneigung, Dachform und Region.

Zum Eindecken der Dachflächen werden Dachziegel, Betondachsteine, Dachplatten, Wellplatten und Schieferplatten sowie Schindeln und Metall verwendet [15].

Im Zuge dessen wird

> *„zwischen Eindeckungen und Abdichtungen unterschieden. Ableitende Deckungen sind z. B. Ziegel-, Betondachstein- und Faserzementplattendeckungen. Sie bestehen aus einzelnen Elementen, die eine vorgeschriebene Mindestneigung haben müssen. Abdichtende Deckungen bestehen aus einer geschlossenen wasser- und luftdichten Dachhaut, z. B. aus geklebten bituminösen Dachbahnen, Kunststoffdachbahnen oder flüssigen Kunststoffen.“, Auszug aus Sanierung und Ausbau von Dächern [16], Kapitel 9, s.285.*

Dachabdichtungen werden heute entweder aus Kunststofffolien, Bitumenbahnen oder nahtlos als Flüssigabdichtung hergestellt [17].

2.1 Reflektierende Anstriche

Herkömmliche Anstriche und reflektierende Anstriche weisen im Vergleich ein unterschiedliches thermisches Verhalten bei gleicher Textur und gleichem Farbton auf. Aufgrund der Unterschiede in der Zusammensetzung der Anstriche verfügt die Außenoberfläche über einen anderen solaren Absorptionsgrad, der Wärmeströme durch kurzwellige Strahlung beeinflusst, und über einen unterschiedlichen thermischen Emissionsgrad, der für den Wärmestrom durch langwellige Wärmestrahlung an der Außenfläche wichtig ist [15].

Die kühlenden bzw. reflektierenden Anstriche können einerseits den Wärmekomfort der Räume verbessern sowie den Energieverbrauch der Klimaanlagen senken, andererseits können sie zur Reduktion des Wärmeinseleffekts führen. Dieser Wärmeinseleffekt ist ein typisches Phänomen des Stadtklimas und zeigt sich in Form einer Temperaturerhöhung in der Stadt gegenüber dem Umland bspw. aufgrund des hohen Absorptionsvermögens von Gebäudeoberflächen, des Verkehrs und anderweitigen Energieverbrauches.

Ca. 52% der gesamten Sonnenstrahlung, die das Erdreich erreicht, besteht aus IR-Strahlung. Deshalb liefert die IR-Strahlung einen hohen Beitrag zur Erwärmung der Außenoberflächen. Die absorbierte Sonnenstrahlung wird in Wärme umgewandelt. Im stationären Zustand stellt sich ein Gleichgewicht zwischen dem absorbierten und emittierten Wärmestrom an der Oberfläche ein.

Wie viel IR-Strahlung von einer angestrichenen Außenoberfläche absorbiert wird, ist von Pigmenten und der Bindemittelbasis abhängig. Das heißt, ein und dasselbe Pigment kann in einer unterschiedlichen Bindemittelbasis einen jeweils anderen solaren Reflexionsgrad aufweisen. Das verwendete Bindemittel soll im sichtbaren und im Infrarotbereich eine hohe Transparenz aufweisen, um eine reflektierende und rückstreuende Wirkung des Anstriches zuzulassen [18].

Die Teilchengrößenverteilung von Pigmenten beeinflusst die Streuung der elektromagnetischen Strahlung – diese kann mittels der Theorie von Mie beschrieben werden [18]. Kenntnisse über die Abhängigkeit der Streuung, die Absorption von Teilchengrößen und die Brechzahl der Pigmente beruhen auf den Ergebnissen dieser Theorie. Die mathematische und physikalische Beschreibung der Wechselwirkung von Licht mit dielektrischen Teilchen ist schwierig und würde, zur ausgiebigen Erläuterung, Ausführungen im Umfang eines ganzen Buches erfordern. Deshalb ist es sinnvoll, Vereinfachungen anzunehmen, um die Ergebnisse der Theorie speziell für die Pigmente anzupassen. Es wurden daher in [18] die damit zusammenhängenden Ergebnisse von Theorie Mie zusammengefasst, die sich wie folgt darstellen lassen:

> *„Teilchendurchmesser und die Wellenlänge verhalten sich der reflektierten Strahlung zueinander proportional. Der Proportionalitätsfaktor hängt hierbei von der Differenz der Brechungsindizes zwischen Pigment und Matrix ab. Nimmt also der Teilchendurchmesser zu, so wird auch Strahlung mit größerer Wellenlänge bevorzugt reflektiert. Kleinere Teilchen reflektieren kurzwellige Strahlung, wohingegen größere Partikel langwellige Strahlung effizienter reflektieren. Über die Partikelgröße lassen sich also die Streuungseigenschaften von Pigmenten entsprechend einstellen. Zwei chemisch identische Pigmente, die aber unterschiedliche Teilchengrößenverteilungen aufweisen, zeigen also eine*

unterschiedliche Wellenabhängigkeit ihrer Reflektion.“, Auszug aus Artikel „Schwarz und trotzdem Kalt“ [18], s.2.

Das hohe solare Reflexionsvermögen der weißen Anstriche ist hauptsächlich durch die Anwesenheit von bestimmten Pigmenten und transparente Polymere bedingt und liegt zwischen 0,7 – 0,85. Häufig gebrauchte Pigmente bilden dabei Titandioxid und Zinkdioxid [15]. Die Klassifikation und die Beschreibung der Pigmente findet sich in Kapitel 3.

Jede Farbe hat mehrere Farbtöne. Jeder Farbton wiederum besteht aus der Pigmentmischung, und jedes Pigment hat einen Einfluss auf die spektrale Verteilung des Reflexionsvermögens nach der Wellenlänge in einem Anstrich. Mit Hilfe der im Abschnitt 1.7 beschriebenen Verfahren lässt sich der solare Reflexionsgrad der Anstriche bestimmen.

Einer der wichtigsten Schritte zur Entwicklung eines IR reflektierenden Anstriches mit einem hohen solaren Reflexionsgrad war die Anwendung von Bindemitteln, die selbst keine oder nur eine gering IR-Strahlung absorbieren sollen. Aus diesem Grund wurde in [19] eine Untersuchung der farbigen Anstriche auf Basis von Acryl-Bindemitteln mit IR-reflektierenden und herkömmlichen Pigmenten durchgeführt, welche miteinander verglichen wurden. Unten in der Abbildung 7 sind ein Auszug aus [19] und einige zentrale Ergebnisse wiedergegeben. Diese Anstriche wurden auf einer Betonoberfläche aufgetragen:

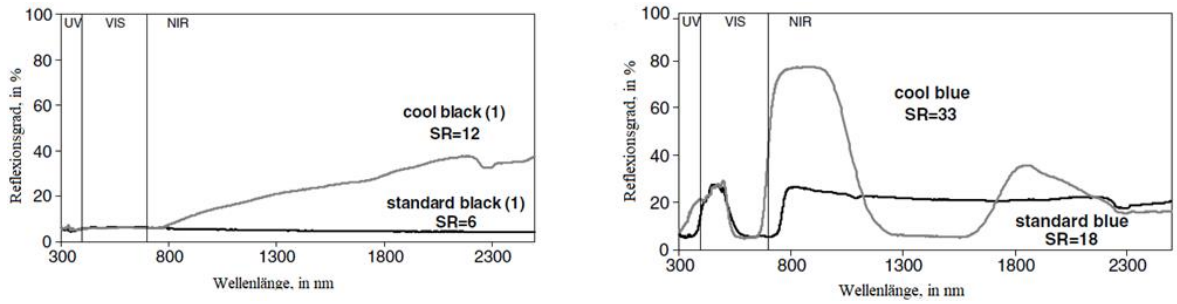


Abbildung 7: Reflektionsspektrum von IR reflektierenden und herkömmlichen Anstrichen auf Basis von Acryl-Bindemitteln, aus [19]

Die standardmäßigen und kühlenden schwarzen Anstriche haben ein ähnlich hohes Absorptionsvermögen im sichtbaren Bereich. Anbei lässt der kühlende Anstrich eine Erhöhung des Reflexionsvermögens im NIR-Bereich erkennen – der herkömmliche schwarze Anstrich zeigt demgegenüber einen stabil niedrigen Reflexionsgrad [19].

Die kühlenden und herkömmlichen blauen Anstriche verfügen über ein mäßiges Reflexionsvermögen im blauen Bereich des sichtbaren Lichtes und über eine starke Absorption im restlichen Bereich des sichtbaren Lichtes. Im NIR-Bereich hat der kühlende Anstrich einen höheren Reflexionsgrad im Wellenbereich von 700 bis 1000 nm, mit einem anschließenden starken Abfall des Reflexionsvermögens auf ca. 10 %, was somit einen

unerwünscht hohen Absorptionsgrad zwischen 1200 und 1600 nm ergibt. Der herkömmliche blaue Anstrich lässt einen mäßigen Reflexionsgrad im NIR-Bereich erkennen. Da keine genaue Beschreibung der Zusammensetzung der untersuchten Anstriche in [19] gegeben wurde, lässt sich nur sehr schwer festlegen, welches Pigment den Abfall des Reflexionsvermögens im NIR-Bereich beeinflusste.

Bei der Anwendung der farbigen Anstriche auf Basis von Acryl-Bindemitteln mit IR reflektierenden Pigmenten wird mehr NIR-Strahlung reflektiert. Dies kann die Temperatur der Außenoberfläche um mehr als 10℃ senken, was sich durch die farbigen Anstriche auf Basis von Acryl-Bindemitteln mit herkömmlichen Pigmenten ergibt [15].

Es gibt Beschichtungen, die neben dem kühlenden Effekt auch gute mechanische Eigenschaften und eine Wasserundurchlässigkeit aufweisen. Die polymermodifizierten, zementbasierten, wasserdichten Beschichtungen haben eine hohe Zugfestigkeit, eine gute Wasserbeständigkeit sowie eine feste Haftung. In [20] wurde eine solche Beschichtung betrachtet. Die kühlenden weißen Dachbeschichtungen auf Basis von Styrol-Acrylat-Copolymer und Zement können als Zwei-Komponenten-Beschichtung bezeichnet werden. Der wichtigste Bestandteil der flüssigen Komponente ist eine hochelastische Styrol-Acrylat-Copolymer-Emulsion. Die feste Komponente besteht aus Weißzement, Titandioxid, Altiris 800 Pigment, gemahlenem Kalziumkarbonat und Talkum. Aufgrund der Anwesenheit von Titandioxid und Altiris 800 Pigmenten haben solche Beschichtungen im Vergleich zu den polymermodifizierten, zementbasierten, wasserdichten Beschichtungen einen hohen solaren Reflexionsgrad, wodurch sie die Temperatur der Außenoberfläche erheblich senken können. Die kühlenden weißen Dachbeschichtungen auf der Basis von Styrol-Acrylat-Copolymer und Zement zeigen eine hohe Bruchdehnung auf, ebenso eine gute Zugfestigkeit und Wetterfestigkeit in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften [15].

2.2 Kühlende Dachziegel

Kühlende Dachziegel eignen sich zur Anwendung bei bestehenden und auch bei historischen Gebäuden. Geneigte Dächer aus keramischen Dachziegeln sind üblicherweise in der typischen ziegelroten Farbe gefertigt, welche einen niedrigen solaren Reflexionsgrad haben, was zur sommerlichen Überwärmung vom Gebäude führt. Die Anwendung der kühlenden Dachziegel auf keramischer Basis ermöglicht die Sanierung von historischen Gebäuden und auch eine Anpassung des Neubaus an das historische Umfeld in der Kombination mit den guten optischen Eigenschaften und der Lebensdauer [15].

Die keramischen Produkte zeichnen sich durch einen hohen thermischen Emissionsgrad und eine chemisch-physikalische Beständigkeit aus. Der Dachziegel kann in unterschiedlichen Farben und Oberflächen hergestellt werden. Es wird dabei zwischen

engobierten Dachziegeln, glasierten Dachziegeln und den Edelengoben (einer Kombination aus Engobe und Glasur) unterschieden.

In [21] wurde der Einfluss von Pigmenten auf den solaren Reflexionsgrad von Ziegeln auf keramischer Basis untersucht. Unten sind einige damit zusammenhängende Merkmale von [21] zusammengefasst.

Der keramische Ziegel wird normalerweise mittels eines dreischichtigen Aufbaus hergestellt, bestehend aus Untergrund – Engobe – Glasur. Diese Struktur ist genutzt worden, um einen kühlenden keramischen Ziegel zu entwickeln [21].

Es wurde festgelegt, dass die Herstellung eines Zweischicht-Systems notwendig ist, wenn der Untergrund NIR-Strahlung absorbiert. Die untere Schicht wird durch eine nahe Infrarot reflektierende Basisschicht dargestellt, die obere Schicht dagegen wird durch eine kühlende Dachschicht gebildet. Für die Analyse des Reflexionsvermögens der kühlenden Dachziegel wurde laut [21] eine typische Struktur von glasierten keramischen Dachziegeln herangezogen, bei der die untere Basisschicht aus der Engobe und die obere Schicht aus der keramischen Glasur besteht.

In diesem Fall wurde die Engobe auf der Basis von Zirkoniumsilikat ($ZiSiO_4$) verwendet, da $ZiSiO_4$ die Eigenschaft der Undurchsichtigkeit und eines guten solaren Reflexionsgrad gewährleistet. Die Glasuren der verschiedenen Zusammensetzungen wurden in Hinblick auf den Prozentanteil von Glanz- und Matt-Fritte betrachtet und bestehen aus Zirconium-Silikat, Carboxymethyl Cellulose und 3% oder 6% Pigmenten. 14 verschiedene Pigmente wurden gewählt und in vier Gruppen nach den Farben Schwarz, Rot, Grün und Gelb eingeteilt. Die vorbereiteten Glasuren wurden mit 50 Gew. % Wasser und Aluminiumoxid Mahlkörper mit unterschiedlichem Durchmesser gesintert. Danach wurde eine 300 μm Glasurschicht auf die engobierten Dachziegel aufgetragen. Im Anschluss an alle notwendigen Herstellungsprozesse wurden bei jeder Probe mit Hilfe eines UV-Vis-NIR-Spektrophotometers die Reflexionsspektren im solaren Spektralbereich gemessen und der solare Reflexionsgrad nach der Norm berechnet [21].

In [21] wurde eine ausführliche Analyse von 112 Proben durchgeführt. Im Allgemeinen kann man schließen, dass alle Proben einen hohen Reflexionsgrad im Infrarotbereich aufgrund des Vorhandenseins der Engobe-Schicht unter der Glasuren-Schicht aufweisen. Interessanterweise aber hat eine Probe aus der gelben Farbgruppe (Abbildung 8) im Vergleich zu den anderen Farbgruppen den höchsten Reflexionsgrad, auch im sichtbaren Bereich, was mit der chemischen Zusammensetzung von Pigmenten (55% von ZrO_2) verbunden ist. Die Anwesenheit des Pigments CoO in der Zusammensetzung der Glasuren führt zur Erhöhung des Absorptionsvermögens und folglich zur Senkung des Reflexionsvermögens im Infrarotbereich, im Wellenlängenbereich von 1000 bis 1800 nm. Daraus lässt sich das niedrige Reflexionsvermögen der Proben aus der schwarzen

Farbgruppe (Abbildung 9) erklären. In einigen Proben von M3_G2 und M6_G2 aus der Farbgruppe Grün kann ein sehr niedriges Reflexionsvermögen im IR-Bereich aufgrund des hohen Anteils von Kobaltoxid CoO (21%) gefunden werden (Abbildung 10). Daraus folgt, dass durch bestimmte Pigmente der solare Reflexionsgrad beeinflusst wird. Bei Anwesenheit von ZrO_2 und Cr_2O_3 steigt der solare Reflexionsgrad, mit CoO und Fe_2O_3 nimmt dieser dagegen ab. Die matte Oberfläche kann einen höheren solaren Reflexionsgrad erzielen als die glänzende Oberfläche.

In den Abbildungen 8 - 10 sind zur besseren Anschaulichkeit 4 von 16 Diagrammen aus dem Artikel [21] dargestellt. In diesen Abbildungen ist die spektrale Reflexion im solaren Spektralbereich ersichtlich:

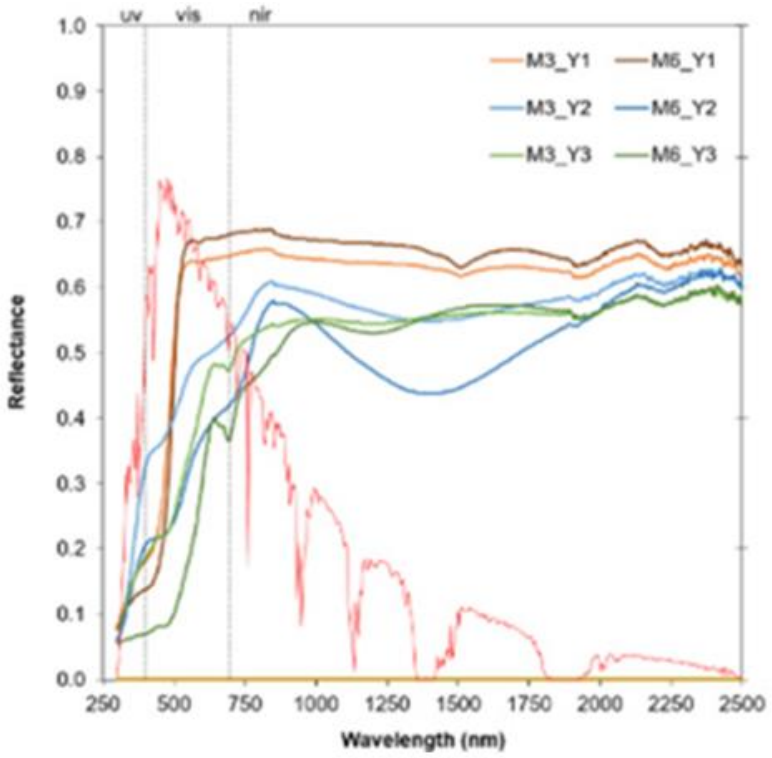


Abbildung 8: Probe mit matter Oberfläche mit Y1 … Y4 Pigmenten aus der Gelben Farbgruppe, aus [21]

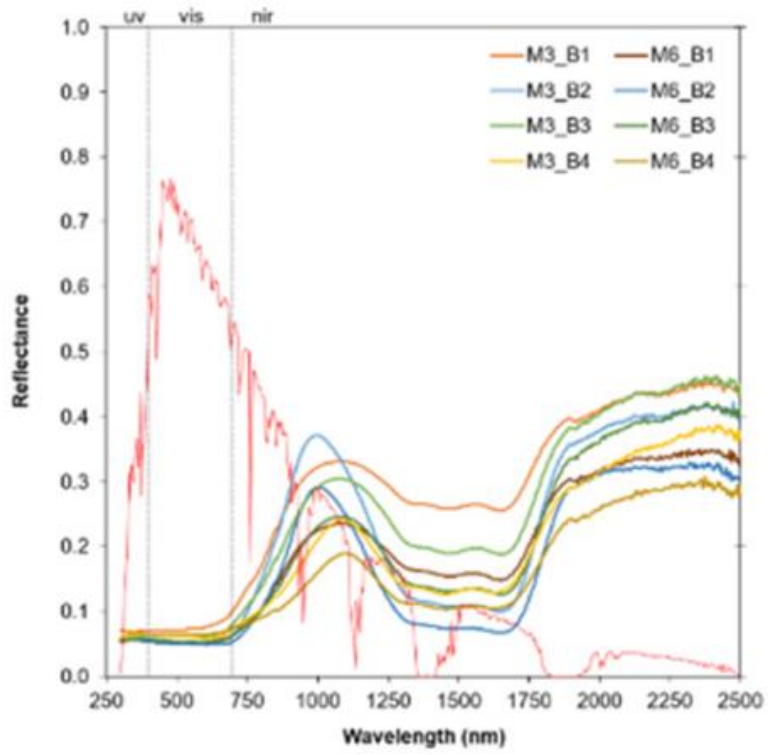


Abbildung 9: Probe mit matter Oberfläche und mit B1 … B4 Pigmenten aus der Schwarzen Farbgruppe, aus [21]

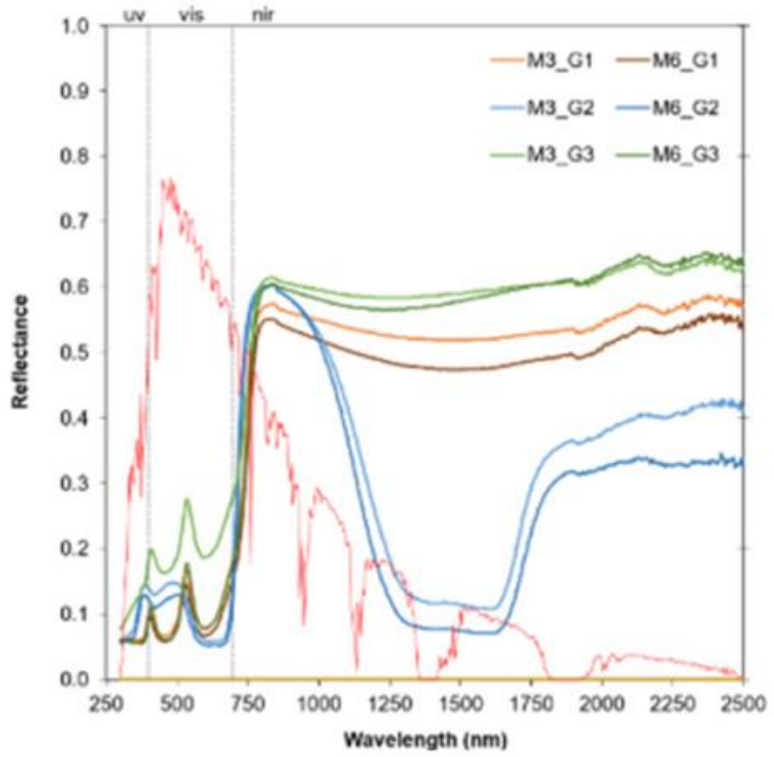


Abbildung 10: Probe mit matter Oberfläche und mit G1 … G4 Pigmenten aus der Grünen Farbgruppe, aus [21]

2.3 Kühlende wasserdichte Membranen

Kühlende wasserdichte Membranen sind gleichfalls eine Möglichkeit, den solaren Reflexionsgrad zu erhöhen und folglich das Kühlpotenzial zu verbessern.

Es wurde belegt, dass die innovativen kühlenden Membranen zur Optimierung der Energieeffizienz von Gebäuden ganzjährig um bis zu 19,3% führen können. Die innovativen wasserfesten Membranen auf Polyurethan-Basis wurden vor und nach ihrer Optimierung mit Titandioxid und keramischen Mikrohohlkugeln im Labor und im Feld experimentell getestet. Der solare Reflexionsgrad liegt in diesem Fall zwischen ca. 80,7 ÷ 85,4% im Vergleich zu den herkömmlichen dunkleren Membranen, die über einen solaren Reflexionsgrad von ca. 26% verfügen [15].

In anderen Studien wurde nach [15] eine innovative weiße Membran auf Basis von Mischmetalloxidpigmente (=Mixed metal oxide (MMO) pigments) wie CoAl, FeCr, NiSbTi untersucht, die einen NIR solaren Reflexionsgrad (Nah-Infrarot-Reflexion) hat, der im Vergleich zu den herkömmlichen dunkleren Membranen um 40% höher ist. Mittels Zugabe der Mischmetalloxidpigmente wurde die globale SRI um 26 % verbessert, ohne Einfluss auf den thermischen Emissionsgrad.

2.4 Natürliche Werkstoffe

Eine andere Art von kühlenden Materialien sind natürliche Werkstoffe. Eine der natürlichen Dachbeschichtungen für Flachdächer ist die Kiesschicht, die im Mittelmeerraum angetroffen werden kann [15]. Eine Kiesschicht wird einfach auf der bituminösen Dichtungsbahn aufgeschüttet. Sie dient als Schutz vor UV-Strahlung und Hitze für die Abdichtungsbahn und verlangsamt damit ihre Alterung. Die Albedo nimmt mit den sinkenden Korngrößen zu. Das passive Kühlpotenzial hängt von den verschiedenen Arten von Kies ab.

2.5 Kunststoff

Typische Materialien für Kunststoffabdichtungen [15] sind:

- EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer/ Ethylene-Propylenediene-Tetrolymer Membrane)
- Polyvinylchlorid (PVC)
- Thermoplastic Polyolefin (TPO)
- Chlorinated Polyethylene (CPE)

- Chlorosulfonated Polyethylene (CPSE)

Tabelle 3: Materialien für Kunststoffdachbahnen, aus [17], s.44

Kurzbezeichnung	**Namen**	
EPDM	Ethylene-Propylene-Dien-Tetrolymer	Elastomer
PVC	Polyvinylchlorid	Thermoplast
TPE	Thermoplastische Elastomere	Elastomer
CSPE	Chloro Sulfonated Poly Ethylene	Elastomer

Die EPDM-Dichtungsbahn ist ein folienförmiger Baustoff aus Ethylen-Propylen-Dien-Monomer-Kautschuk und gehört zu den beliebtesten Kunststoff-Dichtungsbahnen für Flachdächer. Seit 1960 werden diese Dichtungsbahnen als Dachabdichtung in den USA verwendet. EPDM-Dichtungsbahnen zeichnen sich durch eine sehr gute Ozon- und UV-Beständigkeit sowie Alterungseigenschaften aus. Sie haben eine gute Beständigkeit gegen einige Säuren und Lösemittel, der Kontakt mit tierischen und pflanzlichen Ölen und Fetten sowie Produkten auf Basis von Petroleum jedoch soll vermeiden werden [23].

PVC-Polymers (PVC) wurde ursprünglich seit dem 1950er-Jahren in Deutschland produziert (ECRC, Guide Cool Roofing). Heute werden PVC-Dichtungsbahnen mit einem Polyester-Weichmacher eingesetzt. Polyester-Weichmacher sind stabil und ermöglichen die Herstellung von bitumen- und ölbeständigen PVC-Bahnen [17].

TPO (Thermoplatische Elastomere auf Olefinbasis) bestehen aus einer Hochpolymerlegierung von Polypropylen mit dem Ausgangsstoff Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) (Flachdach, Anton Pech). Sie haben gute physikalische Eigenschaften im Hinblick auf Thermische Alterung, Kälteflexibilität, Reiß- und Durchstoßfestigkeit. Zudem sind sie gegen tierische Fette, pflanzliche Öle und Kohlenwasserstoffe beständig [23].

Chloro Sulfonated Poly Ethylene (CSPE) ist das teuerste Material für Kunststoff-Dachbahnen. Es bietet eine gute Witterungsbeständigkeit, hohen Brandwiderstand und Dauerhaftigkeit [23].

2.6 Bituminöse Stoffe

Bitumenabdichtungen haben die längste Bautradition. Der Werkstoff Bitumen entwickelte sich vom reinen Oxidationsbitumen zum kunststoffmodifizierten Polymerbitumen. Folgende bituminöse Abdichtungsbahnen lassen sich finden: Polymerbitumen, Plastomerbitumen, Elastomerbitumen.

Zu Polymerbitumen gehören

> *„physikalische Gemische oder Reaktionsprodukte von Bitumen und Polymer-Systemen (Kunststoffen) oder Reaktionsprodukte zwischen Bitumen und Polymeren (Kunststoffen).“, Auszug aus Flachdach [17], Kapitel 090.2, s.49.*

Plastomerbitumen entstehen dadurch, dass weicher Destillationsbitumen mit ataktischem Polypropylen (PPa) gemischt wird, was dazu führt,

> *„dass sich das Bitumen bei geringfügigen Belastungen elastisch verhält, bei steigenden Temperaturen sowie bei höherer Belastung sich jedoch wieder die plastischen Eigenschaften des Bitumens einstellen. Die Vorteile von Plastomerbitumen liegen in der sehr guten Wärmebeständigkeit von ca. 140° C und der guten Alterungsbeständigkeit. Die Kälteflexibilität ist gut, erreicht aber nicht die Werte von Elastomerbitumen. Plastomerbitumen sollte nicht in direkten Kontakt mit oxidiertem Bitumen gebracht werden, da chemische Unverträglichkeiten nicht auszuschließen sind.“, Auszug aus Flachdach [17], Kapitel 090.2, s.49.*

Elastomerbitumen: Styren-Butadiene-Styren-Bitumen (SBS-Bitumen) stellt ein Gemisch aus unvernetzten SBS-Ketten mit weichem Destillationsbitumen dar.

> *„Mit zunehmendem SBS-Anteil bekommt das Bitumen ein kautschukartiges Verhalten. Die Mischung reagiert im unteren Belastungsbereich zunehmend elastisch, Dehnfähigkeit und Alterungsbeständigkeit nehmen zu. Die Elastomerbitumendeckmasse kann die Wärmebewegungen der Dachkonstruktion mitmachen. Außerdem bewirkt die Elastizität eine weitgehende Unempfindlichkeit gegen mechanische Einwirkungen, da sich die dabei auftretenden Eindrückungen wieder zurückbilden. Als weitere Vorteile von Elastomerbitumen können die extrem gute Kälteflexibilität von -20° C und noch tiefer sowie eine ausreichende Wärmebeständigkeit von über 110° C genannt werden.“, Auszug aus Flachdach [17], Kapitel 090-2, s.49-50.*

2.7 Flüssigabdichtung

Flüssigabdichtungen setzen sich aus in Eimergebinden oder Containern angelieferten Reaktionsharzen zusammen, welche häufig

> *„durch Zugabe von Härtern zu elastischen Massen polymerisieren, wobei in der Regel noch Trägerlagen eingearbeitet werden. Die Eigenschaften der Flüssigkunststoffe ergeben sich aus Art, Menge und Beschaffenheit der Bestandteile. Vorteilhaft ist die Flexibilität beim Anarbeiten an aufgehende Bauteile und die gute Haftung auf der Mehrzahl aller baupraktisch vorhandenen Untergründe.“, Auszug aus Flachdach [17], Kapitel 090-2, s.47.*

Beispiele dafür sind:

- Polyurethane (PU und PUR)
- Acrylate (AY) und Metacrylat-Harze (MMA)
- Ungesättigte Polyester (UP)
- Epoxidharze (EP)

2.8 Metalle

Metalle sind als Werkstoff für die Sanierung von Dachbauteilen von hoher Bedeutung:

> *„Wichtige Einsatzgebiete sowohl mit Metallen als auch mit NE-Metallen sind Rinnen und Abflüsse, Gaupen, Einfassungen Fanggitter bis hin zu kompletten Metalldacheindeckungen.“, Auszug aus Sanierung und Ausbau von Dächern [16], Kapitel 5, s.180.*

Ein metallisches Dach wird typischerweise aus verzinktem Stahl oder Aluminium herstellt. Es hat eine aufgetragene Beschichtung zum Zwecke der Korrosionsbeständigkeit. Stahl galvanisiert üblicherweise entweder mit Zink oder mit Zink/Aluminium, bevor es angestrichen wird. Bei Bandbeschichtungsverfahren wird ein Beschichtungsstoff kontinuierlich auf ein Metallband aufgetragen [23].

Metalldächer haben nachstehend angeführte Vorteile:

- *„Metalldächer widersprechen hohen Temperaturwechselbeanspruchungen [von] + 35 bis 20 Grad.*
- *Eine herkömmliche Dacheindeckung ist etwa 20-mal so dick.*

- *Kupfer- oder Aluminiumdächer können nicht rosten, sie überziehen sich selbst mit einer Schutzschicht.*
- *Sie weisen trotz enormer Materialfestigkeit eine gute Verformbarkeit auf, so dass auch Gauben und Luken, aber auch Ecken und Kanten und Rundungen eines alten Dachs/Dachstuhls formgetreu gedeckt werden können.", Auszug aus Sanierung und Ausbau von Dächern [16], Kapitel 9, s.345.*

2.9 Die künstliche und natürliche Alterung von herkömmlichen und reflektierenden Beschichtungen

Die meisten kühlenden Dachbeschichtungen und Fassadenoberflächen haben ein hohes solares Reflexionsvermögen, das sich unter dem Einfluss der Witterung und Verschmutzungen durch die Zeit vermindert. Zu Verschmutzungsvorgängen gehört die Ablagerung von Ruß, Staub und anderen Partikeln (organisch, anorganisch) sowie die mikrobiologische Einwirkung. Unter die wichtigsten Einflussfaktoren der Witterung fallen Feuchtigkeit, UV-Strahlung und der Tag/Nacht-Temperaturunterschied. Eine Degradation bewirkt die Änderung der chemischen Zusammensetzung der Materialien, was zur irreversiblen Änderung des solaren Reflexionsgrades führt. Es kann einige Jahre dauern, bevor eine herkömmliche oder eine reflektierende Dach- und/oder Fassadenbeschichtung einen quasistationären Reflexionsgrad erreicht, welcher der saisonalen Niederschlagsvariabilität, der Luftverschmutzung sowie der physikalischen und der chemischen Änderung der verwendeten Materialien angepasst wird [22].

In der Stadt, wo die Luftverschmutzung erheblich höher als in ländlichen Gebieten ist, sind die Oberflächen von Gebäuden Verschmutzungsvorgängen stärker unterworfen, was zur stärkeren Beeinflussung des solaren Reflexionsgrad führt [24].

Im Artikel [22] wurde eine Methode für die beschleunigte Alterung der Oberfläche entwickelt und vorgeschlagen. In einem Labor wurden Klima- und Verschmutzungsbedingungen für drei Stadtorte hergestellt, die auf der Dach-/ Fassadenoberfläche in der Realität einwirken können. Diese Labormethode basiert darauf, alle diese Prozesse bzw. die natürliche Einwirkung statt in drei Jahren schon innerhalb weniger Tage zu durchlaufen. Das Ziel der Methode ist, die Bewertung der Alterung der neuen Dachbeschichtungen zu beschleunigen.

Laut [22] der Bewertung der Ergebnisse im Vergleich zwischen der natürlichen Alterung und der beschleunigten Alterungsprüfung hinsichtlich der Typen der Materialien ist zu sehen, dass der größte Unterschied sich für die modifizierte bituminöse Dichtungsbahn ergibt. Dies kann dadurch bedingt sein, dass im Labor nicht alle Prozessvorgänge wie Verschmutzungen durch Mikroorganismen und physikalisch-chemische Veränderungen, die auf einer Oberfläche in der Realität entstehen, modelliert und simuliert werden können.

Die Methode für die beschleunigte Alterung der Oberfläche ist eine Kombination aus Verschmutzungsvorgängen und Verwitterung sowie eine Simulation von Jahren von Außenbewitterung im Laufe von nur drei Tagen. 42 Tage der beschleunigten Prüfung im Labor entsprechen ungefähr einem Jahr Sonnenschein in Florida [22].

In der Abbildung 11 sind mit Hilfe der laboratorischen Methode die durchschnittlichen absoluten Verluste im Hinblick auf den solaren Reflexionsgrad für die verschiedenen Cool-Roof-Produkte für drei Städte in den USA unter dem Einfluss der Wetterbedingungen und Verschmutzung mit und ohne Verwitterung nach der Verschmutzung dargestellt. Mit Hilfe eines QUV-Weatherometers wurde eine beschleunigte Simulation von Wetterbedingungen durchgeführt. Das QUV-Gerät testet Materialien, indem es diese bei hohen Temperaturen alternierenden Zyklen von UV-Licht und Feuchtigkeit aussetzt. In wenigen Tagen oder Wochen kann der QUV-Tester die Auswirkung reproduzieren, die während Monaten oder Jahren im Freien entstehen [22]:

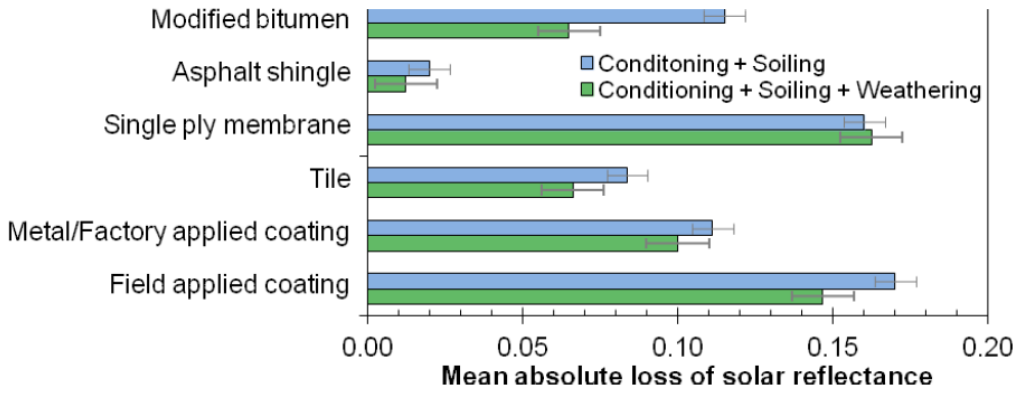


Abbildung 11: Mittlere absolute Verluste im Hinblick auf den solaren Reflexionsgrad durch die Zeit, aus [22]

Ein Bewitterungsschritt nach der Verschmutzung bei der beschleunigten Simulation wurde durchgeführt, um die Auswirkung von UV-Licht, Regen und Feuchtigkeit auf die getesteten Proben abzuschätzen. Nach einem Tag Simulation im QUV-Gerät wurden die Verschmutzungen von der Testoberfläche teilweise entfernt, was zu geringeren Verlusten in Bezug auf den solaren Reflexionsgrad führte. Die Verlängerung der Verwitterungsdauer machte erkennbar, dass für die Simulation der natürlichen Reinigung eine lange Verwitterungsdauer nicht erforderlich ist, weil die leicht entfernten Verschmutzungen bei der beschleunigten Simulation in einem Tag schon entfernt wurden. Bei der verlängerten Simulation ließen nur zwei Arten von Materialien eine Änderung des solaren Reflexionsgrades erkennen: modifiziertes Bitumen und eine flüssig aufgetragene Beschichtung. Diese Materialien sind empfindlich gegenüber Bewitterung im QUV-Gerät aufgrund der schlechten Stabilität der Polymerbeschichtung, was zu den merklichen Verlusten im Hinblick auf den solaren Reflexionsgrad führte [22].

In [25] wurde die natürliche Alterung der reflektierenden und herkömmlichen Anstriche betrachtet.

In [25] wurden in Brasilien (São Carlos) 20 verschiedenen Anstriche auf Basis von Acryl-Bindemittel unter Einfluss der natürlichen Wetterbedingungen im Laufe von 18 Monaten untersucht. São Carlos hat eine milde Witterung mit einem heißen und regnerischen Sommer und mit einem kalten und trockenen Winter. Die durchschnittliche Temperatur liegt zwischen 12 bis 27℃.

12 keramische Proben waren mit herkömmlichen Anstrichen beschichtet, wovon nur eine Probe keramische Mikrokügelchen in der Zusammensetzung hat und 8 keramische Proben mit den kühlenden Anstrichen beschichtet waren. Das Ziel war die Bewertung der Änderung des solaren Reflexionsgrades. Es wurde eine fast horizontale Orientation der Proben (Neigung 8°) gewählt, um die maximale Verschmutzung der Oberflächen zu erreichen. Herangezogen wurde eine glatte Oberfläche für die keramische Probe, um die Wirkung der Rauheit zu vermeiden, denn eine rauhe Oberfläche bewirkt eine diffuse Strahlung [25].

Vor dem Versuch wurde der Reflexionsgrad von allen angestrichenen Proben im Labor gemessen. Um daraufhin die natürliche Alterung durch Verwitterung und Verschmutzung einzuschätzen, wurden alle angestrichenen Probe im Freien unter natürlichen Wetterbedingungen getestet, wobei die Verluste des solaren Reflexionsgrades in allen 3 Monaten im Freien abgemessen wurden [25].

In der Tabelle 4 ist der Abfall oder die Zunahme des solaren Reflexionsgrades in 18 Monaten nur für einige Anstriche zusammengefasst und dargestellt:

Tabelle 4: Änderung des solaren Reflexionsgrades durch die Zeit

Farbe	**Probenbezeichnung**	**Solarer Reflexionsgrad in 18 Monaten, in %**			
		Reflektierende Anstriche		**Herkömmliche Anstriche**	
		Verluste	**Zunahme**	**Verluste**	**Zunahme**
Weiß	Acryl-Elastomere Beschichtung	k.Info	k.Info	27,9	0,0
Weiß	Styrol Acryl Beschichtung	26,9	0,0	k.Info	k.Info
Weiß	Acryl-Elastomere Beschichtung mit keramischen Mikrokügelchen	20,1	0,0	k.Info	k.Info
Weißer Sand	Acryl-Elastomere Beschichtung	17,3	0,0	16,5	0,0

Farbe	Probenbezeichnung	Solarer Reflexionsgrad in 18 Monaten, in %			
		Reflektierende Anstriche		Herkömmliche Anstriche	
		Verluste	Zunahme	Verluste	Zunahme
Sand	Acryl-Elastomere Beschichtung	14,0	0,0	12,1	0,0
Rot	Acryl-Elastomere Beschichtung	6,7	0,0	10,3	0,0
Dunkelgrün	Acryl-Elastomere Beschichtung	k.Info	k.Info	0,0	0,9
Schwarz	Acryl-Elastomere Beschichtung	k.Info	k.Info	0,0	1,0

Nach [25] zeigten 18 von 20 getesteten Proben Verluste beim solaren Reflexionsgrad in 18 Monaten – zwei Proben von der schwarzen und der dunkelgrünen Farbe wiesen einen Anstieg des solaren Reflexionsgrades um 1,0 und 0,9 % auf. Der Einfluss der UV-Strahlung ist signifikant im Hinblick auf die dunkle Farbe. Deshalb sind dunkle Farben durch die UV-Strahlung der Degradation stärker ausgesetzt. Demgegenüber ist der Anstieg des solaren Reflexionsgrades dadurch bedingt, dass angesammelte Staubpartikel auf der Außenoberfläche stärker reflektierend als auf einer reinen schwarzen Oberfläche.

Beim Vergleich der Proben, die in einer gleich hellen Farbe – „White Sand“ und „Sand“ – angestrichen wurden, ließ sich erkennen, dass die reflektierenden Anstriche bei der hellen Farbe höhere Verluste im Hinblick auf den solaren Reflexionsgrad im Vergleich zu den herkömmlichen Anstrichen in der gleiche Farbe aufweisen. Dagegen lässt die Probe, die mit der Farbe „Red“ angestrichen wurde, beim reflektierenden Anstrich weniger Verluste hinsichtlich des solaren Reflexionsgrades als der herkömmliche Anstrich in der gleichen Farbe „Rot“ erkennen. Die Verluste in Bezug auf den solaren Reflexionsgrad waren bei den weißen Farben sowohl für die reflektierenden Anstriche als auch für die herkömmlichen Anstriche am höchsten im Vergleich zu den anderen Farben. Die dunklen Anstriche lassen einen deutlichen Abfall des solaren Reflexionsgrades im IR-Bereich erkennen, welcher im sichtbaren Bereich nur schwach ausgeprägt ist. Die weißen und hellen Anstriche dagegen zeigen einen merklichen Abfall des solaren Reflexionsgrades im sichtbaren und im IR-Bereich [25].

Die Wetterbedingungen und Verschmutzungen wie Staub- und Rußablagerung und das biologische Wachstum haben den größten Einfluss auf die Verluste hinsichtlich des solaren Reflexionsgrades. Diese Verluste sind in erster Linie auf weißer und heller Oberfläche erheblich. Trotz der höheren Verluste des solaren Reflexionsgrades durch die Zeit, wie sie bei weißen und hellen Oberflächen gefunden werden können, bleibt der solare

Reflexionsgrad dennoch erheblich höher als für die dunklen und die schwarzen Beschichtungen, siehe Abbildungen 12 - 15 [25].

Zur Veranschaulichung der Änderung der spektralen Verteilung der Reflexion nach der Wellenlänge durch die Alterung wurden einige Abbildungen aus [25] herangezogen und in den Abbildungen 12 - 14 wiedergegeben:

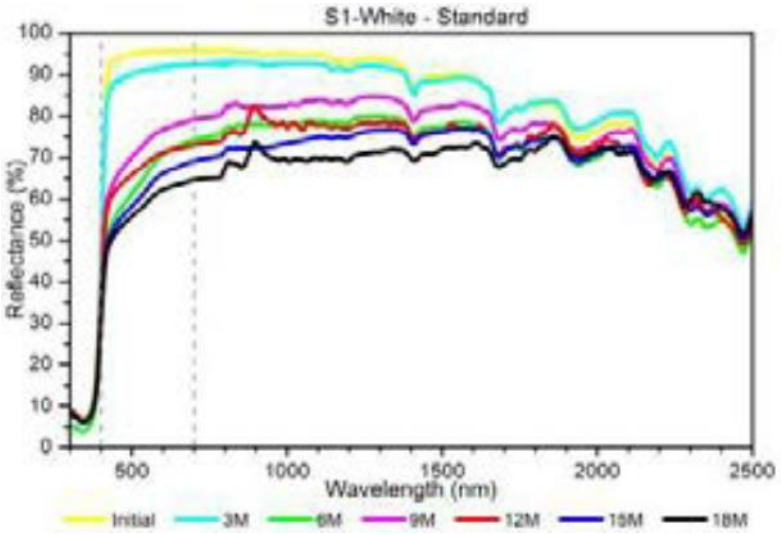


Abbildung 12: Die spektrale Reflexion der angestrichenen Proben beim weißen herkömmlichen Anstrich im Ausgangszustand, in 3, 6, 9, 12, 15 und 18 Monaten der natürlichen Alterung, aus [25]

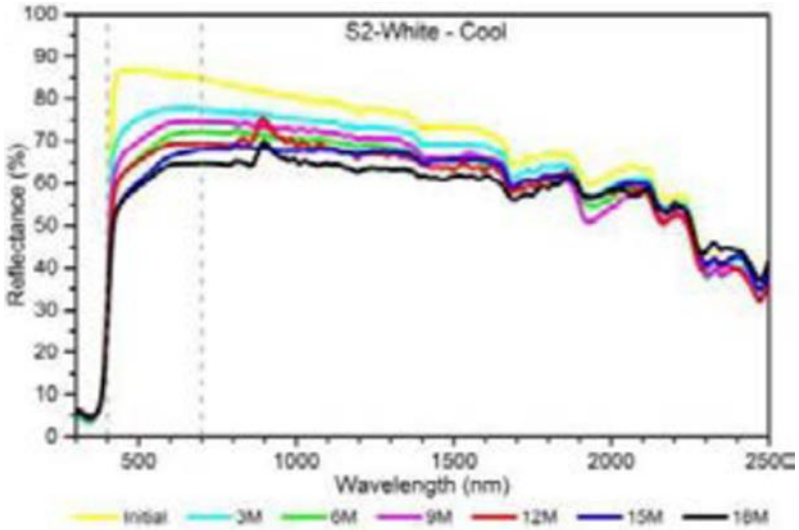


Abbildung 13: Die spektrale Reflexion der angestrichenen Proben beim weißen reflektierenden Anstrich im Ausgangszustand, in 3, 6, 9, 12, 15 und 18 Monaten der natürlichen Alterung, aus [25]

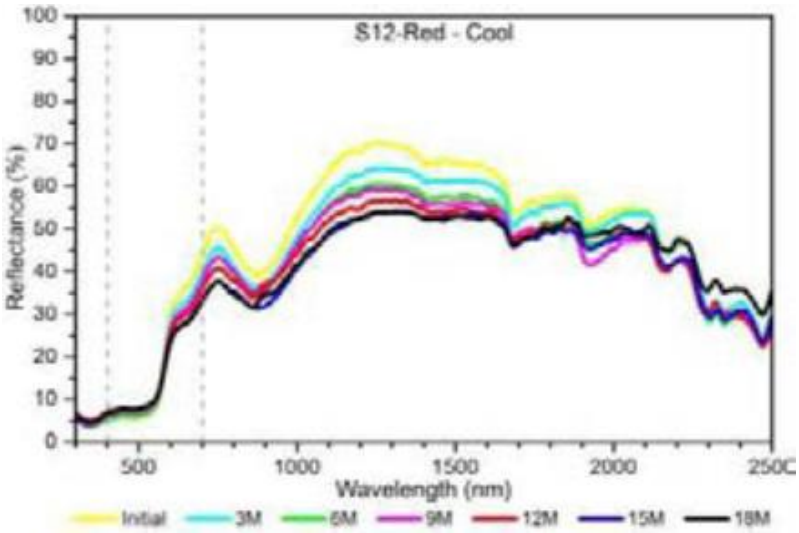


Abbildung 14: Die spektrale Reflexion der angestrichenen Proben beim roten reflektierenden Anstrich im Ausgangszustand, in 3, 6, 9, 12, 15 und 18 Monaten der natürlichen Alterung, aus [25]

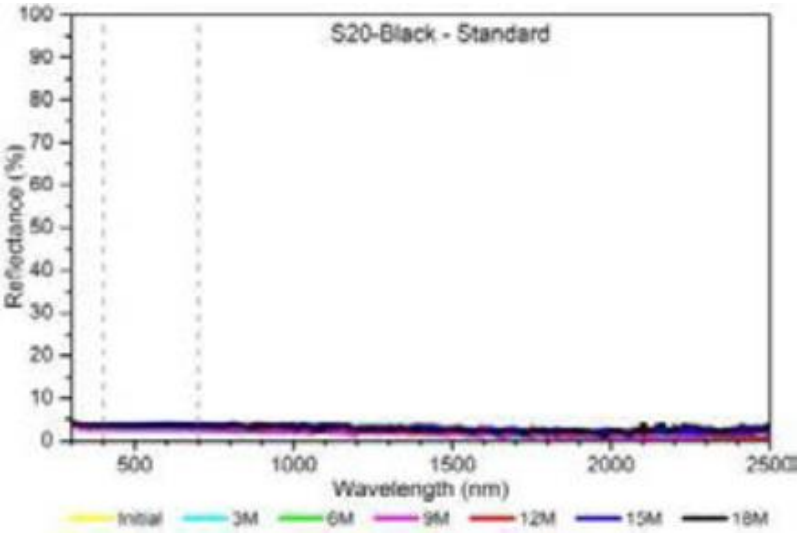


Abbildung 15: Die spektrale Reflexion der angestrichenen Proben beim schwarzen herkömmlichen Anstrich im Ausgangszustand, in 3, 6, 9, 12, 15 und 18 Monaten der natürlichen Alterung, aus [25]

2.10 Datenbanken für die kühlenden Produkte

Derzeit stehen nur wenige Daten für die Bewertung der kühlenden Dachprodukte zur Verfügung, auch finden sich nur kurze Forschungsuntersuchungen, sodass ein umfassender Überblick über dieses Thema noch fehlt. Die meisten Forschungen stammen aus den USA und wurden in amerikanischen Städten und unter den dortigen Klimabedingungen durchgeführt, wobei Datenbanken erstellt wurden.

Die kühlenden Materialien lassen sich folgenderweise gliedern [26]:

- Europa
  - Cool Roofs Europe
- USA
  - CRRC (Cool Roof Rating Council)
  - Energy Star
  - LEED (Leadership in Environmental & Energy Design)

2.10.1 ECRC (European Cool Roofs Council)

Die nicht-kommerzielle Europäische Vereinigung ECRC wurde im Jahr 2011 gegründet. Das Ziel ist die Entwicklung von wissenschaftlichen Kenntnissen und die Erforschung von „Cool-Roof“-Technologien sowie die Ausbreitung der Anwendung der „Cool-Roof“-Produkte und Materialien in Europa, einschließlich der Entwicklung eines Programmes für eine damit zusammenhängende Produkt- und Materialbewertung [27].

Das ECRC ist ein unabhängiges Produkt-Rating-Programm (Produkteinstufungsprogramm), das dem Zweck dient, die Strahlungseigenschaften der Oberflächenschicht der Dachprodukte zu bewerten. Die im Rahmen dieses Programms bewerteten Produkte erhalten ein ECRC-Label und sind in der ECRC-Rated-Produkt-Datenbank veröffentlicht. Jedes Bedachungsprodukt kann gemäß den technischen Anforderungen und den festgelegten Anforderungen des ECRC-Product-Rating-Programms getestet werden [27]. Das ECRC-Produktbewertungsprogramm legt keine Mindest- oder Sollwerte für die Strahlungseigenschaften fest, siehe Abbildung 16:

Pr. id	Brand	Product Type	Init. Solar	Init. Thermal	Init. SRI	Aged Solar	Aged Thermal	Aged (SRI)	Slope	Colors	Notes
FA00000014	**Sika SolaRoof MTC 15**	Field-Applied Coating	0.85	0.90	107	0.00	0.00	0	All Products	White	3-year aged SRI value of 87 according to CRRC

Abbildung 16: Screenshot von der Homepage „Product Rating Database“ für eine kühlende Dachbeschichtung [27]

Im „Guide Cool Roofing Materials“ [23] aus dem Jahr 2012 sind ein Vergleich der herkömmlichen und der kühlenden Dächer nach dem solaren Reflexionsgrad und nach dem thermischen Emissionsgrad dargestellt, siehe Tabelle 5:

Tabelle 5: Der solare Reflexionsgrad und der IR-Emissionsgrad für herkömmliche und kühlende Dächer, aus [23]

Herkömmliche Dächer			**Kühlende Dächer**		
Typen der Dachdeckung	**Solarer Refl.grad**	**Emissivität**	**Typen der Dachdeckung**	**Solarer Refl.grad**	**Emissivität**
Bituminöse Dichtungsbahn mit dunklem Kies	0,08-0,15	0,80-0,90	**Bituminöse Dichtungsbahn** mit grauweißem Kies und/oder zementöser Beschichtung	0,50-0,70	0,80-0,90
PVC-Dachbahnen Schwarz	0,04-0,05	0,80-0,90	**PVC-Dachbahnen** Weiß	0,70-0,78	0,80-0,90
PVC-Dachbahnen Schwarz	0,04-0,05	0,80-0,90	**PVC-Dachbahnen** mit reflektierendem Anstrich	0,30-0,80	0,80-0,90
Polymerbitumenbahnen • **Elastomerbitumen-Dachbahnen (mit Elastomeren wie SBS)** mit mineralischem Oberflächensch	0,10-0,20	0,80-0,90	**Polymerbitumenbahnen** • **Elastomerbitumen-Dachbahnen (mit Elastomeren wie SBS)** mit weißer Beschichtung auf	0,60-0,75	0,80-0,90

Herkömmliche Dächer			Kühlende Dächer		
Typen der Dachdeckung	**Solarer Refl.grad**	**Emissivität**	**Typen der Dachdeckung**	**Solarer Refl.grad**	**Emissivität**
utz • **Plastomerbitumen-Dachbahnen (mit Plastomeren wie APP)** mit mineralischem Oberflächenschutz			mineralischem Oberflächenschutz • **Plastomerbitumen-Dachbahnen (mit Plastomeren wie APP)** mit weißer Beschichtung auf mineralischem Oberflächenschutz		
Dunkle Dachziegel mit konventionellen Pigmenten	0,05-0,35	0,80-0,90	**Kühlende Dachziegel** mit reflektierenden Pigmenten	0,40-0,65	0,80-0,90
Metallwellblech, keine reflektierenden Anstriche	0,30-0,50	0,05-0,30	**Metallwellblech** mit farbigem reflektierendem Anstrich	0,05-0,80	0,80-0,90

2.10.2 CRRC (Cool Roof Rating Council)

Die nicht-kommerzielle amerikanische Organisation CRRC wurde im Jahr 1998 gegründet und dient der Umsetzung und Kommunikation von Energieabstrahlungswerten von Dachflächen, mit dem Ziel der Unterstützung von Forschungen und des Sammelns von Informationen zu den Produkten aus dem Bedachungsbereich [28].

In der CRRC (USE) wurden mehr als 3000 Cool-Roof-Dachbahnen und reflektierende Beschichtungen für drei Stadtorte, nämlich

- das heiße und feuchte Klima in Florida,
- das heiße und trockene Klima in Arizona

- und die gemäßigte Klimazone mit verschmutzter Luft in Ohio

geprüft [22], [23], [28]. Die Änderung des solaren Reflexionsvermögens, des Emissionsvermögens und des Index der solaren Reflexionsgrade in drei Jahren lassen sich dieser Datenbank entnehmen, siehe Abbildung 16:

CRRC PROD. ID	MANUFACTURER	BRAND AND MODEL	PRODUCT TYPE	COLOR	SOLAR REFLECTANCE		THERMAL EMITTANCE		SRI		MORE INFO
					INITIAL	3 YEAR	INITIAL	3 YEAR	INITIAL	3 YEAR	
0646-0020	APOC/Gardner-Gibson Inc.	**APOC** 256 X	Coating	Bright White	0.94	0.75	0.88	0.89	120	93	+
0700-0036	Garland Company, Inc.	**R-Mer Coat** 1531	Coating	Bright White	0.93	0.84	0.90	0.85	119	105	+

Abbildung 17: Screenshot von der Homepage „Cool Roof Rating Council“ für die zwei kühlenden Dachbeschichtungen [28]

2.10.3 ENERGY STAR und LEED

ENERGY STAR wird seit 1992 von der amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) erstellt. Seit 2003 wurde der Energy Star offiziell in Europa eingeführt. Das Umweltprogramm ENERGY STAR fördert die Senkung des Energieverbrauchs [29]. Heutzutage stehen im Energie-Star-Programm mehr als 60 Produktkategorien zur Verfügung, einschließlich Dachprodukte, siehe Abbildung 18:

Pro-Tech Products Inc.: 100% Acrylic Roof Coating - EC-100 Energy Star Tan

Specifications

ENERGY STAR Partner:	Pro-Tech Products Inc.
Product Type:	Coating
Initial Solar Reflectance:	0.66
Solar Reflectance after 3 years:	0.65
Initial Emissivity:	0.88
Low Slope?:	Yes
Steep Slope?:	Yes
Warranty Period (yrs):	2, 5,10,20

Abbildung 18: Screenshot von der Homepage „Energy Star“ für eine Dachbeschichtung [29]

LEED (eng.: **L**eadership in **E**nergy and **E**nvironmental **D**esign) ist ein von den US Green Building Councils entwickeltes Bewertungssystem zur Klassifizierung nachhaltiger Bauten. Die Beurteilung von Gebäuden erfolgt bei diesen Bewertungssystemen durch Punktevergabe für einzelne Kriterien. Die Summe der erreichten Punkte entscheidet, wie das Gebäude bei der Zertifizierung eingestuft wird [30].

3 Hauptbestandteile von Anstrichstoffen

In diesem Kapitel werden die Hauptbestandteile von Anstrichstoffen und ihre Wirkung auf die Eigenschaften der gebildeten Anstriche betrachtet.

Anstrichstoffe bestehen aus dem Bindemittel, den Pigmenten, den Füllstoffen sowie dem Verdünnungsmittel und können auch Zusätze enthalten. Der Anstrich kann durch Streichen, Rollen oder Spritzen aufgetragen werden. Nach der Trocknung bzw. den chemischen Reaktionen mit dem Untergrund ergeben sich im Allgemeinen feste Beschichtungen.

In den Darstellungen der Normen und der Fachliteratur lässt sich eine Einteilung der Pigmente in bestimmte Gruppen finden. Das allgemeine Prinzip bleibt jedoch ähnlich. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die Klassifikationen, die in den Normen und der Fachliteratur gefunden werden können, im Zusammenhang betrachtet.

3.1 Farbmittel

Unter Farbmitteln versteht man alle farbgebenden Substanzen, sog. Farbstoffe und Pigmente. Farbmittel umfassen sowohl die im Anwendungsmedium unlöslichen Pigmente als auch die im Anwendungsmedium löslichen Farbstoffe [31]:

> *„Für Beschichtungsstoffe am Bau werden unlösliche Pigmente verwendet. Sie werden durch Bindemittel miteinander und mit dem Untergrund verbunden und haben deckende Wirkung. Darunter versteht man die Eigenschaft eines Stoffes, die Farbe des Untergrundes zu verdecken. Entsprechend ihres Verwendungszweckes müssen sie licht-, kalk- und zementecht sowie wetter- und UV-beständig sein.“, Auszug aus Frick/Knöll, Baukonstruktionslehre [32], Kapitel 9, s.749.*

Pigmente haben einen großen Einfluss auf die Eigenschaften der Anstrichstoffe. In den Produktbeschreibungen werden sie oder ihre Eigenschaften genannt, wenn es um die Erzeugung der speziell beabsichtigten Eigenschaften geht. So wird bspw. Zinkpigment in Korrosionsschutz-Anstrichstoffen mit kathodischer Schutzwirkung verwendet, wohingegen Weißpigment für eine höhere Reflexion in den Fassaden-Anstrichsoffen zum Einsatz kommt. Der Pigmenttyp, seine Partikelgrößen und die Partikelgrößenverteilung beeinflussen die Reflexionseigenschaften der reflektierenden Anstriche. Der Prozentanteil der Pigmente in der Zusammensetzung hat ebenfalls einen merklichen Einfluss und darf nicht vernachlässigt werden [33].

Für die Erstellung der speziellen Eigenschaften der Anstrichstoffe werden mehrere Pigmente miteinander kombiniert. Die Tabelle 6 zeigt die Eigenschaften der konventionellen Pigmente.

Tabelle 6: Eigenschaften der konventionellen Pigmente, aus Kunststoffeinfärbung [34], Kapitel 4, s.27

Teilchengröße	1µm = 10^{-3} mm 1nm = 10^{-6} mm
Transparente Pigmente	Bis zu ca. 0,15 (halbe Wellenlänge des sichtbaren Lichts)
Opake Pigmente	von ca. 0,2 bis zu 2,5 µm
Plättchenförmige Pigmente	von ca. 8 µm bis zu 25 µm, in extremen Fällen bis zu 200 µm
Dichte	1 g/ml bis zu 6 g/ml
Leitfähigkeit	bis zu 600 µS
Oberfläche (BET)	von 1 m^2/g bis zu 200 m^2/g

Licht-, Wärme-, Wetter- und chemische Beständigkeit der angestrichenen Oberfläche sind durch die chemische Zusammensetzung, Kristallstruktur, -größe und -form der Pigmente im Anstrichstoff bedingt. Das Streuvermögen ist unterschiedlich auf den verschiedenen Kristallachsen des Pigmentes [35].

Die Abbildungen 19 - 20 zeigen die vereinfachte Darstellung einiger physikalischer Vorgänge, die beim Einsatz von Pigmenten Anstrichstoffen entstehen:

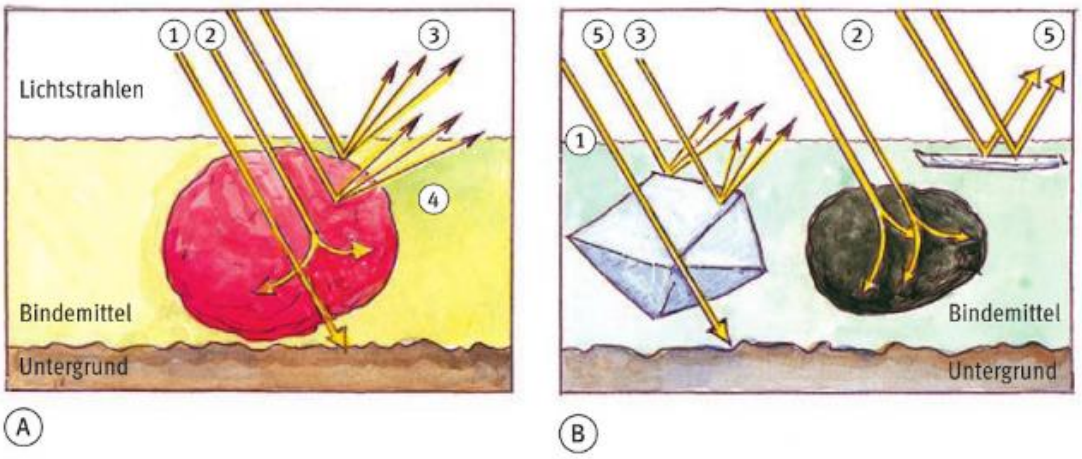


Abbildung 19: Optische Vorgänge an den Buntpigmenten (A) und an den Weiß-, Schwarz- und Metallpigmenten (B): 1 Transmission, 2 Absorption, 3 Remission an der Oberfläche, 4 Remission im Inneren, 5 Reflexion, aus Beschichtungstechniken heute [33], Kapitel 7, s.260

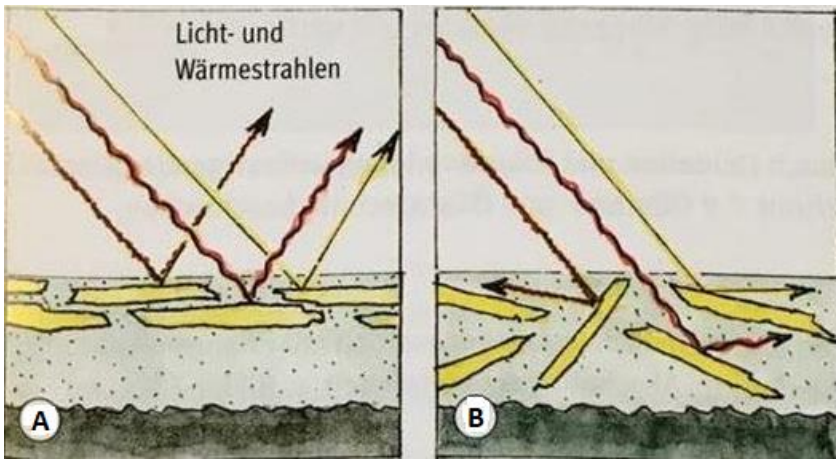


Abbildung 20: A. Licht- und Wärmestrahlung der reflektierenden Metallpigmente, welche darin besteht, dass sie im Bindemittel schwimmen und einen Spiegel bilden;
B. Keine Reflexion, aus Beschichtungstechniken heute [33], Kapitel 7, s.261

Einige wichtige Eigenschaften der Pigmente stellen sich wie folgt dar [33]:

- Die Korngröße hat Einfluss auf das Färbe- und Deckvermögen. Je kleiner die Korngröße ist, desto besser ist das Färbe- und Deckvermögen.
- Die Farbe hängt von der chemischen Zusammensetzung, der stofflichen Reinheit, dem Licht-Remissionsvermögen und dem Kristalltyp der Pigmente ab.
- Lichtechtheit ist die „Beständigkeit gegen Farbveränderungen bei Belichtung ohne atmosphärische Einflüsse.“, aus [36], s.13.
- Es gilt, die Temperaturbeständigkeit in Abhängigkeit von den Anforderungen bei der Anwendung der Anstrichstoffe zu berücksichtigen.
- Für die Pigmente, die in den alkalischen Beschichtungsstoffen – z.B. Mörtel, Anstrichfarben auf Kalk- oder Zementbasis – eingesetzt werden, bedarf es der Alkalienbeständigkeit.

Folgender Zusammenhang ist in diesem Kontext festzustellen:

> *„Die Farbigkeit wird durch Wechselwirkungen des Lichts mit dem Pigment hervorgerufen, indem ein Teil des Wellenspektrums dem Licht durch Absorption oder Interferenzen entzogen wird. Die Farbstärke wird mit Hilfe des Absorptionskoeffizienten beschrieben. Das Deckvermögen ergibt sich aus der Lichtstreuung an den Pigmenten.“, Auszug aus Coil Coating. Bandbeschichtung [35], Kapitel 3, s.74.*

Die Deckvermögen hängt vom Streuvermögen, dem Dispersionsgrad, dem Brechungsindex des Bindemittels, der Schichtdicke der Beschichtung und dem Absorptionskoeffizienten ab.

Die Konzentration und der Dispersionsgrad der Pigmente haben Einfluss auf den Glanz der Oberfläche, wobei nur jene Teilchen eine Wirkung ausüben, die sich direkt auf der Oberfläche befinden. Je höher der Prozentanteil der Pigmente ist, desto geringer fällt der Glanzgrad aus [35].

Die Pigmente können nach der chemischen Zusammensetzung sowie den optischen oder technischen Eigenschaften klassifiziert werden. Sie werden in organische und anorganische Pigmente eingeteilt, wobei sich jede Gruppe nach den koloristischen und den chemischen Gesichtspunkten weiter differenzieren lässt [37].

Organische Pigmente verfügen, wie sich feststellen lässt,

> *„über ein hohes, selektives Absorptionsvermögen, welches sich in sehr reinen Farbtönen in vielfältigen Farbnuancen zeigt. Ihr Streu- und Deckvermögen ist jedoch geringer als das der anorganischen Pigmente. Deshalb müssen sie, insbesondere für rote und gelbe Farbtöne, mit anorganischen Pigmenten kombiniert werden, um den Untergrund abzudecken.“, Auszug aus Coil Coating Bandbeschichtung [35], Kapitel 3, s.77.*

Nach koloristischen Gesichtspunkten können die anorganischen Pigmente unterteilt werden in:

- anorganische Weißpigmente
- anorganische Buntpigmente
- anorganische Schwarzpigmente
- anorganische Effektpigmente
- anorganische Leuchtpigmente
- NIR-reflektierende Pigmente
- IR-absorbierende Pigmente

Die organischen Pigmente wiederum lassen sich untergliedern in:

- organische Buntpigmente
- organische Schwarzpigmente
- organische Effektpigmente

- organische Leuchtpigmente

Die NIR-reflektierenden Pigmente sind Pigmente, die nah-infrarote Strahlung im Wellenlängenbereich oberhalb des Sichtbaren bis 2500 nm streuen. Die dazugehörigen Pigmente reflektieren die Sonnenstrahlung im nahen Infrarot und absorbieren im mittleren Infrarot:

> *„Die Absorption vom mittleren Infrarot ist wichtig für die Emission von Wärme, die durch unvollständige Reflexion von Sonnenstrahlung im nahen Infrarot entsteht.“, Auszug aus DIN ISO 18451-1 [36], s.16.*

Die Vertreter der IR-reflektierenden Pigmente sind Titandioxid, Manganantimontitanoxid sowie Chromeisenoxid.

Weißpigmente haben eine optische Wirkung, die auf ihrer sehr geringen Lichtabsorption und auf wellenlängenunabhängiger Lichtstreuung beruht [37]. Der wichtigste Vertreter der anorganischen Weißpigmente ist Titandioxid. Die organischen Weißpigmente haben derzeit keine praktische Bedeutung. Das Titandioxid-Pigment verfügt zudem über eine sehr gute Beständigkeit. Es ist unlöslich in Wasser und in organischen Lösemitteln und liegt in drei Kristallmodifikationen als Rutil, Anatas und Brookit vor. Vorwiegend wird Titandioxid mit einer Rutilstruktur angewendet. Rutil ist licht- und wetterbeständig. Um seine Beständigkeit noch zu verbessern, ist es notwendig, eine Nachbehandlung der Pigmentoberfläche vorzunehmen. Die Bearbeitung mit Aluminium oder Zink verbessert die Stabilität gegenüber UV-Licht [35].

Schwarzpigmente weisen eine optische Wirkung auf, welche auf wellenlängenunabhängiger Lichtabsorption im sichtbaren Bereich des Lichtes beruht. Die Vertreter der anorganischen Pigmente sind Cobaltchromeisenschwarz, Eisenoxidschwarz, Pigmentruß und Spinellschwarz. Die Vertreter organischer Pigmente sind Perylenschwarz und Anilinschwarz [37].

Buntpigmente lassen eine optische Wirkung erkennen, die mit der wellenlängenabhängigen Lichtabsorption und mit Lichtstreuung verbunden ist. Die bedeutendsten Vertreter der anorganischen Pigmente sind Eisenoxidpigmente [37]. Sie sind typisch für die Farbe Gelb, Organe, Rot und Braun:

> *„Die oxidischen Mischphasenpigmente weisen eine den Oxidpigmenten ähnliche Kristallstruktur auf. Jedoch ist ein Teil der Metallionen durch andere Metalle ersetzt. So kann z. B. das Titan im Titandioxidkristall zum Teil durch Nickel oder Antimon ersetzt sein. Diese Pigmente sind lichtecht, wetter-, säure-, alkali- sowie temperaturbeständig und auch resistent gegenüber den meisten Chemikalien.“, Auszug aus Coil Coating. Bandbeschichtung [35], Kapitel 3, s.76.*

Korrosionsschutzpigmente stellen Pigmente mit einem hohen Oxidationspotenzial dar, welche den Vorgang der Korrosion verzögern. Dazu gehören Zinkphosphat, Zinkstaub und Zink-Aluminiumphosphat [35].

Effektpigmente lassen sich in Metalleffektpigmente, Perlglanzpigmente sowie Interferenzpigmente einteilen.

Metalleffektpigmente sind plättchenförmige metallische Pigmente, die parallel angeordnet sein können und eine gerichtete Reflexion ermöglichen. Sie haben Metallteilchen, die bis zu 20 µm groß und bis zu 1 µm dick sind. Vertreter der Metalleffektpigmente sind Aluminium und Bronze (Cu, Zn) [36].

Perlglanzpigmente werden als transparente Plättchen definiert, die eine gerichtete Reflexion ermöglichen [36].

Interferenzpigmente basieren, wie die Bezeichnung bereits aussagt, auf dem Phänomen der Interferenz. Interferenzpigmente und Perlglanzpigmente erzeugen eine Farbtonverschiebung. Dieses Phänomen ist durch Doppelreflexion auf der Ober- und Unterseite der Metallplättchen bedingt [36].

3.2 Bindemittel

Bindemittel zeichnen sich dadurch aus, dass sie Pigmentteilchen untereinander und mit dem Untergrund verbinden. Sie

> *„bestimmen somit weitgehend die Haltbarkeit der Beschichtung. Man unterscheidet wasserverdünnbare Bindemittel (z. B. Kalk, Zement, Wasserglas, Dispersionen) und lösemittelverdünnbare Bindemittel (z. B. Lacke, Leinöl-Firnis, Natur- und Kunstharze).“, Auszug aus Frick/Knöll Baukonstruktionlehr [32], Kapitel 9, s.749.*

Wasserverdünnbare Bindemittel lassen eine weitere Unterteilung zu, die sich in folgende Möglichkeiten untergliedert [31]:

- Acrylat-Dispersionsbeschichtungsstoff
- Epoxidharz-Dispersionsbeschichtungsstoff
- Elektrotauchlack
- Polyurethan-Dispersionsbeschichtungsstoff
- Silicatfarbe

Die lösemittelhaltigen Bindemittel wiederum können unterteilt werden [31] in:

- Alkydharz-Beschichtungsstoff
- Epoxidharz-Beschichtungsstoff
- Polyurethan-Beschichtungsstoff
- Polyester-Beschichtungsstoff

Der Einsatz von Dispersionsbindemitteln ist vorteilhaft für Wandoberflächen, da sie atmungsaktiv sind. Polyester- oder Polyurethan-Beschichtungen bringen den Vorteil einer besonders guten Witterungsbeständigkeit mit.

Wichtig ist es, die Transparenz des Bindemittels zu berücksichtigen. Damit der Anstrichstoff reflektierende und rückstreuende Eigenschaften im sichtbaren und im thermischen Infrarotbereich aufweisen kann, ist es notwendig, dass die Bindemittel eine hohe Transparenz haben.

Es ist vonnöten, die Pigmente, die Bindemittel und die Untergründe immer im Zusammenhang zu betrachten, da an ihren Kontaktflächen Reaktionen entstehen, die sich vorteilhaft auf die optischen Eigenschaften, die Festigkeit sowie die Lebensdauer auswirken [33].

3.3 Füllstoffe

Bei den sogenannten Füllstoffen handelt es sich um

> *„Material in körniger oder in Pulverform, das im Anwendungsmedium (z. B. Beschichtungsstoff) unlöslich ist und verwendet wird, um bestimmte physikalische Eigenschaften zu erreichen oder zu beeinflussen.“, Auszug aus DIN ISO 18451-1 [36], s.9.*

Füllstoffe können dem Anstrichstoff zur Volumenvergrößerung oder Strukturgebung beigemischt werden. Im Allgemeinen haben Füllstoffe die gleichen Aufgaben wie Zuschläge, jedoch in kleinerer Dimension. Die Wirkung des Füllstoffes ist direkt abhängig von seiner Korngrößenverteilung.

Füllstoffe üben einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Anstrichstoffes aus, der sich in Hinblick auf die Schlagzähigkeit, die Abriebfestigkeit und das Schleifverhalten bemerkbar macht. Im Unterschied zu den Pigmenten haben sie kein merkliches Streu- und Deckvermögen, allerdings haben sie eine Wirkung auf Glanz und Mattierung [35].

4 Modellbildung und Simulation des bestehenden Gebäudes

In diesem Kapitel wird das Basismodel des bestehenden Gebäudes im Ist-Zustand erstellt und mit Hilfe des Programmes „TRNSYS 16“ simuliert.

Das Ziel besteht zunächst darin, das dynamische und thermische Verhalten des Gebäudes im Ist-Zustand abzuschätzen, damit die Optimierungsmöglichkeiten der thermischen Behaglichkeit in den Räumen und im Dachgeschoss im Sommer durch die Anwendung der reflektierenden Anstriche auf die Außenoberflächen des Gebäudes betrachtet werden können.

Die vorhandenen Gebäudedaten für das Gebäude „Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium Wien“ werden in diesem Kapitel zusammengefasst. Sollten notwendige technische Daten fehlen, wird eine erforderliche Annahme getroffen.

4.1 Allgemeine Beschreibung der Simulation mit TRNSYS

TRNSYS 16 (**Tra**nsient **Sys**tem Simulation) ist ein dynamisches Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm und hat einen modularen Strukturaufbau.

Bei der TRNSYS-Projekterstellung werden die grafischen Verbindungen der Komponenten in der Simulationsumgebung „Studio“ eingerichtet. Jede TRNSYS-Komponente wird durch ein mathematisches Modell in der TRNSYS Simulation Engine beschrieben und in der Simulation Studio als „Black Box“-Modell nach Input, Output und Parameter definiert. Die TRNSYS-Komponenten werden häufig als Typen bezeichnet und aus der Programmbibliothek gewählt. Die Verknüpfung der Typen miteinander erfolgt durch die Verbindungslinie zwischen dem Output eines Typs mit dem Input eines anderen Typs. Dadurch wird die Information von einem Typ zum anderen Typ übergeben. Durch eine Verbindungslinie lassen sich mehrere Parameter – z.B. Temperatur, Strahlungsintensität usw. – zuordnen.

Das Multizonengebäudemodell wird im Simulation Studio durch den Typ 56 bestimmt. Aufgrund der Komplexität eines Multizonengebäudes werden die Parameter von Type 56 nicht nur im TRNSYS Simulation Studio durch die Verknüpfung von Input und Output des Typ 56 mit den anderen Typen (z.B. Typ 109 „Weather Data“) definiert, sondern ebenso mit Hilfe von „TRNBild“ beschrieben. TRNBild ist ein spezielles Eingabe-Tool für die Gebäudebeschreibung, in dem mehrere thermische Zonen definiert werden können und in das sich alle Details zur Gebäudestruktur, die zur thermischen Gebäudesimulation erforderlich sind, einfügen lassen. TRNBild erstellt eine Gebäudebeschreibungsdatei, die

alle Informationen erhält, um die Gebäudesimulation im „Simulation Studio“ durchführen zu können.

4.2 Beschreibung des Gebäudes

Adresse: Kandlgasse 39, 1070 Wien

Breitengrad: 48°20'26" N

Längengrad: 16°33'68" E

Die Wand-/Bauteilaufbauten wurden den Gebäudeplänen (Anhang D) entnommen. Ausgehend von einem vorhandenen Plan für das EG und die allgemeine Beschreibung der Räumlichkeiten auf der Webseite der Schule wurde die Raumfläche vom 1. bis 3. Stock selbstständig abgeschätzt und in der Tabelle 7 zusammengefast.

Tabelle 7: Übersicht von Räumlichkeiten und Flächen

Räumlichkeit	**Fläche, m^2**
Erdgeschoss	
Raum (unbezeichnet)	29,4
Raum (unbezeichnet)	16,2
Klassenzimmer	46,2
Klassenzimmer	47,2
Buffet	16,8
Klassenzimmer	47,4
Klassenzimmer	62,3
Klassenzimmer	43,5
Klassenzimmer	46,0
Schulwartzimmer	19,4
Garderobe	19,4
Nachmittagsbetreuung	50,6
WC	17,3
WC	14,5
Dusch	11,3
Lehrerzimmer (Garderobe)	8,0
Garderobe (SchülerInnen)	18,1
Garderobe (SchülerInnen)	24,7
Gang/Flur	170,5
Stiege mit dem Aufzug	39,5

Räumlichkeit	**Fläche, m^2**
Stiege	17,6
Haupteingang/Foyer	48,6
Geräteraum	30,9
Turnsaal	221,1
1. Obergeschoss	
Lehrerzimmer	16,4
Lehrerzimmer	67,7
Lehrerzimmer	37,7
Direktion	37,7
Sekretariat	16,6
Bibliothek	62,3
Bibliothek	19,3
EDS Saal	45,6
Klassenzimmer	48,6
Klassenzimmer	69,6
Klassenzimmer	54,8
WC	17,3
WC	14,5
Dusch	11,3
Lehrzimmer (Garderobe)	8,0
Garderobe	18,1
Garderobe	24,7
Gang	170,5
Stiege mit dem Aufzug	39,5
Stiege	17,6
Geräteraum	30,9
Turnsaal	221,1
2.Obergeschoss	
Biologieraum	62,9
Bio-Sammlung	37,7
GZ Saal	62,9
GWK Sammlung	16,8
Klassenzimmer	62,3
Serverraum	19,4
Klassenzimmer	43,5
Klassenzimmer	48,6
Klassenzimmer	46,0

Räumlichkeit	**Fläche, m^2**
Physik Sammlung	19,4
Klassenzimmer	54,8
Physiksaal	82,8
Physik Sammlung	34,7
WC	17,3
WC	14,5
Teilungsraum	34,7
Gang	170,5
Stiege mit dem Aufzug	39,5
Stiege	17,6
3.Obergeschoss	
Musiksaal/Festsaal	152,1
Musiksammlung	15,2
BE-Sammlung	16,8
BE Saal	62,3
Werksaal	50,9
Klassenzimmer	50,9
Klassenzimmer	50,9
Teilungsraum	29,2
Klassenzimmer	54,8
Chemiesaal	82,8
Chemiesammlung	34,7
WC	17,3
WC	14,5
TEC Sammlung	17,4
TEX Sammlung	17,4
Gang	170,5
Stiege mit dem Aufzug	39,5
Stiege	17,6
Dachgeschoss	896,3
Horizontaler Teil des Daches	127,0
Kellergeschoss	1023,3

Alle notwendigen Beschreibungen und getroffenen Annahmen für die Gebäudesimulation in TRNSYS 16 werden in Verbindung mit der Dateneingabe in TRNBild und anschließend bei der Gebäudesimulation im Simulation Studio betrachtet.

Wandaufbau:

Tabelle 8 zeigt die Aufbauten der Wandflächen für die betrachtete Schule. Die Wand-, Decke-, Dach- und Bodenaufbauten werden dem Plan entnommen. Wenn genauere Informationen über die Baustoff- und Materialtypen fehlen, werden erforderliche Annahmen herangezogen. Die Dichte, Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität des Baustoffes werden dem Katalog für Baustoffe und Bauteile [38] entnommen.

Material/Aufbau:

(von innen nach außen)

Tabelle 8: Aufbau der Wandflächen für das Gebäudemodell „Schule“ im Ist-Zustand

Schicht	**Dicke, in cm**	**Dichte, in kg/m³**	**λ-Wert, in W/(m K)**	**Spez.W. *c*, in kJ/(kg K)**	***U*-Wert, in W/(m² K)**
Außenwand[1]					
Kalkgipsputz	1,0	1200	0,600	1,00	0,921
Vollziegel	60,0	1600	0,700	0,90	
Kalkzementputz	1,5	1800	0,870	1,00	
Trennwand					
Kalkgipsputz	1,0	1200	0,600	1,00	0,922
Vollziegel	60,0	1600	0,700	0,90	
Kalkgipsputz	1,0	1200	0,600	1,00	
Interne Wand					
Kalkgipsputz	1,0	1200	0,600	1,00	2,207
Vollziegel	17,0	1600	0,700	0,90	
Kalkgipsputz	1,0	1200	0,600	1,00	
Kellerboden					
Beton mit Zuschlägen aus Natürlichem Gestein	10,0	1800	1,110	1,08	2,776
Drainageschotter	20,0	1950	2,000	1,05	
Boden EG					
Linoleum	1,3	1000	0,170	1,00	0,345

[1] Annahme: Die Dicke der Außenwand für das Basisgebäudemodell wird auf 60 cm geändert, aufgrund der Meldung von TRNBild zu den Stabilitätsbedingungen bei der Schichtendefinition (Dicke, Wärmeleitfähigkeit und Dichte des Baustoffes).

Schicht	Dicke, in cm	Dichte, in kg/m³	λ-Wert, in W/(m K)	Spez.W. *c*, in kJ/(kg K)	*U*-Wert, in W/(m² K)
Beton	2,0	1800	1,110	1,08	
Zementstrich	6,0	2000	1,400	1,00	
Dämmschüttung	10,0	85	0,042	1,00	
Ziegel	14,0	1600	0,700	0,90	
Decke					
Gipskarton	1,0	900	0,210	1,00	
Holzbalken	22,0	600	0,150	2,50	0,568
Linoleum	1,3	1000	0,170	1,00	
Oberste Geschoßdecken					
Gipskarton	2,0	900	0,210	1,00	
Dippelbaum	18,0	600	0,150	2,50	0,561
Lehmschicht	8,0	1000	0,350	1,00	
Ziegelpflaster	6,0	1600	0,700	1,00	
Dach, geneigt					
Holz	18,0	600	0,150	2,50	0,694
Dachziegel	7,0	2000	1,000	1,00	
Dach, horizontal					
Gipskarton	1,0	900	0,210	1,00	
Holz	18,0	600	0,150	2,50	0,706
Aluminium	0,1	2700	200,000	0,86	

Fenster:

Den Fotos von der Webseite der Schule nach zu beurteilen, sind in den verschiedenen Stockwerken unterschiedliche Fenstertypen eingebaut. Für die Simulation werden zwei Fenstertypen festgelegt. Für jeden Stock wird eine zweifache Isolierverglasung, für das Keller- und Dachgeschoss ein Einfachglas-Fenstertyp gewählt, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9: Beschreibung der Fenstertypen des Gebäudes

Fensterverglasung	*U*-Wert, in W/(m² K)	*g*-Wert, in %
2-fach Isolierverglast	2,83	75,5
Einfachglas	5,68	85,5

4.3 Erstellung des Gebäudemodells

Abbildung 21 visualisiert die Struktur der Simulation der Schule im Ist-Zustand im TRNSYS Simulation Studio. Das betrachtete Gebäude wird durch die Type 56 „Multi-Zone Building“ definiert.

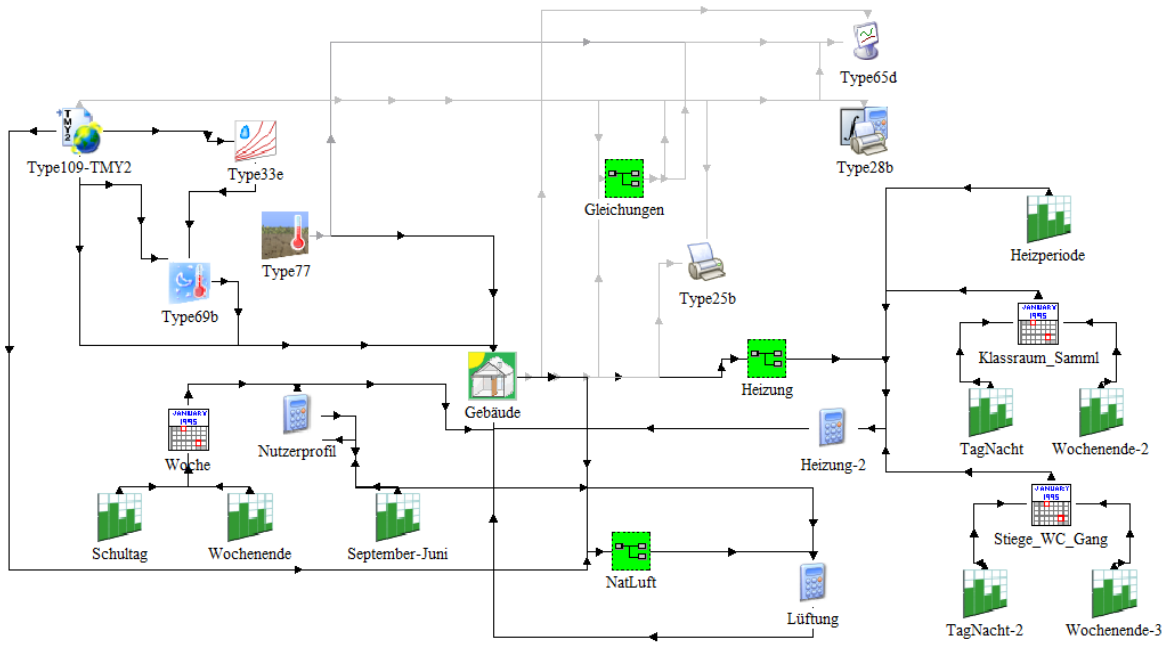


Abbildung 21: Simulationsstruktur der Schule im Ist-Zustand

Für die bessere Veranschaulichung der Simulationsstruktur wurden einige Typen zu einzelnen Makrokomponenten zusammengeschlossen. In der Abbildung 21 können die Makrokomponenten „Heizung“ und „Lüftung“ sowie „Gleichungen“ betrachtet werden. Die Makrokomponente „Heizung“ besteht aus 6 Hysterese-Reglern für die Modellierung des Heizungssystems der 6 beheizten Zonen. Diese Hysterese Regler gehören zur Type 2 „Controllers“. Die Makrokomponente „Nat.Luft“ dient zur Abbildung der Natürlichen Lüftung für 8 thermische Zonen. Die Makrokomponente „Gleichungen“ hat den Zweck der Berechnung der notwendigen Outputs für die betrachteten Zonen und für die Einheitenumrechnung. Die Abbildung 22 zeigt die erstellte Makrokomponente für die Simulation der Heizung:

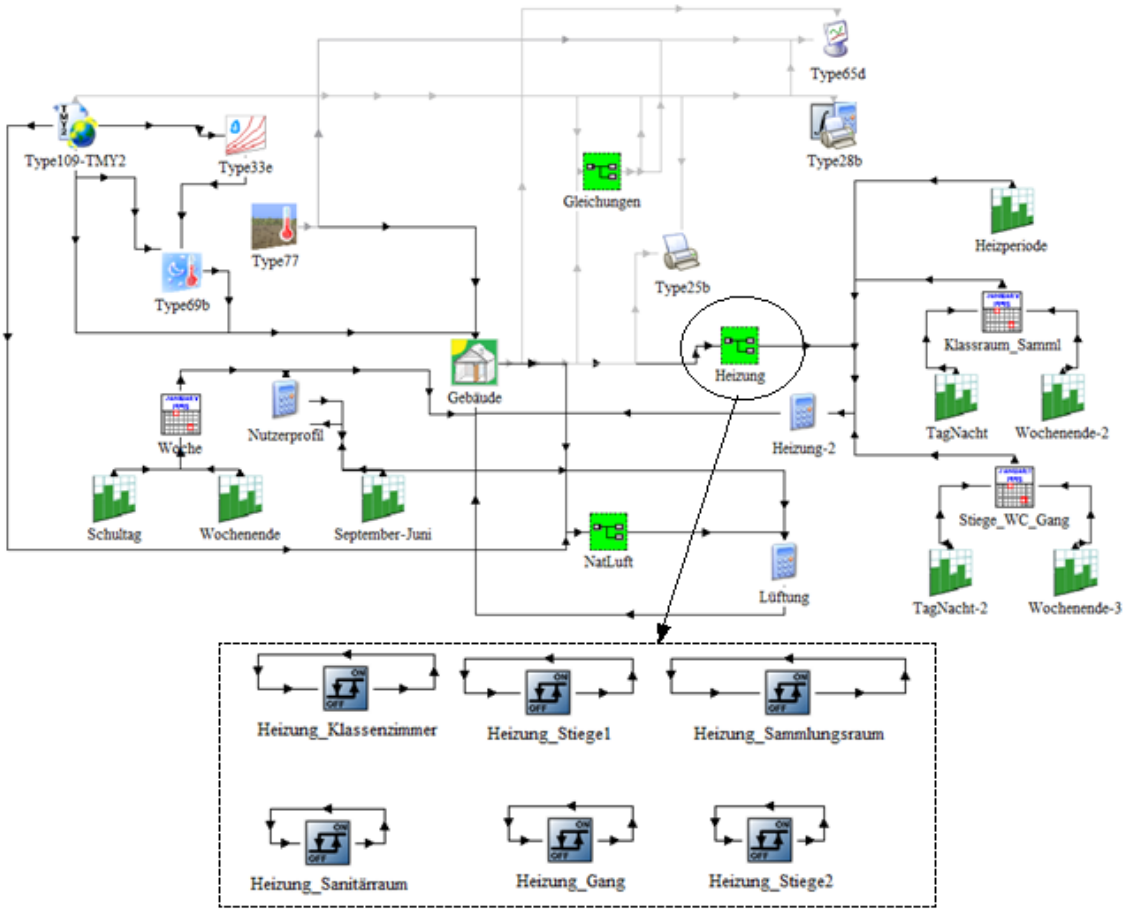


Abbildung 22: TRNSYS Simulation Studio mit der Abbildung der Makrokomponente „Heizung“

4.3.1 Wetterbedingungen

Die Klimabedingungen werden mit Hilfe folgender Typen definiert: Der Typ 109 „Weather Data Reading und Prozessing“ enthält den kombinierten Datenleser und den Solarstrahlungsprozessor. Diese Type liest Wetterdaten in den verschiedenen Standardformaten wie TMY2, TRY und auch in einem vom Benutzer definierten Format ein.

Für die Gebäudesimulation wird der Typ 109-TMY2 mit den Klimadaten für „Wien Hohe Warte“ angenommen. Die typischen meteorologischen Jahre „TMY2“ stammen aus der National Solar Radiation Database (NSRDB) von 1961 bis 1990.

Als Himmelmodel wird das Perez-Modell ausgewählt, da es ein komplexes Modell ist und drei Diffusstrahlungsanteile berücksichtigt, nämlich den isotropen Anteil vom Himmel, den zirkumsolaren Anteil und die Horizonterhellung.

Mit Hilfe dieses Typs sind die Umgebungstemperatur, die Windgeschwindigkeit, die Strahlungsdaten, wie die Gesamtstrahlung oder/und die Direktstrahlung, und der Einfallswinkel der Einstrahlung mit den verschieden orientierten Flächen des

Gebäudemodells direkt verbunden und übergeben. Durch diesen Typ werden der Azimut und die Neigung jeder Gebäudefläche definiert.

Der Typ 77 „Simple Ground Temperature Profile“ dient zur Modellierung der Temperaturverteilung der Böden unter Berücksichtigung der mittleren Bodentemperatur des Jahres, der Amplitude der Bodentemperatur des Jahres, der Zeitdifferenz zwischen dem Beginn des Kalenderjahres und dem Auftreten der minimalen Oberflächentemperatur, der Wärmeleitfähigkeit der Böden und der Bodendichte. Die Erdreichtemperatur kann mittels dieser Type für jede beliebige Tiefe berechnet werden.

Laut [39] werden folgende thermophysikalische Erdbodendaten festgelegt:

Wärmeleitfähigkeit	1,5	W/(m K)
Wärmekapazität	1500	J/(kg K)
Dichte	1800	kg/m^3

Die weiteren notwendigen Werte für das Bodentemperaturprofil werden den Wetterdaten entnommen. Die mittlere Temperatur und die Amplitude der Bodentemperatur beträgt 10℃. Die Amplitude der Bodentemperatur wird als Differenz zwischen der maximalen und minimalen Umgebungstemperatur bestimmt. Der Tag des Jahres, welcher der minimalen Oberflächentemperatur entspricht, wird am 11. Jänner festgelegt. Der Typ 77 wird durch den Input „Erdreich“ des Typs 56 „Gebäudemodel“ für die Kellergeschoss-Simulation verknüpft. Die Temperaturverläufe der Außen- und Bodentemperatur sind in der Abbildung 23 dargestellt:

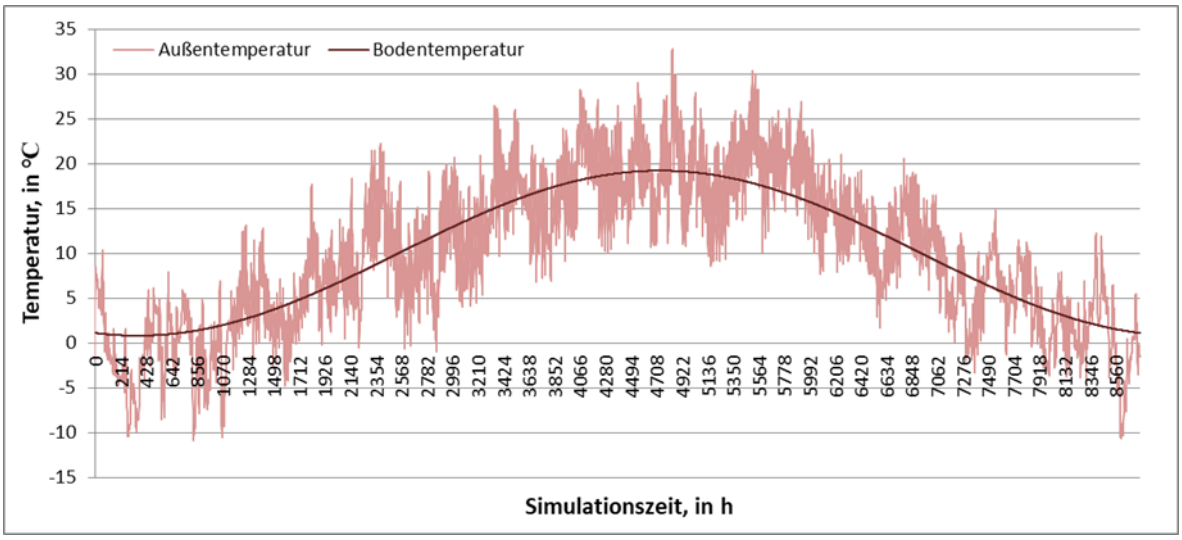


Abbildung 23: Temperaturverlauf der Außen- und Bodentemperatur über das Jahr

Der Typ 69 „Effective Sky Temperature“ bestimmt eine effektive Himmelstemperatur. Mit dieser effektiven Himmelstemperatur kann der langwellige Strahlungsaustausch von Außenflächen eines Gebäudes in die Atmosphäre kalkuliert werden.

Der Typ 33 „Psychrometrics“ wird zur Berechnung der absoluten und relativen Feuchtigkeit, der Feuchttemperatur, der Trockentemperatur, der Taupunktemperatur, der Enthalpie, der Dichte des Luft-Wasser-Gemisches sowie der Dichte der trockenen Luft verwendet. Bei der Simulation berechnet der Typ 33 die Taupunkttemperatur und wird mit dem Input „Taupunkttemperatur“ des Typs 69 „Effective Sky Temperature“ verknüpft. Der Typ 69 verwendet diese Daten zur Errechnung der effektiven Himmelstemperatur.

4.3.2 Zonierung des Gebäudes

Die Kriterien für die Zonierung sind die Art der Nutzung der Räume, die vorgesehene Lüftung und die Heizung. Jede Zone umfasst alle Räume mit einheitlicher Raumtemperatur, die Nutzungszeit, den Luftwechsel, die internen Lasten, die Anforderungen an die Beleuchtung und die thermische Behaglichkeit.

Laut den oben beschriebenen Kriterien wird das Gebäude in 8 thermische Zonen unterteilt. Die ungeheizten Kellergeschossräume und das Dachgeschoss stellen jeweils eine eigene Zone dar. Das Gebäude von EG bis 3.OG wird vertikal in 6 thermische Zonen unterteilt.

Die Klassenzimmer, die Teilungsräume, das Lehrerzimmer und die Direktion werden zu einer thermischen Zone mit dem Titel „Klassenzimmer“ zusammengefasst. TEC-, TEX- und die Chemiesammlungen werden als eine Zone namens „Sammlungsraum“ ohne regelmäßigen Aufenthalt definiert. Die Stiegen 1 und 2, der Gang und die WC-Räume bilden eine eigene Zone und werden als die Zone „Stiege 1“, „Stiege 2“, „Gang“ und „Sanitärraum“ in entsprechender Weise bezeichnet.

Der Turnsaal wird nicht simuliert. Zu diesem zählen Räume wie die Geräteräume; die Garderobe im EG und im 1. OG wird nicht als eine eigene Zone betrachtet und simuliert. Diese Räume werden zum Teil auf die Zone „Sammlungsraum“ und „Klassenzimmer“ bei der Simulation verteilt.

Daraus ergeben sich für die Simulation folgende thermische Zonen (Tabelle 10):

- Klassenzimmer
- Sammlungsraum
- Stiege 1
- Stiege 2

- Gang
- Sanitärraum
- Dachgeschoss
- Kellergeschoss

Die Innenwände, der Fußboden bzw. die Decke, die innerhalb einer vertikalen thermischen Zone liegen, können durch ihre Speichermasse eine Dämpfung der Temperaturgänge bewirken und werden deshalb als „Interne Wand“ bei der Eingabe in TRNBild berücksichtigt.

Tabelle 10: Thermische Zonen hinsichtlich Flächen und Volumen

Thermische Zone	**Fläche, in m^2**	**Volumen, in m^3**
Klassenzimmer	608,7	10396,8
Sammlungsraum	72,9	1245,1
Stiege 1	25,0	427,2
Stiege 2	38,5	658,4
Gang	172,1	2938,8
Sanitärraum	33,9	579,3
Dachgeschoss	844,3	2162,3
Kellergeschoss	1023,3	2875,4

Die Abbildung 24 gibt die Aufteilung des Gebäudes in die thermischen Zonen wieder.

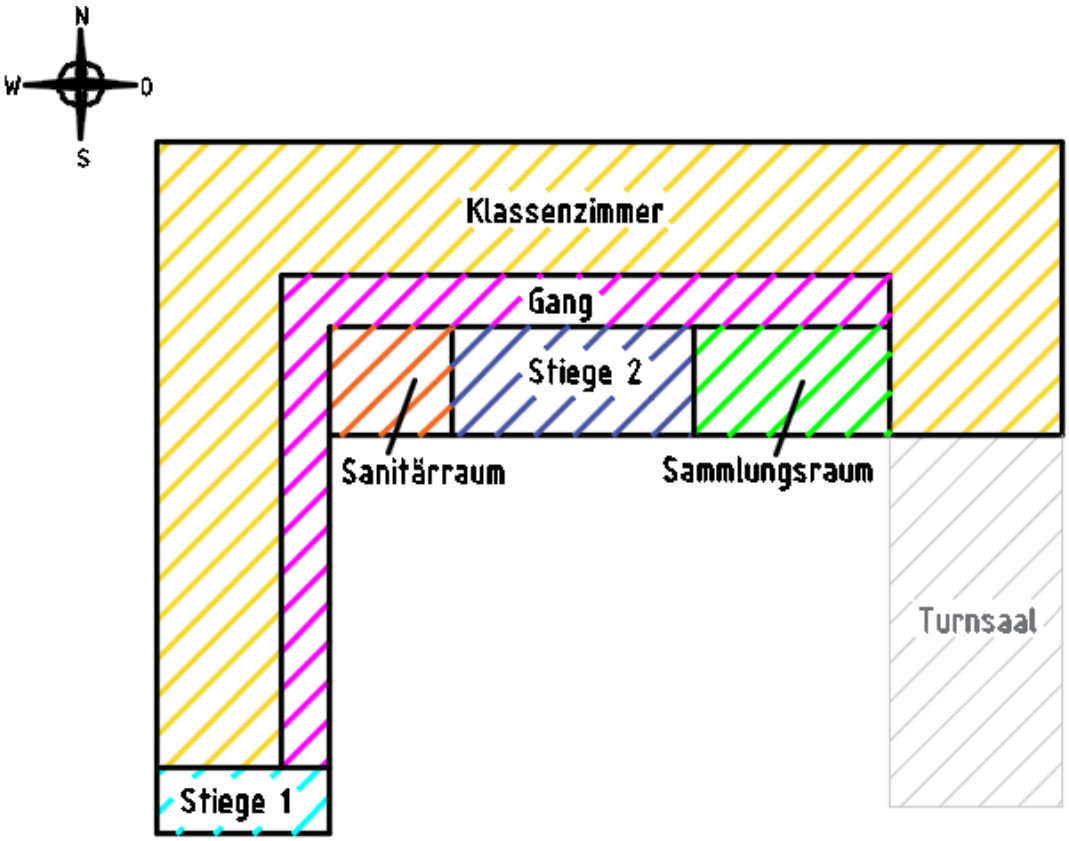


Abbildung 24: Zonierung des betrachteten Gebäudes

4.4 Beschreibung der Gebäudestruktur

In TRNBuild sollen die Bauteilaufbauten von innen nach außen eingegeben werden. Die Bauteile werden unter „Wall type“ definiert und durch die Wahl der entsprechenden Baustoffe aus der vorhandenen Bibliothek in TRNBuild mit der Eingabe der Schichtdicke eingebaut. Die Baustofftypen, die in der Bibliothek nicht existieren oder keine notwendigen Eigenschaften vorweisen, werden erstellt. Unter „Layer Type Manager“ kann man eine Massive oder Masselose Schicht, eine Aktive Schicht (z.B. für Fußbodenheizung oder integrierte Kühlschichten) oder eine Kühldecke erstellen und notwendige Parameter einfügen. Für die Erstellung der Massiven Schichten werden die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität des Baustoffes der Tabelle 8 entnommen und in den „Layer Type Manager“ eingefügt.

Der solare Absorptionsgrad von Wänden wird in „Front“ und „Back“ unterteilt. Unter „Front“ wird die Innenoberfläche der Wand und unter „Back“ die Außenoberfläche der Wand verstanden.

Der solare Absorptionsgrad von opaken Außenflächen und von opaken Innenbauteilen ist gemäß [39] definiert und in der Tabelle 11 dargestellt:

Tabelle 11: Solarer Absorptionsgrad für opake Außenoberflächen und Innenoberflächen des Bauteils

Bauteil	**Materialtyp**		**„Front“**	**„Back“**
	Innenoberfläche	**Außenoberfläche**		
Außenwand	Putz	Putz	0,7	0,60
Dach, geneigt	Holz	Dachziegel, dunkel	0,7	0,95
Dach, horizontal	Gipskarton	Aluminium	0,7	0,30

Für alle Innenbauteile, unabhängig vom Materialtyp, wird ein Solarer Absorptionsgrad für „Front“ und „Back“ von 0,7 nach [39] angenommen.

In der Abbildung 25 sind die Eingabefenster für die Definition der thermischen Zonen dargestellt:

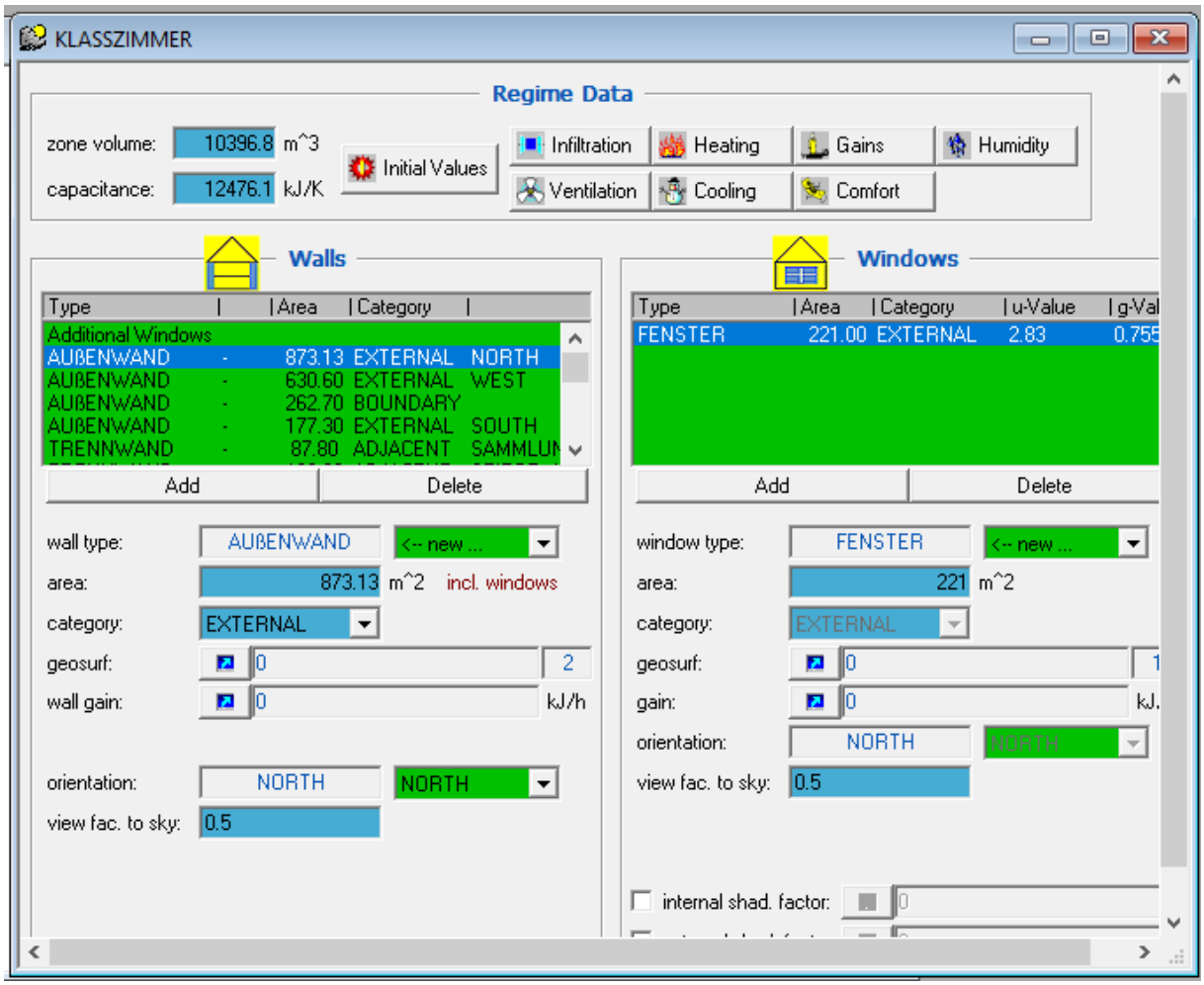


Abbildung 25: TRNBild – die Eingabefenster für die thermische Zone „Klassenzimmer“

Unter der Option „Category“ kann jede Oberfläche einer von 4 Kategorien zugeordnet werden:

EXTERNAL	Außenwand
INTERNAL	Wand innerhalb einer Zone
ADJACENT	Wand, die zwei Zonen voneinander trennt
BOUNDARY	Wand mit den Randbedingungen

Die Option „Geosurf“ beschreibt die Verteilung der einfallenden direkten Sonneneinstrahlung in der Zone und darf in der Summe den Wert 1 nicht überschreiten. Wenn „Geosurf“ gleich 0 ist, bedeutet dies, dass die direkte Sonneneinstrahlung genau wie die diffuse Strahlung verteilt wird. Für die Simulation wird der Wert 0 gewählt.

Unter der Option „Orientation“ kann für jede Oberfläche die Orientierung über den Azimut und Neigungswinkel der Fläche festgelegt werden. In der Simulation werden nachfolgende Orientierungen definiert, siehe Tabelle 12:

Tabelle 12: Orientierung der Bauteile

Bauteil	**Orientierung**
Außenwand	Nord, Ost, Süd, West
Dach	NSLOPE, OSLOPE, SSLOPE, WSLOPE, Horizontal

Die Option „View factor to sky“ berücksichtigt, wie die Gebäudeoberfläche zum Himmel orientiert ist. Dieser Faktor lässt sich mittels nachstehender Formel bestimmen:

$$FSKY = \frac{1 + \cos(ß)}{2} \tag{5}$$

und ist gleich 1,0 für die horizontale Fläche und 0,5 für die vertikale Fläche [41].

Der Wärmeübergangskoeffizient auf der Innen- bzw. Außenoberfläche der Außenwand wird automatisch von dem Programm mit den Werten $h_{s,i}$ = 7,7 W/(m^2 K) und $h_{s,a}$ = 25,0 W/(m^2 K) definiert, was laut [42] dem Wärmeübergangskoeffizient als Summe aus dem Konvektiv- und Strahlungsanteil entspricht.

TRNBuild berechnet den *U*-Wert dynamisch mittels der Methode der Übergangsfunktionen, in deren Rahmen eine Wand als „Black Box“-Modell betrachtet und die thermische Kapazität der Wand über Übergangsfunktionen berücksichtigt werden. Die Anzahl der Zeitschritte ist davon abhängig, ob die Wand zu einer schweren Wandkonstruktion mit einer höheren thermischen Masse gehört oder eine leichte Wandkonstruktion darstellt, für die nur wenige Schichten erforderlich sind, um das thermische Verhalten der Wand zu beschreiben.

4.4.1 Nutzerprofil der Schule

Die Zeitprofile ermöglichen es, das Gebäude in Bezug auf die Belegung, interne Wärmegewinne durch die Personen, die Geräte usw. zu charakterisieren.

Das Unterrichtsjahr wird für den Zeitraum vom 1. September bis 30. Juni festgelegt. Es wird ein Jahr im Simulation Studio mit Hilfe des Typs 14 „Forcing Functions“ und des Typs 41 „Forcing Function Sequencers“ erstellt, siehe Abbildung 26:

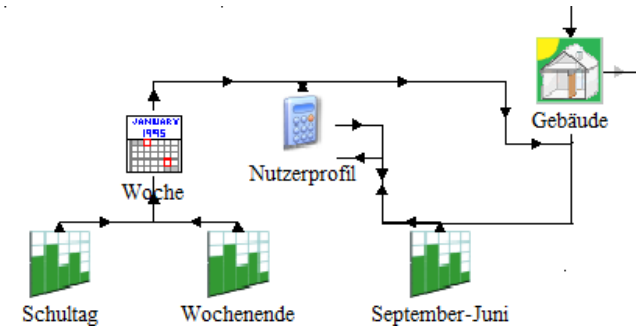


Abbildung 26: Strukturaufbau für das Nutzerprofil der Schule in TRNSYS Simulation Studio

Für eine Woche werden mittels des Typs 14 zwei Zeitpläne erstellt. Der erste Zeitplan gilt für den Schultag laut [43], siehe Abbildung 27, der zweite für das Wochenende, siehe Abbildung 28:

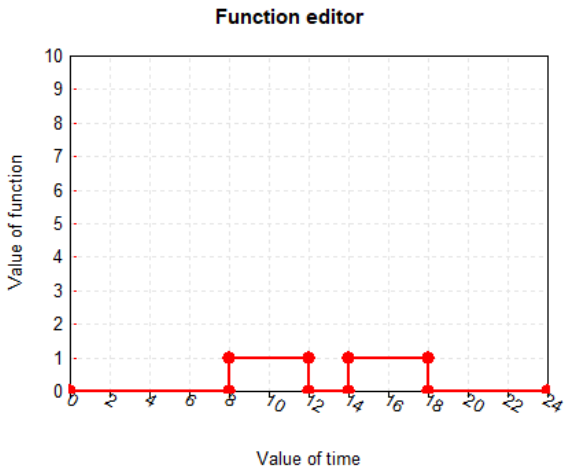


Abbildung 27: Zeitprofile für den Schultag

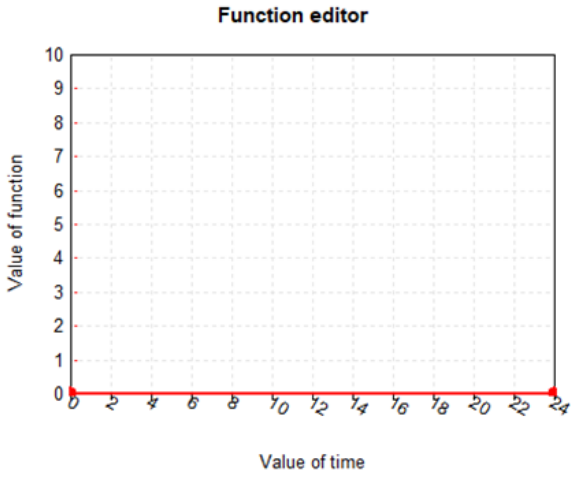


Abbildung 28: Zeitprofile für das Wochenende

Es bedeutet:

„Value of function“	Normierter Belegungsgrad
„Value of time“	Zeit, in h

Diese zwei Zeitpläne bilden eine Woche mit Hilfe des Typs 41:

Montag	Schultag
Dienstag	Schultag
Mittwoch	Schultag
Donnerstag	Schultag
Freitag	Schultag
Samstag	Wochenende
Sonntag	Wochenende

4.4.2 Innere Wärmegewinne

Als interne Wärmequellen sind Personen, Beleuchtung und Geräte (z. B. PCs, Fernseher) zu berücksichtigen [44]. Die Definition der inneren Wärmequellen erfolgt in TRNBuild.

Personen:

In der Schule gibt es 22 Klassen mit ca. 25-30 SchülerInnen und ca. 90 LehrerInnen, wie den Fotos der Schulwebseite entnommen werden kann.

In TRNBuild ist die Wärmeabgabe der Personen nach VDI 2078 [44] bei 20℃ mit dem Aktivitätsgrad II „körperlich nicht tätig bis leichte Arbeit im Stehen“ gewählt, zudem ist das Nutzerprofil für die thermische Zone „Klassenzimmer“ definiert. Die Gebäudesimulation wird unter Annahme einer maximalen Anwesenheit, d.h. für 750 Personen, durchgeführt. Die anderen thermischen Zonen werden als Zonen ohne Anwesenheit simuliert:

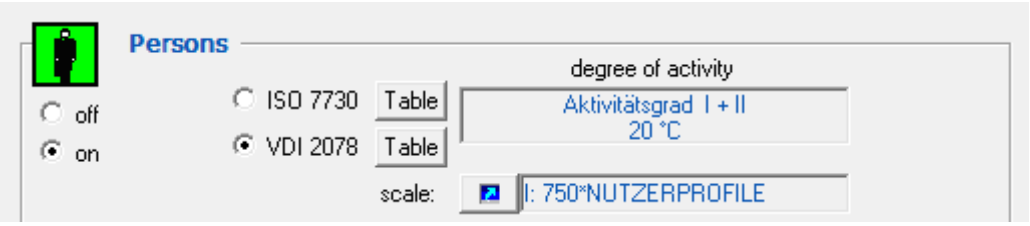


Abbildung 29: TRNBild - Eingabefenster für die internen Wärmegewinne durch die Personen in der Zone „Klassenzimmer“

Geräte:

Die Schule verfügt im Durchschnitt über 69 PCs, laut dem 3D-Plan der Schulwebseite, siehe Tabelle 13 und Abbildung 30.

Tabelle 13: Verfügbare Geräte in der Schule

Stock Nr.	**Raum**	**Anzahl der Geräte, Stück**
Erdgeschoss	EDS-Saal	30 PCs
1. Stock	Schulbibliothek	5 PCs
2. Stock	GZ-Saal	30 PCs
3. Stock	BE-Saal	4 PCs
Summe von PCs		**69 PCs**

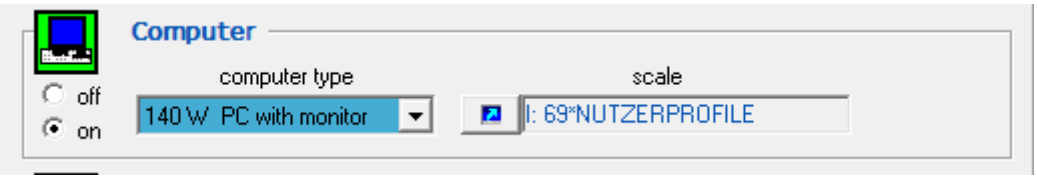


Abbildung 30: TRNBild - Eingabefenster für die internen Wärmegewinne durch die Geräte in der Zone „Klassenzimmer“

Beleuchtung:

Die Wärmegewinne durch die Beleuchtung werden für Direkt bzw. Indirekt Leuchten mit stabförmigen Leuchtstofflampen mit verlustarmen Vorschaltgeräten (VVG) berechnet. Die Beleuchtungsstärke für die Zone „Klassenzimmer“ beträgt 300 Lux laut [4].

In allen Zonen – außer im Kellergeschoss und Dachgeschoss – beträgt die Wärmeabgabe der künstlichen Beleuchtung während der Schulzeit 21,4 W/m^2. Diese wird laut Abschnitt 3.8.3-3.4.2 „Beleuchtungswärme“ [4] berechnet. Die Wärmelast wird bei „TRNBuild“ nach 25% Strahlungsanteil und 75% konvektivem Anteil zergliedert.

Folgender Zusammenhang ist wichtig festzustellen:

> *„Der konvektive Anteil der Belastung wird unmittelbar als Last wirksam, während der Strahlungsanteil über die Raumumschließkonstruktion wirksam werden kann.“, Auszug aus Planungshilfen bauteilintegrierte Heizung und Kühlung [45], Kapitel 1, s.54.*

In TRNBuild wird die Beleuchtungswärmeabgabe mit der Bodenfläche multipliziert und nach dem Nutzerprofil definiert.

4.4.3 Thermische Behaglichkeit

Dieser Faktor wird in TRNBuild durch den Bekleidungsfaktor, körperliche Aktivitäten, die Luftgeschwindigkeit und eine externe Arbeit definiert und kann für jede einzelne Zone festgelegt werden.

Die körperliche Aktivität zeigt die Wärmeabgabe der Mensch bei den verschiedenen Tätigkeiten an. Für die sitzende, leichte Tätigkeit bei den Übungen in der Schule beträgt sie 1,2 met (1 met = 58 W/m^2) laut [4].

Die Kleidung nimmt auf die Behaglichkeit einen großen Einfluss. Der Wärmedämmwert von Bekleidungskombinationen ist in der Einheit (1 clo = 0,155 (m^2 K)/W) angegeben. Das Anziehen oder Ablegen von einzelnen Kleidungsstücken beeinflusst die benötigte Raumtemperatur. Der thermische Isolationswert für Bekleidung wird mit 1 clo für die SchühlerInnen in der thermischen Zone „Klassenzimmer“ angenommen, was einer üblichen Bekleidung in der Winterzeit für SchülerInnen, bestehend aus Jacke, Hemd, Hose, Socken, Unterwäsche und Schuhen, entspricht.

Der empfohlene maximale Wert für die mittlere Luftgeschwindigkeit ist 0,1 bis 0,2 m/s laut [4], da die Personen in der Winterzeit Zugluft gegenüber empfindlich sind. Für die Simulation ist der Mindestwert von 0,1 m/s angenommen.

Im Rahmen der Simulation wird ein gleicher Komforttyp für die Zonen „Klassenzimmer“ und „Sammlungsraum“ definiert, siehe Abbildung 31. Für die Zonen ohne regelmäßigen Aufenthalt werden keine Komfortbedingungen festgelegt.

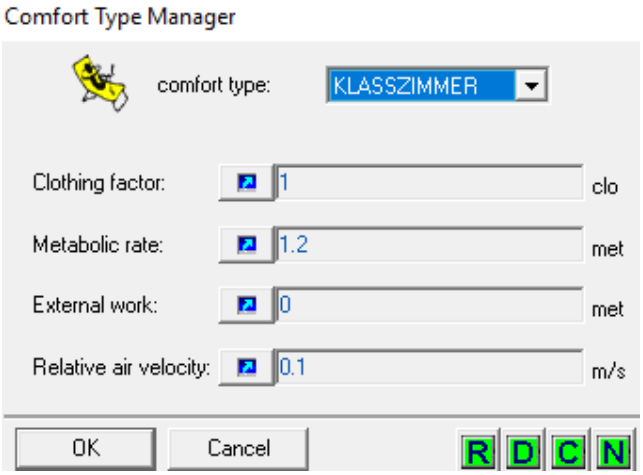


Abbildung 31: TRNBild - Eingabefenster für die thermische Behaglichkeit in der Zone „Klassenzimmer“

4.5 Heizung

Als Heizperiode gilt der Zeitraum vom 1. Oktober bis zum 30. April. Für die Simulation der Heizung wird ein einfaches Model gewählt, wobei eine idealisierte Heizungssteuerung verstanden wird. Die Heizung kann in jeder Zone durch Soll-Temperatur, Heizleistung und Befeuchtung definiert werden. Bei der Definition der Heizleistung kann zwischen „Unlimited“ – d.h. unbegrenzt – und „Limited“, also begrenzt, im Hinblick auf eine bestimmte Leistung pro Stunde unterschieden werden.

Die Heizung für jede beheizte Zone des betrachteten Gebäudes erfolgt mit einer unlimitierten Heizleistung, dadurch wird die maximale Heizleistung bestimmt. Zur Einhaltung des Temperatursollwertes wird ohne Verzögerung die benötigte Heizleistung zur Verfügung gestellt, d.h. die Innenraumtemperatur fällt nie unter die festgelegte Solltemperatur für die jeweilige Zone. Aufgrund dieses idealisierten Heizungsmodells lässt sich annehmen, dass die Heizleistung der Heizlast gleich ist. Der jährliche Heizwärmebedarf ergibt sich als Integral über den Heizlastverlauf über das Jahr hinweg.

Die Temperaturregelung in der Zone „Klassenzimmer“ wird durch Zweipunktregler mit Schalthysterese geregelt. Die Sollwert-Temperatur in der Zone „Klassenzimmer“ beträgt 21,5℃ für den Schultag und 18℃ für die Nachtabsenkung. Für die thermische Zone ohne regelmäßigen Aufenthalt wird ein Sollwert ohne Nachtabsenkung von 19℃ festgelegt.

Der Thermostat schaltet das Heizgerät in der Zone „Klassenzimmer“ bei 20℃ (Regelsignal auf 1) ein und bei Überschreiten der 23℃ (Regelsignal auf 0) wieder aus, die Hysterese beträgt 3℃, siehe Abbildung 32:

Parameter | Input | Output | Derivative | Special Cards | External Files | Comment

1	Upper input temperature Th	21.5	C	More...
2	Lower input temperature Tl	0	C	More...
3	Monitoring temperature Tin	0	C	More...
4	Input control function	0	-	More...
5	Upper dead band dT	1.5	Temp. Difference	More...
6	Lower dead band dT	-1.5	Temp. Difference	More...

Abbildung 32: Eingabefenster für die Definition des Hysterese Reglers für die Heizung

Die innere Raumtemperatur wird mit „Lower input temperatur Tl“ verknüpft. Der Maximalwert ist der Sollwert „Upper input temperature Th“ plus Abweichung „Upper dead band dT“. Der Minimalwert ist der Sollwert „Upper input temperature Th“ plus Abweichung „Lower dead band dT“. Das bedeutet, dass der Ist-Wert im Bereich zwischen Maximal- und Minimalwert schwanken darf.

4.6 Lüftung

Laut Angabe wird in der Schule im Sommer und im Winter der Luftaustausch nur durch die natürliche Lüftung realisiert – eine mechanische Lüftung ist nicht vorhanden. Deshalb wird für die Gebäudesimulation der Luftwechsel in Bezug auf die Raumluftqualität ohne mechanisch zugeführte Luft betrachtet.

Unter Fensterlüftung versteht man den Luftaustausch durch das Öffnen von Fenstern. Es wird unterschieden zwischen Stoßlüftung und Dauerlüftung. Wenn die Fenster kurzfristig geöffnet werden, spricht man von Stoßlüftung, bei ständig oder langzeitig geöffneten Fenstern liegt eine Dauerlüftung [4] vor.

Die Gebäudesimulation wird mit zwei Lüftungskonzepten für die Zone „Klassenzimmer“ bei Fensterlüftung durchgeführt.

Bei der ersten Variante wird die Luftwechselrate für die Zone „Klassenzimmer“ aufgrund eines hygienisch erforderlichen Luftvolumenstroms pro Person berechnet, bei der zweiten Variante wird die Mindestluftwechselrate herangezogen. Die Berechnungen sind für beide Varianten im Abschnitt 4.6.2 dargestellt.

Für die Zone „Sammlungsraum“ beträgt die Mindestluftwechsel-Zahl von 1,0 h^{-1} nach [40]. Für die Zone „Sanitärraum“ ist eine Mindestluftwechsel-Zahl von 1,5 h^{-1} nach [40] festgelegt, ausgehend davon, dass die Sanitärräume die Zuluft aus den angrenzenden Bereichen durch Überströmöffnungen in den Türen bekommen.

In den Zonen ohne regelmäßigen Aufenthalt „Stiege 1“, „Stiege 2“, „Gang“, „Dachgeschoss“ und „Kellergeschoss“ wird ein Luftwechsel von 0,2 h^{-1} durch Undichtigkeiten und periodisch geöffnete Fenster erreicht. Die Berechnung der Infiltration wird in dem nachfolgenden Abschnitt 4.6.1 betrachtet.

4.6.1 Infiltration

Der Luftvolumenstrom infolge der Infiltration durch die Gebäudehülle wird nach [40] berechnet.

$$\dot{V}_{\mathrm{inf}} = 2\, V_{\mathrm{G}}\, n_{50}\, e\, \epsilon \tag{6}$$

V_{G}	Gebäudevolumen, in m^3
n_{50}	Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz
e	Abschirmungskoeffizient für verschiedene Gebäudestandorte
ϵ	Höhenkorrektur

h Höhe, in m

Die Höhenkorrektur ϵ ist bei h > 10 m nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$\epsilon = \left(\frac{h}{10}\right)^{4/9} \tag{7}$$

Für die Schule wurden nachstehende Annahmen getroffen:

$n_{50} = 4{,}0$ für Nicht-Wohngebäude mit dem Grad der Luftdichtheit der Gebäudehülle „Dicht“

$e = 0{,}02$ „Gute Abschirmung“, d.h. es sind Gebäude mittlerer Höhe in Stadtzentren

$\epsilon = 1{,}23$ wurde nach der Formel (7) bestimmt.

Daraus folgt die Infiltration durch die Gebäudehülle mit einer Luftwechselrate von 0,2 h^{-1}.

4.6.2 Fensterlüftung für die Zone „Klassenzimmer“

Variante 1:

Laut [4] ist es, um den Richtwert von 1000 ppm CO_2 nicht zu überschreiten, notwendig, einen Außenluftvolumenstrom in Abhängigkeit vom Alter der Kinder von 25 bis 34 m^3/h pro Person anzunehmen.

Für die Simulation wird ein hygienischer Luftvolumenstrom 35 m^3/h pro Person für die Schulklasse nach [46] angenommen, was einem Luftwechsel von 5,4 h^{-1} bei einer Klassengröße von 30 Personen entspricht.

Automatisierungskonzepte zur Fensterlüftung für das ganze Gebäude werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht entwickelt. Für die Erstellung des Regelalgorithmus der Fensterlüftung für das ganze Jahr sollen mehrere Parameter in Verbindung gesetzt werden, und zwar die Außen-/Innentemperatur, die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung und die maximale Öffnungsweite der Fenster. Vor allem bei niedrigen Außentemperaturen ist es nötig, die thermische Behaglichkeit zu berücksichtigen. Der Regelalgorithmus kann mit Hilfe von externen Programmen, z.B. „MatLab“, realisiert und mit „TRNSYS Simulation“ verknüpft werden.

Aus diesem Grund wird die Annahme getroffen, dass es theoretisch möglich ist, die berechnete Luftwechselrate von 5,4 h^{-1} durch die Fensterlüftung im Laufe des Jahres zu gewährleisten, da laut Angabe eine mechanische Lüftung nicht vorhanden ist.

Im TRNBild unter „Infiltration Type Manager“ wird die Luftwechselrate von 5,4 h^{-1} für die Variante 1 mit dem Zeitprofil verknüpft, siehe Abbildung 33:

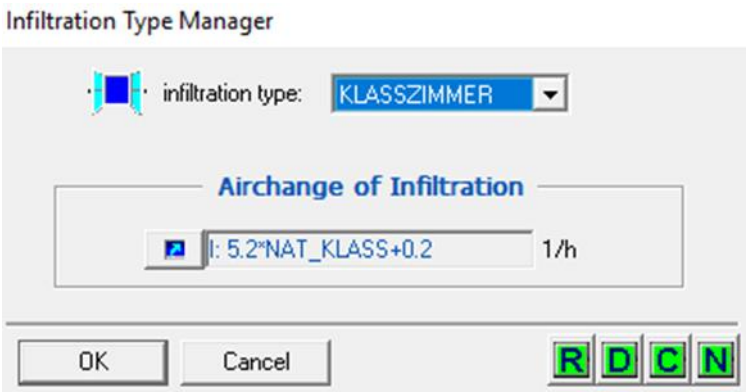


Abbildung 33: TRNBild – Eingabefenster für die Natürliche Lüftung: Variante 1

Variante 2:

Die Mindestluftwechselrate entspricht 1,8 h^{-1} laut [47], die zur Berechnung des Heizwärmebedarfs und Kühlbedarfs gemäß [48] dient. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird nur der erste Parameter berechnet.

Ausgehend von dieser Luftwechselrate ergibt sich ein Luftvolumenstrom von 12 m^3/h pro Person, was nach der Tabelle 3.9.4-3 [4] der Kategorie IDA4 „Niedrige Raumluftqualität“ entspricht.

Die Abbildung 34 zeigt die für die Variante 2 festgelegten Parameter:

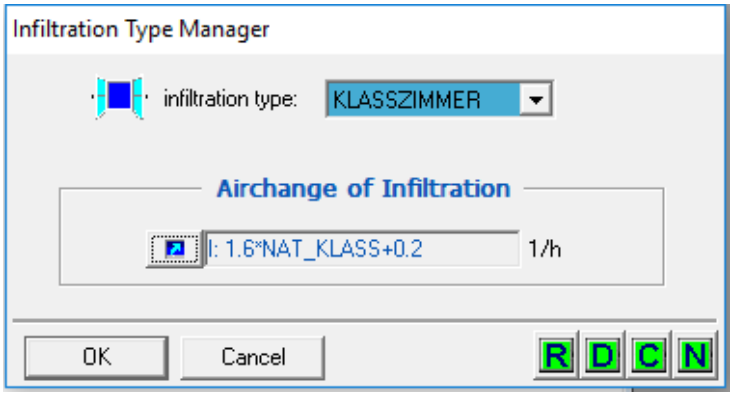


Abbildung 34: TRNBild – Eingabefenster für die natürliche Lüftung der Zone „Klassenzimmer“: Variante 2

Um sicherzustellen, dass es möglich ist, den Mindestluftwechsel in der Zone „Klassenzimmer“ (Variante 2) zu realisieren, werden zwei Berechnungsverfahren (Verfahren A und Verfahren B) zur Bestimmung der entstehenden Luftwechsel bei der Stoßlüftung und der Dauerlüftung betrachtet und simuliert. Zu diesem Zweck wird nur ein Klassenzimmer simuliert. Es wird grob angenommen, dass, wenn in einem Klassenzimmer der

Mindestluftwechsel erreicht oder überschritten wird, in der Folge der festgelegte Mindestluftwechsel von 1,8 h^{-1} für die Zone „Klassenzimmer“ ebenfalls realisierbar ist.

Es werden überdies zwei Begriffe eingeführt: „Hauptsimulation“ und „Nebensimulation“.

Unter „Hauptsimulation“ wird in diesem Zusammenhang die Simulation vom ganzen Gebäude verstanden. Es wird dabei der Luftwechsel für die Zone „Klassenzimmer“ laut den Varianten 1 und 2 berücksichtigt. Das heißt, bei der ersten Simulation vom ganzen Gebäude wird der Luftwechsel für die Zone „Klassenzimmer“ laut der ersten Variante angenommen und bei der zweiten Simulation wird der Luftwechsel für dieselbe Zone laut der zweiten Variante herangezogen. Der Luftwechsel für alle anderen Zonen ändert sich laut dem Abschnitt 4.6 „Lüftung“ nach dem festgelegten Zeitplan in Abschnitt 4.4.1 „Nutzerprofil der Schule“.

Unter „Nebensimulation“ wird die Simulation für ein Klassenzimmer mit Hilfe von Verfahren A und B verstanden. Sie ist nicht mit der Hauptsimulation verbunden und dient zur Veranschaulichung der entstehenden Luftwechsel.

Bei Verfahren A werden die tatsächlichen Luftvolumenströme durch das Fensteröffnen für ein Klassenzimmer und daraus folgend die Luftwechsel mittels der treibenden Kraft bestimmt und anschließend in TRNSYS simuliert.

Bei Verfahren B wird die Öffnungsfläche zur Sicherung des Mindestluftwechsels für die Dauerlüftung und Stoßlüftung in Bezug auf die Personenbelegung des Raumes und auf die Grundfläche des Raumes bestimmt.

Verfahren A für die 2. Variante:

Die Stoßlüftung wird für ein Jahr für ein Klassenzimmer simuliert. Aufgrund thermischer Komfortbedingungen, die im Winter bei lange Zeit geöffneten Fenstern verschlechtert werden, wird die Dauerlüftung nur für die Sommerzeit und nach Bedarf im Mai akzeptiert und betrachtet. Die Dauerlüftung kann in der Sommerzeit als Nachtlüftung unter der Berücksichtigung der notwendigen Sicherheitserfordernisse gegen Sturm, Schlagregen und Einbruch angewendet werden.

Die Simulation der Dauerlüftung wird mittels eines Hysterese-Reglers durchgeführt, unter der Bedingung, dass die Dauerlüftung in der Sommerzeit nur dann sinnvoll ist, wenn die Außentemperatur unter der Innentemperatur laut [46] liegt.

Die Öffnung der Fenster während der Schulzeit wird manuell durch die LehrerInnen durchgeführt, die Nachtlüftung übernimmt das Dienstpersonal.

Der Luftwechsel, der durch Stoßlüftung und Dauerlüftung erreicht werden kann, wird mit Hilfe der unten dargestellten Methode laut [49] erzielt:

$$Q_\mathrm{v} = 3{,}6 \cdot 500\, A_\mathrm{ow}\, V^{0{,}5} \tag{8}$$

$$V = C_\mathrm{t} + C_\mathrm{wind}\, V_\mathrm{met}^2 + C_\mathrm{st}\, H\, \mathrm{abs}(T_\mathrm{i/m} - T_\mathrm{a}) \tag{9}$$

$$A_\mathrm{ow} = C_\mathrm{k}(\alpha)\, A_\mathrm{w} \tag{10}$$

Dies bedeutet:

Q_v	Luftvolumenstrom, in m^3/h
A_ow	Fensteröffnungsfläche, in m^2
$C_\mathrm{t} = 0{,}01$	Berücksichtigung der Windturbulenzen
$C_\mathrm{wind} = 0{,}001$	Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit
$C_\mathrm{st} = 0{,}0035$	Berücksichtigung des thermischen Auftriebs
H	Höhe der freien Flächen des Fensters, in m
V_met	Meteorologische Windgeschwindigkeit, in m/s
$T_\mathrm{i/m}$	Innenraumtemperatur oder mittlere Wandtemperatur, in ℃
T_a	Außenlufttemperatur, in ℃
A_w	Fläche des vollständig geöffneten Fensters , in m^2
$C_\mathrm{k}(\alpha)$	Verhältnis des Luftvolumenstroms durch ein gekipptes Fenster zum Volumenstrom durch das vollständig geöffnete Fenster

Laut [49] Abschnitt 6.5 „Luftvolumenströme durch Fensteröffnen“ beträgt

$C_k(\alpha) = 0{,}25$ bei Öffnungswinkel von 15°,

$C_k(\alpha) = 0{,}46$ bei Öffnungswinkel von 30°.

Die beiden Berechnungen werden nach dem gleichen Prinzip vorgenommen. Der Unterschied liegt in der Bestimmung der Temperaturdifferenz. Bei der Stoßlüftung ändert sich die Wandtemperatur nur gering, es gilt dabei, die Temperaturdifferenz von Raumtemperatur und Außentemperatur zu berechnen. Nach [50] ist bei der Dauerlüftung die Wandtemperatur nicht konstant, und die Temperaturdifferenz wird zwischen mittlerer Wandtemperatur und Umgebungstemperatur berechnet.

Die Abbildung 35 zeigt die zusätzlich entwickelte Simulationsstruktur für ein Klassenzimmer für die Verfahren A, was durch orange Linien verknüpft ist. Die grauen Linien sind relevant für die Hauptsimulation des ganzen Gebäudes.

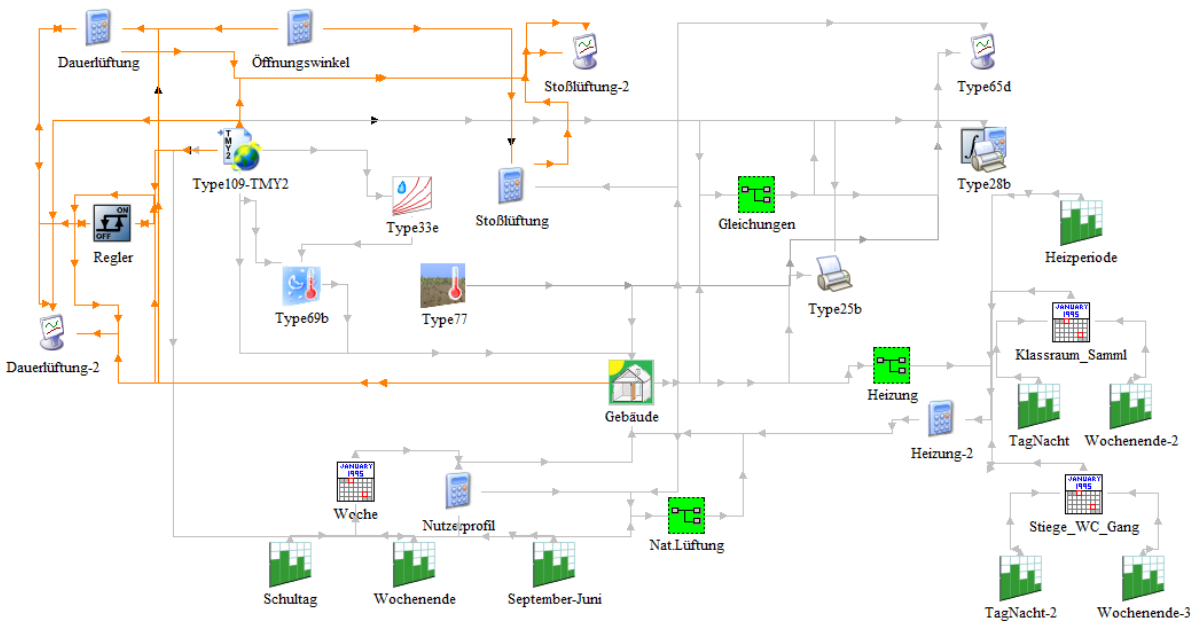


Abbildung 35: Zusätzlich entwickelte Simulationsstruktur für ein Klassenzimmer für Verfahren A

Bei der Simulation im Simulation Studio von TRNSYS werden die folgenden Klimadaten, Windgeschwindigkeit und Außentemperatur, dem Typ „Weather Data“ TYPE 109-TMY2 für „Wien Hohe Warte“ und die tatsächliche Innenraumtemperatur in der Zone „Klassenzimmer“ der „Muli-Zone Building“ TYPE 56 entnommen.

Diese Daten werden mittels „Equation“ mit den oben beschriebenen Gleichungen (8) - (10) mit dem Hysterese-Regler durch die Verknüpfungslinie verbunden. Der Regler dient in diesem Fall zum Vergleich des Unterschiedes zwischen Außen- und Innentemperatur, d.h. die Regler sind nur dann eingeschaltet und die Dauerlüftung ist nur dann im Sommer sinnvoll, wenn die Außentemperatur unter der Innentemperatur liegt.

Die erforderliche Öffnungsfläche der Fenster unterscheidet sich im Sommer und im Winter. Der Luftvolumenstrom durch die natürliche Lüftung ist von den Fenstertypen, der Temperaturdifferenz, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung abhängig.

Die treibende Kraft für den Luftaustausch bei Fensterlüftung entsteht durch den thermischen Auftrieb zwischen Innen- und Außenumgebung und durch Winddruck.

Im Sommer sind die Außen- und Innentemperaturen ungefähr gleich. Die Stärke der Fensterlüftung hängt im Wesentlichen vom Windanfall ab, deshalb sollen die großen Fensterflächen geöffnet werden können, um den ausreichenden Luftwechsel in den Räumen auch bei kleinsten Temperaturdifferenzen und Windgeschwindigkeiten zu erreichen. Im Winter sind die Temperaturdifferenz und die Windgeschwindigkeit höher als im Sommer, daher wird in der Winterzeit eine wesentlich kleinere Öffnungsfläche für den ausreichenden Luftaustausch in den Räumen als im Sommer benötigt.

Auch bei der freien Fensterlüftung im Winter gilt es, die thermische Behaglichkeit zu berücksichtigen, da die Außenluft ohne thermische Vorbereitung direkt in die Räume kommt, was bei den niedrigen Außentemperaturen zu Behaglichkeitsproblemen führen kann.

Die Abbildungen 36 - 40 stellen die Änderung des Luftwechsels bei den in verschiedenen Winkeln gekippten Fenstern bei Stoßlüftung im Laufe eines Jahres und bei Dauerlüftung von Mai bis August in einem Klassenzimmer dar. Diese Abbildungen lassen erkennen, dass der Mindestluftwechsel von 1,8 h^{-1} in dem Klassenzimmer bei den gekippten Fenstern im Winkel von 30° umsetzbar ist.

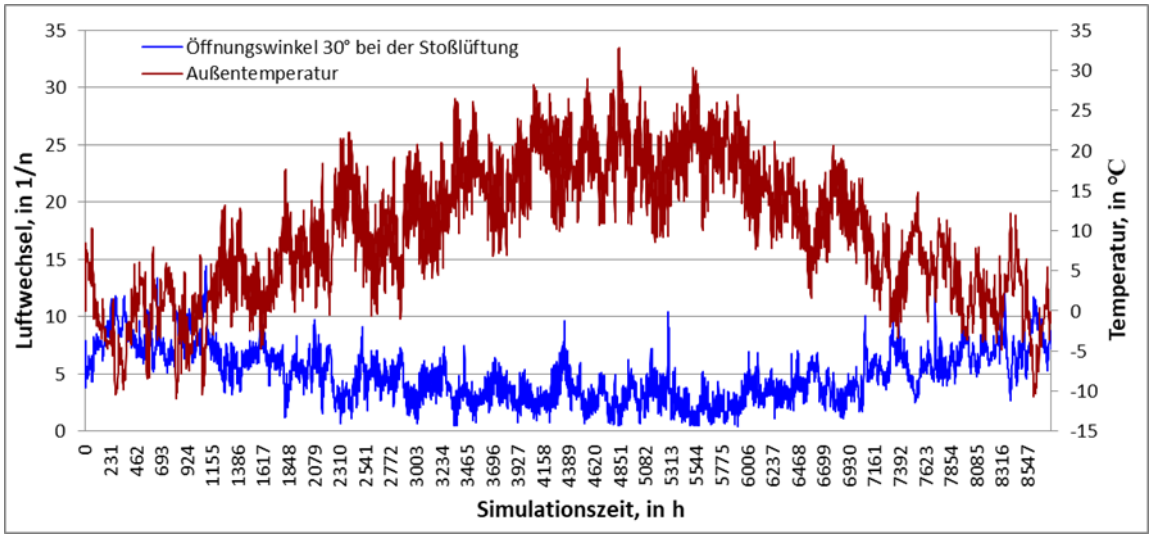


Abbildung 36: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 30° durch Stoßlüftung über ein Jahr in einem Klassenzimmer

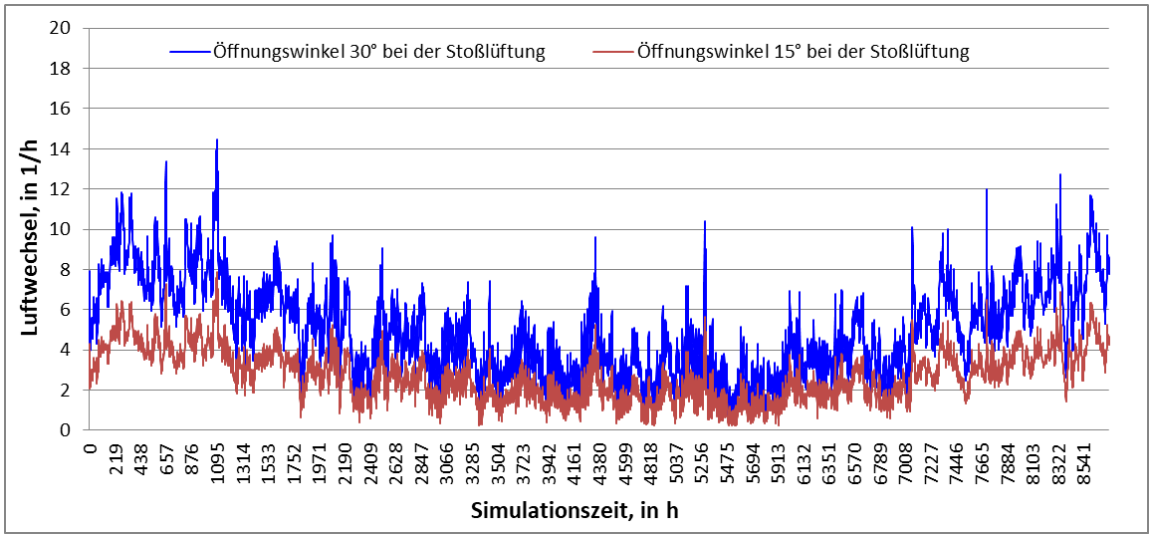


Abbildung 37: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 15° und 30° durch Stoßlüftung über ein Jahr in einem Klassenzimmer

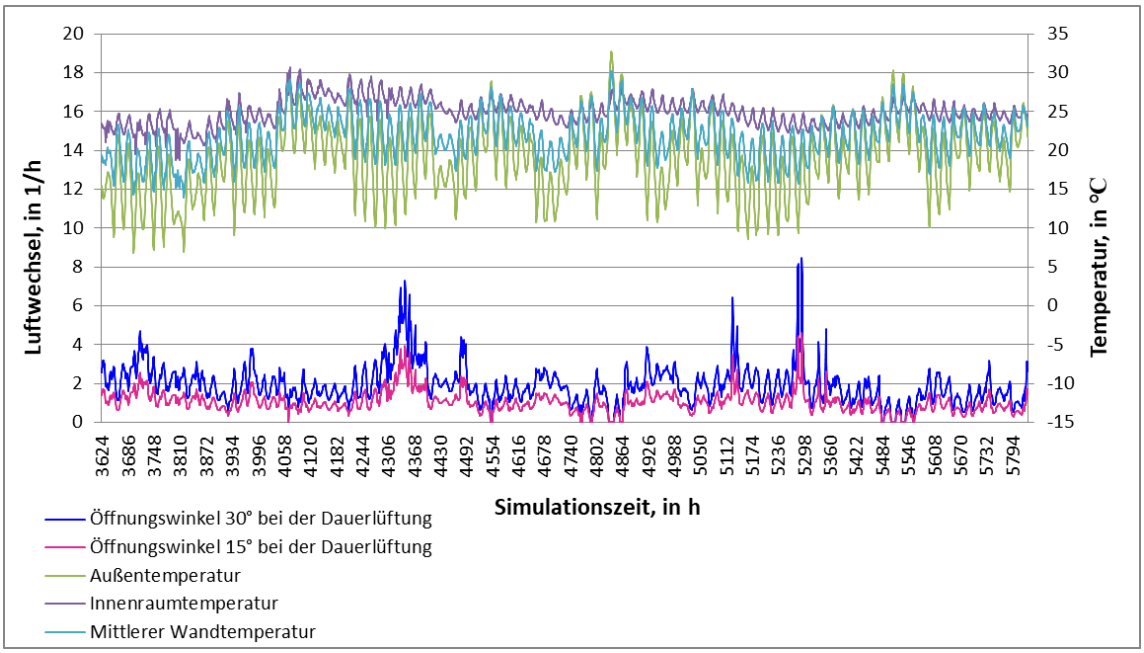


Abbildung 38: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 15° und 30° bei Dauerlüftung von Mai bis August in einem Klassenzimmer

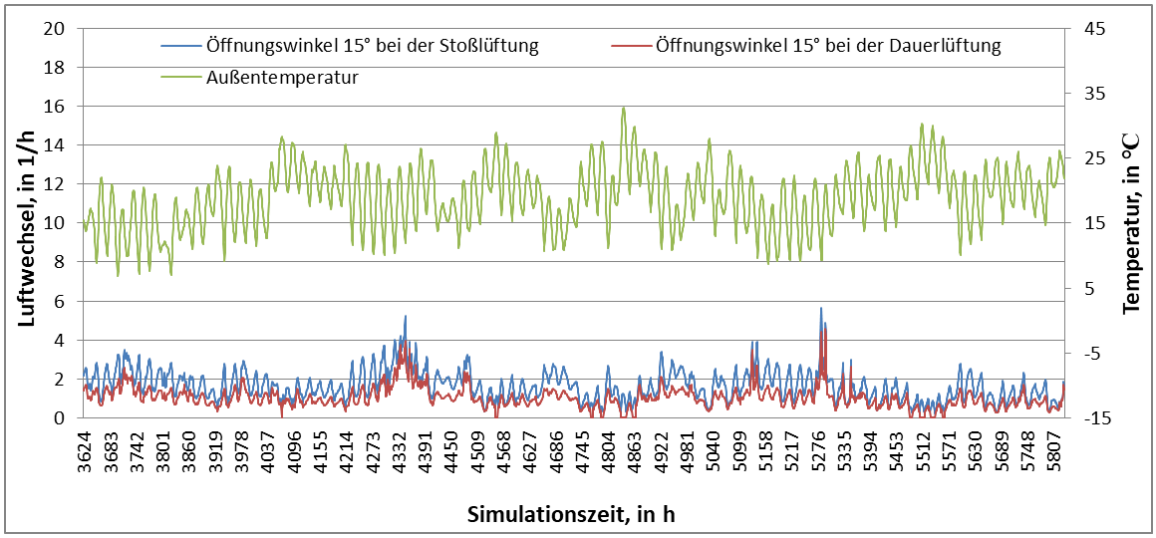


Abbildung 39: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 15° bei Stoßlüftung und Dauerlüftung von Mai bis August in einem Klassenzimmer

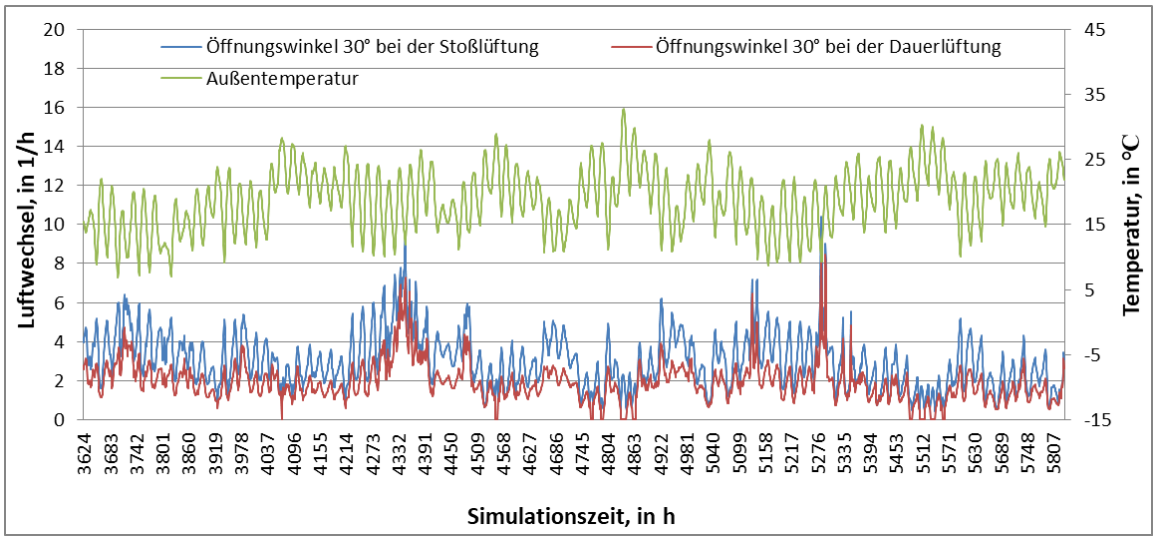


Abbildung 40: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 30° bei Stoßlüftung und Dauerlüftung von Mai bis August in einem Klassenzimmer

<u>Verfahren B für die 2.Variante:</u> Mindestöffnungsfläche für die Dauerlüftung und die Stoßlüftung.

Nach [4], [51] wird die Berechnung der notwendigen Anzahl der Fenster zur Sicherung des Mindestluftwechsels durchgeführt.

- Dauerlüftung

Die Berechnung der Öffnungsflächen bei der Dauerlüftung „bezieht sich auf die Personenbelegung des Raumes“ [51].

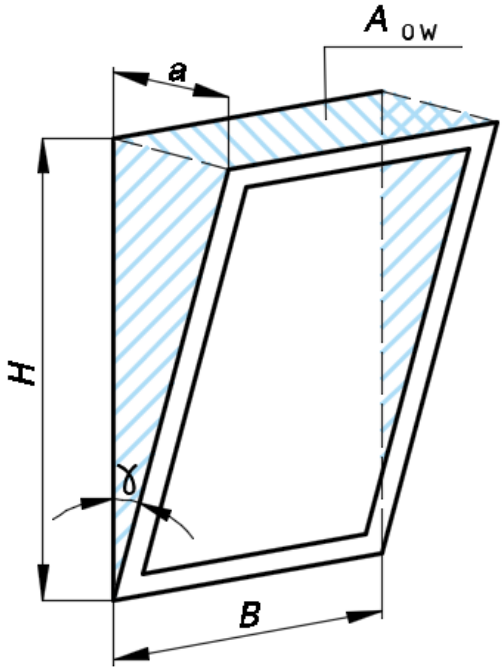


Abbildung 41: Gekipptes Fenster im Winkel von γ

Beim gekippten Fenster im Winkel von 30° ergibt sich die Zuluft- / Abluftfläche für Fenster, sieh die Abbildung 41 aus:

$$a = \sqrt{2\,H^2 - 2\,H^2\cos(\gamma)} = \sqrt{2H^2(1-\cos(\gamma))} \tag{11}$$

$$A_{\mathrm{ow}} = H^2\sin(\gamma) + B\,\sqrt{2H^2(1-\cos(\gamma))} \tag{12}$$

$$A_{\mathrm{ow}} = (2{,}5\mathrm{m})^2 \cdot \sin(30) + 1{,}3\mathrm{m}\,\sqrt{2\cdot(2{,}5\mathrm{m})^2\cdot(1-\cos(30))} = 4{,}8\mathrm{m}^2 \tag{13}$$

Dies bedeutet:

a	Spaltbreite, in m
B	Breite des Fensters, in m
H	Höhe des Fensters, in m

γ	Öffnungswinkel, in Grad
A_{ow}	Fensteröffnungsfläche, in m^2

Die erforderliche Fensterfläche wird ausgehend von 0,35 m^2 pro Person laut [51] für eine einseitige Lüftung errechnet.

Für die Berechnung wird ein Klassenzimmer mit 30 Personen herangezogen, das eine durchschnittliche Grundfläche von 46 m^2 und drei Fenster mit den Größen 1,3 x 2,5 m hat.

Tabelle 14: Erforderliche Anzahl der Fenster bei der Dauerlüftung für das betrachtete Klassenzimmer

Öffnungswinkel, in Grad	**Erforderliche Fensterfläche, in m^2/anwesende Person**	**Erforderliche Fensterfläche bei 30 Personen**	**Erforderliche Anzahl der Fenster**
Gekippte Fenster im Winkel von 30°	0,35	10,5	2,0

Die Tabelle 14 zeigt, dass der Mindestluftwechsel bei der Dauerlüftung für das betreffende Klassenzimmer bei den im Winkel von 30° gekippten Fenstern im Mai und Juni gewährleistet werden kann. Da laut den zur Verfügung gestellten Plänen die meisten Klassenzimmer die erforderliche Fensterfläche, bezogen auf die Anzahl der Personen, haben, kann angenommen werden, dass für alle Klassenzimmer in dieser Schule ein Mindestluftwechsel realisierbar ist.

- Stoßlüftung

  „Die Berechnung der Öffnungsflächen bei Stoßlüftung bezieht sich auf die Grundfläche des Raumes.“, Auszug aus Lüftung. Technische Regeln [51], s.15.

In diesen Normen wird eine Methode vorgeschlagen, bei welcher die Berechnung der Stoßlüftung für die vollständig geöffneten Fenster durchgeführt wird.

Die Öffnungsfläche für ein geöffnetes Fenster ergibt sich wie folgt:

$$A_{\mathrm{w}} = B \cdot H = 1{,}3\mathrm{m} \cdot 2{,}5\mathrm{m} = 3{,}25\mathrm{m}^2 \tag{14}$$

Tabelle 15: Erforderliche Anzahl der Fenster bei Stoßlüftung für das betrachtete Klassenzimmer

Öffnungswinkel, in Grad	Erforderliche Fensterfläche, in m^2/(10 m^2 Grundfläche)	Erforderliche Fensterfläche bei 46 m^2 Grundfläche	Erforderliche Anzahl der Fenster
Vollständig geöffnete Fenster	1,05	4,85	2,0

Die Tabelle 15 zeigt, dass die Stoßlüftung für das betreffende Klassenzimmer schon mit zwei Fenstern realisierbar ist. Tatsächlich verfügt dieses Klassenzimmer über drei Fenster.

4.7 Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der Gebäudesimulation

Ursprünglich wurde die Heizperiode von 1. Oktober bis 30. April (Abschnitt 4.5) angenommen. Nach der ersten Simulation wurde die Heizperiode geändert und festgelegt, dass die Heizung im September und Mai bei Außentemperaturen unter 15°C eingeschaltet wird.

In den Abbildungen 42 - 46 sind die Ergebnisse des Verlaufs der Innenraumtemperatur in allen betrachteten Zonen über ein Jahr hinweg dargestellt. Die Abbildungen 42 - 43 machen erkennbar, dass die Innentemperatur in der Zone „Klassenzimmer“ in der Schulzeit von Mai bis Juni 26°C überschreitet.

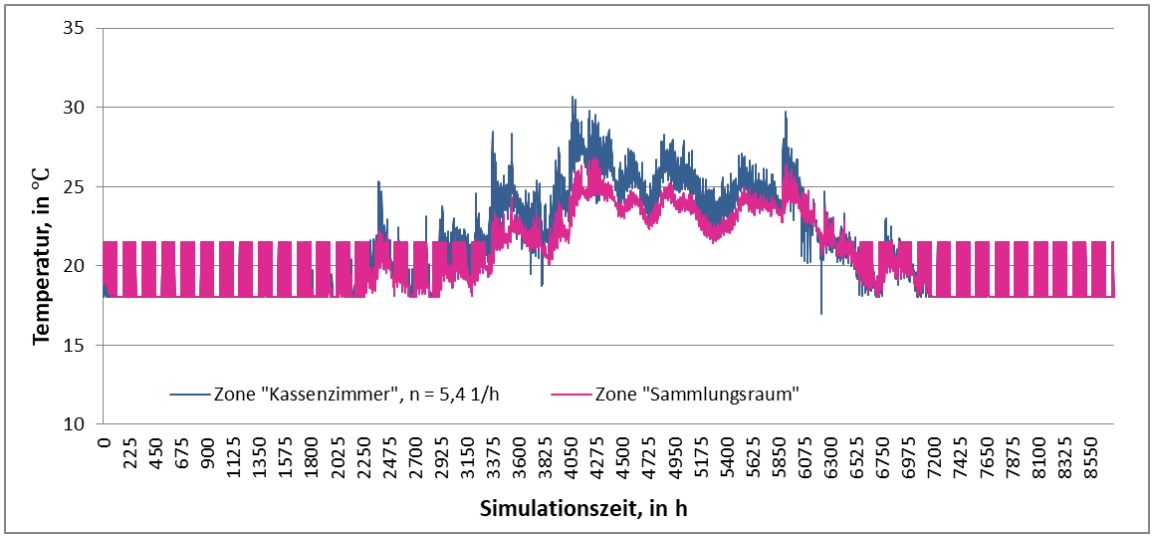


Abbildung 42: Verlauf der Innenraumtemperatur in der Zone „Klassenzimmer“ bei einer Luftwechselrate von 5,4 h^{-1} und in der Zone „Sammlungsraum“

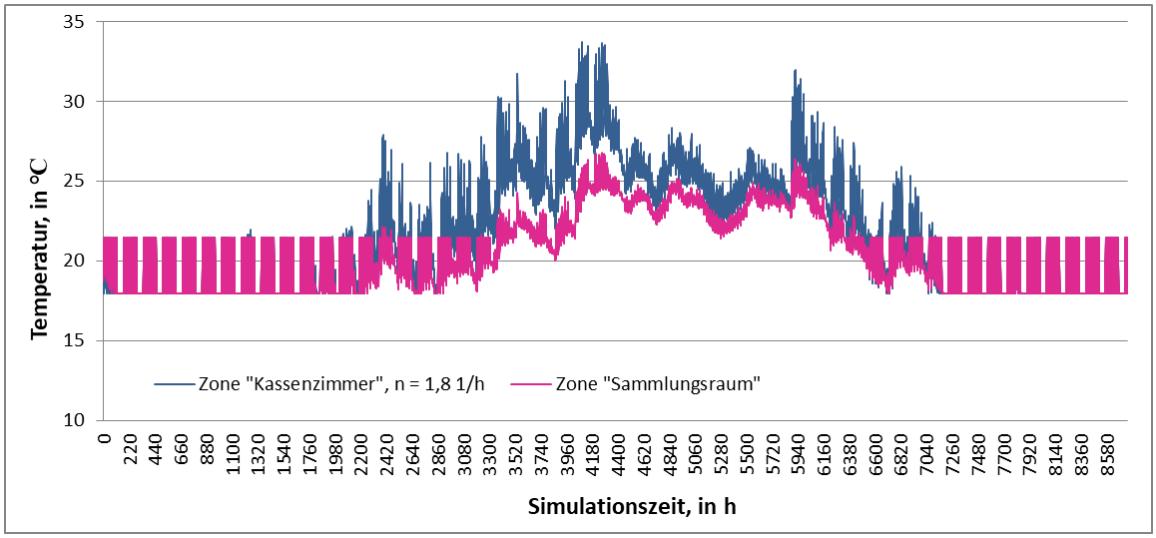


Abbildung 43: Verlauf der Innenraumtemperatur in der Zone „Klassenzimmer“ bei einer Luftwechselrate von 1,8 h^{-1} und in der Zone „Sammlungsraum“

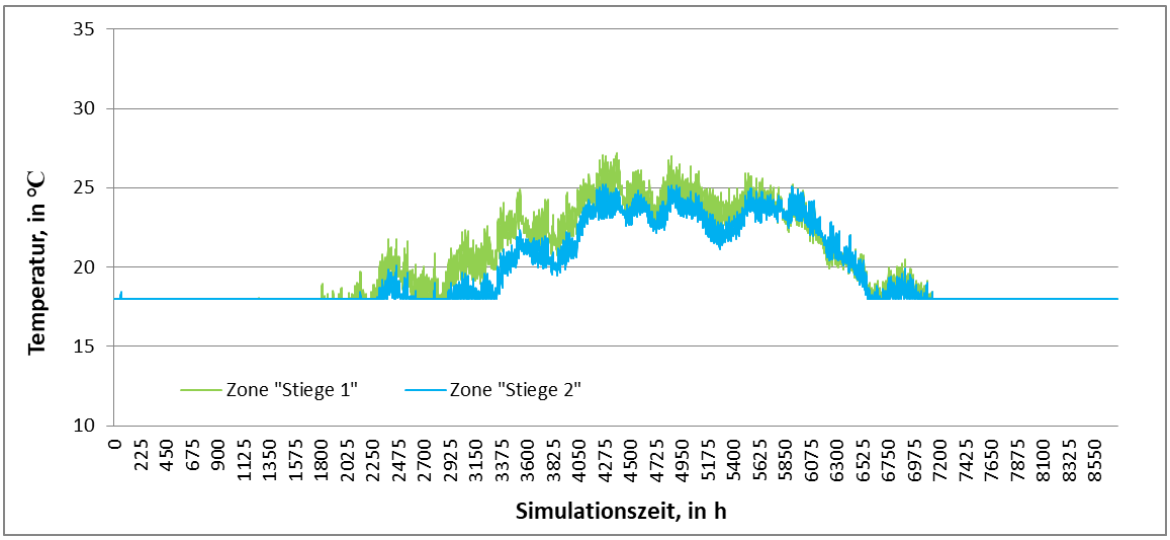


Abbildung 44: Verlauf der Innenraumtemperatur in den Zonen „Stiege 1“ und „Stiege 2“

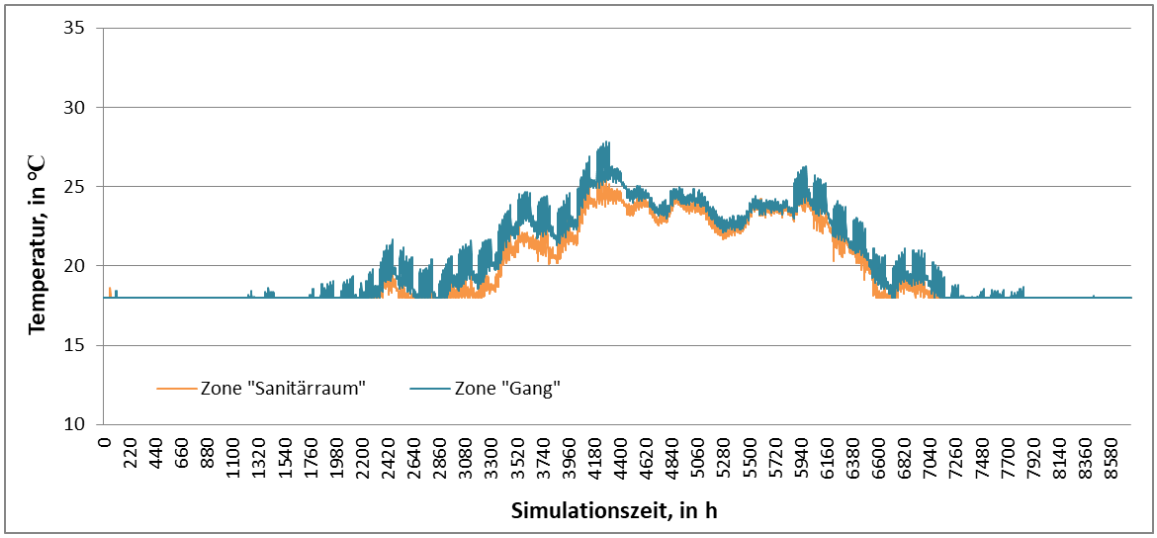


Abbildung 45: Verlauf der Innenraumtemperatur in den Zonen „Gang“ und „Sanitärraum“

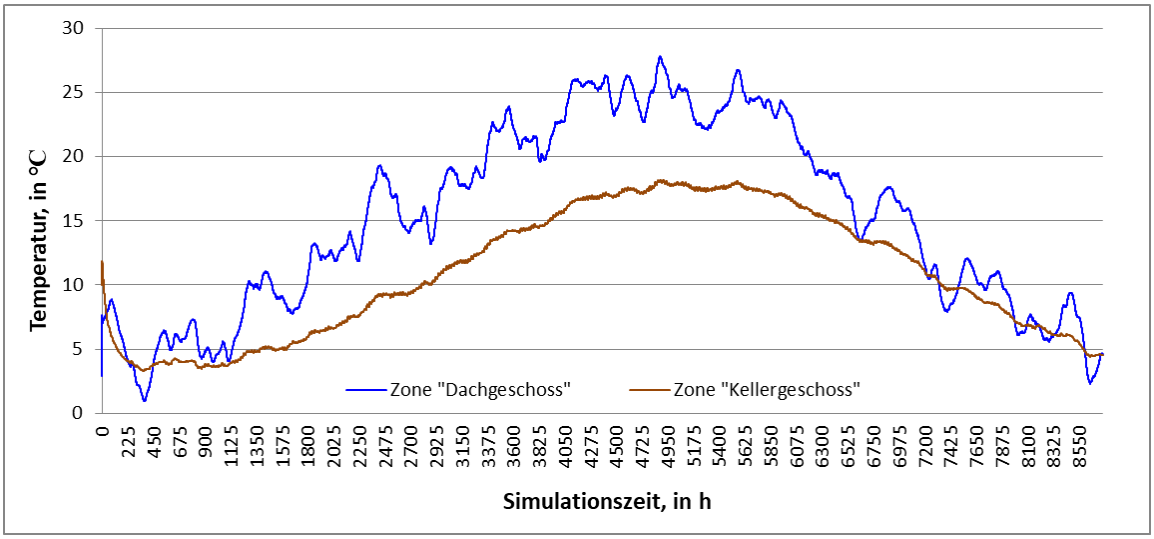


Abbildung 46: Verlauf der Innenraumtemperatur in den Zonen „Dachgeschoss“ und „Kellergeschoss“

Laut den vorliegenden Angaben verfügt die Schule über keine mechanische Lüftung, weshalb die Betrachtung dessen notwendig ist, ob es möglich ist, eine komfortable Raumbedingung in der Zone „Klassenzimmer“ zu erreichen, ohne RLT-Anlagen einbauen zu müssen. Aus diesem Grund wurde für die Simulation mit der ersten Variante der ganze Luftvolumenstrom, der aus hygienischen Gründen den Klassenzimmern zugeführt werden sollte, durch die Fensterlüftung gewährleistet. Die Ergebnisse der Simulation und der parallel durchgeführten Analyse der Stoßlüftung und Dauerlüftung zeigen auf, dass die Fensterlüftung mit einem Luftwechsel von 5,4 h^{-1} nicht realisierbar ist, da die Anforderungen für die thermische Behaglichkeit in der Winterzeit nicht erfüllt sind, vor allem für die SchülerInnen, die neben den Fenstern sitzen. Demgegenüber führen häufig geöffnete Fenster in der Winterzeit zu hohen Wärmeverlusten und folglich zur erhöhten Energiekosten,

da die Wärmerückgewinnung bei Fensterlüftung nicht möglich ist. Der monatliche Heizwärmebedarf nimmt infolgedessen zu.

Die zweite Variante mit einem Mindestluftwechsel von 1,8 h^{-1} ergab zwar einen niedrigeren Wert für den Heizwärmebedarf im Vergleich zur Variante 1, aber die Raumluftqualität ist in der Winterzeit bei Mindestluftwechsel laut Abschnitt 4.6.2 als „niedrig“ einzuschätzen.

Der Vergleich der monatlichen Wärmeverluste durch die Fensterlüftung und die Infiltration für die beiden Varianten der Gebäudesimulation ist in Abbildung 47 dargestellt:

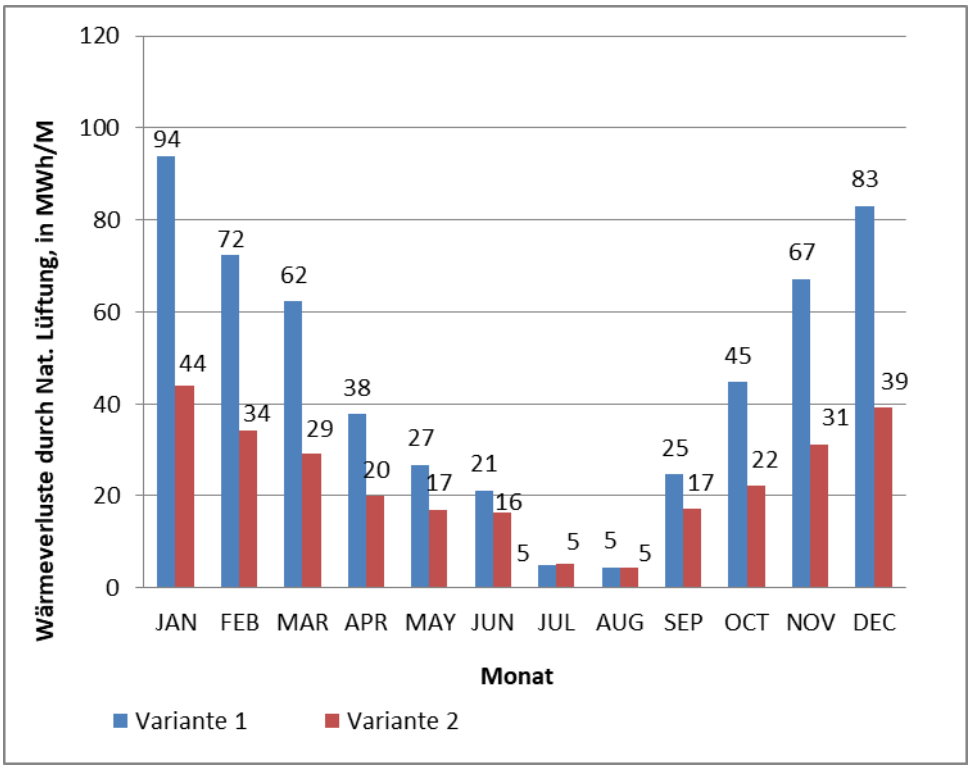


Abbildung 47: Monatliche Wärmeverluste durch die Fensterlüftung und die Infiltration für die zwei Hauptsimulationsvarianten

Die solaren Wärmegewinne und internen Wärmegewinne in der Schule bei der dynamischen Gebäudesimulation sind in den Abbildungen 48 - 49 zusammengefasst. Keine internen Wärmegewinne entstehen in den Monaten Juli und August, da laut dem Zeitplan aus Abschnitt 4.4.1 Sommerferien angenommen wurden, weshalb die Schule gesperrt ist.

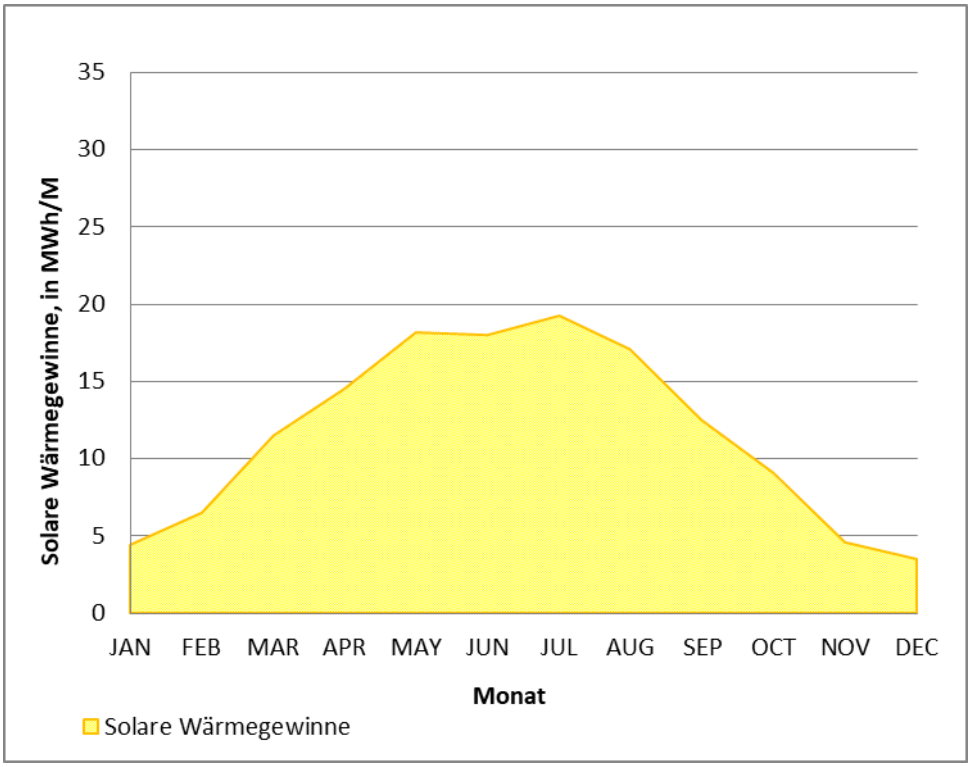


Abbildung 48: Monatliche solare Wärmegewinne

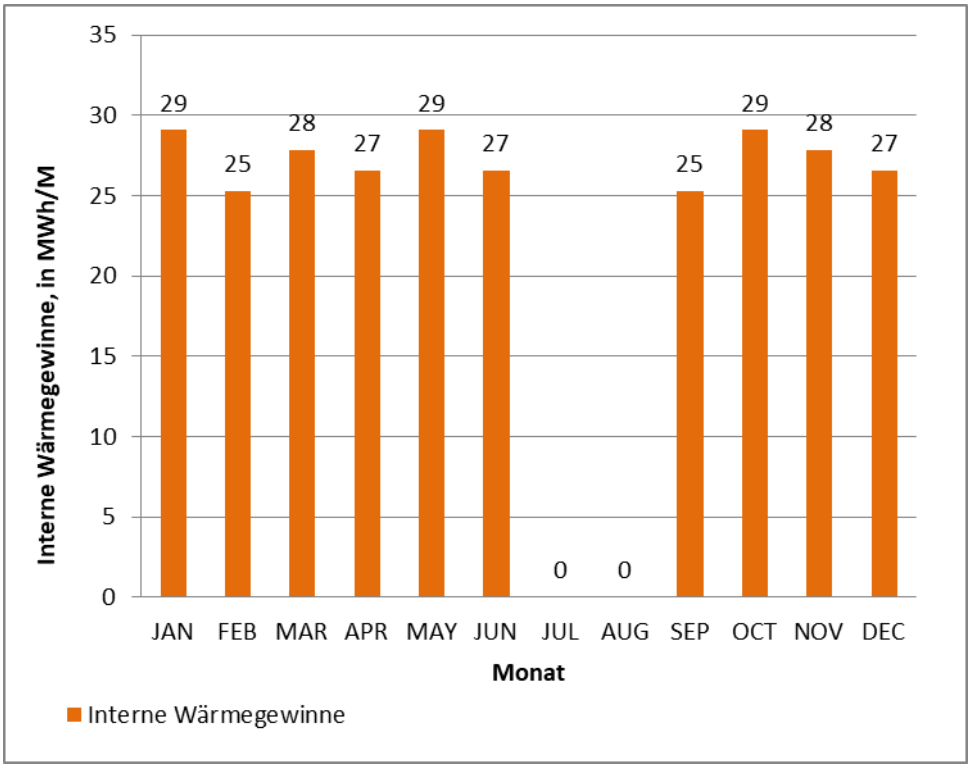


Abbildung 49: Monatliche interne Wärmegewinne in der Schule

Der jährliche Heizwärmebedarf errechnet sich aus der Integration der stündlichen Heizwärmebedarfe, die zum Erhalt der festgelegten, in Abschnitt 4.5 angeführten,

Innenraumtemperaturen aufzubringen sind. Die Abbildung 50 zeigt den Vergleich des monatlichen Heizwärmebedarfs für die zwei Hauptsimulationsvarianten:

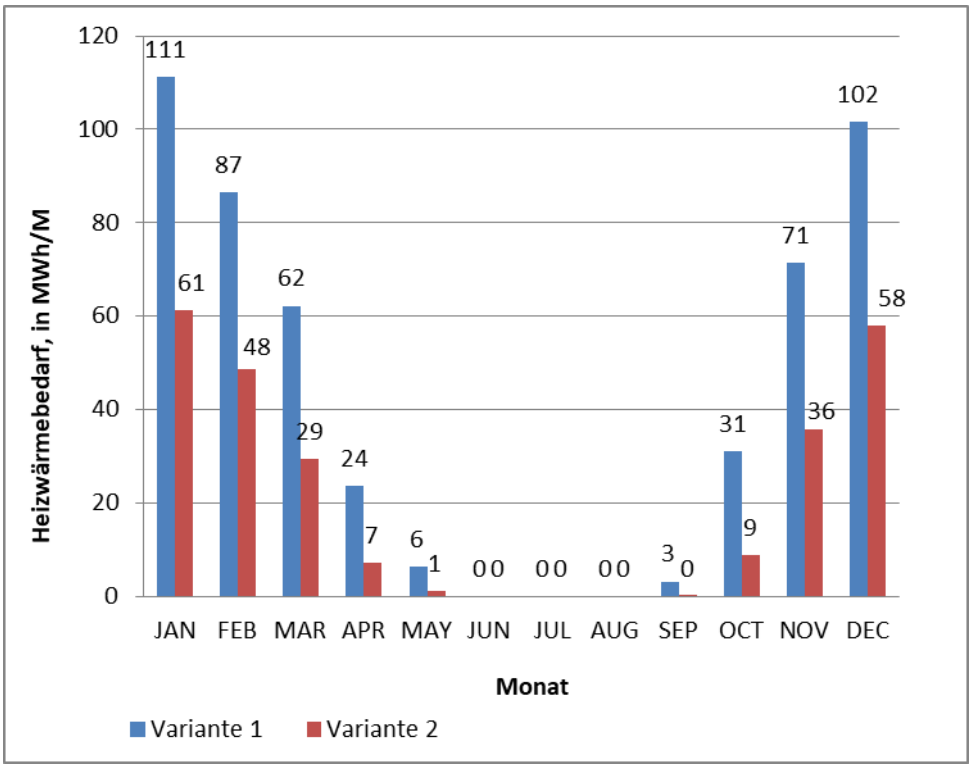


Abbildung 50: Vergleich der monatlichen HWB für die zwei Hauptsimulationsvarianten

Der jährliche Heizwärmebedarf, bezogen auf die konditionierte Brutto-Grundfläche, ergibt für das gesamte Gebäude für die 1. Variante und die 2. Variante, 95 W/(m^2 a) und 48 W/(m^2 a).

5 Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit des Gebäudes

In diesem Kapitel wird die Auswirkung der reflektierenden Beschichtungen auf die thermische Behaglichkeit der Schule untersucht, zudem wird eine Analyse der Änderung des Energiebedarfs durchgeführt.

Es werden drei Arten von reflektierenden Anstrichen mit einem unterschiedlichen solaren Reflexionsvermögen und solaren Absorptionsvermögen analysiert. Die Hauptkomponente der reflektierenden Anstrichstoffe, nämlich Pigmente, Bindemittel, Füllstoffe, haben auf die Reflexionseigenschaften der Beschichtungen einen merklichen Einfluss. Danach werden die zusätzlichen Maßnahmen für die Optimierung der Innenraumtemperatur im Dachgeschoss betrachtet, mit dem Ziel, die sommerliche Überwärmung des Dachgeschoßes zu vermindern. Diese Maßnahmen sehen Dauer- und Nachtlüftung vor.

Zur Auswertung der Temperaturänderung an den Außen-/Innenoberflächen und der Energieeinträge in das Gebäude sind folgende reflektierende Anstriche ausgewählt worden:

- White Reflex
- Cool Dry
- Alesta Cool

Die technischen Datenblätter für die entsprechenden Anstiche befinden sich im Anhang A.

5.1 Produktionsbeschreibung und Anwendungsbereiche

5.1.1 „Cool Dry“

„Cool Dry“ ist eine elastische, umweltfreundliche und wasserlösliche Hochleistungsbeschichtung auf Basis von 100 % Acryl-Bindemittel und Hightech-Wärme-Reflexionskomponenten.

Sie zeichnet sich durch gute Langlebigkeit aus und verhindert effizient das Eindringen von Sonnenwärme ins Gebäude. Diese Beschichtung reflektiert bis zu 90% der Sonnenenergie (Hitze, Licht, UV-Strahlung) und reduziert deutlich die Temperatur des Daches. „Cool Dry“ verfügt über exzellente Wärmereflexionseigenschaften sowie eine hohe Flexibilität und Belastbarkeit, ebenso über eine effektive Abdichtung von Haarrissen und Wasserundurchlässigkeit. Vorwiegend ist die weiße Farbe im Glanzgrad „Matt“ anwendbar.

„Cool Dry“ kann im Innen- und Außenbereich verwendet und auf verschiedenen Untergründen verarbeitet werden, z.B. Beton, Ziegel, Zementputze, Zement, Holz, Metalle (Stahl, verzinktes Metall, Aluminium), Außenwände, Betondächer, Teerpappe, Metallfassaden und -dächer von Lagergebäuden, Fahrzeugdächer, Büro-Container und Sperrholz-Kabinen.

5.1.2 „White Reflex“

Produkte der Linie „White Reflex“ sind weiße Einkomponentenanstriche mit Titandioxidpigmenten auf Basis von Polymeren in wässriger Emulsion und Spezialzusätzen.

In trockenem Zustand bilden sie einen elastischen Film, der gegen Witterungseinflüsse und UV-Strahlen schützt. Der hohe Emissionsgrad (0,91 für „White Reflex“) unterstützt die Dissipation der gespeicherten Wärme in den Nachtstunden. Die Anstriche „White Reflex“ können im Wohnungs- und Industriebau sowohl auf Bitumenabdichtungen als auch auf Putz- und Betonflächen, Blech-, Pfannen- und Ziegeldächern sowie Bitumenwellplatten angewendet werden.

5.1.3 „Alesta Cool“

„Alesta Cool“ ist eine Polyester-Pulverbeschichtung, die aufgrund der speziellen Pigmente die Reflexion dunkler Farben signifikant verbessert. Die Wirksamkeit von „Alesta Cool“ steigt umso mehr, je dunkler der Farbton wird.

Der TSR-Wert kann um bis zu 20 % verbessert und die Oberflächentemperatur um 20 % verringert werden. Schwarzes RAL 9005 „Alesta Cool“ verhält sich ebenso wie ein weißes RAL 9010 Standardprodukt.

Laut dem Anhang A beträgt der solare Reflexionsgrad von „Alesta Cool“ Schwarz (RAL 9005) im sichtbaren Licht bis zu 0,1 und im IR-Bereich bis zu 0,8.

„Alesta Cool“ hat eine breite Auswahl von RAL-Farbtönen und verfügt über verschiedene Glanzgrade und Strukturen.

„Alesta Cool“ kann sowohl in der Architektur als auch im Bauwesen für Dächer, Verkleidungsplatten, Sonnenschutz-Rollos, Außenmöbel, sowie in der Transportbranche für Tiertransportanhänger und landwirtschaftliche Maschinen verwendet werden.

5.2 Grundlagen für den Algorithmus zur Berechnung der Wärmeströme und der Außen-/Innenoberflächen-Temperaturen eines Bauteils

In diesem Abschnitt wird eine allgemeine kurze Erläuterung des mathematischen Modells und einiger Annahmen gegeben, die von TRNSYS bei der Simulation zum Einsatz kommen. Die vollständige Beschreibung der Bestimmung der Wärmeeinträge und Temperaturen auf der Außen- und Innenoberfläche durch das Programm ist im Band 6 des Handbuchs „TRNSYS 16“ [41] wiedergegeben. Abbildung 51 zeigt die Wärmeströme auf ein Außenbauteil sowie die Temperaturen:

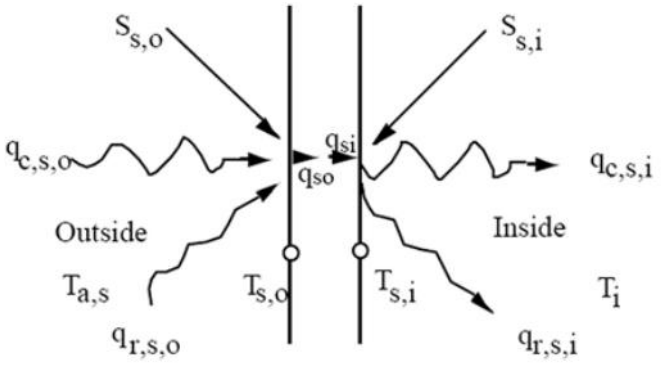


Abbildung 51: Wärmeströme[2] und Temperaturen an der Außenoberfläche und Innenoberfläche einer Außenwand oder des Daches, aus TRNSYS Handbuch [41], Band 6, s. 66

Das Programm TRNSYS berechnet den Wärmestrom für die Außenoberfläche der opaken Bauteile folgenderweise: Der Wärmestrom durch von den Außenoberflächen absorbierte kurzwellige Sonnenstrahlung $S_{s,o}$ wird durch Eingabe des solaren Absorptionsgrades und die Orientierung der Außenoberflächen berechnet.

Das Dach und die Wände sind über die Übergangsfunktion von Oberfläche zu Oberfläche dynamisch modelliert. Die übertragenen Wärmeströme durch die Wärmeleitung werden in TRANSYS durch eine zeitabhängige Gleichung bestimmt:

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,a}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \tag{15}$$

[2] Anmerkung: Der Index "o" bedeutet in diesem Fall "außen", da die Abbildung ohne Änderung dem TRNSYS Handbuch entnommen wurde.

$$\dot{q}_{\mathrm{s,a}} = \sum_{\mathrm{k=0}}^{\mathrm{n_{a_s}}} a_{\mathrm{s}}^{\mathrm{k}} T_{\mathrm{s,a}}^{\mathrm{k}} - \sum_{\mathrm{k=0}}^{\mathrm{n_{b_s}}} b_{\mathrm{s}}^{\mathrm{k}} T_{\mathrm{s,i}}^{\mathrm{k}} - \sum_{\mathrm{k=1}}^{\mathrm{n_{d_s}}} d_{\mathrm{s}}^{\mathrm{k}} \dot{q}_{\mathrm{s,a}}^{\mathrm{k}} \tag{16}$$

Die zeitabhängigen Gleichungen des Wärmestromes und der Oberflächentemperaturen werden in gleichen Zeitintervallen bewertet. Das hochgestellte k bezeichnet die Zeitreihe. Für die aktuelle Zeit gilt k = 0 und für die vorherige Zeit k = 1 usw. Die Koeffizienten a_s, b_s, c_s, d_s werden in TRNBuild durch die Z-Transformationsmethode bestimmt.

Der Wärmestrom durch langwellige Strahlung an jeder Außenoberfläche des Gebäudes wird unter Verwendung der fiktiven Himmelstemperatur als Input für Type 56 „Gebäudemodel“ und des Sichtfaktors zum Himmel für jede Außenfläche als Input in TRNBild berechnet. Der Wärmestrom von der Außenumgebung zur Außenoberfläche besteht aus dem Konvektiven und dem Strahlungsanteil und wird in TRNSYS wie folgt berechnet:

$$\dot{q}_{\mathrm{comb,s,a}} = \dot{q}_{\mathrm{c,s,a}} + \dot{q}_{\mathrm{r,s,a}} \tag{17}$$

wobei

$$\dot{q}_{\mathrm{c,s,a}} = h_{\mathrm{c,s,a}} \left(T_{\mathrm{a}} - T_{\mathrm{s,a}}\right) \tag{18}$$

$$\dot{q}_{\mathrm{r,s,a}} = \sigma\, \varepsilon \left(T_{\mathrm{s},a}^{4} - T_{\mathrm{fsky}}^{4}\right) \tag{19}$$

$$T_{\mathrm{fsky}} = \left(1 - f_{\mathrm{sky}}\right) T_{\mathrm{a}} + f_{\mathrm{sky}}\, T_{\mathrm{sky}} \tag{20}$$

Dies bedeutet:

$\dot{q}_{\mathrm{comb,s,a}}$	Wärmestrom durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der Außenoberfläche, in W
$\dot{q}_{\mathrm{c,s,a}}$, $\dot{q}_{\mathrm{c,s,i}}$	Wärmestrom durch Konvektion an der Außenseite und Innenseite des Bauteils, in W
$\dot{q}_{\mathrm{r,s,a}}$, $\dot{q}_{\mathrm{r,s,i}}$	Wärmestrom durch langwellige Strahlung an der Außen- und Innenoberfläche, in W
$S_{\mathrm{s,a}}$	Wärmestrom durch von der Außenoberflächen absorbierte kurzwellige Sonnenstrahlung, in W
$S_{\mathrm{s,i}}$	Wärmestrom durch von der Innenoberfläche absorbierte solare und langwellige Strahlung, bspw. durch Wärmegewinn von Menschen und Geräten, in W
$h_{\mathrm{c,s,a}}$	Wärmeübergangskoeffizient der Konvektion auf der Außenoberfläche, in W/(m^2 K)
f_{sky}	Sichtfaktor zum Himmel
T_{sky}	Fiktive Himmelstemperatur, in °C

T_a	Außenlufttemperatur, in °C
$T_{s,a}$	Temperatur der Außenoberfläche, in °C
ε	Langwelliger Emissionsgrad
σ	Stephan-Boltzmann Konstante: $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m^2 K^4)

TRNSYS verwendet automatisch bei den Berechnungen einen langwelligen Emissionsgrad von ε = 0,9 für die Außenoberfläche; für die Fenster wird ε der zur Verfügung stehenden Datenbibliothek für die Fenster entnommen.

5.3 Solarer Wärmegewinn durch die Außenbauteile

Wenn eine Wand Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist, so absorbiert sie Energiemengen, die vom Absorptionsgrad der Wandoberfläche abhängig sind, was die Wandoberfläche erwärmt.

> *„Je größer der Absorptionsgrad der Außenwandoberfläche ist, desto größer ist die absorbierte Energiemenge und um so höher wird die Temperatur auf der äußeren Wandoberfläche sein. Die absorbierte Wärmemenge wird aber größtenteils sofort wieder in die Außenluft abgegeben, nur ein geringer Teil der Wärme gelangt ins Gebäudeinnere.“, Auszug aus Lehrbuch der Bauphysik [53], Kapitel 5, s.174.*

Folgender wesentlicher Unterschied ist in diesem Zusammenhang für Fenster zu erkennen:

> *„Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Fenster im Vergleich zu anderen Bauteilen ist die Transparenz der Verglasung, d.h., dass beim Fenster, im Gegensatz zu nichttransparenten Bauteilen, die Wärmestrahlung am Energietransport mitbeteiligt ist. Die Wärmestrahlung kann entweder von außen nach innen oder umgekehrt gerichtet sein. Im ersten Fall handelt es sich um Sonnenstrahlung, die Wärmeenergie in das Gebäudeinnere überträgt und einen Wärmegewinn darstellt, im zweiten Fall um langwellige Wärmestrahlung, die Wärmeenergie aus dem Gebäudeinneren zum Freien transportiert und somit zum Wärmeverlust beiträgt.“, Auszug aus Lehrbuch Bauphysik [53], Kapitel 5, s.167.*

Die Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile kann die Raumtemperatur stark beeinflussen. Durch Sonneneinstrahlung im Sommer kann es bei geringer Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile zu einem hohen Ansteigen der Raumtemperatur kommen.

Die Speicherkapazität eines Bauteils beeinflusst den Heizwärmebedarf und den Kühlenergiebedarf. Die wirksame Speicherfähigkeit wird definiert als Teilbetrag der

Speicherung, der einen Einfluss auf den Heizwärmebedarf und auf die sommerliche Raumkonditionierung hat. Sie wird für Sommer und Winter unterschiedlich ermittelt [45].

Die wirksame Speicherung durch den Bauteil erfolgt nicht über den ganzen Bauteilquerschnitt und ist auf eine begrenzte Dicke beschränkt. Für die Berechnung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit ist es notwendig, die spezifische Wärmekapazität, die Rohdichte, die Fläche des Bauteils sowie die wirksame Schichtdicke des Baustoffes zu wissen. Sie kann nach [52] berechnet werden.

Eine große Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile führt zu:

- einem langsamen Aufheizen der Räume
- einem allmählichen Auskühlen in der Nacht bzw. am Wochenende durch Absenkung der Heizung nach Zeitplan
- einer langsamen und verzögerten Wärmeabgabe bei Sonneneinstrahlung von außen
- keinen hohen Temperaturschwankungen in den Räumen

Die Wärmespeicherfähigkeit der Wände, die Fenstergrößen und -orientierung können die Raumtemperatur stark beeinflussen, folglich auch den jährlichen Heizwärmebedarf.

Bei der Gebäudesimulation in dieser Arbeit ändern sich alle diese Parameter nicht. Es werden die Außenoberflächen der Wände und des Daches mit den reflektierenden Anstrichen beschichtet. Der solare Reflexionsgrad und der solare Absorptionsgrad ändern sich in diesem Fall im Verhältnis:

$$\alpha + \rho = 1{,}0 \tag{21}$$

Die Fenster sind für die kurzwellige Strahlung durchlässig, für die langwellige Strahlung hingegen kaum. Das heißt also, ein Anteil der kurzwelligen Strahlung wird in die Räume transmittiert und in Wärme umgewandelt, hierbei gilt das Verhältnis nach der Gleichung (1): $\alpha + \rho + \tau = 1{,}0$. Die erwärmten Oberflächen emittieren ihrerseits langwellige Strahlung und steigern die Innenraumtemperatur.

> *„Bewertet wird die Strahlungsdurchlässigkeit der Verglasung durch den Gesamtenergiedurchlassgrad g. Er ist definiert als das Verhältnis der durch die Verglasung in das Gebäudeinnere übertragenen Wärmeenergie zur auftreffenden Strahlungsenergie.“, Auszug aus Lehrbuch Bauphysik [53], Kapitel 5, s.167.*

Die kurzwellige Sonnenstrahlung hat aufgrund der Transparenz der Fenster einen merklichen Einfluss auf die Innenraumtemperatur.

Einerseits absorbieren die Außenoberflächen des Bauteils den Anteil der kurzwelligen Sonnenstrahlung, was zur Erwärmung führt, andererseits wird durch die Konvektion und die Strahlung im langwelligen Bereich Wärme an die Umgebung emittiert. In Abhängigkeit von den Außen- und Innentemperaturen stellt sich die Richtung der Wärmeströme ein. Im Sommer entsteht bei entsprechend hohen Außentemperaturen ein derartiger Temperaturgradient an der Außenwand, dass sich der Wärmestrom von außen nach innen richtet. In der Heizperiode kann diese Besonderheit kurzfristig auch auftreten.

Im Winter wird Wärme vom beheizten Raum nach außen abgegeben. Bei starker Sonnenstrahlung können die Außenoberflächen der Wände auch im Winter hohe Temperaturen während des Tages erreichen, sodass die Wärmeströme die Richtung kurzfristig ändern und die Wärme in die Wand geleitet und gespeichert wird. Nachdem die Sonne untergeht und sich der ursprüngliche Temperaturgradient in der Wand erneut einstellt, strömt die Wärme wieder von innen nach außen.

5.4 Thermische Sanierung – Input-Daten für TRNSYS

Um den Einfluss der reflektierenden Anstriche auf das Gebäude im Winter und im Sommer zu bewerten, wird das ursprüngliche Model des Gebäudes mit den verschiedenen Anstrichen beschichtet. Als ursprüngliches Gebäudemodell wird die Hauptsimulation nach Variante 2 angenommen. Alle im Kapitel 4 für die Hauptsimulation von Variante 2 festgelegten Parameter bleiben unverändert.

Dabei werden sämtliche Außenoberflächen der Wände und der Dachflächen mit den entsprechenden Anstrichen laut der Tabelle 16 behandelt.

Tabelle 16: Die Beschichtungen für die äußere Oberfläche der Schule

Bauteil	**Ursprüngliche Beschichtung**	**1. Variation**	**2. Variation**	**3. Variation**
Außenwand	Putz	„Cool Dry“ Weiß	„White Reflex“ Weiß	„Alesta Cool“ Weiß
Dach, geneigt	Dachziegel	„Cool Dry“ Weiß	„White Reflex“ Weiß	„Alesta Cool“ Schwarz
Dach, horizontal	Alu Blech	„Cool Dry“ Weiß	„White Reflex“ Weiß	- [3]

[3] Nicht angestrichen, da der solare Absorptionsgrad von Alu Blech niedriger ist als der solare Absorptionsgrad von „Alesta Cool“ Grau

Für jede in der Tabelle 16 dargestellte Variation wurde eine Gebäudesimulation durchgeführt. Der Luftwechsel für die Zone „Klassenzimmer“ ist gleich 1,8 h^{-1}, was der Hauptsimulation von Variante 2 aus dem Abschnitt 4.6.2 entspricht.

Die Reflektierenden Anstriche wurden als masselose Schichten betrachtet. Die Wirkung der reflektierenden Anstriche wurde durch Eingabe des solaren Absorptionsgrades in TRANSYS abgeschätzt.

Nach der Gleichung (1) ist in diesem Fall der Transmissionsgrad $\tau = 0$, da ein Anteil der Strahlung auf einer Oberfläche des strahlungsundurchlässigen Bauteiles reflektiert und ein anderer Anteil der Strahlung absorbiert wird.

In der Tabelle 17 sind die Eigenschaften der reflektierenden Anstriche dargestellt:

Tabelle 17: Eigenschaften der reflektierenden Anstriche

	Alesta Cool	**Alesta Cool**	**White Reflex**	**Cool Dry**
Farbe	Schwarz (matt, RAL 9005)	Grau (glänzend, RAL 9007)	Weiß	Weiß
Solarer Reflexionsgrad ρ	0,30	0,44	0,82	0,90
Solare Absorptionsgrad α	0,70	0,56	0,18	0,10
Emissionsgrad ε	0,90[4]	0,90[4]	0,91	0,90[4]
SRI, in %	32	50	103	114

[4] Annahme: TRNSYS führt automatisch die Berechnungen mit $\varepsilon = 0{,}9$ für die Außenoberfläche durch.

5.5 Ergebnisse der Variationen der Gebäudesimulation

5.5.1 Heizwärmebedarf des Gebäudes

Die Ergebnisse der dynamischen Simulation des Gebäudes mit den verschiedenen Anstrichen machen einen Anstieg des monatlichen und entsprechend auch des jährlichen Heizwärmebedarfs in der Heizperiode erkennbar. Der Vergleich der Änderung des monatlichen Heizwärmebedarfs in Abhängigkeit von verschiedenen Anstrichen ist in nachfolgender Abbildung 52 wiedergegeben:

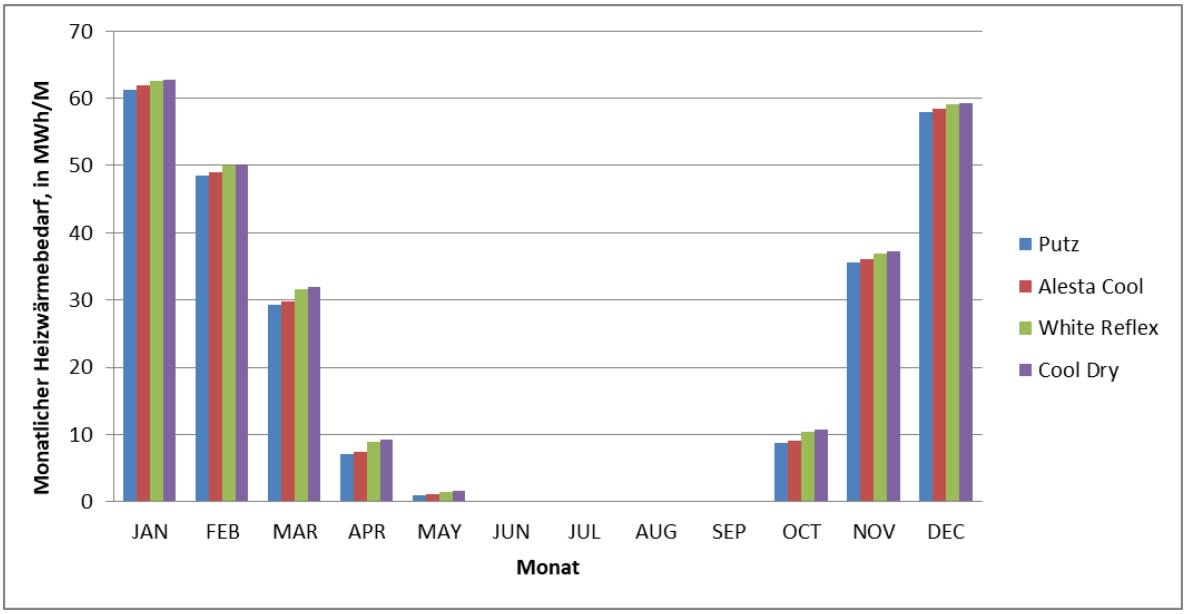


Abbildung 52: Vergleich des monatlichen Heizwärmebedarfs bei den diversen Anstrichen

Bei Anwendung des Anstriches „Cool Dry“, „White Reflex“ und „Alesta Cool“ nimmt der jährliche Heizwärmebedarf im Vergleich zu den ursprünglichen Beschichtungen um 6%, 5% und 1% zu, siehe Abbildung 53:

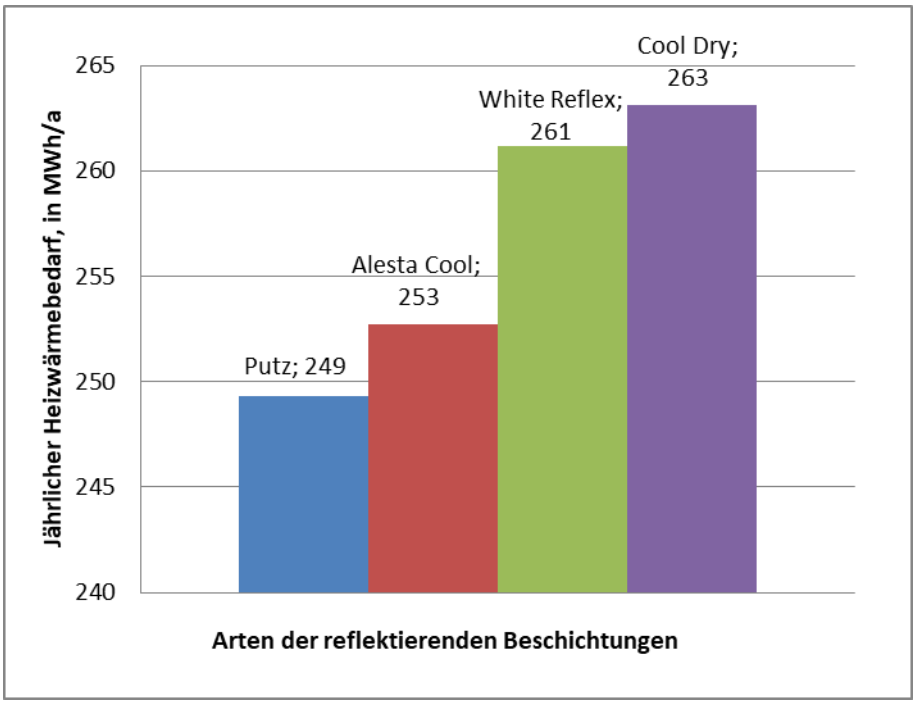


Abbildung 53: Vergleich des jährlichen Heizwärmebedarfs des Gebäudes

Mit der Absenkung des solaren Absorptionsgrades wird mehr solare Strahlung reflektiert. Es erfolgen zwar keine großen Wärmeverluste aufgrund der Anwendung der reflektierenden Beschichtungen, allerdings steigt der jährliche Heizwärmebedarf etwas an.

5.5.2 Raumklima in der Zone „Klassenzimmer“

Während der Heizperiode werden die Innenraumtemperaturen auf dem festgelegten Niveau geregelt und ändern sich laut dem Zeitplan. Die Abbildung 54 zeigt den Vergleich des Verlaufs der Innenraumtemperatur in der thermischen Zone „Klassenzimmer“ bei der Anwendung der verschiedenen Beschichtungen. Die maximale Innenraumtemperaturdifferenz beträgt 1,1℃ im Sommer zwischen dem Putz und dem Anstrich „Cool Dry“.

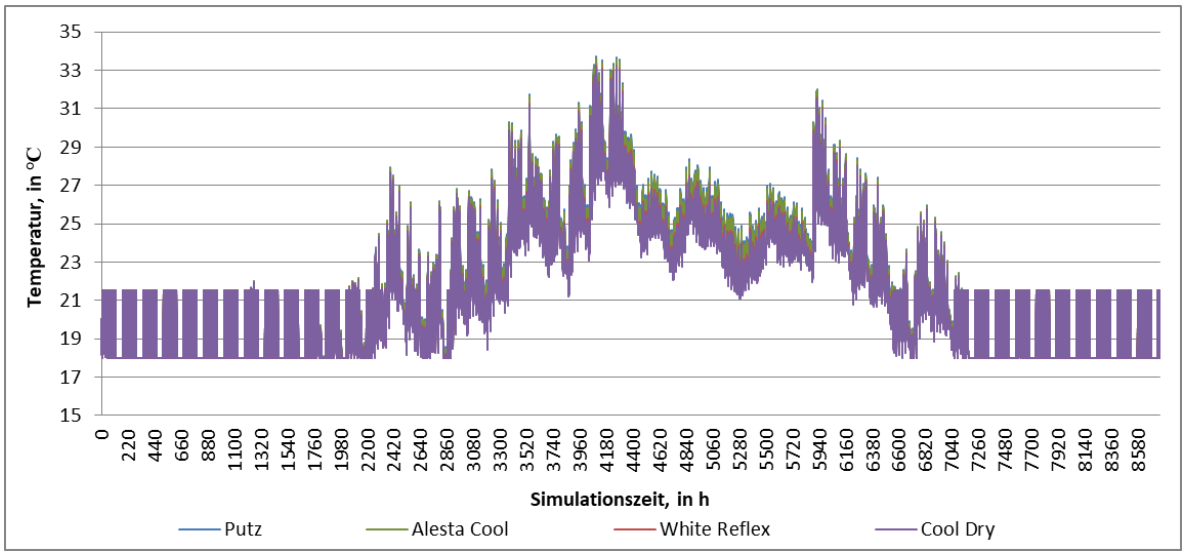


Abbildung 54: Vergleich des Verlaufes der Innerraumtemperatur in der Zone „Klassenzimmer“ hinsichtlich der verschiedenen Beschichtungen

5.5.3 Temperaturverlauf an der Außen-/Innenoberfläche der Außenwände für die Zone „Klassenzimmer“

Die Ergebnisse der Simulation zeigen die geringere Änderung der Innenoberflächentemperaturen in der thermischen Zone „Klassenzimmer“ unabhängig davon, ob die Außenoberfläche mit oder ohne reflektierende Anstriche versehen ist. Die durchschnittliche Differenz zwischen Innenoberflächentemperatur des ursprünglichen Gebäudemodells und des angestrichenen Modells ist geringer als 1,5℃. Das heißt, die durchschnittliche Innenoberflächentemperatur bei der ursprünglichen Außenbeschichtung „Putz“ ist um max. 1,5℃ höher als bei der reflektierenden Außenbeschichtung „Cool Dry“.

In der Abbildung 55 ist der Verlauf der Innenoberflächentemperatur bei Südorientierung der Zone „Klassenzimmer“ dargestellt:

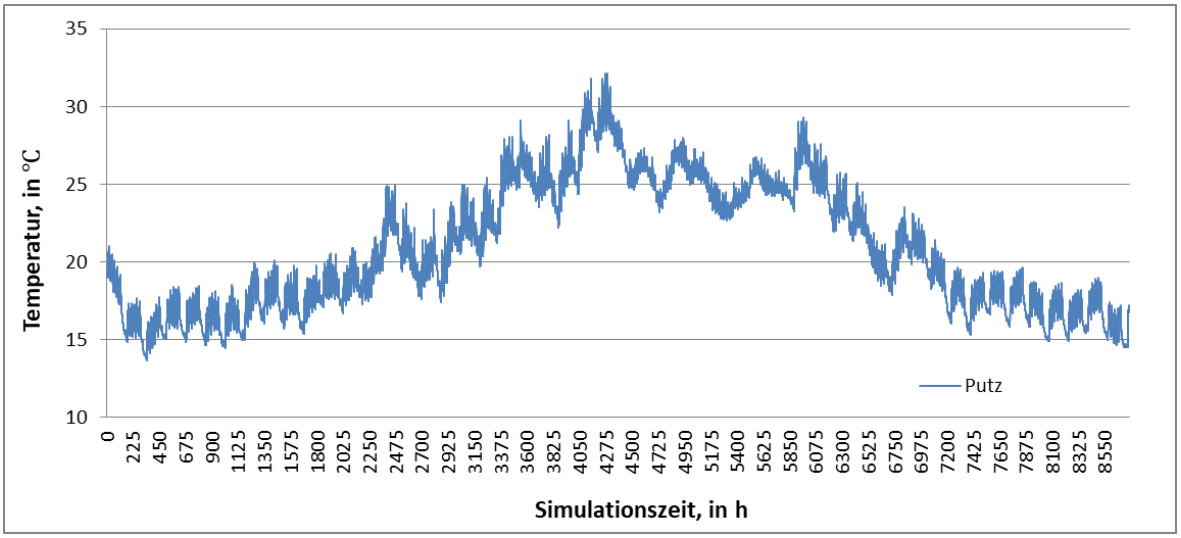


Abbildung 55: Verlauf der Innenoberflächentemperatur an der Südwand der Zone „Klassenzimmer“ über ein Jahr hinweg

Bei der Nachtabsenkung und am Wochenende steigen die Transmissionswärmeverluste durch die Außenwände und sinken die Innenoberflächentemperaturen. In der Aufheizphase nimmt die Wand die Wärme auf, solange die Raumluft wärmer ist als die Innenwandoberfläche. Mit der Nachtabsenkung oder der Absenkung am Wochenende geht der Rückfluss der in der Wand gespeicherten Wärme in den Raum, jedoch sind die Wärmeverluste durch die Außenwände höher, da der Temperaturgradient der Wand groß bleibt. In der Abbildung 56 kann gesehen werden, wie sich der Verlauf der Innenoberflächentemperaturen im Laufe von einer Woche in der Zone „Klassenzimmer“ ändert:

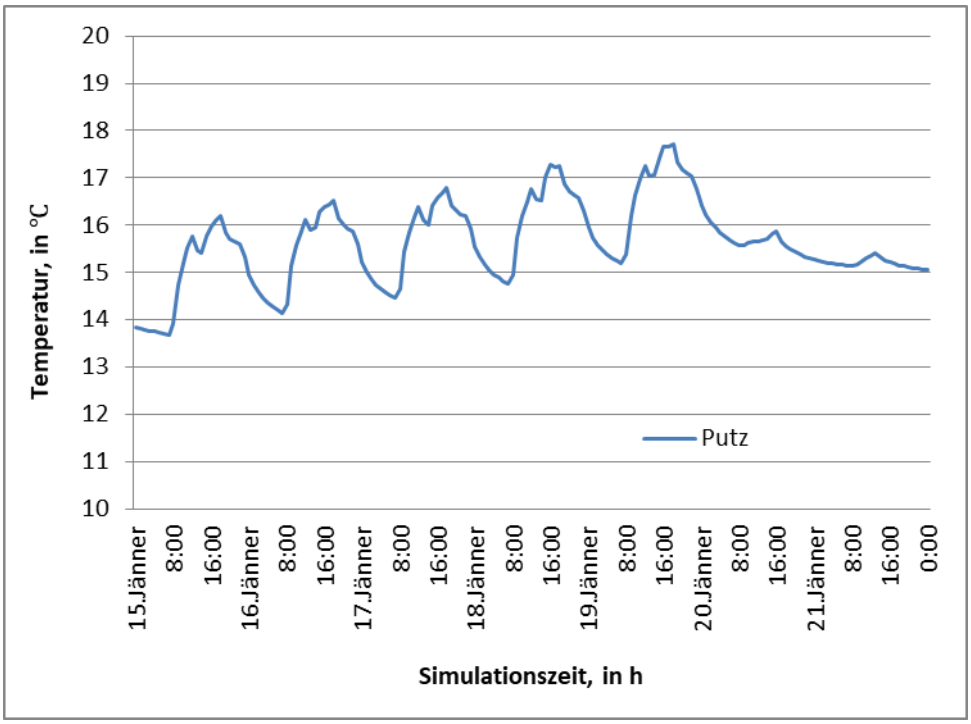


Abbildung 56: Verlauf der Innenoberflächentemperatur im Laufe von einer Woche an der Südwand in der Zone „Klassenzimmer“

Im Winter erreicht die Intensität der Sonnenstrahlung auf die Südwand höhere Werte als im Sommer, siehe Abbildung 57. Aus diesem Grund unterscheiden sich die Temperaturen an der Außenoberfläche und der Innenoberfläche der Wand entsprechend der Wandorientierung und Jahreszeit.

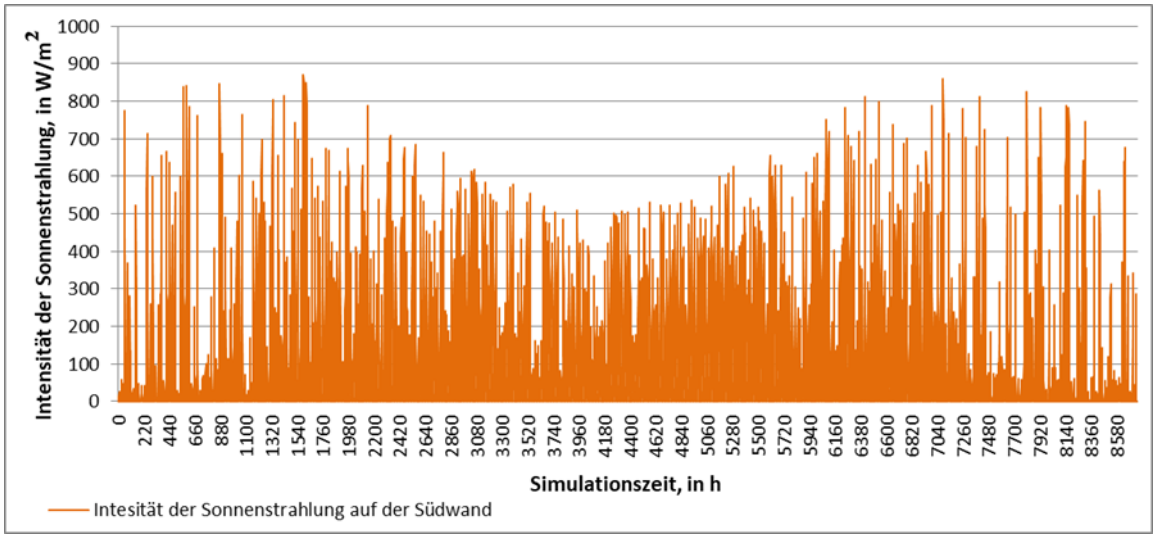


Abbildung 57: Verteilung der Intensität der Sonnenstrahlung an die Südwand des Gebäudes über ein Jahr hinweg

Die Abbildungen 58 - 60 geben den Vergleich der Temperaturen an den Außenoberflächen bei der Anwendung der verschiedenen reflektierenden Anstriche für die Zone „Klassenzimmer“ wieder. Aufgrund der Auswirkung der reflektierenden Anstriche sinkt die Temperatur an den Außenoberflächen. Die höchste Absenkung der Außentemperatur wird bei Anwendung des Anstriches „Cool Dry“ erreicht, was durch den hohen solaren Reflexionsgrad bedingt ist und zur Steigerung des jährlichen Heizwärmebedarfes führt:

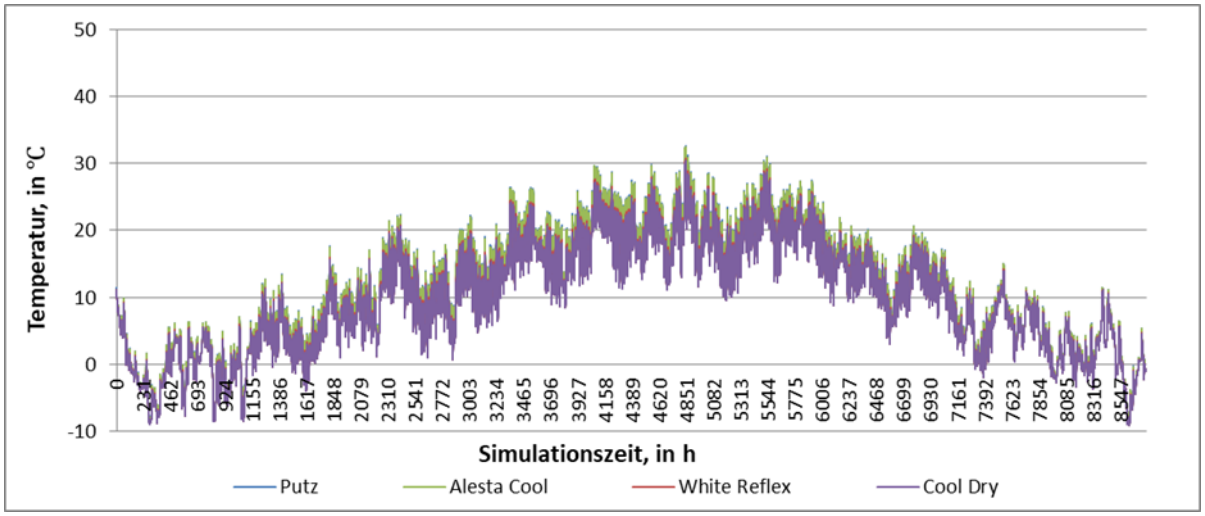


Abbildung 58: Vergleich der Temperaturverläufe an der Außenoberfläche bei der Nordwand

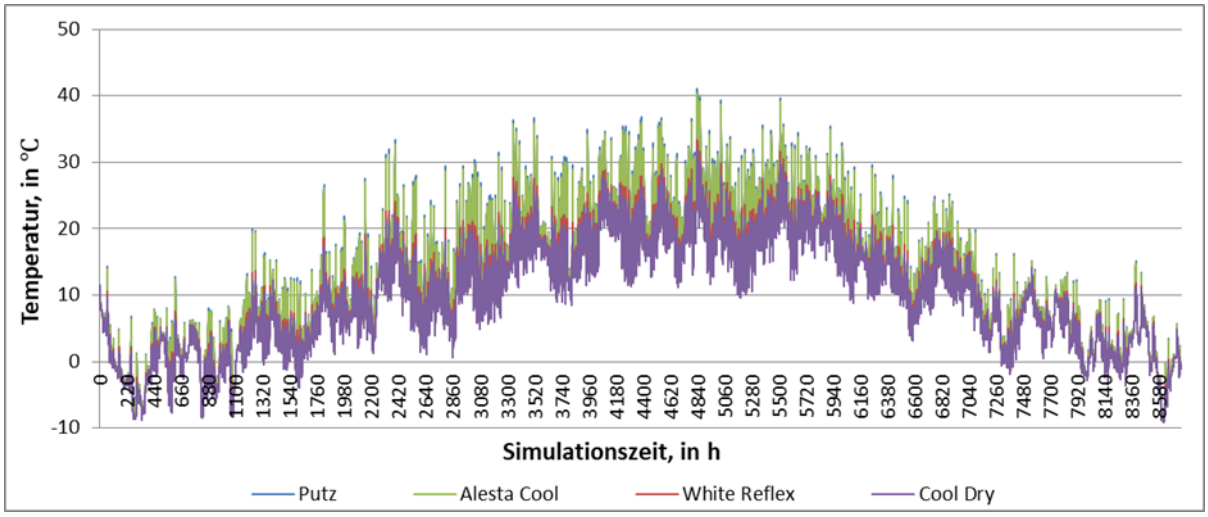


Abbildung 59: Vergleich der Temperaturverläufe an der Außenoberfläche bei der Westwand

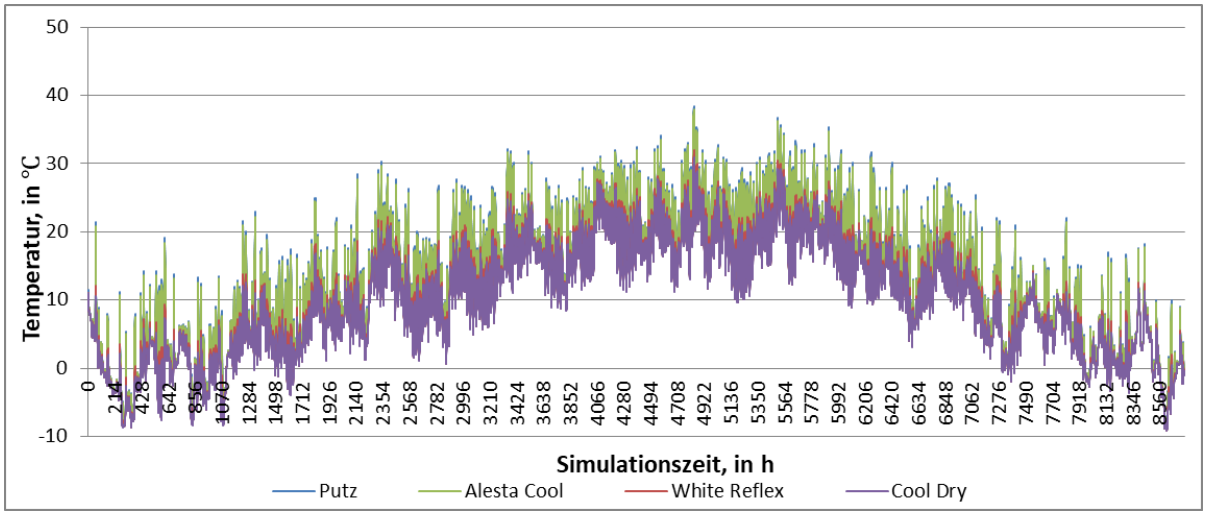


Abbildung 60: Vergleich der Temperaturverläufe an der Außenoberfläche bei der Südwand

5.5.4 Raumklima in den Zonen „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum“

Als Nächstes wird das horizontale Blechdach über die thermische Zone „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum“ betrachtet. Die Außenwände dieser Zonen werden bei den Simulationen auch mit reflektierenden Anstrichen beschichtet.

Die Simulationen werden mit zwei reflektierenden Anstrichen „White Reflex“ und „Cool Dry“ für die weiße Farbe durchgeführt. Der Anstrich „Alesta Cool“ Grau wurde nicht gewählt, da der solare Absorptionsgrad von Alu Blech niedriger als der Absorptionsgrad von „Alesta Cool“ Grau ist und 0,3 bzw. 0,56 beträgt.

Der Vergleich des Verlaufes der Innenraumtemperatur für die Zonen „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum“ bei der Auswirkung der reflektierenden Anstriche wird für die Zeitperiode von Mai bis August dargestellt, da in der Heizperiode die Innenraumtemperatur auf die festgelegte Temperatur geregelt wurde, siehe Abbildungen 61 - 62. Der Luftwechsel ändert sich laut Zeitplan. Die Simulation für diese Zonen ist ohne Berücksichtigung der Nachtlüftung durchgeführt, da diese Zonen nicht zum regulären Aufenthalt bestimmt sind und 27℃ nicht überschreiten:

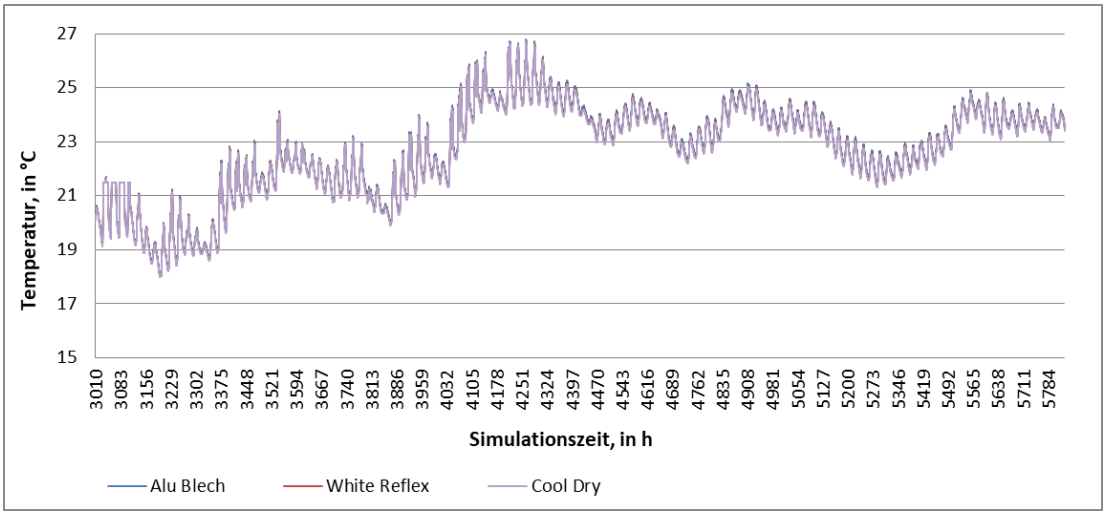


Abbildung 61: Vergleich des Innenraumtemperaturverlaufes in der Zone „Sammlungsraum“

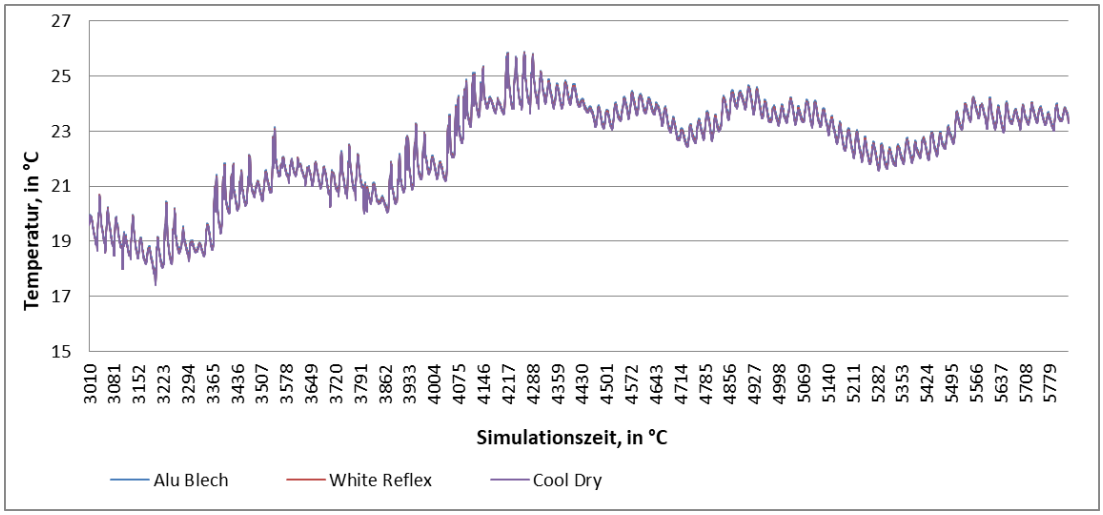


Abbildung 62: Vergleich des Innenraumtemperaturverlaufes in der Zone „Sanitärraum“

Die maximale Innentemperatur in diesen Zonen wird vom 24. bis 28. Juni erreicht und liegt zwischen 25 und 27℃.

Die Innenraumtemperatur von Mai bis August sinkt in den Zonen „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum“ bei Anwendung der Anstriche „Cool Dry“ und „White Reflex“ im Vergleich zu herkömmlichen Beschichtungen für diese Zonen um max. 1,5℃ ab.

5.5.5 Temperaturverlauf an der Außen-/Innendachfläche des Blechdaches für die Zone „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum"

Die maximalen Temperaturverläufe stellen sich am 20. Juli an der Außenoberfläche des Blechdaches in der Zone „Sammlungsraum“ ein. Die Temperaturverläufe an der Außen-/Innenoberflächen des betrachteten Daches unter der Auswirkung der reflektierenden Anstriche sind in den Abbildungen 63 - 64 dargestellt:

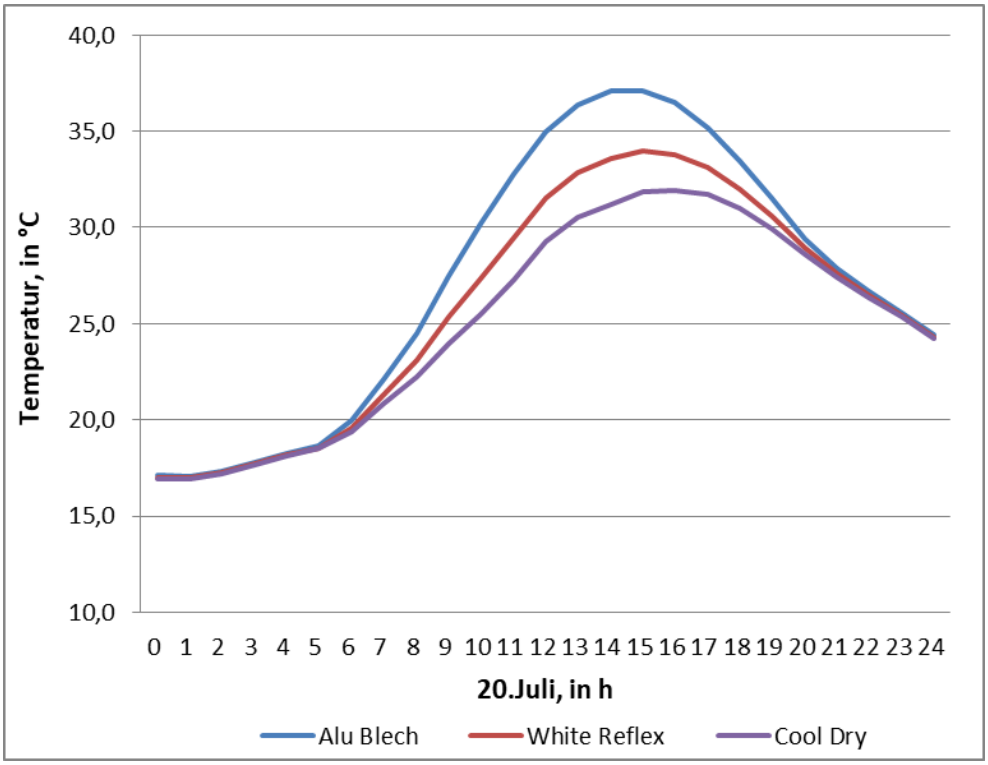


Abbildung 63: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der horizontalen Dachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Sammlungsraum“

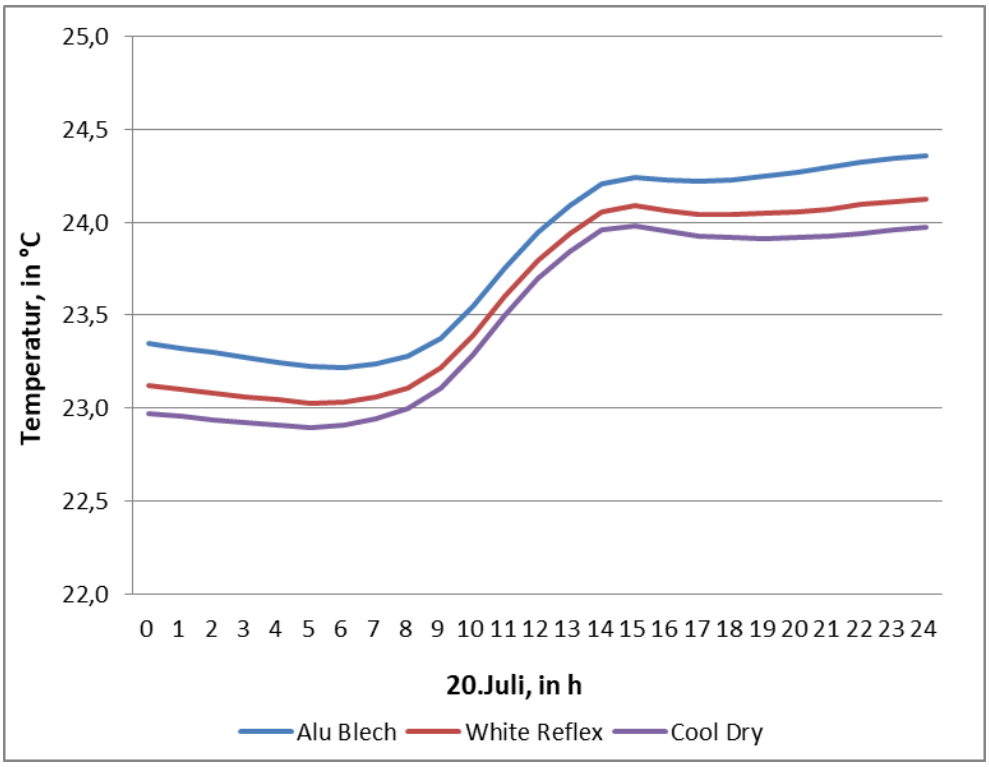


Abbildung 64: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der horizontalen Dachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Sammlungsraum“

Die Abbildung 64 macht erkennbar, dass die Temperatur an der Innenoberfläche des Daches als Auswirkung der reflektierenden Anstriche im Vergleich zur ursprünglichen Beschichtung max. um 0,5℃ absinkt.

Analog dazu wurden die Temperaturen für die Zone „Sanitärraum“ analysiert, wobei die Ergebnisse der Simulation in den Abbildungen 65 - 66 wiedergegeben sind:

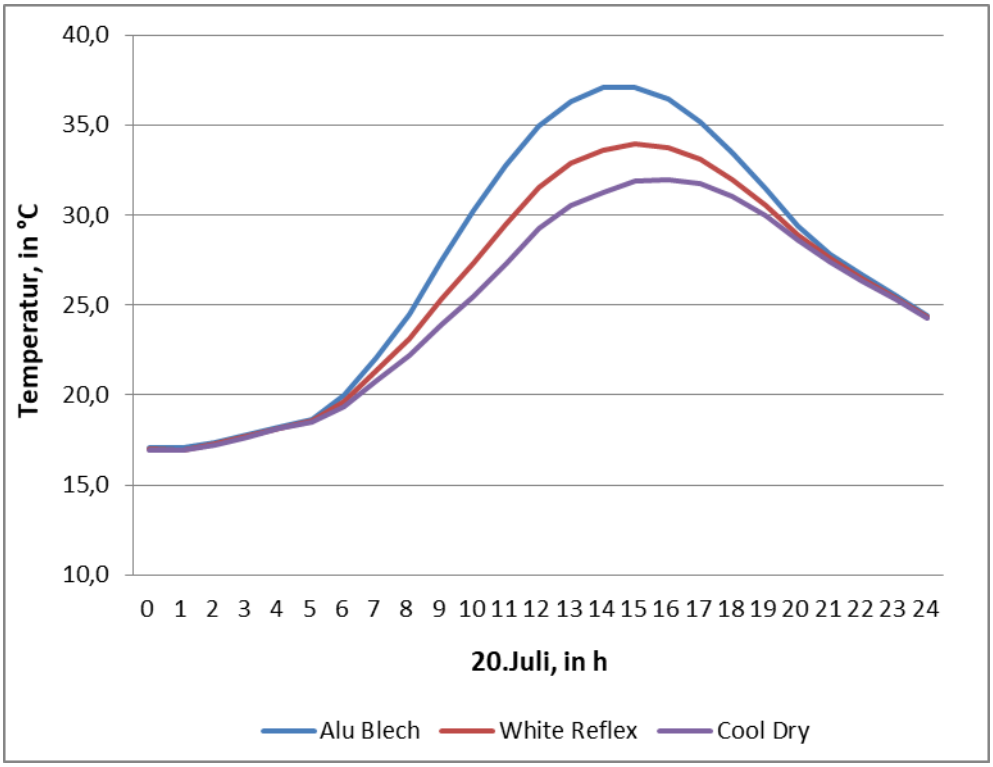


Abbildung 65: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der horizontalen Dachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Sanitärraum“

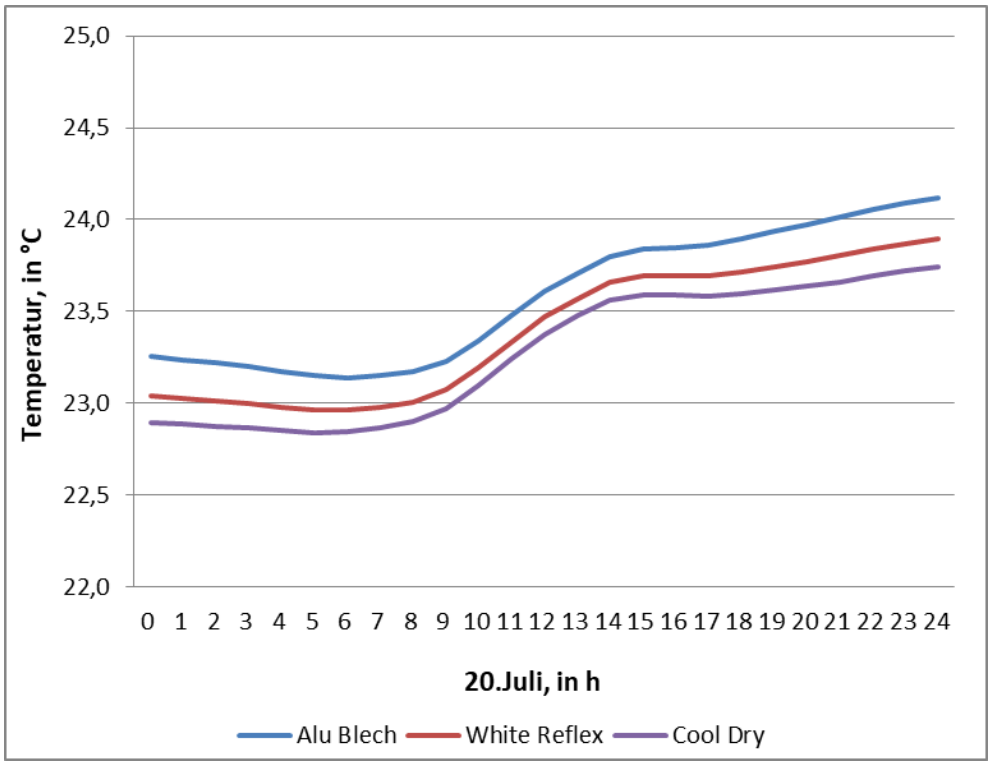


Abbildung 66: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der horizontalen Dachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Sanitärraum“

5.5.6 Energieeinträge durch die Dachfläche des Blechdaches in die Zone „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum“

Mit Hilfe von TRNBild unter der Option „Project“ besteht die Möglichkeit, für jede betrachtete Zone oder eine einzelne Wand (z.B. Außen-/Innenoberfläche der Wand) die notwendigen Outputs festzulegen, siehe nachfolgende Abbildung 67. Dabei geht es nicht nur um die Temperaturen an den Außen-/Innenoberflächen der Wand oder des Daches, sondern ebenso um die Wärmeeinträge durch einzelne Oberflächen oder um solare Wärmegewinne durch die transparente Fläche und die Lüftungswärmeverluste aufgrund von Undichtigkeiten:

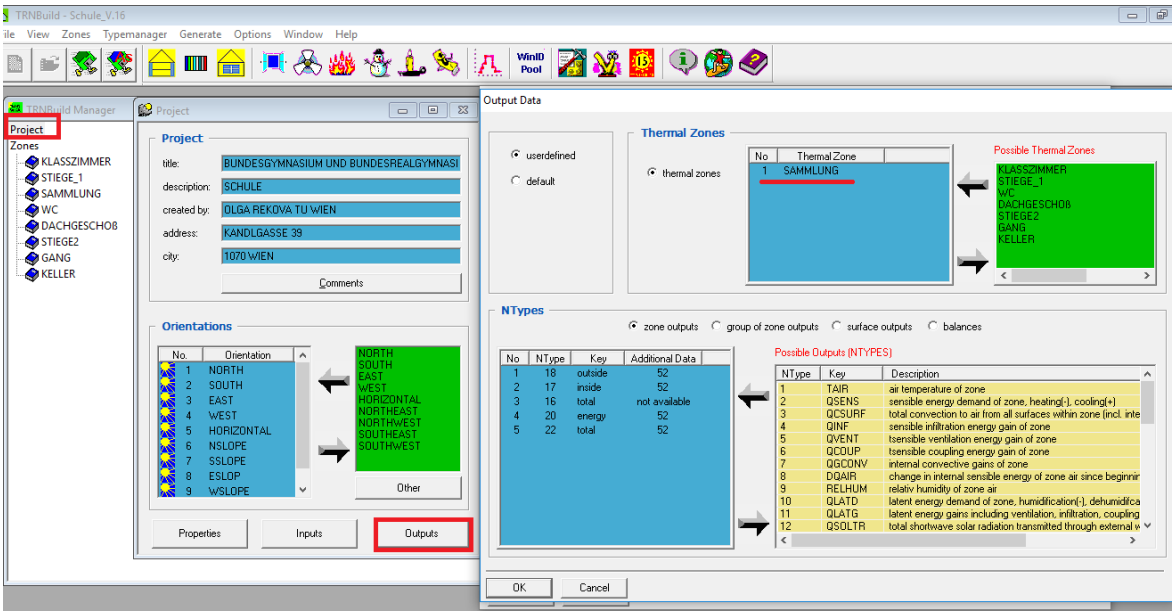


Abbildung 67: TRNBild – Eingabefenster zur Definition der Outputs für die Zone „Sammlungsraum“

Um die Energieeinträge durch die Dachfläche des Blechdaches in die betrachteten Zonen abzuschätzen, werden als Outputs der Simulationen folgende Daten gewählt:

Q ABSO — Wärmeeintrag durch von der Außenoberfläche des Daches absorbierte Gesamtstrahlung (exklusive der eigenen Emissionen), in kW/M oder in MWh/M

Q COMO — Wärmeeintrag durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der Außenoberfläche des Daches, in kWh/M oder in MWh/M

Q SOLTR — Solare Wärmegewinne infolge der durch die Fenster transmittierten kurzwelligen Strahlung für die betrachtete Zone, in kWh/M oder in MWh/M

Q INF — Lüftungswärmeverluste durch die Infiltration für die betrachtete Zone, in kWh/M oder in MWh/M

Die Abbildungen 68 - 68 visualisieren, dass sich die Wärmeeinträge als Auswirkung der reflektierenden Anstriche in Abhängigkeit vom solaren Reflexionsgrad ändern. Je höher der solare Reflexionsgrad, desto geringer fallen die Wärmeeinträge durch das Blechdach aus:

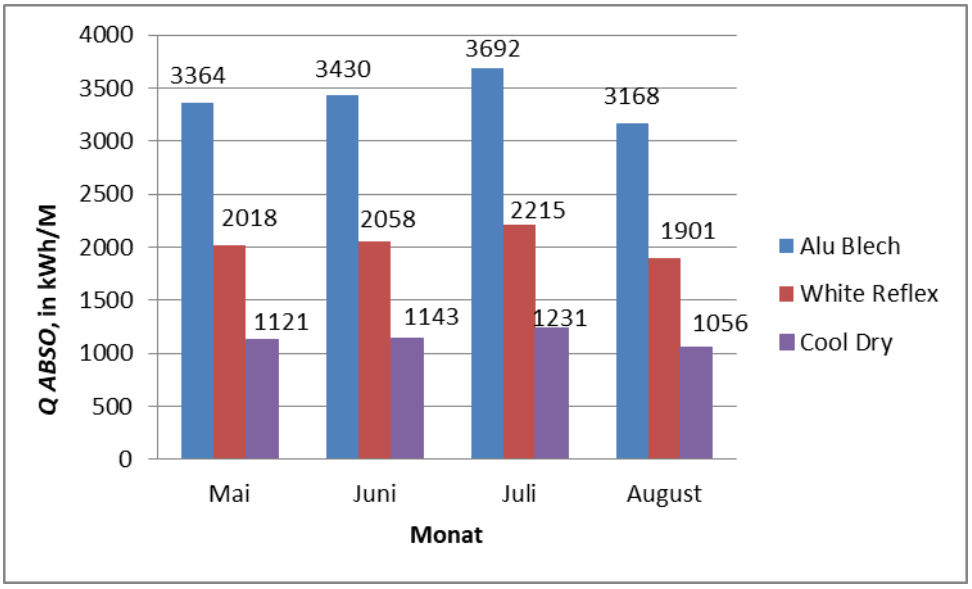


Abbildung 68: Wärmeeintrag durch von der Außenoberfläche der horizontalen Dachfläche absorbierte Gesamtstrahlung (exklusive der eigenen Emissionen) für die Zone „Sammlungsraum“

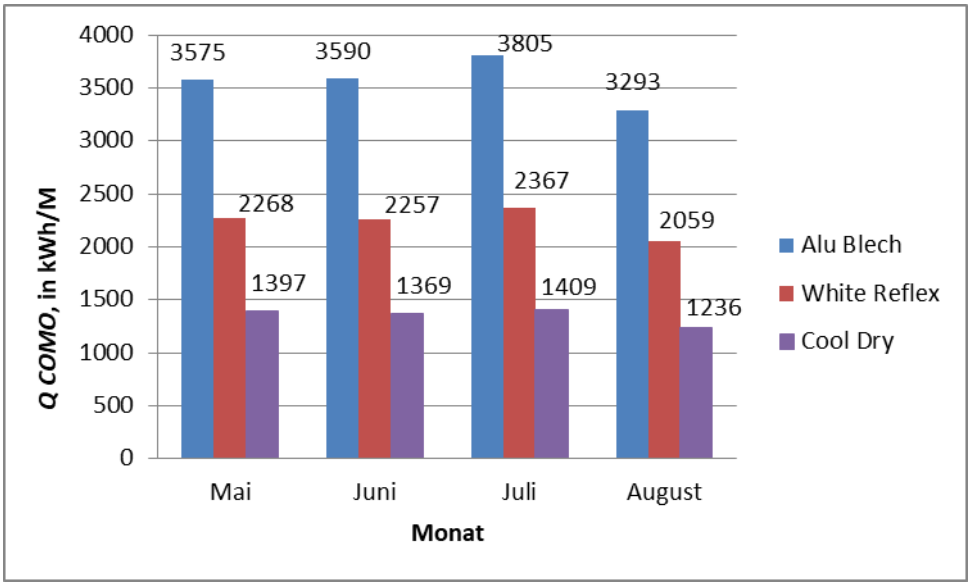


Abbildung 69: Wärmeeintrag durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der horizontalen Dachfläche für die Zone „Sammlungsraum“

Die Südfensterfläche für die vertikale thermische Zone „Sammlungsraum“ beträgt 65 m^2 mit dem höchsten solaren Wärmegewinn von 2866 kWh im Monat August für den betrachteten Zeitraum von Mai bis August, siehe Abbildung 70:

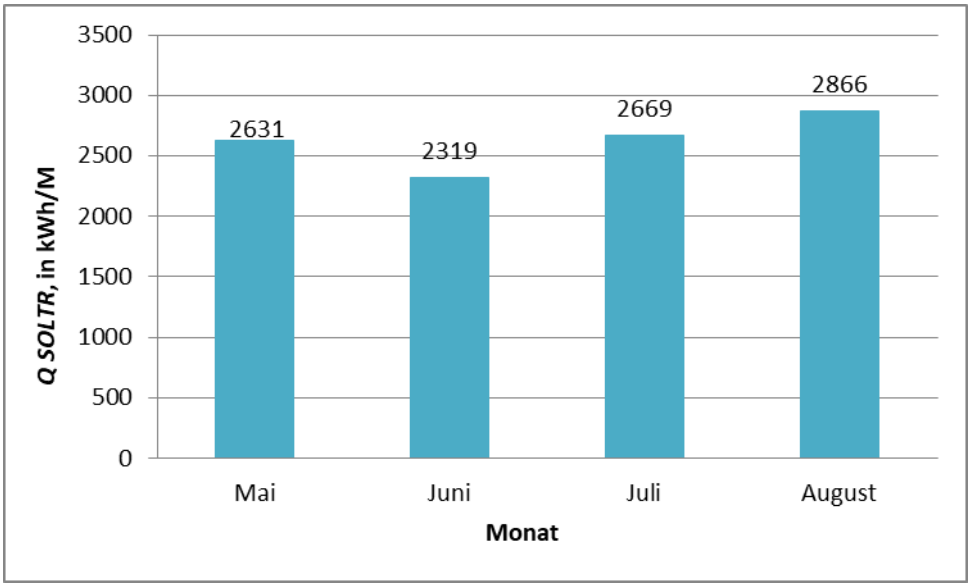


Abbildung 70: Solare Wärmegewinne infolge der durch die Fenster transmittierten kurzwelligen Strahlung in die Zone „Sammlungsraum“

Die niedrigen Luftwärmeverluste im Juli und August sind dadurch bedingt, dass die Schule in den Sommerferien gesperrt ist und der Luftwechsel laut dem beschriebenen Zeitprofil in Abschnitt 4.4.1 nur durch die Infiltration erfolgen wird.

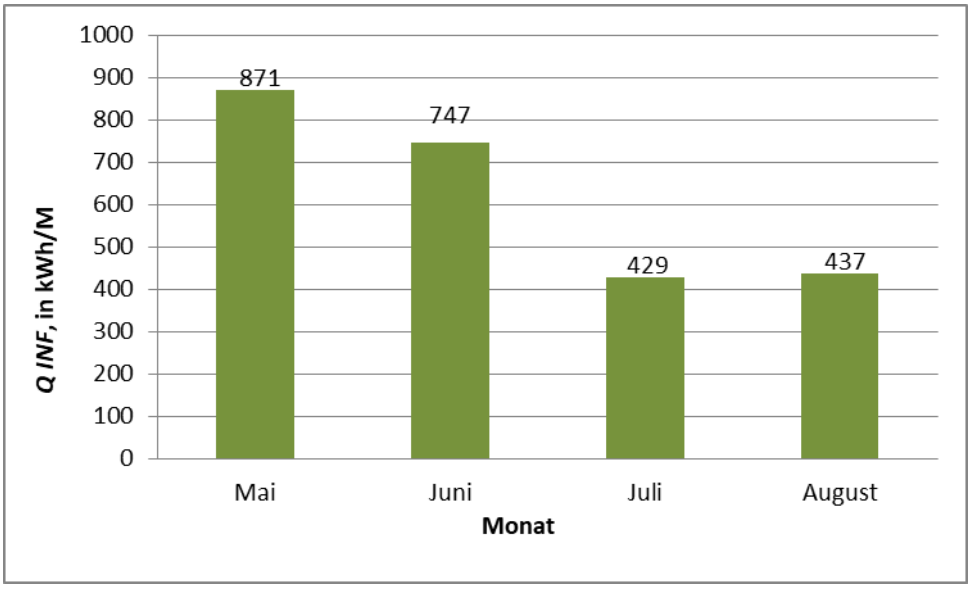


Abbildung 71: Lüftungswärmeverluste durch die Infiltration durch die Zone „Sammlungsraum“

Ausgehend von den analogischen Überlegungen wurde die vertikale thermische Zone „Sanitärraum“ analysiert, wobei die Ergebnisse der Simulation im Anhang B dargestellt sind.

5.6 Ergebnisse der Simulation des Dachgeschosses und zusätzliche Optimierungsmaßnahmen für das Raumklima im Dachgeschoss

In diesem Abschnitt werden im Dachgeschoss in der Zeit von Mai bis August die Dauerlüftung und die Nachtlüftung modelliert und danach mit Anwendung der reflektierenden Beschichtungen für das Dachgeschoss simuliert. Die Variationen der reflektierenden Anstriche sind in der Tabelle 18 dargestellt. Da die Ergebnisse der Gebäudesimulation mit Anwendung der verschiedenen reflektierenden Beschichtungen gezeigt haben, dass ihr Einfluss auf die Innenraumtemperatur des Gebäudes vernachlässigbar gering ist, folgt daraus, dass keine Auswirkung auf das Raumklima des Dachgeschosses entsteht. Aus diesem Grund werden die Außenwände von den anderen Zonen bei der Simulation nur mit dem Putz beschichtet bleiben.

Die ursprünglichen Daten für das Dachgeschoss sind:

Dachform	Steildach
Dachneigung	40°
Dacheindeckung	Dachziegel
Fläche	844,3 m^2
Volumen	2162,3 m^3
Fensterfläche	1,68 m^2
Infiltration	0,2 h^{-1}
Heizung	Nein
Kühlung	Nein

Die Abmessungen für das Dachgeschoss wurden dem Plan (Anhang D) entnommen.

Tabelle 18: Beschichtungen für die Außenoberfläche der Schule

Bauteil	**Ursprüngliche Beschichtung**	**1. Variation**	**2. Variation**	**3. Variation**
Dach, geneigt	Dachziegel, dunkel	„CoolDry“ Weiß	„White Reflex“ Weiß	„Alesta Cool“ Schwarz
Dach, horizontal	Alu Blech	Alu Blech	Alu Blech	Alu Blech
Außenwand	Putz	Putz	Putz	Putz

Die Abbildung 72 zeigt die von außen sichtbaren Dachflächen nach der Verteilung der Oberflächenbeschichtungen:

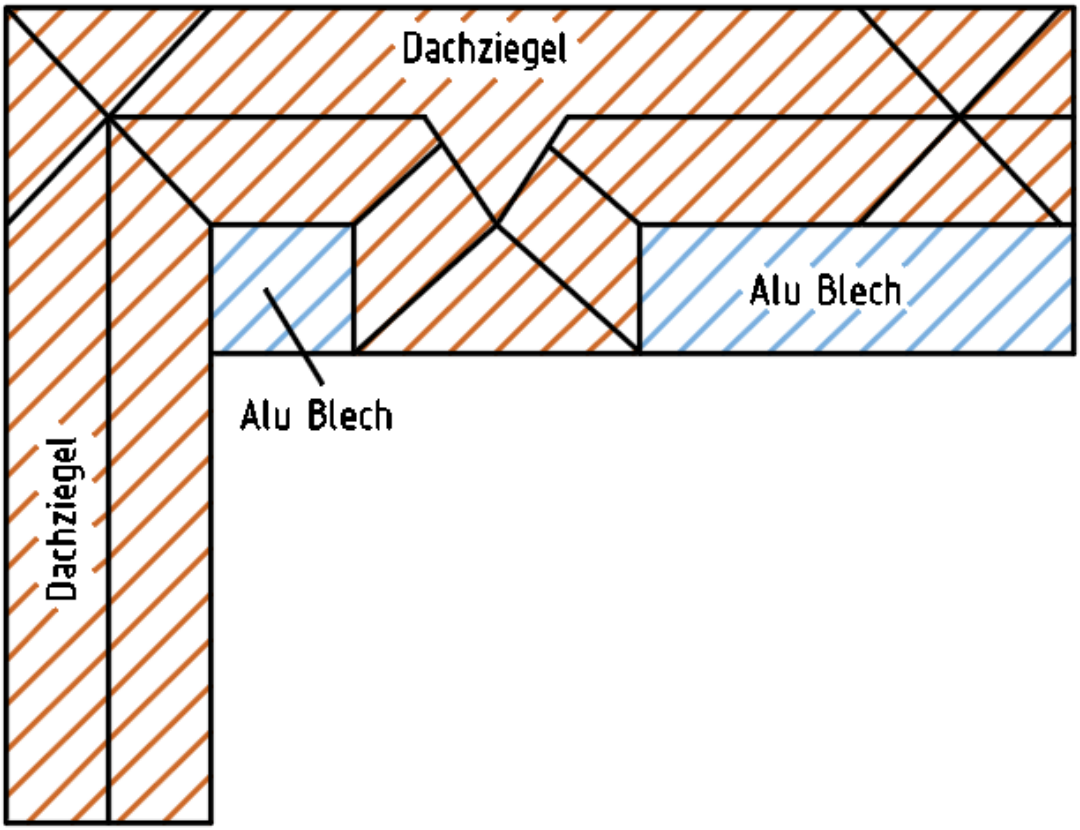


Abbildung 72: Verteilung der Oberflächenbeschichtungen der Dachfläche

Der erreichbare Luftwechsel bei der Dauerlüftung und der Nachtlüftung wird mit Hilfe der im Abschnitt 4.6.2 beschriebenen Methode für die Bestimmung der Dauerlüftung nach den Formeln (8) - (10) berechnet. Die Wetterdaten sind aus „Weather Data“ TYPE 109-TMY2 entnommen.

Die Abbildung 73 zeigt die Simulationsstruktur des betrachteten Gebäudes mit der zusätzlich erstellten Dauer-/Nachtlüftung für das Dachgeschoss für die Zeitperiode von Mai bis August. Die entsprechenden Verbindungslinien zwischen den Typen sind mit der Farbe Grün

bezeichnet. Wenn die Außentemperatur unter der Innentemperatur im DG liegt, sollen die Fenster geöffnet werden. Im Simulation Studio wird dies durch den Regler vorgenommen. Wenn die Außentemperatur über der Innenraumtemperatur liegt, wird der Regler ausgeschaltet. Bei der Simulation wird in dem Dachgeschoss nur die Infiltration durch Undichtigkeiten mit einem Luftwechsel von 0,2 h^{-1} berücksichtigt.

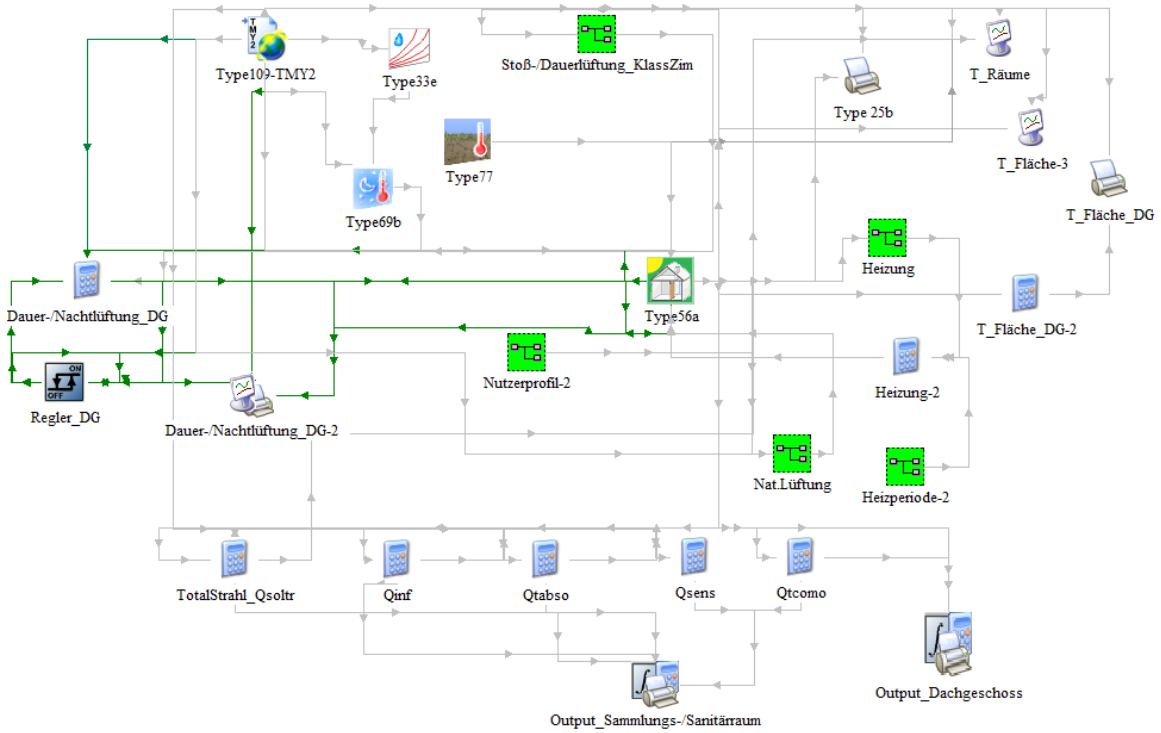


Abbildung 73: Die Simulationsstruktur des Gebäudes mit der Dauer-/Nachtlüftung für das Dachgeschoss

Die Abbildung 74 zeigt den erreichbaren Luftwechsel von Mai bis August. Die Ergebnisse machen erkennbar, dass aufgrund der geringeren Fensterfläche von 1,68 m^2 in Bezug auf das Dachvolumen von 2162,3 m^3 der Luftwechsel bei Dauerlüftung und Nachtlüftung gering bleibt.

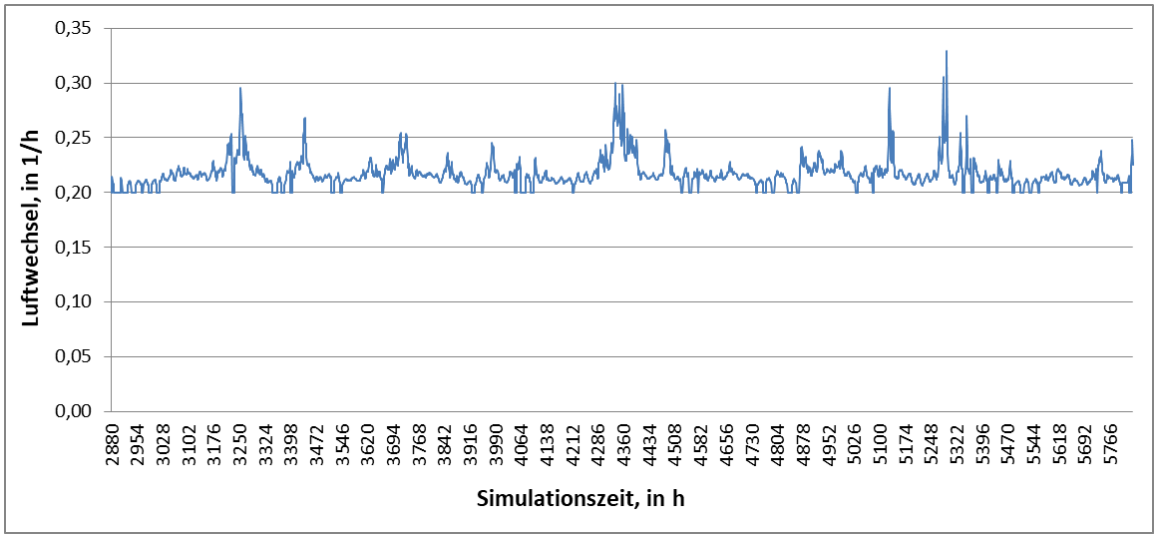


Abbildung 74: Luftwechsel im Dachgeschoss von Mai bis August

5.6.1 Raumklima in der Zone „Dachgeschoss“

Trotz des niedrigeren Luftwechsels bei Dauerlüftung und Nachtlüftung im DG werden die weiteren Simulationen mit den unterschiedlichen Beschichtungen für diesen Fall betrachtet.

Die Ergebnisse der Simulation lassen erkennen, dass die Innenraumtemperatur im DG an einem heißen Sommertag bei Anwendung der reflektierenden Anstriche „Cool Dry“, „White Reflex“ und „Alesta Cool“ maximal um 4,9℃, 4,5℃ und 1,4℃ gesenkt werden kann.

Die Änderung des Innentemperaturverlaufs im Dachgeschoss mit/ohne Dauer- und Nachtlüftung und ohne/unter der Wirkung der reflektierenden Anstriche für die Zeit von Mai bis August ist in der Abbildung 75 dargestellt:

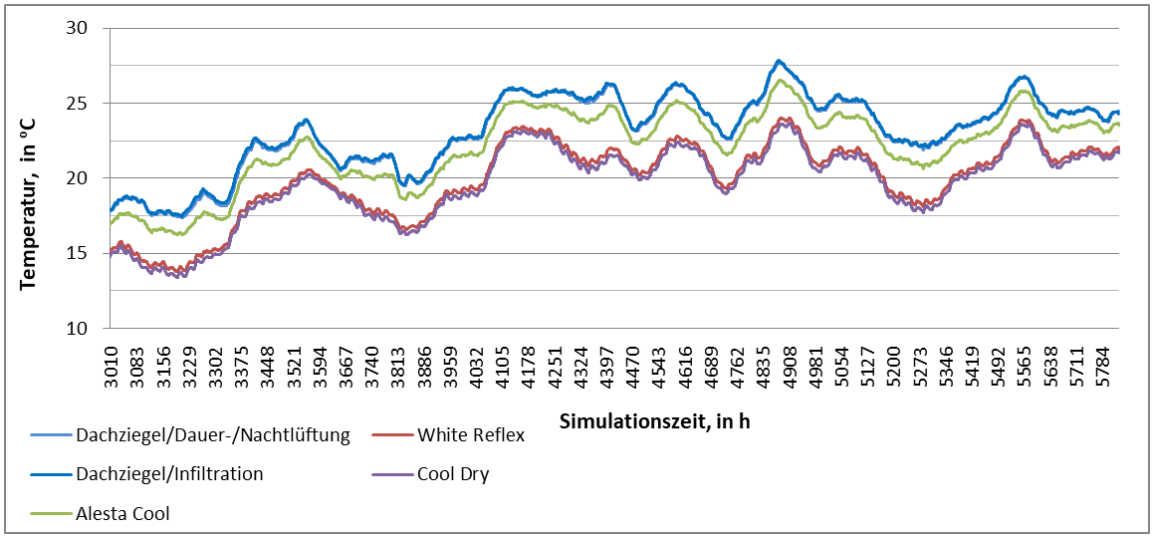


Abbildung 75: Temperaturverläufe im Dachgeschoss in der Zeitperiode von Mai bis August

5.6.2 Temperaturverlauf an der Außen-/Innendachfläche für die Zone „Dachgeschoss"

In der Tabelle 19 sind die Ergebnisse der thermodynamischen Simulation unter Anwendung der ursprünglichen und der reflektierenden Beschichtungen zusammengefasst und zeigen die maximal erreichbare Außenoberflächentemperatur der geneigten Dachflächen am heißesten Tag im Sommer und die dabei entstehende Innenoberflächentemperatur. Die maximale Temperatur auf der Außenoberfläche des Daches wird am 20. Juli erreicht. Die Temperatur ändert sich in Abhängigkeit von der Orientierung der Dachflächen und nimmt durch die reflektierenden Anstriche ab.

Tabelle 19: Die erreichbaren Temperaturen im DG am heißesten Tag

Beschichtungsart	**Maximale Temperatur an der Außenoberfläche, in °C**				**Temperatur an der Innenoberfläche, in °C**			
	N	W	S	O	N	W	S	O
Dachziegel	42,4	53,8	55,1	49,6	25,3	25,4	25,4	25,3
Alesta Cool	39,0	47,5	48,1	43,5	24,1	24,1	24,1	24,1
White Reflex	31,8	33,9	33,4	31,4	21,6	21,6	21,5	21,5
Cool Dry	30,7	31,9	31,4	30,3	21,2	21,2	21,2	21,2

Die grafische Abbildung der Temperaturverläufe an der Außendachfläche in West-, Ost- und Nord-Ausrichtung sowie die dabei entstehenden Innenoberflächentemperaturen am heißesten Tag im Sommer unter Einwirkung der betrachteten reflektierenden Anstriche sind in Anhang C wiedergegeben. Die Temperaturverläufe für die Süddachfläche werden in den Abbildungen 76 - 77 gezeigt:

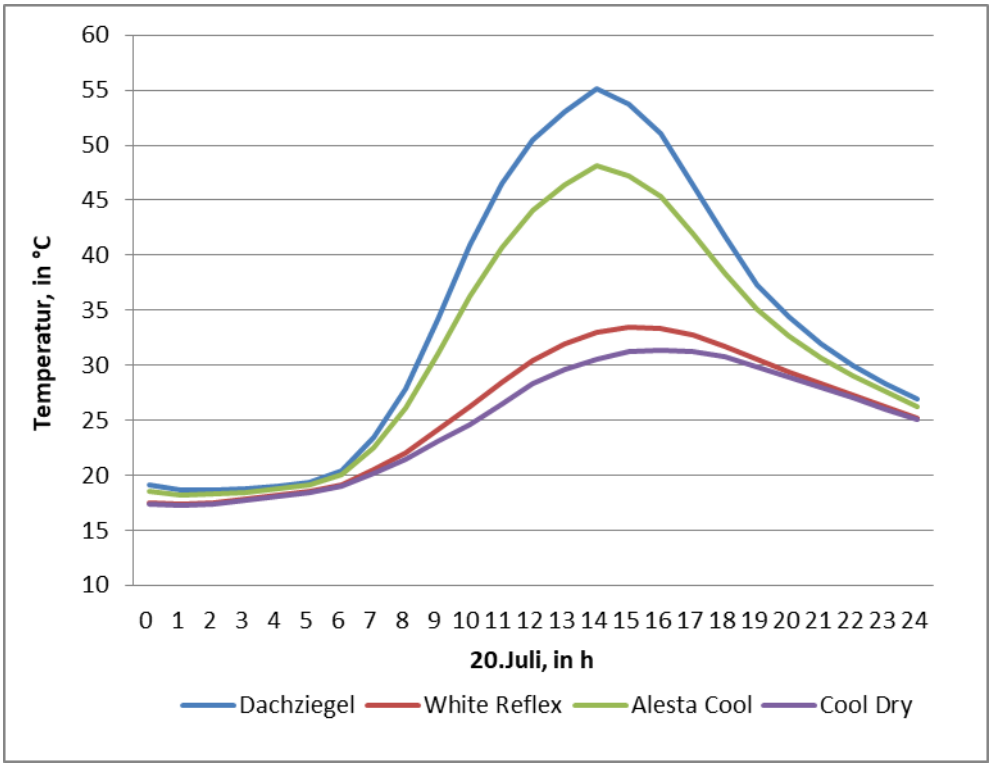


Abbildung 76: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Süddachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“

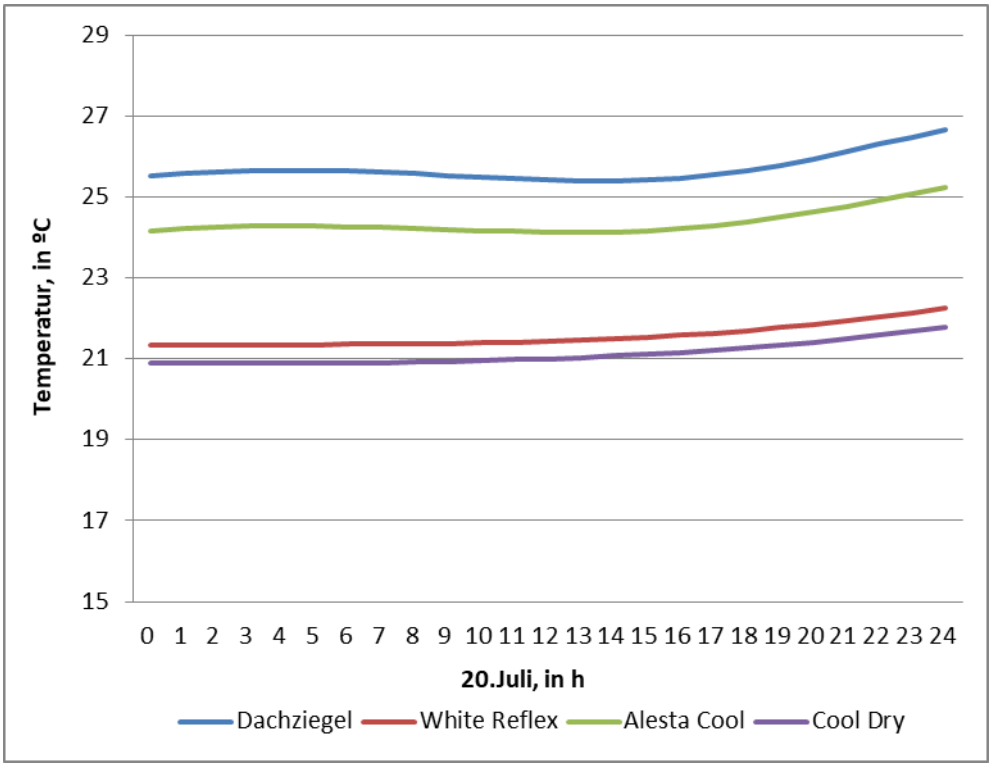


Abbildung 77: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Süddachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“

Im Anhang C werden die zeitlichen Verläufe der Temperatur an der Außen-/ Innenoberfläche der geneigten Dachflächen in West-, Ost- und Nord-Ausrichtung mit und ohne reflektierende Beschichtung im Laufe der drei heißesten Tage im Sommer gezeigt. Die Temperaturverläufe an den drei heißesten Tagen für die geneigte Süddachfläche sind in den Abbildungen 78 - 79 dargestellt:

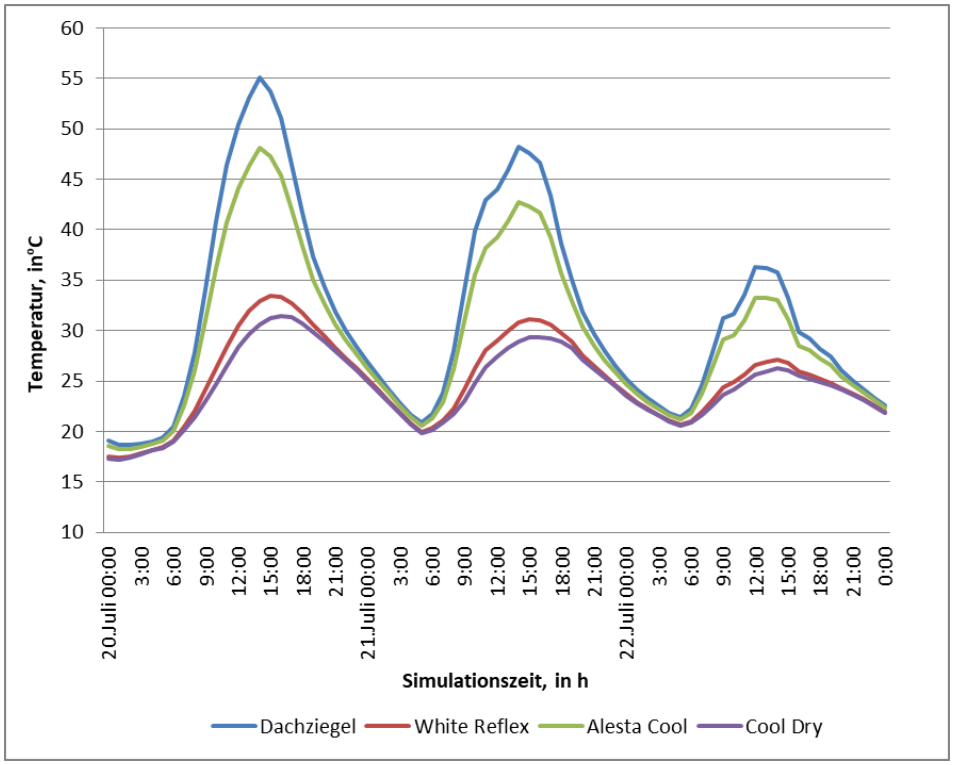


Abbildung 78: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Süddachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“

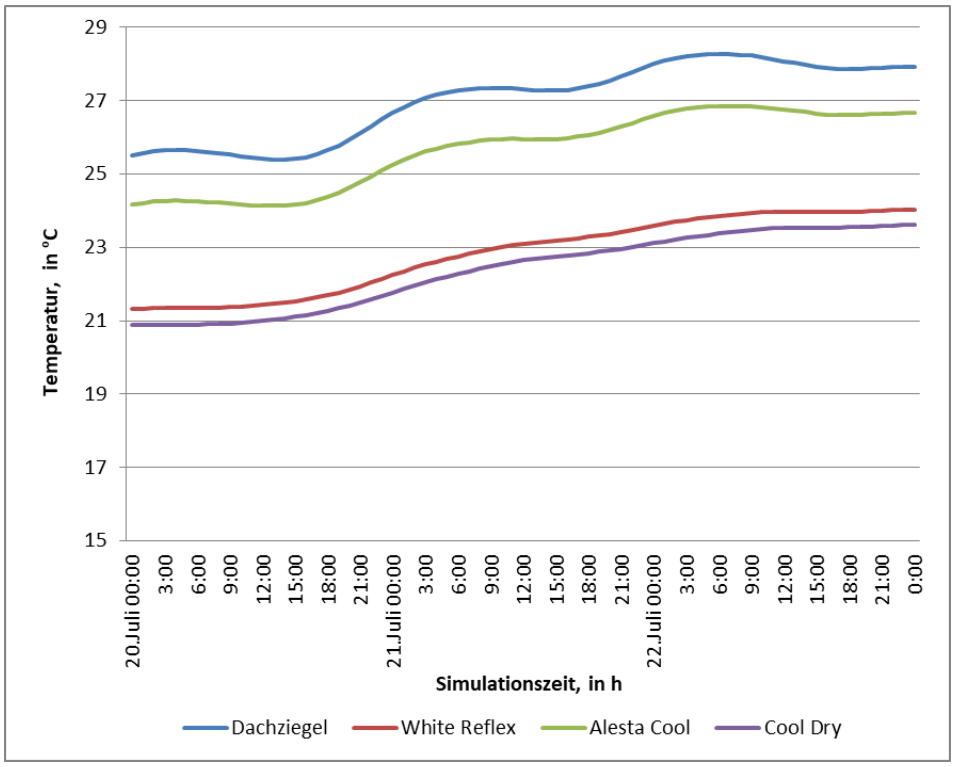


Abbildung 79: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Süddachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“

Durch direkte Sonneneinstrahlung entsteht unterhalb der Dachdeckung Stauwärme. Da die Außentemperatur während dieser drei heißesten Tage absinkt, fällt die Temperatur auf der Außenoberfläche, aber die Innenoberflächentemperatur steigt aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit der Dachkonstruktionen mit zeitlicher Verzögerung. Die maximale Temperatur an der Innenoberfläche des Daches und des Innenraumes wird am 22. Juli festgestellt.

5.6.3 Wärmeeinträge durch die Dachfläche in die Zone „Dachgeschoss“

Aus ähnlichen Gründen, die in dem Abschnitt 5.5.6 beschrieben wurden, sind die Outputs für die geneigten Dachflächen festgestellt und nach dem gleichen Prinzip in TRNBild bei der Option „Project“ definiert, siehe Abbildung 80. Als Outputs der Simulationen werden folgende Daten gewählt, nämlich *Q ABSO, Q COMO, Q SOLTR, Q INF*:

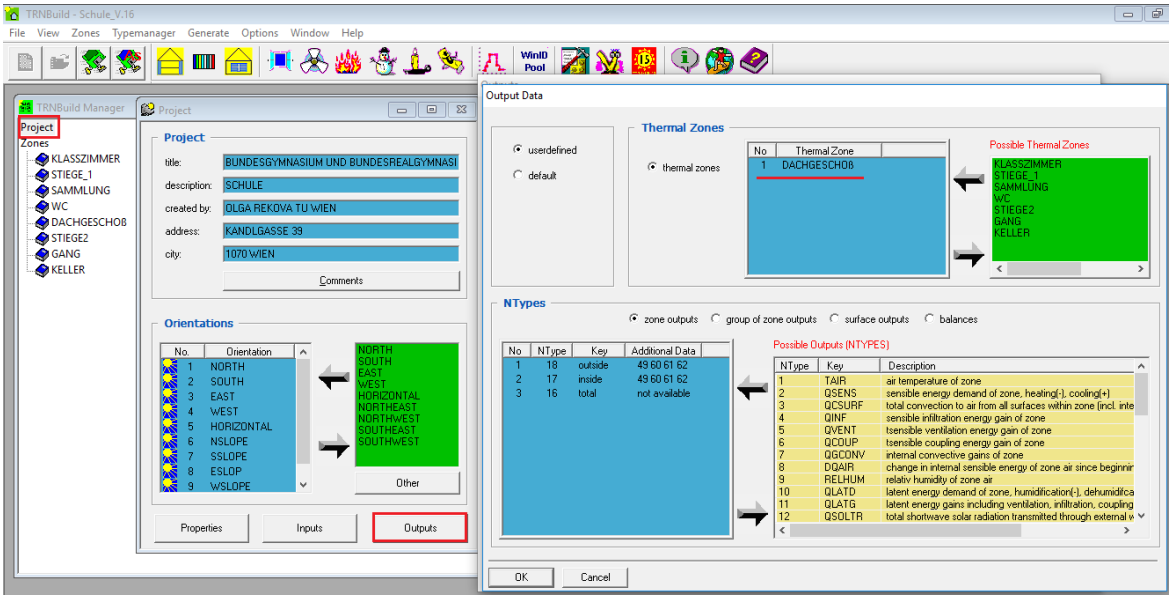


Abbildung 80: TRNBild-Eingabefenster für die Definition der Outputs für die Zone „Dachgeschoss“

Die Abbildungen 81 - 82 zeigen den Vergleich der Änderung der Wärmeeinträge in Abhängigkeit von den gewählten reflektierenden Anstrichen. Der Anstrich „Cool Dry“ mit dem solaren Reflexionsgrad von 0,9 hat einen merklichen Einfluss auf die Wärmeeintrage durch die absorbierte Gesamtstrahlung und durch Konvektion von Luft sowie durch langwellige Strahlung an der Außenoberfläche des Daches.

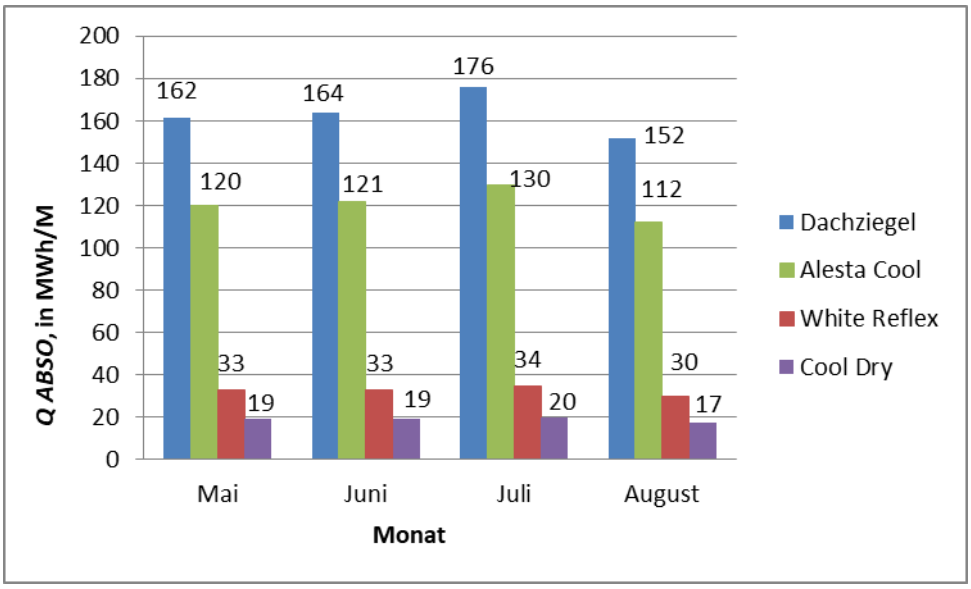


Abbildung 81: Wärmeeintrag durch von der Außenoberfläche des Daches absorbierte Gesamtstrahlung (exklusive der eigenen Emissionen)

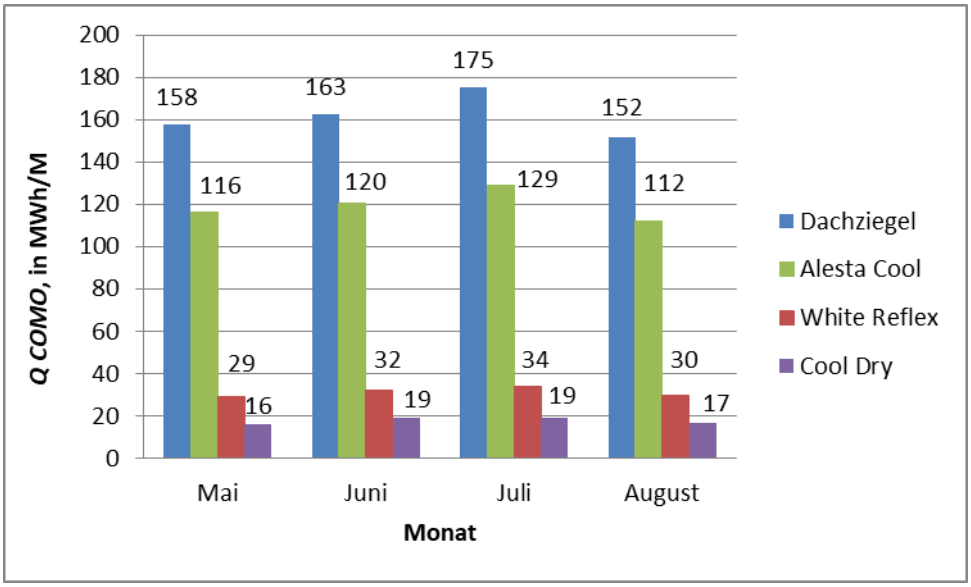


Abbildung 82: Wärmeeintrag durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der Außenoberfläche des Daches

Die Abbildung 83 lässt die solaren Wärmegewinne durch die Nordfensterfläche von 1,68 m² erkennen, die durch transmittierte kurzwellige Strahlung in der Zone „Dachgeschoss“ entstehen. Im Juni und Juli halten sie fast das gleiche Niveau:

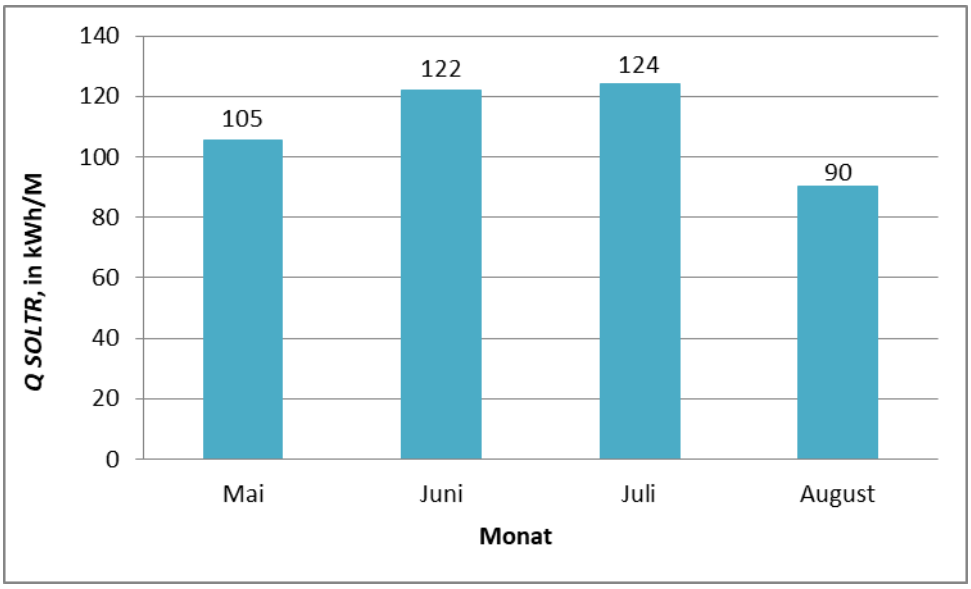


Abbildung 83: Solare Wärmegewinne infolge der durch die Fenster transmittierten kurzwelligen Strahlung in die thermische Zone „Dachgeschoss“

Es wurde festgelegt, dass die Fensterlüftung im Laufe des Tages und die Nachtlüftung nur dann vorgenommen werden, wenn die Außentemperatur unter der Innentemperatur liegt. Unter der Wirkung der reflektierenden Anstriche ist die Innenraumtemperatur im DG niedriger als beim Dach ohne reflektierende Anstriche und liegt öfter unter der Außentemperatur, d.h. die Fenster sind zugemacht. Deshalb nimmt der Wärmestrom durch die Fensterlüftung ab, siehe Abbildung 84:

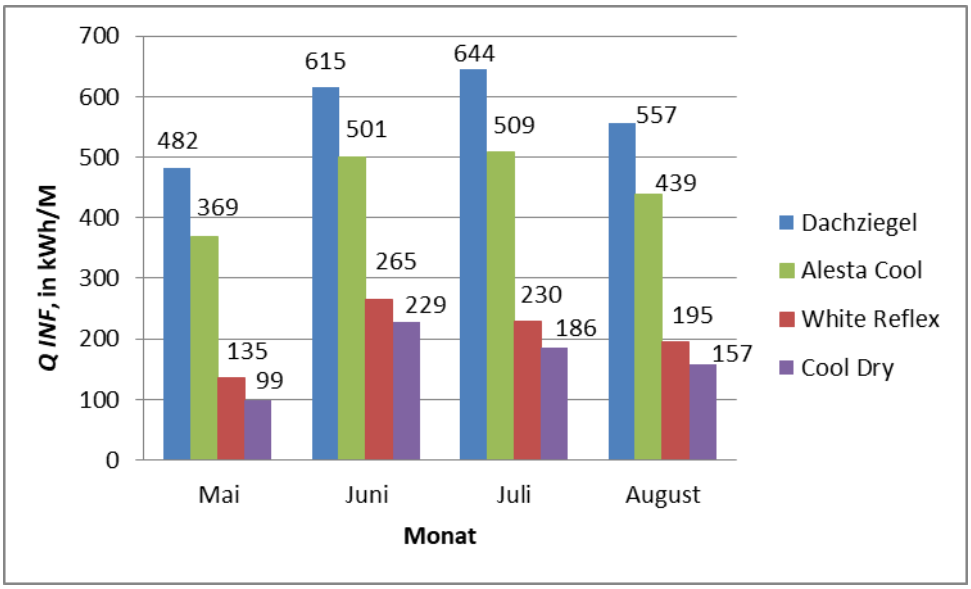


Abbildung 84: Lüftungswärmeverluste durch die Infiltration durch die Zone „Dachgeschoss“

6 Zusammenfassung und Fazit

Die Berechnungen wurden mit TRNSYS, einem Programm das zur thermischen Simulation von Gebäuden und Anlagen dient, durchgeführt.

Das Gebäude wurde in 8 thermische Zonen eingeteilt und simuliert. Für jede thermische Zone sind die notwendigen Parameter laut Normen und Fachliteratur angenommen worden. Für die Zone „Klassenzimmer“ wurden zwei Lüftungskonzepte bei Fensterlüftung betrachtet. Bei der ersten Variante wurde der Luftwechsel für die Zone „Klassenzimmer“ aufgrund des hygienisch erforderlichen Luftvolumenstroms pro Person berechnet und bei der zweiten Variante wurde eine Mindestluftwechselrate angenommen.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass die Fensterlüftung mit einem Luftwechsel von 5,4 h^{-1} für die Zone „Klassenzimmer“ im Winter nicht realisierbar ist, da die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit bei der Stoßlüftung in der Winterzeit nicht erfüllt sind. Darüber hinaus resultiert eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs, da die oft geöffneten Fenster in der Winterzeit zu hohen Wärmeverlusten führen und folglich zu erhöhten Energiekosten, da Wärmerückgewinnung bei Fensterlüftung nicht möglich ist.

Die zweite Variante mit einem Mindestluftwechsel von 1,8 h^{-1} für die Zone „Klassenzimmer“ ist realisierbar. Das wurde durch die zusätzlichen Berechnungen mit Verfahren A und B überprüft. Dabei wurde zwar ein niedriger Wert für den Heizwärmebedarf im Vergleich zur Variante 1 bekommen, aber die Raumluftqualität in der Winterzeit bei Mindestluftwechsel muss als „niedrig“ eingeschätzt werden.

In der Zeit von Mai bis August können in der Zone „Klassenzimmer“ durch die Dauer-/ Nachtlüftung und Stoßlüftung unter der Bedingung, dass die Außentemperatur unter der Innentemperatur ist, bei gekippten Fenstern ein akzeptabler Luftwechsel und eine Innenraumtemperatur von unter 26℃ erreicht werden.

Nach der Modellierung und Simulation mit dem Gebäudemodell des Ist-Zustands mit den ursprünglichen Aufbauten und Beschichtungen, wurde die Möglichkeit der Optimierung der thermischen Behaglichkeit im ganzen Gebäude und dem Dachgeschoss durch reflektierende Anstriche untersucht.

Der solare Reflexionsgrad und der solare Absorptionsgrad von den reflektierenden Anstrichen „Cool Dry“ Weiß, „White Reflex“ Weiß und „Alesta Cool“ Schwarz ändern sich in Abhängigkeit von den in der Zusammensetzung enthaltenen IR reflektierenden Pigmenten und von der Bindermittelbasis.

Der Pigmenttyp, seine Partikelgrößen und die Partikelgrößenverteilung, sowie die Nachbearbeitung der Pigmente beeinflussen die Reflexionseigenschaften der

reflektierenden Anstriche. Der Prozentanteil der Pigmente in der Zusammensetzung hat auch einen merklichen Einfluss und darf nicht vernachlässigt werden. Die Transparenz des Bindemittels soll auch berücksichtigt werden, da sie auch einen Einfluss auf die reflektierenden Eigenschaften hat. Es sollen die Pigmente, das Bindemittel und die Untergründe immer im Zusammenhang betrachten werden, da durch die Wechselwirkung miteinander, die reflektierenden Anstriche verbesserte Eigenschaften, wie hohe solare Reflexionsgrade sowie gute Wetter- und UV-Beständigkeit bekommen.

Die Verluste des solaren Reflexionsgrades über die Zeit sind von den Wetterbedingungen und zwar Temperaturen, Luftgeschwindigkeit, UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Luftqualität und von der chemischen Zusammensetzung der betreffenden Beschichtungen abhängig.

Die Anwendung von reflektierenden Anstrichen auf die Außenoberfläche des geneigten Daches vom Dachgeschoß weist eine erhebliche Reduktion der Temperatur auf der Außenoberfläche in Abhängigkeit von der Orientierung der Dachfläche auf. Die Temperatur der südorientierten geneigten Außenoberfläche des Daches kann am heißesten Tag durch die Anstriche „Cool Dry“ Weiß, „White Reflex“ Weiß und „Alesta Cool“ Schwarz um 23,7℃, 21,7℃ und 7,0℃ gesenkt werden.

Die Innenraumtemperatur im DG kann unter der Berücksichtigung der zeitlichen Verzögerung aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit des Daches um 4,9℃, 4,5℃ und 1,4℃ bei den Anstrichen „Cool Dry“ Weiß, „White Reflex“ Weiß und „Alesta Cool“ Schwarz im Vergleich zur ursprünglichen Außenbeschichtung gesenkt werden.

Durch das erhöhte Rückstrahlvermögen wird die Überhitzung der Außenoberfläche des Daches unter der direkten Sonneneinstrahlung merklich verhindert, die Beschichtung bleibt kühl und verlängert die Lebensdauer des Daches.

Die Auswirkungen der Dauerlüftung und Nachtlüftung auf die Innenraumtemperatur im DG sind aufgrund der geringeren Fensterfläche niedrig und können vernachlässigt werden.

Die Anwendung der reflektierenden Beschichtungen auf die Außenoberflächen der Außenwände aus Vollziegel zeigte, dass der jährliche Heizwärmebedarf bei den Anstrichen „Cool Dry“ Weiß, „White Reflex“ Weiß und „Alesta Cool“ Schwarz um 6 %, 5 % und 1 % entsprechend steigt, was durch die Absenkung der Außenoberflächentemperatur aufgrund der niedrigeren solaren Absorption der reflektierenden Beschichtungen verursacht wird. In der Übergangszeit und im Sommer kann die Innenraumtemperatur in den thermischen Zonen „Klassenzimmer“ um ca. 1,1℃ und in den Zonen „Sammlungsraum“ und „Sanitärraum“ um ca. 1,5℃ gesenkt werden. Die geringere Auswirkung der reflektierenden Beschichtungen auf die Auskühlung der betreffenden Zonen ist durch die gute Wärmespeicherfähigkeit der Vollziegel bedingt. Die Auskühlung ist auf die wirksame Schichtdicke des Baustoffes begrenzt, da die wirksame Speicherung durch den Bauteil nicht

über den ganzen Bauteilquerschnitt erfolgt, sondern auf eine begrenzte Dicke beschränkt ist. Je größer die gespeicherte Wärmemenge und je kleiner die Wärmeleitfähigkeit ist, umso langsamer kühlt der Raum aus.

Daraus kann geschlossen werden, dass die Anwendung der betrachteten reflektierenden Anstriche auf der Außenoberfläche des Daches zur Auskühlung der Innenraumtemperatur im DG führt. Die Anwendung dieser Anstriche für die Außenwände der Schule hat keinen merklich vorteilhaften Einfluss auf die Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in den festgelegten thermischen Zonen und führt zu einer Erhöhung des jährlichen Heizwärmebedarfs.

7 Nomenklatur

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Definition
α, α_{sol}	--	Solarer Absorptionsgrad
$\rho, \rho_{\mathrm{sol}}$	--	Solarer Reflexionsgrad
τ	--	Transmissionsgrad
α_{λ}	--	Spektraler Absorptionsgrad
ρ_{λ}	--	Spektraler Reflexionsgrad
ε	--	Emissionsgrad
$I_{\lambda,\mathrm{AM}}$	W(/m^2 nm)	die spektrale Strahlungsintensität für AM 1,0
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
λ	nm	Wellenlänge
$\Delta\lambda$	nm	Wellenlängenintervall
V_{G}	m^3	Gebäudevolumen
Q_{v}	m^3/h	Luftvolumenstrom
n_{50}	--	Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz
e	--	Abschirmungskoeffizient für verschiedene Gebäudestandorte
ϵ	--	Höhenkorrektur
C_{t}	--	Berücksichtigung der Windturbulenzen
C_{wind}	--	Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit
C_{st}	--	Berücksichtigung des thermischen Auftriebs
$C_{\mathrm{k}}(\alpha)$	--	Verhältnis des Luftvolumenstroms durch ein gekipptes Fenster zum Volumenstrom durch das vollständig geöffnete Fenster
h	m	Höhe, in m
V_{met}	m/s	Meteorologische Windgeschwindigkeit
A_{ow}	m^2	Fensteröffnungsfläche
A_{w}	m^2	Fläche des vollständig geöffneten Fensters
a	m	Spaltbreite
B	m	Breite des Fensters
H	m	Höhe der freien Flächen des Fensters
γ	°	Öffnungswinkel
f_{sky}	--	Sichtfaktor zum Himmel
T_{sky}	°C	Fiktive Himmelstemperatur
T_{a}	°C	Außenlufttemperatur
$T_{\mathrm{s,a}}$	°C	Temperatur für Außenoberfläche
T_{i}	°C	Innenraumtemperatur oder mittlere Wandtemperatur
$\dot{q}_{\mathrm{comb,s,a}}$	W	Wärmestrom durch Konvektion von Luft und durch langwellige

		Strahlung an der Außenoberfläche
$\dot{q}_{\mathrm{c,s,a}}$, $\dot{q}_{\mathrm{c,s,i}}$	W	Wärmestrom durch Konvektion an der Außenseite und Innenseite von Bauteilen
$\dot{q}_{\mathrm{r,s,a}}$, $\dot{q}_{\mathrm{r,s,i}}$	W	Wärmestrom durch langwellige Strahlung an der Außen- und Innenoberfläche
$S_{\mathrm{s,a}}$	W	Wärmestrom durch von den Außenoberflächen absorbierte kurzwellige Sonnenstrahlung
$S_{\mathrm{s,i}}$	W	Wärmestrom durch von Innenoberflächen absorbierte solare und langwellige Strahlung, bspw. durch Wärmegewinn von Menschen und Geräten
Q ABSO	Wh/M	Wärmeeintrag durch von den Außenoberflächen des Daches absorbierte Gesamtstrahlung (ausgeschlossen die eigenen Emissionen)
Q COMO	Wh/M	Wärmeeintrag durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der Außenoberfläche des Daches
Q SOLTR	Wh/M	Solare Wärmegewinne infolge der durch die Fenster transmittierten kurzwelligen Strahlung für die betrachtete Zone
Q INF	Wh/M	Lüftungswärmeverluste durch die Infiltration für die betrachtete Zone
$h_{\mathrm{conv,s,a}}$	W/(m^2 K)	Wärmeübergangskoeffizient der Konvektion auf der Außenoberfläche
$h_{\mathrm{s,i/a}}$	W/(m^2 K)	Wärmeübergangskoeffizient auf der Innen- bzw. Außenseite des Bauteils
U	W/(m^2 K)	Wärmedurchgangskoeffizient
g	--	Gesamtenergiedurchlassgrad
σ	W/(m^2 K^4)	Stephan-Boltzmann Konstante
c	kJ/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität
a_{s}, b_{s}, c_{s}, d_{s}	--	Koeffizienten der Zeitreihe

Indizes

Symbol	Einheit	Definition
c		Konvektion, konvektiv
r		Strahlung
comb		Konvektion und Strahlung
a		Außen oder Außenbereich
i		Innen oder Innenbereich
sky		Himmel
s		Oberfläche

λ	Spektral
AM	Air-Mass-Zahl
v	Luft
t	Turbulenz
wind	Wind
st	Thermisch
abs	Absolutwert
met	Meteorologisch
ow	Fensteröffnung
w	Fenster
G	Gebäude
k	Zeitreihe

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arten der Sonnenstrahlung 4
Tabelle 2: Einteilung der NIR-Strahlung 4
Tabelle 3: Materialien für Kunststoffdachbahnen, aus [17], s.44 19
Tabelle 4: Änderung des solaren Reflexionsgrades durch die Zeit 24
Tabelle 5: Der solare Reflexionsgrad und der IR-Emissionsgrad für herkömmliche und kühlende Dächer, aus [23] 29
Tabelle 6: Eigenschaften der konventionellen Pigmente, aus Kunststoffeinfärbung [34], Kapitel 4, s.27 34
Tabelle 7: Übersicht von Räumlichkeiten und Flächen 41
Tabelle 8: Aufbau der Wandflächen für das Gebäudemodell „Schule“ im Ist-Zustand 44
Tabelle 9: Beschreibung der Fenstertypen des Gebäudes 45
Tabelle 10: Thermische Zonen hinsichtlich Flächen und Volumen 50
Tabelle 11: Solarer Absorptionsgrad für opake Außenoberflächen und Innenoberflächen des Bauteils 52
Tabelle 12: Orientierung der Bauteile 53
Tabelle 13: Verfügbare Geräte in der Schule 56
Tabelle 14: Erforderliche Anzahl der Fenster bei der Dauerlüftung für das betrachtete Klassenzimmer 69
Tabelle 15: Erforderliche Anzahl der Fenster bei Stoßlüftung für das betrachtete Klassenzimmer 70
Tabelle 16: Die Beschichtungen für die äußere Oberfläche der Schule 82
Tabelle 17: Eigenschaften der reflektierenden Anstriche 83
Tabelle 18: Beschichtungen für die Außenoberfläche der Schule 99
Tabelle 19: Die erreichbaren Temperaturen im DG am heißesten Tag 102

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arten der Wechselwirkung zwischen Strahlung und Materie, aus Regenerative Energietechnik [1], Kapitel 3, s.111 1
Abbildung 2: Die Energiebilanzen von Erdoberfläche, Atmosphäre und Obergrenze der Atmosphäre, aus Raumklimatechnik [2], Kapitel B, s.33 2
Abbildung 3: „Elektromagnetisches Strahlungsspektrum“, aus Regenerative Energietechnik [1], Kapitel 3, s. 112 4
Abbildung 4: Sonnenstrahlungsintensität, aus Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik [4], Kapitel 1, s.46 5
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Wärmeübertragungsvorgänge an opaken (eine Wand) und transparenten Bauteilen (ein Fenster), aus Skriptum „Lüftungs- und Klimatechnik“ [8], s. 26 7
Abbildung 6: Erläuterung zum Terminus der Air-Mass-Zahl, aus Photovoltaik [12], Kapitel 2, s. 20 9

Abbildung 7: Reflektionsspektrum von IR reflektierenden und herkömmlichen Anstrichen auf Basis von Acryl-Bindemitteln, aus [19] 13
Abbildung 8: Probe mit matter Oberfläche mit Y1 … Y4 Pigmenten aus der Gelben Farbgruppe, aus [21] 16
Abbildung 9: Probe mit matter Oberfläche und mit B1 … B4 Pigmenten aus der Schwarzen Farbgruppe, aus [21] 17
Abbildung 10: Probe mit matter Oberfläche und mit G1 … G4 Pigmenten aus der Grünen Farbgruppe, aus [21] 17
Abbildung 11: Mittlere absolute Verluste im Hinblick auf den solaren Reflexionsgrad durch die Zeit, aus [22] 23
Abbildung 12: Die spektrale Reflexion der angestrichenen Proben beim weißen herkömmlichen Anstrich im Ausgangszustand, in 3, 6, 9, 12, 15 und 18 Monaten der natürlichen Alterung, aus [25]. 26
Abbildung 13: Die spektrale Reflexion der angestrichenen Proben beim weißen reflektierenden Anstrich im Ausgangszustand, in 3, 6, 9, 12, 15 und 18 Monaten der natürlichen Alterung, aus [25]. 26
Abbildung 14: Die spektrale Reflexion der angestrichenen Proben beim roten reflektierenden Anstrich im Ausgangszustand, in 3, 6, 9, 12, 15 und 18 Monaten der natürlichen Alterung, aus [25] 27
Abbildung 15: Die spektrale Reflexion der angestrichenen Proben beim schwarzen herkömmlichen Anstrich im Ausgangszustand, in 3, 6, 9, 12, 15 und 18 Monaten der natürlichen Alterung, aus [25]. 27
Abbildung 16: Screenshot von der Homepage „Product Rating Database“ für eine kühlende Dachbeschichtung [27] 29
Abbildung 17: Screenshot von der Homepage „Cool Roof Rating Council“ für die zwei kühlenden Dachbeschichtungen [28] 31
Abbildung 18: Screenshot von der Homepage „Energy Star“ für eine Dachbeschichtung [29] 31
Abbildung 19: Optische Vorgänge an den Buntpigmenten (A) und an den Weiß-, Schwarz- und Metallpigmenten (B): 1 Transmission, 2 Absorption, 3 Remission an der Oberfläche, 4 Remission im Inneren, 5 Reflexion, aus Beschichtungstechniken heute [33], Kapitel 7, s.260 34
Abbildung 20: A. Licht- und Wärmestrahlung der reflektierenden Metallpigmente, welche darin besteht, dass sie im Bindemittel schwimmen und einen Spiegel bilden; B. Keine Reflexion, aus Beschichtungstechniken heute [33], Kapitel 7, s.261 35
Abbildung 21: Simulationsstruktur der Schule im Ist-Zustand 46
Abbildung 22: TRNSYS Simulation Studio mit der Abbildung der Makrokomponente „Heizung“ 47
Abbildung 23: Temperaturverlauf der Außen- und Bodentemperatur über das Jahr 48
Abbildung 24: Zonierung des betrachteten Gebäudes 51
Abbildung 25: TRNBild – die Eingabefenster für die thermische Zone „Klassenzimmer“ 52
Abbildung 26: Strukturaufbau für das Nutzerprofil der Schule in TRNSYS Simulation Studio 54
Abbildung 27: Zeitprofile für den Schultag 54
Abbildung 28: Zeitprofile für das Wochenende 54
Abbildung 29: TRNBild - Eingabefenster für die internen Wärmegewinne durch die Personen in der Zone „Klassenzimmer“ 55

Abbildung 30: TRNBild - Eingabefenster für die internen Wärmegewinne durch die Geräte in der Zone „Klassenzimmer“ ... 56
Abbildung 31: TRNBild - Eingabefenster für die thermische Behaglichkeit in der Zone „Klassenzimmer“ ... 57
Abbildung 32: Eingabefenster für die Definition des Hysterese Reglers für die Heizung ... 58
Abbildung 33: TRNBild – Eingabefenster für die Natürliche Lüftung: Variante 1 ... 61
Abbildung 34: TRNBild – Eingabefenster für die natürliche Lüftung der Zone „Klassenzimmer“: Variante 2 ... 61
Abbildung 35: Zusätzlich entwickelte Simulationsstruktur für ein Klassenzimmer für Verfahren A ... 64
Abbildung 36: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 30° durch Stoßlüftung über ein Jahr in einem Klassenzimmer ... 65
Abbildung 37: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 15° und 30° durch Stoßlüftung über ein Jahr in einem Klassenzimmer ... 66
Abbildung 38: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 15° und 30° bei Dauerlüftung von Mai bis August in einem Klassenzimmer ... 66
Abbildung 39: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 15° bei Stoßlüftung und Dauerlüftung von Mai bis August in einem Klassenzimmer ... 67
Abbildung 40: Luftwechsel bei gekipptem Fenster im Winkel von 30° bei Stoßlüftung und Dauerlüftung von Mai bis August in einem Klassenzimmer ... 67
Abbildung 41: Gekipptes Fenster im Winkel von γ ... 68
Abbildung 42: Verlauf der Innenraumtemperatur in der Zone „Klassenzimmer“ bei einer Luftwechselrate von 5,4 h^{-1} und in der Zone „Sammlungsraum“ ... 70
Abbildung 43: Verlauf der Innenraumtemperatur in der Zone „Klassenzimmer“ bei einer Luftwechselrate von 1,8 h^{-1} und in der Zone „Sammlungsraum“ ... 71
Abbildung 44: Verlauf der Innenraumtemperatur in den Zonen „Stiege 1“ und „Stiege 2“ ... 71
Abbildung 45: Verlauf der Innenraumtemperatur in den Zonen „Gang“ und „Sanitärraum“ ... 72
Abbildung 46: Verlauf der Innenraumtemperatur in den Zonen „Dachgeschoss“ und „Kellergeschoss“ ... 72
Abbildung 47: Monatliche Wärmeverluste durch die Fensterlüftung und die Infiltration für die zwei Hauptsimulationsvarianten ... 73
Abbildung 48: Monatliche solare Wärmegewinne ... 74
Abbildung 49: Monatliche interne Wärmegewinne in der Schule ... 74
Abbildung 50: Vergleich der monatlichen HWB für die zwei Hauptsimulationsvarianten ... 75
Abbildung 51: Wärmeströme und Temperaturen an der Außenoberfläche und Innenoberfläche einer Außenwand oder des Daches, aus TRNSYS Handbuch [41], Band 6, s. 66 ... 78
Abbildung 52: Vergleich des monatlichen Heizwärmebedarfs bei den diversen Anstrichen ... 84
Abbildung 53: Vergleich des jährlichen Heizwärmebedarfs des Gebäudes ... 85
Abbildung 54: Vergleich des Verlaufes der Innerraumtemperatur in der Zone „Klassenzimmer“ hinsichtlich der verschiedenen Beschichtungen ... 86

Abbildung 55: Verlauf der Innenoberflächentemperatur an der Südwand der Zone „Klassenzimmer“ über ein Jahr hinweg 87
Abbildung 56: Verlauf der Innenoberflächentemperatur im Laufe von einer Woche an der Südwand in der Zone „Klassenzimmer“..... 88
Abbildung 57: Verteilung der Intensität der Sonnenstrahlung an die Südwand des Gebäudes über ein Jahr hinweg..... 88
Abbildung 58: Vergleich der Temperaturverläufe an der Außenoberfläche bei der Nordwand 89
Abbildung 59: Vergleich der Temperaturverläufe an der Außenoberfläche bei der Westwand..... 89
Abbildung 60: Vergleich der Temperaturverläufe an der Außenoberfläche bei der Südwand 90
Abbildung 61: Vergleich des Innenraumtemperaturverlaufes in der Zone „Sammlungsraum“..... 91
Abbildung 62: Vergleich des Innenraumtemperaturverlaufes in der Zone „Sanitärraum“ 91
Abbildung 63: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der horizontalen Dachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Sammlungsraum“ 92
Abbildung 64: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der horizontalen Dachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Sammlungsraum“..... 93
Abbildung 65: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der horizontalen Dachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Sanitärraum“..... 94
Abbildung 66: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der horizontalen Dachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Sanitärraum“..... 94
Abbildung 67: TRNBild – Eingabefenster zur Definition der Outputs für die Zone „Sammlungsraum“95
Abbildung 68: Wärmeeintrag durch von der Außenoberfläche der horizontalen Dachfläche absorbierte Gesamtstrahlung (exklusive der eigenen Emissionen) für die Zone „Sammlungsraum“ 96
Abbildung 69: Wärmeeintrag durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der horizontalen Dachfläche für die Zone „Sammlungsraum“ 96
Abbildung 70: Solare Wärmegewinne infolge der durch die Fenster transmittierten kurzwelligen Strahlung in die Zone „Sammlungsraum“..... 97
Abbildung 71: Lüftungswärmeverluste durch die Infiltration durch die Zone „Sammlungsraum“..... 97
Abbildung 72: Verteilung der Oberflächenbeschichtungen der Dachfläche 99
Abbildung 73: Die Simulationsstruktur des Gebäudes mit der Dauer-/Nachtlüftung für das Dachgeschoss..... 100
Abbildung 74: Luftwechsel im Dachgeschoss von Mai bis August 101
Abbildung 75: Temperaturverläufe im Dachgeschoss in der Zeitperiode von Mai bis August 102
Abbildung 76: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Süddachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“..... 103
Abbildung 77: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Süddachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“..... 103
Abbildung 78: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Süddachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“..... 104

Abbildung 79: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Süddachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“ 105
Abbildung 80: TRNBild-Eingabefenster für die Definition der Outputs für die Zone „Dachgeschoss“ 106
Abbildung 81: Wärmeeintrag durch von der Außenoberfläche des Daches absorbierte Gesamtstrahlung (exklusive der eigenen Emissionen) 107
Abbildung 82: Wärmeeintrag durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der Außenoberfläche des Daches 107
Abbildung 83: Solare Wärmegewinne infolge der durch die Fenster transmittierten kurzwelligen Strahlung in die thermische Zone „Dachgeschoss“ 108
Abbildung 84: Lüftungswärmeverluste durch die Infiltration durch die Zone „Dachgeschoss“ 108
Abbildung 85: Wärmeeintrag durch von der Außenoberfläche der horizontalen Dachfläche absorbierte Gesamtstrahlung (exklusive der eigenen Emissionen) für die Zone „Sanitärraum“ 135
Abbildung 86: Wärmeeintrag durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der horizontalen Dachfläche für die Zone „Sanitärraum“ 135
Abbildung 87: Solare Wärmegewinne infolge der durch die Fenster transmittierten kurzwelligen Strahlung in die Zone „Sanitärraum“ 136
Abbildung 88: Lüftungswärmeverluste durch die Infiltration durch die Zone „Sanitärraum“ 136
Abbildung 89: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Westdachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“ 138
Abbildung 90: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Westdachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“ 138
Abbildung 91: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Ostdachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“ 139
Abbildung 92: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Ostdachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“ 139
Abbildung 93: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Norddachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“ 140
Abbildung 94: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Norddachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“ 140
Abbildung 95: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Westdachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“ 141
Abbildung 96: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Westdachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“ 141
Abbildung 97: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Ostdachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“ 142
Abbildung 98: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Ostdachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“ 142
Abbildung 99: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Norddachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“ 143

Abbildung 100: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Norddachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“ 143

10 Literature

[1] Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T., Fischer, J.: Regenerative Energietechnik. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2013

[2] Rietschel, H.: Raumklimatechnik. Bd.1: Grundlagen. Hrsg. Esdorn, H. 16. Auflage. Berlin: Springer 2008

[3] Levinson, R., Berdahl, P., Akbari H.: 2005. Solar spectral optical properties of pigments—Part II: survey of common colorants. Solar Energy Materials & Solar Cells 89 (2005): 351–389

[4] Albers, K.J.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. Bd.1. 78. Auflage. München: DIV Deutscher Industrieverlag 2017

[5] Eicker, U.: Solare Technologien für Gebäude. 1. Auflage. Wiesbaden: Springer 2001

[6] Zou, Y.: Unstetige Wärmeversorgung im Mehrfamilienhaus. 2009. Universität Karlsruhe (TH): Dissertation

[7] Fischer, H.M., Freymuth, H., Häupl, P., Homann, M., Jenisch, R., Richter, E., Stohrer, M.: Lehrbuch der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2008

[8] Glaninger, A.: Skriptum zur Vorlesung „Lüftungs- und Klimatechnik“. Technische Universität Wien. Institut für Energietechnik und Thermodynamik. 2014

[9] ÖNORM EN 13363-2: Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen – Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades. Teil 2: Detailliertes Berechnungsverfahren. Hrsg. Österreichisches Normungsinstitut. Wien. Ausg. Juli 2006

[10] Fouad, N. A., Richter, T.: Leitfaden Thermografie im Bauwesen. Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung. 3. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2008

[11] Loimer, T., Steinrück, H.: Skriptum zur Vorlesung mit Übung „Wärmeübertragung“. Technische Universität Wien. Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung. 2017

[12] Wesselak, V., Voswinckel, S.: Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird. 2. Auflage. Berlin: Springer 2016

[13] DIN EN 17190: Abdichtungsbahnen – Index des Reflexionsvermögens. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag 2018

[14] Coole Farben für dunkle Fassaden. Cool Pigments. Erklärung der Fachbegriffe HBW und TSR.
In: http://www2.baumit.com/pimdam/DE/pdf/FOL_CoolPigments.pdf, (Zugegriffen: 09.12.2018)

[15] Pisello, A. L.: 2017. State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities. Solar Energy 144 (2017): 660–680

[16] Stahr, M., Dietrich, H.: Sanierung und Ausbau von Dächern. Grundlagen – Werkstoffe – Ausführung. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2011

[17] Pech, A., Hubner, W., Zach, F.: Flachdach. Bd.9: Baukonstruktionen. Hrsg. Pech, A. 1.Auflage. Wien: Springer 2011

[18] Frischmann, L.: Schwarz und trotzdem kalt. Farbe und Lack. 08/2008. Hannover: Vincentz Network

[19] Synnefa. A., Santamouris M., Apostolakis, K.: 2007. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. Solar Energy 81 (2007): 488–497

[20] Xue, X., Yang, J., Zhang, W., Jiang, L., Qu, J., Zhang, H., Song, J., Zhang, R., Li, Y., Qin, J., Zhang, Z.: 2015. The study of an energy efficient cool white roof coating based on styrene acrylate copolymer and cement for waterproofing purpose – Part II: Mechanical and water impermeability properties. Construction and Building Materials 96 (2015): 666–672

[21] Ferrari, C., Muscio, A., Siligardi, C.: 2016. Development of a Solar-Reflective Ceramic Tile Ready for Industrialization. Procedia Engineering 169 (2016): 400 – 407

[22] Sleiman. M., Kirchstetter, T., Berdahl, P., Gilbert, H., Quelen, S., Marlot, L., Preble, C., Chen, S., Montalbano, A., Rosseler, O., Akbari, H., Levinson, R., Destaillats, H.: 2014. Soiling of building envelope surfaces and its effect on solar reflectance – Part II: Development of an accelerated aging method for roofing materials. Solar Energy Materials and Solar Cells 122 (2014): 271-281

[23] An Introduction Guide for Cool Roofing Materials. ECRC. 2012. In: http://coolroofcouncil.eu/files/downloads/documents//ECRC_Guide_Cool_Roofing_Materials.pdf, (Zugegriffen: 12.11.2018)

[24] Paolini, R., Zinzi, M., Poli, T., Carnielo E., Mainini A. G.: 2014. Effect of ageing on solar spectral reflectance of roofing membranes: natural exposure in Roma and Milano and the impact on the energy needs of commercial buildings. Energy and Buildings 84 (2014): 333-343

[25] Dornellesa, K., Carama, R., Sichieria, E.: 2015. Natural weathering of cool coatings and its effect on solar reflectance of roof surfaces. Energy Procedia 78 (2015): 1587 – 1592

[26] Synnefa, A., Santamouris, M.: 2012. Advances on technical, policy and market aspects of cool roof technology in Europe: The Cool Roofs project. Energy and Buildings 55 (2012): 35 – 41

[27] European Cool Roofs Council. In: http://coolroofcouncil.eu/, (Zugegriffen: 17.12.2018)

[28] Cool Roof Rating Council. In: https://coolroofs.org/, (Zugegriffen: 17.12.2018)

[29] Energie Star. In: https://www.energystar.gov/, (Zugegriffen: 17.12.2018)

[30] Leadership in Energy and Environmental Design. In: https://new.usgbc.org/leed, (Zugegriffen:17.12.2018)

[31] DIN EN ISO 4618: Beschichtungsstoffe – Begriffe (ISO 4618:2014); Dreisprachige Fassung EN ISO 4618:2014. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag. Ausg. Januar 2015

[32] Hestermann, U., Rongen, L.: Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 2. 34. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013

[33] Schönburg, K.: Beschichtungstechniken heute. Nachhaltiges Instandsetzen und Instandhalten von Bauwerkoberflächen, Korrosionsschutz, Holzschutz. 2.Auflage. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag 2013

[34] Etzrodt, G., Müller, A.: Kunststoffeinfärbung: Farbmittel, Füllstoffe, Regularien. 2. Auflage. München: Carl Hanser Verlag 2018

[35] Jandel, A. S., Meuthen, B.: Coil Coating. Bandbeschichtung: Verfahren, Produkte und Märkte. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013

[36] DIN ISO 18451-1: Pigmente, Farbstoffe und Füllstoffe – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe (ISO18451-1:2015). Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag. Ausg. Juni 2016

[37] DIN ISO 18451-2: Pigmente, Farbstoffe und Füllstoffe – Begriffe – Teil 2: Einteilung nach koloristischen und chemischen Gesichtspunkten (ISO 18451-2:2015). Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag. Ausg. Juni 2016

[38] Österreichisches Normungsinstitut. Katalog für wärmeschutztechnische Rechenwerte von Baustoffen und Bauteilen, ON V 31. 1.Auflage. Wien. Ausg. 1.12.2001

[39] ÖNORM H 6040: Berechnung der sensiblen und latenten Kühllast sowie der sommerlichen Temperaturgänge von Räumen und Gebäuden (Nationale Ergänzungen zu ÖNORM EN 15255 und ÖNORM EN ISO 13791). Hrsg. Österreichisches Normungsinstitut. Wien. Ausg. 1.11.2012

[40] ÖNORM H 7500-1: Heizungssysteme in Gebäuden Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast für Gebäude mit einem mittleren *U*-Wert ≥ 0,5 W/(m^{2}K). Hrsg. Österreichisches Normungsinstitut. Wien. Ausg. 15.02.2015

[41] TRNSYS 16. Volume 6: Multizone Building modeling with Type 56 and TRNBuild. 2005. Hrsg. Wisconsin: University of Wisconsin-Madison. The Solar Energy Laboratory; Stuttgart: TRANSSOLAR Energietechnik GmbH

[42] DIN EN ISO 13789: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Transmissions- und Lüftungswärmetransferkoeffizient – Berechnungsverfahren (ISO 13789:2017). Hrsg. Deutsches Institut für

Normung. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag. Ausg. April 2018

[43] ÖNORM EN 15232: Energieeffizienz von Gebäuden. Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement – Module M10-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. Hrsg. Österreichisches Normungsinstitut. Wien. Ausg. 01.12.2017

[44] VDI 2078: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation). Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Ausg. Juni 2015

[45] Trogisch, A., Günther, M.: Planungshilfen bauteilintegrierte Heizung und Kühlung. 1. Auflage. Heidelberg: C. F. Müller Verlag 2008

[46] ÖNORM B 8110-3: Wärmeschutz im Hochbau. Teil 3: Vermeidung sommerlicher Überwärmung. Hrsg. Österreichisches Normungsinstitut. Wien. Ausg. 15.03.2012

[47] ÖNORM B 8110-5: Wärmeschutz im Hochbau. Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile. Hrsg. Österreichisches Normungsinstitut. Wien. Ausg. 1.03.2011

[48] ÖNORM B 8110-6: Wärmeschutz im Hochbau. Teil 6: Grundlagen und Nachweisverfahren – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf. Hrsg. Österreichisches Normungsinstitut. Wien. Ausg. 15.11.2014

[49] DIN EN 15242: Lüftung von Gebäuden – Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag 2017

[50] Richter, W., Seifert, J., Gritzki, R., Rösler, M.: Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB 2003

[51] Lüftung. Technische Regeln für Arbeitsstätten. ASR A3.6. Ausg. Januar 2012 (zuletzt geändert GMBl 2018, s. 474)

[52] DIN V 4108-6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Hrsg. Deutsches Institut für Normung. Berlin: Beuth Verlag 2003

[53] Lohmeyer, G. C. O., Post, M.: Praktische Bauphysik: Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013

Anhang

A. Technische Datenblätter

Im Anhang befinden sich technische Datenblätter für die reflektierenden Anstriche „Cool Dry“, „Reflex White“, „Alesta Cool“.

COOLDRY
the cooling paint

COOLDRY KÜHLFARBE

Typenbezeichnung	CoolDry – reflektierende Dach-Beschichtung
Produktbeschreibung	CoolDry ist eine elastische, umweltfreundliche und wasserlösliche Hochleistungsbeschichtung auf Basis von 100 % Acryl-Bindemittel und Hightech Wärme-Reflexionskomponenten. Sie zeichnet sich durch außerordentliche Langlebigkeit aus und verhindert effizient das Eindringen von Sonnenwärme ins Gebäude. CoolDry vereint: • Exzellente Wärmereflexionseigenschaften • Hohe Flexibilität und Belastbarkeit • Effektive Abdichtung von Haarrissen • Wasserundurchlässigkeit
Einsatzgebiet	Verwendbar im Innen- und Außenbereich. CoolDry kann auf zahlreichen Untergründen verarbeitet werden, wie z.B. Beton, Ziegel, Zementputze, Zement, Holz, entsprechend vorbehandelte Metalle (Stahl, verzinktes Metall, Aluminium), Außenwände, Betondächer, Teerpappe, Metallfassaden und -dächer von Lagergebäuden, Fahrzeugdächer, Büro-Container, Sperrholz-Kabinen etc. Bei einer Schichtdicke von mindestens 400 µm hat das Produkt die besten Reflexionseigenschaften. Die Kosten für Klimatisierung können so um bis zu 50 % gesenkt werden.
Bindemittelbasis	Reine Acryl-Emulsion mit Hightech-Reflexionskomponenten
Glanzgrad	Matt
Farbton	Weiß, weitere Farben auf Anfrage
Trockenzeit	Klebfrei nach ca. 60 Minuten bei einer Trocken-Schichtdicke von 200 µm je Schicht. Überstreichbar nach ca. 16 Stunden. Getestet bei 25 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von nicht mehr als 75 %. Nicht anwenden, wenn die relative Luftfeuchtigkeit mehr als 95 % beträgt, oder die Temperatur des Trägermaterials weniger als 3 °C über dem Taupunkt liegt. Verarbeitung bei hoher Außen- oder Objekttemperatur oder direkter Sonneneinstrahlung vermeiden, da das Material sehr schnell antrocknet.
Spezifisches Gewicht	0,83 ± 0,05 kg/l
Feststoffanteil in %	58 ± 2 %
Ergiebigkeit	Ein Liter reicht für ca. 1,5 m² (bei 2 Schichten).
Verdünnung	Das Produkt sollte unverdünnt angewendet werden. Um das Auftragen zu erleichtern mit max. 5 % Wasser verdünnen.
Reinigung	Mit Seifenlösung
Flammpunkt	Das Produkt ist nicht brennbar (Produkt auf Wasserbasis).
Gebindegröße	2,5 Liter/2,1 kg, 5 Liter/4,2 kg und 10 Liter/8,3 kg

COOLDRY
the cooling paint

Verarbeitung	Pinsel/Rolle: in zwei Schichten gleichmäßig auftragen, Nasen und Vertiefungen vermeiden. Empfohlene Materialstärke 200 µm/Schicht für optimale Reflexionseigenschaften Airless: 0.021" to 0.027" oder 0,5 – 0,7 mm/1600 – 1900 psi oder 110 – 130 bar + 5 % Wasser	
Untergrund	**Beton, Putz** Der Untergrund muss sauber, trocken, fest und frei von Verunreinigungen sein. Entfernen Sie Zementreste mit einer Drahtbürste oder einem Hochdruckreiniger. Pilz- oder Schwammbefall muss vollständig entfernt werden. Je nach Festigkeit und Sauberkeit des Untergrunds wird die Verwendung einer geeigneten Grundierung empfohlen. **Holz** Der Untergrund muss sauber, trocken und frei von Verunreinigungen sein. Holz kann mit Grundierung/Primer vorbehandelt werden. **Stahl oder andere Metalle** Tragfähige und intakte Altlackierung anschleifen. Bei Rost komplett abschleifen oder sandstrahlen. Rostschutzgrundierung bzw. geeignete Grundierung verwenden.	
Besonderer Hinweis	Da CoolDry elastisch ist, kann durch die Schichtstärken-Messung eine Delle im Material entstehen, so dass das Messergebnis verfälscht wird. In diesem Fall legen Sie einen Ausgleich (mindestens 150 µm) auf die Probe, messen die gesamte Dicke und subtrahieren die Dicke des Ausgleichs. CoolDry trocknet sehr schnell und sollte daher stets verschlossen werden – auch während der Verarbeitung.	
Lagerung	An einem kühlen, trockenen Ort aufbewahren. Von direktem Sonnenlicht fernhalten.	
Entsorgung	Zu entsorgen wie normale Dispersionsfarbe. Bei Fragen wenden Sie sich an die zuständigen Behörden. **Darf nicht in die Kanalisation gelangen.**	
Lagerstabilität	1 Jahr bei ca. 20 °C und geschlossenem Behälter	
Sicherheitsvorkehrungen	Nur an gut belüfteten Orten verwenden. Dämpfe und Aerosol nicht einatmen, vermeiden Sie Kontakt mit Haut und Augen. Tragen Sie adäquate Sicherheitskleidung wie Overall, Schutzbrille, Atemschutzmaske und Handschuhe. Verwenden Sie Schutzcreme für die Hände.	
Erste Hilfe	**AUGEN**	Im Falle von Spritzern waschen Sie die Augen sofort mit warmem Wasser aus und konsultieren Sie Ihren Arzt.
	HAUT	Waschen Sie Ihre Haut gründlich mit Wasser und Seife oder geeignetem Industriereiniger ab. VERWENDEN SIE KEINE LÖSUNGSMITTEL ODER VERDÜNNER.
	VERSCHLUCKEN	Bei Verschlucken konsultieren Sie umgehend einen Arzt. KEIN ERBRECHEN HERBEIFÜHREN.

COOLDRY
the cooling paint

Haftungsausschluss
Die Informationen auf diesem Datenblatt können ggf. unvollständig sein und sind nur als generelle Hinweise zu verstehen. Es liegt in der Verantwortung des Verwenders, die Eignung des Produktes für die geplante Anwendung zu prüfen. Da wir keine Kontrolle über die Verarbeitung des Produktes, die Qualität der Oberflächenvorbereitung oder andere relevante Faktoren bei der Benutzung dieses Produktes haben, sind wir für das Ergebnis nicht verantwortlich und lehnen eine Haftung jeglicher Art ab, es sei denn wir haben explizit schriftlich zugestimmt.
Die Informationen in diesem Datenblatt können unsererseits von Zeit zu Zeit ohne Hinweis aktualisiert oder verändert werden, während wir das Produkt kontinuierlich weiterentwickeln.

TECHNISCHE DATEN

	Vorschriften	WHITE REFLEX	WHITE REFLEX Ultra	WHITE REFLEX Fire Resistant
Aussehen		Flüssig	Flüssig	Flüssig
Farbe		Weiß	Weiß	Weiß
Rohdichte des Gemischs	**EN 2811-1**	1,35 ± 0,10 kg/L	1,35 ± 0,10 kg/L	1,55 ± 0,10 kg/L
Festkörpergehalt – bei 130 °C	**UNI EN ISO 3251**	62 ± 3%	62 ± 3%	70 ± 3%
Viskosität Brookfield	**Int. Methode**	15 000 ± 5 000 cPs	15 000 ± 5 000 cPs	20 000 ± 5 000 cPs
Lagerung in Originalgebinden an trockenem Ort, vor Eis geschützt		12 Monate	12 Monate	12 Monate
Verarbeitungseigenschaften				
Auftragsdicke		0,2 ÷ 0,4 mm (zwei Mäntel)	0,2 ÷ 0,4 mm (zwei Mäntel)	0,2 ÷ 0,4 mm (zwei Mäntel)
Wartezeit - bis zur Hautbildung (*)		ca. 1 ÷ 2 Stunden	ca. 1 ÷ 2 Stunden	ca. 1 ÷ 2 Stunden
Wartezeit - bis zur klebfreien Erhärtung (*)		ca. 2 ÷ 4 Stunden	ca. 2 ÷ 4 Stunden	ca. 2 ÷ 4 Stunden
Wartezeit - bis zum nächsten Materialauftrag (*)		mindestens 6 Stunden	mindestens 6 Stunden	mindestens 6 Stunden
Wartezeit – für eine vollständige Trocknung (*)		ca. 12 ÷ 24 Stunden	ca. 12 ÷ 24 Stunden	ca. 12 ÷ 24 Stunden
Verarbeitungstemperatur		+5°C ÷ +35°C	+5°C ÷ +35°C	+5°C ÷ +35°C
Auftrag		manuelles oder spritz-auftragen	manuelles oder spritz-auftragen	manuelles oder spritz-auftragen
Leistungseigenschaften	**Standard**	**Produktleistung**	**Produktleistung**	**Produktleistung**
Klasse und Typ	**EN 1504-2**	**C PI-MC-IR**	**C PI-MC-IR**	**C PI-MC-IR**
Wasserdampfdurchlässigkeit	**EN 7783**	Sd <5 m - klasse I	Sd <5 m - klasse I	Sd <5 m - klasse I
Haftungstest	**EN 1542**	≥1.0 MPa	≥1.0 MPa	≥1.0 MPa
Kapillare Wasseraufnahme und Wasserdurchlässigkeit	**EN 1062-3**	$w < 0.1\ kg/m^2 \cdot h^{0.5}$	$w < 0.1\ kg/m^2 \cdot h^{0.5}$	$w < 0.1\ kg/m^2 \cdot h^{0.5}$
CO_2-Dichtheit	**EN 1062-6**	Sd >50 m	Sd >50 m	Sd >50 m
Solarreflexion	**ASTM E-903-12**	0.82 (**)	0.86 (**)	0.83 (**)
Solarreflexion – nach Alterung von 2 Jahren		0.75 (**)	–	–
IR-Emissivität	**ASTM C-1371-15**	0.91 (**)	0.91 (**)	0.94 (**)
SRI (Solar Reflectance Index)	**ASTM E-1980-11**	**104** (**)	**110** (**)	**104** (**)
Temperatursenkung - angestrichene Dichtungsbahn (75° ÷ 80°C)	**Int. Methode**	35 ÷ 40°C	40 ÷ 45°C	35 ÷ 40°C
Künstliche Bewitterung Q.UV Test	**EOTA TR 010**	Keine sichtbare Veränderung	Keine sichtbare Veränderung	Keine sichtbare Veränderung
Brandverhalten im Außenbereich		–	–	B_{roof} (t2) (¹) (²)
Wärmewiderstand - Servicetemperatur		-30 ÷ +90 °C	-30 ÷ +90 °C	-30 ÷ +90 °C
Gefährliche Stoffen	**EN 1504-2**	Gemäß Fußnote in ZA.1	Gemäß Fußnote in ZA.1	Gemäß Fußnote in ZA.1

Prüfbedingungen: Temperatur 23±2°C, 50±5% R.F. und Luftgeschwindigkeit im Prüfbereich <0.2 m/s. **Die angegebenen Daten können in Abhängigkeit der spezifischen Baustellenbedingungen variieren: Temperatur, Feuchtigkeit, Belüftung, Saugfähigkeit des Untergrunds.** (*) Die angegebenen Zeiten können sich bei abnehmender oder zunehmender Temperatur verlängern oder verkürzen.
(**) Prüfbericht - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile (Abteilung für Maschinen- und Bauingenieurwissenschaften), Universität Modena und Reggio Emilia.
(¹) Zertifizierung „Istituto Giordano": Zertifizierte Feuerbeständigkeit mit Anwendung auf einer nicht feuerhemmenden 50 mm dicken EPS-Platte mit Dichte von 20 kg/m³ und einem zwischen die beiden Produktschichten eingefügten Glasvlies für Asphaltierer von 45 g/m² ohne Verstärkung. (²) Zertifizierung „LAPI": Zertifizierte Feuerbeständigkeit für Dichtungsbahn MINERAL LIGTHERFLEX HPCP 20 T 4,5 mm.
Entspricht den in der Norm **EN 1504-2** festgelegten allgemeinen Grundsätzen – Bewertungsgrundsätze für den Gebrauch von Produkten und Systemen.

Haltbarkeit

Durch die Staub- und Schmutzablagerungen auf der weißen Oberfläche nimmt der Grad der Solarreflexion mit der Zeit ab. Die in den Labors von Forschungsinstituten erfolgten Messungen zeigen eine Abnahme der Solarreflexion von **WHITE REFLEX** um circa 10 % nach zwei Jahren Bewitterung. Diese Ergebnisse entsprechen den Studien renommierter Forschungszentren:

- Das Florida State Energy Center ermittelte eine maximale Reduzierung um schätzungsweise 11 % nach zwei Jahren Bewitterung ohne Reinigung oder Instandhaltung.
- Die vom LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) durchgeführten Studien zeigen, dass die Verminderung der Reflexion im ersten Jahr prozentuell höher ist und in den darauffolgenden Jahren langsamer erfolgt.

Es empfiehlt sich deshalb eine regelmäßige Reinigung des Dachs, um die Solarreflexion dauerhaft hoch zu erhalten. In den zitierten Studien wird empfohlen, die Dächer ungefähr alle 10 Jahre neu zu streichen.

PACKAGING

Eimer zu 20 kg.

schiften und Anwendung der Produkte. Angesichts der zahlreichen Einsatzmöglichkeiten und der Gefahr der Überlagerung von Elementen, auf die wir keinen Einfluss haben, übernehmen wir keinerlei Haftung für die Resultate. Der Käufer muss auf eigene Verantwortung prüfen, ob sich das Produkt für den vorgesehenen Gebrauch eignet.

Die angegebenen Daten sind unverbindliche Durchschnittswerte, die sich auf die derzeitige Produktion beziehen. Die Firma Index S.p.A. kann sie jederzeit und unangekündigt ändern und auf den neuesten Stand bringen. Die Ratschläge und technischen Informationen entsprechen unseren besten Kenntnissen in Bezug auf Eigen-

• SCHLAGEN SIE ZUM RICHTIGEN GEBRAUCH UNSERER PRODUKTE IN DEN TECHNISCHEN VORSCHRIFTEN VON INDEX NACH. • WENDEN SIE SICH FÜR WEITERE AUSKÜNFTE ODER BESONDERE VERWENDUNGSZWECKE AN UNSERE TECHNISCHE ABTEILUNG. •

index
Construction Systems and Products
Via G. Rossini, 22 - 37060 Castel D'Azzano (VR) - Italy - C.P.67
Tel. (+39)045.8546201 - Fax (+39)045.518390

Internet: www.indexspa.it
Informazioni Tecniche Commerciali
tecom@indexspa.it
Amministrazione e Segreteria
index@indexspa.it
E-mail Index Exportabteilung
index.export@indexspa.it

3/2018 REVISIONE 2017
G.C./dig. - 250

© INDEX

AXALTA COATING SYSTEMS

Product Information Bulletin
07/2015

Alesta® Cool

Schwarz so kühl wie weiß.

Jede Farbe reflektiert Wärme anders. Die Farbe einer Beschichtung wird durch ihren Strahldichtekoeffizienten und den Infrarotabsorptionskoeffizienten bestimmt: die Sonnenreflexion.

Ungefähr 50 % der Sonnenenergie, die die Oberfläche der Erde erreicht, besteht aus Infrarotstrahlung. Dieses unsichtbare Licht erhöht die Temperatur des Objekts, das ihm ausgesetzt ist. Dunkle Farben absorbieren die Strahlung besser als helle Farben. Die Temperatursteigerung heller Farben, die der Sonne ausgesetzt sind, ist deshalb im Vergleich zu dunkleren Farben geringer.

Alesta® Cool verbessert die Infrarotreflexion und verringert die Oberflächentemperatur der beschichteten Fläche. Mit Alesta® Cool kann die totale Sonnenreflexion für dunkle Farben um bis zu 20 % erhöht werden. Diese technische Innovation verringert die Übertragung der Wärme auf das Metall.

Eine Verringerung der Temperaturunterschiede im Objekt verringert die mechanische Belastung, die auf das Metall wirkt und verbessert dadurch die Farbstabilität, den Glanz und die mechanischen Eigenschaften der Schicht.

In der Architektur trägt die Temperaturverringerung beschichteter Flächen dazu bei, den Energieverbrauch für die Kühlung in den Gebäuden zu verringern. Dies spart Energie und hilft der Umwelt.

Auch eine dünne Schicht kann den Reflexionsgrad erheblich verbessern. Alesta® Cool-Formulierungen können die Oberflächentemperatur um 20 % verringern.

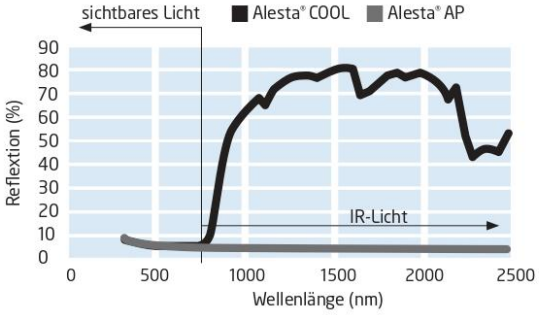
Ein Spezialsortiment aus 12 Farben mit verbessertem Reflexionsgrad wurde bereits formuliert. Das neue Alesta® Cool-Sortiment ist für alle Arten von Lacken verfügbar: von hochglänzend bis matt, von glatt bis Feinstruktur.

Unser Ziel sind Anwendungen in der Architektur und im Bauwesen, zum Beispiel Dächer, Verkleidungsplatten, Sonnenschutz-Rollos, Außenmöbel usw. Und schließlich kann Alesta® Cool auch in der Transportbranche verwendet werden, wenn eine Verringerung der Wärme sinnvoll ist, zum Beispiel für Tiertransportanhänger und landwirtschaftliche Maschinen.

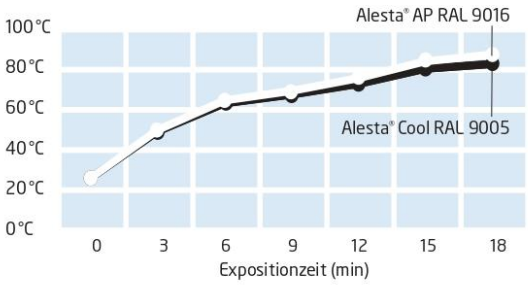
Highlights

- Polyester-Pulverbeschichtung
- Kann den TSR-Wert um bis zu 20 % verbessern.
- Kann die Oberflächentemperatur um 20 % verringern.
- Schwarzes RAL 9005 Alesta® Cool verhält sich genauso wie ein weißes RAL 9010 Standardprodukt.
- Verringert die Notwendigkeit von Klimaanlagen.
- Kann wie jede andere Pulverbeschichtung aufgebracht werden.
- Ausgezeichnete Farb- und Glanzstabilität
- Ausgezeichnete mechanische Eigenschaften
- Qualicoat- und GSB-Zulassung
- Farbsortiment:
  RAL 3005 glatt glänzend - RAL 5004 glatt glänzend
  RAL 5011 Feinstruktur - RAL 5013 glatt matt
  RAL 6005 glatt seidenglänzend - RAL 6009 Feinstruktur
  RAL 7016 glatt glänzend - RAL 7021 glatt seidenglänzend
  RAL 7026 Feinstruktur - RAL 8017 glatt seidenglänzend
  RAL 9005 glatt matt - RAL 9007 glatt glänzend

Messung des Reflektionsgrades von RAL 9005



RAL 9005 Cool vs RAL 9016 Regular



The Axalta logo, Axalta™, Axalta Coating Systems™ and all products denoted with ™ or ® are trademarks or registered trademarks of Axalta Coating Systems, LLC and its affiliates. Axalta trademarks may not be used in connection with any product or service that is not an Axalta product or service.

www.powder.axaltacs.com

Farben und Oberflächen		Alesta® Cool	Alesta® AP Standard
		TSR-Wert	
glänzend	RAL 3005	32%	21%
	RAL 5004	29%	7%
	RAL 7016	35%	10%
	RAL 9007	44%	30%
seidenglänzend	RAL 6005	26%	-
	RAL 8017	27%	-
	RAL 7021	29%	-
matt	RAL 5013	32%	11%
	RAL 9005	30%	5%
Feinstruktur	RAL 5011	29%	-
	RAL 6009	25%	9%
	RAL 7026	35%	-

Alesta® Cool ist in einer breiten Palette gebräuchlicher RAL-Farbtöne verfügbar. Darüber werden diverse Glanzgrade und Strukturen angeboten.

TSR = Totale Sonnenreflexion definiert den Prozentsatz mit dem das Sonnenlicht reflektiert wird (100% = totale Reflexion, 0% = totale Absorption).

The Axalta logo, Axalta™, Axalta Coating Systems™ and all products denoted with ™ or ® are trademarks or registered trademarks of Axalta Coating Systems, LLC and its affiliates.
Axalta trademarks may not be used in connection with any product or service that is not an Axalta product or service. Cover Picture © Hansenn | Dreamstime.com

Axalta Coating Systems Germany GmbH & Co. KG
Siemensstraße 4
84051 Essenbach Altheim

Tel. +49 87 03 93 18 10 63
Fax +49 87 03 93 18 10 65

contact-cs@axaltacs.com

Axalta Coating Systems Austria GmbH
Mödlinger Strasse 15
A-2353 Guntramsdorf

Tel. +43 22 36 50 00
Fax +43 22 36 53 041

www.powder.axaltacs.com

B. Ergebnisse der Simulation der Zone „Sanitärraum“

Im Anhang befinden sich die Ergebnisse der Simulation für die Zone „Sanitärraum“.

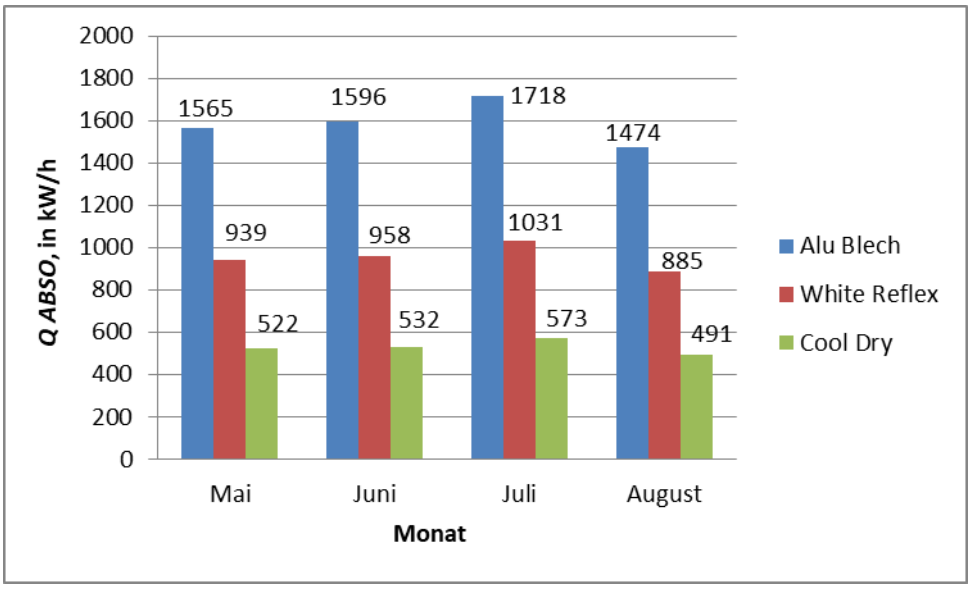


Abbildung 85: Wärmeeintrag durch von der Außenoberfläche der horizontalen Dachfläche absorbierte Gesamtstrahlung (exklusive der eigenen Emissionen) für die Zone „Sanitärraum“

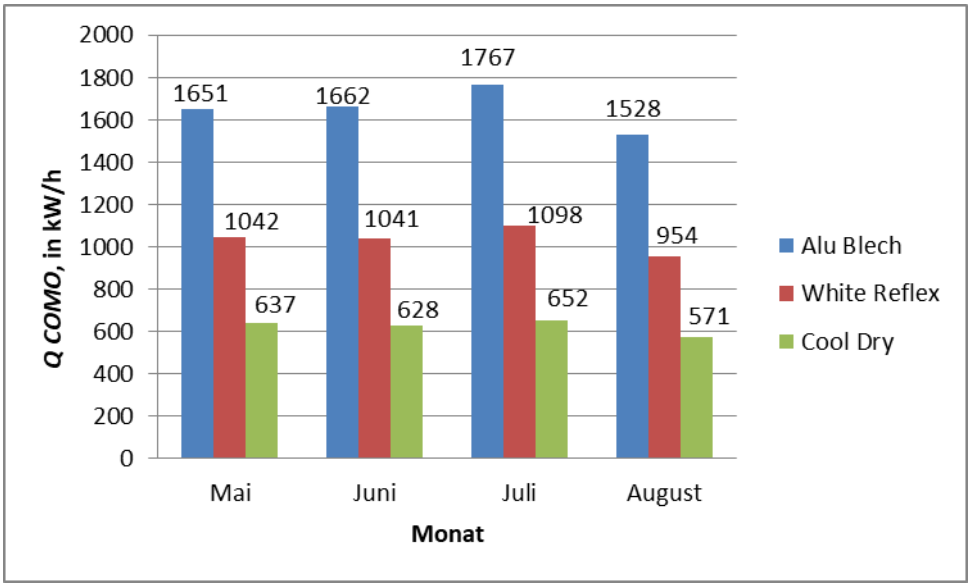


Abbildung 86: Wärmeeintrag durch Konvektion von Luft und durch langwellige Strahlung an der horizontalen Dachfläche für die Zone „Sanitärraum“

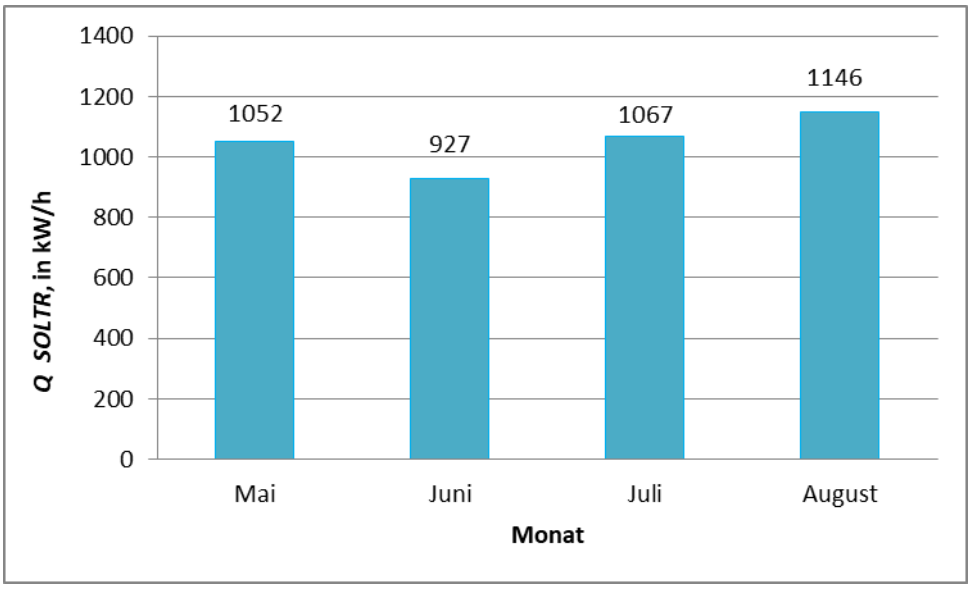


Abbildung 87: Solare Wärmegewinne infolge der durch die Fenster transmittierten kurzwelligen Strahlung in die Zone „Sanitärraum“

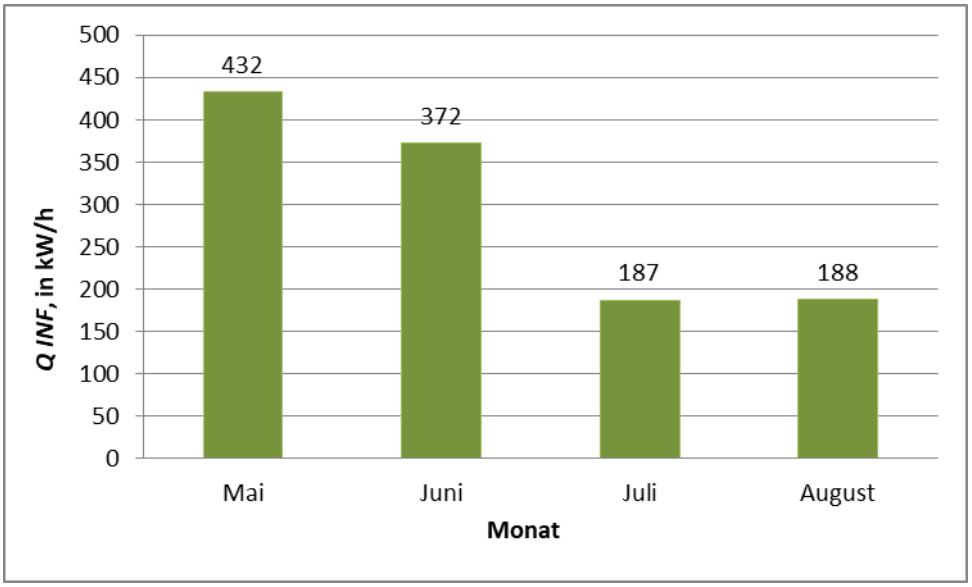


Abbildung 88: Lüftungswärmeverluste durch die Infiltration durch die Zone „Sanitärraum“

C. Abbildungen für die Zone „Dachgeschoss“

Im Anhang befinden sich die grafischen Abbildungen der Temperaturverläufe an der Außendachfläche in West-, Ost- und Nord-Ausrichtung sowie die dabei entstehenden Innenoberflächentemperaturen am heißesten Tag und im Laufe der drei heißesten Tage im Sommer.

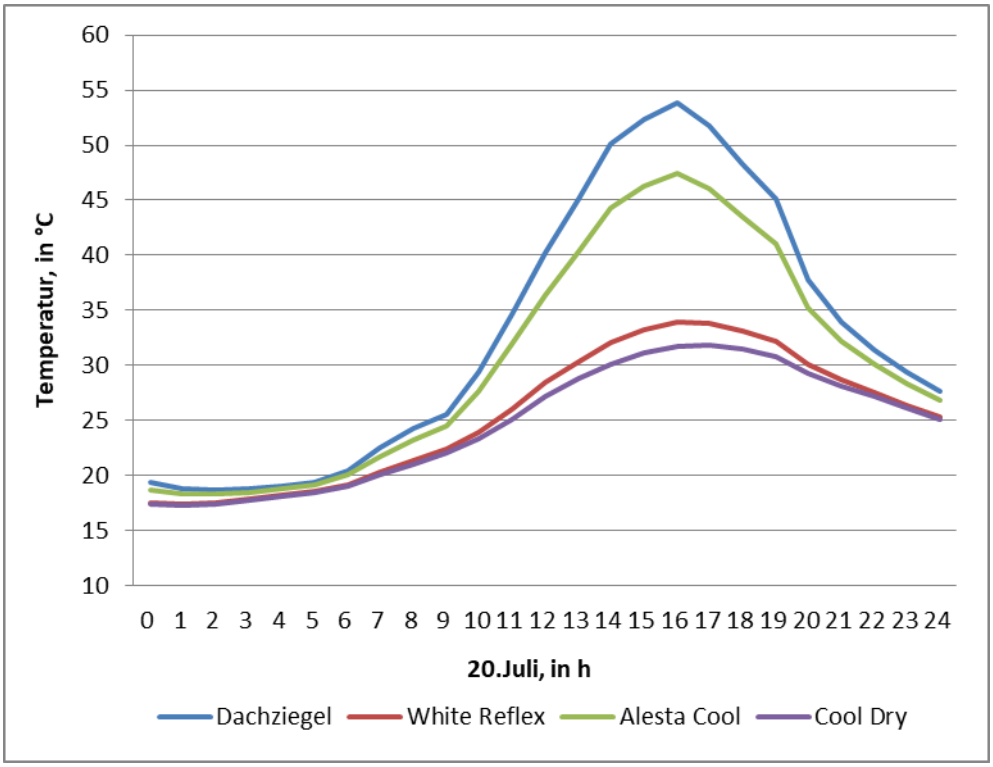


Abbildung 89: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Westdachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“

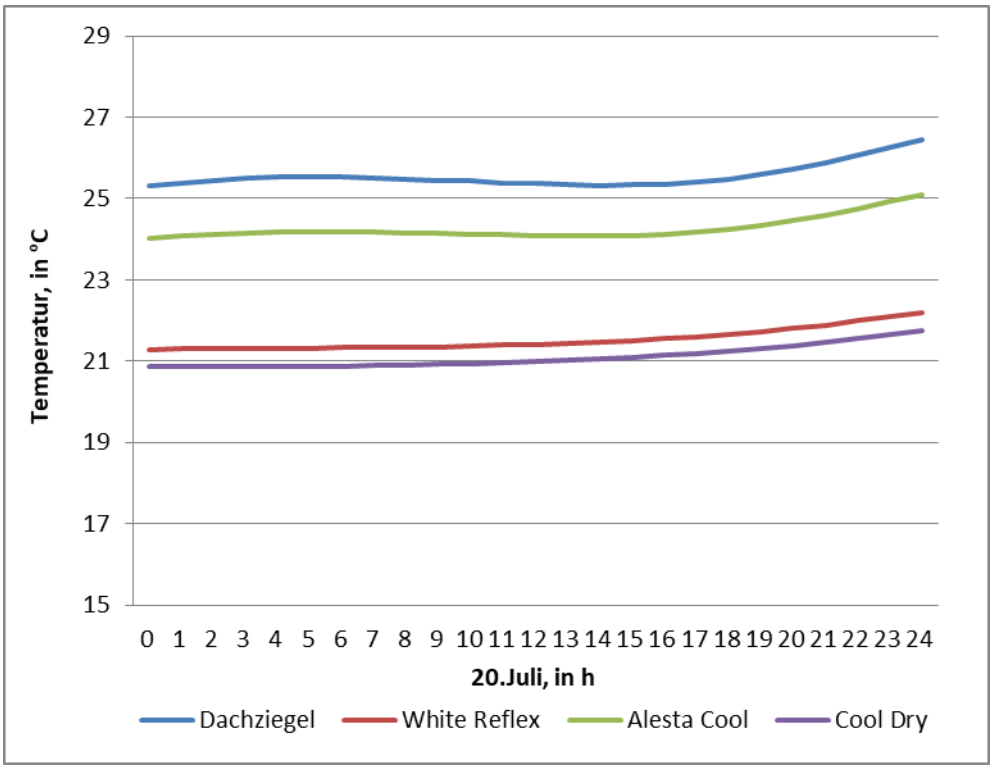


Abbildung 90: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Westdachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“

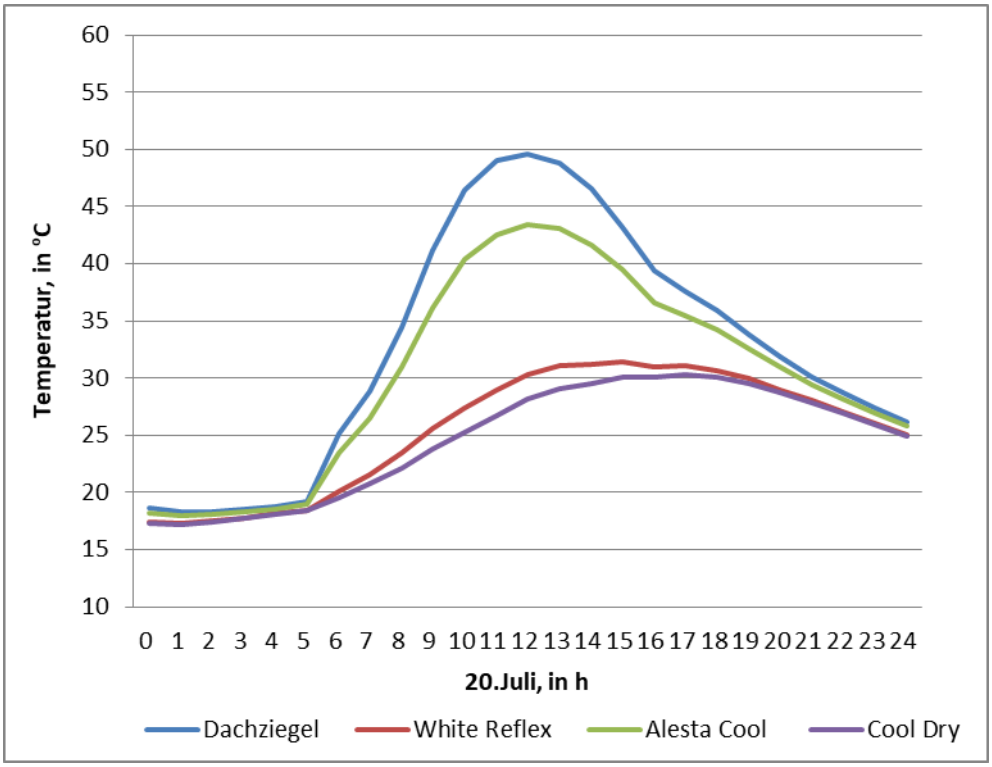


Abbildung 91: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Ostdachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“

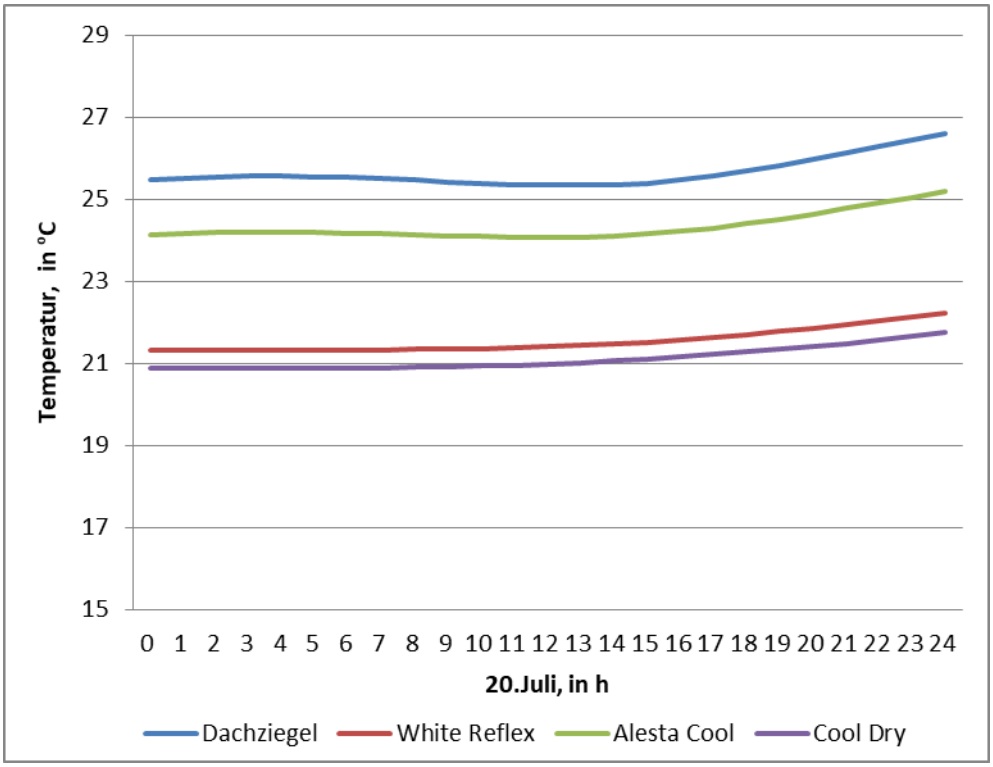


Abbildung 92: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Ostdachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“

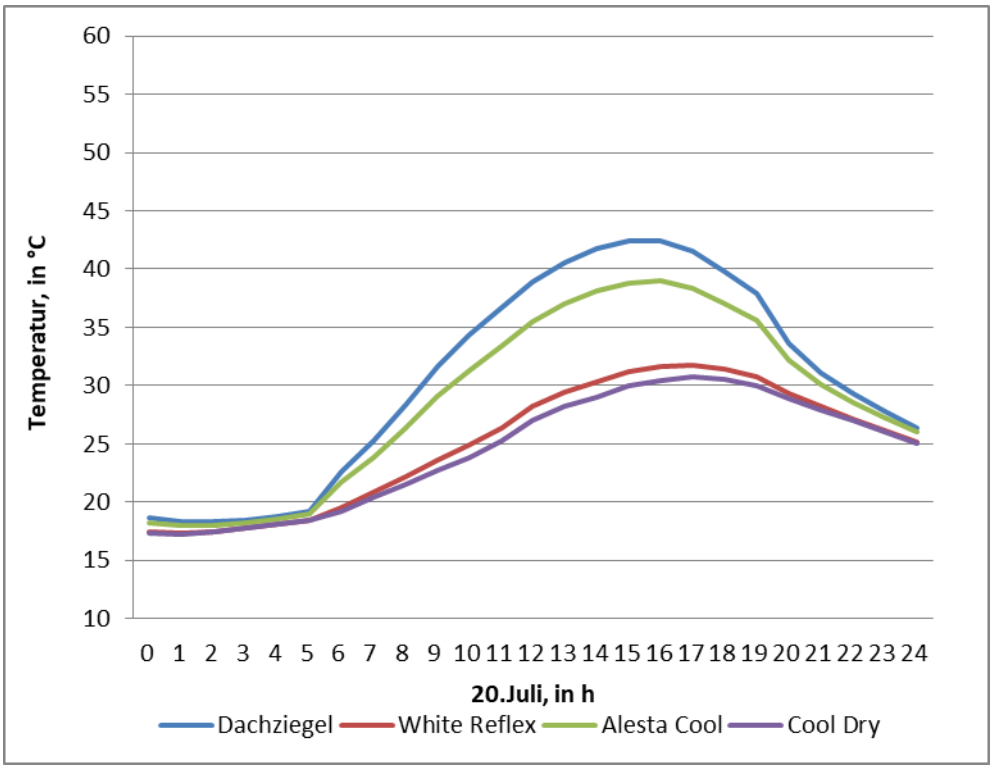


Abbildung 93: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Norddachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“

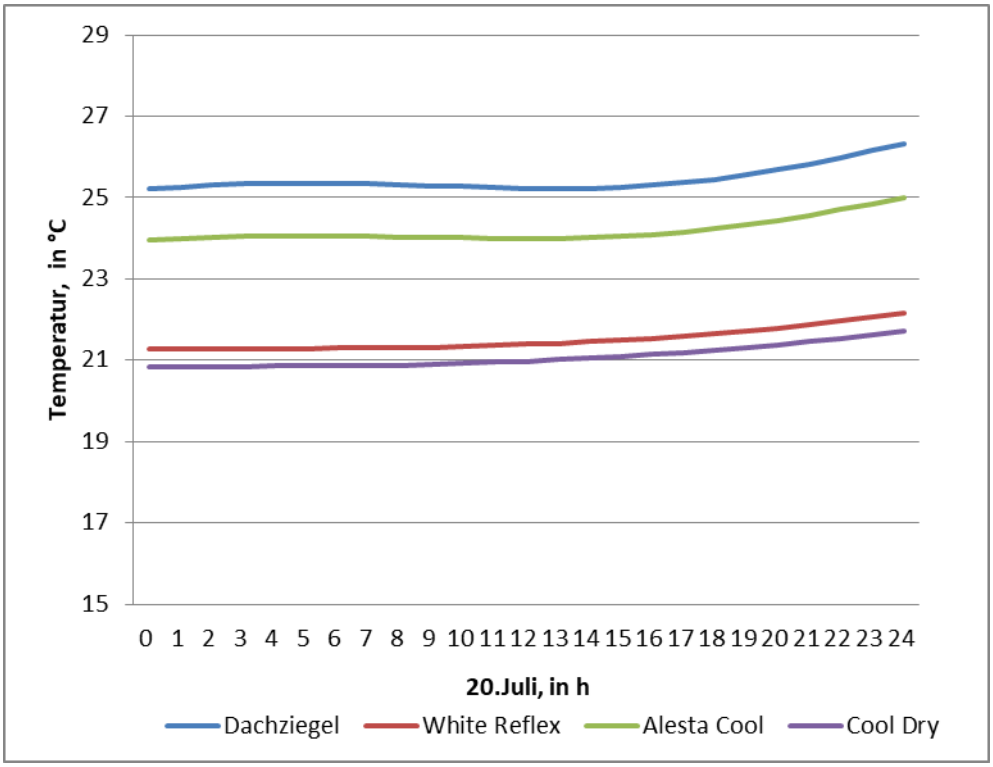


Abbildung 94: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Norddachfläche am heißesten Sommertag für die Zone „Dachgeschoss“

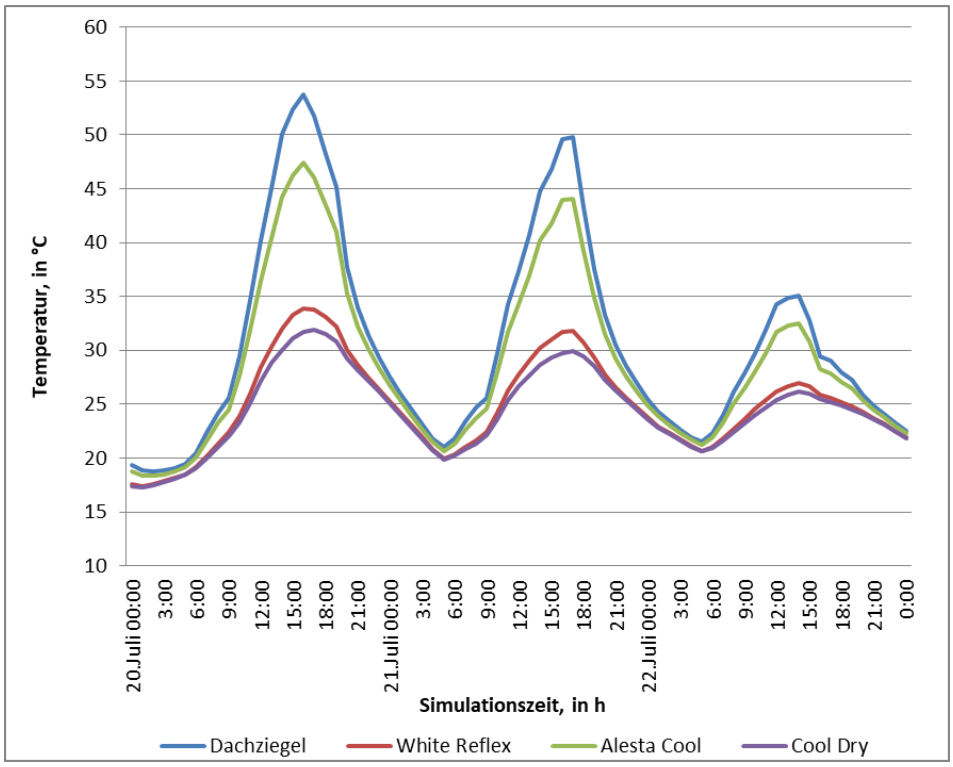


Abbildung 95: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Westdachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“

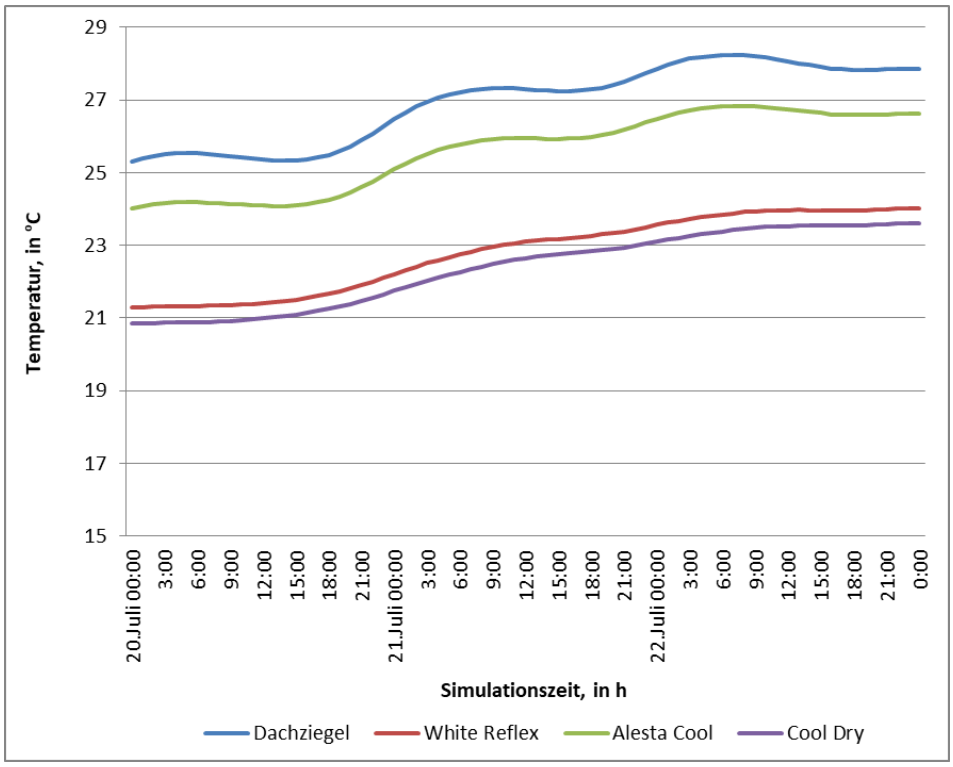


Abbildung 96: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Westdachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“

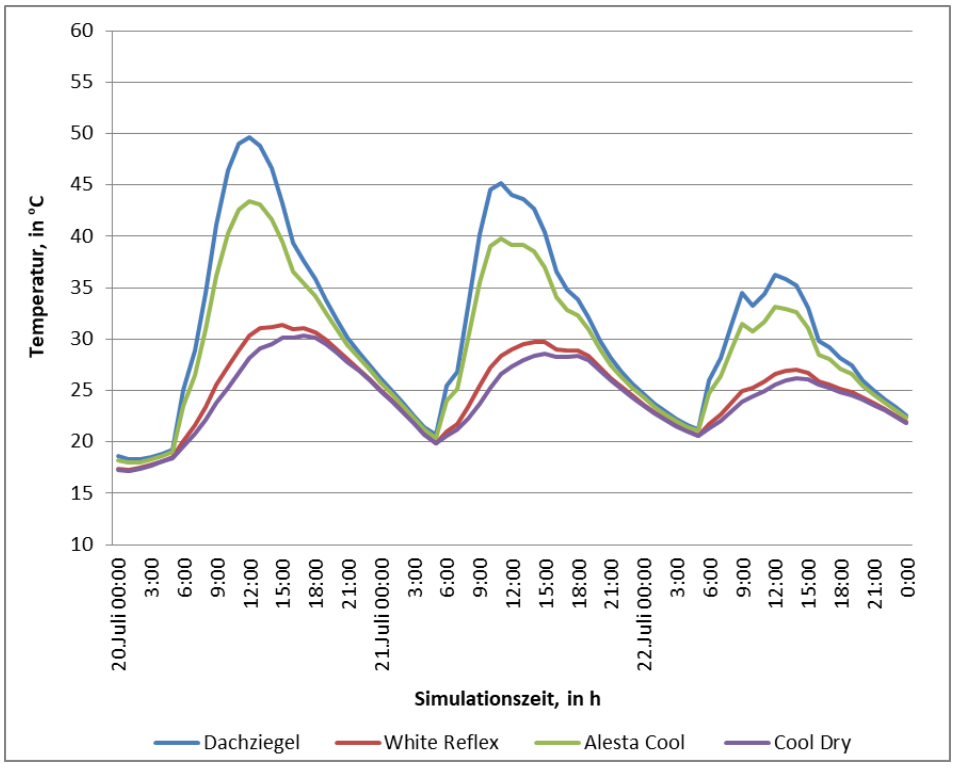


Abbildung 97: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Ostdachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“

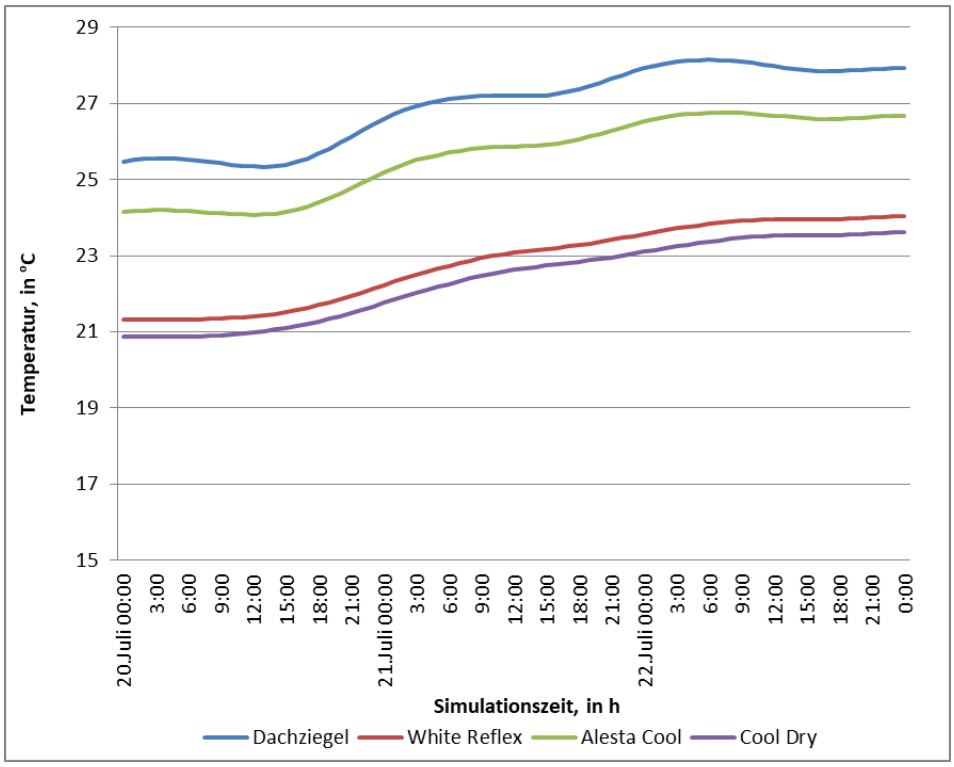


Abbildung 98: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Ostdachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“

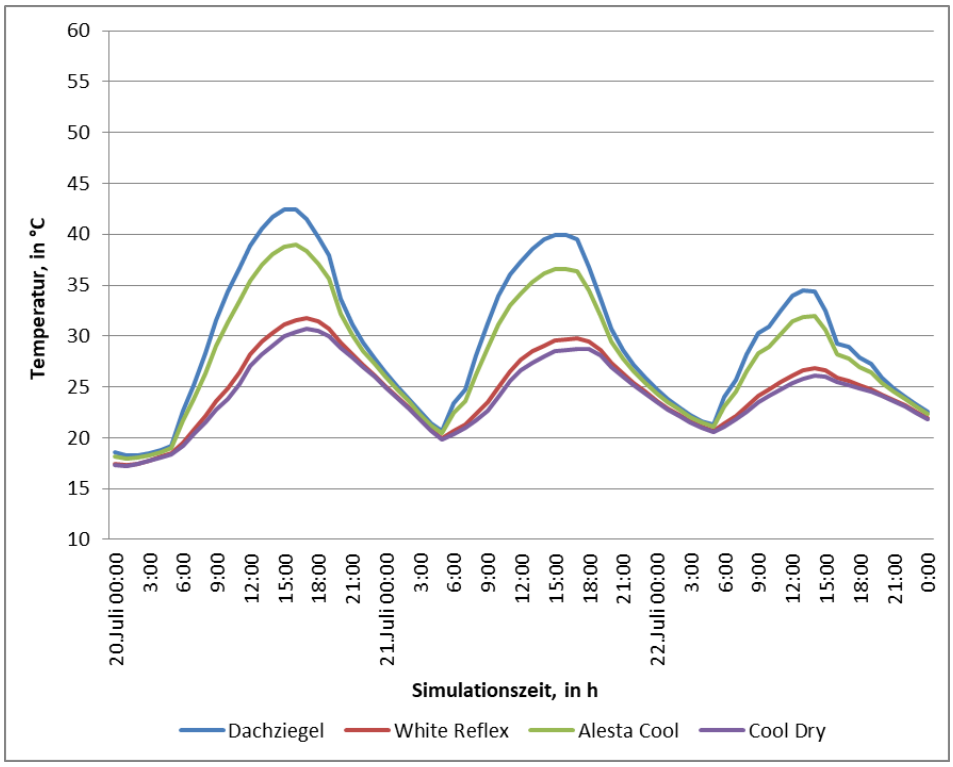


Abbildung 99: Temperaturverläufe an der Außenoberfläche der geneigten Norddachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“

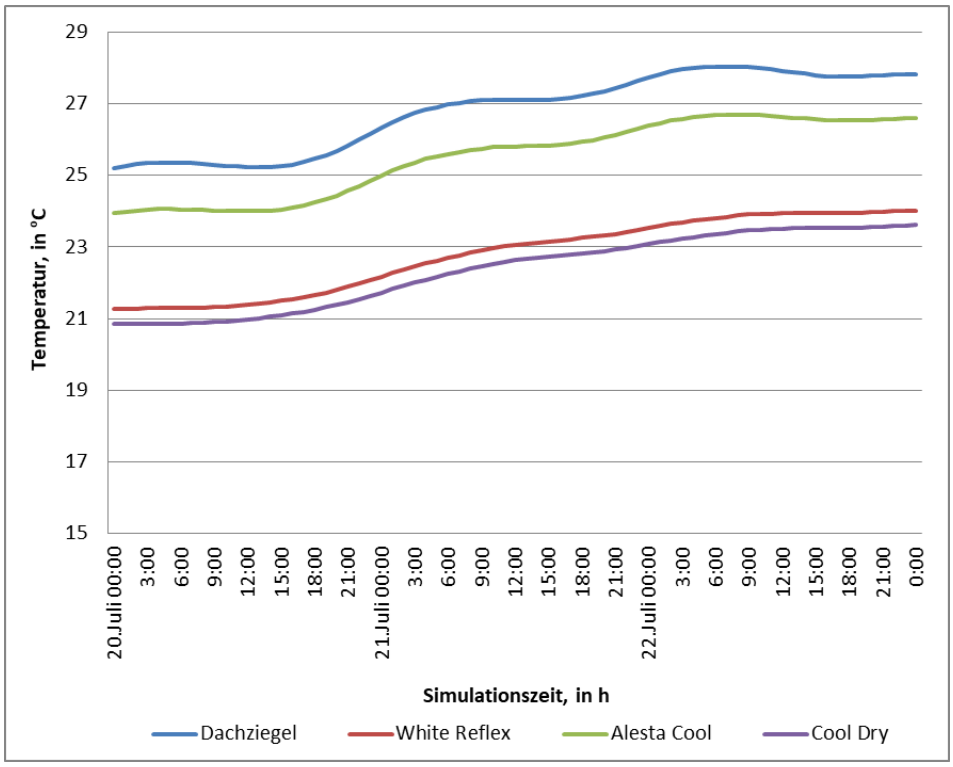
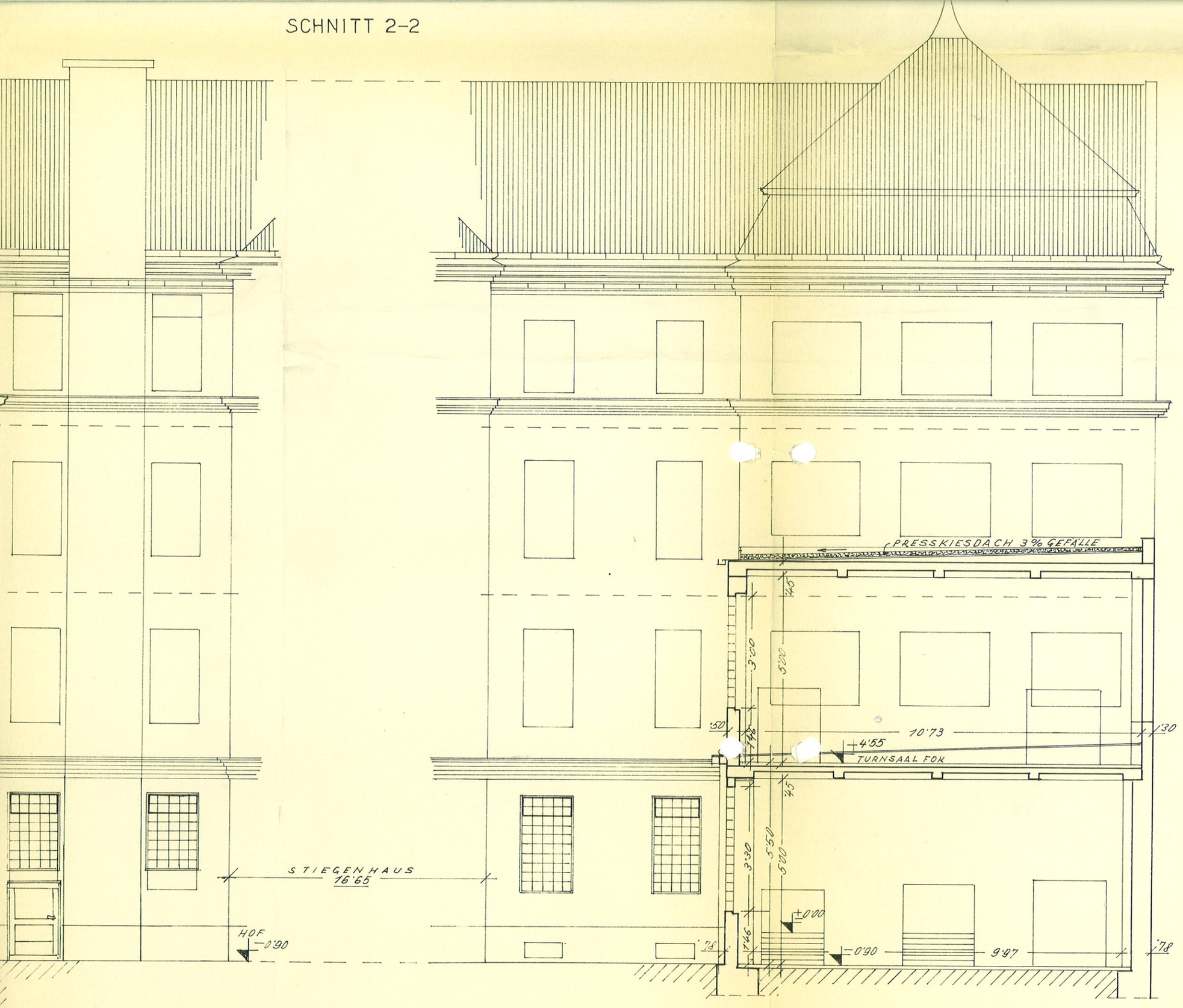


Abbildung 100: Temperaturverläufe an der Innenoberfläche der geneigten Norddachfläche für die drei heißesten Sommertage für die Zone „Dachgeschoss“

D. Gebäudepläne

Im Anhang befinden sich Gebäudepläne für das „Bundesgymnasium und Bundesrealgymnasium“ im 7. Bezirk von Wien.

SCHNITT 2-2



GRUNDEIGENTÜMER:
BAUWERBER:
PLANVERFASSER:

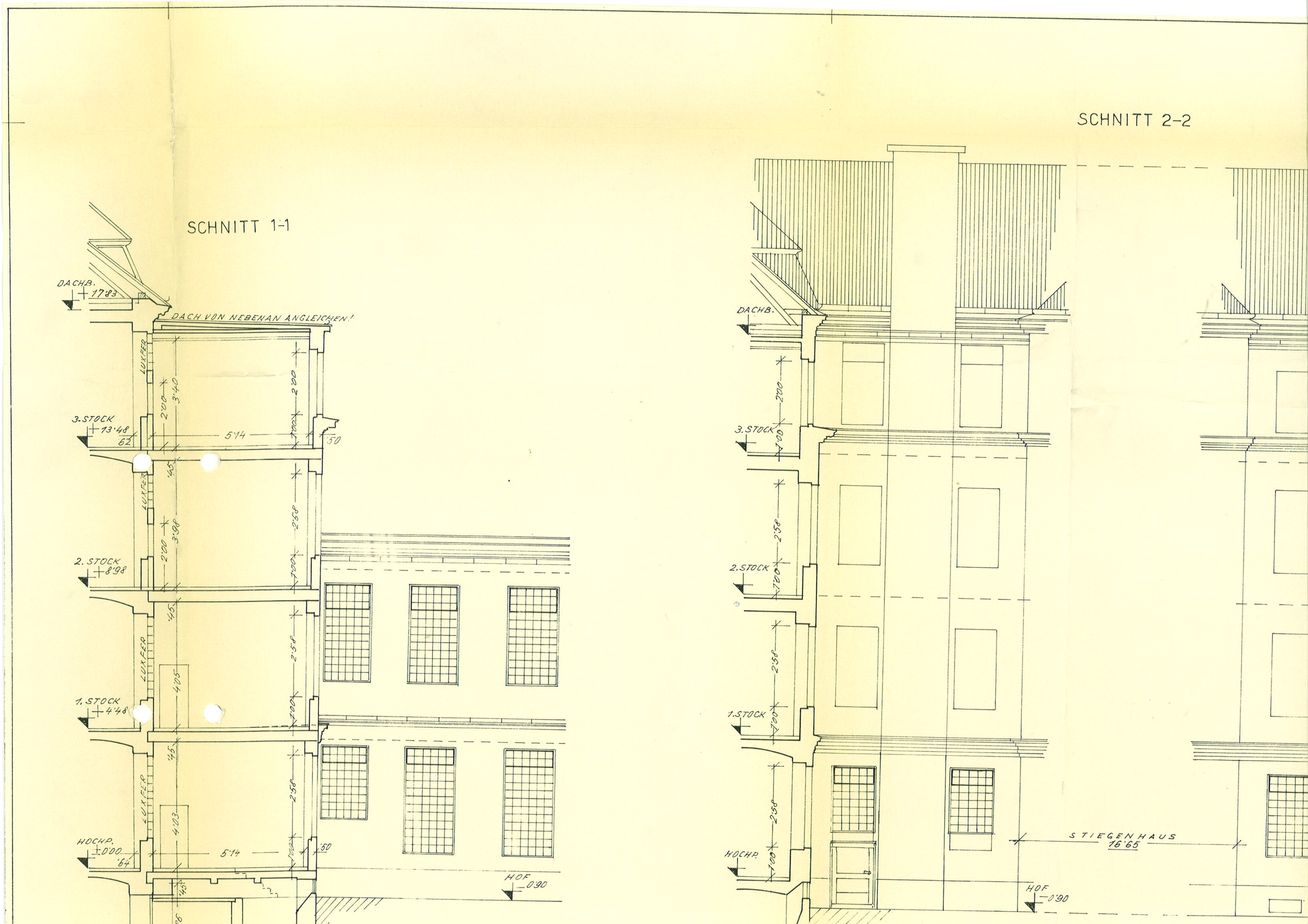
BAUFÜHRER:

BUNDESGEBÄUDEVERWALTUNG I WIEN
1030 WIEN III, RETZGASSE 2, RUF 73 25 11

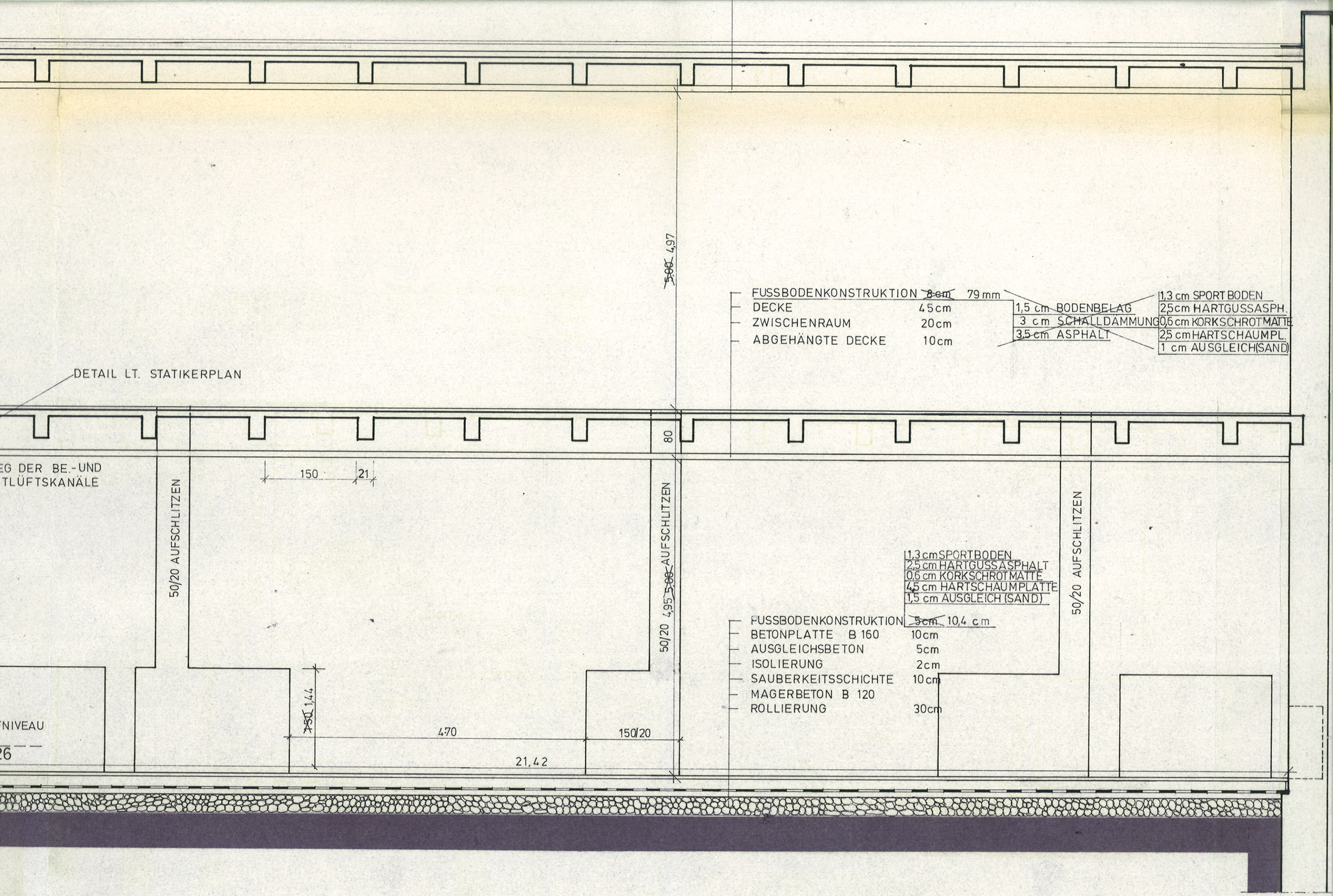
WIEN 7., KANDLGASSE 39 41, BRG. U. BG. GYMN.
DIVERSE ZU- U. UMBAUTEN (TURNSAAL)
SCHNITTE 1-1 U. 2-2

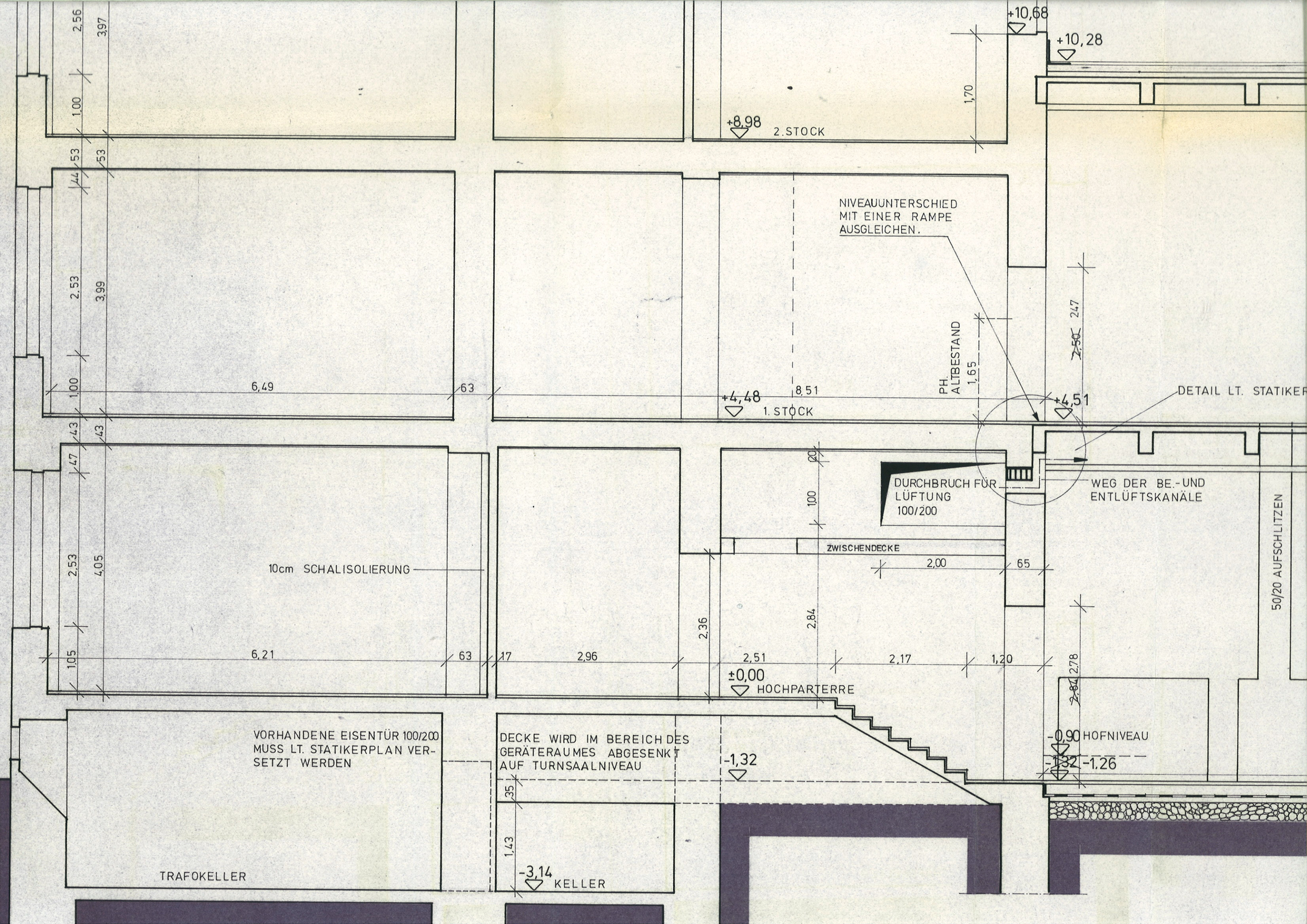
GEZEICHNET	KOLLER 1977. 05. 17	MASS-STAB 1:100
GEPRÜFT	[illegible] 77.07.07	

2/14/1



SCHNITT 1-1
DACHB. +17'83
DACH VON NEBENAN ANGLEICHEN!
LUXFER
3'40
2'00
3.STOCK +13'48
5'14
2. STOCK +8'98
3'98
2'58
1'00
1. STOCK +4'48
4'05
·45
HOCHP. ±0'00
4'03
HOF -0'90
SCHNITT 2-2
DACHB.
3.STOCK
2.STOCK
1.STOCK
HOCHP.
STIEGENHAUS 16'65
HOF -0'90


~~5,00~~ 4,97
FUSSBODENKONSTRUKTION ~~8cm~~ 79 mm
DECKE 45cm
ZWISCHENRAUM 20cm
ABGEHÄNGTE DECKE 10cm
1,5 cm BODENBELAG
3 cm SCHALLDÄMMUNG
3,5 cm ASPHALT
1,3 cm SPORTBODEN
2,5 cm HARTGUSSASPH.
0,6 cm KORKSCHROTMATTE
2,5 cm HARTSCHAUMPL.
1 cm AUSGLEICH(SAND)
DETAIL LT. STATIKERPLAN
EG DER BE.-UND
TLÜFTSKANÄLE
50/20 AUFSCHLITZEN
150
21
80
50/20 AUFSCHLITZEN
50/20 ~~5,00~~ 4,95
1,3 cm SPORTBODEN
2,5 cm HARTGUSSASPHALT
0,6 cm KORKSCHROTMATTE
4,5 cm HARTSCHAUMPLATTE
1,5 cm AUSGLEICH (SAND)
50/20 AUFSCHLITZEN
FUSSBODENKONSTRUKTION ~~5cm~~ 10,4 cm
BETONPLATTE B 160 10cm
AUSGLEICHSBETON 5cm
ISOLIERUNG 2cm
SAUBERKEITSSCHICHTE 10cm
MAGERBETON B 120
ROLLIERUNG 30cm
NIVEAU
26
~~1,50~~ 1,44
470
150/20
21,42


+10,68
+10,28
1,70
+8,98
2.STOCK
2,56
3,97
1,00
53
53
44
2,53
3,99
1,00
6,49
63
NIVEAUUNTERSCHIED
MIT EINER RAMPE
AUSGLEICHEN.
PH.
ALTBESTAND
1,65
247
+4,48
8,51
1. STOCK
+4,51
DETAIL LT. STATIKER
43
43
47
2,53
4,05
10cm SCHALISOLIERUNG
1,05
6,21
63
17
2,96
2,36
20
1,00
2,84
DURCHBRUCH FÜR
LÜFTUNG
100/200
ZWISCHENDECKE
2,00
65
WEG DER BE.-UND
ENTLÜFTSKANÄLE
50/20 AUFSCHLITZEN
2,51
2,17
1,20
±0,00
HOCHPARTERRE
2,78
-0,90
HOFNIVEAU
-1,32
-1,26
VORHANDENE EISENTÜR 100/200
MUSS LT. STATIKERPLAN VER-
SETZT WERDEN
DECKE WIRD IM BEREICH DES
GERÄTERAUMES ABGESENKT
AUF TURNSAALNIVEAU
-1,32
35
1,43
-3,14
KELLER
TRAFOKELLER

WIEN 7., KANDLGASSE 39-41., BUNDESGYMNASIUM E.Z.1

NEUGESTALTUNG DER FASSADE

WIEN, JUNI 1962

PENZ

Z.1453 M. 1:100 PL. NR. 4413

BUNDESDENKMALAMT WIEN

WIEN 7., KANDLG. 39-41 E.Z. 1453
FASSADE, ALT U. NEUGEST

ATAMANIUK 7.6.1962 4413
HOCH —"—
GENEHMIGT 1:100

2/14/1-

PENZ

MNASIUM EZ 1453 M. 1:100 PL.NR. 4461

BERGER-GASSE

WIEN 7., KANDLG 39-41 EZ 1453
FASSADE NEUGESTALTUNG
ATAMANIUK 25.7.62
HOCH 25.7.62
4461
1:100

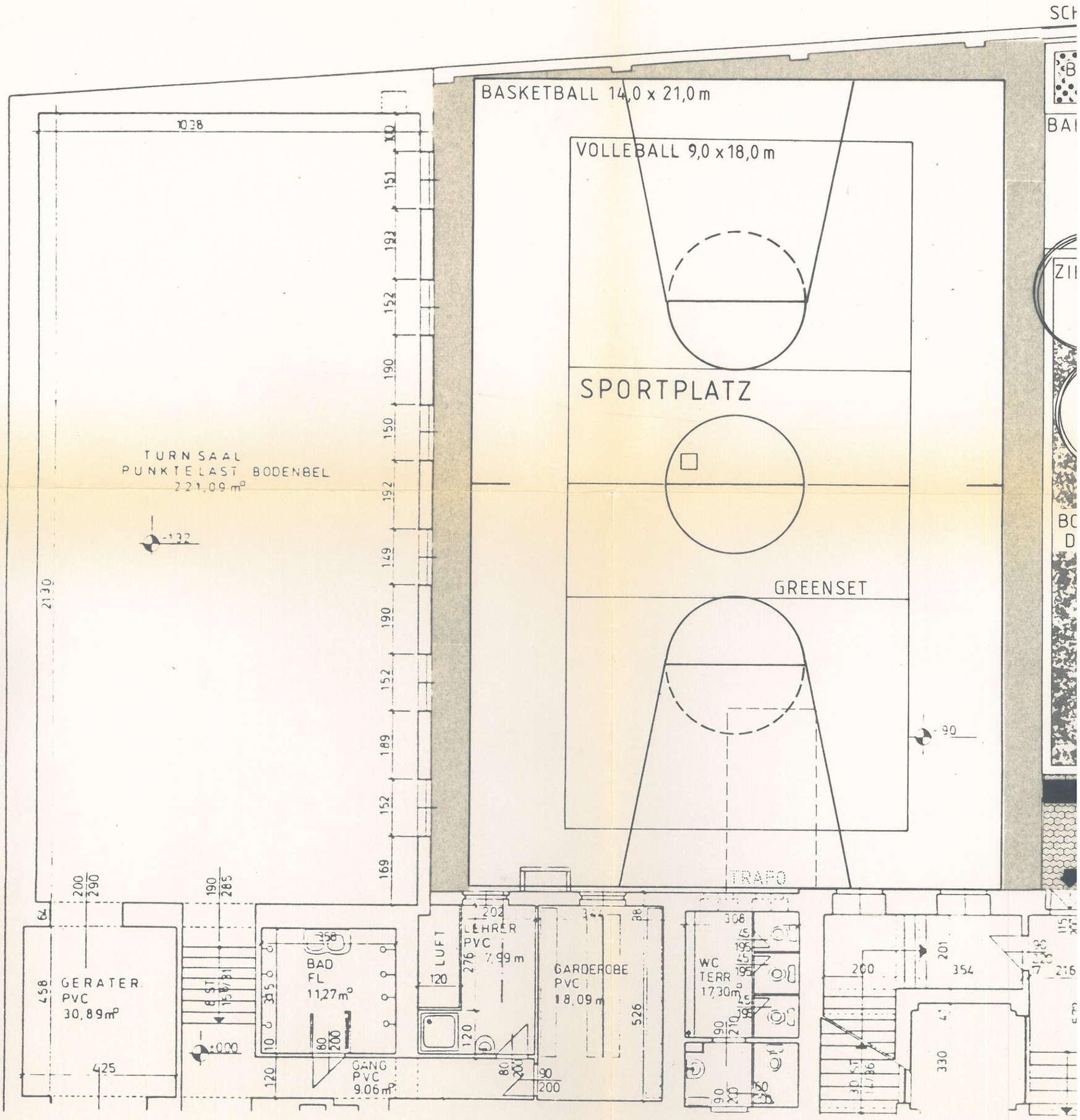
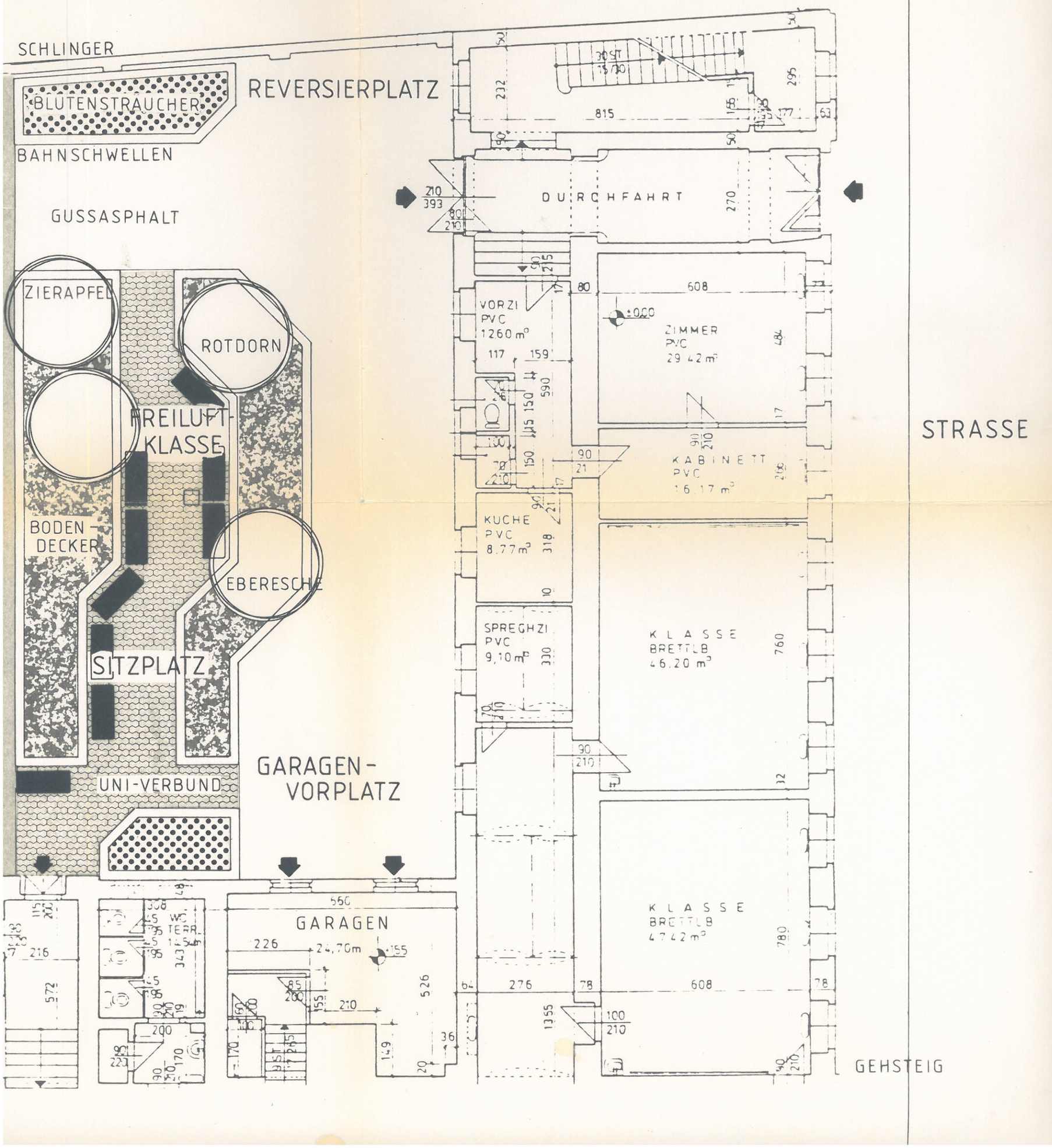
2/14/1-

WIEN 7., KANDLGASSE 39-41., BUNDESGYMNASIUM EZ 1453

NEUGESTALTUNG DER FASSADE

WIMBERGER-GASSE

WIEN JULI 1962


BASKETBALL 14,0 x 21,0 m
VOLLEBALL 9,0 x 18,0 m
SPORTPLATZ
GREENSET
TRAFO
TURNSAAL
PUNKTELAST BODENBEL
221,09 m²
GERATER
PVC
30,89 m²
BAD
FL
11,27 m²
LUFT
LEHRER
PVC
7,99 m
GARDEROBE
PVC
18,09 m
WC
TERR
17,30 m²
GANG
PVC
9,06 m²

VORENTWURF			
Plannummer	Maßstab	Mitarbeiter	Datum
194/01	1/100	W.	870717