

Diplomarbeit Architektur
Jessica Donau

Tageslichtsimulation

Untersuchungen zur Einbindung in eine thermische Gebäudesimulationsplattform & Entwicklung einer Auswertungsmethodik

Betreuer/ Gutachter: Dipl.-Ing. Dirk Weiß
Lehrstuhl für Bauklimatik, Professor Dr. John Grunewald
Matrikelnummer: 47 929 56
Tag der Themenübergabe: 09. Oktober 2024
Eingereicht am: 19.02.2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1. Zielstellung	1
2. Notwendigkeit von Tageslicht	2
3. Grundlagen der Tageslichtbewertung: DIN 17037	6
4. Verwendete Software	8
4.1. Radiance	8
4.2. VICUS	10
4.3. Schnittstelle	11
5. Algorithmus Tageslichtsimulation	12
5.1. Eingangsdaten: Raum	14
5.1.1. Raumgeometrie	14
5.1.2. Materialien & Oberflächen	19
5.1.3. Punktlisten	22
5.2. Eingangsdaten: Umgebung	26
5.2.1. Himmel	26
5.2.2. Verschattung	30
5.2.3. Bodenplatte	32
5.3. Verarbeitung	33
5.3.1. Bildgeneration	33
5.3.2. Berechnung Beleuchtungsstärken	41
5.3.3. Erstellen von Slices	44
5.4. Ausgabedaten	50
5.4.1. Bewertungsgrundlage: DIN EN 17037	50
5.4.2. Auswertungsalgorithmus	51
6. Benutzeroberfläche	55
6.1. Eingabe	55
6.1.1. Eingabegrößen	55
6.1.2. Simulationseinstellungen	58
6.2. Ausgabe	60
6.2.1. Ausgabegrößen	60
6.2.2. Bericht	61
7. Anwendung an Beispielgebäude	69
7.1. Kurzbeschreibung	69
7.2. Eingangsdaten	70
7.3. Ausgangsdaten	72
7.4. Bewertung	90
8. Funktionalität des Algorithmus	91
8.1. Eingabe	91
8.2. Verarbeitung	92
8.3. Ausgabe/Auswertung	93
Anhang	95
Literatur- und Quellenverzeichnis	124
Eigenständigkeitserklärung	127

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 - Aufschlüsselung Lichtspektrum nach Wellenlängen	2
Abb. 2 - Flussdiagramm zur Verknüpfung von Programmen (Rechtecke) und Daten (Ovale) in Radiance	8
Abb. 3 - Beispielrendering, erstellt mit Radiance	9
Abb. 4 - Übersicht: Inhalte Geometriedatei	14
Abb. 5 - Gegenüberstellung der Polygonerfassung in VICUS & Radiance	15
Abb. 6 - Erfassung eines Wandpolygons mit Fenstern	16
Abb. 7 - Versatz der Fensteröffnung zur Berücksichtigung des Fensterrahmens	17
Abb. 8 - Erstellung von Laibungen	18
Abb. 9 - Zusammenfassung der Erstellung der Raumgeometrie	18
Abb. 10 - Oberfläche des Jaloxa Colour Pickers (Results)	19
Abb. 11 - Diagramm: Zusammenhang Gesamtenergiedurchlassgrad g & Transmissionsgrad Tn	21
Abb. 12 - Definition der Bezugsebene in 3 Schritten	22
Abb. 13 - Bezugsflächen in Räumen mit abgestufter Grundfläche	23
Abb. 14 - Kantenversatz der Bezugsfläche mit Straight Skeleton	24
Abb. 15 - Boundary Boxen für unregelmäßige Raumformen	24
Abb. 16 - Flowchart: Definition Zellgröße (Punktliste)	25
Abb. 17 - Diagramm zur Unterscheidung von Typ 1 und Typ 16	26
Abb. 18 - Weltkarte Zeitzonen	27
Abb. 19 - Messpunkte Himmelsvalidierung & Abweichung in Lux	29
Abb. 20 - Zusammenhang zwischen g _{tot} & T _n am Herstellerbeispiel roma	31
Abb. 21 - Beispielraum in VICUS	35
Abb. 22 - Falsecolor: Einfluss der Legendenskalierung (Unterteilungsanzahl)	38
Abb. 23 - Falsecolor: Einfluss der Legendenskalierung (Höchstwert)	38
Abb. 24 - Falsecolor: Einfluss verschiedener Farbpaletten ("spec", "eco", "hot")	39
Abb. 25 - Falsecolor: Einfluss der Darstellungsformen	40
Abb. 26 - Fotomontage: Prinzipdarstellung der Slices im VICUS Modell	44
Abb. 27 - Vergleich von zwei View.vf Konfigurationen zur Erstellung von Slices	44
Abb. 28 - Vergleich der zwei Ergebnisbilder (Slices) mit verschiedenen vf-Dateien	45
Abb. 29 - Slice mit vereinfachter Parametrierung und 96.000 Punkten	46
Abb. 30 - Slice des Beispielraumes mit 96.000; 240 und 8 Punkten	47
Abb. 31 - Beispielraum "Kantig" in VICUS	48
Abb. 32 - View.vf für den kantigen Beispielraum	48
Abb. 33 - Gegenüberstellung der generierten Slices des kantigen Beispielraumes	48
Abb. 34 - Slices der Beispielraum Abwandlungen	52
Abb. 35 - Vorschlag: Menü zur Erfassung optischer Materialeigenschaften in VICUS	55
Abb. 36 - Vorschlag: Menü zur Erfassung weiterer Fenstereigenschaften in VICUS	56
Abb. 37 - Vorschlag - Übersichtsleiste	57
Abb. 38 - Vorschlag - Menü zur Himmelerfassung	57
Abb. 39 - Vorschlag- Raumliste zur Raumauswahl	58
Abb. 40 - Vorschlag - Menü "Tageslichtsimulation"	59
Abb. 41 - Musterbericht: Titelblatt	62
Abb. 42 - Musterbericht: Infokasten zur Software	62
Abb. 43 - Musterbericht: Inhaltsverzeichnis	63
Abb. 44 - Musterbericht: Normgrundlage DIN EN 17037	64
Abb. 45 - Musterbericht: Eingangsdaten	65

Abb. 46 - Musterbericht: Ergebnisse - Übersicht der Empfehlungsstufen	66
Abb. 47 - Musterbericht: Einzelauswertung eines Raumes mit Slice	67
Abb. 48 - Musterbericht: Bewertung	68
Abb. 49 - Standort Fakultätsgebäude II der Goethe Universität (genordeter Kartenausschnitt)	69
Abb. 50 - Verschattungselemente (grau) um das bauphysikalische Simulationsmodell	70
Abb. 51 - Simulationsbereich des Beispielgebäudes	70
Abb. 52 - Vereinfachtes Simulationsmodell in VICUS	71
Abb. 53 - Beispielgebäude: Modellübersicht Slices der 4 Varianten	72
Abb. 54 - Beispielgebäude: Slices - Einzelbuero 01	74
Abb. 54 - Beispielgebäude: Farblegende	74
Abb. 56 - Beispielgebäude: Slices - Einzelbuero 09	76
Abb. 57 - Beispielgebäude: Slices - Besprechung 01 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]	77
Abb. 58 - Beispielgebäude: Slices – Einzelbuero 10 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]	79
Abb. 59 - Beispielgebäude: Slices – Einzelbuero 16 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]	80
Abb. 60 - Beispielgebäude: Slices – Einzelbuero 17 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]	82
Abb. 61 - Beispielgebäude: Slices – Doppelbuero 04 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]	83
Abb. 62 - Beispielgebäude: Slices – Doppelbuero 03	85
Abb. 63 - Beispielgebäude: Slices – Doppelbuero 01	86
Abb. 64 - Beispielgebäude: Slices – Sanitaer [90° im Uhrzeigersinn gedreht]	88

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 - Abminderung des Transmissionsgrades für Verschmutzungskombinationen der Fensterflächen	21
Tab. 2 - Übersicht der Zeitzonen für Radiance (gensky) [vgl. Anhang 5]	27
Tab. 3 - Ein- & Ausgabe von gensky	28
Tab. 4 - Inhalte der Himmelsdateien Sky.rad mit 13.900 lx & 17.100 lx	29
Tab. 5 - Vergleich HDR & LDR Bildformate	33
Tab. 6 - Parameterkonfigurationen für rpict	35
Tab. 7 - Ergebnisbilder und Rechenzeiten der Parameterkonfigurationen für rpict	36
Tab. 8 - Ergebnisbilder und Rechenzeiten der angepassten Parameterkonfiguration „Max“ für rpict	37
Tab. 9 - Ausschnitt der Punktliste zum Beispielraum	41
Tab. 10 - Rtrace Abweichungen & Rechenzeiten in Abhängigkeit der Punktlisten und Rendereinstellungen	42
Tab. 11 - Ausschnitt der Ergebnisse zum Beispielraum mit Beleuchtungsstärke	43
Tab. 12 - Slices & Rechenzeiten in Abhängigkeit der Punktlisten und Rendereinstellungen	46
Tab. 13 - Empfehlungsstufen für die Beleuchtungsstärke in Innenräumen	50
Tab. 14 - Tageslichtquotienten in Deutschland in Abhängigkeit der (Mindest-) Zielbeleuchtungsstärken	51
Tab. 15 - Herleitung der Flächenanteile auf Basis der Beleuchtungsstärken für den Beispielraum	51
Tab. 16 - Herleitung der Flächenanteile auf Basis der Tageslichtquotienten für den Beispielraum	52
Tab. 17 - Matrix der Flächenanteile der abgewandelten Beispielräume bezüglich der Beleuchtungsstärken und der Tageslichtquotienten	53
Tab. 18 - Bewertungsmatrix der Empfehlungsstufen der abgewandelten Beispielräume	53
Tab. 19 - Matrix der Flächenanteile der Punktzahl-Varianten des Beispielraumes bezüglich der Beleuchtungsstärken und der Tageslichtquotienten	54
Tab. 20 - Bewertungsmatrix der Empfehlungsstufen der Punktzahl-Varianten des Beispielraumes	54
Tab. 21 - Beispielgebäude: Übersicht der erreichten Empfehlungsstufe der vier Varianten	73
Tab. 22 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 01	75
Tab. 23 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 01	75
Tab. 24 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 09	76
Tab. 25 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 09	77
Tab. 26 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Besprechung 01	78
Tab. 27 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen – Besprechung 01	78
Tab. 28 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 10	79
Tab. 29 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 10	80
Tab. 30 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 16	81
Tab. 31 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 16	81
Tab. 32 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 17	82
Tab. 33 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 17	83
Tab. 34 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Doppelbuero 04	84
Tab. 35 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Doppelbuero 04	84
Tab. 36 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Doppelbuero 03	85
Tab. 37 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Doppelbuero 03	86
Tab. 38 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Doppelbuero 01	87

Tab. 39 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Doppelbuero 01	87
Tab. 40 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Sanitaer	88
Tab. 41 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Sanitaer	89

1. Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Integration & Nutzung von Radiance, einer Tageslichtsimulationssoftware, in der Gebäudesimulationsumgebung VICUS. Diese Methodik soll es ermöglichen, die zur Bewertung der Tageslichtversorgung notwendigen Kennwerte effizient zu berechnen und die Ergebnisse in einem für die Gebäudesimulation geeigneten Format darzustellen. Dabei ist auf die Praktikabilität und Barrierefreiheit der Lösung zu achten, wodurch die Verwendbarkeit ingenieurtechnischer Insellösungen gewährleistet wird.

Um die Tageslichtbewertung durchzuführen, erfolgen zunächst grundlegende Recherchen zum Workflow. Darauf aufbauend werden die geometrischen Parameter der betrachteten Räume sowie die Oberflächenkennwerte, wie Rauigkeit und Spiegelglanz, präzise erfasst. Zu diesem Zweck wird die Verwendbarkeit bereits vorhandener 3D-Modelle geprüft. Ergänzend sind Punktlisten zur Raumerfassung zu erstellen. Neben der Geometrie sind auch Randbedingungen wie Himmelszustände und Umgebungsfaktoren zu berücksichtigen.

Anschließend erfolgt die Durchführung der Tageslichtsimulationen. Die Ausgaben werden in geeigneten Datenstrukturen sowie temporären Dateien gespeichert. Um eine detaillierte Analyse auf Basis der DIN 17037 zu ermöglichen, werden die Simulationsergebnisse so aufgeteilt, dass die Auswertung für einzelne Räume möglich ist.

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wird ein Konzept entwickelt, welches die Darstellung in Form fiktiver horizontaler Ebenen (sogenannter Slices) innerhalb der Software ermöglicht. Die Visualisierung der Simulationsergebnisse erfolgt so, dass eine intuitive Interpretation der Berechnungen unterstützt wird.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Arbeit ist die Erstellung eines automatisch generierbaren Berichts, welcher die Eingangsdaten, Rahmenbedingungen und Ergebnisse der Simulation übersichtlich dokumentiert. Er soll außerdem den Kontext zum betrachteten Gebäude herstellen.

Ein zentrales Ziel der Methodik ist es, die Tageslichtbewertung skalierbar zu gestalten, sodass alle Räume eines Gebäudes in einem einzigen Simulationsdurchlauf analysiert werden können. Auf diese Weise reduziert sich der zeitliche Aufwand im Vergleich zur händischen Bearbeitung einzelner Räume erheblich. Um dieses Vorgehen zu ermöglichen, werden die zur Simulation notwendigen Prozesse so weit wie möglich über Algorithmen automatisiert.

Abschließend wird die Methodik anhand eines Beispielgebäudes mit mehreren Räumen angewendet. Dabei soll analog der zuvor beschriebenen Vorgehensweise ein kurzer Beispielbericht entstehen. Dieses Verfahren ermöglicht die Überprüfung der Praktikabilität und die Bewertung des entwickelten Algorithmus auf Funktionalität und einfache Anwendbarkeit.

2. Notwendigkeit von Tageslicht

Der Begriff Tageslicht umfasst einen Teilbereich des Sonnenlichtes. Bei Sonnenlicht handelt es sich um die elektromagnetische Strahlung der Sonne, die sogenannte Globalstrahlung. Im Rahmen des Strahlungshaushaltes setzt sich diese aus direkter Sonnenstrahlung, also dem Anteil, welcher als Parallelstrahlung nach selektiver Schwächung innerhalb der Erdatmosphäre die Erdoberfläche erreicht, und diffuser Himmelsstrahlung, also dem Anteil, welcher nach Streuung an Luftmolekülen, Aerosolen und Wolkenpartikeln die Erdoberfläche erreicht, zusammen.¹

Das Tageslicht² beschreibt den Anteil der sichtbaren Sonnenstrahlung, welche folglich aus dem Sonnenlicht (sichtbare Direktstrahlung) und Himmelslicht (sichtbare Diffusstrahlung) besteht. Im Allgemeinen gilt Licht als sichtbar, wenn die Wellenlängen zwischen circa 400 und 780 nm liegen.

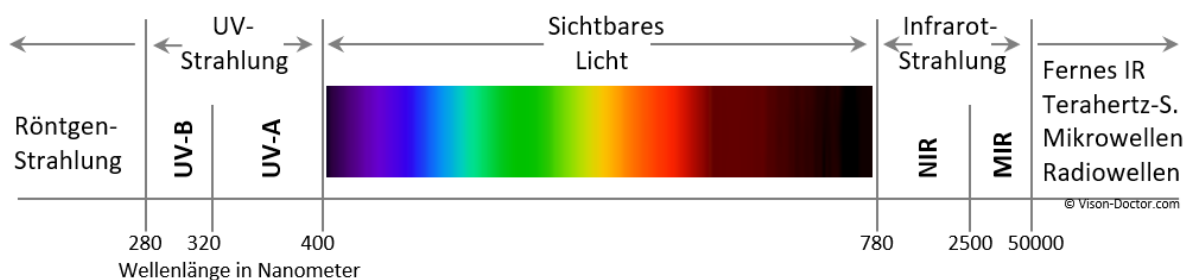


Abb. 1 - Aufschlüsselung Lichtspektrum nach Wellenlängen³

Die Einflüsse des Tageslichts auf Innenräume lassen sich in vier Bereiche aufteilen: Die Psychische Wirkung, die Sehbedingungen, die Thermische Behaglichkeit und die Energieeffizienz. Eine klare Trennung der Teilbereiche ist dabei nicht möglich, da sie stark miteinander verwebt sind.

Da sich das Folgende auf den sichtbaren Anteil der Sonnenstrahlung konzentrieren soll, wird auf die thermische Behaglichkeit nicht genauer eingegangen. Sie befasst sich im Wesentlichen mit den wärmenden Effekten der Sonnenstrahlung und steht damit im direkten Zusammenhang mit dem sommerlichen Wärmeschutz, welcher die Wärme- & Strahlungsbelastung eines Gebäudes eingrenzen soll. Folglich ist es also wichtig, alle folgenden Betrachtungen zum Tageslicht in Innenräumen nicht losgelöst vom Gesamtgebäude zu betrachten, sondern in der Anwendung stets im Kontext mit allen weiteren bauphysikalischen Teilbereichen zu bewerten.

¹ (vgl. Cakir et al. 2016)

² Zur Berechnung der Tageslichtversorgung von Innenräumen wird in der Regel ein bewölkter Himmel als Grundlage herangezogen. Folglich werden die Begriffe „Tageslicht“ und „Himmelslicht“ in den folgenden Kapiteln annähernd synonym verwendet.

³ (VisionDoctor)

Psychische Wirkung von Tageslicht

Den größten psychischen Effekt hat Tageslicht auf den Tag-Nacht-Rhythmus des Menschen. Der Circadiane Rhythmus wird zwar auch von Essensaufnahme, Stress, physischer Aktivität, sozialem Umfeld und der Temperatur beeinflusst, aber die Umgebungshelligkeit⁴ ist nachgewiesen der stärkste Taktgeber. Der Rhythmus selbst bestimmt unser Schlafverhalten, den Hormonhaushalt, den Appetit und die Verdauung, sowie die Körpertemperatur. Da gesunder Schlaf einer der wichtigsten Bausteine des körperlichen Wohlbefindens ist, hat diese innere Uhr sowohl einen Einfluss auf das alltägliche Leben als auch auf speziellere Umstände.⁵

Weiterhin wirkt Tageslicht stimulierend auf die Freisetzung von Serotonin, welches ein höheres Energieniveau, ein Gefühl von Glück & Wohlbefinden und die Reduktion von Angstzuständen und Depressionen zur Folge hat. Einen vergleichbaren Effekt haben die durch Tageslichtexposition produzierten Endorphine, sogenannte „Glückshormone“. Diese wirken außerdem schmerzstillend und stimmungsaufheiternd.

Auf dieser Basis wurde eine therapeutische Wirkung von Licht festgestellt, welche beim Vorgehen gegen saisonale Depressionen mit einer Lichttherapie hilft. Dabei wird der Patient mit 2.500-10.000 lx starkem Kunstlicht bestrahlt, um dem fehlenden Tageslicht in den Wintermonaten entgegenzuwirken. Der Effekt dieser Therapie lässt sich verstärken, wenn sie in den frühen Morgenstunden durchgeführt wird, da hier der Zeitpunkt dem circadianen Rhythmus entspricht.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel der Lichtwirkung sind lichtdurchflutete Gesundheitseinrichtungen. Hier ist ein kürzerer Genesungsprozess, höhere Schlafqualität und Schmerzreduktion auf Seiten der Patienten zu beobachten. Auch das Personal profitiert durch das Tageslicht; hier reduzieren sich die Medikationsfehler.⁶

Auch die Vitamin-D-Synthese wird maßgeblich durch Tageslicht beeinflusst. Vitamin D ist ausschlaggebend für die Knochengesundheit und das Immunsystem. Es ist an der Bildung von Proteinen, Neurotransmittern und Melatonin beteiligt, wirkt entzündungshemmend, hilft bei der Stressbewältigung und fördert kognitive Fähigkeiten. Vor allem letzteres erhöht im hohen Alter die Selbstständigkeit und Lebensqualität.⁷

Neben dem Helligkeitseindruck⁸ selbst, geht die Tageslichtversorgung in der Regel mit Öffnungen zum Außenraum einher. Dieser sorgt für Orientierung, ein Gefühl von Freiheit und die Möglichkeit Wetter, Uhrzeit und Umgebung jederzeit einzuordnen. Außerdem sorgt der Blick nach draußen in Arbeitsstätten für eine Möglichkeit kurze Bildschirmspausen einzulegen und die Augen durch das Fokussieren weit entfernter Objekte zu entspannen.

⁴ Es ist nicht nur die Helligkeit selbst, sondern auch entsprechende Farbanteile, der Verlauf, die Einfallrichtung und die Verteilung im Raum entscheidend. Es ist bis heute nicht möglich die Qualitäten des Sonnenganges mit Kunstlicht zu 100% abzubilden. (Ficker 2024)

⁵ (vgl. National Institute of General Medical Sciences 2023)

⁶ (vgl. Bachmann 2024)

⁷ (vgl. Bachmann 2024)

⁸ Der „subjektive Helligkeitseindruck“ wird in DIN 5034-1 definiert & beschreibt den psychischen Einfluss der Beleuchtungsstärke.

Sehbedingungen

Das Tageslicht hat signifikanten Einfluss auf die Sehbedingungen in Innenräumen. Vor allem an Arbeitsplätzen ist die Beleuchtungsstärke entscheidend für Produktivität und Sicherheit. Aus diesem Grund fordern Arbeitsstättenrichtlinie 3.4 und im weiteren DIN EN 17037 Mindestbeleuchtungsstärken am Arbeitsplatz.⁹

Konkret sorgt Licht am Arbeitsplatz für ein geringeres Risiko von Augenbeschwerden, weniger Kopfschmerzen und gesteigerte Produktivität. Dabei ist Tageslicht Kunstlicht vorzuziehen, da Dynamik, Farbe, Richtung & Menge technisch nicht erreichbar sind. Außerdem kann an ca. 85% der Arbeitstage (hier: 7-17 Uhr) der Lichtbedarf durch Tageslicht gedeckt werden. Bereits ab 80% spricht man dabei von einer „hohen Tageslichtautonomie“.¹⁰

Die Musterbauordnung¹¹ definiert ein Verhältnis von 1:8 für das Rohbaumaß der Fensteröffnungen zur Netto-Grundfläche des Raumes.¹²

DIN EN 12464-1 ergänzt die ASR 3.4 um individuellere Lichtsituationen. Es wird deutlich, dass gerade die folgenden Szenarien von einer höheren Beleuchtungsstärke profitieren:

- Kritische Sehaufgaben
- Hohe Fehlerkosten
- Notwendigkeit größter Genauigkeit
- Arbeiten mit kleinen/kontrastarmen Details
- Lange Ausführungsdauern
- Reduzierte Sehfähigkeit der Mitarbeiter

Ein weiterer Teil der Sehbedingungen umfasst die Blendfreiheit. Diese wird im Folgenden nicht genauer betrachtet, da der Schwerpunkt auf die Beleuchtungsstärken gelegt wird. Theoretisch ist eine Abbildung durch Radiance jedoch möglich. [vgl. Absatz 4.1, S.8]

⁹ Genauere Angaben siehe 5.4.1 Bewertungsgrundlage: DIN EN 17037, S.10

¹⁰ (vgl. Ficker 2024; vgl. Koch 2024)

¹¹ (vgl. MBO 2019 §47, Absatz 2)

¹² Fensterposition, Raumgeometrie, Transmissionsgrad, usw. haben Einfluss, der genauere Betrachtung notwendig macht.

Energieeffizienz

Auch die Energieeffizienz profitiert von einem hohen Nutzungsgrad von Tageslicht. Entscheidend ist dafür sind erster Linie die solaren Gewinne, welche mit Tageslichtöffnungen einhergehen und den Energiebedarf in der Heizperiode senken.

Hier ist im Rahmen einer bauphysikalischen Betrachtung abzuwägen, ob die solaren Gewinne ausreichend sind, um große Glasflächen, welche in der Regel einen schlechteren Wärmedurchgangskoeffizienten als opake Wände aufweisen, zu rechtfertigen. Außerdem kann sich dieser Effekt in der Sommerperiode umkehren und eine Kühlung notwendig machen, welche den Energiebedarf des Gebäudes erhöht. Entscheidend ist dabei die korrekte Fenster- bzw. Glaswahl.

Dazu kommt ein geringerer Bedarf an Kunstlicht. Je höher der Deckungsgrad durch Tageslicht ist, desto geringer der Kunstlichtbedarf eines Gebäudes. Da in Deutschland in einem Bürogebäude Deckungsgrade von bis zu 85% möglich sind, kann der Energiebedarf gegenüber einem vergleichbaren Gebäude mit beispielsweise 50% Deckungsgrad deutlich reduziert werden. Zwar sind die Einzelbedarfe der Leuchten aufgrund effizienter LEDs nicht sehr hoch, in Summe kann in einem Bürogebäude jedoch ein nicht zu vernachlässigender Strombedarf durch Beleuchtung entstehen.

Auch die thermische Behaglichkeit, kann in Form der operativen Temperatur durch die Beleuchtungsstärke beeinflusst werden. Direkte Versorgung mit Tageslicht kann diese erhöhen und folglich den Heizbedarf senken. Auch dieses Phänomen führt trotz geringem direktem Effekt über eine Vielzahl von Räumen und die gesamte Heizperiode, zu einer erstrebenswerten Einsparung.¹³

¹³ (vgl. Bachmann 2024)

3. Grundlagen der Tageslichtbewertung: DIN 17037

Als Grundlage zur Tageslichtbewertung wird die DIN 17037 herangezogen. Unter dem Titel „Tageslicht in Gebäuden“ befasst sich diese mit der Nutzung von Tageslicht zur Beleuchtung von Innenräumen, der Reduzierung von Blendung und der Sicherstellung einer ausreichenden Aussicht. Sie richtet sich insbesondere an Architekten, Ingenieure und Bauherren, welche Gebäude entwerfen, planen, bewerten und Tageslicht dabei normgerecht integrieren möchten. Ihr Anwendungsbereich umfasst dabei *„alle regelmäßig und über längere Zeit von Menschen genutzten Räume, mit Ausnahme von Räumen, in denen eine Tageslichtbeleuchtung der Nutzung des Raumes entgegensteht“*.¹⁴ Sie wird für besondere Sehaufgaben, durch die EN 12464-1 ergänzt. Inhaltlich gliedert sich die Norm in vier Teile, welche im Folgenden kurz zusammengefasst werden:

Tageslichtversorgung

Unter dem ersten Punkt wird die Nutzung des Tageslichtes zur Beleuchtung des Gebäudeinneren bewertet. Dabei werden die Verfügbarkeit von Tageslicht am Standort, sowie die Eigenschaften des Raumes berücksichtigt. Ziel ist es, festgelegte (Mindest-) Zielbeleuchtungsstärken über eine fiktive Bezugsfläche innerhalb des Raumes zu erreichen. Dafür definiert die Norm drei Empfehlungsstufen [vgl. 5.4.1, S.50].

Zur Überprüfung dieses Zusammenhanges werden zwei Berechnungsverfahren erläutert:

- Tageslichtquotienten in Abhängigkeit des Standortes
- Beleuchtungsstärken in Abhängigkeit von Klimadaten

Die Berechnung ist mit einem repräsentativen Modell durchzuführen, welches alle wesentlichen Parameter¹⁵ des geplanten Gebäudes enthält. Alternativ kann der Nachweis nachträglich mit einer Vor-Ort-Messung erfolgen.¹⁶

Die Tageslichtversorgung ist zentraler Inhalt der folgenden Arbeit. Die weiteren Facetten der Belichtung von Räumen bedürfen aufgrund ihrer Vielfältigkeit und Komplexität eine separate Betrachtung an anderer Stelle. Aus diesem Grund werden die betreffenden Teile der Norm nachfolgend lediglich kurz zusammengefasst.

Beurteilung der Aussicht

Unter Aussicht versteht sich eine visuelle Verbindung in den Außenraum, welche Orientierungsmöglichkeiten bietet und Müdigkeit vorbeugt. Sie setzt sich aus den drei Ebenen Himmel, Landschaft und Boden zusammen. Ihre Qualität ist abhängig von den folgenden Punkten:¹⁷

- Größe der Tageslichtöffnungen
- Breite der Aussicht
- Außensichtweite
- Anzahl der Ebenen
- Qualität der Umgebungsinformationen

Die Verifizierung der Qualität erfolgt entweder im vereinfachten oder im erweiterten Verfahren, welche in den Anhängen C.4.1/C.4.2 der Norm beschrieben sind.

¹⁴ (DIN EN 17037 2022, S. 6)

¹⁵ Zu den wesentlichen Parametern zählen vor allem Geometrie, Transmissionsgrade, Reflexionsvermögen und Umgebende Verschattungen

¹⁶ (vgl. DIN EN 17037 2022, S. 11/12)

¹⁷ (vgl. DIN EN 17037 2022, S. 12/13)

Besonnungsdauer

Die Besonnungsdauer beschreibt die Anzahl an Stunden, die ein Raum an einem klaren, wolkenlosen Bezugstag¹⁸, dem direkten Sonnenlicht ausgesetzt ist. Die Norm definiert für Patientenzimmer (Krankenhaus), Spielzimmer (Kindergarten) und Wohnräume (mindestens einer pro Wohnung) eine Mindestzahl an Stunden in drei Empfehlungsstufen.¹⁹

Schutz vor Blendung

*"Blendung ist eine negative Empfindung, die durch helle Bereiche mit einer ausreichend größeren Leuchtdichte als für das menschliche Auge verträglich verursacht wird und zu Belästigung, Unwohlsein oder reduzierter Sehleistung und Sichtbarkeit führt."*²⁰

Um diesen Blendungseffekt zu vermeiden, sollten in allen Räumen Blendschutzvorrichtungen verbaut werden, welche den direkten Blick in die Sonne vermeiden. Die Norm gibt dafür Zielwerte der Blendungswahrscheinlichkeit (DGP: Daylight Glare Probability) vor, welche einzuhalten sind. Diese können entweder über ein vereinfachtes Rechenverfahren, oder über Messungen vor Ort nachgewiesen werden.²¹

Rechtliche Bindung

Insgesamt konkretisiert die DIN, die eher ungenauen Forderungen der Musterbauordnung (MBO) §47, welche grobe Vorgaben zur Mindestbelichtung eines Aufenthaltsraumes in Form des Fensterflächenanteils gibt, und der Arbeitsstättenrichtlinie (ASR) 3.4 Punkte 4 & 5, welche sich mit der Aussicht und der Tageslichtversorgung befassen. Da die ASR im Rahmen der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) rechtlich bindend ist, kann daraus eine gewisse Verbindlichkeit der DIN 17037 abgeleitet werden.²²

Die Norm selbst ist jedoch nicht baurechtlich eingeführt, da sie nicht als Verweis in den Landesbauordnungen oder den Technischen Baubestimmungen geführt wird. Sie stellt damit lediglich den anerkannten Stand der Technik dar, welcher als Planungsgrundlage zu berücksichtigen ist.

¹⁸ Der Bezugstag entspricht einem frei gewählten Datum zwischen dem 1. Februar & 21. März.

¹⁹ (vgl. DIN EN 17037 2022, S. 13)

²⁰ (DIN EN 17037 2022, S. 14)

²¹ (vgl. DIN EN 17037 2022, S. 14)

²² (vgl. ASR 3.4 2023, S. 4–8; vgl. MBO 2019 §47)

4. Verwendete Software

4.1. Radiance

Auf der eigenen Homepage²³ beschreiben die Ersteller der Software Radiance frei übersetzt wie folgt:

„Radiance ist eine Suite von Programmen zur Analyse und Visualisierung von Beleuchtung im Design.“

Wie bereits aus dem Zitat hervor geht, handelt es sich um eine Suite, also ein Konglomerat aus vielen einzelnen Programmen, welche miteinander verkettet werden, um das gewünschte Ergebnis zu erzeugen. Eine Übersicht der möglichen Anwendungen ist in Anhang 1, S.96 abgebildet.

Die grundlegende Struktur (vgl. Abb. 2) ähnelt sich dabei für eine Vielzahl von Anwendungsfällen. In einem ersten Schritt erfasst das Programm über Eingabedaten die Gebäudegeometrie und die Umgebungsbedingungen. Diese werden zusammengeführt & für die Verarbeitung vorbereitet. Dabei entsteht der sogenannte „Octree“. Daraufhin erfolgt eine Weiterverarbeitung der Daten gemäß der Zielstellung mit anschließender Ausgabe entsprechender Ergebnisdaten. Vor allem im letzten Schritt treten dabei Unterschiede in den verwendeten Funktionen von Radiance auf.

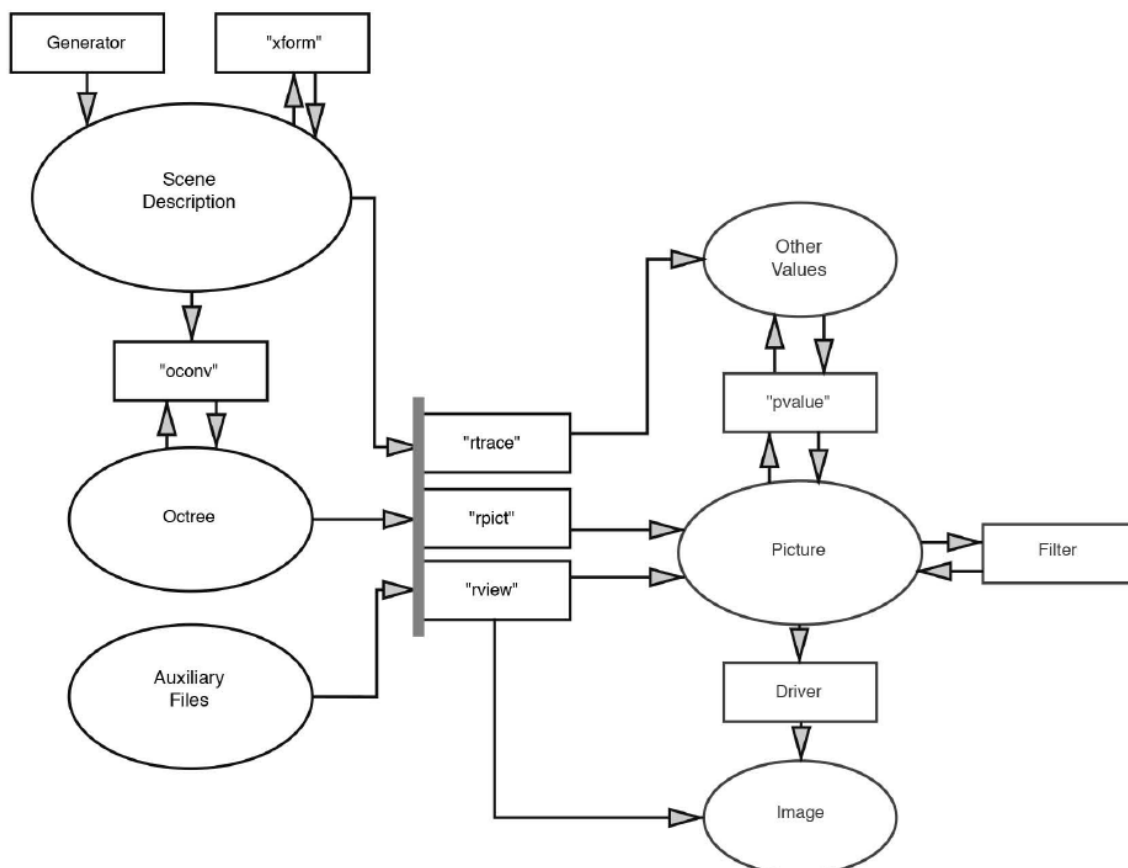


Abb. 2 - Flussdiagramm zur Verknüpfung von Programmen (Rechtecke) und Daten (Ovale) in Radiance ²⁴

²³ (RFritz/AMcneil 2019)

²⁴ (Building Technologies Department 2020)

„Der Hauptvorteil von Radiance gegenüber einfacheren Beleuchtungsberechnungs- und Rendering-Tools besteht darin, dass es nur wenige Einschränkungen hinsichtlich der Geometrie oder der Materialien gibt, die simuliert werden können. Radiance wird von Architekten und Ingenieuren genutzt, um Beleuchtung, visuelle Qualität und Erscheinungsbild innovativer Designräume vorherzusagen, sowie von Forschern, um neue Beleuchtungs- und Tageslichttechnologien zu bewerten.“²⁵

Neben der Tageslichtsimulation, auf der in dieser Arbeit der Hauptfokus liegt, kann Radiance fast jeden Bereich der visuellen Behaglichkeit abdecken. Es ist also auch möglich Ausgaben zu Blendquellen/-freiheit, Aussicht, technischer Beleuchtung, usw. zu erzeugen. Des Weiteren ist auch das Erstellen materialgetreuer Renderings zur Architekturvisualisierung ein möglicher Anwendungsfall der Software.



Abb. 3 - Beispielrendering, erstellt mit Radiance²⁶

²⁵ (RFritz/AMcneil 2019)

²⁶ („admin“ 2021)

4.2. VICUS

VICUS²⁷, ehemals SIM-VICUS, ist eine Simulationssoftware, welche die Planung energieeffizienter Gebäude und nachhaltiger Quartiere ermöglichen soll.

Der Fokus der Software liegt auf einer ganzheitlichen bauphysikalischen Betrachtung von Gebäuden. Die Grundlage dazu ist ein detailliertes 3D Modell, welches alle notwendigen Informationen (Konstruktionen/Materialien, Nutzungen, Umgebung, etc.) vereint. Dieses Modell kann sowohl innerhalb der Software neu erstellt als auch aus einer bestehenden Planung importiert werden. Für den Import eignen sich IFC-Modelle, welche direkt verwendet werden können. Alternativ ist innerhalb des Programmes eine 3D-Modellierung auf Grundlage von DXF- oder PDF-Dateien möglich. Um die Modellerstellung zu erleichtern, ist die Software mit einer großen Datenbank gängiger Materialien und deren Kennwerten ausgestattet.

Der gebräuchlichste Anwendungsfall ist die Berechnung des Jahresenergieverbrauchs und der Jahreslastkennlinie eines Gebäudes. Diese Kennzahlen sind Grundlage für die energetische Beurteilung und geben speziell im Praxisfall wichtige Informationen für beispielsweise die Dimensionierung/Abstimmung von Erzeugern und Speichern. Auch die Ermittlung von Gleichzeitigkeiten für Wärme- und Kälteverschiebung ist in diesem Rahmen möglich.

Im Weiteren ist auch eine Heiz- und Kühllastberechnung in Anlehnung an die DIN 12831 bzw. VDI 2078 möglich. Diese ist nicht nur Grundlage für eine individuelle und effiziente Planung des Heiz- & Kühlsystems, sondern auch für eine Kosten-Nutzen-Analyse des Gebäudes. Diese Betrachtungen sind entscheidend für eine nachhaltige Planung, da sie die Energieeffizienz und Ökonomie vereinen und mit dem Ziel maximaler Ersparnis in Investition und Betrieb gegeneinander abwägen.

Neben der Überprüfung gesetzlicher Mindeststandards und Betrachtungen zur Performance des Gebäudes sind auch Nachweise des Komforts möglich. Die thermische Behaglichkeit wird über die Luft-, Operativ- und Oberflächentemperaturen abgebildet. So sind Aussagen über den sommerlichen Wärmeschutz (Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2) möglich. Hinzu kommen noch Nachweise gemäß DGNB – SOC1.1.

Führt man die einzelnen Bausteine zusammen ergibt sich die Möglichkeit einer Potential- bzw. Risikoanalyse. Diese ist speziell für Umnutzungen oder speziellen Rahmenbedingungen bei etwaigen Sondergebäuden relevant. Die ganzheitliche Simulation ermöglicht es, die Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen passiver oder aktiver Art zu prüfen und gegeneinander abzuwägen. Auch Betrachtungen zur Zukunftsfähigkeit eines Gebäudes, speziell unter dem Blickpunkt Klimawandel sind abbildbar.²⁸

Zu den bisher vorhandenen Funktionen, sollen in der Zukunft noch die hier thematisierte Tageslichtsimulation sowie das Life-Cycle-Assessment hinzukommen.

²⁷ Die VICUS Software unterteilt sich in VICUS Buildings und VICUS Districts. Im Rahmen der Tageslichtsimulation ist hier stets VICUS Buildings gemeint.

²⁸ (vgl. VICUS Software GmbH)

4.3. Schnittstelle

Wie bereits unter Punkt 1 beschrieben, ist es Ziel der Arbeit eine Methodik zu entwickeln, welche die barrierefreie Zusammenarbeit der beiden Software Komponenten ermöglicht. Im Rahmen dieser Betrachtung, stellt VICUS die Benutzeroberfläche dar. Das bedeutet, dort werden alle für die Simulation notwendigen Eingaben und Einstellungen getätigt. Dazu gehört in erster Linie die Erfassung der Geometrie, welche in den meisten Fällen aus externen Programmen in Form einer IFC importiert wird. Diese wird im Weiteren mit simulationsspezifischen Parametern belegt. Diese beschreiben in der Regel die physikalischen Eigenschaften der verbauten Materialien. Im Rahmen der Tageslichtsimulation handelt es sich dabei um die optischen Eigenschaften. Weiterhin wird die Umgebung abgebildet und alle Rahmenfaktoren für die Simulation erfasst.

Anschließend werden alle Daten, die vom Nutzer über VICUS zur Verfügung gestellt wurden an Radiance weitergegeben. Die Komponente Radiance arbeitet in diesem Zusammenspiel ausschließlich im Hintergrund als Rechenkern beziehungsweise Solver. Das bedeutet, der Nutzer interagiert an keinem Punkt direkt mit den Programmen der Radiance Suite. Dieser Umstand ist insofern vorteilhaft, dass die Radiance Suite von Haus aus ohne User Interface (UI) geliefert wird. Es wären also ohnehin extra Schritte notwendig, um ein grafisches Menü für Eingaben in Radiance zu erzeugen. Durch die Kombination der beiden Softwares, wird diese Aufgabe von VICUS übernommen.

Nachdem Radiance die Inhalte aus VICUS entsprechend verarbeitet und damit Ergebnisse erzeugt hat, werden diese an VICUS zurückgegeben. Dort können sie entweder visuell weiterverarbeitet, oder in sonstiger Form aufgearbeitet und ausgegeben werden.

Dabei wird deutlich, dass eine Schnittstelle zwischen beiden Programmen zu einem Ausgleich ihrer jeweiligen Schwächen führt. Außerdem wird VICUS so weiterentwickelt, dass es sich einer ganzheitlichen Simulationssoftware, welche alle Belange der Gebäudeplanung abdeckt, nähert. Ein Tool, welches so ganzheitlich arbeitet, ist in der Praxis von hoher Bedeutsamkeit, da es nur noch einen geschulten Anwender benötigt, welcher die geforderten Betrachtungen gebündelt an einem Ort durchführen kann. So können mehrere Workflows, mit mehreren Programmen/Modellen und Bearbeitern vereint werden. Der damit verbundene Planungsaufwand gestaltet sich folglich in zeitlicher und monetärer Hinsicht deutlich effizienter.

5. Algorithmus Tageslichtsimulation

Das Ziel ist es, anhand einer, aus sonstigen bauphysikalischen Simulationen bereits vorhandenen Gebäudegeometrie, ebenfalls Aussagen zur Tageslichtversorgung treffen zu können. Dabei sollen möglichst viele Überlegungen durch einen Algorithmus übernommen werden.

In den folgenden Kapiteln werden die dazu notwendigen Prozesse beschrieben. Die dabei entstehende Dateistruktur²⁹ stellt sich wie folgt dar:

Eingabe

- *Geometry.rad* [vgl. 5.1.1, 5.1.2, 5.2.2]
 - ➔ Gebäudegeometrie, Umgebungsstrukturen, Materialeigenschaften
- *Sky.rad* [vgl. 5.2.1]
 - ➔ Himmelsdatei mit Beleuchtungsstärke und Farbdefinition
- Ordner: Punktlisten [vgl. 5.1.3]
 - ➔ Je eine Liste pro Raum, Benennung anhand Raum ID: *ID_Points.pnt*

Ausgabe [vgl. 6.2]

- *ID_Results.tsv* [vgl. 5.3.2]
 - ➔ Ergebnisliste mit Punktkoordinaten und Beleuchtungsstärken in Lux
 - ➔ Je eine Liste pro Raum, Benennung anhand Raum ID
- *ID_Slices.png* [vgl. 5.3.3]
 - ➔ Falschfarbebilder eines horizontalen Schnittes durch einen Raum
 - ➔ Je ein Bild pro Raum, Benennung anhand Raum ID
- Empfehlungsstufen [vgl. 5.4]
 - ➔ *Illuminance-OV.tsv* (Übersichtsdatei mit Empfehlungsstufen aller Räumen)
 - ➔ *Illuminance.tsv* (Flächenanteile aller Räume bezüglich Beleuchtungsstärken)
 - ➔ *Daylightfactor-OV.tsv* (Übersichtsdatei mit Empfehlungsstufen aller Räumen)
 - ➔ *Daylightfactor.tsv* (Flächenanteile aller Räume bezüglich Tageslichtquotient)
- Vorkonfigurierter Bericht [vgl. 6.2.2]
 - ➔ Textdokument mit eingebetteten Simulationsergebnissen

²⁹ Eingliederung von Eingabe- & Einstellungsmöglichkeiten siehe Kapitel 6, S. 55ff

Im Folgenden sind einige Begriffe, welche zum Verständnis der Zusammenhänge der Tageslichtsimulation notwendig sind, aufgeführt:

Beleuchtungsstärke [E_v oder E]

Englisch: *Illuminance*

Die Beleuchtungsstärke beschreibt, wie viel Licht bzw. Lichtstrom auf eine Fläche fällt, also wie hell diese (fiktive) Oberfläche beleuchtet wird. Es handelt sich um den Quotienten aus Lichtstrom [Φ] und Fläche [A]. Die verwendete Maßeinheit Lux entspricht dabei Lumen pro Quadratmeter.³⁰

Sie ist die typischerweise maßgebende Größe für Betrachtungen bezüglich des Tageslichtes im architektonischen Kontext.

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad \text{mit} \quad 1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$

Leuchtdichte [L_v oder L]

Englisch: *Luminance*

Die Leuchtdichte definiert, wie viel Lichtenergie pro Fläche und Raumwinkel von einem Punkt oder einer Oberfläche abgegeben oder reflektiert wird. Sie berechnet sich aus dem Lichtstrom [$d\Phi_v$], welcher „in einem elementaren Bündel durch den gegebenen Punkt geht und sich in dem Raumwinkel [$d\Omega$], der die gegebene Richtung enthält, ausbreitet“; der Querschnittsfläche [dA] dieses Bündels, in welcher der gegebene Punkt enthalten ist; sowie dem Winkel [ϑ] „zwischen der Normalen der Querschnittsfläche und der Richtung des Bündels.“³¹

$$L_v = \frac{d\Phi_v}{dA \cos \vartheta d\Omega} \quad \text{mit} \quad 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}} = 1 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

Bestrahlungsstärke [E_{dm}]

Englisch: *Irradiance*

Die Bestrahlungsstärke gibt die gesamte auf eine Oberfläche treffende Leistung der elektromagnetischen Energie im Verhältnis zur Flächengröße an. Im Vergleich zur Beleuchtungsstärke [E] wird hier nicht die Empfindlichkeitskurve des Auges berücksichtigt. Eine Umrechnung ist mit Hilfe der Lichtausbeute [179 lm/W] möglich.³²

$$E = \frac{P}{A} \quad \text{mit} \quad 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 179 \text{ lx}$$

Strahldichte [L]

Englisch: *Radiance*

Die Strahldichte beschreibt die Menge an Strahlungsenergie (oder Licht) pro Flächeneinheit, pro Raumwinkel und pro Wellenlängeneinheit, die von einer Lichtquelle in eine bestimmte Richtung abgestrahlt oder reflektiert wird. Einfach gesagt also, wie viel Licht/Strahlung von einer Fläche in eine bestimmte Richtung ausgesendet oder reflektiert wird.³³

$$L = \frac{dI}{dA \cdot d\cos\epsilon} \quad \text{in} \quad \frac{\text{W}}{\text{sr} \cdot \text{m}^2}$$

³⁰ (vgl. DIN EN 12665 2018, S. 11)

³¹ (DIN EN 12665 2018, S. 9)

³² (vgl. licht.de)

³³ (vgl. Spektrum Akademischer Verlag 1998)

5.1. Eingangsdaten: Raum

5.1.1. Raumgeometrie

Um die Tageslichtsituation in einem Raum zu simulieren, muss dieser zunächst geometrisch erfasst werden. Da das Gebäudemodell in VICUS bereits existiert und im Vergleich zu sonstigen gängigen BIM-Softwares oder dem IFC-Format schon stark vereinfacht ist, erfolgt eine Übergabe von VICUS an Radiance. Dabei werden einige Anpassungen in der Dateistruktur vorgenommen, die im Folgenden erläutert werden.

Radiance verwendet für die Geometrie einer Szene in der Regel rad-Dateien. Diese folgen einem klassischen Aufbau³⁴ (vgl. Abb. 4), in welchem als erstes, wenn nötig, rein optische Texturen oder Muster definiert werden. Diese sind nicht zwingend für eine Simulation notwendig und können nicht aus VICUS generiert werden. Vielmehr spielen sie eine Rolle, wenn ein realistisches Rendering generiert werden soll, da so zum Beispiel eine Holzmaserung auf die Geometrie abgebildet werden kann.

An zweiter Stelle steht das Material, welches die Oberfläche der Geometrie weiter beschreibt. Wesentliche Faktoren sind hier Farbe, Transparenz oder Beschaffenheit der Oberflächen. Eine genauere Erläuterung bzw. Aufschlüsselung zu den Materialien folgt unter Punkt 0 (S. 18).

An dritter und letzter Stelle folgt die eigentliche Geometrie. Diese kann entweder über geometrische Körper, also beispielsweise eine Kugel oder einen Quader beschrieben werden, oder sich aus vielen einzelnen Polygonen zusammensetzen. Im Falle der Tageslichtsimulation mit VICUS, wird auf die Polygon-Variante zurückgegriffen, da die VICUS Datei bereits mit Einzelpolygonen arbeitet und so weniger Anpassungen notwendig sind.



Abb. 4 - Übersicht: Inhalte Geometriedatei

³⁴ Um zu große Einzeldateien zu vermeiden ist es auch möglich die Texturen, Muster und Materialien in einer separaten mat-Datei zu speichern und diese nur mit der Geometry.rad zu verknüpfen.

Die einzelnen Polygone (dort: Surfaces) aus der VICUS Datei müssen dafür zunächst in das Radiance Format überführt werden. Beispielhaft kann ein Polygon im VICUS so beschrieben werden:

```
<Surface id="4" displayName="Boden" displayColor="#566094">
<Polygon3D offset="0 5 0" normal="-0 -0 -1" localX="0 1 0">0 0, 0 10, -5 10, -5 0</Polygon3D>
```

Nachdem eine ID, ein Anzeigename und eine Anzeigefarbe definiert werden, wird die eigentliche Geometrie beschrieben. Diese setzt sich zusammen aus dem „Offset“ vom Koordinatenursprung, welcher als Ausgangspunkt verwendet wird, einer Flächennormalen, welche die Ausrichtung der Surface und folglich die „Drehrichtung“ des Polygons definiert und einer lokalen X-Richtung, welche das lokale bzw. polygonbezogene Koordinatensystem beschreibt (vgl. Abb. 5). Darauf folgen die Eckpunkte des Polygons, beschrieben im lokalen Koordinatensystem.

In Radiance stellt sich das gleiche Polygon wie folgt dar (vgl. Abb. 5):

```
# surface name: Boden
# surface id: 4
Mat1 polygon S_4
0
0
12
0.0000 5.0000 0.0000
10.0000 5.0000 0.0000
10.0000 0.0000 0.0000
0.0000 0.0000 0.0000
```

Zunächst werden die aus VICUS importierten Definitionen, also Name und ID, angegeben. Danach folgt die Materialzuweisung (Mat1) und die Benennung des Polygons (S_4). Die darauffolgenden zwei Leerzeilen sind typisch für Radiance. Es handelt sich dabei um provisorische Platzhalter für weitere Parametrierungen. In der nächsten Zeile wird die Anzahl der Argumente angegeben. Da im Anschluss vier Punkte mit je drei Koordinaten (X, Y, Z) folgen, muss für ein einfaches Rechteck also eine „12“ angegeben werden.

Bei der Überführung der Polygonbeschreibung, ist eine Umwandlung lokaler 2D Koordinaten aus VICUS in 3D Koordinaten mit gemeinsamen Koordinatenursprung notwendig. Dies ist aufgrund der Angabe des Offsets und der lokalen X-Richtung jedoch gut umsetzbar.

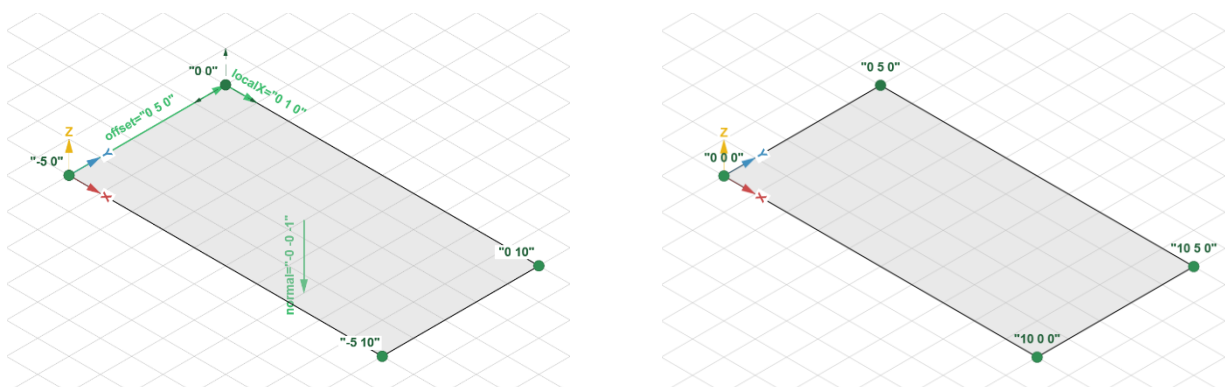


Abb. 5 - Gegenüberstellung der Polygonerfassung in VICUS & Radiance

Das bisher gezeigte Beispiel entspricht jedoch nicht der Praxis im VICUS. Häufig sind insbesondere horizontale Raumbegrenzungsflächen in mehrere Polygone zerteilt, Grund dafür sind die in den anliegenden Geschossen einbindenden Trennwände. Da diese Zerteilung für die weiteren Betrachtungen nicht zielführend ist, werden in einer Ebene liegende, zum gleichen Raum gehörende Polygone zu einem vereint.

Deutlich komplexer stellt sich die Erfassung von Wandflächen mit Fenstern dar. Grund dafür ist, dass die Polygonbeschreibung in Radiance keine „Löcher“ vorsieht. Ein Polygon muss also als Abfolge von Punkten erfasst werden. Folglich kann nicht erst das eigentliche Wandpolygon und dann die enthaltenen Fenster beschreiben werden. Vielmehr müssen alle Punkte wie „Perlen auf eine Schnur gefädelt“ und kontinuierlich abgefahren werden [vgl. Abb. 6].

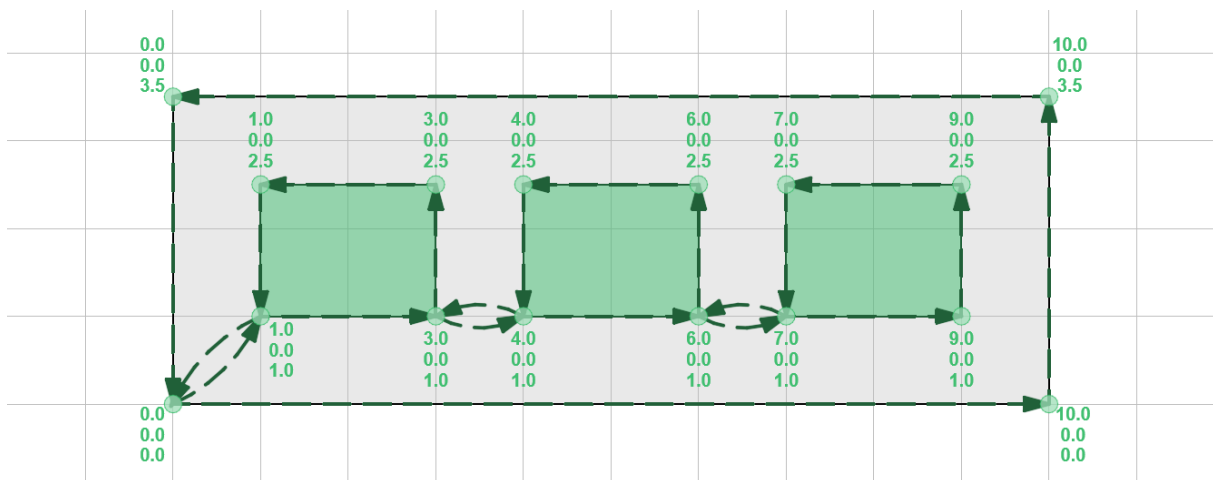


Abb. 6 - Erfassung eines Wandpolygons mit Fenstern

Um diese Polylinie als Algorithmus zu beschreiben, wird als Startpunkt stets ein Punkt auf der Außenkante des betrachteten Polygons gewählt.³⁵ Von dort werden die möglichen Verbindungen zu anderen Polygonpunkten (Fensteröffnungen) betrachtet.³⁶ Dabei wird die Verbindung auf Schnittpunkte mit anderen Polygonkanten geprüft. Ist keine Überschneidung dieser Art gegeben, wird ein Glied der Polylinie zwischen diesen Punkten erstellt. Andernfalls wird der innerhalb des aktuell betrachteten Polygons folgende Punkt zur Erstellung des Gliedes genutzt. In Abb. 6 entspricht jeweils ein Pfeil einem dieser Glieder.

Gleichzeitig ist es nicht möglich, bereits erfasste Polygone erneut zu erschließen. Das bedeutet, dass eine Pfadführung der Art A-B-A ausgeschlossen wird. Ist ein Polygon, wie beispielsweise das linke im Bild, bereits an einem Punkt erfasst, wird es für die weitere Prüfung ignoriert. Erst wenn alle Polygone vom Pfad eingeschlossen sind, kann dieser auf dem „Rückweg“ erneut auf das Polygon treffen. Dabei erfolgt jedoch nicht die Prüfungsabfolge wie zuvor beschrieben. Vielmehr wird der bisher vorhandene Pfad zurückverfolgt und um noch nicht vorhandene Punkte der unvollständigen Polygone ergänzt. Dieses Verhalten trifft zum Beispiel auf die oberen Punkte der Fensteröffnungen in Abb. 6 zu.

In Anhang 2 werden weitere dieser Pfade für geometrische Sonderfälle dokumentiert und ausgewertet.

³⁵ Die Auswahl erfolgt anhand des automatisch vergebenen Indexes der Punkte. Start ist der Index 0.

³⁶ Ausschlaggebend für die Reihenfolge der Prüfung ist die ID der Öffnungen. Dabei wird stets nach oben gezählt, also das jeweils nächste Polygon zuerst betrachtet. Gewählt wird die erste Verbindung ohne Schnittpunkte.

Erschwerend kommt hinzu, dass für eine korrekte Tageslichtsimulation der Rahmen der Fenster, welcher in der VICUS-Geometrie nicht vorhanden ist, berücksichtigt werden muss. Hier ist ähnlich wie beim Transmissionsgrad eine zusätzliche Eingabe notwendig. Da der Rahmenfaktor (F_F) als Teil des sommerlichen Wärmeschutzes bereits ein häufig verwendeter Kennwert von Fenstern ist, kann davon ausgegangen werden, dass dieser dem späteren Software-Anwender vorliegt, insofern das zu verbauende Fenster bereits gewählt wurde. Weiterhin definiert die DIN 18599-2 unter Punkt 6.4.1. folgendes: „[...] *Abminderungsfaktor für den Rahmenanteil, welcher dem Verhältnis der transparenten Fläche zur Gesamtfläche A des Bauteils entspricht; sofern keine genaueren Werte bekannt sind, wird $F_F = 0,7$ gesetzt, für Dachoberlicht- und schlanke Wintergartenkonstruktionen $F_F = 0,9$* “³⁷. Auf Basis dieser Aussage können Annahmen getroffen werden, wenn das Fenster noch unbekannt ist.

Um diesen Faktor geometrisch anwenden zu können, muss der Versatz der Fensterpolygonkanten nach innen bekannt sein.

Ausgehend von rechteckigen Fenstern, gilt:

$$A = a \cdot b$$

Mit dem Abminderungsfaktor F_F kann folgender Zusammenhang beschrieben werden:

$$A_F = F_F \cdot a \cdot b = a_F \cdot b_F$$

Wobei die neuen Kantenlängen so berechnet werden können:

$$a_F = a \cdot \sqrt{F_F} \quad b_F = b \cdot \sqrt{F_F}$$

Um den Versatz der Kanten zu berechnen, muss eine weitere Überlegung vorgenommen werden:

$$\Delta a = \frac{a_F - a}{2} \quad \Delta b = \frac{b_F - b}{2}$$

$$\Delta a = a \cdot \frac{(1 - \sqrt{F_F})}{2} \quad \Delta b = b \cdot \frac{(1 - \sqrt{F_F})}{2}$$

In Abb. 7 wird deutlich, dass bei diesem Ansatz, die Versätze der jeweils parallelen Seiten gleich groß sind. Damit ist für die Simulation eine hinreichende Näherung getroffen.

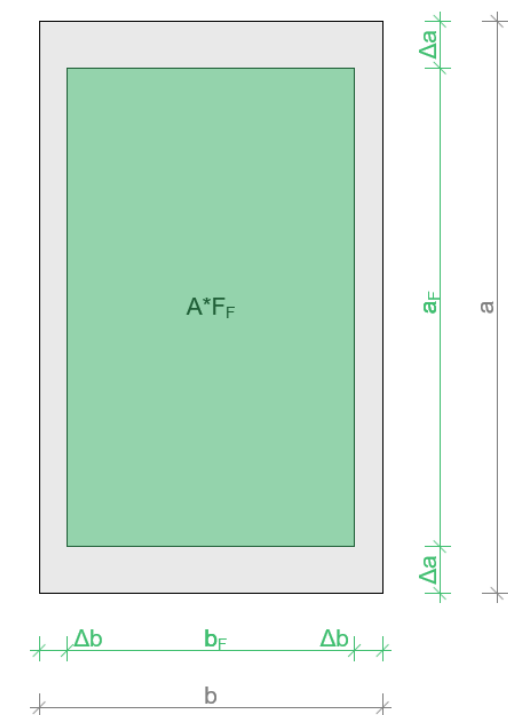


Abb. 7 - Versatz der Fensteröffnung zur Berücksichtigung des Fensterrahmens

Mit diesem Ansatz kann der außenliegende Fensterrahmen hinreichend genau beschrieben werden. Da hier einheitliche Proportionen angenommen werden, treten immer minimale Abweichungen zur Realität auf. Diese sind jedoch so klein, dass sie im Ergebnis vernachlässigt werden können.

Anders ist das bei zweiflügligen Fenstern mit Pfosten oder Stulp. Diese mittlere Verschattung ist zwar Teil des Abminderungsfaktors, würde aber auch außen aufgeschlagen werden. Je nach Ausprägung des Fensters kann dabei eine nicht zu vernachlässigende Abweichung zur Realität entstehen. Da Gebäudemodelle diese Teilung jedoch in der Regel als Teil des Fensters berücksichtigen, wird diese nicht in die VICUS Datei importiert. Dort liegt nur die Rohbauöffnung in der Wand vor, sodass dieser Fehler nicht mehr nachvollziehbar ist. Soll ein Fensterpfosten oder -stulp berücksichtigt werden, muss dieser im VICUS Modell händisch nachmodelliert werden. Der Rahmenfaktor ist entsprechend anzupassen.

³⁷ (DIN 18599-2 2018, S. 72)

Auf Basis der zuvor beschriebenen Fensteröffnungen müssen außerdem Laibungen erstellt werden. Da das VICUS Modell nur aus raumbegrenzenden Polygonflächen besteht, gibt es normalerweise keine Außenwand im eigentlichen Sinne. In der Konstruktion ist jedoch ein Schichtaufbau mit Materialstärken hinterlegt, aus welchem die Wandstärke ermittelt werden kann. Die Laibungen sind also so tief wie die Wandstärke und erhalten im Weiteren auch das gleiche Material wie die Außenwand.

Sie schließen geometrisch direkt an die Fensteröffnungen an. Konkret bedeutet das, dass an jeder Fensterkante ein neues Polygon erstellt wird, welches sich eine Kante mit der Fensteröffnung teilt [vgl. Abb. 8]. Die Fenster sind folglich stets innenliegend und sonstige Fenstereinbaupositionen werden nicht berücksichtigt. Diese Vereinfachung wird aufgrund ihres geringen Einflusses hingenommen.

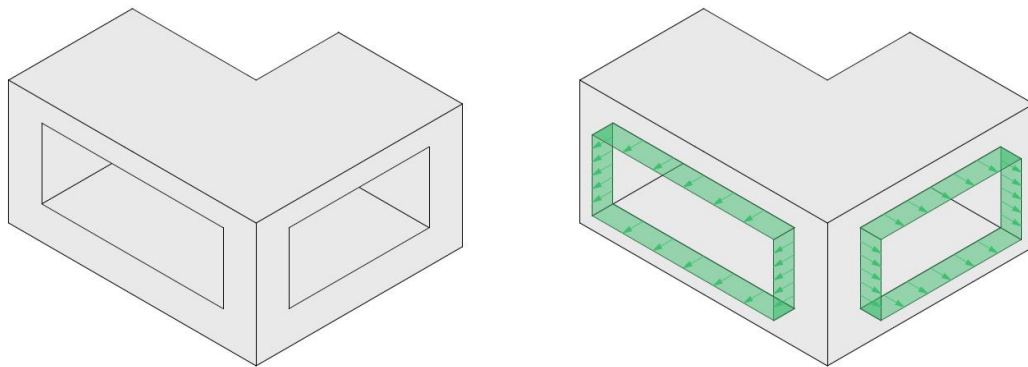


Abb. 8 - Erstellung von Laibungen

Letzter Teil der Geometrieerfassung sind die eigentlichen Fenster. Bisher wurden nur Polygone mit Öffnungen erstellt. Diese Öffnungen werden mit Polygonen gefüllt, welche später dem Material Glas, also einem transparenten Baustoff, zugeordnet werden. Die Erfassung erfolgt hier analog der sonstigen Polygone, mit dem Unterschied, dass es sich bei den Fensterpolygonen um „Subsurfaces“ statt „Surfaces“ handelt. In diesem Fall werden Offset, Flächennormale und lokale X-Richtung in dem übergeordneten „Surface“, also der Wand, definiert. Im Surface selbst, sind nur die ID, der Anzeigename und die 2D-Koordinaten hinterlegt.

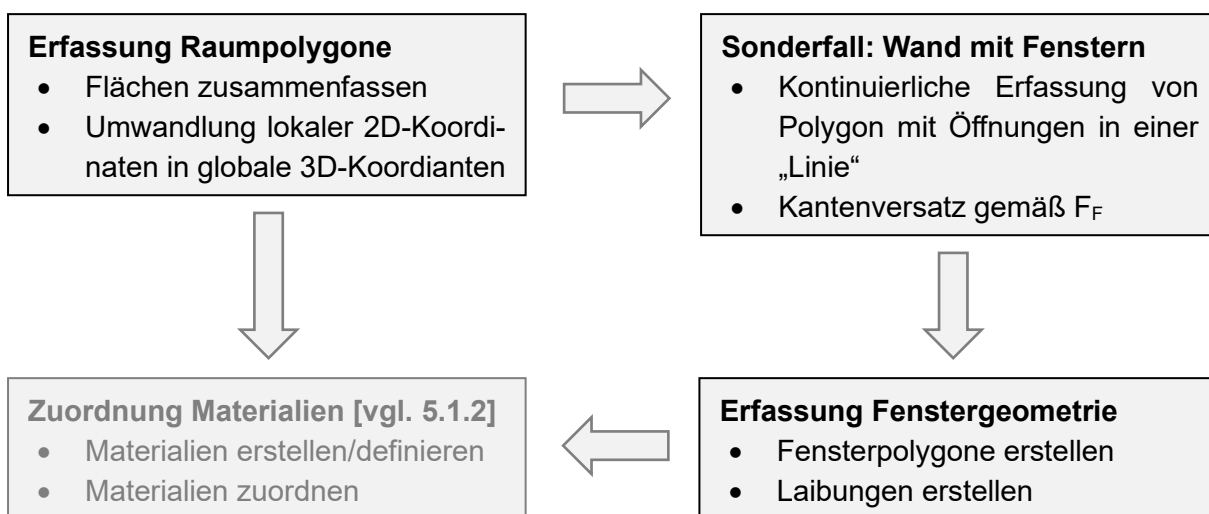


Abb. 9 - Zusammenfassung der Erstellung der Raumgeometrie

5.1.2. Materialien & Oberflächen

Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, sind die Materialdefinitionen Teil der Geometriedatei, da diese immer direkt einem Polygon zugewiesen werden. Um opake & nicht leuchtende Materialien zu definieren, gibt es im Wesentlichen zwei Ansätze:

- Vereinfachte Umwandlung der RGB Werte
- Zuweisen aus Materialtabelle (Jaloxa Colour Picker)

Für einen schnellen Überblick, bzw. vereinfachte Betrachtungen ist es ausreichend die Farbwerte grob anzunehmen. Grundlage dafür, ist dass die Polygonflächen in VICUS in etwa die Farben haben, die ihren Materialien in der Realität entsprechen. Wenn diese Voraussetzung gegeben ist, können die Materialien als „plastic“ dargestellt werden. Hierzu ist lediglich eine Umrechnung des RGB-Wertes notwendig. VICUS arbeitet mit den klassischen RGB Angaben zwischen 0 und 255, Radiance arbeitet jedoch mit prozentualen Anteilen der jeweiligen Farbe. Daraus ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 1/255.

Am Beispiel reinweißer Bauteile (RAL 9010) mit dem Hexcode #f1ece1, welche in VICUS mit den RGB Werten 226, 222, 205 hinterlegt sind, würden sich in Radiance die folgenden Werte ergeben: 0.886; 0.871; 0.804.

Da dieser Ansatz für eine genaue Tageslichtsimulation in den meisten Fällen jedoch nicht ausreichend ist, empfiehlt es sich mit dem Jaloxa Colour Picker³⁸ zu arbeiten. Dabei handelt es sich um ein Web-Tool zur Farbauswahl bzw. -definition. Zum einen ist es möglich über RGB bzw. HSL Werte eine Farbvorschau oder Umrechnung in das jeweils andere Format zu erhalten. Hinzu kommen außerdem noch die Auswahlmöglichkeiten für „plastic“ oder „metal“, sowie Slider für „Specularity“ (Spiegelglanz), „Roughness“ (Rauheit) & „Reflectance“ (Reflexion). Neben der Farbvorschau verfügt das Online Tool auch über eine Render-Funktion³⁹ die spezifisch auf Radiance ausgelegt ist und noch weitere Aufschlussmöglichkeiten zum eingestellten Material ermöglicht.

Die deutlich wichtigere Funktion ist jedoch der „Chooser“, in welchem eine Vielzahl gängiger Baumaterialien hinterlegt sind⁴⁰. Diese müssen lediglich ausgewählt und übernommen werden, um die Eigenschaften abzugreifen. Ist die Farbe bzw. das Material richtig eingestellt, gibt das Tool unter „Results“ eine Primitive aus, welche im Radiance Format geschrieben ist. Diese kann dann direkt in die Materialdatei übernommen werden. In der Praxis bietet es sich jedoch an, den „identifier“, welcher als Platzhalter immer „identifier“ heißt durch den Materialnamen zu ersetzen.⁴¹

Abb. 10 - Oberfläche des Jaloxa Colour Pickers (Results)

³⁸ (vgl. Jacobs 2012, S. 19)

³⁹ Bei etwaigen Testversuchen an mehreren Tagen zu verschiedenen Uhrzeiten musste festgestellt werden, dass die Render-Funktion „Generate Radiance Preview“ stets den Fehler „Server busy. Please try again in a few seconds.“ ausgab. Es ist also unklar, ob diese Funktion aktuell wirklich verfügbar ist.

⁴⁰ Eine Teilübersicht zu diesen erfolgt in Anhang 3

⁴¹ Neben der Primitive selbst, werden auch die normalisierten Parameter angegeben. Diese sind zu verwenden, wenn das Material auf den Himmel oder den Boden angewendet werden soll.

Einen Sonderfall stellen transparente, transluzente und leuchtende Materialien dar. Diese sind in ihrer Erfassung deutlich komplexer als opake Stoffe, welche über „plastic“ und „metal“ nahezu vollständig abgebildet werden können. Da leuchtende Materialien für die Tageslichtsimulation keine Rolle spielen, werden sie hier nicht genauer betrachtet. Transparente und transluzente Materialien sind in ihrer Erfassung sehr ähnlich. Entscheidend für die Definition dieser Materialien sind allen voran die folgenden zwei Größen:

Transmittance (Transmissionsgrad): Der Transmissionsgrad gibt den Anteil des Lichts an, der durch ein Material hindurchtritt, bezogen auf das einfallende Licht. Es ist ein dimensionsloser Wert zwischen 0 und 1 (oder als Prozentsatz), wobei 1 bedeutet, dass 100 % des Lichts durch das Material hindurchgelassen werden, und 0 bedeutet, dass kein Licht hindurchgeht. [T_n]

Transmissivity (Transmissivität): Die Transmissivität ist eine materialspezifische Eigenschaft, die beschreibt, wie durchlässig ein Material für Strahlung ist. Sie bezieht sich auf die Fähigkeit eines Materials, Strahlung über eine gewisse Dicke hindurchzulassen, und hängt sowohl von der Materialstärke als auch den optischen Eigenschaften des Materials ab. [t_n]

Der Zusammenhang zwischen beiden, lässt sich vereinfacht wie folgt beschreiben:

$$t_n = 1,0895 \times T_n$$

Diese Vereinfachung beruht auf dem folgenden Zusammenhang:⁴²

$$t_n = \frac{\sqrt{(0.8402528435) + 0.0072522239T_n^2} - 0.9166530661}{0.0036261119T_n}$$

Da die Ergebnisse beider Ansätze nahezu identisch sind und keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Tageslichtsimulation haben, wird bei Bedarf die vereinfachte Umrechnung verwendet, da die Radiance Materialien stets die Transmissivität abfragen.

Da allerdings auch der Transmissionsgrad, aufgrund seltener Angabe seitens der Fensterhersteller, in der Praxis nicht immer vorliegt, ist auch hier eine Vereinfachung zur Ermittlung notwendig. Auf Basis des Gesamtenergiedurchlassgrades (g-Wert)⁴³ kann unter Umständen eine vereinfachte Annahme zum Transmissionsgrad getroffen werden. Wichtig ist dabei jedoch zu berücksichtigen, dass es sich nur um einen Schätzwert handelt und die direkte Angabe eines Transmissionsgrades immer zum genaueren Ergebnis führt. Das Verhältnis $T_n:g$ kann mit 1,3:1 beschrieben werden.⁴⁴

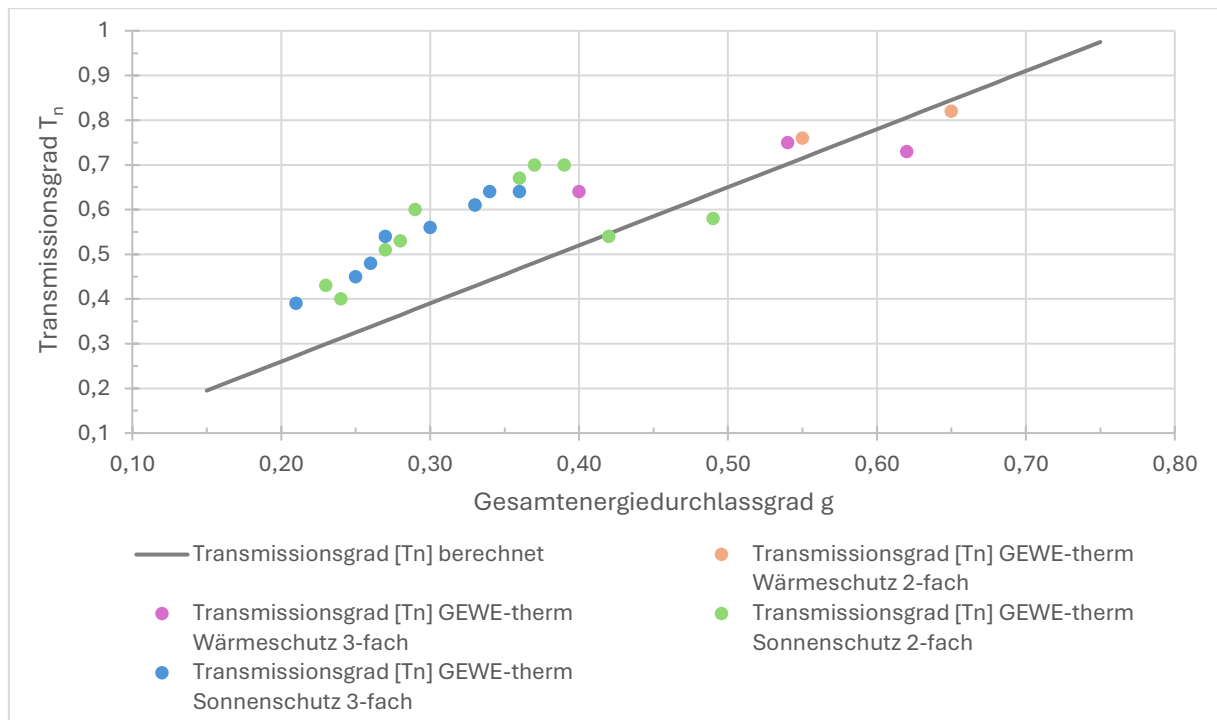
Auftretende Abweichungen sind von Verglasungsart, Glasdicke, Scheibenzahl und eventuell vorhandenen Beschichtungen, o.ä. abhängig. In Abb. 11 wird der vereinfachte Zusammenhang mit ausgewählten Herstellerangaben⁴⁵ verglichen. Dabei wird deutlich, dass die Herstellerwerte (farbige Punkte) eine Streuung um die berechneten Werte (graue Linie) aufweisen. Dieses Ergebnis, ist aufgrund des verwendeten Näherungswertes zu erwarten und würde für andere vergleichbare Produkte ähnlich ausfallen und nur in der Verteilung abweichen. Auffällig ist weiterhin die Tendenz, dass die realen Bauprodukte einen höheren Transmissionsgrad haben, als die Berechnung voraussagt. Dieser Effekt wirkt sich in der Tageslichtsimulation insofern positiv aus, dass in der Realität tendenziell höhere Beleuchtungsstärken erreicht werden als in der Simulation. Es ist folglich davon auszugehen, dass der Näherungswert eine ausreichende Genauigkeit für die Anwendung bei unbekannter Datenlage aufweist.

⁴² (Jacobs 2014, S. 20)

⁴³ Dieser muss in VICUS für bauphysikalische Bewertungen angegeben werden, sodass er als vorhanden angenommen werden kann.

⁴⁴ (vgl. Doris Haas-Arnd/Fred Ranft/Energieagentur NRW 2006)

⁴⁵ (vgl. Scholl Glas 2021)


 Abb. 11 - Diagramm: Zusammenhang Gesamtenergiedurchlassgrad g & Transmissionsgrad T_n

Neben den zuvor beschriebenen Abweichungen durch fehlende Produktinformationen gibt es weitere Fehlerquellen, die für Abweichungen des Simulationsergebnisses von Messungen vor Ort verantwortlich sind.

Neben dem saisonal unterschiedlichen Verschattungsgrad, durch beispielsweise Baumkronen ist der Hauptgrund für Abweichungen dieser Art der Verschmutzungsgrad der Fenster. Hierbei ist es wichtig zu differenzieren, ob die Verschmutzung auf der Innen- oder Außenseite des Fensters auftritt. Aus der DGUV-Information 215-211 zum Thema Tageslicht am Arbeitsplatz lassen sich dabei Abminderungsfaktoren für gewisse Verschmutzungskombinationen der Innen- bzw. Außenseite des Fensters ableiten.

Verschmutzungsgrad	Innen: gering	Innen: Mittel	Innen: Stark
Außen: Gering	10%	20%	30%
Außen: Stark	30%	40%	50%

 Tab. 1 - Abminderung des Transmissionsgrades für Verschmutzungskombinationen der Fensterflächen⁴⁶

Da die Abminderung bis 50 % reicht, wird deutlich, welcher großer Einfluss auf die tatsächliche Tageslichtversorgung besteht. Die Verschmutzung ist nach DIN EN 17037 in Form einer Annahme zu berücksichtigen.⁴⁷ Diese ist vom Nutzer zu treffen, wobei die obenstehenden Werte als Grundlage für die Schätzung verwendet werden können. Die Eingabe erfolgt im Zuge der Angabe des Transmissionsgrades des Fensters, wobei dieser Wert direkt anzupassen ist. Für den Verschmutzungsgrad ist dabei keine eigene Eingabeaufforderung vorgesehen [vgl. Abb. 36, S. 56].

⁴⁶ (vgl. BG Bau 2022)

⁴⁷ (vgl. DIN EN 17037 2022, S. 23 Anhang B.3.1)

5.1.3. Punktlisten

Einige Programme aus dem Radiance Katalog benötigen eine zusätzliche Input-Datei. Dabei handelt es sich um die „InputPoints.pnt“. In dieser werden Punkte und ein ihnen zugeordneter Richtungsvektor im Format „ $P_x P_y P_z V_x V_y V_z$ “⁴⁸ beschrieben.

Sie sind notwendig, da diese Programme einzelne Strahlen verfolgen [vgl. 5.3.2, S.41]. Konkret definiert die Punktliste also an welcher Stelle (Punktkoordinaten) ein Strahl abgefragt wird. Der Richtungsvektor definiert dabei aus welcher Richtung Informationen generiert werden. Zeigt der Vektor zu einem Punkt A also beispielsweise nach oben (0 0 1), wird an Punkt A eine Ausgabe für von oben einfallendes Licht generiert.

Über diese Definition ist es möglich auf fiktiven Ebenen Werte abzugreifen, ohne zusätzliche Polygone zu erstellen, welche die Simulation verfälschen würden. Anwendung findet dieser Zusammenhang bei der Ermittlung der Beleuchtungsstärke auf der Arbeits- bzw. Bezugsebene. Diese Beleuchtungsstärke ist jene, welche zur Bewertung der Tageslichtversorgung nach DIN EN 17037 herangezogen wird. [vgl. 5.4.1, S.50]

Die Punktlisten für einen Raum entsprechen einem gleichmäßigen Mesh (Gitter), welches sich über die Bezugsebene erstreckt. Die DIN EN 17037 gibt dabei grundlegende Parameter vor, welche berücksichtigt werden müssen:⁴⁹

- Bezugsebene liegt auf einer Höhe von 0,85 m im Raum
- Bezugsebene hat 0,5 m Abstand zu den Wänden
- Gitterzellen sind annähernd quadratisch mit $p/q = 0,5 \dots 2$
- Maximale Gitterzellengröße: $P = 0,5 \times 5^{\log(d)}$
 - $d \triangleq$ längere Raumseite [Ausnahme: Seitenverhältnis > 2 , dann $d \triangleq$ kurze Seite]

Um auch in größeren Räumen ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten, kann zusätzlich zu den Angaben der Norm ein individueller Richtwert für die Gitterzellengröße gewählt werden. So wird gewährleistet, dass auch in Räumen mit größeren Dimensionen, wie beispielsweise Hallen oder Sälen eine kleinteilige Auswertung möglich ist.

Um eine Punktliste zu erstellen, muss also zuerst das Polygon definiert werden, welches die Bezugsebene darstellt. Als Grundlage dazu dient die Bodenfläche eines Raumes. Da diese im VICUS aus mehreren einzelnen Polygonen bestehen kann, müssen diese zunächst vereinigt werden [vgl. Abb. 12. – Schritt 1]. Dieser Schritt ist bereits Teil der Erfassung der Raumgeometrie [vgl. 5.1.1 S. 14].

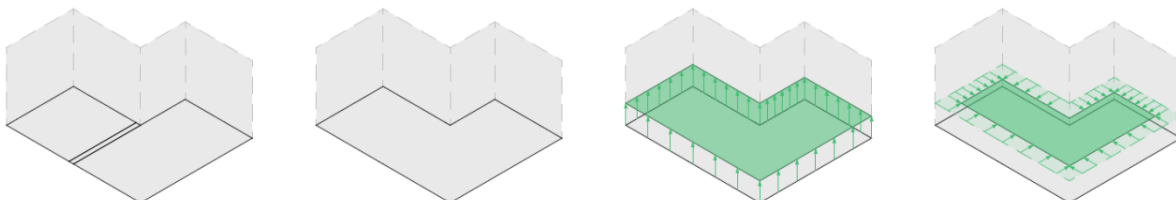


Abb. 12 - Definition der Bezugsebene in 3 Schritten

⁴⁸ P für Punktkoordinaten, V für Vektorkoordinaten

⁴⁹ (vgl. DIN EN 17037 2022, S. 22)

Im nächsten Schritt wird eine fiktive Kopie der Bodenfläche erstellt und ihre Z-Koordinate um 0,85 m erhöht. Grundlage hierfür ist die Definition gemäß DIN EN 17037, welche die Höhe der Bezugsebene mit 0,85 m festlegt.

Im letzten Schritt werden die Kanten der Bezugsebene um 0,5 m nach innen versetzt.⁵⁰ Das dabei entstandene Polygon definiert die zu simulierende Fläche, welche die Grundlage für die zu erstellende Punktliste bildet.

Für die meisten Räume kann dieser Ansatz problemlos angewendet werden, jedoch gibt es einige Ausnahmen.

Den ersten Sonderfall bilden Räume mit abgestufter Grundfläche. Diese kann nicht zu einem zusammenhängenden Polygon vereinigt werden. Stattdessen entstehen mehrere Teilflächen, welche folglich mehrere Bezugsebenen erzeugen [vgl. Abb. 13]. Diese Bezugsebenen lassen sich zwar im Einzelnen so weiterverarbeiten wie eine Einzelne für normale Räume, jedoch muss berücksichtigt werden, dass an den Stößen der Bezugsflächen zueinander kein Kantenversatz notwendig ist, da sonst Lücken in der zu betrachtenden Gesamtfläche entstehen.

Im Vergleich dazu sind geneigte Grundflächen kein Problem. Diese erzeugen parallele, also ebenfalls geneigte, Bezugsflächen, welche genauso wie gerade Flächen weiterverarbeitet werden können.

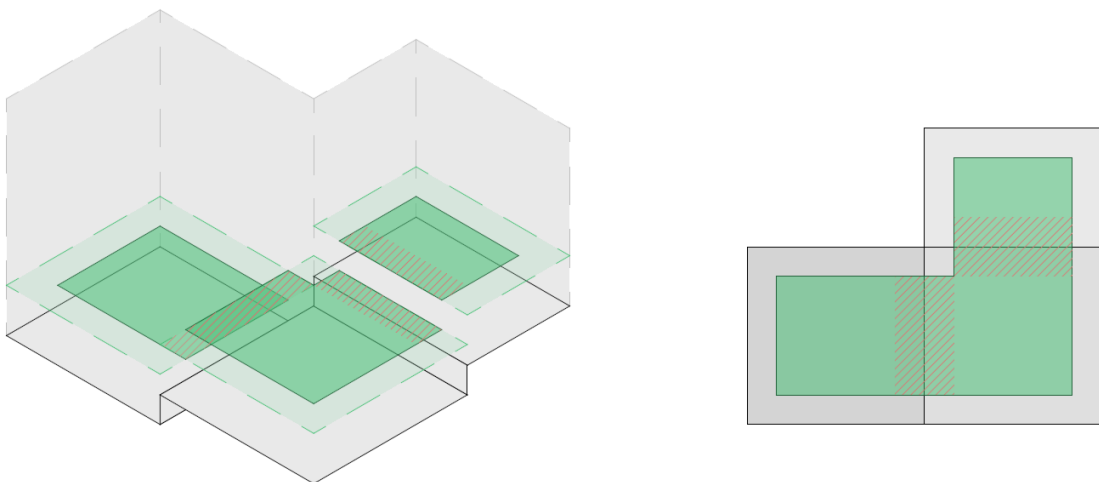


Abb. 13 - Bezugsflächen in Räumen mit abgestufter Grundfläche

Einen zweiten Sonderfall bilden Räume mit sehr schmalen Abschnitten, welche konkret eine Breite von 1 m erreichen oder unterschreiten. Hier kann es beim Kantenversatz zu fehlerhaften Ausgaben, oder einer Linienbildung kommen [vgl. Abb. 14]. Darum ist es notwendig, für den Kantenversatz einen Straight Skeleton Algorithmus zu verwenden. Dieser stellt sicher, dass an solchen Stellen kein Informationsverlust stattfindet, indem er schrittweise die Polygonkanten nach innen versetzt bis diese sich treffen und damit eine Mittellinie generieren. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit der Firstlinie auf einem Dach, welche der Mittellinie aller geneigten Flächen entspricht.

⁵⁰ Wandabstand von 0,5 m nach DIN 17037

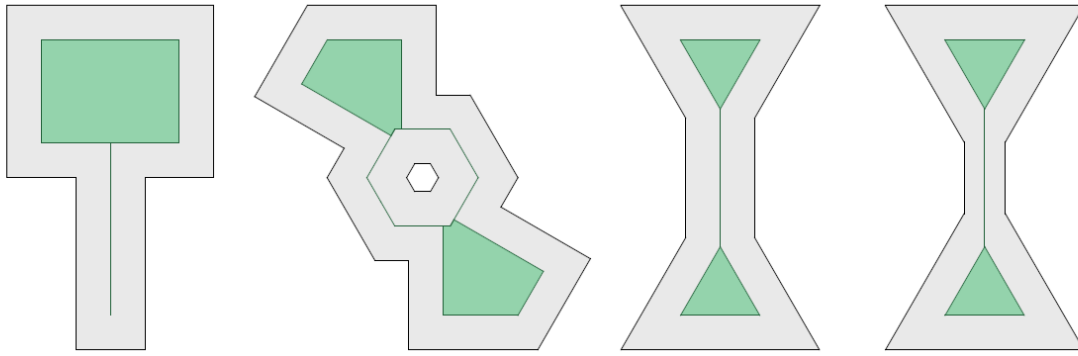


Abb. 14 - Kantenversatz der Bezugsfläche mit Straight Skeleton

Auf Basis der Bezugsebene muss im nächsten Schritt ein Gitter bzw. Mesh erstellt werden. Für diesen Prozess gibt es viele Algorithmen, welche als Grundlage in Frage kommen:

- Uniforme Rasterung (Grid Subdivision)
- Delaunay-Triangulation
- Quadtree-Dekomposition
- Voronoi-Diagramm
- Hexagonale Gitterung mit Quads als Annäherung

Da für die gewählte Anwendung annähernd quadratische und regelmäßige Gitterzellen notwendig sind, und nur in sehr seltenen Ausnahmefällen organische Formen⁵¹ abgebildet werden müssen, stellt sich eine uniforme Rasterung als beste Lösung heraus. Sie erfüllt alle Anforderungen an das Mesh und ist gleichzeitig vergleichsweise einfach zu implementieren.

Bevor die Rasterung jedoch durchgeführt werden kann, müssen die Zellgrößen definiert werden. Grundlage dafür sind die maximalen Abmessungen der Bezugsfläche. Da nicht gewährleistet werden kann, dass ein Raum rechteckig ist, wird zur Hilfe eine „Boundary Box“ verwendet, welche die Fläche in einem Rechteck einfasst. Einige Beispiele dazu folgen in Abb. 15.

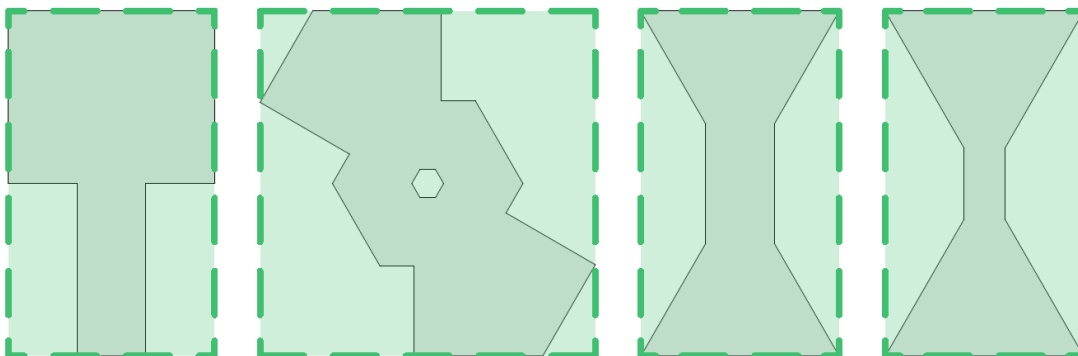


Abb. 15 - Boundary Boxen für unregelmäßige Raumformen

⁵¹ Da im speziellen Innenräume abgebildet werden, wird davon ausgegangen, dass diese gemäß der Baupraxis zu Großteilen eine polygonal abbildbare Form aufweisen. Sollten jedoch organische Sonderfälle abgebildet werden müssen, sind diese auf Polygone zu vereinfachen.

Aus dieser Boundary Box ergeben sich die maximalen Abmessungen der Bezugsfläche. Im nächsten Schritt müssen die DIN-Vorgaben mit der vom Benutzer definierten Mindestgenauigkeit verglichen werden. Dieser Prozess stellt sich wie in Abb. 16 dar.

Das Resultat sind auf die Bezugsfläche angepasste Gittergrößen. Wichtig ist dabei zu berücksichtigen, dass P bzw. das festgelegte Maximalmaß nur Richtwerte sind und in Abhängigkeit der Raumgröße angepasst werden. Sie entsprechen also nicht den tatsächlichen Zellabmessungen P_x/P_y . Um zu vermeiden, dass ungewollte Ungenauigkeiten entstehen, muss das Ergebnis „ n_{Punkte} “ stets aufgerundet werden.

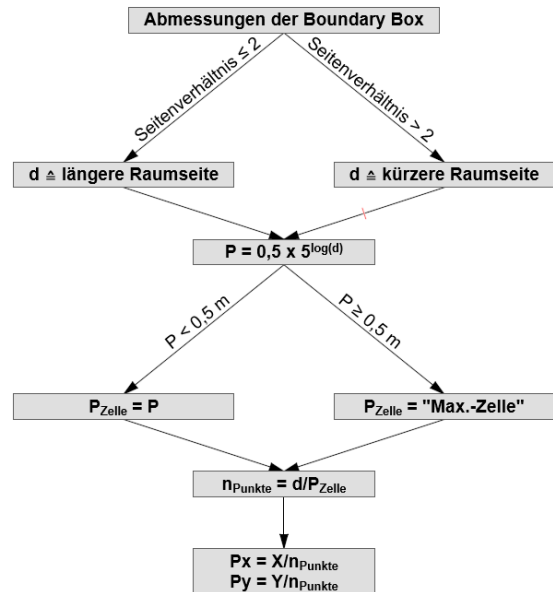


Abb. 16 - Flowchart: Definition Zellgröße (Punktliste)

Auf Basis der definierten Zellgrößen in X- (P_x) & Y-Richtung (P_y) des lokalen Koordinatensystems⁵² kann unter Zuhilfenahme des Algorithmus für die uniforme Rasterung ein Mesh erstellt werden, welches sich auf die gesamte Boundary Box bezieht. Nimmt die Bezugsfläche also die Form eines unregelmäßigen Polygons an, werden auch Punkte außerhalb der Bezugsfläche generiert. Da diese keine sinnvollen Ausgaben erzeugen würden und weiterhin nicht notwendig für die Simulation des Raumes sind, müssen sie aussortiert werden. Das erfolgt mit einem sogenannten „Point-in-Polygon“-Algorithmus⁵³. Dieser prüft, ob ein Punkt innerhalb des gewählten Polygons (hier der Bezugsfläche) liegt.

Für die verbleibenden Punkte innerhalb der Bezugsfläche muss das Ausgabeformat so gewählt werden, dass es für Radiance verwendet werden kann. Wie zuvor beschreiben, werden also erst die Punktkoordinaten (X Y Z) aus dem Algorithmus aufgeführt & dann der Vektor⁵⁴ ergänzt. Die Punkt-Vektor-Paare selbst, sind dabei listenartig, zeilenweise untereinander geschrieben. Die Liste könnte also wie folgt beginnen:

```

-1.99 7.99 0.85 0 0 1
-1.97 7.99 0.85 0 0 1
-1.95 7.99 0.85 0 0 1
-1.93 7.99 0.85 0 0 1
...
    
```

⁵² Das lokale Koordinatensystem bezieht sich auf die Boundary Box und wird von dem bezugsflächen-Polygon übernommen.

⁵³ Ein Beispiel ist der Ray-Casting-Algorithmus. Dieser überprüft, ob ein Punkt innerhalb eines Polygons liegt, indem er einen Strahl von diesem Punkt in eine beliebige Richtung zieht und zählt, wie oft der Strahl die Polygonkanten schneidet. Wenn der Strahl eine ungerade Anzahl von Kanten schneidet, liegt der Punkt innerhalb des Polygons; bei einer geraden Anzahl liegt er außerhalb.

⁵⁴ Da in der Tageslichtsimulation immer das Licht oberhalb der Bezugsebene relevant ist, kann der Vektor einheitlich als 0 0 1, also nach oben zeigend, definiert werden. In der Praxis wird damit beispielsweise die Beleuchtungsstärke oberhalb eines Schreibtisches abgefragt.

5.2. Eingangsdaten: Umgebung

Neben der bisher erfassten Raumgeometrie, welche sich direkt auf das Gebäude bezieht, sind noch weitere Informationen notwendig, um eine korrekte Tageslichtsimulation durchzuführen. Dazu zählen Rahmenbedingungen wie Helligkeit, Standort, Vorhandensein von direkter Sonne, etc. [vgl. 5.2.1], aber auch weitere geometrische Einflüsse, wie die Umgebungsver-schattung [vgl. 5.2.2].

5.2.1. Himmel

Die Himmelsdatei ist ebenfalls eine rad-Datei. In ihr werden wesentliche, zur Simulation notwendige Rahmenbedingungen, beschrieben. Inhaltliche Grundlage ist die DIN EN 17037. Sie definiert in Tabelle A.3 den Median der äußeren diffusen Beleuchtungsstärke ($E_{v,d,med}$) für verschiedene Nationen. Für Deutschland (Berlin, $\varphi = 52,47^\circ$) beträgt dieser beispielsweise 13.900 lx. Über diesen Wert definiert sich im Weiteren auch der Himmel, welcher als allgemeine Grundlage zur Tageslichtsimulation dient.

Dabei muss allerdings unterschieden werden, ob ein allgemeiner Raum simuliert wird, oder ein Raum, welcher ausschließlich über horizontale Öffnungen mit lichtstreuenden Verglasungen⁵⁵ verfügt. In diesem Falle ist statt der diffusen Beleuchtungsstärke (13.900 lx), die äußere globale Beleuchtungsstärke ($E_{v,g,med}$) anzusetzen. Sie wird in Tabelle A.4 der gleichen Norm mit 17.100 lx festgelegt.

Außerdem wird beschrieben, dass es sich immer um einen bewölkten Himmel⁵⁶ handeln muss. Dieser wird in ISO 15469:2004, als Typ 1 oder Typ 16 genauer definiert. Folglich ist der Einfluss der Raumausrichtung in verschiedene Himmelsrichtungen kaum vorhanden.⁵⁷

In ISO 15469:2004 werden 15 Himmelstypen definiert. Dafür werden die Gradation, also der Helligkeitsgradient zwischen Horizont und Zenit, und die Indicatrix, also die Winkelabhängigkeit der Luminanz relativ zur Sonne, in jeweils sechs Untergruppen beschrieben und kombiniert [vgl. Anhang 4]. Hinzu kommt Typ 16, ein bewölkter Himmel, welcher aus der Vorgängerversion der Norm übernommen wurde. Dieser ist nicht den Gradations- oder Indicatrixgruppen zuzuordnen. Er kann auch als Grundlage für die Tageslichtsimulation herangezogen werden.

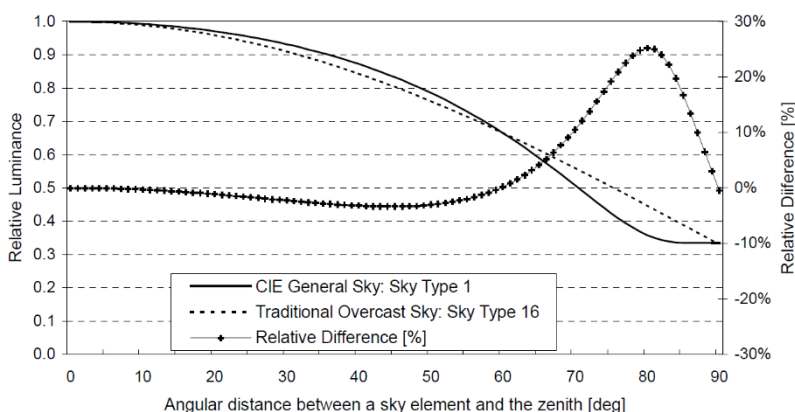


Abb. 17 - Diagramm zur Unterscheidung von Typ 1 und Typ 16⁵⁸

⁵⁵ „Eine lichtstreuende Verglasung verteilt das transmittierte Licht nahezu ungeachtet der Winkelverteilung des einfallenden Lichts gleichmäßig. Das Verhältnis zwischen der inneren und äußeren Beleuchtungsstärke bleibt ungeachtet der Sonnen- und Himmelsbedingungen relativ konstant.“ [DIN EN 17037]

⁵⁶ Dies bedeutet, dass keine direkte Sonnenstrahlung vorhanden ist, da die Sonne vollständig blockiert wird.

⁵⁷ (vgl. DIN EN 17037 2022, S. 23)

⁵⁸ (ISO 15469, S. 6)

Aus Abb. 17 geht hervor, dass sich Typ 1 und Typ 16 in ihrer Helligkeitsverteilung vor allem im Bereich kurz über dem Horizont unterscheiden. Gut sichtbar wird dies, bei Betrachtung der prozentualen relativen Differenz zwischen beiden Typen. Diese liegt bis zu einem Winkel von 60 ° bei etwa 0 %. Im Anschluss steigt sie im Maximum über 25 % bei 80 ° Neigung gegenüber dem Zenith, was fast dem Horizont (90 °) entspricht. Am Horizont selbst, ist die Abweichung allerdings wieder auf 0 % gesunken.

Um eine Himmelsdatei zu erstellen, wird das Radiance-Programm gensky benötigt. Dieses erzeugt eine Radiance-Szenenbeschreibung (rad-Datei), welche auf dem CIE-Standard⁵⁹ für Himmelsverteilungen basiert und sich entsprechend dem angegebenen Datum und der Uhrzeit anpasst. Dabei ist auf eine korrekte Angabe der Zeitzone zu achten [vgl. Abb. 18 / Tab. 2]. Die Uhrzeit selbst, wird im Format „hh:mm“ angegeben, wobei direkt darauf die Zeitzone ohne Leerzeichen folgen muss.

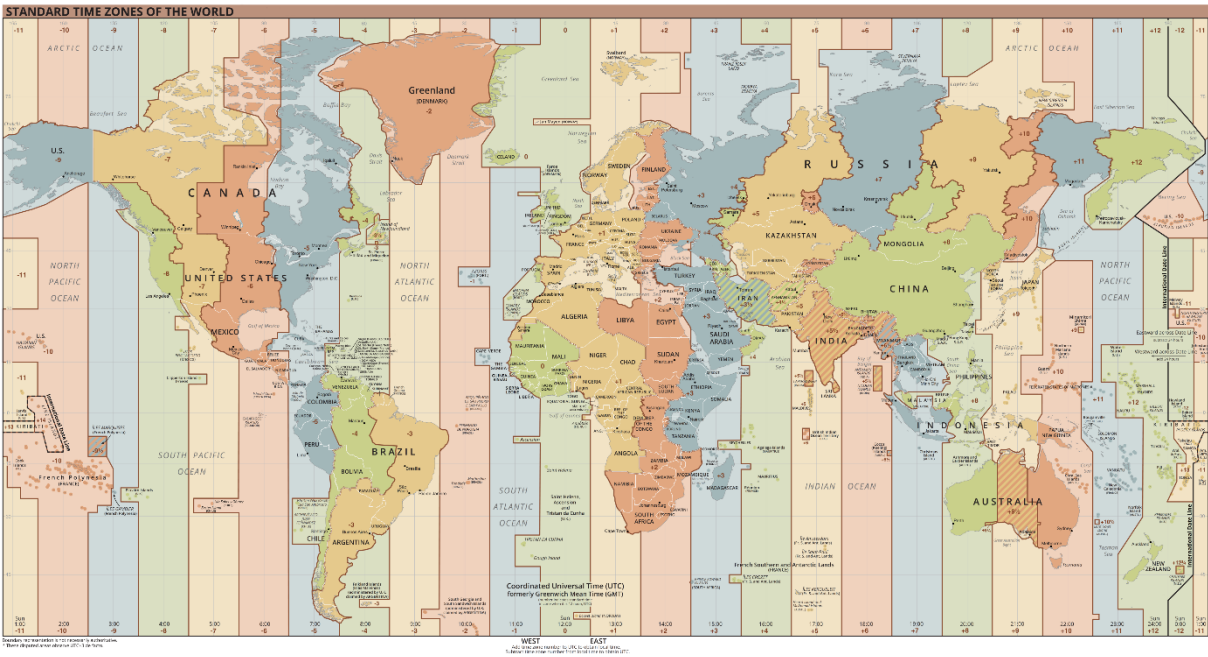


Abb. 18 - Weltkarte Zeitzonen⁶⁰

„Standard Time“ (Winterzeit)													
YST	PST	MST	CST	EST	GMT	CET	EET	AST	GST	IST	JST	NZST	
9	8	7	6	5	0	-1	-2	-3	-4	-5,5	-9	-12	
„Daylight Savings Time“ (Sommerzeit)													
YDT	PDT	MDT	CDT	EDT	BST	CEST	EEST	ADT	GDT	IDT	JDT	NZDT	
8	7	6	5	4	-1	-2	-3	-4	-5	-6,5	-10	-13	

Tab. 2 - Übersicht der Zeitzonen für Radiance (gensky) [vgl. Anhang 5]

⁵⁹ Der CIE-Standard umfasst drei Himmelstypen: Clear Day, Intermediate & Overcast. Es handelt sich also nicht um die 15 Typen aus ISO 15469, sondern um den vorherigen Standard, aus welchem Typ 16 übernommen wurde.

⁶⁰ (vgl. U.S. Central Intelligence Agency (CIA) 2024)

Da für die Tageslichtsimulation jedoch ein bewölkter Himmel ohne direkte Sonne benötigt wird, erfüllen das Datum und die Uhrzeit lediglich eine Platzhalter Funktion. Der eigentliche Himmel wird zum einen über den Parameter „-c“ definiert, welcher einen CIE-Standard Overcast Sky (entspricht Himmelstyp 16) erzeugt. Zum anderen kann über „-B“ die diffuse horizontale Bestrahlungsstärke direkt angegeben werden.⁶¹ Die DIN EN 17037 gibt Werte für die diffuse Beleuchtungsstärke vor. Diese sind über die Lichtausbeute (179 lm/W) in die benötigte Bestrahlungsstärke umzurechnen.⁶² Es ergibt sich folgendes:

$$R_{horiz} = \frac{E_{v,d,med}}{179 \frac{lm}{W}} = \frac{13.900 \frac{lm}{m^2}}{179 \frac{lm}{W}} = 77,6536 \frac{W}{m^2} \quad R_{horiz} = \frac{E_{v,g,med}}{179 \frac{lm}{W}} = \frac{17.100 \frac{lm}{m^2}}{179 \frac{lm}{W}} = 95,5307 \frac{W}{m^2}$$

Mit diesen Werten als Grundlage kann gensky die erste Hälfte der Himmelsdatei generieren:

Eingabe	gensky mm dd hh:mmCET -c -B 77.6536 > Sky_13900.rad [„mm dd hh:mmCET“ muss durch Datum und Uhrzeit ersetzt werden, es ist jedoch egal welches]	gensky mm dd hh:mmCET -c -B 95.5307 > Sky_17100rad [„mm dd hh:mmCET“ muss durch Datum und Uhrzeit ersetzt werden, es ist jedoch egal welches]
	# gensky mm dd hh:mmCET -c -B 77.6536 # Local solar time: 2.77 # Solar altitude and azimuth: -19.0 -139.3 # Ground ambient level: 24.7	# gensky mm dd hh:mmCET -c -B 95.5307 # Local solar time: 2.71 # Solar altitude and azimuth: -51.4 -103.6 # Ground ambient level: 30.4
Ausgabe	void brightfunc skyfunc 2 skybr skybright.cal 0 3 2 3.178e+01 4.944e+00	void brightfunc skyfunc 2 skybr skybright.cal 0 3 2 3.910e+01 6.082e+00

Tab. 3 - Ein- & Ausgabe von gensky

Damit ist der Himmel jedoch nicht vollständig beschrieben. Es müssen noch Hemisphären ergänzt werden, welche das Himmelsgewölbe darstellen. Dabei handelt es sich um zwei unendlich weit entfernte „source“-Objekte, in Form von Himmel & Boden. Sie definieren sich geometrisch über eine Richtung und einen Winkel, statt über absolute Koordinaten. Für die Halbkugeln ist jeweils ein Winkel von 180 ° anzusetzen. Nur die Ausrichtung unterscheidet zwischen Himmel & Boden.

Als Material wird „glow“ verwendet, da es sich um indirekte Lichtquellen handelt.⁶³ Es wird zusätzlich dem Modifier „skyfunc“ zugewiesen, welcher zuvor über gensky generiert wurde. Für beide Hemisphären können nun unabhängig die Materialparameter gewählt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die gewählten RGB-Werte folgende Gleichung zutrifft:⁶⁴

$$1,0 = 0,265R + 0,670G + 0,065B$$

⁶¹ (vgl. Ward 1998)

⁶² (Jacobs 2012, S. 21/22)

⁶³ In direkten Berechnungen werden nur direkte Lichtquellen („light“, „spotlight“, „illum“) berücksichtigt. Für die Tageslichtsimulation ist „glow“ jedoch ausreichend.

⁶⁴ (Jacobs 2012, S. 22, Eqn. 3)

Insgesamt sehen die beiden Himmelsoptionen, bei Verzicht auf die Header-Zeilen, wie folgt aus:

	Himmel mit 13.900 lx	Himmel mit 17.100 lx
generiert	<pre>void brightfunc skyfunc 2 skybr skybright.cal 0 3 2 3.178e+01 4.944e+00</pre>	<pre>void brightfunc skyfunc 2 skybr skybright.cal 0 3 2 3.910e+01 6.082e+00</pre>
Händisch hinzugefügt	<pre>skyfunc glow skyglow 0 0 4 .85 1.04 1.2 0 skyglow source sky 0 0 4 0 0 1 180 skyfunc glow groundglow 0 0 4 .8 1.1 .8 0 groundglow source ground 0 0 4 0 0 -1 180</pre>	<pre>skyfunc glow skyglow 0 0 4 .85 1.04 1.2 0 skyglow source sky 0 0 4 0 0 1 180 skyfunc glow groundglow 0 0 4 .8 1.1 .8 0 groundglow source ground 0 0 4 0 0 -1 180</pre>

Tab. 4 - Inhalte der Himmelsdateien Sky.rad mit 13.900 lx & 17.100 lx⁶⁵

Um die vergebene Beleuchtungsstärke zu prüfen, werden mit der Methode aus Kapitel 5.3.2 Messwerte innerhalb eines fiktiven Würfels mit einer Kantenlänge von 100 m genommen. Dabei existiert in der betrachteten Szene keine Geometrie. Sie besteht also ausschließlich aus dem Himmel.

In Abb. 19 sind diese freischwebenden Messpunkte dargestellt. Ihre Farbe spiegelt dabei wider, wie groß die Differenz zu den definierten 13.900 lx ist. Der maximale Unterschied⁶⁶ liegt bei 27,44 lx (ca. 0,2%). Damit kann eine hinreichend gleichmäßige Ausleuchtung des Himmels mit den in Tab. 4 beschriebenen Parametern beobachtet werden.

Eine Logik hinter den Abweichungen lässt sich jedoch nicht erkennen. Es besteht beispielsweise kein Zusammenhang zwischen Differenz und Nähe zum Koordinatenursprung. Die Position des zu simulierenden Gebäudes innerhalb der Himmels- und Bodensphäre ist folglich nicht relevant.

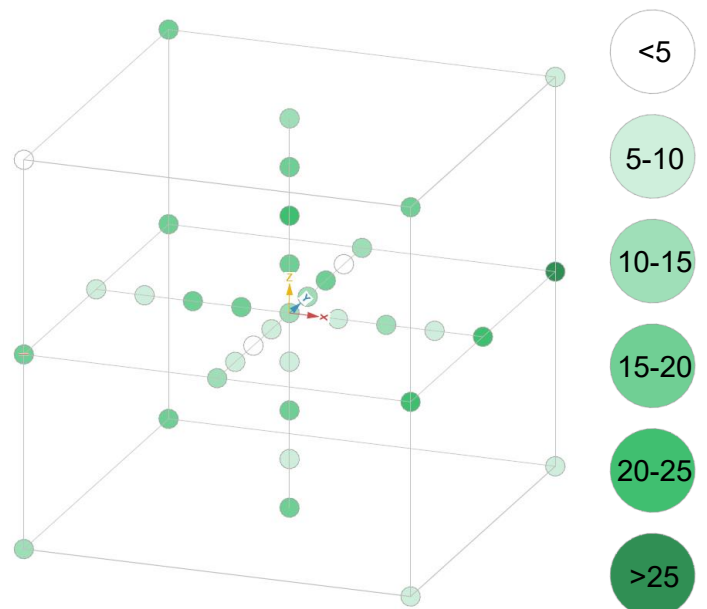


Abb. 19 - Messpunkte Himmelsvalidierung & Abweichung in Lux

⁶⁵ Händisch ergänzter Teil: (Jacobs 2012, S. 51/52)

⁶⁶ Alle weiteren Messergebnisse inkl. Koordinaten sind Anhang 6 zu entnehmen

5.2.2. Verschattung

Auf eine Tageslichtöffnungen können eine Vielzahl von Faktoren wirken, welche den Lichteinfall reduzieren. Um ein möglichst realistisches Ergebnis zu erzielen, müssen diese in der Tageslichtsimulation erfasst und berücksichtigt werden. Konkret wird nach folgenden Kategorien unterschieden:

- Sonnenschutzelemente
 - Innenliegender Sonnenschutz
 - Außenliegender Sonnenschutz
- Gebäudekonstruktion [vgl. 5.1.1]
 - Laibungen
 - Auskragende/überstehende Bauteile
- Umgebung
 - Nachbarbebauung
 - Vegetation
 - Gelände
- Fenstertyp [vgl. 5.1.2]
 - Glasart/-farbe
 - Beschichtungen
- Witterung [nicht nachzuweisen]
 - Innen-/Außenliegende Verschmutzung [vgl. 5.1.2]
 - Saisonale Faktoren (bspw. Schnee)
- Einrichtung [nicht nachzuweisen]
 - Möblierung
 - Fliegengitter

Ein Großteil der genannten Faktoren wurde bereits in den Kapiteln 5.1.1 & 5.1.2 behandelt, da in diesen das gesamte Gebäude in Form und Materialität erfasst wird. Einige Weitere sind im Rahmen einer Tageslichtsimulation nicht abzubilden, da sie zu individuell und nicht in den Anforderungen eines normierten Nachweises enthalten sind.

Die direkte Umgebung des Gebäudes ist bisher noch nicht Teil der Tageslichtsimulation. Da große Bäume oder enge Nachbarbebauung jedoch einen großen Einfluss auf das einfallende Licht haben können, müssen diese abgebildet werden. Im VICUS gibt es bereits eine Verschattungssimulation, welche beispielsweise für den sommerlichen Wärmeschutz genutzt wird. Die zur Erstellung benötigten Geometrien können auch für die Tageslichtsimulation genutzt werden. Durch eine Umformatierung der vorhandenen Polygone analog der Raumgeometrie [vgl. 5.1.1], ist eine Ergänzung in der Geometriedatei für Radiance möglich.

Deutlich komplexer gestaltet sich die Erfassung der Sonnenschutzelemente. Sie haben einen sehr großen Einfluss auf den Helligkeitseindruck im Innenraum, sind allerdings nicht Teil der Betrachtungen zur Tageslichtversorgung nach DIN EN 17037.⁶⁷ Der DIN-Nachweis kann also unabhängig der Verschattungselemente erfolgen. Lediglich bei den Themen Besonnungsdauer, Ausblick und Blendung fordert die Norm ihre Berücksichtigung.

⁶⁷ Ausnahme sind Simulationsverfahren mit stündlichen Klimadaten. Hier fordert die DIN EN 17037 Anhang B.3.3 eine dynamische Verschattungssimulation. Da es sich bei der beschriebenen Methodik jedoch um eine statische Simulation handelt, kann die Verschattung vernachlässigt werden. Des Weiteren ist in der Praxis davon auszugehen, dass die Verschattung bei bewölktem Himmel in der Regel nicht aktiv ist.

Eine Ausnahme stellen dynamische Jahressimulationen dar. Diese können über die bisher beschriebenen Zusammenhänge nicht abgebildet werden. Hier wäre jedoch aufgrund der veränderlichen Himmelszustände & entsprechend dynamischen Verschattung eine Betrachtung notwendig.⁶⁸

Sollen die Verschattungselemente unabhängig des Norm-Nachweises trotzdem abgebildet werden, können die Abminderungsfaktoren für den sommerlichen Wärmeschutz⁶⁹ einen Anhaltspunkt geben. Dabei handelt es sich nur um einen Näherungswert, da der Einfluss eines Verschattungselements auf den Energiedurchlassgrad nicht identisch zum Einfluss auf den Transmissionsgrad ist. Gerade im Vergleich verschiedener Verschattungsvarianten, oder um den direkten Einfluss des sommerlichen Wärmeschutzes auf die Tageslichtversorgung zu prüfen, ist dieser Ansatz jedoch sinnvoll, da es keine allgemeinen lichtbezogenen Abminderungsfaktoren für Verschattungselemente gibt.

Einige Hersteller geben in ihren Datenblättern Abminderungsfaktoren unterschieden Energiedurchlass und Lichttransmission an. Ist ein solcher produktspezifischer Kennwert bekannt, ist dieser stets dem Näherungswert vorzuziehen.

Beispiel für solche Angaben sind die Textilscreens von roma⁷⁰. Für diese werden in den entsprechenden Datenblättern die Kennwerte bezüglich des energetischen und visuellen Verhaltens, unterschieden nach Materialität und Farbgebung, angegeben. In Abb. 20 wird dabei der Zusammenhang zwischen Gesamtennergiedurchlassgrad und Transmissionsgrad, der Reihe „Serge 5%“ mit flexiblem Gewebe, dargestellt. Die fünf Prozent stehen dabei für den Öffnungsfaktor des Gewebes, was zunächst einen annähernd einheitlichen Transmissionsgrad vermuten lässt. Dies ist jedoch nicht der Fall, denn T_n liegt, abhängig von der Farbgebung des Screens, zwischen 3% & 21%. Der genaue Wert steht dabei jedoch in keinem Zusammenhang zum Gesamtennergiedurchlassgrad, wie in der Punktverteilung in Abb. 20 zu erkennen ist. Folglich kann kein allgemeiner Näherungswert angegeben werden. Soll die Verschattung simuliert werden, ist diese händisch vom Nutzer zu ergänzen.

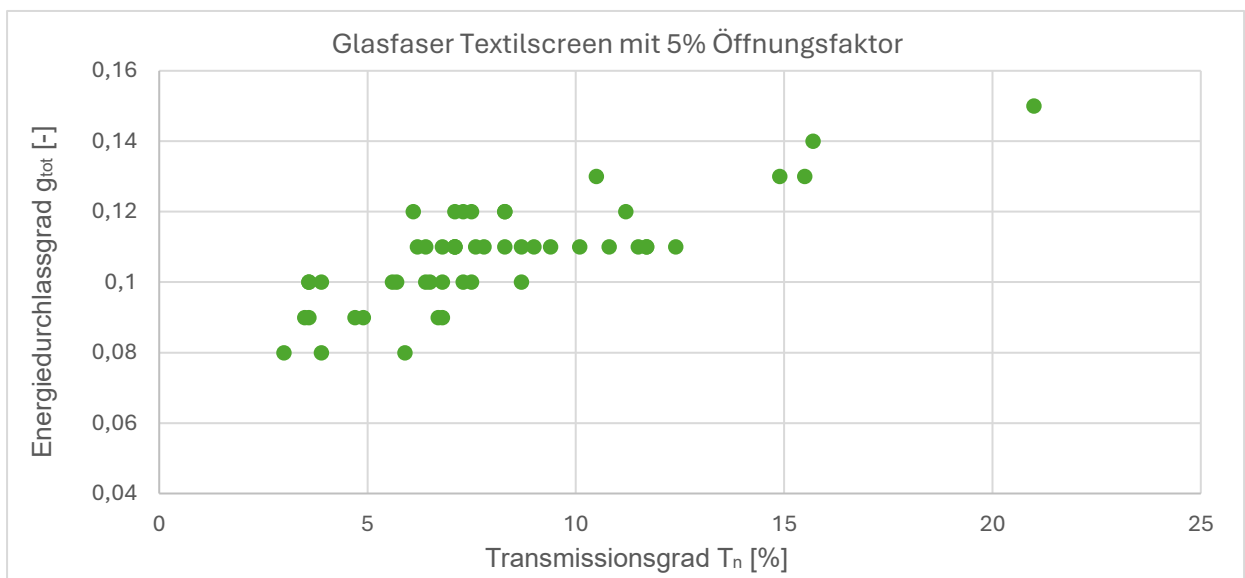


Abb. 20 - Zusammenhang zwischen g_{tot} & T_n am Herstellerbeispiel roma

⁶⁸ (vgl. Jakobiak 2021)

⁶⁹ (DIN 4108-2 2013, S. 25, Tab.7)

⁷⁰ (roma 2025)

5.2.3. Bodenplatte

Bei Betrachtungen zum Tageslicht wirft sich stets die Frage nach dem vom Boden reflektierten Licht auf. Es erscheint hier logisch eine Bodenplatte, welche sich unter dem Gebäude in einer entsprechend großen Ausdehnung anordnet, vorzusehen. So könnte das Himmelslicht auf realistische Weise zum Gebäude zurück reflektiert werden. Außerdem würden die Oberflächeneigenschaften des Bodens berücksichtigt werden. Das Reflexionsvermögen eines hellen, unebenen gepflasterten Bodens unterscheidet sich beispielsweise maßgeblich von einer dunklen Asphaltfläche.

Maßnahmen dieser Art sind für eine Tageslichtsimulation jedoch nicht notwendig. Durch die Zusammensetzung der Himmelsdatei [vgl. 5.2.1] wird der Einfluss des Bodens bereits ausreichend abgebildet. Grund dafür ist das Zweisphären-Modell, welches in der oberen Hälfte aus dem Himmel und in der unteren Hälfte aus dem Boden besteht. Dadurch erfolgt bereits eine Lichteinwirkung von der „Unterseite“ des Gebäudes.

Der einzige Unterschied zur Realität ist die Vereinheitlichung des Bodens. Dieser ist eben, kann keine Schatten werfen und hat ein uniformes Reflexionsvermögen. Diese Charakteristiken treten so in der realen Welt nie auf. Der Unterschied im Simulationsergebnis ist jedoch so gering, dass eine genauere Betrachtung in der Regel überflüssig ist.

Ausnahmen sind Gebäude die zum Beispiel vom Gelände verschattet werden, oder direkt an speziellen Untergrund anschließen. Dabei könnte es sich beispielsweise um größere Wasserflächen, wie Seen oder „Reflecting Pools“ handeln. In diesem Falle kann es sinnvoll sein, ein Polygon in VICUS zu erstellen und es mit den entsprechenden Materialeigenschaften zu hinterlegen. Diese Einschätzung liegt jedoch im Ermessen des Nutzers und wird im Algorithmus aufgrund der wenigen Anwendungsszenarien nicht berücksichtigt.

5.3. Verarbeitung

Im Kern handelt es sich bei Radiance um einen Rechenkern, welcher Ray-Tracing durchführt [vgl. 4.1, S. 8]. Konkret werden Lichtstrahlen innerhalb einer Szene entsprechend zuvor festgelegter Parameter simuliert. Aufgrund der Vielzahl der Einzelprogramme und der großen Anpassbarkeit durch die Parametrierung kann fast jeder Anwendungsfall abgebildet werden.

Für die Verarbeitung gibt es immer einen gemeinsamen Ausgangspunkt: den „Octree“. Dabei handelt es sich um eine Szenenbeschreibung im Radiance-Format. In welcher alle zuvor getätigten Eingaben⁷¹ [vgl. 5.1] durch das Programm „oconv“ gebündelt werden.

5.3.1. Bildgeneration

Unter Bildgeneration lassen sich viele Bauteile von Radiance zusammenfassen. Für die Tageslichtsimulation ist die eigentliche Berechnung zwar deutlich relevanter, aber auch die Bildgeneration findet ihre Anwendungsfälle. Allerdings sind dazu nicht alle Komponenten, welche Bilder generieren können notwendig. In Anhang 1 findet sich eine Übersicht der Radiance Programme, dabei fallen alle unter dem Titel „Rendering“ in die Kategorie der Bildgeneration. In der Tageslichtsimulation finden dabei vor allem „rpict“ und im Weiteren auch „rtrace“ Anwendung.

Die Bildgeneration selbst wird im Rahmen der Tageslichtsimulation als Kontrollinstanz oder zur Vermittlung eines Raumgefühls verwendet.

Rpict

Bei rpict handelt es sich um ein Raytracing-Werkzeug, welches die Lichtstrahlen ausgehend von der Kamera in einer vorgegebenen Szene simuliert und auf Basis des Simulationsergebnisses realistische Bilder erzeugt.

Das standardmäßige Ausgabeformat ist, wie bei den meisten Bildgeneratoren von Radiance, das HDR-Format (High Dynamic Range). HDR-Bilder bieten im Vergleich zu LDR-Bildern (Low Dynamic Range), wie beispielsweise JPEG oder PNG, viele Vorteile, welche sich in der Art und Weise der hinterlegten Helligkeits- und Farbinformationen begründen [vgl. Tab. 5]. Insgesamt, kann mit HDR Bildern ein genaueres Ergebnis erzeugt werden. Der einzige Nachteil ist, dass sie häufig spezielle Software zum Lesen der Datei benötigen. Sie lassen sich also etwas schwerer handhaben als die gängigen LDR-Formate.

HDR-Format	LDR-Format
<u>Dynamikumfang</u>	
~20 Blendstufen 10+ EV	10-14 Blendstufen 6-9 EV
<u>Farbtiefe</u>	
16, 32, 32+ Bit	8 Bit
<u>Beleuchtung</u>	
Physikalisch akkurate Helligkeitswerte	Kein physikalischer Bezug
<u>Anwendungsbereiche</u>	
Filmproduktion, Simulation = Professionelle Nutzungen	Web, Social Media = Alltägliche Nutzungen
<u>Anzeige</u>	
passende Hardware/Software notwendig	Mit Standarddisplays & -software kompatibel

Tab. 5 - Vergleich HDR & LDR Bildformate

⁷¹ Punktlisten sind nicht Teil des Octrees. Dieser enthält ausschließlich die Szenenbeschreibung (Geometrie, Materialeigenschaften, Himmel, o.ä.)

Neben der Szenenbeschreibung muss weiterhin eine korrekte Parametrierung vorgenommen werden, damit eine sinnvolle Ausgabe erzeugt werden kann. Es folgt eine Übersicht, der allgemein relevanten Parameter⁷², welche durch Anhang 7 um Rendereinstellungen ergänzt wird:

Ansicht (ggf. in view.vf)

- vt_ _ bestimmt die Ansichtsart
- v = Perspektive
 - l = Parallelansicht
 - c = zylindrisches Panorama
 - h = hemisphärische Fischaugenansicht
 - a = winkelbasierte Fischaugenansicht
 - s = stereographische Projektion (Planisphärenprojektion)

Kameraeinstellungen (ggf. in view.vf)

- vp x y z Koordinaten des View Points (Kameraposition)
- vd x y z View Direction Vektor (Blickrichtung)
- vu x y z Vektor, welcher die Ausrichtung des Ausgabebildes definiert
(zeigt an linker Bildkante nach oben)
- vh val horizontales Blickfeld als Winkel (v, h, a, s)
horizontale Bildbreite in Koordinateneinheit (l)
- vv val vertikales Blickfeld als Winkel (v, h, a, s)
vertikale Bildhöhe in Koordinateneinheit (l)
- vf file Dateiname einer View.vf-Datei mit Kameraeinstellungen
(Wird aus den Fenstereinstellungen in VICUS generiert)

Bildeinstellungen

- x val maximale Bildauflösung in X-Richtung
- y val maximale Bildauflösung in Y-Richtung

Um die Lesbarkeit von Bildern, welche mit rpict generiert wurden zu gewährleisten, bietet sich die Verwendung des Programms pfilt an. Pfilt führt ein Anti-Aliasing und eine Skalierung für das Bild durch. Das Programm durchläuft die Bilddatei in zwei Schritten, um die Belichtung auf den korrekten Durchschnittswert einzustellen. Je nach gewünschtem Ergebnis kann auch hier eine Parametrierung [vgl. Anhang 8] vorgenommen werden. Damit lassen sich folgende Eigenschaften beeinflussen:⁷³

- Bildauflösung & Seitenverhältnis
- Helligkeit & Farbigkeit
- Schärfe & Bildeffekte

Für ein lesbares Bild ist in der Regel jedoch keine weitere Parametrierung notwendig, da die Standardeinstellungen bereits ausreichend sind, um das mit rpict erstellte Bild anzupassen.

Neben der Filterung ist es auch möglich, die HDR-Datei in LDR-Formate umzuwandeln. Auch dafür stellt Radiance Übersetzer zur Verfügung. Mit den in Anhang 1 unter Konverter geführten Programmen, können damit zum Beispiel GIF, BMP oder TIFF-Dateien erstellt werden.

⁷² (vgl. Ward 1999)

⁷³ (vgl. Ward 1996)

Im Folgenden soll anhand eines Beispielraumes der Einfluss verschiedener Parameter dargestellt werden. Die Geometrie wurde dabei im VICUS erstellt und wie in Kapitel 5.1 in eine rad-Datei umgewandelt.

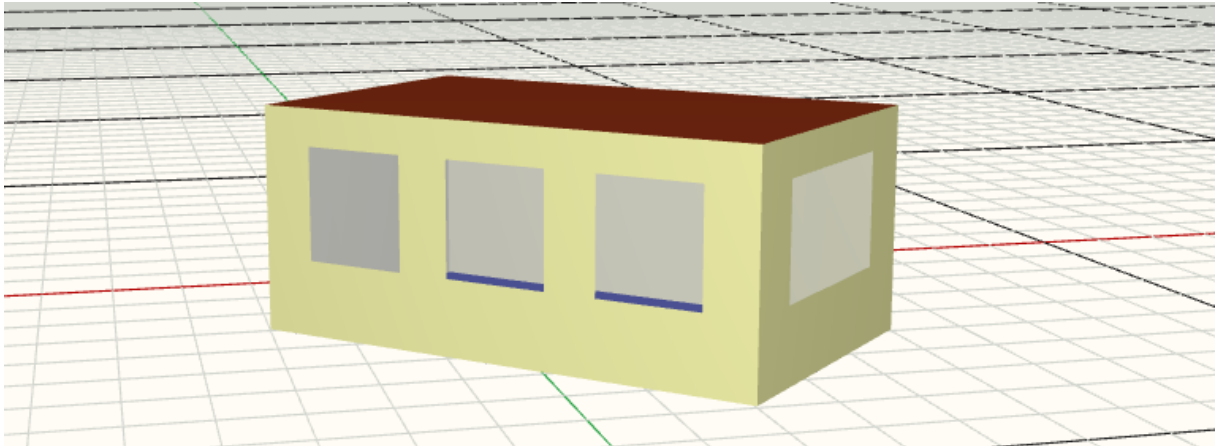


Abb. 21 - Beispielraum in VICUS

Um möglichst vergleichbare Bilder zu erzeugen, werden zunächst zwei Kamerapositionen definiert, welche später auf alle Varianten angewendet werden. Kameraposition 1, stellt dabei den Außenraum ähnlich zu Abb. 21 dar, während Kameraposition 2 einen Ausschnitt des Innenraumes abbilden soll. Der Dateinhalt sieht dabei wie folgt aus:

- 1) Innen.vf: `rvu -vtr -vp 0 1 1.8 -vd -2 6 0 -vv 60 -vh 90`
- 2) Aussen.vf: `rvu -vtr -vp 0 15 5 -vd -1 -5 -2 -vv 60 -vh 90`

Auf Basis der dargestellten Geometrie, Kameraposition und mit einer maximalen Auflösung von 1920x1080 Pixeln, werden die folgenden Szenarien generiert, welche über die konstanten Parameter `-av 0.1 0.1 0.1` & `-pj 0.6` verfügen:

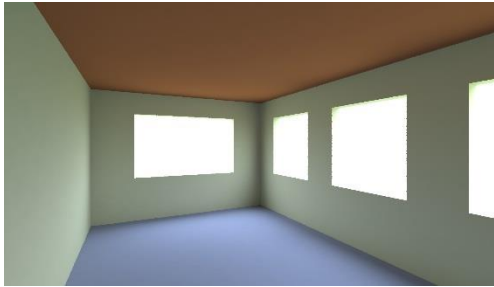
	pt	dt	dc	dr	dp	ss	st	aw	ab	ar	aa	ad	as	lr	lw
Min	0.50	0.50	0	0	4	0	1	0	1	8	0.5	1	1	1	0.50
Fast	0.25	0.20	0.25	1	32	0.5	0.75	0	1	32	0.2	32	32	2	0.50
Normal	0.20	0.10	0.50	2	256	1	0.50	1	2	128	0.15	512	256	4	0.25
Genau	0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.08	2048	512	16	0.1
Max	0.10	0.02	1	6	0	16	0	1	8	0	0	4096	1024	0	0.05

Tab. 6 - Parameterkonfigurationen für *rpict*⁷⁴

In Tab. 7 sind die Ergebnisbilder [vgl. Anhang 9], sowie die benötigte Rechenzeit aufgelistet. Bei genauerer Betrachtung lässt sich feststellen, dass die Einstellungen „Min“, „Fast“ & „Normal“ keine ausreichend genaue Berechnung darstellen. Sie sind eher geeignet, um die Bildeinstellungen oder den korrekten Export der Szene zu prüfen, da sie extrem kurze Rechenzeiten aufweisen. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da die gewählten Parameter das tatsächliche Verhalten des Lichtes stark vereinfachen.

Die Rendereinstellung „Genau“ hat mit Abstand die längste Rechenzeit, jedoch auch das realistischste visuelle Ergebnis. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich diese Parametrierung zur Tageslichtsimulation eignet.

⁷⁴ Parameter *ab* bis *as*: (Jacobs 2012, S. 32)

	Innenraum	Außenraum
Min		
	Dauer: 00:00,25	Dauer: 00:00,27
Fast		
	Dauer: 00:00,29	Dauer: 00:00,37
Normal		
	Dauer: 00:03,90	Dauer: 00:07,34
Genau		
	Dauer: 02:44,42	Dauer: 03:37,19
Max (Alt)		
	Dauer: 00:02,80	Dauer: 00:55,66

Tab. 7 - Ergebnisbilder und Rechenzeiten der Parameterkonfigurationen für rpict

Im Vergleich dazu, kann die Stufe „Max“ nicht das gewünschte Ergebnis erreichen. Hier kommt es zu einem starken Rauscheffekt im Bild. Dieser macht es im Weiteren unmöglich, eine genaue Datenauswertung vorzunehmen, da die Informationen der einzelnen Pixel verfälscht sind. Durch das Rauschen können die Bildpunkte deutlich heller oder dunkler dargestellt werden, als sie in der Realität wären. Obwohl das rauschende Bild als solches also einen Raumeindruck vermittelt, ist es im Rahmen der Tageslichtsimulation unbrauchbar. Außerdem fällt die Rechenzeit entgegen der Erwartung sehr kurz aus, was bestärkt, dass die Simulation nicht korrekt erfolgt. Zu den Ursachen dieses Effektes werden im Folgenden weitere Betrachtungen angestellt.

Um die Fehlerquelle zu finden, wurden ausgehend von den Einstellungen der Stufe „Genau“ nach und nach Parameter der Stufe „Max“ ergänzt. Dies erfolgte zunächst kategorisch und anschließend im eingegrenzten Bereich anhand einzelner Parameter. Ergebnis dieser Untersuchung war ein Problem mit dem Parameter „-aa“. Dieser bestimmt den maximalen Fehler, welcher eine Interpolation zur Folge hat [vgl. Anhang 7].

Auf der Stufe „Max“ war dieser auf einen Wert von 0 gesetzt. Dies hat zur Folge, dass keine Interpolation stattfindet. Folglich werden aneinander angrenzende Bildpunkte nicht aneinander angeglichen, was zum beobachteten Rauschen führt.

Der Wert selbst wurde zuvor der Dokumentation zur Software Radiance⁷⁵ entnommen und dort von den Entwicklern für ein sehr genaues Ergebnis vorgeschlagen. Für den hier dokumentierten Anwendungsfall hat sich diese Vorgabe als ungeeignet bewiesen.

Folglich wurde eine Variante der Stufe „Max“ mit einem angepassten Wert von 0,05 (entspricht 5%) für den Parameter „-aa“ erprobt. Aufgrund einer sehr langen Berechnungszeit im Stundenbereich, stellte sich auch diese Konfiguration als unbrauchbar heraus.

Durch eine empirische Testreihe [vgl.

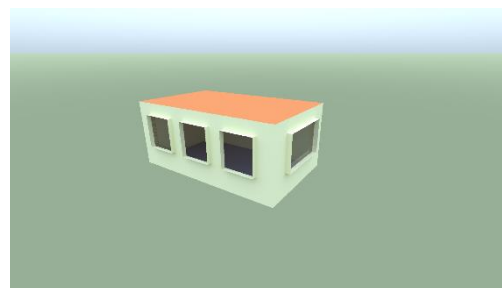
Anhang 10] haben sich *-lr 0 -aa 0.05* und *-ad 4096* als Hauptgründe für die lange Berechnungszeit herausgestellt. Hinzu kommt der Parameter *-lw 0.05* welcher zu Artefakten⁷⁶ im Ergebnisbild geführt hat. Diese Parameter werden mit Rückbezug auf die Stufe „Genau“ angepasst und wie folgt für die Stufe „Max“ neu definiert:

```
rpict -vf View.vf -x 1920 -y 1080 -av 0.1 0.1 0.1 -pj 0.6 -pt 0.1 -dt 0.02 -dc 1 -dr 6 -dp 0 -ss 16 -st 0 -aw 1 -ab 8 -ar 0 -aa 0.08 -ad 2048 -as 1024 -lr 32 -lw 0.1 Szene.oct > Bild.hdr
```

**Max
(Neu)**



Dauer: 04:30,97



Dauer: 02:42,32

Tab. 8 - Ergebnisbilder und Rechenzeiten der angepassten Parameterkonfiguration „Max“ für *rpict*

⁷⁵ (vgl. Jacobs 2012, S. 32)

⁷⁶ Unter Artefakten verstehen sich im Kontext der Bildgeneration alle Formen von visuellen Fehlstellen im Ergebnis. Dazu können falsche Glanzlichter, Rauschen, Interpolationsfehler, oder sonstige Einflüsse, die sich als eine Art „Fleck“ äußern, zählen.

Falsecolor

Falsecolor dient zur Erstellung von Falschfarbenbildern, die für Lichtanalysen genutzt werden. Es verarbeitet gerenderte Radiance-Bilder im HDR-Format und wandelt numerische Lichtwerte, wie beispielsweise Strahldichte oder Beleuchtungsstärke in visuelle Farbkarten um, die unterschiedliche Werte darstellen. Dazu können je nach Ausgabewunsch Legenden generiert, sowie weitere Anpassungen der Darstellung über die Parameter [vgl. Anhang 11] getroffen werden. Die Ausgabe erfolgt auch hier im HDR-Format, welches über die genannten Konverter in gängige LDR-Formate umgewandelt werden kann.

Auf Grundlage des zuvor generierten Innenraumbildes mit genauen Einstellungen [vgl. Tab. 7], werden im Folgenden einige Beispielbilder erzeugt, welche die Vielfalt der Darstellungsmöglichkeiten mit falsecolor grob erfassen.

In den ersten Bildern werden verschiedene Skalierungsoptionen für die Falschfarbenbilder erprobt. Diese lassen sich am besten über die Legende vergleichen. Diese erscheint ohne weitere Einstellungen stets klein in der linken unteren Ecke neben dem Bild, kann aber über entsprechende Parameter [vgl. Anhang 11] größer dargestellt werden. Als Ausgabeeinheit wird Lux gewählt.

Die erste Variante verschiedene Skalierungen vorzunehmen, bezieht sich ausschließlich auf die Legende. Die beiden Bilder in Abb. 22 wurden mit einem Höchstwert von 2000 lx erstellt. Die Legenden⁷⁷ unterscheiden sich jedoch in der Anzahl ihrer Unterteilungen. Die Bilder selbst sehen folglich identisch aus.

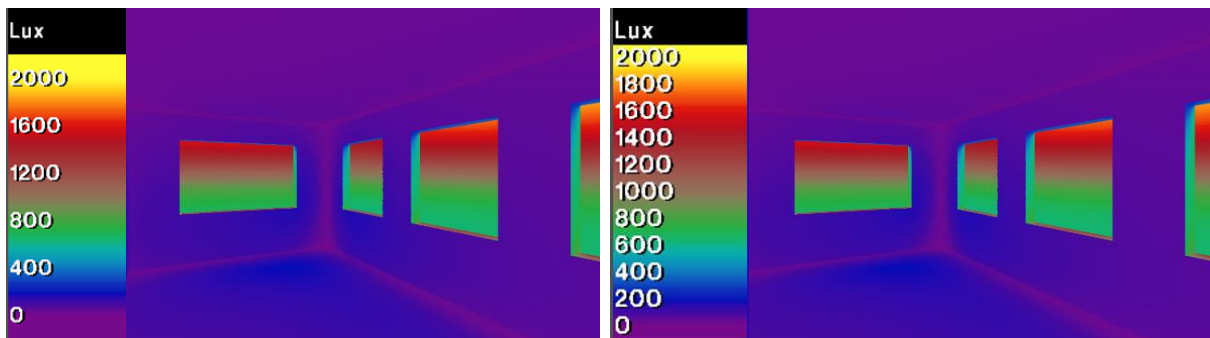


Abb. 22 - Falsecolor: Einfluss der Legendenskalierung (Unterteilungsanzahl)

Im Vergleich dazu kann auch der Höchstwert, bei gleicher Unterteilungsanzahl angepasst werden. In Abb. 23 ist ein Bild zu sehen, welches mit einem Höchstwert von 1000 lx, statt wie zuvor 2000 lx erstellt wurde. Die zugrunde liegende Farbskala bleibt zwar die gleiche, jedoch verschiebt sich die Zuordnung und damit die Bedeutung der Farben. Folglich ist das visuelle Ergebnis der Ausgabe ein anderes.

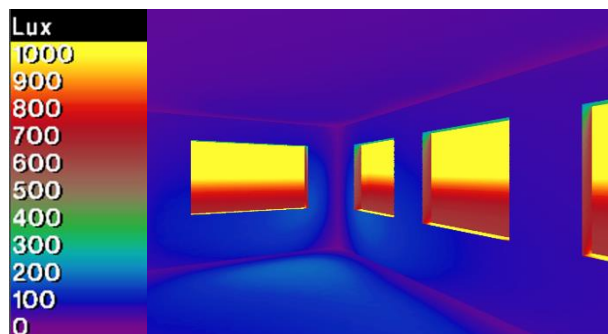


Abb. 23 - Falsecolor: Einfluss der Legendenskalierung (Höchstwert)

⁷⁷ Zum Zwecke der Lesbarkeit, wurde die Legende vergrößert und überlappend mit dem Bild dargestellt. Die Standardausgabe erfolgt deutlich kleiner, auf schwarzem Grund.

Je nach räumlicher Situation kann es sinnvoll sein, die Legendenskalierung des Ausgabebildes anzupassen, um eine einfachere Lesbarkeit zu ermöglichen. Bereits im Vergleich zwischen den räumlichen Eindrücken aus Abb. 22 & Abb. 23 wird deutlich, dass für einen eher dunklen Raum, eine geringere Höchstgrenze sinnvoller ist. Sie ermöglicht es kleinere Unterschiede innerhalb des Raumes erkennbar zu machen, ohne dass wichtige Informationen verwaschen werden.

Die Höchstgrenze sollte also in etwa der größten Beleuchtungsstärke im Raum entsprechen. Damit Fenster, welche durch den Blick in den Außenraum eine deutlich höhere Helligkeit aufweisen, erkennbar bleiben, muss auf diesen Wert jedoch noch ein Puffer aufgeschlagen werden. Je nach Raumsituation kann dieser größer oder kleiner ausfallen.

Die bisher betrachteten Ausgaben wurden alle mit der Standardpalette versehen. Falsecolor gibt insgesamt sechs verschiedene Farbpaletten [vgl. Anhang 11] zur Erstellung der Falschfarbenbilder vor. Darüber hinaus ist es möglich eine eigene Farbzuordnung mit RGB-Werten zu definieren. Im Folgenden werden drei weitere dieser Paletten abgebildet, wobei für alle sonstigen Parameter die gleichen Einstellungen wie in Abb. 23 verwendet werden.

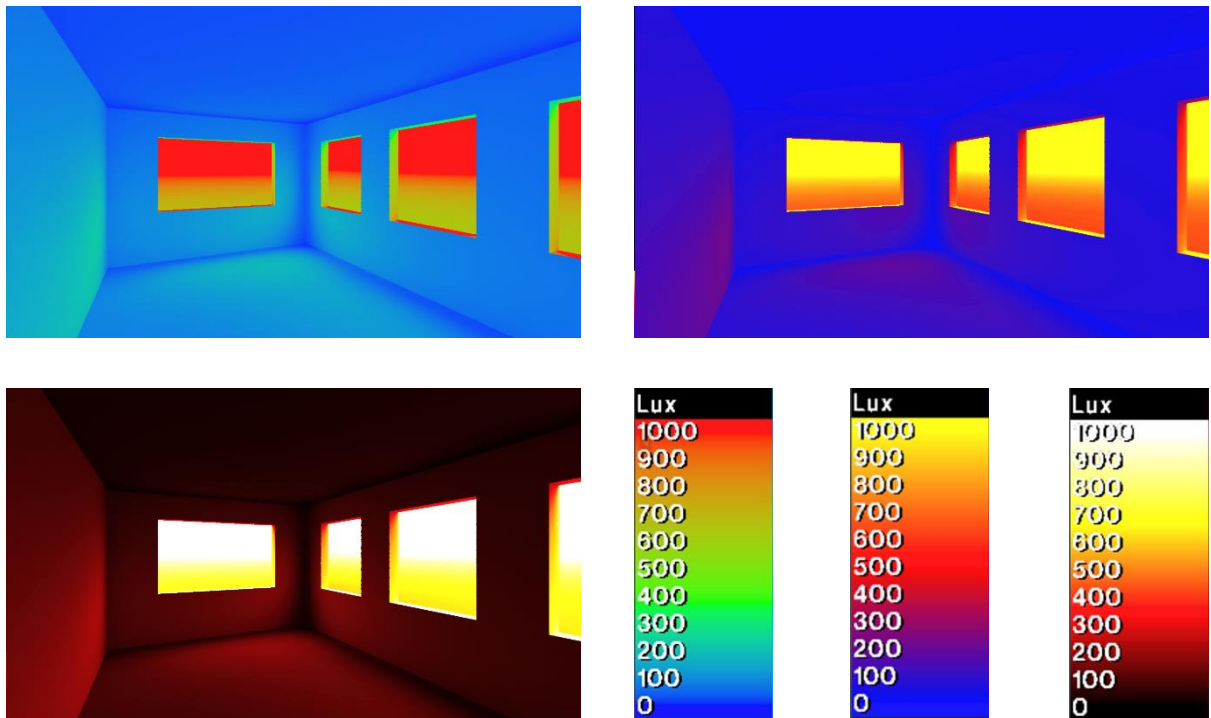


Abb. 24 - Falsecolor: Einfluss verschiedener Farbpaletten ("spec", "eco", "hot")

Auch diese Farbpaletten können je nach Kontext zur Lesbarkeit beitragen. Es ist beispielsweise möglich, dass ein Anwender das dunkle Blau der Standardpalette [Abb. 23] dunkler als das Violett empfindet und den Raumeindruck entsprechend falsch interpretiert. In diesem Fall könnte die Palette „spec“ [links oben in Abb. 24] oder „eco“ [rechts oben in Abb. 24] von Vorteil sein.

Ein anderer Nutzer könnte aus seinen thermischen Erfahrungen auch eine Farbgebung gewohnt sein, welche der Palette „hot“ [unten links in Abb. 24] ähnelt. Um eine Umgewöhnung der Farbinterpretation zu vermeiden, kann die Verwendung dieser Palette vorteilhaft sein.

Die letzte wichtige Gestaltungsmöglichkeit von falsecolor ist die Art des Falschfarnebildes. In den bisher betrachteten Varianten handelte es sich stets um eine vollflächige Darstellung mit fließenden Übergängen, welche den Farbgradienten entsprechen.

Es ist jedoch auch möglich, Konturlinien, Bänder oder Vollflächen mit Posterisationseffekt⁷⁸ auszugeben. Auf diese Darstellungsformen lassen sich die zuvor erläuterten Skalierungsmöglichkeiten und Farbpaletten ebenfalls anwenden. Für alle Bilder in Abb. 25 wurde die Standardpalette mit einem Höchstwert von 1000 lx und 10 Unterteilungen gewählt.

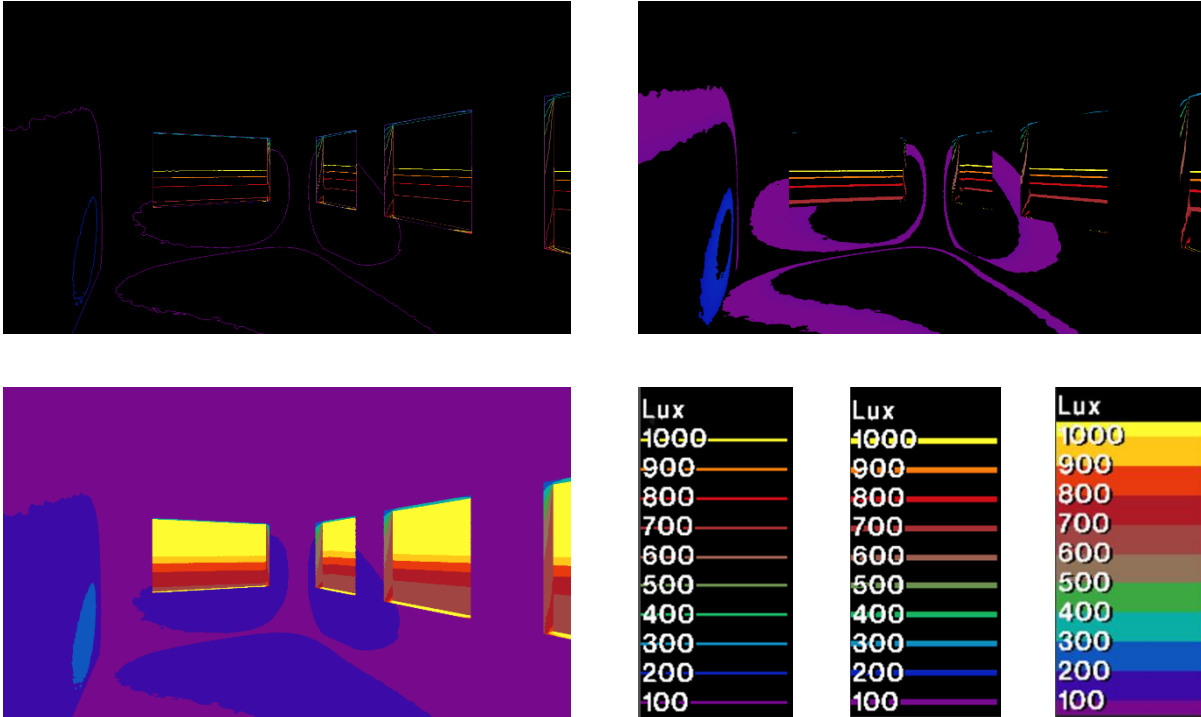


Abb. 25 - Falsecolor: Einfluss der Darstellungsformen

Da in diesen Darstellungsformen die Grenzen zwischen den Unterteilungsstufen des betrachteten Helligkeitsbereichs hervorgehoben werden, ist die situationsbezogene Anpassung der Skalierung noch wichtiger als bisher. Vor allem in der Konturlinien-Darstellung [oben links in Abb. 25] ist erkennbar, dass die meisten Konturlinien außerhalb des Raumes liegen, sodass insgesamt wenig Informationen über die Lichtverteilung im Innenraum vorhanden sind.

Für alle hier aufgeführten Darstellungsformen gilt jedoch ein Nachteil gegenüber der Standarddarstellung: Die Nachvollziehbarkeit der Raumgeometrie ist nur sehr eingeschränkt möglich. Während die Fensterpositionen noch gut erkennbar sind, gehen Informationen zu den Raumkanten und folglich der Raumhöhe verloren.

⁷⁸ Unter „Posterisationseffekt“ versteht sich die Unterteilung eines kontinuierlichen Farbverlaufes in klar abgegrenzte Farbflächen mit abrupten Übergängen. Grundlage dafür ist die Reduzierung der vorhandenen Farbwerte.

5.3.2. Berechnung Beleuchtungsstärken

Die Berechnung verschiedener Größen erfolgt mit dem Programm rtrace. Dabei handelt es sich um ein Ray-Tracing-Tool innerhalb der Radiance-Suite, welches Strahlen durch eine 3D-Szene verfolgt, um Beleuchtung, Reflexionen und andere optische Effekte zu berechnen. Wie zuvor beschrieben, benötigt auch dieses den Octree, also die Szenenbeschreibung, als Eingabe. Zusätzlich muss die Eingabe der Punktlisten [vgl. 5.1.3, S.22] erfolgen. Diese sind notwendig, da rtrace die Helligkeitswerte an vorbestimmten Punktkoordinaten abfragt. Die Ausgabe erfolgt daher standardmäßig in Form einer Liste.

Neben der Beleuchtungsstärke, welche für den Nachweis der Tageslichtversorgung benötigt wird, kann rtrace eine Vielzahl weiterer Ausgaben erzeugen. Wie bei den bereits erläuterten Programmen erfolgt auch hier eine Parametrierung [vgl. Anhang 12], welche die Art der Ausgabe definiert. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Genauigkeit des Ergebnisses maßgeblich durch die Punktliste bestimmt wird. Ist diese entsprechend eng gerastert, gibt rtrace mehr Ergebnisse aus, was zu einem genaueren Ergebnis führt, jedoch auch die Rechenzeit⁷⁹ verlängert.

Für den bereits aus 5.3.1 bekannten Raum könnte sich die Punktliste⁸⁰ wie in Tab. 9 darstellen. Die erste Zeile wurde für das Verständnis ergänzt und ist nicht regulärer Bestandteil einer Punktliste. Diese besteht aus insgesamt 96.000 Zeilen⁸¹ mit je sechs Werten. Dabei werden zuerst drei Punktkoordinaten definiert, welche beschreiben an welcher Stelle das Berechnungsergebnis abgefragt wird. Darauf folgt ein Vektor, der die Richtung, aus welcher die Lichtsituation betrachtet wird, beschreibt [vgl. 5.1.3].

X-Koordinate	Y-Koordinate	Z-Koordinate	X-Vektor	Y-Vektor	Z-Vektor
-4.98795	4.99879	0.85	0	0	1
-4.97545	5.0113	0.85	0	0	1
-4.96294	5.02381	0.85	0	0	1
-4.95043	5.03631	0.85	0	0	1
-4.93793	5.04882	0.85	0	0	1

Tab. 9 - Ausschnitt der Punktliste zum Beispielraum

Um sinnvolle Ergebnisse zu erzeugen ist eine korrekte Parametrierung von rtrace notwendig. Für eine einfache Datenweitergabe wird die Option -h genutzt, welche den Header wegfällt lässt, sodass in der Ausgabedatei nur die Berechnungsergebnisse liegen. Mit -l wird die Bestrahlungsstärke statt der standardmäßigen Strahldichte ausgegeben. Das ist notwendig, da in den Nachweisen der Tageslichtversorgung die Beleuchtungsstärke betrachtet wird, welche sich aus der Bestrahlungsstärke ergibt. Mit der Option -oov wird die Eingabedatei so definiert, dass Punktlisten des zuvor beschriebenen Aufbaus, eingelesen werden können. Zuletzt sind auch hier die Rendereinstellungen zu treffen. Dafür können die fünf Stufen, welche bereits aus der Bildgeneration bekannt sind, verwendet werden [vgl. Tab. 6, S.35]. Dabei entfallen die Parameter -pt & -pj, da kein Bild erstellt wird.

⁷⁹ Ein Vorteil von rtrace ist, dass Multithreading unterstützt wird, was bei korrekter Anwendung zu einer wesentlichen Reduzierung der Rechenzeit führt.

⁸⁰ Zur Erstellung der sehr engmaschigen Punktliste wurde das Programm vwrrays verwendet. Dieses kann auf Basis von Bilddimensionen & einer vf-Datei automatisch Listen erstellen, welche mit rcalc zu nutzbaren Punktlisten umgewandelt werden können. [vgl. Anhang 13]

⁸¹ Es handelt sich dabei um ein extrem engmaschiges Netz, welches für einen normalen Nachweis nicht benötigt wird. Diese Genauigkeit ist lediglich für die Bilderstellung mit rtrace notwendig. [vgl. 5.3.3, S.41]

Für eine genaue Berechnung würde sich der Syntax wie folgt darstellen:

```
rtrace -I -h -av 0.1 0.1 0.1 -dt 0.05 -dc 0.75 -dr 4 -dp 512 -ss 4 -st 0.25 -aw 1 -ab 5 -ar 512 -aa 0.08  
-ad 2048 -as 512 -lr 16 -lw 0.1 -oov Scene.oct < Points.pnt > Results.res
```

Für den zuvor betrachteten Beispielraum ergeben sich nun also eine Vielzahl möglicher Kombinationen aus Punktlisten und Rendereinstellungen. Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen den gewählten Einstellungen und den Ergebnissen genauer betrachtet.

	96.000 Punkte (vwrays: 400x400)	6.000 Punkte (vwrays: 100x100)	240 Punkte (vwrays: 20x20)
Min	Rechenzeit: 00:00,28 Abweichung: 92,65%	Rechenzeit: 00:00,03 Abweichung: 91,13%	Rechenzeit: 00:00,01 Abweichung: 88,52%
Fast	Rechenzeit: 00:00,34 Abweichung: 92,91%	Rechenzeit: 00:00,05 Abweichung: 91,89%	Rechenzeit: 00:00,02 Abweichung: 90,17%
Normal	Rechenzeit: 00:03,45 Abweichung: 49,21%	Rechenzeit: 00:02,04 Abweichung: 49,54%	Rechenzeit: 00:00,96 Abweichung: 48,61%
Genau	Rechenzeit: 02:26,16 Abweichung: 0,00%	Rechenzeit: 02:00,01 Abweichung: 0,00%	Rechenzeit: 01:27,46 Abweichung: 0,00%
Max^(neu)	Rechenzeit: 02:28,54 Abweichung: 1,00%	Rechenzeit: 02:01,55 Abweichung: 0,98%	Rechenzeit: 01:29,39 Abweichung: 0,93%

Tab. 10 - Rtrace Abweichungen⁸² & Rechenzeiten in Abhängigkeit der Punktlisten und Rendereinstellungen

In Tab. 10 spiegelt sich das Ergebnis aus dem vorherigen Kapitel [vgl. Tab. 7, S.36] wider. Für eine Berechnung sind nur die Ergebnisse der Stufe „Genau“ & „Max“ verwendbar, da sonst zu große Abweichungen von der Realität auftreten und die Nachweisführung nichtig ist. Dieses Ergebnis entspricht der Erwartung, da der Simulationsprozess mit dem von rpict übereinstimmt und bereits an den Bildern des Innenraums erkennbar war, dass die Berechnung der ersten drei Stufen nicht ausreicht.

Der Einfluss der Punktzahl lässt sich hier nicht ablesen. Abweichungen zwischen den Punktkategorien können nicht numerisch erfasst werden, da die berechneten Punkte mit gleichen Koordinaten die gleichen Werte aufweisen. Eine Abweichung entsteht im Zwischenraum, welcher auf Interpolation basiert und kein Bestandteil der Ergebnisliste ist. Eine genauere Auswertung zum Einfluss der Punktgitterdichte folgt in 5.3.3, S. 47 und 5.4.2, S. 54.

Die Rechenzeit ist in erster Linie von den Rendereinstellungen abhängig und wird vergleichsweise wenig von der Punktzahl beeinflusst. Daher bietet es sich an, bei Vorbemessungen oder ähnlichem einen vereinfachten Ansatz zu wählen, welcher die Rechenzeit verringert, ohne zu große Abweichungen zu erzeugen. Mit `rtrace -I -h -ab 2 -oov` lässt sich die Rechenzeit bei ebenfalls 96.000 Punkten auf rund 21 Sekunden verkürzen, wobei ein Ergebnis mit einer Abweichung von nur 5% erzeugt wird.

Für das Punktgitter kann keine allgemeine Vorgabe gemacht werden, wie groß das Gittermaß zu wählen ist. Grund dafür sind verschiedene räumliche Situationen. Je einfacher der Raum, desto genauer kann eine Interpolation die Realität abbilden. In diesem Fall würde eine geringe Punktzahl, mit einem Rastermaß von ca. 0,5 m ausreichen. Bei komplexeren Räumen kann eine deutlich höhere Auflösung notwendig sein. Auch für visuelle Auswertungen [vgl. 5.3.3] empfiehlt sich eine hohe Punktzahl.

⁸² Für die Abweichung wird die genaue Einstellung aus der gleichen Punktkategorie betrachtet.

Ein wichtiger Unterschied ist, dass im Zuge der Berechnung die Helligkeit auf der Bezugsebene, welche über die Punktlisten definiert ist, betrachtet wird. Aus diesem Grund ist kein direkter Vergleich mit den Ergebnissen der Falsecolor-Darstellung [vgl. Abb. 22 - Abb. 25] möglich, da diese nur die Oberflächen des Raumes erfasst.

Wie zuvor erläutert, gibt rtrace mit dem -I Parameter Werte für die Bestrahlungsstärke [W/m²], aufgeteilt in die Anteile Rot [R], Grün [G] und Blau [B], aus. Um diese in die Beleuchtungsstärke [E in Lux] umzurechnen, müssen folgende Anpassungen vorgenommen werden:⁸³

$$E = \eta(0,265 \cdot R + 0,67 \cdot G + 0,065 \cdot B)$$

Dabei beschreibt η die Lichtausbeute [179 lm/W]. Das Ergebnis ist folglich lm/m², was der Einheit Lux entspricht.

In Tab. 11 werden die Ergebnisse⁸⁴ vergleichbar zur Tab. 9 (Punktliste) ausschnittsweise dargestellt. Auch hier ist die erste Zeile für das Verständnis ergänzt worden. Die Spalte „Beleuchtungsstärke“ wurde zusätzlich erstellt und ist nicht Teil der rtrace Standardausgabe.

Koordinaten [-]			Bestrahlungsstärke RGB [W/m²]			Beleuchtungsstärke [lx]
-4,99	5,00	0,85	2,07	1,45	0,94	282,43
-4,98	5,01	0,85	2,05	1,43	0,94	280,30
-4,96	5,02	0,85	2,08	1,44	0,93	282,10
-4,95	5,04	0,85	2,10	1,45	0,94	285,01
-4,94	5,05	0,85	2,14	1,48	0,95	289,88

Tab. 11 - Ausschnitt der Ergebnisse zum Beispielraum mit Beleuchtungsstärke

Die berechneten Beleuchtungsstärken müssen im Weiteren auf die Vorgaben der DIN 17037 geprüft werden. Dafür ist ein weiterer Auswertungsschritt notwendig, welcher in 5.4, S. 50 genauer beschrieben wird.

⁸³ (Jacobs 2012, S. 37)

⁸⁴ Ergebnisse der genauen Simulation mit 96.000 Punkten

5.3.3. Erstellen von Slices

Um die Berechnungsergebnisse visuell aufzubereiten und übersichtlich darzustellen, ist es sinnvoll sogenannte Slices zu erstellen. Dabei handelt es sich um Schnittbilder, welche Informationen zu den Beleuchtungsstärken auf der Bezugsebene in Form von Falschfarbenbildern [vgl. S. 38] enthalten. Diese werden anschließend in das VICUS-Modell eingefügt, sodass eine Übersicht über Grundrisse denkbar ist.

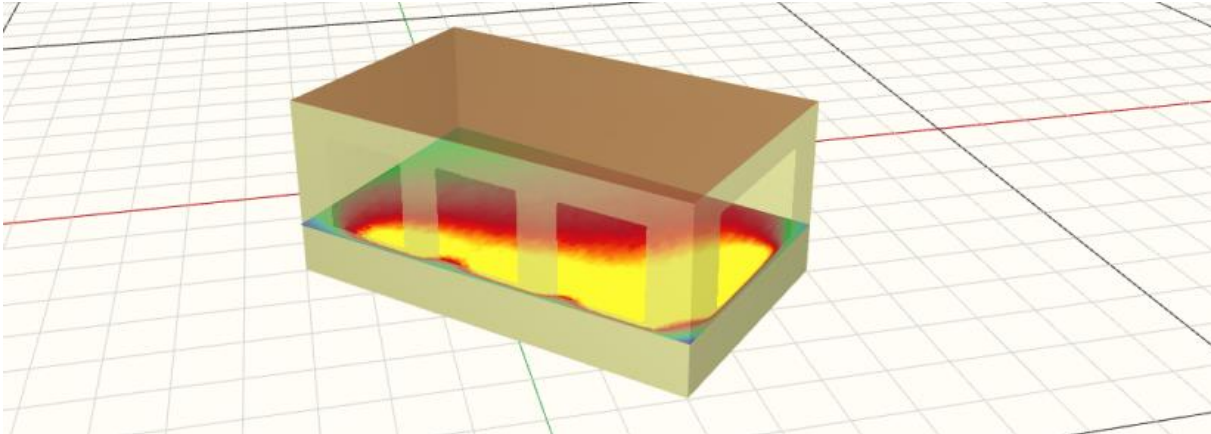


Abb. 26 - Fotomontage: Prinzipdarstellung der Slices im VICUS Modell

Auch bei der Erstellung von Slices wird rtrace verwendet. Allerdings wird hier statt einer listenartigen Berechnung ein HDR-Bild ausgegeben. Die ersten Schritte sind dabei identisch zur Berechnung [vgl. 5.3.2/Anhang 13]. Bei der Bildgeneration über rtrace ist eine engmaschige Punktliste genauso wichtig wie bei der Berechnung, da das Falschfarbenbild sonst Artefakte aufzeigen könnte. Außerdem ist die Auflösung des resultierenden Bildes abhängig von der Punktzahl. Es bietet sich also auch hier an, die Punktliste über vwrays in Kombination mit einer View.vf oder einem externen Algorithmus [vgl. 5.1.3] zu erstellen.

Vwrays bietet weiterhin die Möglichkeit, das benötigte Bildformat in Abhängigkeit der View.vf abzufragen. Dieser Schritt müsste bei Verwendung eines externen Algorithmus noch ergänzt werden. Er ist wichtig, da nur so ein Bild erzeugt wird, welches passgenau dem Raum oder der Bezugsebene entspricht, ohne dass ein ungewollter Rand oder ähnliches erzeugt wird [vgl. Abb. 27 & Abb. 28]. Diese genaue Abstimmung ist notwendig, um das Bild später wieder in VICUS zurückzuführen.

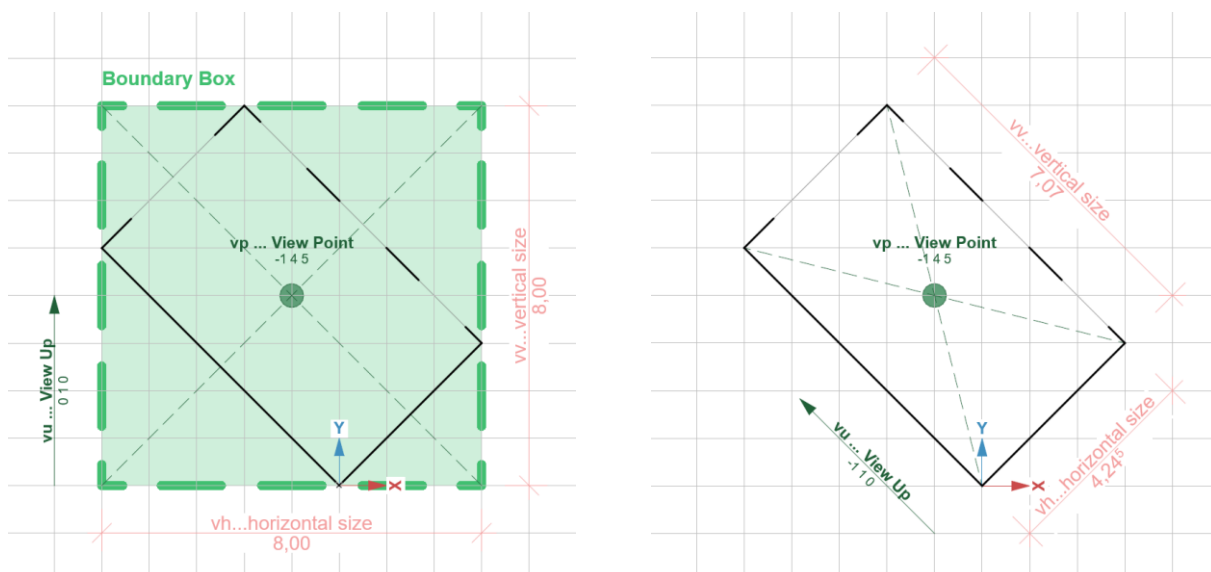


Abb. 27 - Vergleich von zwei View.vf Konfigurationen zur Erstellung von Slices

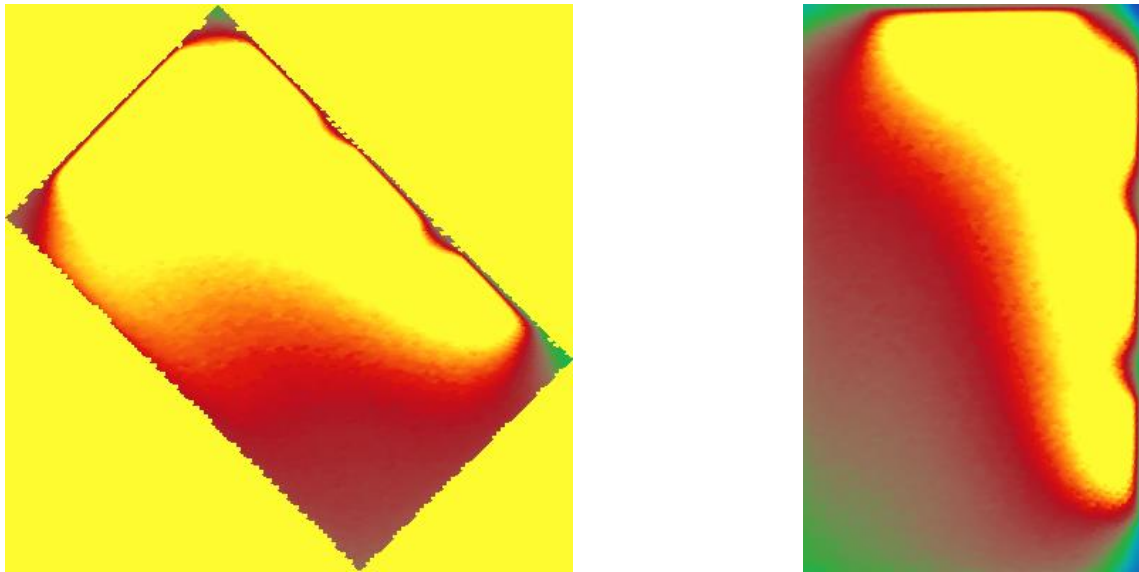


Abb. 28 - Vergleich der zwei Ergebnisbilder (Slices) mit verschiedenen vf-Dateien

Auf Basis der Bilddimensionen, der Punktliste und der Szene (Octree), kann rtrace nun ein HDR-Bild generieren, welches im Weiteren mit falsecolor in ein Falschfarbenbild, Isolinien, usw. umgewandelt werden kann.⁸⁵

Ähnlich wie im vorherigen Kapitel, werden in Tab. 12 verschiedene Parameter für die Erstellung von Slices erprobt und auf Rechenzeit, sowie ihr visuelles Ergebnis geprüft.⁸⁶

Zunächst wird deutlich, dass die Rechenzeiten im Wesentlichen denen der Berechnung [vgl. Tab. 10; S.42] entsprechen. Grund dafür ist, dass beide Ergebnisse auf der gleichen Simulation, also dem gleichen Rechenprozess innerhalb der Radiance Komponente rtrace, basieren.

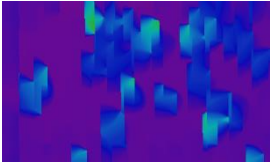
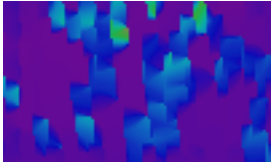
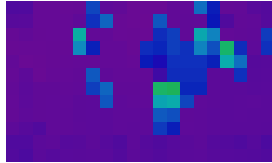
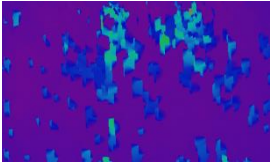
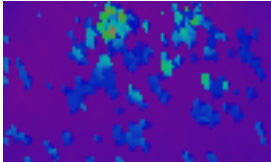
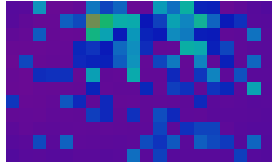
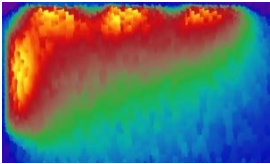
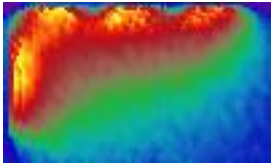
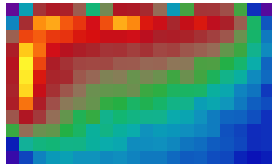
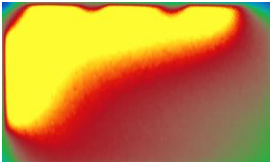
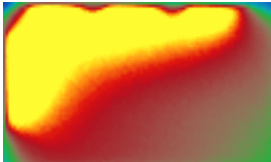
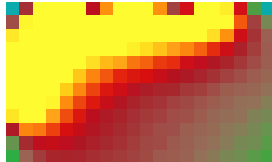
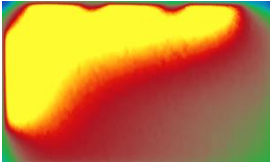
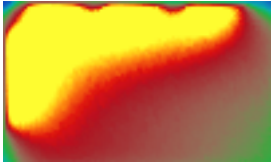
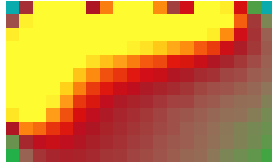
Die visuellen Abweichungen zwischen den verschiedenen Renderstufen entsprechen denen der Berechnung. In der visuellen Übersicht wird dabei noch deutlicher, dass bei den niedrigen Stufen nicht annähernd alle Lichtstrahlen berücksichtigt werden und der Raum deutlich dunkler erscheint, als er tatsächlich ist. Folglich sind diese für eine Anwendung in der Praxis nicht geeignet.

Zuletzt wird der direkte Einfluss der Punktlisten auf die Bildauflösung deutlich. Diese Beobachtung hängt mit der Funktionsweise von vwrays zusammen, da es im ersten Schritt Punktlisten aus seiner Bildauflösung generiert, welche wiederum der Auflösung des Falschfarbenbildes entsprechen.⁸⁷ Sehr vereinfacht, entspricht also ein Pixel einem Punkt und folglich einem abgefragten Strahl.

⁸⁵ Beispieleingabe für Slice Erstellung in Anhang 14

⁸⁶ Zur übersichtlichen Darstellung wurden alle Ergebnisbilder um 90 ° gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Die Bilder der ersten (96.000 Punkte) und letzten (240 Punkte) Spalte wurden außerdem in ihrer Größe an die der zweiten Spalte angepasst. In Anhang 15 folgt ein Größenvergleich im Originalformat.

⁸⁷ Vgl. Anhang 13

	96.000 Punkte (vwrays: 400x400)	6.000 Punkte (vwrays: 100x100)	240 Punkte (vwrays: 20x20)
Min	Rechenzeit: 00:00,28 	Rechenzeit: 00:00,03 	Rechenzeit: 00:00,01 
Fast	Rechenzeit: 00:00,34 	Rechenzeit: 00:00,05 	Rechenzeit: 00:00,02 
Normal	Rechenzeit: 00:03,45 	Rechenzeit: 00:02,04 	Rechenzeit: 00:00,96 
Genau	Rechenzeit: 02:26,16 	Rechenzeit: 02:00,01 	Rechenzeit: 01:27,46 
Max (neu)	Rechenzeit: 02:28,54 	Rechenzeit: 02:01,55 	Rechenzeit: 01:29,39 

Tab. 12 - Slices & Rechenzeiten in Abhängigkeit der Punktlisten und Rendereinstellungen

Für die Slices kann analog der Berechnungen ebenfalls ein vereinfachter Ansatz gewählt werden, welcher die Rechenzeit signifikant verringert, ohne zu große Abweichungen hervorzurufen. Dabei sollte die folgende Parametrierung gewählt werden:

`rtrace -ab 2 -fac -w -l -ov @PictDimensions.txt Szene.oct < Points.pnt > Slice.hdr`

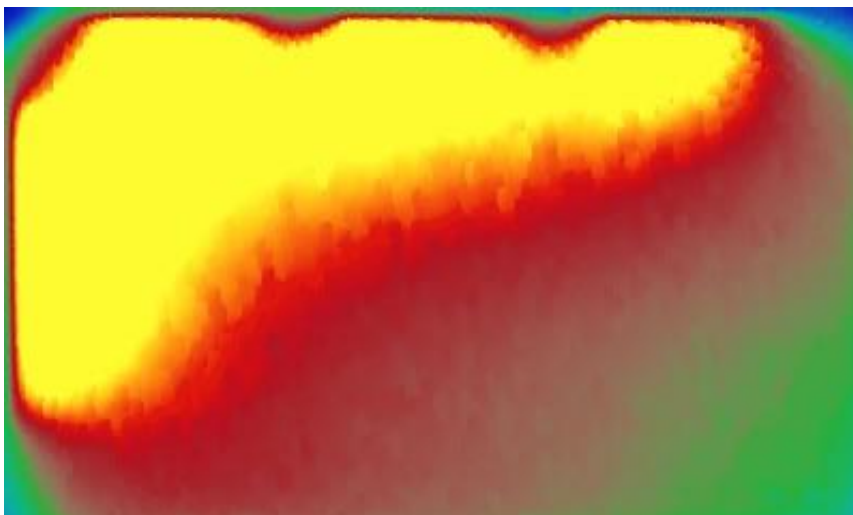


Abb. 29 - Slice mit vereinfachter Parametrierung und 96.000 Punkten

Wie bereits in Tab. 12 dargestellt, hat die Anzahl der Berechnungspunkte einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des visuellen Ergebnisses. Der Grund dafür ist, dass detaillierte Helligkeitsverläufe bei einer zu geringen Auflösung nicht erfasst werden können. Zwischen den Werten findet keine Interpolation statt, wodurch ein „gekacheltes“ Erscheinungsbild entsteht. Diese Vereinfachung kann einen nicht zu vernachlässigenden Fehler hervorrufen. Besonders in der anschließenden Auswertung nach Kapitel 5.4, welche sich mit Flächenanteilen innerhalb des Raumes befasst, wird dieser maßgebend.

Um dieses Problem genauer darzustellen, wird der bekannte Beispielraum mit den Mindestanforderungen der DIN EN 17037 simuliert. Er hat Abmessungen von 7,07x4,245 m.⁸⁸ Da die maximale Gitterzellengröße von der längeren Seite abhängig ist (Seitenverhältnis < 2), ergibt sich ein Grenzwert von 1,962 m. Daraus folgt unter Anwendung der DIN [vgl. 5.1.3], dass in Längsrichtung vier und in Querrichtung drei Messpunkte angeordnet werden müssen.

Bei automatischer Erstellung der Punktliste mit vwrays werden die Parameter „x“ und „y“ folglich mit „4“ bestückt. Eine weitere Anpassung ist nicht notwendig, da das Seitenverhältnis über die vf-Datei berücksichtigt wird. Allerdings wird hier nicht grundsätzlich aufgerundet, was im Vergleich zur DIN zu 4x2 Punkten statt 4x3 Punkten führt. Da in der Regel mit genaueren Gittern als in der Norm vorgegeben simuliert wird, kann dieses Phänomen vernachlässigt werden. Für die folgende Betrachtung verstärkt es jedoch den negativen Effekt einer geringen Punktzahl.

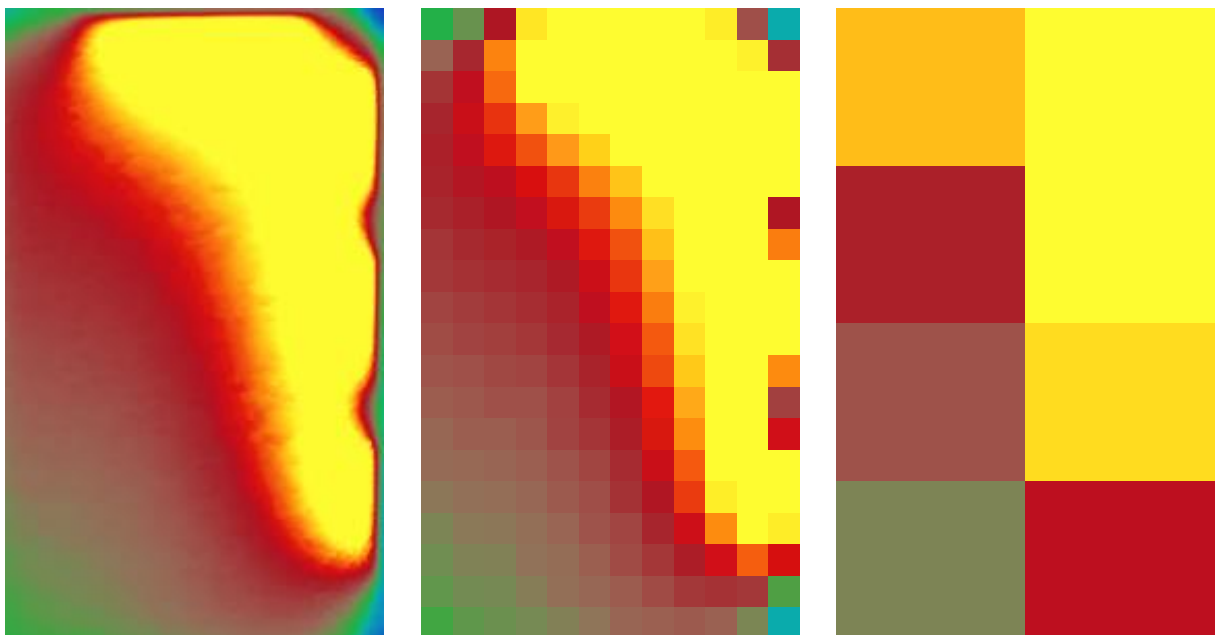


Abb. 30 - Slice des Beispielraumes mit 96.000; 240 und 8 Punkten

In Abb. 30 wird klar, warum die Gitterauflösung nach DIN-Vorgabe in der Regel nicht ausreichend ist. Im Vergleich zu den beiden bereits bekannten Varianten, stellt sich die Flächenverteilung der Helligkeiten deutlich verfälscht dar. Kapitel 5.4.2, S. 54 geht im Rahmen der Auswertung genauer auf diese Problematik ein.

⁸⁸ Zur Vergleichbarkeit mit den vorherigen Simulationsergebnissen wird hier auf den Abstand von 0,5 m zur Wand verzichtet.

Die Erstellung von Slices für rechteckige Räume ist ohne externe Prozesse problemlos möglich. Anders stellt sich die Situation bei jenen dar, welche nicht diese Voraussetzung erfüllen. Im Zentrum stehen dabei die Grenzen von Bilddateien. Diese sind stets rechteckig und nie L-Förmig oder ähnliches. Das macht es mit dem bisher erläuterten Vorgehen unmöglich ein Bild zu erstellen, welches passgenau in einem Raum sitzt.

Zur genaueren Erläuterung wird im Folgenden ein Beispiel näher beleuchtet. Schritt 1 ist die Erstellung eines frei erfundenen Raumes im VICUS, welcher möglichst viele Kanten hat:

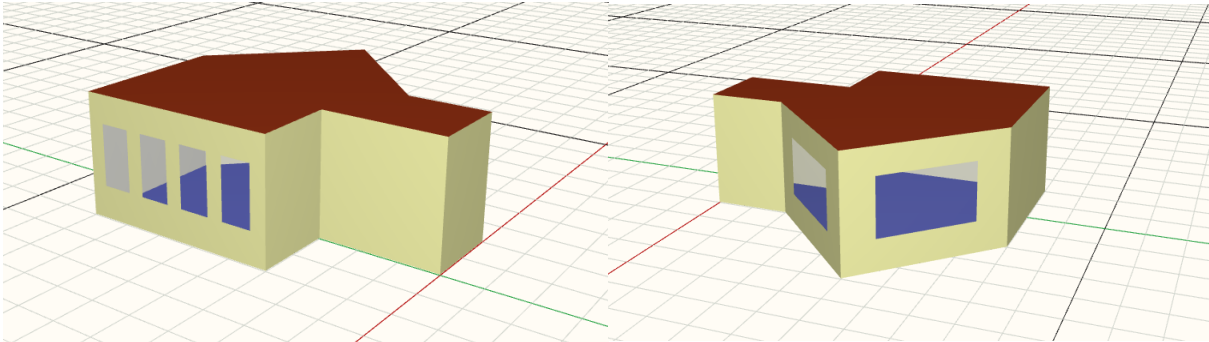


Abb. 31 - Beispielraum "Kantig" in VICUS

Für diesen Raum stellt dich die vf-Datei wie folgt dar:

```
rvu -vtl -vp 1.5 4 5 -vd 0 0 -1 -vv 8 -vh 7 -vu 0 1 0
```

Bereits in Abb. 32 lässt sich erahnen, dass das resultierende Bild, welches hier der Boundary Box entspricht, über die Grenzen des Raumes hinausragen wird.

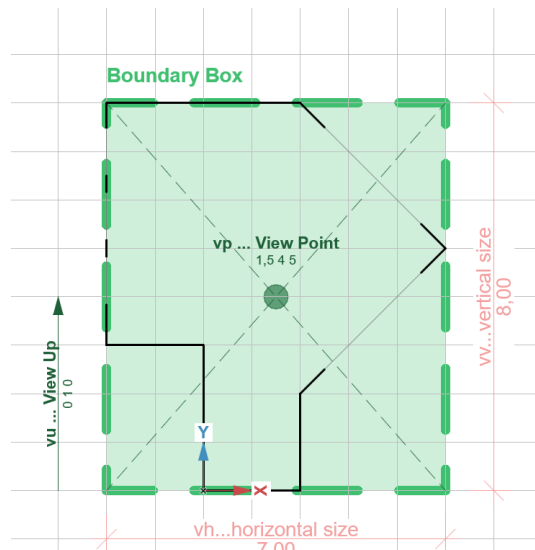


Abb. 32 - View.vf für den kantigen Beispielraum

In Abb. 33 bestätigt sich die Vermutung in Form der fertigen Slices.

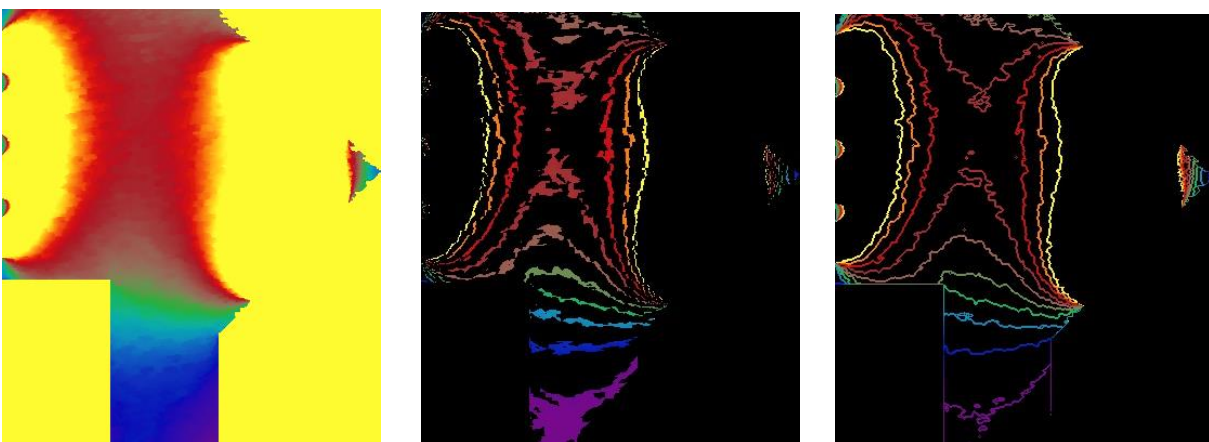


Abb. 33 - Gegenüberstellung der generierten Slices des kantigen Beispielraumes

Um dieses Problem der Slice-Erstellung zu umgehen, gibt es zwei Ansätze:

1. Unterscheidung der Messpunkte innerhalb & außerhalb des Raumes
2. Nutzen der Berechnungsergebnisse zur externen Bilderstellung

Für Variante 1 muss bereits vor der eigentlichen Slice-Erstellung ein zusätzlicher Schritt ergänzt werden. Ohne diesen werden alle Punkte der verwendeten Punktliste gleichbehandelt, unabhängig ihrer Position.

Damit im Slice später nur innerhalb des Raumes eine Farbe erzeugt wird, muss eine Unterscheidung nach Innen- & Außenraum⁸⁹ vorgenommen werden. Dazu kann wie in Kapitel 5.1.3 bereits erwähnt, ein „Point-in-Polygon“-Algorithmus verwendet werden. Dieser prüft, welche Punkte tatsächlich im Raumpolygon, statt in der Boundary Box, liegen. Diese könnten anschließend in der Punktliste durch einen abweichenden Vektor, eine andere Z-Koordinate, oder ähnliches unterschieden werden. Diese Anpassung ist je nach Raumsituation so zu wählen, dass möglichst kein Licht am neuen Punkt vorhanden ist. Wichtig ist, dass die Punkte selbst erhalten bleiben müssen, da die Bildgeneration sonst nicht korrekt ausgeführt werden kann.⁹⁰

Alternativ kann die Slice-Erstellung gänzlich ausgelagert werden. Dabei würden die Berechnungsergebnisse in Tabellenform als Grundlage genutzt werden, um extern ein Bild zu erzeugen. Hier ist es möglich nur Punkte innerhalb des Raumes zu verarbeiten. Alle außerhalb liegenden Punkte, die Teil des rechteckigen Bildes sind, wären transparent. Weiterhin sind deutlich mehr individuelle Anpassungsmöglichkeiten denkbar, da die Farbwiedergabe selbst zu definieren ist. Grundsätzlich wird eine Farbskala mit den entsprechenden Beleuchtungsstärken erstellt und auf die Berechnungsergebnisse mit ihren Raumkoordinaten angewandt.

In Bezug auf die Auswertung ist hier eine Betrachtung der Empfehlungsstufen [vgl. 5.4.1] denkbar. Dabei würde jeder Beleuchtungsstärke (100 lx, 300 lx, 500 lx & 750 lx) eine Farbe zugewiesen werden, welche dann im Raum abgebildet wird. So wäre eine schnelle visuelle Ersteinschätzung der Tageslichtsituation möglich.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass im Rahmen der Slice-Erstellung die Grenze der reinen Radiance-Nutzung erreicht ist. Die zwei Ansätze sind lediglich ein Ausblick auf weitere Möglichkeiten zur Anwendung in der Praxis und sollten in einer separaten Ausführung genauer beleuchtet werden.

⁸⁹ In Bezug auf den betrachteten Raum. Außenraum ist hier auch ein Punkt im Nachbarraum.

⁹⁰ Bei der Bildgeneration müssen alle Bereiche mit Punkten hinterlegt sein, damit an jeder Stelle Informationen abgefragt werden können.

5.4. Ausgabedaten

Auf Basis der im vorherigen Kapitel erstellten Ergebnisse, ist es nun Ziel diese übersichtlich darzustellen. Um die Daten inhaltlich aufzubereiten, werden die Bewertungsvorgaben der DIN 17037 verwendet.

5.4.1. Bewertungsgrundlage: DIN EN 17037

Wie bereits unter Punkt 3, S.6 erläutert, gibt die DIN 17037 wesentliche Grundlagen zur Bewertung der Tageslichtversorgung in Innenräumen vor. Die damit einhergehenden zwei Berechnungsverfahren werden im Folgenden genauer erläutert.

Beleuchtungsstärke

Das erste Verfahren nutzt direkt die berechneten Beleuchtungsstärken. Es wird in der Regel verwendet, wenn zuvor mit Klimadaten und entsprechend zeitabhängiger Betrachtung des Raumes gearbeitet wurde. Das entspricht nicht dem Vorgehen der vorherigen Kapitel, jedoch ist eine Betrachtung dieser Variante trotzdem sinnvoll, da eine vergleichbare Aussage auch mit einheitlichen Rahmenbedingungen möglich ist.

Kerninhalte sind die Zielbeleuchtungsstärke [E_T in lx], welche über 50% der Bezugsfläche an mindestens der Hälfte der Tageslichtstunden angesetzt wird, sowie die Mindestzielbeleuchtungsstärke [E_{TM} in lx], welche über 95% der Bezugsfläche im gleichen zeitlichen Rahmen zu erreichen ist. Die Kombination aus beiden ist auf Räume mit vertikalen oder geneigten Öffnungen anzuwenden. Bei Räumen mit ausschließlich horizontalen Öffnungen⁹¹, wird statt der Mindestzielbeleuchtungsstärke die Zielbeleuchtungsstärke auf 95% der Bezugsfläche erweitert.⁹²

Empfehlungsstufe	Zielbeleuchtungsstärke (Bezugsflächenanteil: 50%)	Mindestzielbeleuchtungsstärke (Bezugsflächenanteil: 95%)
Vertikale & Geneigte Öffnungen⁹³		
Gering	300 lx	100 lx
Mittel	500 lx	300 lx
Hoch	750 lx	500 lx
Horizontale Öffnungen⁹⁴		
Gering	300 lx	300 lx
Mittel	500 lx	500 lx
Hoch	750 lx	750 lx

Tab. 13 - Empfehlungsstufen für die Beleuchtungsstärke in Innenräumen

Werden für die beide Größen verschiedene Empfehlungsstufen erreicht, ist die niedrigere maßgebend. Diese Anforderungen stellen sicher, dass eine gleichmäßige und ausreichende Tageslichtversorgung gewährleistet wird, ohne dass größere Flächen des Raums unzureichend beleuchtet bleiben.

⁹¹ Um eindeutig zwischen geneigten & horizontalen Öffnungsflächen zu unterscheiden, werden alle Flächen die vollständig oberhalb der Bezugsebene liegen als horizontale Öffnungsflächen definiert.

⁹² (vgl. Jakobiak 2021, S. 15)

⁹³ Eigene Darstellung gemäß (DIN EN 17037 2022 Tabelle A.1)

⁹⁴ Eigene Darstellung gemäß (DIN EN 17037 2022 Tabelle A.2)

Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient [D] beschreibt das Verhältnis zwischen der Beleuchtungsstärke im Innen- und Außenraum. Durch den Außenraumbezug macht er sich standortabhängig, folgt aber gleichzeitig den Empfehlungsstufen des zuvor beschriebenen Verfahrens.

Nation	Median der äußeren diffusen Beleuchtungsstärke [$E_{v,d,med}$]	D für ≥ 100 lx	D für ≥ 300 lx	D für ≥ 500 lx	D für ≥ 750 lx
DE	13900 lx	0,7%	2,2%	3,6%	5,4%
DE	17100 lx ⁹⁵	0,6%	1,8%	2,9%	4,4%

Tab. 14 - Tageslichtquotienten in Deutschland in Abhängigkeit der (Mindest-) Zielbeleuchtungsstärken

Die Luxzahlen in den letzten Spalten der Tab. 14 entsprechen dabei den (Mindest-) Zielbeleuchtungsstärken des vorherigen Verfahrens. Damit ist auch für den Tageslichtquotienten eine Rückführung auf die drei Empfehlungsstufen möglich.

5.4.2. Auswertungsalgorithmus

Da der Tageslichtquotient indirekt auf dem Verfahren der Beleuchtungsstärke aufbaut, ist es sinnvoll, eine gemeinsame Auswertung für beide Betrachtungen zu erstellen. Grundlage sind die listenförmigen Berechnungsergebnisse aus 5.3.2, S. 41ff.

Es ist möglich von einem Anteil der Ergebnisse an der Gesamtzahl dieser auf den Flächenanteil der Bezugsfläche zu schließen, da die Ausgaben auf einem engmaschigen und gleichverteilten Gitter basieren. Eine weitere Voraussetzung ist der Abstand von 0,5 m zur Wand, da in diesem Bereich Berechnungssingularitäten auftreten können, welche das Ergebnis verfälschen würden.

Konkret müssen alle Berechnungsergebnisse auf Basis der (Mindest-) Zielbeleuchtungsstärken ausgezählt werden, sodass sich vier Gruppen (≥ 100 lx, ≥ 300 lx, ≥ 500 lx, ≥ 750 lx) ergeben, deren Anzahl mit der Gesamtmenge der Ergebnisse dividiert wird.

Für den bereits bekannten rechteckigen Beispielraum mit 96.000 Punkten stellt sich der Zusammenhang wie folgt dar:

Punktzahl nach Kategorie		Punktverhältnis	Flächenanteile
≥ 100 lx	96000	1,00	100,00%
≥ 300 lx	95281	0,99	99,25%
≥ 500 lx	85136	0,89	88,68%
≥ 750 lx	47752	0,50	49,74%

Tab. 15 - Herleitung der Flächenanteile auf Basis der Beleuchtungsstärken für den Beispielraum

Damit ergeben sich die folgenden Empfehlungsstufen:

- Zielbeleuchtungsstärke: „Mittel“ [50% mit ≥ 500 lx]
- Mindestzielbeleuchtungsstärke: „Mittel“ [95% mit ≥ 300 lx]

Es fällt auf, dass der Raum bereits sehr nah an der Stufe „Hoch“ für die Zielbeleuchtungsstärke ist. Für die gleiche Stufe der Mindestzielbeleuchtungsstärke fehlen jedoch 6,32%.

⁹⁵ nur für horizontale Tageslichtöffnungen mit lichtstreuenden Verglasungen.

„Eine lichtstreuende Verglasung verteilt das transmittierte Licht nahezu ungeachtet der Winkelverteilung des einfallenden Lichts gleichmäßig. Das Verhältnis zwischen der inneren und äußeren Beleuchtungsstärke bleibt ungeachtet der Sonnen- und Himmelsbedingungen relativ konstant.“ (Jakobiak 2021, S. 18)

Damit die Auswertung vollständig automatisiert erfolgt, muss auf den dargestellten Zwischenschritt aus Tab. 15 noch die Abfrage der Empfehlungsstufe folgen. Dafür ist lediglich zu prüfen, welche der Stufen die 50% bzw. die 95% Grenze des Flächenanteils überschreiten, und anschließend die passende Empfehlungsstufe in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke verknüpft werden.

Zur Berechnung des Tageslichtquotienten ist die Beleuchtungsstärke des Außenraumes notwendig, welche bereits für die Erstellung der Himmelsdatei [vgl. 5.2.1, S. 26] verwendet wurde. Diese ist anschließend mit den Beleuchtungsstärken im Innenraum, welche listenartig vorliegen, ins Verhältnis zu setzen. Für diese Ergebnisse gelten im Vergleich zur vorherigen Auswertung nun die Grenzwerte der Tab. 14 zur Unterteilung der Stufen.

Für den Beispielraum ergeben sich dabei folgende Zwischenergebnisse.:

Punktzahl nach Kategorie		Punktverhältnis	Flächenanteile
$\geq 0,7 \%$	96000	1,00	100,00%
$\geq 2,2 \%$	95236	0,99	99,20%
$\geq 3,6 \%$	85081	0,89	88,63%
$\geq 5,4 \%$	47677	0,50	49,66%

Tab. 16 - Herleitung der Flächenanteile auf Basis der Tageslichtquotienten für den Beispielraum

Die Ergebnisse entsprechen im Wesentlichen denen aus Tab. 15. Die minimalen Abweichungen begründen sich darin, dass die prozentualen Grenzwerte gerundet sind. Sie entsprechen den Grenzkriterien in Lux aus der vorherigen Tabelle geteilt durch die Beleuchtungsstärke im Außenraum.

Trotz der minimalen Abweichung fällt die Einordnung in die Empfehlungsstufen identisch aus. Die automatisierte Abfrage ist auch hier analog der zuvor beschriebenen Methode möglich.

Zur genaueren Erläuterung des Auswertungsprinzips, werden im Folgenden zwei Abwandlungen des Beispielraumes betrachtet. Um diese zu erstellen, wurden jeweils die Fenster einer Wand entfernt, sodass nur noch eine einseitige Belichtung vorliegt [vgl. Abb. 34].

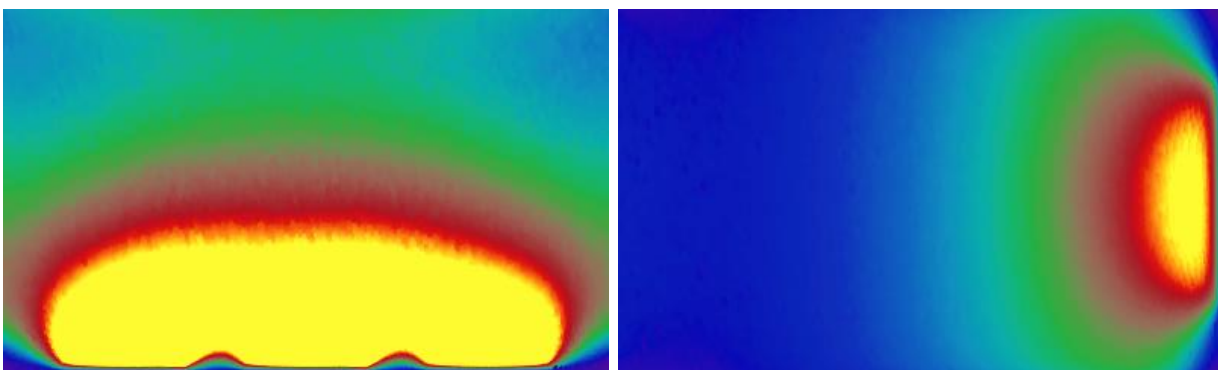


Abb. 34 - Slices der Beispielraum Abwandlungen

Bereits aus den Falschfarbenbildern lässt sich ableiten, dass die linke Variante einen deutlich besser belichteten Raum erzeugt als die rechte. Außerdem lässt sich die Fensterposition in beiden Fällen anhand der hellsten Bereiche (gelb) gut nachvollziehen.

Wendet man die Auswertung anhand der Berechnungsergebnisse an, ergeben sich die folgenden Flächenanteile:

Variante: 3 Fenster		Variante: 1 Fenster	
Beleuchtungsstärken			
≥ 100 lx	99,09%	≥ 100 lx	56,25%
≥ 300 lx	79,19%	≥ 300 lx	30,64%
≥ 500 lx	46,57%	≥ 500 lx	19,01%
≥ 750 lx	31,83%	≥ 750 lx	12,82%
Tageslichtquotienten			
≥ 0,7 %	99,12%	≥ 0,7 %	56,92%
≥ 2,2 %	77,53%	≥ 2,2 %	30,20%
≥ 3,6 %	46,53%	≥ 3,6 %	18,99%
≥ 5,4 %	31,80%	≥ 5,4 %	12,81%

Tab. 17 - Matrix der Flächenanteile der abgewandelten Beispierräume bezüglich der Beleuchtungsstärken und der Tageslichtquotienten

Bezogen auf die Empfehlungsstufen bedeutet das Folgendes:

Variante: 3 Fenster		Variante 1 Fenster	
Beleuchtungsstärken			
Mindestzielbeleuchtungsstärke:	Gering	Mindestzielbeleuchtungsstärke:	-
Zielbeleuchtungsstärke:	Gering	Zielbeleuchtungsstärke:	-
Tageslichtquotienten			
Mindestzielbeleuchtungsstärke:	Gering	Mindestzielbeleuchtungsstärke:	-
Zielbeleuchtungsstärke:	Gering	Zielbeleuchtungsstärke:	-

Tab. 18 - Bewertungsmatrix der Empfehlungsstufen der abgewandelten Beispierräume

Aus Tab. 18 geht hervor, dass bei Verzicht auf beidseitige Belichtung im Beispierraum, die Empfehlungsstufe nicht gehalten werden kann. Bleiben die drei Fenster, an der günstigeren Position erhalten, kann nur noch die Empfehlungsstufe „Gering“ erreicht werden. Bleibt das einzelne Fenster erhalten, wird gar keine Empfehlungsstufe der Norm erreicht. Der Raum ist damit als Aufenthaltsraum nicht geeignet. Grund für dieses Ergebnis ist die große Raumtiefe, welche von dem einzelnen Fenster nicht abgedeckt werden kann.

Als letztes Beispiel einer Auswertung sollen die aus 5.3.3, S. 47 bekannten Varianten des Beispielraumes betrachtet werden. Diese Varianten vergleichen verschiedene Auflösungen des Gitterrasters. Bereits in der visuellen Darstellung wurde dabei deutlich, dass sich die Flächenverhältnisse aufgrund der geringen Punktzahl deutlich verschieben.

	Variante 1 96.000 Punkte	Variante 2 240 Punkte	Variante 3 8 Punkte
Beleuchtungsstärken			
≥ 100 lx	100,00%	100,00%	100,00%
≥ 300 lx	99,25%	99,17%	100,00%
≥ 500 lx	88,68%	90,42%	87,50%
≥ 750 lx	49,74%	51,67%	50,00%
Tageslichtquotienten			
≥ 0,7 %	100,00%	100,00%	100,00%
≥ 2,2 %	99,20%	99,17%	100,00%
≥ 3,6 %	88,63%	90,42%	87,50%
≥ 5,4 %	49,66%	51,67%	50,00%

Tab. 19 - Matrix der Flächenanteile der Punktzahl-Varianten des Beispielraumes bezüglich der Beleuchtungsstärken und der Tageslichtquotienten

Tab. 19 bestätigt die Vermutung. Bereits in Variante 2 mit 240 Punkten wird in der letzten Stufe (750 lx bzw. 5,4%) die Grenze zu 50% überschritten, was in der folgenden Bewertung einen falschen positiven Effekt auslöst. In Variante 3 wird dagegen deutlich, dass kleinere Feinheiten gar nicht abgebildet werden können, da die Fläche nur in 12,5%-Schritten unterteilt ist. Liegt die Differenz zu einer relevanten Schwelle also unterhalb dieses Wertes, wird sie aufgrund der Auflösung nicht berücksichtigt.

Für ein Ergebnis, welches auf 2 Kommastellen genau ist, sind also immer mindestens 10.000 Punkte notwendig.

	Variante 1 96.000 Punkte	Variante 2 240 Punkte	Variante 3 8 Punkte
Beleuchtungsstärken			
Mindestzielbeleuchtungsstärke	Mittel	Mittel	Mittel
Zielbeleuchtungsstärke	Mittel	Hoch	Hoch
Tageslichtquotienten			
Mindestzielbeleuchtungsstärke	Mittel	Mittel	Mittel
Zielbeleuchtungsstärke	Mittel	Hoch	Hoch

Tab. 20 - Bewertungsmatrix der Empfehlungsstufen der Punktzahl-Varianten des Beispielraumes

In der Auswertung treten durch die Verschiebung um den 50% Punkt Abweichungen im Rahmen der Zielbeleuchtungsstärke auf. Da jedoch das schlechtere Ergebnis maßgebend ist, würde hier durch die Mindestzielbeleuchtungsstärke keine Verfälschung stattfinden. Wird jedoch über die reine Empfehlungsstufe hinaus ausgewertet, erscheint der Raum deutlich besser, als er tatsächlich ist, was im Rahmen der Tageslichtsimulation nicht erstrebenswert ist. Es ist also stets mit einer gewissen Mindestzahl an Punkten zu arbeiten.

6. Benutzeroberfläche

Neben den logischen Zusammenhängen, welche für den Algorithmus [Kapitel 5] zur Durchführung einer Tageslichtsituation notwendig sind, ist auch die Benutzeroberfläche entscheidend. Bisher wurden lediglich die Zusammenhänge zwischen den beiden Softwarekomponenten erläutert. Damit diese auch für den allgemeinen Anwender nutzbar sind, soll Radiance, welches hier als „Rechenkern“ genutzt wird, in den Hintergrund rücken. Das heißt, alle Eingaben, Einstellungen, Ausgaben usw. müssen direkt in der bisher vorhandenen Oberfläche von VICUS ergänzt werden.

Die folgenden Abschnitte erläutern, an welchen Stellen innerhalb des Programmes neue Menüs oder Schaltflächen notwendig sind. Außerdem wird in diesem Kontext ein Gestaltungskonzept zur Einbindung in die vorhandene Programmoberfläche entwickelt.

6.1. Eingabe

Unter den Eingabegrößen werden alle jene verstanden, welche vor der eigentlichen Simulation vorhanden sein müssen, damit diese durchgeführt werden kann. Konkret handelt es sich um alle Größen, welche in den Punkten 5.1.1 bis 5.1.3 beschrieben wurden.

6.1.1. Eingabegrößen

Im Rahmen der Modellerstellung innerhalb von VICUS werden allen Polygonen, ausgenommen Fenstern, Bauteile zugewiesen. Dabei handelt es sich um Konstruktionen, denen Randparameter zugeordnet wurden. Diese bestehen wiederum aus einzelnen Materialien mit hinterlegten Eigenschaften. Erst innerhalb der Konstruktion werden sie zu einem Schichtenaufbau mit Materialstärke kombiniert.

Die Materialeigenschaften setzen sich, neben dem Namen und der Anzeigefarbe, welche aktuell frei gewählt werden kann, aus den thermischen Eigenschaften: der Leitfähigkeit, der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität, zusammen. Es erfolgt also noch keine Aussage über die optischen Eigenschaften.

An dieser Stelle ist es sinnvoll, einen weiteren Eigenschaftenreiter zu ergänzen. In diesem wird der bereits vergebene Name übernommen oder kann neu festgelegt werden. Außerdem gibt es die Möglichkeit verschiedene hinterlegte Materialien [vgl. Anhang 3] aus einem Dropdown-Menü auszuwählen. Als Resultat wird das Feld „Primitive“ ausgefüllt. Dort sind weitere Anpassungen, wie beispielsweise die Definition einer abweichenden Farbgebung⁹⁶, durch den Anwender denkbar.

The image shows a software interface titled 'Materialeigenschaften'. It has four tabs: 'Thermisch', 'Optisch', 'EPD', and 'Information'. The 'Optisch' tab is active. Below the tabs, there are three input fields: 'Name' with the text 'Rauputz', 'Kategorie' with a dropdown menu showing 'White Roughcast', and 'Primitive' with a text area containing the following text: 'void plastic Rauputz', '0', '0', and '5 0.726 0.706 0.633 0 0'.

Abb. 35 - Vorschlag: Menü zur Erfassung optischer Materialeigenschaften in VICUS

⁹⁶ Die gegebene Farbgebung ist stets die mit dem Material verknüpfte und wird nicht automatisch aus der Anzeigefarbe im Programm übernommen.

Für die Fenster ist eine ähnliche Anpassung notwendig. Diese fallen im Vergleich zu Wänden, Decken usw. nicht in die Kategorie der Bauteile, sondern in die Kategorie der Teilflächen. Grund ist, dass sie immer der Wand, in der sie liegen, zugeordnet sind.

Entsprechend wird ihnen auch keine Konstruktion zugewiesen. Stattdessen gibt es direkte Fenstereigenschaften, welche erstellt werden können. Diese setzen sich aus dem Namen der Fensterart, einer Typisierung (bei Fenstern: Window), dem Wärmedurchgangskoeffizienten, sowie den Fenstereigenschaften, den dynamischen Verschattungseigenschaften und den Randbedingungen zusammen.

Die erste Anpassung sollte im Bereich der Fenstereigenschaften vorgenommen werden, da für die Ermittlung des Transmissionsgrades ein Bezug auf den Gesamtenergiedurchlassgrad (in VICUS: SHGC) notwendig sein kann. Es wird eine Zeile zur Eingabe des Transmissionsgrades [T_n], sowie die Option der automatischen Berechnung ergänzt.

Die zweite Anpassung kann in den allgemeinen Fenstereigenschaften erfolgen. Dort soll sich der Rahmenfaktor⁹⁷, welcher standardmäßig auf 0,7 vorgegeben ist, eingliedern.

Zuletzt sollte unter „dyn. Verschattungseigenschaften“ der Transmissionsgrad des Sonnenschutzes angegeben werden können.

Teilflächeneigenschaften

Name: Standard-Fenster ...

Typ: Window

UValue (mit zugewiesenen Randbedingungen): 0,7362 W/m2K

Rahmenfaktor: 0,7 -

Fenstereigenschaften | dyn. Verschattungseigenschaften

Standardfenster ...

SHGC: 0,6000 -

SHGC [-] vs. Einfallswinkel [Grad]

○ Transmissionsgrad aus SHGC berechnen

T_n: 0,73 -

Abb. 36 - Vorschlag: Menü zur Erfassung weiterer Fenstereigenschaften in VICUS

⁹⁷ Der Rahmenfaktor könnte sich gegebenenfalls auch über die Tageslichtsimulation hinaus für den sommerlichen Wärmeschutz als nützlich erweisen.

Bisher wurde die in VICUS vorhandene Geometrie um Parameter ergänzt, welche zur Tageslichtsimulation notwendig sind. Allerdings sind auch Eingaben zu tätigen, welche sich nicht auf bereits vorhandene Inhalte der Software beziehen. Hierfür müssen gänzlich neue Menüs, welche gut auffindbar sind, geschaffen werden.

Alle Angaben bezüglich des Himmels fallen unter diese Kategorie. Sie existieren unabhängig von sonstigen Eingaben und verstehen sich auch nicht als Simulationseinstellungen [vgl. 6.1.2]. Sie weisen lediglich eine inhaltliche Ähnlichkeit zu den Einstellungen „Klima und Standort“ auf. Da dieses Menü jedoch bereits gut ausgefüllt ist und in erster Linie mit thermischen Betrachtungen in Zusammenhang steht, scheint eine Angliederung an dieser Stelle weniger sinnvoll. Stattdessen wird in der linken Übersichtsleiste⁹⁸ ein Reiter „Himmel“ ergänzt.

Wird dieser ausgewählt, öffnet sich ein neues Menü [vgl. Abb. 38] im rechten Bereich. In diesem können alle unter 5.2.1 beschriebenen Angaben bearbeitet oder genauer definiert werden.

Es wurden bereits Felder zur Datenerfassung, welche über die Grundform der Tageslichtsimulation hinaus gehen vorgesehen, um spätere Funktionen, oder Schnittstellen zur bereits vorhandenen Verschattungssimulation einfacher zu implementieren.

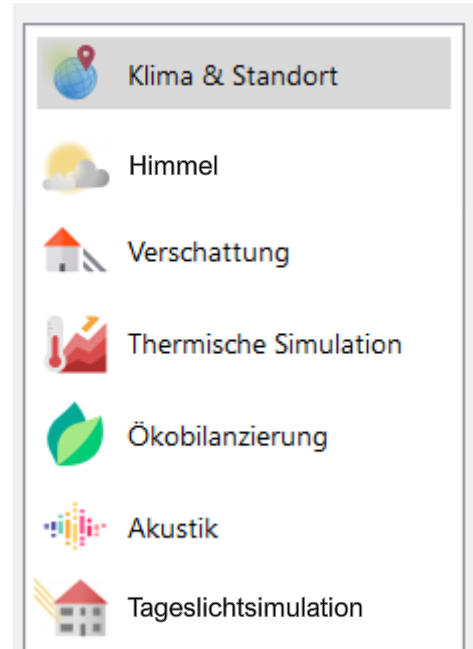


Abb. 37 - Vorschlag - Übersichtsleiste

Himmelsdaten

☒ Aus DIN 17037

Textfilter:

Nation	Hauptstadt	Breiten-grad	Median der äußeren diffusen Be-leuchtungsstärke	Median der äußeren globalen Be-leuchtungsstärke
Zypern	Nicosia	34,88	18 100	43 200
Malta	Valletta	35,54	16 500	33600
Griechenland	Athen	37,90	19 400	35350
Portugal	Lissabon	38,73	18 220	38717
Türkei	Ankara	40,12	19 000	31300
Spanien	Madrid	40,45	16 900	35200
Italien	Rom	41,80	19 200	30900
Rep. Nordmazedonien	Skopje	42,00	15 400	24300
Bulgarien	Sofia	42,73	18 700	22200
Rumänien	Bukarest	44,50	18 200	28500
Kroatien	Zagreb	45,48	17 000	20300
Slowenien	Ljubljana	46,22	17 000	19800

☐ Benutzerdefinierter Wert

Himmelsart

Himmelstyp nach CIE-Standard:

Zeitzone:

Datum:

Uhrzeit:

Abb. 38 - Vorschlag - Menü zur Himmelerfassung

⁹⁸ An der gleichen Stelle wird für Kapitel 6.1.2 auch der Reiter „Tageslichtsimulation“ ergänzt.

6.1.2. Simulationseinstellungen

Neben den direkten Eingabegrößen, die in der Regel Eigenschaften verwendeter Objekte festlegen, sind auch Einstellungen, welche die Simulationsrandbedingungen oder ähnliches definieren, notwendig. Alle diese Einstellungen finden sich unter dem zuvor neu erstellten Reiter „Tageslichtsimulation“ [vgl. Abb. 37].

Bevor die Rahmenbedingungen gestaltet werden können, soll hier eine Auswahl der Räume möglich sein. Diese ist notwendig, da es in der Regel nicht sinnvoll ist, für alle im Gebäude vorhandenen Räume eine Tageslichtsimulation durchzuführen. Ausnahmen könnten zum Beispiel innenliegende Lager oder Flure sein, an die keine Anforderungen gestellt werden, da es sich nicht um Aufenthaltsräume handelt. Hinzu kommt, dass sie als innenliegende Räume ohnehin keine Tageslichtöffnung haben.⁹⁹ In diesem Kontext ist es auch denkbar eine Filterfunktion für das Vorhandensein einer Tageslichtöffnung zu ergänzen, damit alle Räume ohne Fenster oder Oberlicht ausgeschlossen werden.

Diese Auswahl soll in einem separaten Pop-Up Fenster namens „Raumliste“ erfolgen. Dort sind alle Räume listenartig geführt¹⁰⁰ und können nach Namen, sowie Nutzungsprofil gefiltert und sortiert werden. Mit dieser Sortierungsmöglichkeit soll es erleichtert werden, in großen Gebäuden alle Räume der gleichen Kategorie zu erfassen. Die ausgewählten Räume werden, wie in VICUS üblich, in fester Schrift angezeigt.

Id	Name	Nutzungsprofil	Fläche [m²]	Volumen [m³]
60957	Abstellraum	Lager	10.16	30.50
82335	Abstellraum	Lager	10.17	30.50
82115	Aufzug	Aufzug	9.80	29.40
82505	Aufzug	Aufzug	5.34	16.02
82728	Aufzug	Aufzug	10.21	30.62
82909	Aufzug	Aufzug	5.35	16.05
83804	Aufzug	Aufzug	5.70	17.10
83931	Aufzug	Aufzug	5.41	16.23
82411	Besprechung	Seminar/Konferenz	40,7	122,09
83253	Besprechung	Seminar/Konferenz	23,18	69,54
78155	Besprechung	Seminar/Konferenz	44,83	134,48
83555	Besprechung	Seminar/Konferenz	44,83	134,48
83878	Besprechung	Seminar/Konferenz	40,84	122,53
82070	Doppelbuero	Gruppenbuero	23	69,01
82351	Doppelbuero	Gruppenbuero	23,72	71,45
82688	Doppelbuero	Gruppenbuero	23	69,01
82769	Doppelbuero	Gruppenbuero	22,96	68,9
32862	Doppelbuero	Gruppenbuero	22,41	67,22
83012	Doppelbuero	Gruppenbuero	23,18	69,54
83201	Doppelbuero	Gruppenbuero	17 000	19800
33439	Doppelbuero	Gruppenbuero	36,87	110,6
83756	Doppelbuero	Gruppenbuero	23,1	69,3
83908	Doppelbuero	Gruppenbuero	23,56	70,69
84084	Doppelbuero	Gruppenbuero	22,93	68,8
65857	EG Aufzug 01	Aufzug	9,8	39,2
66063	EG Aufzug 02	Aufzug	5,41	21,64
66326	EG Aufzug 03	Aufzug	5,15	20,6
66877	EG Aufzug 04	Aufzug	5,85	23,38
66962	EG Aufzug 05	Aufzug	5,70	22,80
67335	EG Aufzug 06	Aufzug	7,25	29,01

Abb. 39 - Vorschlag- Raumliste zur Raumauswahl

⁹⁹ Zum jetzigen Zeitpunkt ist es nicht möglich, innenliegende Glasflächen zu modellieren. Aufgrund dieses Umstandes ist eine Tageslichtsimulation für innenliegende Räume nicht möglich und müsste zu einem späteren Zeitpunkt ergänzt und dokumentiert werden.

¹⁰⁰ Eine vergleichbare Liste, lediglich ohne die zugewiesenen Nutzungsprofile findet sich bereits unter: Parametrierung der Struktureinheit > Raumeigenschaften

Neben der Raumauswahl soll in diesem Menü auch eine Entscheidung zu den Rendereinstellungen getroffen werden. Konkret kann zwischen den erprobten Stufen „Vereinfacht“, „Genau“ und „Maximal“ aus Kapitel 5.3 gewählt werden. Gleichzeitig ist ein Button „Erweiterte Einstellungen“ vorzusehen. Über diesen öffnet sich ein Pop-Up Fenster, in welchem die einzelnen Radiance Parameter händisch bearbeitet werden können. Diese Option ist für den allgemeinen Gebrauch nicht notwendig, kann aber bei gewissen Anwendungsfällen für Nutzer mit Radiance Kenntnissen nützlich sein.

Außerdem soll hier das Mindestraster für die Punktlisten festgelegt werden. Wie in Kapitel 5.1.3 beschrieben, wird der maximale Abstand der Punkte innerhalb des Gitters definiert, über welchen später das tatsächliche Raster generiert wird.

Anschließend folgt die Festlegung der Rahmenbedingungen. Dazu muss zunächst eine Auswahl über die optischen Eigenschaften der Bauteile stattfinden: Es werden entweder die Anzeigefarben, oder die zuvor hinterlegten Primitiven als maßgeblich definiert. Außerdem muss festgelegt werden, mit welcher Beleuchtungsstärke zu arbeiten ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die globale Beleuchtungsstärke nur für Räume mit ausschließlich „*horizontale[n] Tageslichtöffnungen mit lichtstreuenden Verglasungen*“¹⁰¹ anzuwenden ist.

Zuletzt erfolgt wie für die sonstigen Simulationen auch, eine Auswahl über die auszugebenden Größen. Hier besteht die Möglichkeit, durch das Setzen eines Hakens zwischen Ergebnislisten, Slices, einer Raumübersicht mit Empfehlungsstufen und einem vorkonfigurierten Bericht [vgl. 6.2.2] zu wählen.

Abb. 40 - Vorschlag - Menü "Tageslichtsimulation"

¹⁰¹ (DIN EN 17037 2022, S. 18 Tabelle A.4)

6.2. Ausgabe

Unter Ausgabegrößen werden in der Regel all jene verstanden, welche als (End-)Ergebnis eines Prozesses, in diesem Falle der Simulation, betrachtet werden können. Im Folgenden werden jedoch nicht ausschließlich die erzeugten Ergebnisse, sondern auch deren formale Weiterverarbeitung zu einem Musterbericht betrachtet.

6.2.1. Ausgabegrößen

Die Ausgabegrößen sind jene, welche in Abb. 40 unter dem Punkt „Ausgabe“ geführt sind. Beim ersten Punkt „Ergebnisliste“ handelt es sich um die nahezu unverarbeitete Radiance Ausgabe. Ihr Inhalt setzt sich aus einer Header Zeile, welche die folgenden Größen definiert und den entsprechenden Simulationsergebnissen zusammen. Diese Liste wird raumweise erstellt und beinhaltet die Punktkoordinaten, sowie die errechneten Beleuchtungsstärken in Lux [vgl. 5.1.3 & 5.3.2]. Für den bekannten Beispielraum ergibt sich Folgendes:

<i>Px</i>	<i>Py</i>	<i>Pz</i>	<i>Illuminance [lx]</i>
-4,99	5,00	0,85	282,43
-4,98	5,01	0,85	280,30
-4,96	5,02	0,85	282,10
-4,95	5,04	0,85	285,01
-4,94	5,05	0,85	289,88
...			

Die Empfehlungsstufen werden in Form einer Übersichtsliste (.tsv) ausgegeben. Die Form ist dabei für die Beleuchtungsstärke und den Tageslichtquotienten identisch, lediglich der Inhalt unterscheidet sich. Grundlage für die Ausgabe ist Kapitel 5.4. Beispielhaft könnte die generierte Liste wie folgt aussehen:

<i>Id</i>	<i>Name</i>	<i>Empfehlungsstufe</i>
82411	Besprechung	Mittel
83253	Besprechung	Gering
82070	Doppelbuero	Hoch
82351	Doppelbuero	Mittel
82688	Doppelbuero	Mittel
...		

Zusätzlich zu der Raumübersichtsliste wird noch eine weitere Liste mit den berechneten Flächenanteilen generiert. In dieser folgen auf Raumname und ID jeweils die Flächenanteile in Prozent zugeordnet zum betrachteten Schwellenwert¹⁰². Am Beispiel des Tageslichtquotienten könnte diese Auflistung wie folgt aussehen:

```

82411 Besprechung
    0,7  100
    2,2  96,7
    3,6  58,2
    5,4  44,4
83253 Besprechung
...
    
```

Sollen Slices ausgegeben werden, wird basierend auf der Raumkategorie (entsprechend dem Nutzungsprofil) ein Ordner erstellt, in dem die Bilddateien der zugehörigen Räume abgelegt werden. Diese werden nach Raumname und ID benannt: *ID_Raumname.png*.¹⁰³

Die Datei *82411_Besprechung.png* würde beispielsweise im Ordner *Seminar-Konferenz* liegen.

¹⁰² Je nach Auswahl, die Beleuchtungsstärke [lx] oder der Tageslichtquotient [%] in Abhängigkeit der Außenraumbeleuchtungsstärke.

¹⁰³ Das PNG-Format ist hier nur Platzhalter für ein mögliches Bildformat. Grund dafür ist die Abhängigkeit vom gewählten Verfahren zur Slice Erstellung [vgl. 5.3.3]

6.2.2. Bericht

Mit den zuvor beschriebenen Daten ist es möglich einen vollständigen Bericht zur Tageslichtversorgung innerhalb eines Gebäudes zu verfassen. Damit auch dieser Schritt möglichst automatisiert erfolgen kann, wird im Folgenden ein Musterbericht beschrieben, welcher von VICUS komplett automatisch erstellt und später vom Nutzer editiert werden kann.

Bisher gibt es noch keine vollautomatisierte Berichterstellung in VICUS. Folglich gibt es noch keine allgemeine Datenerfassung zum bearbeiteten Projekt. Diese allgemeinen Daten sind jedoch zentraler Bestandteil eines Berichts. Sie erscheinen in der Regel auf dem Deckblatt oder verkürzt in Kopf, oder Fußzeile.

Da der Bericht im Anschluss noch editierbar sein soll, ist es an dieser Stelle nicht zielführend, die Dokumentstruktur soweit individualisierbar zu gestalten, dass Unternehmen ihre ganz eigenen Format-Vorlagen erstellen können. Trotzdem sollten allgemeine Angaben erfasst und auf alle in VICUS erstellbaren Dokumente übertragen werden.

Dazu ist unter dem Menüpunkt „Bearbeiten“ ein neuer Unterpunkt namens „Projektinformationen“ zu ergänzen. Dort sind dann die folgenden Angaben zu hinterlegen:

Projekt:

- *Projektname*
- *Projekt-Nummer*
- *Kurzbeschreibung*
- *Titelbild¹⁰⁴*

Grundstück:

- *Adresszeile 1*
- *Adresszeile 2*
- *Adresszeile 3*

Bauherr/Planer/Auftraggeber:

- *AG Name*
- *AG Firma*
- *AG Adresszeile 1*
- *AG Adresszeile 2*
- *AG Adresszeile 3*
- *AG E-Mail*
- *AG Telefon*

Ingenieur/Auftragnehmer:

- *AN Name*
- *AN Firma*
- *AN Adresszeile 1*
- *AN Adresszeile 2*
- *AN Adresszeile 3*
- *AN E-Mail*
- *AN Telefon*

¹⁰⁴ Für das Titelbild soll eine lokale Datei ausgewählt werden. Zu empfehlen sind Objektfotos, Renderings oder Aufnahmen vom VICUS-Modell.

Die meisten dieser Angaben finden sich auf der Titelseite wieder:

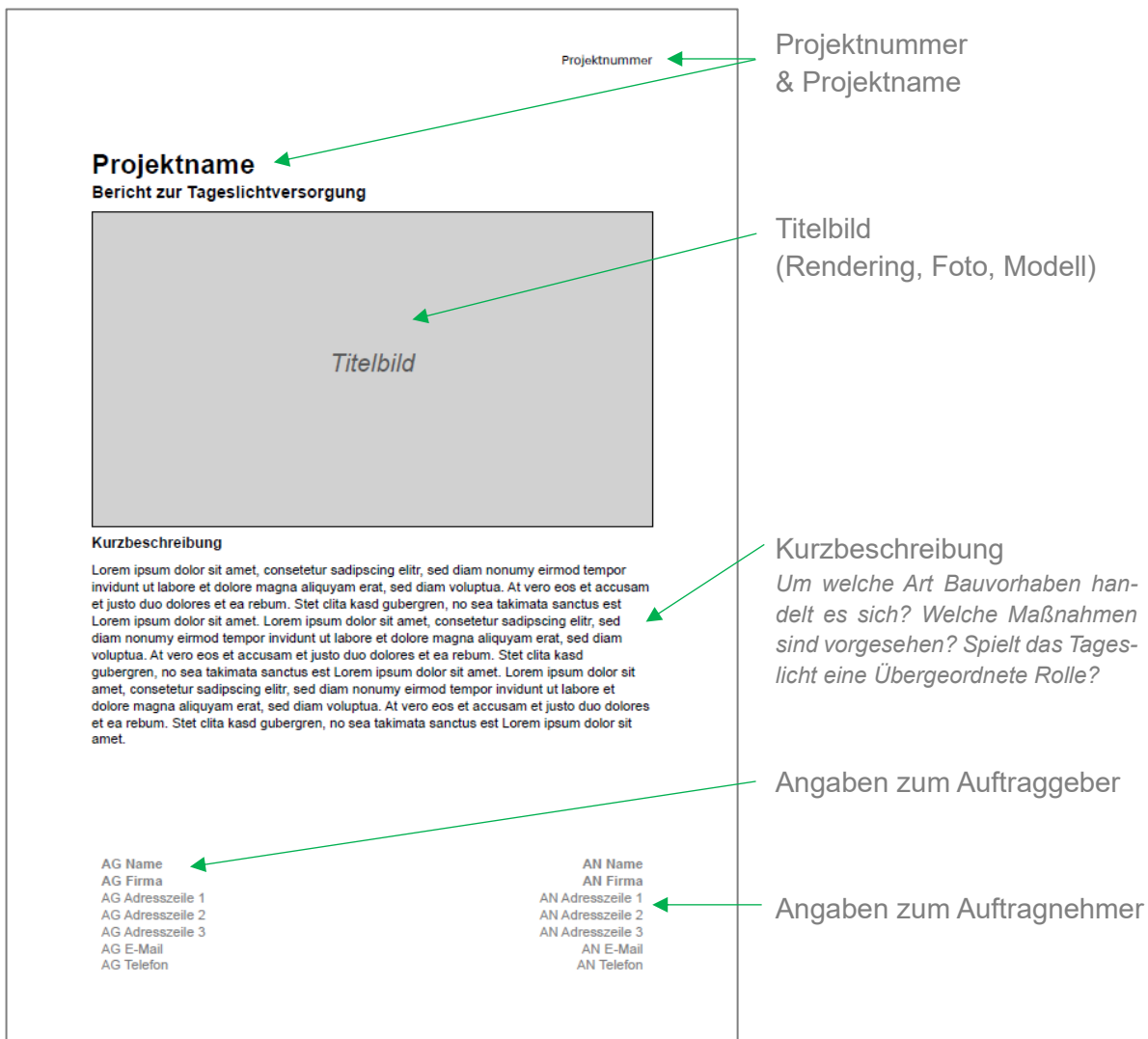


Abb. 41 - Musterbericht: Titelblatt

Die Funktion des Titelblattes ist eine schnelle Übersicht über das untersuchte Vorhaben. Im Fokus stehen daher Projektname und ein Titelbild, welche schnell visuell klar machen, worum es im folgenden Dokument geht.¹⁰⁵ Des Weiteren sollen alle Beteiligten, sowie eventuelle Besonderheiten erkennbar sein. Diese müssen jedoch nicht auf den ersten Blick ersichtlich sein und ordnen sich daher in ihrer Formsprache unter.

Auf das Titelblatt folgt in der Regel eine Leerseite, da es sich hier im gedruckten Zustand um die Rückseite dessen handelt. Hier wäre es möglich einen Verweis [vgl. Abb. 42] anzuordnen, welcher auf die verwendete Software mit Version und sonstigen Eckdaten verweist.

Die erste Seite mit tatsächlichem Inhalt ist das folgende Inhaltsverzeichnis, welches übersichtlich alle Inhalte listet und die Teilüberschriften mit Seitenzahlen verknüpft.

VICUS Software GmbH

Shaping the Future of Energy Software for Buildings and Districts

Version XXX

c/o TU Dresden

Helmholtzstraße 10

01069 Dresden

info@vicus-software.com

Abb. 42 - Musterbericht: Infokasten zur Software

¹⁰⁵ Für das Titelbild eignet sich besonders eine VICUS-Übersicht in der die Slices in den Räumen angeordnet sind und die entsprechende Etage geschnitten wird. Dabei handelt es sich um das Endergebnis der Slices, welche wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben, weitere Betrachtungen benötigen.

The diagram illustrates the structure of a document, likely a technical report or standard, with annotations pointing to specific elements. The document structure is as follows:

- Projektname
- Projektnummer
- Inhalt
 - Normgrundlage DIN 170374
 - Eingangsdaten6
 - Ergebnisse8
 - Übersicht der Empfehlungsstufen8
 - Einzelauswertung von Räumen.....9
 - Raum 19
 - Raum 210
 - Raum 311
 - Raum 412
 - Raum 513
 - Bewertung.....14

Annotations (green arrows):

- Projektname (points to the top left of the document structure)
- Projektnummer (points to the top right of the document structure)
- Inhalt: (points to the 'Inhalt' section header)
- Seitenzahl (points to the page number '3' at the bottom left)

Abb. 43 - Musterbericht: Inhaltsverzeichnis

Beginnend mit dem Inhaltsverzeichnis wird außerdem eine einheitliche Formatierung für Kopf- & Fußzeile eingeführt. Auf jeder folgenden Seite befinden sich ganz oben der Projektname und die Projektnummer. Angenommen es werden in der Praxis nur einzelne Seiten gedruckt, wird so eine problemlose Zuordnung ermöglicht. Außerdem wird in der unteren, jeweils äußeren Ecke die aktuelle Seitenzahl ergänzt.

Nach dem Inhaltsverzeichnis folgt eine kurze Einführung in die DIN EN 17037. Ziel ist es dabei nicht alle Inhalte der Norm zu erfassen und wiederzugeben. Der Fokus liegt auf für die Simulation notwendigen Begriffen sowie allgemeinen Anforderungen, welche die Norm vorgibt. Dazu zählen beispielsweise die Beschreibung der Bezugsfläche und die Kennwerte des Himmels. Hinzu kommt eine Erläuterung bezüglich des Auswertungsschemas nach Empfehlungsstufen inklusive der Begriffserklärung bezüglich der Ziel- und Mindestzielbeleuchtungsstärken.

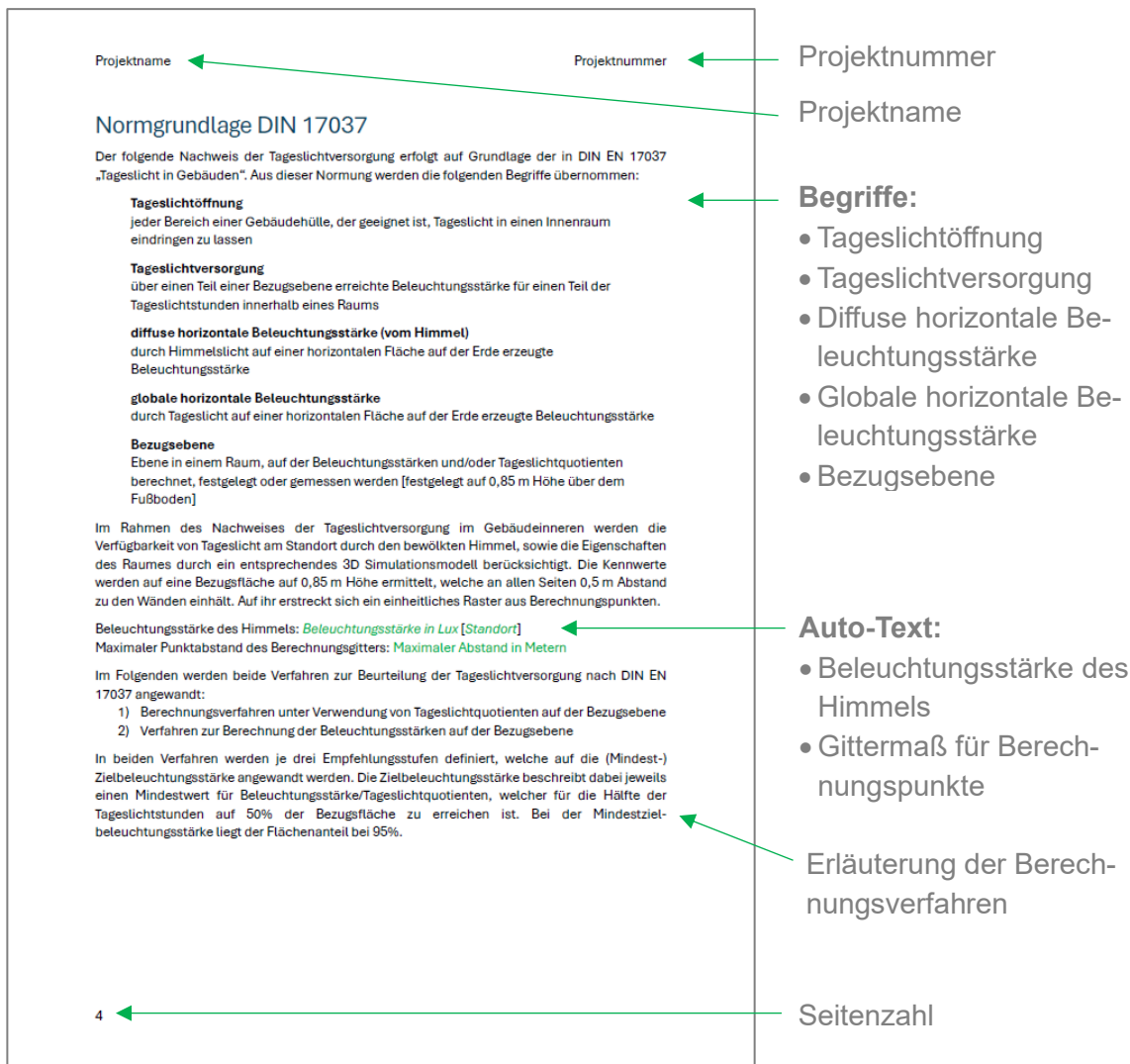


Abb. 44 - Musterbericht: Normgrundlage DIN EN 17037

In Anhang 16 folgt der dargestellte Text in lesbarer Ausführung. Dieser dient nur als Vorschlag und muss bei zukünftiger Anpassung des Simulationsalgorithmus, oder Änderungen der Normgrundlage angepasst werden. Die Inhalte entsprechen der Aufschlüsselung in Abb. 44.

Anschließend beginnt der eigentliche Bericht. Um die späteren Ergebnisse und Bewertungen zu verstehen, ist eine kurze Einführung in das Projekt notwendig. Da auf dem Titelblatt bereits eine Kurzbeschreibung angeordnet ist, welche Art und Umfang des Bauvorhabens ausreichend erläutern sollte, wird auf Inhalte dieser Art verzichtet.

Stattdessen erfolgt eine Erläuterung der Eingangsdaten zur Simulation [vgl. Abb. 45]. Dabei handelt es sich um einen Fließtext, welcher nicht automatisch generiert wird. Dieser ist im Nachgang händisch vom Anwender der Software zu ergänzen.

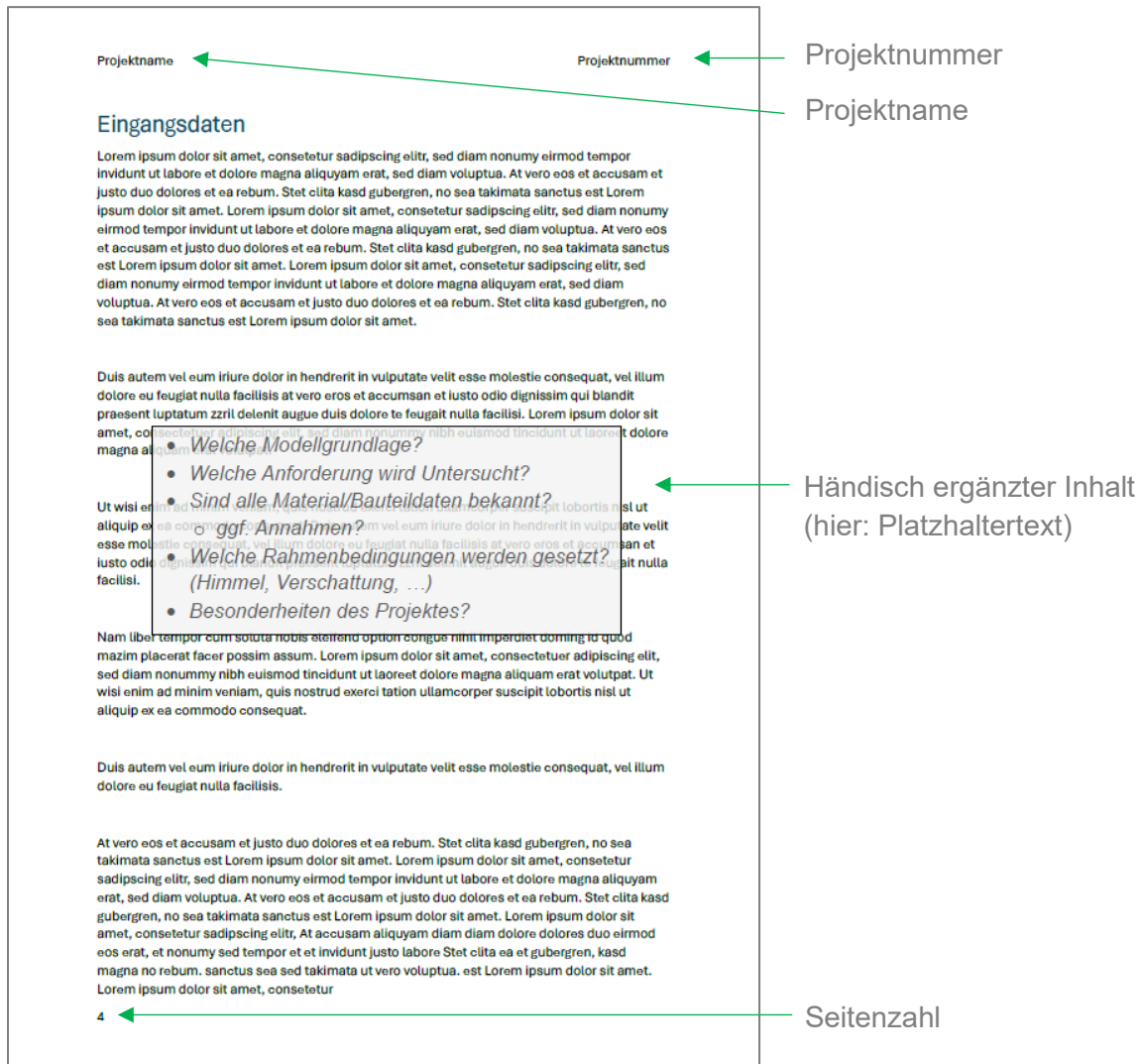


Abb. 45 - Musterbericht: Eingangsdaten

Inhaltlich sollen in diesem Text alle Grundlagen, welche zur Erstellung der Simulation verwendet wurden, beschrieben werden. Es ist konkret folgendes zu erläutern:

- Auf welcher Modellgrundlage basiert das Simulationsmodell?
 - Handelt es sich um einen älteren Stand? Treten sonstige Abweichungen auf?
- Auf welche Anforderungen ist das Gebäude zu prüfen?
 - Welche Räume können unberücksichtigt bleiben?
- Sind alle Daten zur Modellerstellung bekannt, oder werden Annahmen getroffen?
 - Optische Oberflächeneigenschaften der Materialien?
 - Transmissionsgrad & Geometrie der Fenster?
 - Zu erwartende Verschmutzung im Gebäudebetrieb?
 - Wird verbauter Sonnenschutz berücksichtigt?
- Welche Rahmenbedingungen beeinflussen die Simulation?
 - Kennwerte des verwendeten Himmels?
 - Umgebungsverschattung durch Gebäude, Vegetation, etc.?
- Gibt es sonstige Besonderheiten des Projektes?

Projektname

Projektnummer

Projektname

Ergebnisse

Übersicht der Empfehlungsstufen

<u>Id</u>	<u>Name</u>	<u>Empfehlungsstufe</u>	<u>Einzelbetrachtung</u>
82411	Besprechung	Mittel	
83253	Besprechung	Gering	
82070	Doppelbuero	Hoch	
82351	Doppelbuero	Mittel	
82688	Doppelbuero	Mittel	
82411	Besprechung	Mittel	
83253	Besprechung	Gering	
82070	Doppelbuero	Hoch	
82351	Doppelbuero	Mittel	
82688	Doppelbuero	Mittel	
82411	Besprechung	Mittel	
83253	Besprechung	Gering	
82070	Doppelbuero	Hoch	
82351	Doppelbuero	Mittel	
82688	Doppelbuero	Mittel	
82411	Besprechung	Mittel	
83253	Besprechung	Gering	
82070	Doppelbuero	Hoch	
82351	Doppelbuero	Mittel	
82688	Doppelbuero	Mittel	
82411	Besprechung	Mittel	
83253	Besprechung	Gering	
82070	Doppelbuero	Hoch	
82351	Doppelbuero	Mittel	
82688	Doppelbuero	Mittel	

Raumliste aus:

- Raum ID
- Raumnamen
- Empfehlungsstufe
- Verweis auf Einzelbetrachtung

Seitenzahl

6

Abb. 46 - Musterbericht: Ergebnisse - Übersicht der Empfehlungsstufen

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen der Simulation. Da es in der Regel nicht sinnvoll ist, im Rahmen des Berichts alle einzelnen Beleuchtungsstärken mit Raumkoordinaten anzugeben, wird diese Ausgabe nicht direkt verwertet. Stattdessen erfolgt zunächst eine Übersicht in Form der Raumliste. Hier werden alle simulierten Räume und ihre erreichte Empfehlungsstufe nach ID sortiert aufgeführt. Maßgebend ist dabei stets die niedrigste erreichte Empfehlungsstufe.

Wird im Rahmen der Ausgabe der „vorkonfigurierte Bericht“ [vgl. Abb. 40, S. 59] ausgewählt, öffnet sich automatisch ein Dialogfenster, welches dem aus Abb. 39, S. 58 zur Raumauswahl, ähnelt. Dort können alle Räume markiert werden, welche im Bericht einer Einzelbetrachtung unterzogen werden sollen. Diese werden dann in der oben dargestellten Tabelle mit einer Seitenzahl versehen und erscheinen außerdem im Inhaltsverzeichnis.

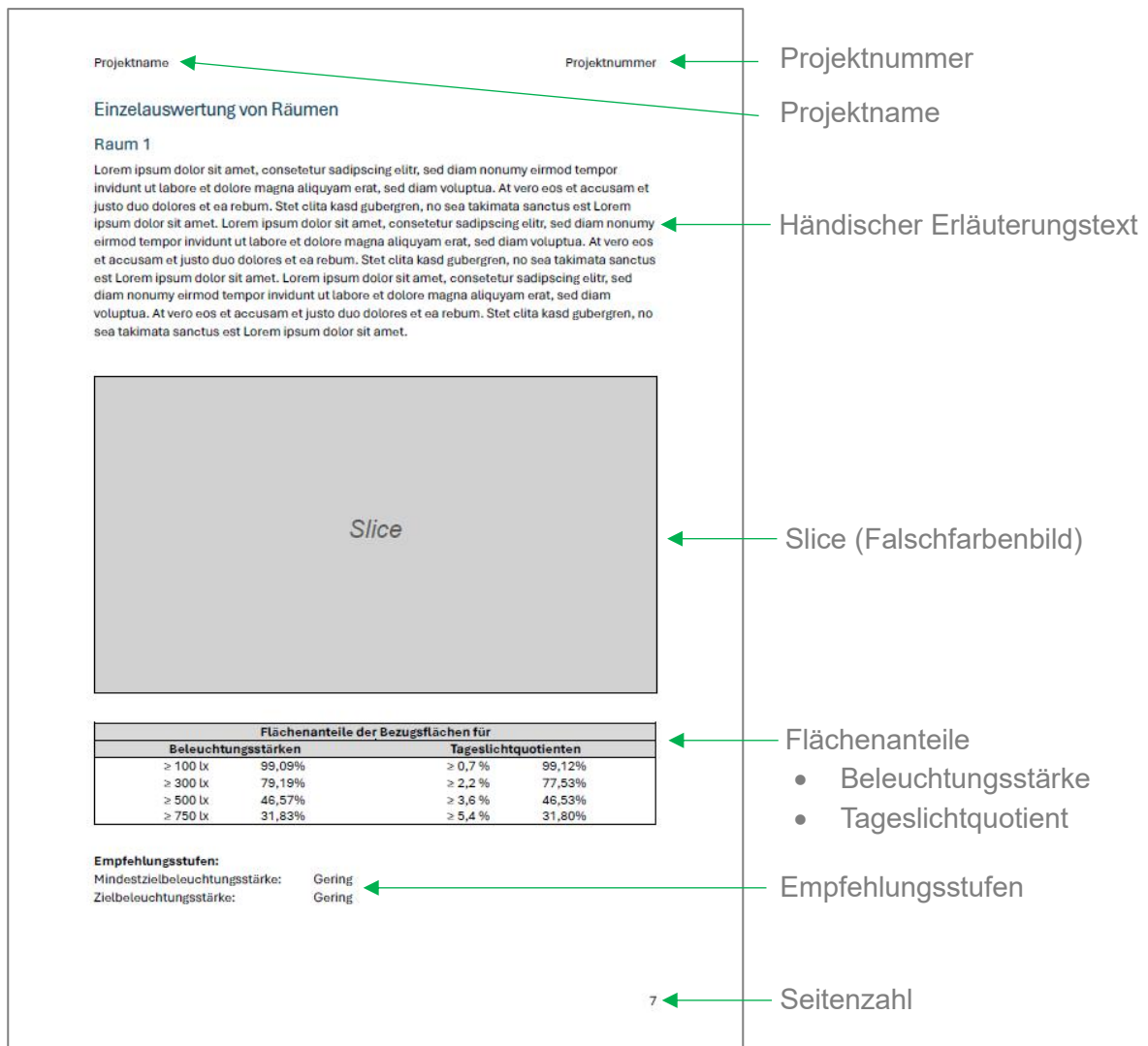


Abb. 47 - Musterbericht: Einzelauswertung eines Raumes mit Slice

Für alle Räume, die einer Einzelauswertung unterzogen werden sollen, wird eine Seite in der Art von Abb. 47, mit dem Raumnamen als Überschrift, erstellt. Auf dieser ordnet sich ein händisch zu ersetzender Platzhaltertext an. In diesem könnte beispielsweise beschrieben werden, warum der Raum bestimmte Vorgaben nicht erfüllt, was verbessert werden könnte, oder welche Besonderheiten sonstiger Art aufgefallen sind.

Gestärkt wird dieser Text durch die Anordnung des Slices. Dieses gibt visuell schnellen Rückschluss über die Helligkeitsverteilung im Raum. Es ist sinnvoll an dieser Stelle ein Slice mit Legende zu verwenden, damit die abgebildeten Farben den entsprechenden Beleuchtungsstärken zugeordnet werden können.

Zuletzt werden die Flächenanteile der Bezugsfläche an den Schwellenwerten für Beleuchtungsstärken bzw. Tageslichtquotienten aufgeführt. Sie ermöglichen es abzuschätzen, wie nah der Raum an der jeweils höheren oder niedrigeren Empfehlungsstufe liegt. Dadurch ist ein Rückschluss auf den notwendigen Aufwand zur Verbesserung, bzw. die mögliche Gestaltungsfreiheit ohne Verschlechterung denkbar.

Zuletzt erfolgt die Aufschlüsselung der Empfehlungsstufen nach Mindestzielbeleuchtungsstärke und Zielbeleuchtungsstärke. Dadurch kann in Verbindung mit dem Slice beurteilt werden, ob der Raum grundsätzlich mehr Licht, oder lediglich eine bessere Lichtverteilung benötigt.

Diagram illustrating the structure of a template page for 'Bewertung' (Evaluation). The page contains placeholder text and a central box with evaluation questions. Green arrows point from labels on the right to specific elements on the page:

- Projektname** (Project Name) points to the top left header area.
- Projektnummer** (Project Number) points to the top right header area.
- Projektname** points to the main title 'Bewertung'.
- Händisch ergänzter Inhalt (hier: Platzhaltertext)** (Handwritten additional content, here: placeholder text) points to the central box containing evaluation questions.
- Seitenzahl** (Page Number) points to the bottom left footer area.

The central box contains the following evaluation questions:

- Erfüllen die Räume die notwendigen Anforderungen?
- Gibt es Ausnahmen?
- Was sind Gründe für die erhaltenen Ergebnisse?

Abb. 48 - Musterbericht: Bewertung

Den Abschluss des Berichtes bildet das Kapitel „Bewertung“. Dieses ist ebenfalls händisch durch den Anwender zu füllen, da der Fließtext nicht automatisch generierbar ist. Es handelt sich dabei um einen Optionalen Inhalt, welcher nicht zwingend Teil des Berichtes sein muss. Inhaltlich erfolgen hier eine kurze Zusammenfassung sowie eine qualitative Einordnung der Ergebnisse. Es soll beurteilt werden, ob das Gebäude alle notwendigen Anforderungen erfüllt. Falls dies nicht der Fall ist, sind die Gründe zu benennen. Ausnahmen sollten aufgeführt und Verbesserungsvorschläge erläutert werden.

7. Anwendung an Beispielgebäude

In den folgenden Kapiteln sollen die bisher beschriebenen Kenntnisse und Abläufe anhand eines Beispielgebäudes geprüft werden. Dabei wird sich inhaltlich grob an der Vorgabe des Musterberichtes orientiert, wobei die inhaltliche Aufschlüsselung der DIN EN 17037 beispielsweise übergangen wird, da sie in der Arbeit bereits umfassend erläutert wurde.

In Kapitel 8 folgt dann eine kurze Erläuterung zur Funktionalität des bisher beschriebenen Prozesses mit Ausblick auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten, welche die hier beschriebene Grundfunktionalität überschreiten.

7.1. Kurzbeschreibung

Betrachtet wird das Fakultätsgebäude II der Goethe-Universität in Frankfurt am Main, welches 2007 von Müller Reimann Architekten geplant und 2015 fertiggestellt wurde. Das Gebäude ist Teil des Campus Westend am Theodor-W.-Adorno-Platz.



Abb. 49 - Standort Fakultätsgebäude II der Goethe Universität (genordeter Kartenausschnitt)¹⁰⁶

Der kubische Bau mit zwei Innenhöfen verfügt über ca. 61.700 m² Brutto-Geschossfläche (BGF), verteilt auf insgesamt sechs Etagen und eine Tiefgarage. Die Hauptnutzer sind Studierende und Mitarbeiter der Fakultät für Psychologie, Erziehungs- und Gesellschaftswissenschaften. Daran orientiert, umfasst das Raumprogramm primär verschiedene Bürotypen, Seminarräume, eine Bibliothek mit Lesesaal sowie übliche Flächen für Sanitär, Erschließung und Technik.

¹⁰⁶ (Google 2025)

7.2. Eingangsdaten

Simulationsgrundlage bildet ein mit ArchiCAD 27 erstelltes 3D-Gebäudemodell, welches im IFC-Format (Industry Foundation Classes) in die Software VICUS importiert wurde. Dabei werden nur die IFC-Spaces übernommen, was bedeutet, dass ausschließlich die vereinfachte Gebäudegeometrie in Form von Polygonen vorliegt. Die Fensterflächen wurden anschließend vereinfacht und auf Basis des Fensterflächenanteils innerhalb der Wände, ergänzt.

Neben dem Gebäude ordnen sich außerdem einige Verschattungsobjekte in Form von Nachbarbebauung, Vegetation oder Ähnlichem an. Da diese einen wesentlichen Einfluss auf die Belichtungsmöglichkeiten haben, werden sie in VICUS als 2D-Flächen nachmodelliert.

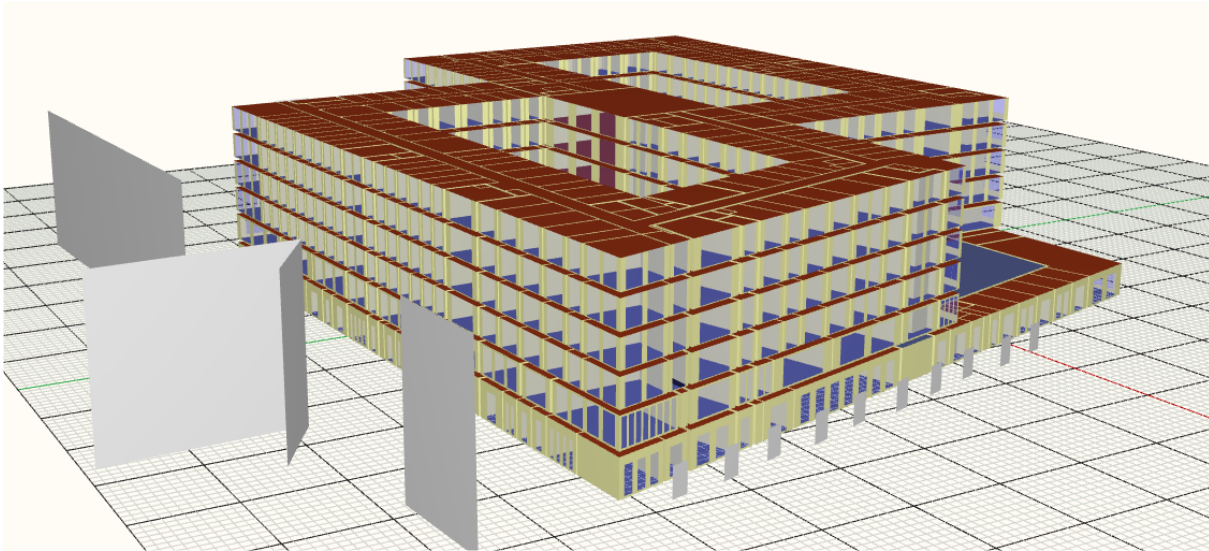


Abb. 50 - Verschattungselemente (grau) um das bauphysikalische Simulationsmodell

Die vorhandene Gebäudegeometrie wird mit Materialparametern, wie in Anhang 17 bestückt. Dadurch werden für die Simulation grundlegende, visuelle Eigenschaften definiert. Dazu zählen vor allem die Farben & Oberflächenbeschaffenheit der opaken Bauteile, sowie der Transmissionsgrad der Fenster. Um die Zuordnung der Materialien zu erleichtern, werden drei Raumgruppen definiert, welche einheitliche Materialien für die gleichen Bauteile verwenden.

Aufgrund der Größe des Gebäudes, wird im Folgenden nur ein Ausschnitt des 2. Obergeschosses betrachtet. Dafür wird eine Ecksituation ausgewählt, welche in Abb. 51 farblich hervorgehoben ist. In Anhang 18 erfolgt eine genauere Aufschlüsselung inklusive der Raumnamen.

Im Rahmen dieser Vereinfachung wird auch die Modellgrundlage angepasst, um die zu verarbeitenden Datenmengen zu reduzieren. Alle nicht betrachteten Räume werden entfernt und in Form der Hüllflächenkontur durch 2D Polygone ersetzt. Das Ergebnis der Vereinfachung, sowie die Materialzuordnung ist in Abb. 52 dargestellt.



Abb. 51 - Simulationbereich des Beispielgebäudes

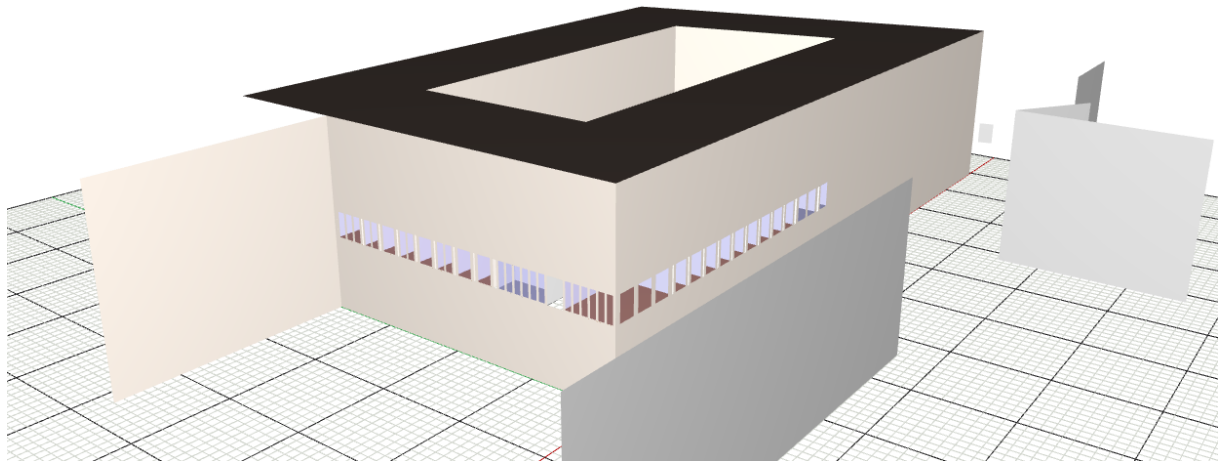


Abb. 52 - Vereinfachtes Simulationsmodell in VICUS¹⁰⁷

Es wird mit einem bewölkten Himmel nach CIE-Standard gearbeitet. Da vorwiegend vertikale Öffnungen maßgeblich für das Gebäude sind, wird nach DIN EN 17037 für den Standort Deutschland ein Median der äußeren diffusen Beleuchtungsstärke ($E_{v,d,med}$) von 13.900 lx angesetzt. Der Inhalt der Himmelsdatei gestaltet sich wie rechts dargestellt.

Nachgewiesen werden die Empfehlungsstufen nach DIN EN 17037, sowie die Helligkeitsverteilung in ausgewählten Räumen. Auswertungsvorlage ist dabei der Musterbericht aus Kapitel 6.2.2. Abweichend vom Musterbericht werden im Folgenden alle vier Simulationsvarianten betrachtet, sodass jeweils vier Ergebnisse/Empfehlungsstufen vorliegen.

Zusätzlich erfolgt eine Untersuchung bezüglich der Parametrierungsstufen aus Kapitel 5.3.1. Bei dieser Betrachtung ist eine Validierung auf Basis mehrerer Räume das Ziel. Dabei soll die Funktionalität, der am Beispielraum erprobten Parameter tiefergehend geprüft werden.

```
void brightfunc skyfunc
2 skybr skybright.cal
0
3 2 3.178e+01 4.944e+00

skyfunc glow skyglow
0
0
4 .85 1.04 1.2 0

skyglow source sky
0
0
4 0 0 1 180

skyfunc glow groundglow
0
0
4 .8 1.1 .8 0

groundglow source ground
0
0
4 0 0 -1 180
```

Insgesamt werden vier verschiedene Konfigurationen des Beispielgebäudes simuliert und anschließend ausgewertet:

- Raumgroße Bezugsfläche & genaue Parametrierung [Var 1]
- Raumgroße Bezugsfläche & vereinfachte Parametrierung [Var 2]
- Bezugsfläche mit 0,5 m Wandabstand & genaue Parametrierung [Var 3]
- Bezugsfläche mit 0,5 m Wandabstand & vereinfachte Parametrierung [Var 4]

¹⁰⁷ Die getätigten Vereinfachungen sind bei Verwendung des fertigen Algorithmus nicht notwendig. Sie dienen hier lediglich der händischen Nachvollziehbarkeit der einzelnen Simulationsschritte.

7.3. Ausgangsdaten

Die Auswertung der Simulationsergebnisse soll im ersten Schritt übersichtsweise erfolgen. Dazu sind in Abb. 53 die verschiedenen Modellübersichten mit integrierten Slices dargestellt. Die Slices wurden aktuell als Fotomontage auf Höhe der Raumdecken im Modell ergänzt. Die Integration in VICUS, welche auch den Modellschnitt auf Höhe der Bezugsebene involviert, ist Teil einer separaten Betrachtung zur Slice-Erstellung.

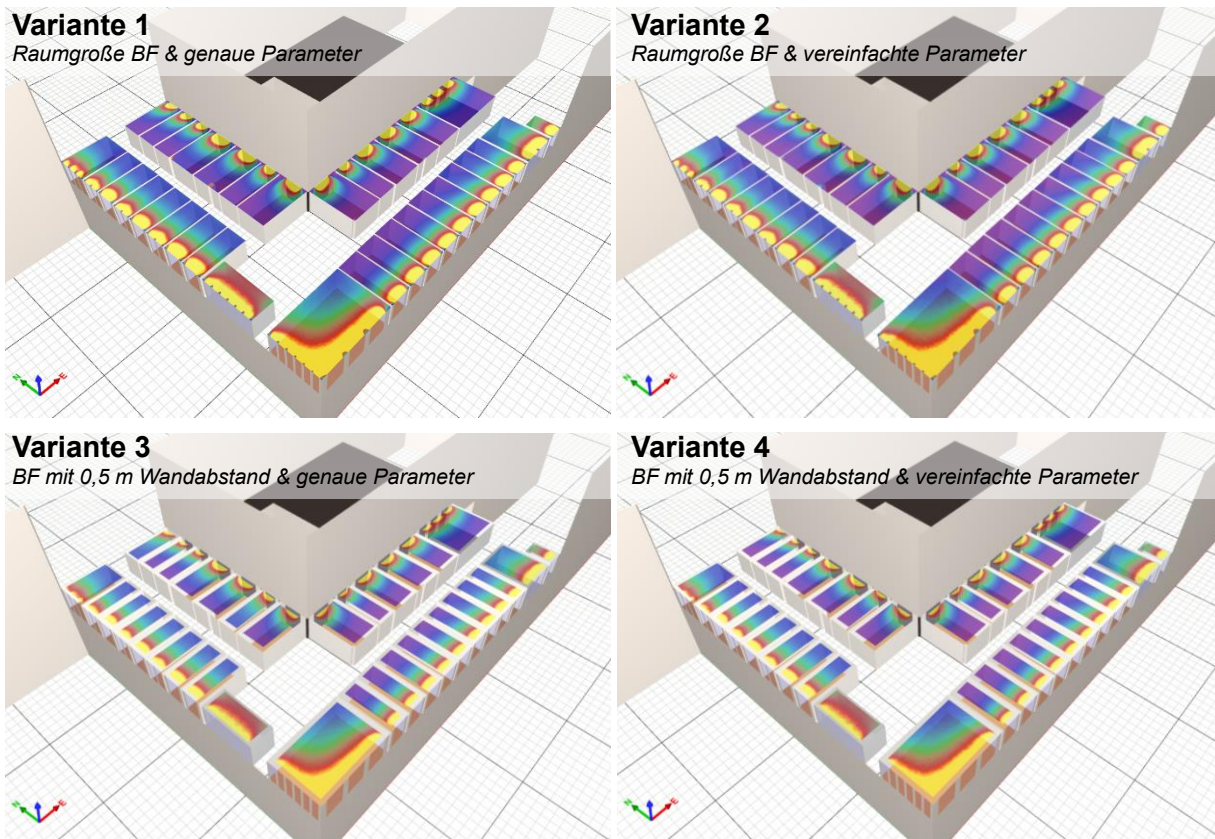


Abb. 53 - Beispielgebäude: Modellübersicht Slices der 4 Varianten

In Abb. 53 sind die wesentlichen Unterschiede zwischen den Varianten erkennbar. Am auffälligsten ist dabei die Größe der Slices. Während diese sich in Varianten 1 & 2 über die gesamte Raumgröße erstrecken, ist in Varianten 3 & 4 ein Versatz zu erkennen. Durch diesen gehen an einigen Stellen Informationen zu Fensteranzahl und -position verloren.

Weniger auffällig ist der Unterschied zwischen den genauen und vereinfachten Parametrierungen. Dieser könnte bezüglich der Slice Erstellung womöglich vernachlässigt werden. Bei sehr genauer Betrachtung fällt jedoch eine leichte Verschiebung der Farbwerte auf. Grund dafür sind die geringeren Beleuchtungsstärken in den vereinfachten Varianten der Simulation. Folglich erfolgt die Farbverschiebung entlang der Skala nach unten.

Bezüglich des Gebäudes selbst wird deutlich, dass die fensternahen Bereiche stets sehr gut belichtet werden. Die innenliegenden Raumabschnitte können diese Qualität aufgrund recht großer Raumtiefen jedoch nicht aufrechterhalten. Es kommt in fast allen Räumen zu einem hohen Gefälle der Beleuchtungsstärke.

Hinzu kommt der Einfluss der Verschattung im Innenhof und an der Gebäudeecke [vgl. Abb. 52, S. 71]. Hier verschiebt sich der innere Raumabschnitt von einem dunklen Blau zu Violett, was für eine geringere Beleuchtungsstärke aufgrund eben dieser Verschattung spricht.

ID	Raumname	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4	Verweis
62021	Besprechung 01	Gering	Gering	Gering	Gering	77
62140	Besprechung 02	-	-	-	-	
61850	Besprechung 03	-	-	-	-	
60117	Einzelbuero 01	-	-	-	-	74
60359	Einzelbuero 02	-	-	-	-	
61610	Einzelbuero 03	-	-	-	-	
61438	Einzelbuero 04	-	-	-	-	
60595	Einzelbuero 05	-	-	-	-	
61223	Einzelbuero 06	-	-	-	-	
61841	Einzelbuero 07	-	-	-	-	
60286	Einzelbuero 08	-	-	-	-	
61093	Einzelbuero 09	-	-	-	-	76
60383	Einzelbuero 10	-	-	-	-	79
60456	Einzelbuero 11	-	-	Gering	-	
62690	Einzelbuero 12	-	-	-	-	
60622	Einzelbuero 13	-	-	-	-	
60693	Einzelbuero 14	-	-	-	-	
60201	Einzelbuero 15	-	-	-	-	
62060	Einzelbuero 16	-	-	-	-	80
61565	Einzelbuero 17	-	-	-	-	82
60392	Einzelbuero 18	-	-	-	-	
62109	Einzelbuero 19	-	-	-	-	
61132	Einzelbuero 20	-	-	-	-	
61280	Einzelbuero 21	-	-	-	-	
61598	Doppelbuero 01	-	-	-	-	86
62359	Doppelbuero 02	-	-	-	-	
61806	Doppelbuero 03	-	-	-	-	85
62679	Doppelbuero 04	-	-	-	-	83
62359	Doppelbuero 05	-	-	-	-	
60989	Doppelbuero 06	-	-	-	-	
60341	TH 01	-	-	-	-	
60782	TH 02	Mittel	Mittel	Hoch	Mittel	
61331	Lager	Gering	Gering	Mittel	Mittel	
61162	Sanitaer	-	-	-	-	88

Tab. 21 - Beispielgebäude: Übersicht der erreichten Empfehlungsstufe der vier Varianten

In der obigen Übersicht wird deutlich, dass die vier Betrachtungsvarianten maßgebliche Auswirkungen auf das Ergebnis der Nachweisführung haben. Zwar schneidet das Gebäude in allen Fällen eher schlecht ab, da der Großteil der Räume keine der geforderten Empfehlungsstufen zur Tageslichtversorgung erreicht, jedoch ist gerade in Räumen mit erreichten Stufen ein Unterschied vorhanden.

Grund dafür, ist in erster Linie die Definition der Bezugsfläche. Erstreckt sich diese über den gesamten Raum, werden mehr schwer zu beleuchtende Randbereiche berücksichtigt, welche die notwendigen Flächenanteile reduzieren. Bezüglich der Simulationsparameter kann beobachtet werden, dass der vereinfachte Ansatz bei größerer Raumtiefe ungenauere Ergebnisse ausgibt. Eine detaillierte Auswertung erfolgt im Rahmen der Einzelräume.

Einzelbuero 01

Für den ersten Raum in der Einzelauswertung werden kurz einige allgemeine Unterschiede der Betrachtungsweisen erläutert:

Die beiden oberen Bilder in Abb. 54 beziehen sich auf die gesamte Raumgröße, das heißt, die Bezugsfläche (BF) verläuft bündig bis an die Innenwände. Diese Ausführung ist an den Slices insofern sichtbar, dass rechts im Bild, also an der Wand mit Fenster, kleine verschattete Ecken entstehen. Dort gelangt von außen in den Raum scheinendes Licht nur auf indirektem Wege, über Reflexionen hin. Ein im Bild nicht eindeutig ersichtlicher Unterschied ist, dass diese Randbereiche umlaufend im Raum betrachtet werden. Folglich wird auch die im Bild linke Raumhälfte um einen halben Meter erweitert. Diese beinhaltet, aufgrund der Distanz zur Tageslichtöffnung, die dunkelsten Stellen im Raum. In der erläuterten Betrachtungsweise begründen sich die zuvor beobachteten Abweichungen in der Empfehlungsstufe gegenüber der Bezugsfläche nach DIN, da sie den Anteil dunklerer Flächen deutlich erhöht.

Ein weiterer Unterschied tritt beim Vergleich der Varianten mit unterschiedlichen Parametern auf. Bei genauer Beobachtung wird deutlich, dass die Slices mit vereinfachten Parametern ein unschärferes Ergebnis ausgeben als die mit genauen. Der Unterschied in Bezug auf die Slices ist jedoch so gering, dass dieser in der Anwendung vernachlässigt werden kann.¹⁰⁸

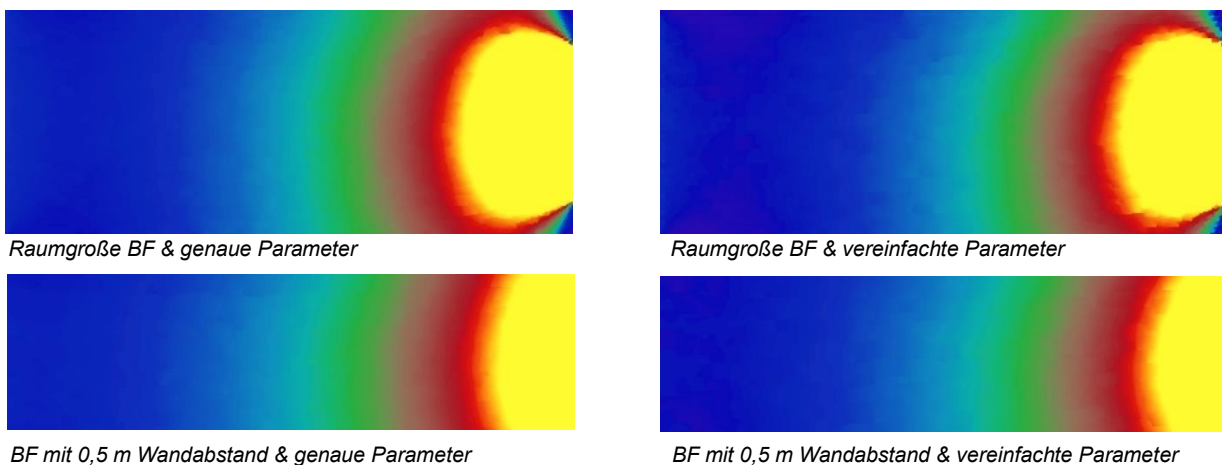


Abb. 54 - Beispielgebäude: Slices - Einzelbuero 01



Bezüglich des Raumes selbst wird die unvorteilhafte Helligkeitsverteilung, welche aus einseitig belichteten Räumen mit hoher Raumtiefe hervor geht, deutlich. Die hellen Bereiche ordnen sich ausschließlich in Fensternähe an, während die gegenüberliegende Raumhälfte deutlich dunkler erscheint. Auch die nahezu raumhohen Öffnungen können diesem Effekt nicht entgegenwirken. Erschwerend kommt die geringe Breite des Raumes hinzu. Bei einem Seitenverhältnis von rund 2,5 und lediglich einer Fensteröffnung gibt es nur wenige Möglichkeiten die tieferliegenden Bereiche zu belichten.

Die Legende auf der linken Seite gilt für alle Slices, die im Rahmen des Beispielgebäudes betrachtet werden. Es erfolgt eine Unterteilung von 0 bis 1000 lx.

Abb. 55 - Beispielgebäude:
Farblegende

¹⁰⁸ Ausnahme sind dabei Räume mit hochkomplexer Geometrie. Die Einstufung obliegt dem Anwender.

Der eben beschriebene Effekt spiegelt sich noch deutlicher in Tab. 22 wider. Am Beispiel von Variante 1 oder 3 wird deutlich, dass die geringste Beleuchtungsstärke von 100 lx auf fast der gesamten Fläche erreicht wird, was im Weiteren zu einer Mindestzielbeleuchtungsstärke der Stufe „Gering“ führt. Bei Betrachtung der höheren Beleuchtungsstärken treten jedoch sehr geringe Flächenanteile, alle unterhalb von 50 % auf. Das bedeutet, dass im Raum ein sehr hohes Gefälle der Helligkeiten besteht und folglich keine Empfehlungsstufe bezüglich der Zielbeleuchtungsstärke erreicht werden kann.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	96,59%	49,33%	100,00%	82,98%
≥ 300 lx	43,72%	27,57%	44,06%	41,39%
≥ 500 lx	30,79%	17,65%	29,19%	27,41%
≥ 750 lx	20,67%	11,95%	18,78%	17,55%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	98,22%	49,82%	100,00%	84,84%
≥ 2,2 %	43,22%	27,13%	43,51%	40,87%
≥ 3,6 %	30,78%	17,63%	29,17%	27,40%
≥ 5,4 %	20,64%	11,94%	18,76%	17,53%

Tab. 22 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 01

Neben der ungünstigen Helligkeitsverteilung, gibt Tab. 22 auch Rückschluss zu Unterschieden zwischen den Varianten mit unterschiedlichen Parametern. Es bestätigt sich, dass die vereinfachte Variante in den hinteren Teilen des Raumes das Tageslicht nicht ausreichend genau abbilden kann. Dieser Effekt lässt sich in der annähernden Halbierung des Flächenanteils bezüglich der Beleuchtungsstärke von 100 lx beobachten. Grund ist, dass die Lichtstrahlen mit nur zwei „Ambient Bounces“, ohne weitere Parametrierung, nicht lang genug verfolgt werden, um den ganzen Raum zu belichten.

Da es durch diesen Effekt auch zu Abweichungen in den erreichten Empfehlungsstufen kommt, wird geschlussfolgert, dass die vereinfachte Parametrierung nicht für den Nachweis nach DIN EN 17037 geeignet ist. Bezogen auf alle berechneten Beleuchtungsstärken treten zwischen Variante 1 & 2 im Mittel 9,97 % und zwischen Variante 3 & 4 9,22 % Abweichung auf.¹⁰⁹

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS ¹¹⁰	Gering	-	Gering	-
ZBS ¹¹¹	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	Gering	-	Gering	-
ZBS	-	-	-	-

Tab. 23 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 01

¹⁰⁹ In Anhang 19 folgt eine Aufschlüsselung der Abweichungen zwischen den Varianten für alle Räume.

¹¹⁰ Mindestzielbeleuchtungsstärke im Folgenden mit MZBS abgekürzt

¹¹¹ Zielbeleuchtungsstärke im Folgenden mit ZBS abgekürzt

Einzelbuero 09

Neben den bereits in Einzelbuero 01 erläuterten Zusammenhängen wird an Einzelbuero 09 der Effekt der umliegenden Verschattung deutlich. Obwohl der Raum geometrisch nahezu identisch zu Einzelbuero 01 ist, an der gleichen Fassade liegt und folglich die gleiche Ausrichtung aufweist, treten hier deutlich geringere Beleuchtungsstärken auf.

Grund dafür ist die Verschattung durch ein Nachbargebäude, welches in diesem Eckbereich auf das simulierte Gebäude folgt. Durch das hier gegebene Bauvolumen wird die Menge an vorhandenem Tageslicht maßgeblich gesenkt. Folglich gelangt auch weniger Licht in den Raum.

Dieser Effekt lässt sich auch in der Gesamtdarstellung auf Seite 72 beobachten. Dort verschiebt sich die Farbe der inneren Raumhälften entlang der Fassade stufenweise von blau zu violett. Grund dafür ist der zunehmende Effekt der Umgebungsverschattung.

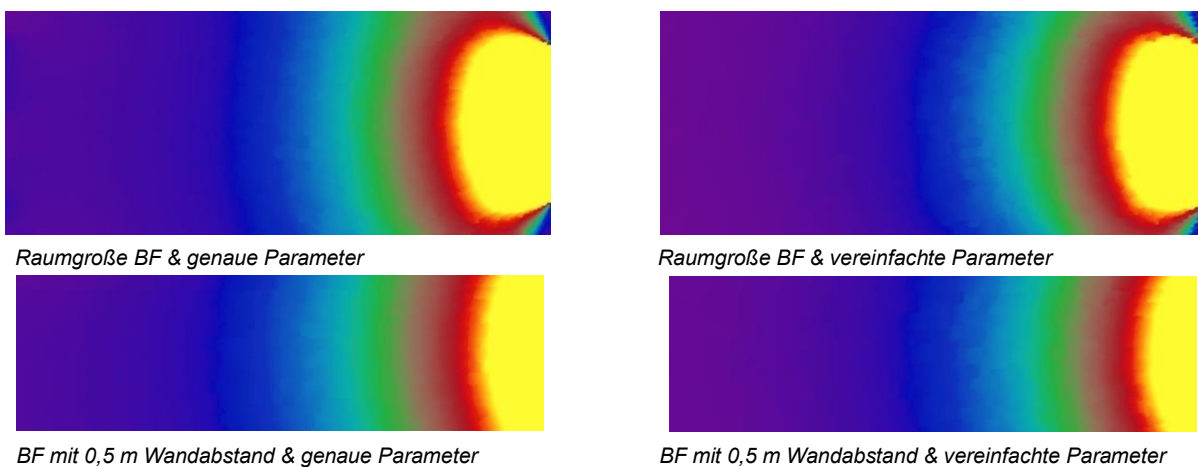


Abb. 56 - Beispielgebäude: Slices - Einzelbuero 09

In den Zahlen aus Tab. 24 spiegelt sich der Verschattungseinfluss ebenfalls wider. Während Einzelbuero 01 in den genauen Varianten noch zu nahezu 100 % die Schwelle von 100 lx erreichen konnte, erreicht Einzelbuero 09 nur Werte knapp über 50 %. Aufgrund der grundsätzlich geringen Helligkeit ist auch die Abweichung zwischen den Varianten deutlich geringer, aber mit rund 5 % bezüglich der 100 lx weiterhin erkennbar vorhanden.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	55,71%	50,55%	56,74%	52,02%
≥ 300 lx	34,55%	32,05%	33,16%	30,68%
≥ 500 lx	25,17%	23,23%	22,60%	20,70%
≥ 750 lx	16,67%	15,14%	14,37%	12,93%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	56,29%	51,00%	57,31%	52,55%
≥ 2,2 %	34,17%	31,75%	32,77%	30,31%
≥ 3,6 %	25,15%	23,22%	22,59%	20,68%
≥ 5,4 %	16,65%	15,12%	14,36%	12,91%

Tab. 24 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 09

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-

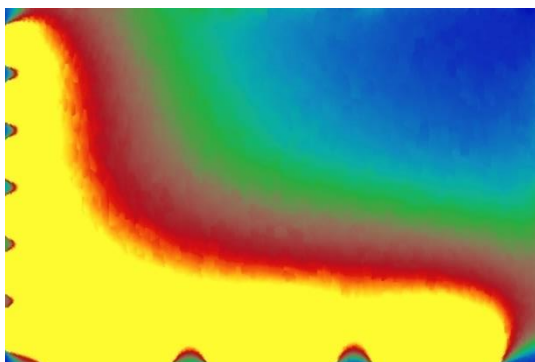
Tab. 25 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 09

Durch den Einfluss der Umgebungsverschattung kann Einzelbuero 09 keine der Empfehlungsstufen nach DIN EN 17037 erreichen. Die Ausführung des Raumes in der simulierten Art und Weise ist demzufolge nach den aktuellen Standards fraglich.

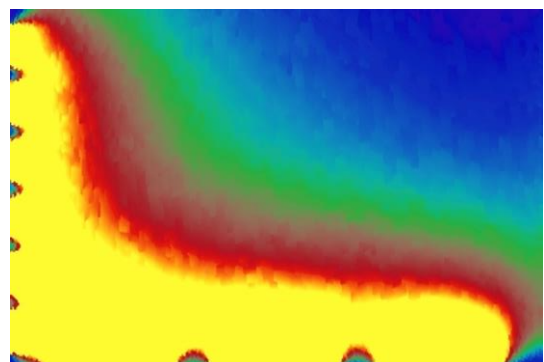
Trotz der einheitlich nicht erreichten Empfehlungsstufe treten Abweichungen auf, die vor allem in Tab. 24 sichtbar sind. Zwischen Variante 1 & 2 liegt die mittlere Abweichung bei 25,82 %, zwischen Variante 3 & 4 bei 19,93%.

Besprechung 01

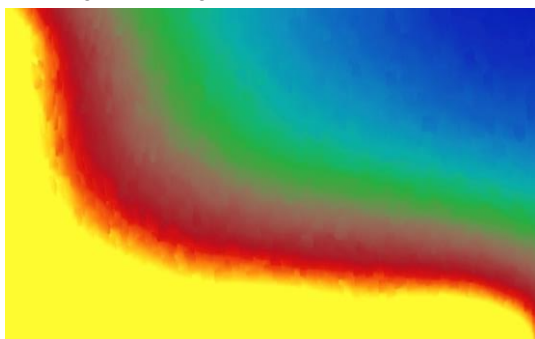
Beim Besprechungsraum 01 handelt es sich um einen Sonderfall im betrachteten Gebäudeausschnitt. Durch seine Position an der Gebäudeecke ist hier eine Belichtung über zwei Seiten möglich, welche insgesamt zu einer verbesserten Tageslichtversorgung gegenüber den anderen Räumen führt. Dieser Effekt ist bereits in den Slices erkennbar, da hier der visuelle Anteil blauer Raumabschnitte deutlich geringer ist als in den zuvor betrachteten Einzelbüros.



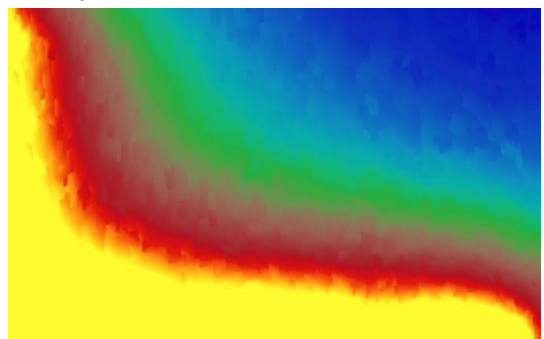
Raumgroße BF & genaue Parameter



Raumgroße BF & vereinfachte Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & genaue Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & vereinfachte Parameter

Abb. 57 - Beispielgebäude: Slices - Besprechung 01 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	99,97%	96,65%	100,00%	99,04%
≥ 300 lx	73,60%	67,29%	74,13%	68,89%
≥ 500 lx	55,88%	51,81%	54,88%	51,33%
≥ 750 lx	40,59%	37,84%	37,80%	34,59%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	99,98%	97,18%	100,00%	99,35%
≥ 2,2 %	72,95%	66,76%	73,38%	68,25%
≥ 3,6 %	55,85%	51,76%	54,84%	51,30%
≥ 5,4 %	40,55%	37,81%	37,76%	34,55%

Tab. 26 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Besprechung 01

Die zweiseitige Belichtung wirkt sich vor allem positiv auf die Empfehlungsstufe der Zielbeleuchtungsstärke aus. Da hier nur 50 % der Bezugsfläche betrachtet werden, können in allen Varianten Beleuchtungsstärken über 500 lx und folglich Tageslichtquotienten über 3,6 % erreicht werden, was der Empfehlungsstufe „Mittel“ entspricht.

Etwas geringer, aber nicht zu vernachlässigen ist der Effekt auf die Mindestzielbeleuchtungsstärke. Hier kann in allen Varianten die Stufe „Gering“ erreicht werden. Da es sich dabei um das schlechtere Ergebnis handelt, ist es für den Raum maßgeblich. Trotz dieser Bewertung wirkt sich die bessere Stufe der Zielbeleuchtungsstärke positiv auf die Raumqualität aus.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	Gering	Gering	Gering	Gering
ZBS	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel
Tageslichtquotienten				
MZBS	Gering	Gering	Gering	Gering
ZBS	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel

Tab. 27 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen – Besprechung 01

Die mittlere Abweichung der Beleuchtungsstärken zwischen Variante 1 & 2 liegt bei rund 13,40 %, während die zwischen Variante 3 & 4 bei rund 10,20 % liegt.

Dabei fällt auf, dass die Differenz der Varianten mit raumgroßer Bezugsfläche größer ausfällt. Gemäß der Liste aus Anhang 19 tritt dieser Effekt in allen Räumen auf. Damit bestätigt sich, dass die vereinfachte Variante gerade in den tieferliegenden Bereichen des Raumes Abweichungen hervorruft. Wird also in Variante 3 & 4 ein halber Meter weniger betrachtet, reduziert sich die entstehende Abweichung, gegenüber den Varianten 1 & 2.

Einzelbuero 10

Einzelbuero 10 verhält sich als nicht verschattetes Büro im Wesentlichen wie Einzelbuero 01. Da es jedoch an einer anderen Fassade als ersteres liegt, ist seine Position um 90° gedreht. Das Fenster zeigt folglich in eine andere Himmelsrichtung. Aufgrund der sehr ähnlichen Ausprägung in Slice und Flächenanteilen kann geschlussfolgert werden, dass die Ausrichtung nach Himmelsrichtung keinen Einfluss auf die Tageslichtversorgung eines Raumes hat. Diese Beobachtung war zu erwarten, da mit einem bewölkten Himmel ohne direkte Sonne simuliert wird. Dadurch ist die Beleuchtungsstärke des vorhandenen Tageslichtes in der gesamten Himmelskugel gleichverteilt.

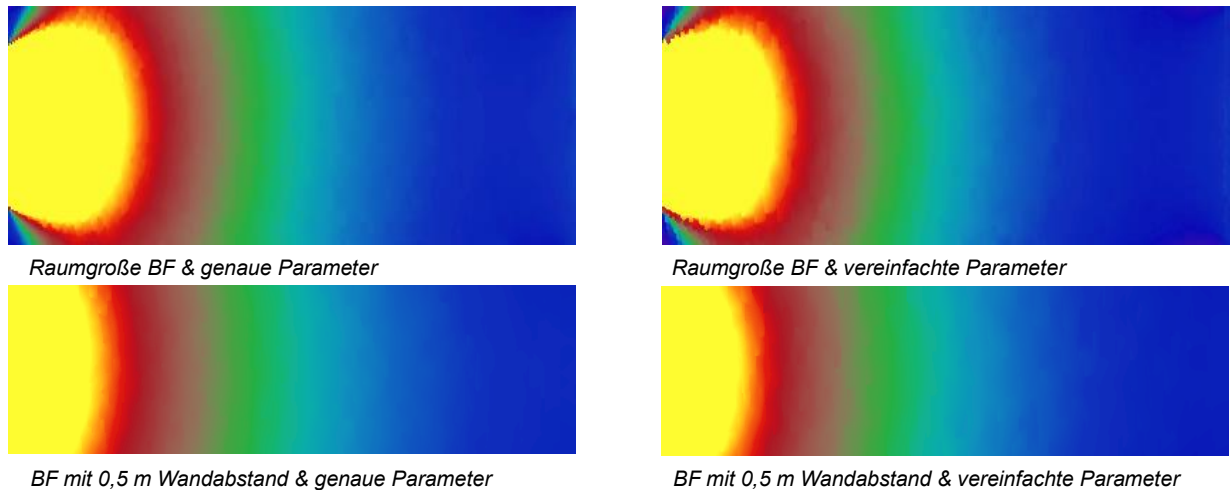


Abb. 58 - Beispielgebäude: Slices – Einzelbuero 10 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	99,82%	95,73%	100,00%	100,00%
≥ 300 lx	48,49%	45,59%	49,49%	46,45%
≥ 500 lx	34,62%	32,48%	33,05%	30,95%
≥ 750 lx	23,75%	21,41%	21,33%	19,92%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	99,92%	97,20%	100,00%	100,00%
≥ 2,2 %	47,96%	45,13%	48,74%	45,83%
≥ 3,6 %	34,61%	32,47%	33,04%	30,94%
≥ 5,4 %	23,73%	21,39%	21,31%	19,90%

Tab. 28 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 10

Genau wie Einzelbuero 01 treten auch in Einzelbuero 10 Probleme mit der Belichtung der tieferliegenden Raumlälfte auf. Grund ist auch hier die ungünstige Geometrie des Raumes, welcher mit wenig Fassadenfläche tief in das Gebäude hineinragt.

Bezüglich der Empfehlungsstufen ist es so knapp nicht möglich die 50 %-Schwelle für die Stufe „Gering“ (Zielbeleuchtungsstärke: 300 lx) zu erreichen. Je nach Simulationsvariante tritt dazu eine Differenz von rund 0,5 % bis 4,5 % auf.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	Gering	Gering	Gering	Gering
ZBS	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	Gering	Gering	Gering	Gering
ZBS	-	-	-	-

Tab. 29 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 10

Da die Differenz zu 50% in Tab. 28 so gering ausfällt, ist davon auszugehen, dass bei einer Simulation mit weniger Messpunkten, welche entsprechend näher an den Vorgaben der DIN EN 17037 liegt, die Empfehlungsstufe hätte erreicht werden können. Grund dafür ist der in Kapitel 5.4.2, S. 54 erläuterte Einfluss der Punktzahl. Bei einer geringeren Anzahl an Berechnungspunkten würde vermutlich aufgerundet, sodass exakt 50 % erreicht werden.

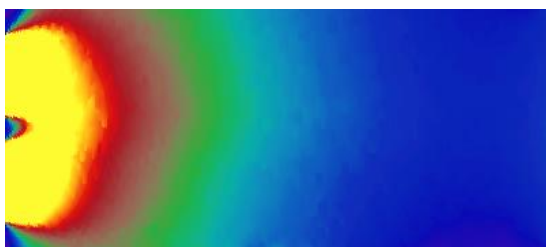
Aufgrund der angesetzten Bildauflösung von 400x400 Pixeln, welche angepasst auf die Geometrie von Einzelbuero 10 eine Auflösung von 168x400 bzw. 119x400 Pixeln ergibt, wird mit 67.200 bzw. 47.600 Punkten gerechnet.¹¹² Folglich ist die Ergebnisgenauigkeit deutlich höher als nach Normnachweis gefordert. In diesem Fall führt dies zu einer Verschlechterung des Ergebnisses, welches nicht vom Auswertungsalgorithmus berücksichtigt werden kann.

Mittlere Abweichung Variante 1 & 2: 9,89 %

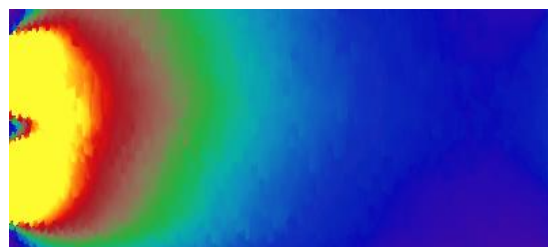
Mittlere Abweichung Variante 3 & 4: 8,65 %

Einzelbuero 16

Auch Einzelbuero 16 stellt sich vergleichbar zu den anderen Einzelbüros dar. Einziger Unterschied ist hier, dass der Einfluss eines Doppelfensters, statt eines Einzelfensters in den Slices erkennbar ist. Bezüglich der Belichtung treten dadurch jedoch keine maßgeblichen Unterschiede auf.



Raumgroße BF & genaue Parameter



Raumgroße BF & vereinfachte Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & genaue Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & vereinfachte Parameter

Abb. 59 - Beispielgebäude: Slices – Einzelbuero 16 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]

¹¹² Die Abweichung begründet sich in der betrachteten Fläche. Die größere Punktzahl gilt für Varianten 1 und 2 mit raumgroßer Bezugsfläche, die kleiner folglich für Variante 3 & 4 mit Bezugsfläche nach DIN EN 17037.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	94,80%	75,85%	96,80%	80,06%
≥ 300 lx	40,29%	36,64%	41,28%	37,12%
≥ 500 lx	26,19%	23,25%	25,39%	21,89%
≥ 750 lx	15,33%	13,43%	13,60%	10,93%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	96,15%	77,83%	98,34%	81,79%
≥ 2,2 %	39,76%	36,01%	40,66%	36,39%
≥ 3,6 %	26,17%	23,23%	25,36%	21,88%
≥ 5,4 %	15,31%	13,42%	13,57%	10,91%

Tab. 30 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 16

Der Einfluss der anschließenden Gebäudeecke ist ebenfalls gering. Daraus kann geschlossen werden, dass eine zur Tageslichtöffnung parallele Verschattung wie in Einzelbuero 09 deutlich größere Auswirkungen hat als eine zur Tageslichtöffnung orthogonale Verschattung, wie hier abgebildet.

Grund dafür ist die Art des Lichteinfalls. Während ein paralleles Verschattungsobjekt in erster Linie alle die Strahlen blockiert, welche annähernd senkrecht in den Raum eintreten würden, hält ein orthogonal angeordnetes Verschattungsobjekt nur all jene Strahlen auf, welche aus einer Richtung kommen und einen relativ flachen Einfallswinkel in den Raum haben. Dieser Effekt ist relevant, da die senkrecht einfallenden Strahlen direkt bis in das Innere des Raumes vordringen können, ohne reflektiert zu werden und dabei an Energie zu verlieren.¹¹³ Sie tragen damit maßgeblich zur Belichtung des gesamten Raumes bei. Die Strahlen mit flachem Einfallswinkel haben einen deutlich geringeren Einfluss auf die Belichtung des Raumes, da der Großteil ihrer Lichtenergie im fensternahen Bereich verloren geht. Grund dafür sind zahlreiche Reflexionen an den Oberflächen des Innenraumes.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	-	-	Gering	Gering
ZBS	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	Gering	-	Gering	-
ZBS	-	-	-	-

Tab. 31 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 16

In Tab. 30 & Tab. 31 bestätigen sich die in den vorhergehenden Räumen erläuterten Effekte bezüglich der Parametrierung und der Punktzahl.

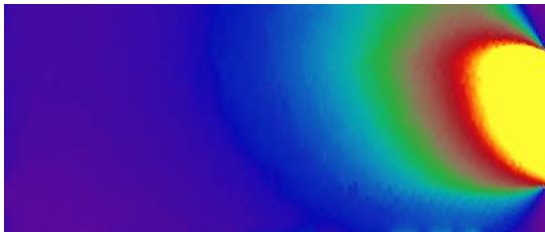
Mittlere Abweichung Variante 1 & 2: 14,23 %

Mittlere Abweichung Variante 3 & 4: 12,21 %

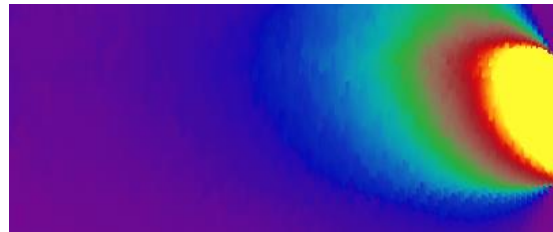
¹¹³ Der Energieverlust bei Reflexion tritt an jeder Oberfläche in Abhängigkeit zu ihrem Absorptionsvermögen auf, da ein Teil der Lichtenergie direkt von der Oberfläche aufgenommen wird.

Einzelbuero 17

Einzelbuero 17 ist der erste Raum im betrachteten Ausschnitt, dessen Tageslichtöffnung in den Innenhof des Gebäudes zeigt. Dadurch entsteht eine Kombination aus einem parallel angeordneten und zwei orthogonal angeordneten Verschattungsobjekten. Hinzu kommt, dass direkt unterhalb der Öffnung eine Dachfläche mit sehr dunkler und rauer Oberfläche anschließt. Folglich tritt hier ein verringertes Reflexionsvermögen auf.



Raumgroße BF & genaue Parameter



Raumgroße BF & vereinfachte Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & genaue Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & vereinfachte Parameter

Abb. 60 - Beispielgebäude: Slices – Einzelbuero 17 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]

Durch die beidseitige orthogonale Verschattung wird der Lichteinfall im Fensterbereich soweit vermindert, dass bereits in wandnähe sehr geringe Beleuchtungsstärken auftreten. Diese sind in den oberen Slices als blaue Bereiche zu erkennen. Die parallele Verschattung sorgt für große Helligkeitsverluste im innenliegenden Raumteil. Diese sind im Slice violett eingefärbt. Insgesamt wird die Tageslichtversorgung maßgeblich reduziert, was sich in den folgenden Tabellen numerisch widerspiegelt:

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	50,87%	41,41%	100,00%	47,09%
≥ 300 lx	24,21%	21,12%	31,90%	22,21%
≥ 500 lx	14,61%	12,46%	16,60%	11,90%
≥ 750 lx	8,41%	7,14%	7,50%	5,05%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	51,60%	42,13%	100,00%	47,94%
≥ 2,2 %	23,83%	20,79%	31,24%	21,79%
≥ 3,6 %	14,59%	12,45%	16,57%	11,89%
≥ 5,4 %	8,39%	7,13%	7,49%	5,04%

Tab. 32 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Einzelbuero 17

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	-	-	Gering	-
ZBS	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	-	-	Gering	-
ZBS	-	-	-	-

Tab. 33 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Einzelbuero 17

Die Verschattung sorgt in Kombination mit der ungünstigen Geometrie des Raumes für eine problematische Tageslichtversorgung. Die Empfehlungsstufen nach DIN EN 17037 können nicht einmal annähernd erreicht werden.

Mittlere Abweichung Variante 1 & 2: 30,74 %

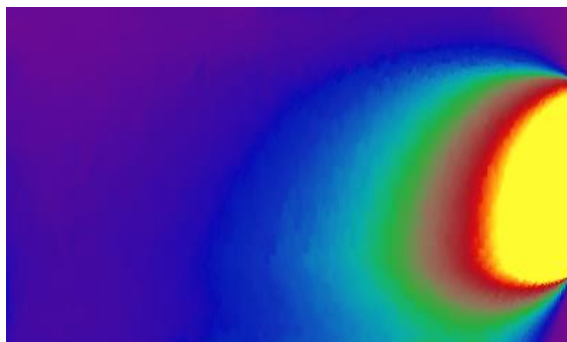
Mittlere Abweichung Variante 3 & 4: 50,36 %

Die Abweichung nimmt wie erwartet bei schlechter Tageslichtversorgung zu. Der Grund liegt auch hier in einer unzureichend genauen Simulation der Lichtstrahlen, bei vereinfachter Parametrierung.

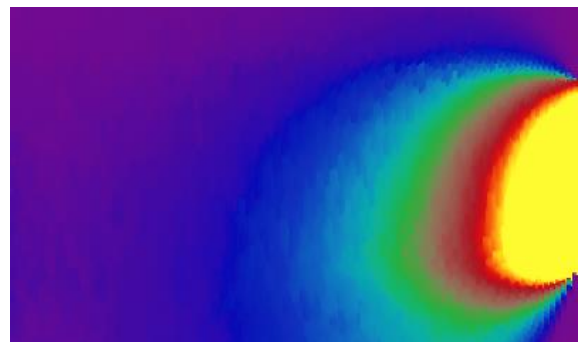
Doppelbuero 04

Doppelbuero 04 kombiniert die zuvor aufgeführten negativen Effekte des Innenhofes mit einem breiteren Raum. Der Fensterflächenanteil bleibt unverändert, da sich die Räume eine Fassade teilen.

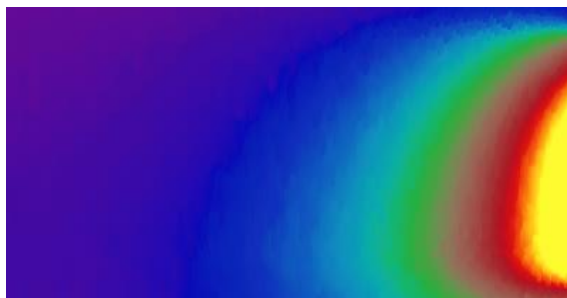
An den Slices kann der Lichteinfall nachvollzogen werden. Da der Raum an einer Seite bündig mit der orthogonalen Verschattung ist, neigen sich die Farbbänder im Bild nach unten, also weg von dem Verschattungsobjekt. In Einzelbuero 17 kehrt sich der Effekt aufgrund der abweichenden Position um.



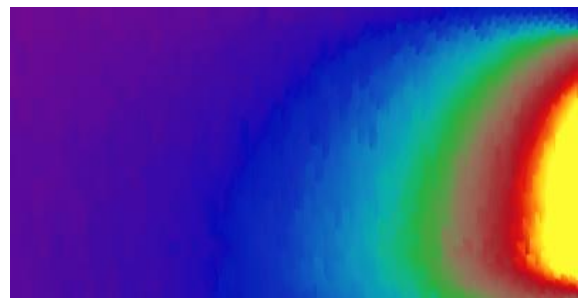
Raumgroße BF & genaue Parameter



Raumgroße BF & vereinfachte Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & genaue Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & vereinfachte Parameter

Abb. 61 - Beispielgebäude: Slices – Doppelbuero 04 [90° im Uhrzeigersinn gedreht]

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	46,50%	44,33%	54,20%	51,77%
≥ 300 lx	23,25%	22,26%	25,20%	24,46%
≥ 500 lx	14,22%	13,75%	14,77%	14,27%
≥ 750 lx	8,98%	8,65%	7,00%	6,78%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	47,09%	45,01%	55,10%	52,53%
≥ 2,2 %	22,86%	21,84%	24,81%	24,03%
≥ 3,6 %	14,21%	13,74%	14,75%	14,25%
≥ 5,4 %	8,97%	8,64%	6,98%	6,76%

Tab. 34 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Doppelbuero 04

Die numerischen Ergebnisse für Doppelbuero 04 fallen ebenso gering aus, wie die von Einzelbuero 17. Auch hier sorgt die massive Verschattung für eine sehr schlechte Tageslichtversorgung, welche nicht annähernd an die Empfehlungsstufen nach DIN EN 17037 herankommt.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-

Tab. 35 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Doppelbuero 04

Mittlere Abweichung Variante 1 & 2: 16,74 %

Mittlere Abweichung Variante 3 & 4: 11,66 %

Doppelbuero 03

In Doppelbuero 03 wiederholen sich alle Probleme aus Doppelbuero 04. Erschwerend kommt jedoch hinzu, dass hier die parallele Verschattung deutlich näher an der Tageslichtöffnung liegt als zuvor. Grund dafür ist die Rechteckige Ausprägung des Innenhofes, wobei der Abstand hier der kurzen Seite entspricht. Erneut ist in den Slices Erkennbar, dass die orthogonale Verschattung im Bild „unten“ anschließt, sodass ein flacher Lichteinfall von „oben“ möglich ist. Dieser flache Lichteinfall profitiert jedoch nicht maßgeblich von der Form des Innenhofes, obwohl die nächste, annähernd orthogonale Verschattung deutlich weiter entfernt liegt als in den zuvor betrachteten Beispielen.

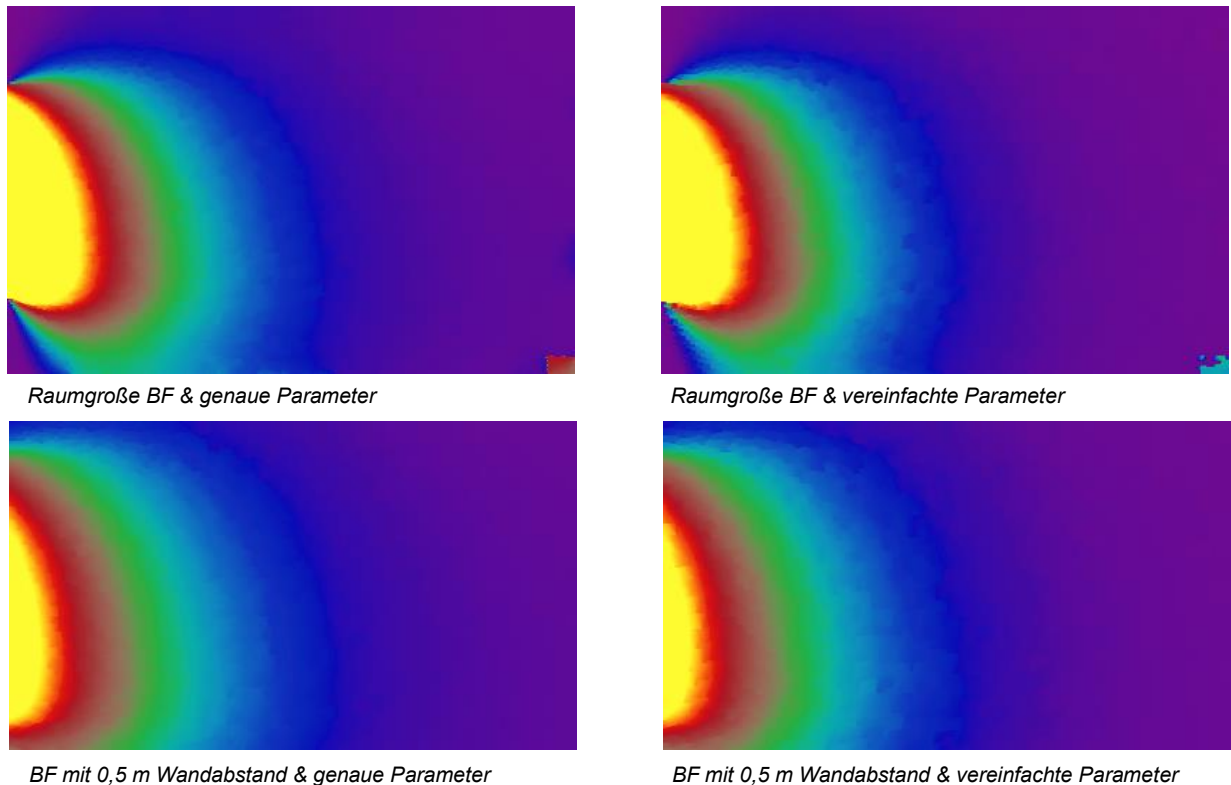


Abb. 62 - Beispielgebäude: Slices – Doppelbuero 03

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	41,83%	39,16%	48,02%	45,08%
≥ 300 lx	22,28%	20,99%	23,38%	21,83%
≥ 500 lx	13,90%	13,02%	13,55%	12,64%
≥ 750 lx	8,67%	8,26%	6,25%	5,60%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	42,33%	39,62%	48,72%	45,65%
≥ 2,2 %	21,94%	20,65%	22,95%	21,44%
≥ 3,6 %	13,89%	13,00%	13,53%	12,61%
≥ 5,4 %	8,66%	8,25%	6,23%	5,60%

Tab. 36 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Doppelbuero 03

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-

Tab. 37 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Doppelbuero 03

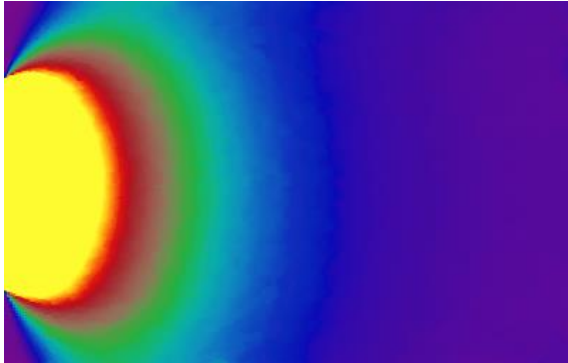
Doppelbuero 03 wiederholt die schlechten Ergebnisse der Räume mit Innenhoffenster und kann somit keine Empfehlungsstufe erreichen.

Mittlere Abweichung Variante 1 & 2: 22,75 %

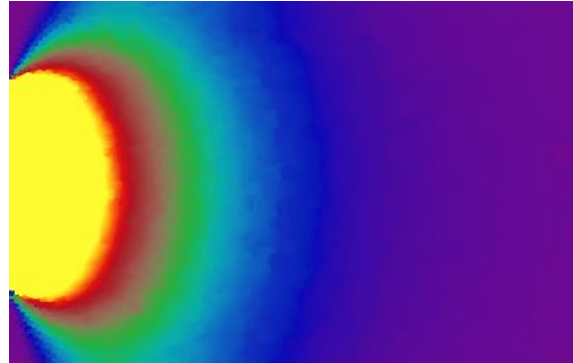
Mittlere Abweichung Variante 3 & 4: 18,83 %

Doppelbuero 01

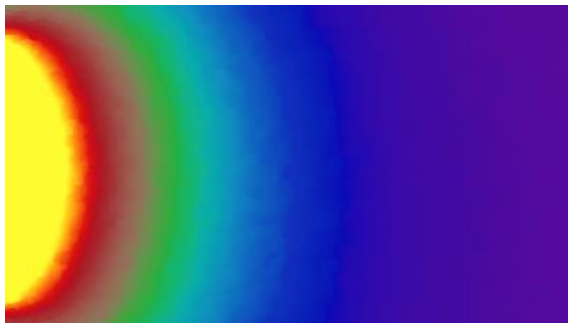
Bei Doppelbuero 01 handelt es sich ebenfalls um einen Raum mit Öffnung zum Innenhof. Einziger Unterschied ist, dass die orthogonalen Verschattungsobjekte annähernd gleich weit vom Raum entfernt liegen. Dabei ist die Entfernung so groß, dass ihr Effekt in den Slices nicht erkennbar ist. Stattdessen bildet sich um das Fenster eine gleichmäßige Farbabstufung aus. Der innenliegende Teil des Raumes bleibt jedoch aufgrund des parallelen Verschattungsobjekt sehr dunkel.



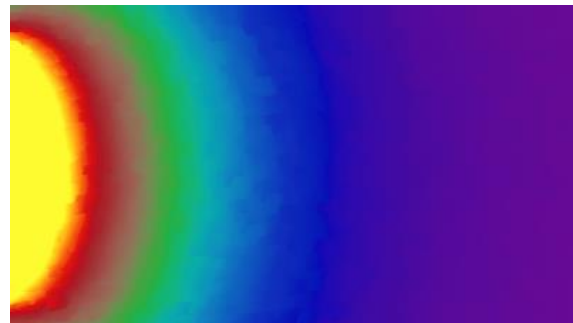
Raumgroße BF & genaue Parameter



Raumgroße BF & vereinfachte Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & genaue Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & vereinfachte Parameter

Abb. 63 - Beispielgebäude: Slices – Doppelbuero 01

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	53,30%	49,33%	55,96%	52,53%
≥ 300 lx	29,04%	27,57%	31,59%	30,15%
≥ 500 lx	18,44%	17,65%	20,35%	19,40%
≥ 750 lx	12,59%	11,95%	11,56%	10,88%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	53,82%	49,82%	56,52%	53,16%
≥ 2,2 %	28,59%	27,13%	31,14%	29,79%
≥ 3,6 %	18,43%	17,63%	20,33%	19,39%
≥ 5,4 %	12,58%	11,94%	11,54%	10,86%

Tab. 38 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Doppelbuero 01

Obwohl das schlechte Ergebnis bezüglich der Empfehlungsstufen bestehen bleibt, schneidet Doppelbuero 01 gegenüber den anderen Räumen mit Fenstern zum Innenhof etwas besser ab. In Bezug auf den Grenzwert von 100 lx werden hier im Schnitt Werte oberhalb von 50 % erreicht.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-

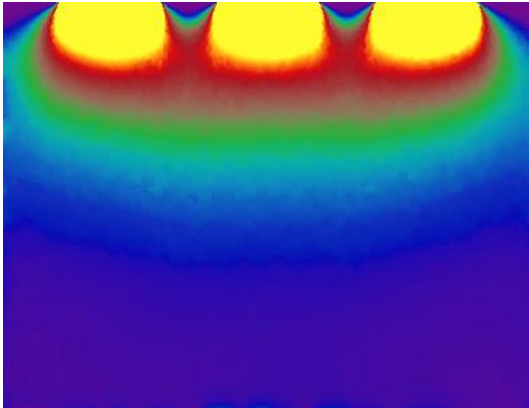
Tab. 39 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Doppelbuero 01

Mittlere Abweichung Variante 1 & 2: 21,50 %

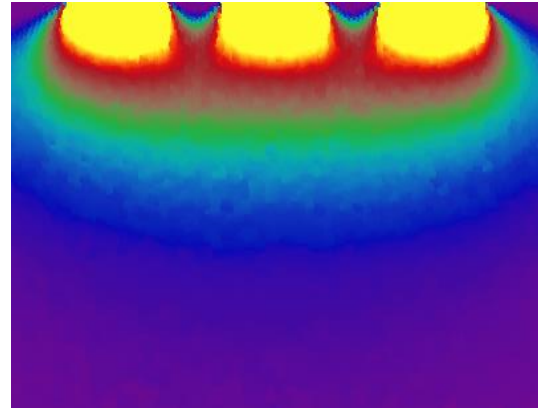
Mittlere Abweichung Variante 3 & 4: 16,15 %

Sanitaer

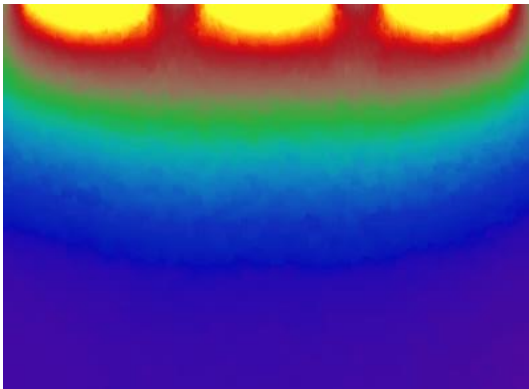
Ein Sanitärraum ist üblicherweise nicht Teil eines Nachweises zur Tageslichtversorgung. Grund ist, dass es sich dabei nicht um einen Aufenthaltsraum nach MBO § 2 Abs. 5 handelt. Er wird hier jedoch als Beispiel für einen Raum mit vielen kleinen Tageslichtöffnungen, statt einer großen betrachtet.



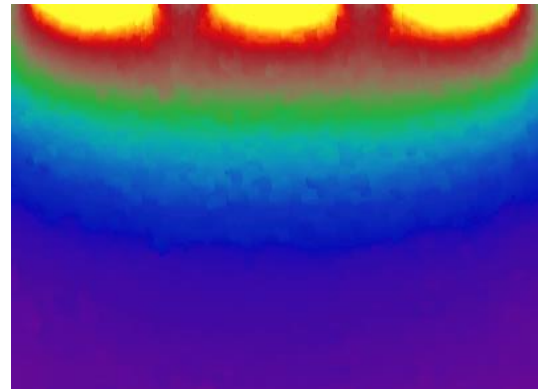
Raumgroße BF & genaue Parameter



Raumgroße BF & vereinfachte Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & genaue Parameter



BF mit 0,5 m Wandabstand & vereinfachte Parameter

Abb. 64 - Beispielgebäude: Slices – Sanitaer [90° im Uhrzeigersinn gedreht]

In den Slices lassen sich die drei vorhandenen Fenster, durch die hohen Beleuchtungsstärken (gelb) im ersten Raumdrittel sehr gut ablesen. Dahinter, also etwa am Farbübergang von rot zu grün, bildet der Verlauf ein durchgängiges Band. Es ist also nicht mehr erkennbar, dass das Licht durch mehrere Öffnungen eintritt.

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
≥ 100 lx	51,68%	48,29%	56,50%	53,20%
≥ 300 lx	29,27%	27,93%	30,63%	29,27%
≥ 500 lx	19,88%	18,95%	18,85%	17,85%
≥ 750 lx	11,83%	10,96%	8,60%	7,81%
Tageslichtquotienten				
≥ 0,7 %	52,33%	48,72%	57,22%	53,82%
≥ 2,2 %	28,89%	27,59%	30,20%	28,91%
≥ 3,6 %	19,87%	18,93%	18,83%	17,83%
≥ 5,4 %	11,81%	10,95%	8,58%	7,78%

Tab. 40 - Beispielgebäude: Flächenanteile der BF - Sanitaer

	Var 1	Var 2	Var 3	Var 4
Beleuchtungsstärken				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-
Tageslichtquotienten				
MZBS	-	-	-	-
ZBS	-	-	-	-

Tab. 41 - Beispielgebäude: Empfehlungsstufen - Sanitär

Trotz der Öffnungsanzahl und deutlich günstigeren Raumgeometrie (geringe Tiefe, bei großem Fassadenanteil) kann keine Empfehlungsstufe nach DIN EN 17037 erreicht werden. Grund ist auch hier der Einfluss des Innenhofes, wobei die gegenüberliegende Gebäudewand als parallele Verschattung einen günstigen Lichteinfall verhindert.

Mittlere Abweichung Variante 1 & 2: 19,74 %

Mittlere Abweichung Variante 3 & 4: 15,23 %

7.4. Bewertung

Das Gebäude schneidet bezüglich der Tageslichtversorgung insgesamt sehr schlecht ab. Die meisten Räume können keine der in DIN EN 17037 beschriebenen Empfehlungsstufen erreichen. Gründe dafür sind vor allem ungünstige Raumgeometrien, welche sich durch eine Belichtung über die kurze Raumseite und große Raumtiefen auszeichnen. Erschwerend hinzu kommt die Verschattung in vielen der Räume. Dabei haben die Umgebungsverschattung durch Nachbarbebauung und die Eigenverschattung im Innenhof ähnlich negative Auswirkungen.

Für die meisten Räume, welche diese Empfehlungsstufen nicht erreichen, kann jedoch positiv argumentiert werden, dass die dunkelsten Bereiche in der Regel nur der Erschließung des Raumes dienen. Konkret sind dort die Türen angeordnet, wobei aufgrund der geringen Raumbreite kein Platz für eine weitere Nutzung bleibt. Der tatsächliche Aufenthaltsbereich im Raum verschiebt sich damit in Richtung des Fensters, sodass ein potenzieller Nutzer den Raum vermutlich als besser belichtet wahrnimmt. Verstärkt wird diese Wahrnehmung gegebenenfalls noch durch direktes Sonnenlicht, welches in der Simulation mit bewölktem Himmel nicht vorhanden ist.

Bei dieser Argumentation handelt es sich jedoch nur um eine voraussichtliche Wahrnehmung, welche das Nachweisergebnis nicht beeinflusst.

Es gibt jedoch auch einige Räume, welche Empfehlungsstufen nach DIN EN 17037 erreichen, diese sind im Vergleich entsprechend positiv herauszustellen. Gemeint sind dabei:

- Besprechung 01 („Gering“)
- TH 02 („Mittel“ bzw. „Hoch“)
- Lager („Gering“ bzw. „Mittel“)

Bei dieser Auflistung ist festzuhalten, dass es sich nur bei Besprechung 01 um einen Aufenthaltsraum handelt, welcher Teil des Nachweises ist. Nichtsdestotrotz schneiden diese Räume aufgrund einer günstigeren Proportionierung besser ab. Konkret bedeutet dies, dass hier geringere Raumtiefen gewählt wurden, oder mehr Fensterfläche durch mehr Fassadenanteil vorhanden ist. Insbesondere TH 02 kann als „Gegenentwurf“ zu den Einzelbüros verstanden werden, da es ähnliche Dimensionen aufweist, jedoch um 90° gedreht ist und damit mit der längeren Seite an der Fassade liegt.

Die Bewertung der Varianten erfolgt im Rahmen der Auswertung des Algorithmus unter Punkt 8.

8. Funktionalität des Algorithmus

Der Algorithmus gliedert sich im Wesentlichen nach den Punkten Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe und Auswertung. Im Folgenden soll anhand dieser Punkte kurz die Leistungsfähigkeit der zuvor erläuterten Methodik bewertet werden. Gleichzeitig wird ein Ausblick auf zukünftige Erweiterungsmöglichkeiten, welche über den Nachweis nach Norm in seiner Grundfassung hinausgehen, gegeben.

8.1. Eingabe

Die Eingabe stützt sich in erster Linie auf das bereits vorhandene Simulationsmodell der Bauphysik. Die reine Geometrieerfassung (Gebäude & Umgebungsverschattung) ist damit problemlos möglich. Bei der Übergabe von VICUS an Radiance entstehen dabei keine weiteren Ausnahmen oder Sonderfälle, sodass hier eine voll umfängliche Funktionalität des beschriebenen Algorithmus gegeben ist. Lediglich bereits in VICUS vorhandene Einschränkungen bleiben erhalten. Hierbei handelt es sich in erster Linie um die fehlende Darstellungsmöglichkeit von Fensterteilungen, da im Modell stets die Rohbauöffnung angesetzt werden. Für normale Fenster wird eine funktionale Anpassung über den Rahmenfaktor vorgenommen.

Die Erfassung der Oberflächeneigenschaften, also der Materialien, gestaltet sich im Vergleich dazu deutlich komplexer. Während bei den Innenraummaterialien lediglich entsprechende optische Überschreibungen in Form von Farben oder Radiance-Primitiven ergänzt werden müssen, sorgt die Vereinfachung der Außenwand auf ein Polygon für ein Problem. Diesem Polygon kann nur eine Eigenschaft zugeordnet werden. In der Regel sollte dafür die Überschreibung der Innenseite gewählt werden, da diese den Raum direkt beeinflusst. Handelt es sich jedoch um ein Gebäude mit Innenhof, würden diese Eigenschaften gegebenenfalls auch andere Räume beeinflussen. Je nach Beschaffenheit des Innenraumes, könnten dadurch Abweichungen entstehen. Da diese in der Regel eher klein ausfallen, wurden sie für die hier beschriebene Basis-Methodik vernachlässigt. Im Rahmen später folgender Verbesserungen besteht ein mögliches Potenzial.

Die Erfassung der Fenstereigenschaften ist ebenfalls problemlos möglich. Hier muss lediglich die UI so weit angepasst werden, dass eine Eingabe des Transmissionsgrades möglich ist.

Anders stellt sich die Situation für die Erfassung von Punktlisten dar. Dafür gibt es im Wesentlichen zwei verschiedene Ansätze. Option 1 ist die Erstellung eines externen Algorithmus, welcher die Raumfläche in ein gleichmäßiges Gitter unterteilt. Dessen Zellgröße durch den Nutzer anpassbar ist, wobei die Vorgaben der DIN EN 17037 nicht unterschritten werden können. Diese Option entspricht dem in Kapitel 5.1.3 beschriebenen Vorgehen.

Da diese Variante losgelöst von den Programmlimitierungen durch Radiance existiert, besteht hier für spätere Anpassungen mehr Potential. So können zum Beispiel nicht rechteckige Räume einfacher verarbeitet werden. Nachteil ist, dass es für den Anwender recht schwer ist abzuschätzen, welches Maß als Punktabstand geeignet ist. Gerade bei der Erstellung von Slices sollte dieses nicht zu grob gewählt werden, da das Ergebnis sonst mangelhaft erscheint. Hinzu kommt, dass die aus den Berechnungsergebnissen resultierenden Empfehlungsstufen nach DIN EN 17037 mit einem großen Gittermaß möglicherweise verfälscht werden. Konkret haben weniger Berechnungspunkte eine gröbere Schrittweite der prozentualen Flächenanteile zur Folge. Dadurch könnte die Bewertung bei nur wenigen Punkten besser ausfallen als bei einer genaueren Betrachtung. Diese Art der Abweichung wird vom Algorithmus nicht berücksichtigt.

Option 2 nutzt die Möglichkeit über `vwrays` und `rcalc` automatisch Punktlisten ausgehend von einer Bildauflösung zu erstellen. Dieser Ansatz ist vor allem für die Erstellung von Slices rechteckiger Räume geeignet. Die Punktlisten fallen hier in der Regel deutlich engmaschiger aus als in Variante 1, jedoch wird immer ein rechteckiger Bildausschnitt betrachtet. Außerdem muss für diese Variante eine Hilfsdatei erstellt werden, welche den „View“ (`vf`-Datei) beschreibt. Dazu müssen der Mittelpunkt, sowie die vertikalen und horizontalen Maße des betrachteten Raumes ermittelt werden.

Je nach gewünschten Weiterentwicklungsmöglichkeiten haben beide Varianten Vor- und Nachteile und müssen gegebenenfalls weiter angepasst werden.

Zuletzt erfolgt die Erfassung des Himmels als eine Art Randbedingung der Tageslichtsimulation. Diese existiert losgelöst von bisher in VICUS vorhandenen Größen, sodass notwendige Parameter in einem neuen Menü erfasst werden müssen. Der beschriebene Algorithmus kann damit einen bewölkten Himmel an verschiedenen Standorten mit Beleuchtungsstärken nach DIN EN 17037 erstellen.

Dieser Leistungsumfang ist ausreichend, um einen Normnachweis der Tageslichtversorgung durchzuführen. Jedoch könnte es in der Zukunft wünschenswert sein, auch Himmel mit direkter Sonne oder in bestimmten Farbspektren zu erstellen. Dafür müsste die Eingabemöglichkeit um einige Parameter (Farbwerte, Sonnenstand, etc.) und der Algorithmus um weitere Funktionen ergänzt werden.

8.2. Verarbeitung

Die Verarbeitungsmöglichkeiten der Radiance-Suite sind mit dem beschriebenen Algorithmus keineswegs vollständig ausgeschöpft. Dies ist jedoch auch nicht Ziel der Betrachtung gewesen, da ein klarer Fokus auf die Tageslichtversorgung gesetzt wurde.

Der erste Punkt der Bildgeneration ist nicht zwingend Teil der Tageslichtsimulation. Wie im Kapitel 5.3.1 beschrieben, handelt es sich viel mehr um eine Kontrollinstanz zur Prüfung getätigter Eingaben. Weiterhin bestehen hier Möglichkeiten zur visuellen Aufarbeitung spezifischer Raumsituationen nach den Wünschen eines späteren Auftraggebers.

Insgesamt ist der Funktionsumfang wie bisher beschrieben eher sporadisch. Neben der Übergabe einer Kameraposition und Vorschlägen zu Rendereinstellungen gibt es nach aktuellem Stand keine weiteren Anpassungsmöglichkeiten. Auch in den Betrachtungen zur UI-Anpassung wurde dieser Punkt vernachlässigt. Folglich besteht in diesem Kontext noch viel Potenzial den Algorithmus zu einem späteren Zeitpunkt zu erweitern.

Deutlich genauer wurde die eigentliche Berechnung, welche Grundlage der Tageslichtsimulation ist, betrachtet. Im Rahmen der Kapitel 5.3.2 & 5.3.3 werden alle relevanten Funktionen der Software Komponente `rtrace` beleuchtet und für eine Verwendung in Kombination mit VICUS beschrieben. In der Anwendung am Beispielraum, oder dem Beispielgebäude aus Kapitel 7 hat sich bestätigt, dass die dargestellten Zusammenhänge so funktionieren wie erhofft. Sie bilden damit den Kern der Simulation und folglich des Nachweises nach DIN EN 17037. Im Rahmen späterer Erweiterungen gibt es hier nur wenig Potential.

In der Anwendung auf das Beispielgebäude ist jedoch aufgefallen, dass die vereinfachte Parametrierung im Vergleich zu den Erkenntnissen am Beispielraum nicht universell anwendbar ist. Während der Effekt bei der Erstellung von Slices kaum auffällt, da es sich nur um einen kaum wahrnehmbaren visuellen Unterschied handelt, wirkt er sich maßgeblich negativ auf die Berechnungsergebnisse aus. Hier kann das Nachweisergebnis folglich mangelhaft ausfallen, sodass diese Variante ausschließlich für Vorbemessungen, welche von einer geringen Rechenzeit profitieren, zu verwenden ist. Beispielsweise könnte ein Gebäude komplett vereinfacht simuliert werden, um die problematischen Räume festzustellen, welche anschließend mit genauer Parametrierung simuliert werden.

Neben der Berechnung ist auch eine Slice-Erstellung über rtrace möglich. Der beschriebene Algorithmus ermöglicht die Erstellung solcher Falschfarbenbilder. Jedoch unter der Bedingung, dass der Raum rechteckig ist. Sollte dies nicht der Fall sein, wird trotzdem ein rechteckiges Bild ausgegeben, wobei die Grenzen zwischen Innen und Außenraum verschwimmen können. Folglich ist diese Methodik nicht universell auf alle Raumarten anwendbar. Wie zuvor erläutert, ist hier eine separate Betrachtung zur Erstellung von Slices notwendig, wobei die Generierung der Bilder aus den Berechnungsergebnissen empfohlen wird.

Für beide Anwendungsfälle von rtrace ist die Verwendung stündlicher Klimadaten nicht gegeben. Die in dieser Arbeit beschriebene Methodik stellt sich statisch dar und simuliert lediglich eine Variante der Tageslichtversorgung unter einem bewölkten Himmel. Folglich können dynamische Einflüsse, wie Sonnenschutz, oder wechselnde Helligkeitsbedingungen im Tagesgang nicht berücksichtigt werden. Da es sich bei dieser Betrachtung um ein weiteres mögliches Verfahren nach DIN EN 17037 handelt, besteht für die zukünftige Entwicklung des Algorithmus noch Potenzial. In diesem Zuge ist die Auswertung insoweit anzupassen, dass die Kriterien der Empfehlungsstufen für 50 % der Tageslichtstunden zu erreichen sind.

8.3. Ausgabe/Auswertung

Da die Ausgabe von Daten unmittelbar an die Auswertung dieser geknüpft ist, muss ihre Funktionalität im Kontext betrachtet werden.

Die beschriebene Methodik ermöglicht sowohl die gegliederte Ausgabe von Rohdaten, welche durch den Nutzer händisch weiterverarbeitet werden können, als auch eine vorverarbeitete Variante in Form des Berichtes. Damit ist eine möglichst hohe Flexibilität für alle Arten von Anwendern gegeben.

In Bezug auf die Rohdaten können die Beleuchtungsstärken aller Punkte eines simulierten Raumes nachvollzogen werden. Außerdem erfolgt eine Ausgabe bezüglich der erreichten Empfehlungsstufen und Flächenanteile der simulierten Räume. Hier sind die Beleuchtungsstärken also bereits weiterverarbeitet. Das dazu notwendige Vorgehen wurde anhand des Beispielgebäudes in Kapitel 7 überprüft, wobei keine Einschränkungen der Funktionalität festgestellt werden konnten.

Da der Musterbericht auf die gleichen Ausgaben verweist, ist auch hier die volle Funktionalität gegeben. Hier besteht in zukünftiger Weiterentwicklung lediglich die Option, bereits vorgefertigte Texte, welche auf den Simulationsergebnissen basieren, vorzusehen. Nach aktuellem Stand sind alle Texte noch vom Nutzer selbst zu ergänzen, wobei die gesamte Formatierung, sowie Bilder und Tabellen bereits vorgegeben sind.

Fazit

Der betrachtete Algorithmus kann insgesamt alle notwendigen Funktionen zum Normnachweis der Tageslichtversorgung erreichen. Dabei ist zu beachten, dass derzeit ausschließlich die Durchführung eines statischen Verfahrens vorgesehen ist. Eine Betrachtung auf Grundlage stündlicher Klimadaten ist daher mit dieser Methodik noch nicht möglich, woraus sich ein Bereich mit Entwicklungspotenzial ergibt. Darüber hinaus ist die visuelle Auswertung in Form von Slices nur eingeschränkt möglich, da diese nach aktuellem Stand nicht auf jeden Raum anwendbar sind. In seiner Grundform ist er ungeachtet dessen verwendbar und erfüllt alle Vorgaben der DIN EN 17037.

Anhang

Anhang 1 - Kategorisierte Funktionsübersicht Radiance	96
Anhang 2 - Gegenüberstellung der Erfassung geometrischer Sonderfälle	98
Anhang 3 - Materialparameter aus dem Jaloxa Tool - Chooser (Jacobs)	100
Anhang 4 - Übersicht der Himmelstypen nach ISO 15469	104
Anhang 5 - Übersicht Zeitzonen mit Vollnamen und Beispielregionen	105
Anhang 6 - Messergebnisse der Himmelsvalidierung	106
Anhang 7 - Rpict Parameter: Rendereinstellungen(Auswahl)	107
Anhang 8 - Pfilt: Parameter	108
Anhang 9 - Rpict Voreinstellungen & resultierende Ergebnisbilder	109
Anhang 10 - Rpict Rechenzeiten in Abhängigkeit der Parameter	115
Anhang 11 - Falsecolor Parameter	116
Anhang 12 - Rtrace Parameter (Auswahl)	117
Anhang 13 - Beispieleingabe für die Erstellung von Punktlisten mit vwrays	118
Anhang 14 - Beispieleingabe für die Erstellung von Slices	118
Anhang 15 - Größenvergleich der Slices der Stufe "Genau"	119
Anhang 16 - Musterbericht: Textvorlage zu "Normgrundlage DIN EN 17037"	120
Anhang 17 - Materialzuweisung Beispielgebäude nach Raumkategorien	121
Anhang 18 - Grundrissausschnitt 2.OG des Beispielgebäudes	122
Anhang 19 - Mittlere Abweichungen zwischen den Parametrierungsvarianten in den Räumen des Beispielgebäudes	123

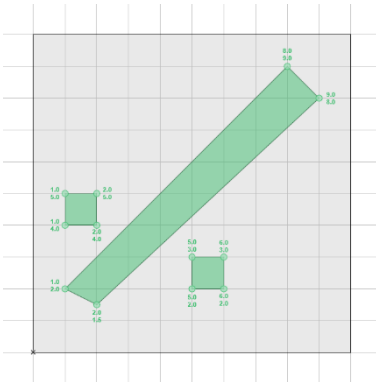
Anhang 1 - Kategorisierte Funktionsübersicht Radiance

Szenenvorbereitung / Verarbeitung	
ies2rad	konvertiert IES-Leuchtdaten in eine RADIANCE-Beschreibung
mgf2meta	konvertiert Materials and Geometry Format-Datei in Metafile-Grafik
mgf2rad	konvertiert Materials and Geometry Format-Datei in eine RADIANCE-Beschreibung
obj2rad	konvertiert Wavefront .obj-Datei in eine RADIANCE-Beschreibung
obj2mesh	erstellt eine kompilierte RADIANCE-Mesh-Datei aus Wavefront .OBJ-Eingaben
tmesh2rad	konvertiert ein dreieckiges Mesh in eine RADIANCE-Szenenbeschreibung
Radiance-Geometriegeneratoren	
genblinds	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung von Jalousien
genbox	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung einer Box
genBSDF	erstellt BSDF-Beschreibungen aus Radiance- oder MGF-Eingaben
genclack	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung einer Uhr
genprism	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung eines Prismas
genrev	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung einer Rotationsfläche
gensky	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung des Himmels
gendaylit	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung der Tageslichtquellen unter Verwendung der Perez-Modelle für diffuse und direkte Komponenten
gensurf	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung einer gekrümmten Fläche
genworm	erzeugt eine RADIANCE-Beschreibung eines funktionalen Wurms
pkgBSDF	packt BSDFs, die als XML für Radiance bereitgestellt werden
Szenenvorbereitung / Verarbeitung	
xform	transformiert eine RADIANCE-Szenenbeschreibung
rcalc	Aufzeichnungsrechner
icalc	interaktiver Rechner
cnt	Zähler
macbethcal	berechnet die Farbkompensation basierend auf dem gemessenen Macbeth-Chart
lampcolor	berechnet die spektrale Strahldichte für diffuse Lichtquellen
ev	wertet Ausdrücke aus
neaten	ordnet Ausgabespalten
tabfunc	konvertiert Tabellen in Funktionen für rcalc usw.
total	summiert Spalten
vwright	normalisiert eine RADIANCE-Ansicht und verschiebt sie nach rechts
rcollate	ändert die Größe oder transponiert eine Matrix von Datenwerten
replmarks	ersetzt Dreiecksmarker in einer RADIANCE-Szenenbeschreibung
rlam	laminieren Datensätze aus mehreren Dateien
pmbur	erstellt Ansichten für Bewegungsunschärfe der Kamera
pmdbur	erstellt Ansichten für kombinierte Bewegungs- und Tiefenschärfenunschärfe
pdfbur	erstellt Ansichten für Tiefenschärfenunschärfe
vwrays	berechnet Strahlen für ein bestimmtes Bild oder eine bestimmte Ansicht
oconv	erstellt einen Octree aus einer RADIANCE-Szenenbeschreibung
getbbox	berechnet die Begrenzungsbox für eine RADIANCE-Szene
mkillum	berechnet Beleuchtungsquellen für eine RADIANCE-Szene
compamb	berechnet einen guten Umgebungswert für eine rad-Eingabedatei
raddepend	findet Abhängigkeiten in einer RADIANCE-Szene
objview	zeigt RADIANCE-Objekte an
lookamb	untersucht Umgebungsdatei-Werte
rhcopy	kopiert Strahlinformationen in ein Holodeck
rhoptimize	optimiert Strahlenpositionen in einer Holodeck-Datei
Rendering	
rpict	erstellt ein RADIANCE-Bild
rvu	erstellt interaktiv RADIANCE-Bilder
rcontrib	berechnet Beitragskoeffizienten in einer RADIANCE-Szene
rtrace	verfolgt Strahlen in einer RADIANCE-Szene
rpiece	rendert Teile eines RADIANCE-Bildes
ranimate	erstellt eine RADIANCE-Animation
ranimove	rendert eine RADIANCE-Animation mit Bewegung
rho	erstellt / zeigt ein RADIANCE-Holodeck an
rhpic	rendert ein RADIANCE-Bild aus einer Holodeck-Datei
bsdfview	zeigt eine BSDF-Darstellung an
Benutzeroberfläche	
rad	rendert eine RADIANCE-Szene
trad	grafische Benutzeroberfläche für das Radiance-Programm rad
lampcolor	berechnet die spektrale Strahldichte für diffuse Lichtquellen
dayfact	berechnet Beleuchtungsstärke und Tageslichtfaktor auf einer Arbeitsebene
glare	führt Blendungs- und Komfortberechnungen durch
getinfo	ruft Header-Informationen aus einer RADIANCE-Datei ab
xshowtrace	zeigt interaktiv verfolgte Strahlen auf einem RADIANCE-Bild unter X11 an

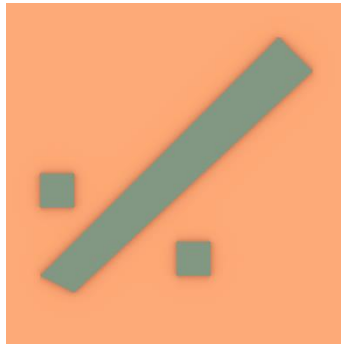
Ausgabe anzeigen	
ximage	RADIANCE-Bildanzeige für das X-Fenstersystem
x11meta	gibt Metafile-Grafiken auf X11 aus
Tageslichtkoeffizienten und Flux-Matrix-Tools für Jahressimulationen	
genklemsamp	erstellt Strahlenproben über Oberflächen unter Verwendung der Klems-BSDF-Basis
genskyvec	berechnet durchschnittliche Strahldichte für einen spezifischen Himmel
gendaymtx	erstellt eine jährliche Perez-Himmelsmatrix aus einer Wetterdatei
dcimestep	berechnet die jährliche Simulationszeit über Matrixmultiplikation
rfluxmtx	berechnet Flux-Übertragungsmatrizen für eine Radiance-Szene
rmtxop	verketten, addieren, multiplizieren, dividieren, transponieren, skalieren und konvertieren von Matrizen
Photonen-Kartentools	
mkpmap	erstellt eine RADIANCE-Photonenkarte
Analysieren und falten	
pfilt	filtert ein RADIANCE-Bild
falsecolor	erstellt ein Falschfarben-RADIANCE-Bild
histo	berechnet ein eindimensionales Histogramm von N Datenspalten
phisto	berechnet ein Leuchtdichte-Histogramm aus einem oder mehreren RADIANCE-Bildern
pcond	konditioniert ein RADIANCE-Bild für die Ausgabe
findglare	lokalisiert Blendquellen in einer RADIANCE-Szene
glarendx	berechnet Blendungsindex
xglaresrc	zeigt Blendungsquellen unter X11 an
evalglare	lokalisiert Blendquellen und berechnet Blendungsmetriken in einem RADIANCE-Bild
pcomb	kombiniert RADIANCE-Bilder
pcompos	setzt RADIANCE-Bilder zusammen
pexpand	erweitert angeforderte Befehle in Metadateien
pextrem	findet Minimal- und Maximalwerte in einem RADIANCE-Bild
pflip	dreht ein RADIANCE-Bild
pinterp	interpoliert/extrapoliert Ansicht aus Bildern
protate	rotiert ein RADIANCE-Bild
psign	erstellt ein RADIANCE-Bild aus Text
psort	sortiert Metafile-Primitiven nach Anforderung
pvalue	konvertiert ein RADIANCE-Bild in/aus alternativen Formaten
dayfact	berechnet Beleuchtungsstärke und Tageslichtfaktor auf einer Arbeitsebene
normpat	normalisiert RADIANCE-Bilder zur Verwendung als Muster
fieldcomb	kombiniert zwei oder mehr Felder für Videoanimationen
Konverter	
rad2mgf	konvertiert eine RADIANCE-Szenenbeschreibung in das Materials and Geometry Format
ra_gif	konvertiert RADIANCE-Bilder in Compuserve GIF
ra_bmp	konvertiert RADIANCE-Bilder in/aus Windows BMP-Bildern
ra_pict	konvertiert Radiance-Bilder in Macintosh PICT-Dateien
ra_ppm	konvertiert RADIANCE-Bilder in/aus ein Poskanzer Portable Pixmap
ra_ps	konvertiert ein RADIANCE-Bild in eine PostScript-Datei
ra_rgbe	ändert die Lauflängenkomprimierung eines RADIANCE-Bildes
ra_t16	konvertiert RADIANCE-Bilder in/aus Targa 16- oder 24-Bit-Bilddateien
ra_t8	konvertiert RADIANCE-Bilder in/aus Targa 8-Bit-Bilddateien
ra_tiff	konvertiert RADIANCE-Bilder in/aus TIFF-Farb- oder Graustufenbildern
ra_xyze	konvertiert zwischen RADIANCE RGBE- und XYZ-Formaten
ran2tiff	belichtet und konvertiert eine RADIANCE-Animation in TIFF-Frames
normtiff	passt die Tonwertkurve an und konvertiert RADIANCE-Bilder oder SGILOG-TIFF in RGB-TIFF
Sonstige Ausgabe	
dgraph	erstellt eine Reihe von Grafiken für ein einfaches Terminal
gcomp	führt Berechnungen auf einer Grafikdatei durch
igraph	interaktives Grafikprogramm
Metafile-Tools	
libmeta.a	vereinfachte Schnittstelle zu Metadateien
metafile	Grafikbefehlsschnittstelle, ähnlich wie plot
objline	erstellt Linienzeichnungen von RADIANCE-Objekten als Metadatei
plotin	konvertiert plot in Metafile-Primitiven
psmeta	konvertiert Metadatei in PostScript
bgraph	erstellt eine Reihe von Batch-Grafiken als Metadatei
cv	konvertiert zwischen Metadateiformaten
meta2bmp	konvertiert eine Metadatei in ein Windows-Bitmap (BMP)
meta2tga	konvertiert eine Metadatei in das Targa-Bildformat
x11meta	gibt Metafile-Grafiken auf X11 aus

Anhang 2 - Gegenüberstellung der Erfassung geometrischer Sonderfälle

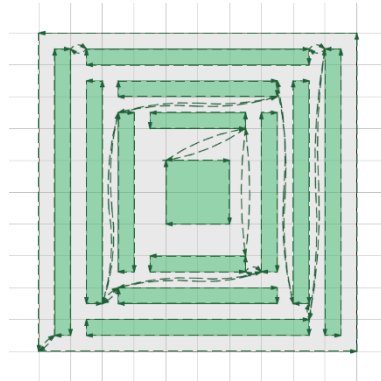
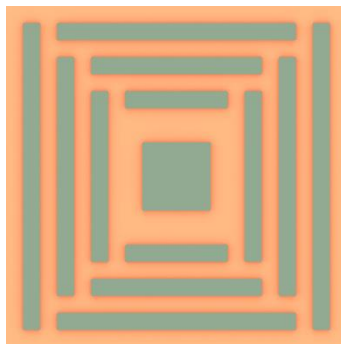
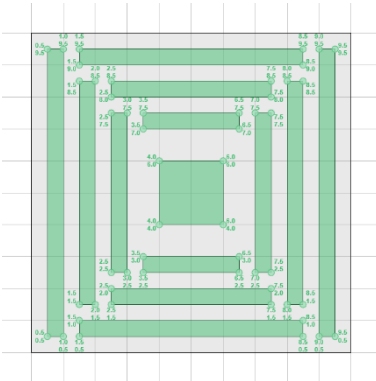
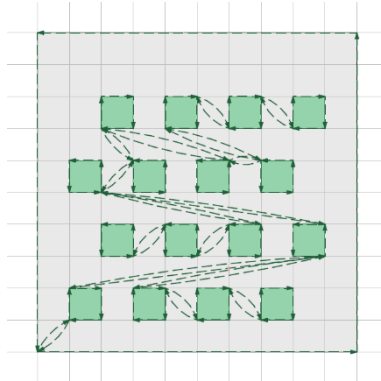
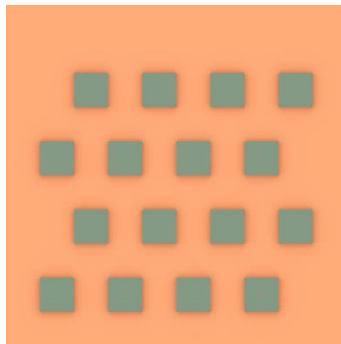
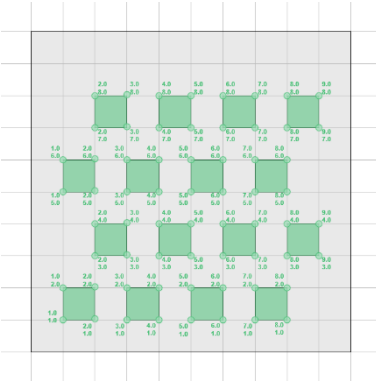
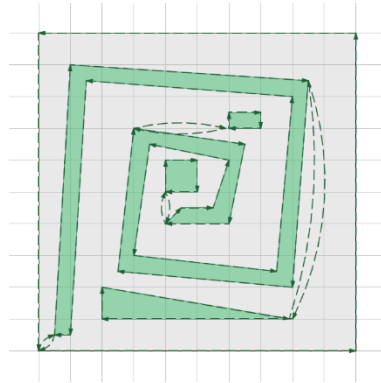
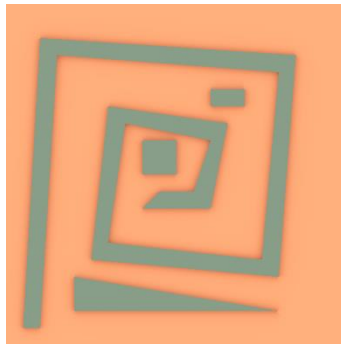
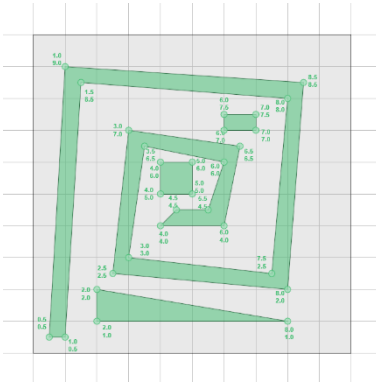
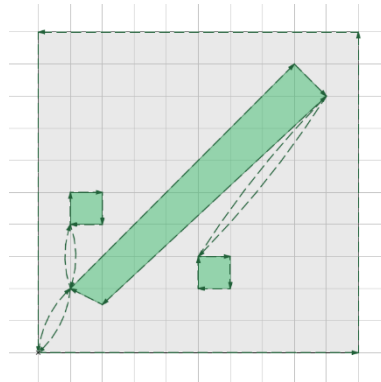
Skizze

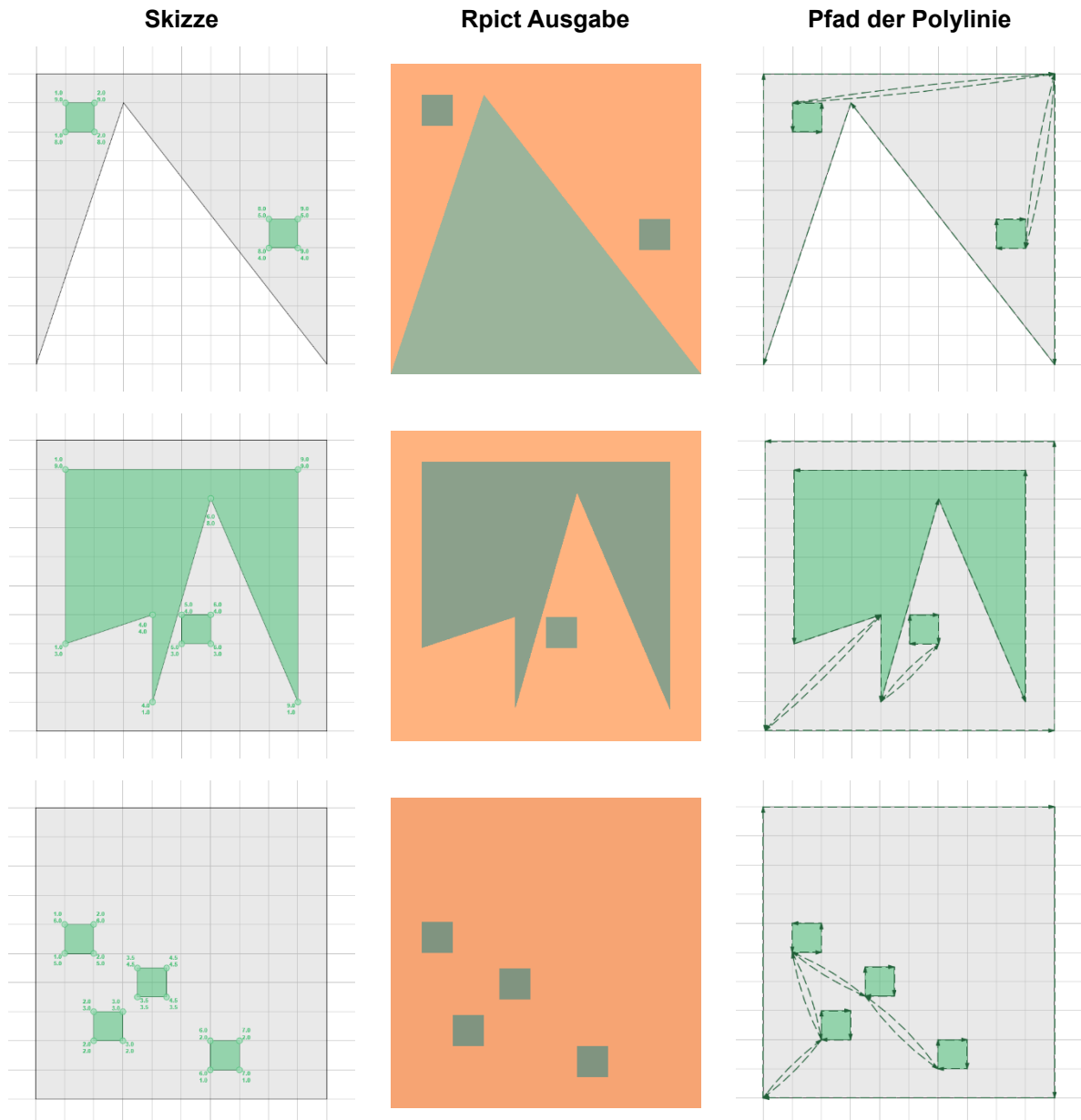


Rpict Ausgabe



Pfad der Polylinie





Erkenntnisse zur Funktionalität des Geometrie-Algorithmus:

1. Die Erfassungsreihenfolge ist ausschließlich von der ID der Polygone abhängig. Da die IDs wiederum abhängig von der Erstellreihenfolge im Modell sind, wird so nicht immer der effizienteste Weg gewählt.
2. Die Drehrichtung der Polygone, also die Reihenfolge der Eckpunkte, nimmt wesentlichen Einfluss auf die Erfassung, da stets der Punkt mit dem kleinsten Index bevorzugt wird. Dabei ergibt sich ein vergleichbar ineffizienter Weg, wie in Punkt 1 beschrieben.
3. Die Erfassung eines weiteren Polygons hat Vorrang gegenüber der Erfassung weiterer Punkte im aktuellen Polygon. Dadurch gestaltet sich der Pfad ebenfalls häufig komplexer als notwendig.

Als Lösungsansatz zu den beobachteten Problemen, wäre neben der Abfrage auf Schnittpunkte eine Abfrage des kürzesten Weges denkbar. So könnten unnötig große Sprünge zwischen den Polygonen vermieden und stattdessen bereits begonnene Polygone komplett erfasst werden.

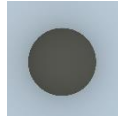
Anhang 3 - Materialparameter¹¹⁴ aus dem Jaloxa Tool - Chooser (Jacobs)

Holz- & Faserstoffe

MDF/HDF

Reflectance: $\rho=0.15$
void plastic AgglomerateWoodFiber
0
0

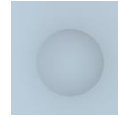
5 0.17 0.147 0.107 0 0



Papier

Reflectance: $\rho=0.902$
void plastic Paper
0
0

5 0.9 0.9 0.9 0.02 0.08



Glänzendes graues Papier

Reflectance: $\rho=0.376$
void plastic GlossyGreyPaper
0
0

5 0.32 0.32 0.32 0.083 0.082



Faserzementplatten

Rot-Braun

Reflectance: $\rho=0.197$
void plastic AuburnEternit
0
0

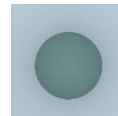
5 0.341 0.148 0.113 0 0



Blau-Grau

Reflectance: $\rho=0.388$
void plastic BlueGrayEternit
0
0

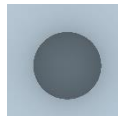
5 0.287 0.429 0.372 0 0



Blau

Reflectance: $\rho=0.247$
void plastic BlueEternit
0
0

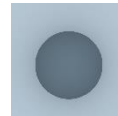
5 0.234 0.251 0.26 0 0



Hellblau

Reflectance: $\rho=0.289$
void plastic LightBlueEternit
0
0

5 0.249 0.3 0.332 0 0



Pink

Reflectance: $\rho=0.334$
void plastic PinkEternit
0
0

5 0.473 0.287 0.259 0 0



Violet

Reflectance: $\rho=0.164$
void plastic VioletEternit
0
0

5 0.189 0.155 0.159 0 0

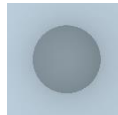


Betone

Hell, gestrichen

Reflectance: $\rho=0.505$
void plastic LightPaintedConcrete
0
0

5 0.493 0.51 0.499 0 0



Hell

Reflectance: $\rho=0.416$
void plastic LightConcrete
0
0

5 0.47 0.403 0.337 0 0



Normalbeton

Reflectance: $\rho=0.204$
void plastic MediumConcrete
0
0

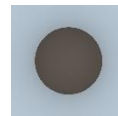
5 0.244 0.194 0.145 0 0



Dunkel

Reflectance: $\rho=0.161$
void plastic DarkConcrete
0
0

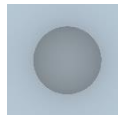
5 0.216 0.145 0.106 0 0



Ytong

Reflectance: $\rho=0.555$
void plastic CellularConcreteYtong
0
0

5 0.576 0.549 0.53 0 0

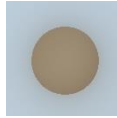


¹¹⁴ Bei den Abbildungen handelt es sich um Selbsterstellte Radiance Ausgaben. Dazu wurde rpict in Kombination mit dem bewölkten Himmel 13.900 lx aus 5.2.1 verwendet. Auf den ihnen ist je eine 1x1 m große Kugel mit den beistehenden Materialparametern zu sehen. Im Hintergrund befindet sich eine Bodenplatte.

Hölzer

Zirbe

Reflectance: $\rho=0.489$
 void plastic ArolleWood
 0
 0
 5 0.645 0.374 0.162 0.1 0.08



Esche

Reflectance: $\rho=0.46$
 void plastic AshWood
 0
 0
 5 0.544 0.362 0.208 0.1 0.08



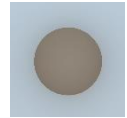
Buche

Reflectance: $\rho=0.335$
 void plastic BeechWood
 0
 0
 5 0.413 0.214 0.125 0.1 0.08



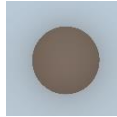
Birke

Reflectance: $\rho=0.417$
 void plastic BirchWood
 0
 0
 5 0.494 0.313 0.181 0.1 0.08



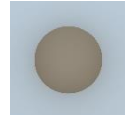
Kirsche

Reflectance: $\rho=0.281$
 void plastic CherryWood
 0
 0
 5 0.334 0.16 0.077 0.1 0.08



Kastanie

Reflectance: $\rho=0.444$
 void plastic ChestnutWood
 0
 0
 5 0.525 0.344 0.19 0.1 0.08



Ulme

Reflectance: $\rho=0.381$
 void plastic ElmWood
 0
 0
 5 0.46 0.271 0.134 0.1 0.08



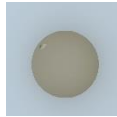
Hemlock Tanne

Reflectance: $\rho=0.416$
 void plastic HemlockWood
 0
 0
 5 0.503 0.309 0.168 0.1 0.08



Hainbuche

Reflectance: $\rho=0.55$
 void plastic HornbeamWood
 0
 0
 5 0.619 0.473 0.286 0.1 0.08



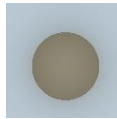
Lärche

Reflectance: $\rho=0.411$
 void plastic LarchWood
 0
 0
 5 0.528 0.294 0.14 0.1 0.08



Limba

Reflectance: $\rho=0.433$
 void plastic LimbaWood
 0
 0
 5 0.485 0.344 0.17 0.1 0.08



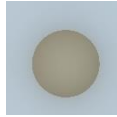
Linde

Reflectance: $\rho=0.483$
 void plastic LindenWood
 0
 0
 5 0.591 0.382 0.196 0.1 0.08



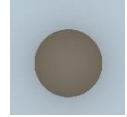
Ahorn

Reflectance: $\rho=0.59$
 void plastic MapleWood
 0
 0
 5 0.689 0.511 0.298 0.1 0.08



Eiche

Reflectance: $\rho=0.304$
 void plastic OakWood
 0
 0
 5 0.329 0.199 0.1 0.1 0.08



Douglasie

Reflectance: $\rho=0.448$
 void plastic OregonPineWood
 0
 0
 5 0.588 0.329 0.154 0.1 0.08



Parkett

Reflectance: $\rho=0.222$
 void plastic ParquetWood
 0
 0
 5 0.309 0.165 0.083 0.03 0.1



Birne

Reflectance: $\rho=0.223$
 void plastic PearWood
 0
 0
 5 0.246 0.1 0.068 0.1 0.08



Pappel

Reflectance: $\rho=0.572$
 void plastic PoplarWood
 0
 0
 5 0.653 0.497 0.291 0.1 0.08



Rotkiefer

Reflectance: $\rho=0.545$
 void plastic RedPineWood
 0
 0
 5 0.667 0.452 0.231 0.1 0.08



Waldkiefer/schottische Kiefer

Reflectance: $\rho=0.514$
 void plastic ScotsPineWood
 0
 0
 5 0.64 0.415 0.195 0.1 0.08



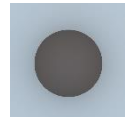
Teak

Reflectance: $\rho=0.263$
 void plastic TeakWood
 0
 0
 5 0.28 0.153 0.071 0.1 0.08



Walnuss

Reflectance: $\rho=0.197$
 void plastic WalnutWood
 0
 0
 5 0.156 0.093 0.068 0.1 0.08



Weißkiefer

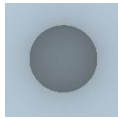
Reflectance: $\rho=0.566$
 void plastic WhitePineWood
 0
 0
 5 0.683 0.477 0.26 0.1 0.08



Steine

Heller Simplon-Granit

Reflectance: $\rho=0.359$
 void plastic LightSimplonGranite
 0
 0
 5 0.355 0.361 0.348 0 0



Glänzender Schwarzer Granit

Reflectance: $\rho=0.099$
 void plastic ShinyBlackGranite
 0
 0
 5 0.101 0.098 0.103 0 0



Dunkler Tessin-Granit

Reflectance: $\rho=0.155$
 void plastic DarkTicinoGranite
 0
 0
 5 0.194 0.143 0.123 0 0



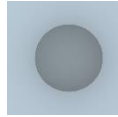
Grünlicher Alba-Marmor

Reflectance: $\rho=0.661$
 void plastic GreenishWhiteAlba
 0
 0
 5 0.612 0.683 0.628 0 0



Kalk-Silikat-Ziegel

Reflectance: $\rho=0.488$
 void plastic ChalkySilicateBrick
 0
 0
 5 0.499 0.487 0.458 0 0



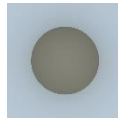
Verunreinigter Alba-Marmor

Reflectance: $\rho=0.479$
 void plastic DirtyWhiteAlba
 0
 0
 5 0.51 0.473 0.412 0 0



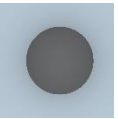
Cremeweißer Kies

Reflectance: $\rho=0.384$
 void plastic CreamWhiteGravel
 0
 0
 5 0.452 0.369 0.259 0 0



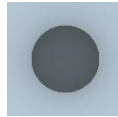
Zementblock

Reflectance: $\rho=0.236$
 void plastic CementBlock
 0
 0
 5 0.27 0.226 0.203 0 0



Zementstein Variante 1

Reflectance: $\rho=0.198$
 void plastic CementBrick1
 0
 0
 5 0.196 0.2 0.189 0 0



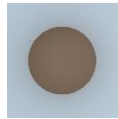
Zementstein Variante 2

Reflectance: $\rho=0.289$
 void plastic CementBrick2
 0
 0
 5 0.356 0.269 0.225 0 0



Terra Cotta, hell

Reflectance: $\rho=0.285$
 void plastic LightTerraCottaBrick
 0
 0
 5 0.427 0.242 0.146 0 0



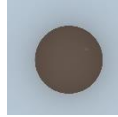
Terra Cotta, dunkel

Reflectance: $\rho=0.207$
 void plastic DarkTerraCottaBrick
 0
 0
 5 0.364 0.155 0.097 0 0



Terra Cotta, hell, texturiert

Reflectance: $\rho=0.17$
 void plastic TextLightTerraCottaBrick
 0
 0
 5 0.252 0.145 0.097 0 0



Terra Cotta, dunkel, texturiert

Reflectance: $\rho=0.219$
 void plastic TextDarkTerraCottaBrick
 0
 0
 5 0.392 0.163 0.087 0 0



Putze

Rauputz, weiß

Reflectance: $\rho=0.707$
 void plastic WhiteRoughcast
 0
 0
 5 0.726 0.706 0.633 0 0



Metalle

Aluminium

Reflectance: $\rho=0.885$

void metal Aluminium

0

0

5 0.9 0.88 0.88 0.8 0.02



Gewalztes Aluminium

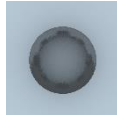
Reflectance: $\rho=0.31$

void metal RolledAluminium

0

0

5 0.31 0.31 0.31 0.68 0.065



Alufolie

Reflectance: $\rho=0.92$

void metal AluminiumFoil

0

0

5 0.92 0.92 0.92 0.12 0.1



Beige/Goldenes Metall

Reflectance: $\rho=0.653$

void metal Champagne

0

0

5 0.7 0.641 0.58 1 0.4



Oxidiertes Kupfer

Reflectance: $\rho=0.11$

void metal OxidizedCopper

0

0

5 0.136 0.102 0.083 0.3 0.2



Verzinktes Blech (neu)

Reflectance: $\rho=0.66$

void metal NewGalvanisedSheetMetal

0

0

5 0.623 0.672 0.692 0.5 0.1



Edelstahl Variante 1

Reflectance: $\rho=0.8$

void metal StainlessSteel1

0

0

5 0.8 0.8 0.8 0.9 0.035



Stahl

Reflectance: $\rho=0.498$

void metal Steel

0

0

5 0.498 0.498 0.498 0.4 0.01



Gebürstetes Aluminium

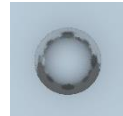
Reflectance: $\rho=0.7$

void metal BrushedAluminium

0

0

5 0.7 0.7 0.7 0.85 0.05



Oxidiertes Aluminium

Reflectance: $\rho=0.48$

void metal OxidizedAluminium

0

0

5 0.487 0.481 0.436 0.3 0.02



Messing

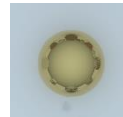
Reflectance: $\rho=0.584$

void metal Brass

0

0

5 0.726 0.563 0.223 0.85 0



Chrom

Reflectance: $\rho=0.815$

void metal Chrome

0

0

5 0.808 0.821 0.789 0.823 0.05



Gold

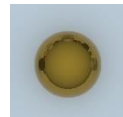
Reflectance: $\rho=0.288$

void metal Gold

0

0

5 0.45 0.25 0.02 0.9 0



Verzinktes Blech (alt)

Reflectance: $\rho=0.271$

void metal OldGalvanisedSheetMetal

0

0

5 0.259 0.276 0.27 0.3 0.2



Edelstahl Variante 2

Reflectance: $\rho=0.541$

void metal StainlessSteel2

0

0

5 0.54 0.54 0.55 0.96 0.02



Anhang 4 - Übersicht der Himmelstypen nach ISO 15469

Typ	Gradations-Gruppe	Indicatrix Gruppe	Beschreibung
1	1	1	CIE Standard Overcast Sky: <i>Steile Leuchtdichteabnahme in Richtung Zenit, gleichmäßige Verteilung in der Azimutalebene</i>
2	1	2	<i>Bewölkt, mit steiler Leuchtdichteabnahme und leichter Aufhellung in Richtung Sonne</i>
3	2	1	<i>Bewölkt, mäßig abgestuft mit gleichmäßiger Verteilung in der Azimutalebene</i>
4	2	2	<i>Bewölkt, mäßig abgestuft und leichte Aufhellung in Richtung Sonne</i>
5	3	1	Himmel mit gleichmäßiger Leuchtdichte
6	3	2	<i>Teilweise bewölkter Himmel, keine Leuchtdichteabnahme zum Zenit, leichte Aufhellung in Richtung Sonne</i>
7	3	3	<i>Teilweise bewölkter Himmel, keine Leuchtdichteabnahme zum Zenit, hellerer Bereich um die Sonne</i>
8	3	4	<i>Teilweise bewölkter Himmel, keine Leuchtdichteabnahme zum Zenit, ausgeprägte Sonnenkorona</i>
9	4	2	<i>Teilweise bewölkt, mit verdeckter Sonne</i>
10	4	3	<i>Teilweise bewölkt, mit hellerer Region um die Sonne</i>
11	4	4	<i>Weiß-blauer Himmel mit ausgeprägter Sonnenkorona</i>
12	5	4	CIE Standard Clear Sky: <i>niedrige Trübung</i>
13	5	5	CIE Standard Clear Sky: <i>verschmutzte Atmosphäre</i>
14	6	5	<i>Wolkenloser trüber Himmel mit breiter Sonnenkorona</i>
15	6	6	<i>Weiß-blauer trüber Himmel mit breiter Sonnenkorona</i>

Anhang 5 - Übersicht Zeitzone mit Vollnamen und Beispielregionen

Standard Time		Daylight Savings Time		Region
UTC	Coordinated Universal Time	-	-	-
GMT	Greenwich Mean Time	BST	British Summer Time	Vereinigtes Königreich, Westafrika
CET	Central European Time	CEST	Central Eur. Summer Time	Deutschland, Frankreich, Spanien
EET	Eastern European Time	EEST	Eastern Eur. Summer Time	Griechenland, Bulgarien, Rumänien
EST	Eastern Standard Time	EDT	Eastern Daylight Time	New York, Toronto, Montreal
CST	Central Standard Time	CDT	Central Daylight Time	Chicago, Dallas, Mexiko-Stadt
MST	Mountain Standard Time	MDT	Mountain Daylight Time	Denver, Phoenix (USA)
PST	Pacific Standard Time	PDT	Pacific Daylight Time	Los Angeles, Vancouver, San Francisco
IST	Indian Standard Time	-	-	Indien, Sri Lanka
AEST	Australian Eastern Standard Time	AEDT	Australian Eastern Daylight Time	Sydney, Melbourne, Brisbane
JST	Japan Standard Time	-	-	Japan
NZST	New Zealand Standard Time	NZDT	New Zealand Daylight Time	Auckland, Wellington
AST	Atlantic Standard Time	ADT	Atlantic Daylight Time	Puerto Rico, Dominikanische Republik
HST	Hawaii-Aleutian Standard Time	-	-	Hawaii
WET	Western European Time	WEST	Western Eur. Summer Time	Portugal, Irland

Anhang 6 - Messergebnisse der Himmelsvalidierung

Koordinaten			Beleuchtungsstärke am Messpunkt [lx]	Abweichungen	
X	Y	Z		In Lux	In Prozent
0,00	0,00	-100,00	13884,08	15,92	0,11%
0,00	0,00	-75,00	13891,16	8,84	0,06%
0,00	0,00	-50,00	13881,23	18,77	0,14%
0,00	0,00	-25,00	13894,33	5,67	0,04%
0,00	0,00	0,00	13889,62	10,38	0,07%
0,00	0,00	25,00	13884,41	15,59	0,11%
0,00	0,00	50,00	13876,40	23,60	0,17%
0,00	0,00	75,00	13880,01	19,99	0,14%
0,00	0,00	100,00	13889,90	10,10	0,07%
-100,00	0,00	0,00	13891,23	8,77	0,06%
-75,00	0,00	0,00	13894,48	5,52	0,04%
-50,00	0,00	0,00	13882,82	17,18	0,12%
-25,00	0,00	0,00	13881,34	18,66	0,13%
0,00	0,00	0,00	13889,62	10,38	0,07%
25,00	0,00	0,00	13894,43	5,57	0,04%
50,00	0,00	0,00	13885,69	14,31	0,10%
75,00	0,00	0,00	13890,65	9,35	0,07%
100,00	0,00	0,00	13876,59	23,41	0,17%
0,00	-100,00	0,00	13888,91	11,09	0,08%
0,00	-75,00	0,00	13893,29	6,71	0,05%
0,00	-50,00	0,00	13899,22	0,78	0,01%
0,00	-25,00	0,00	13892,12	7,88	0,06%
0,00	0,00	0,00	13889,62	10,38	0,07%
0,00	25,00	0,00	13889,41	10,59	0,08%
0,00	50,00	0,00	13883,84	16,16	0,12%
0,00	75,00	0,00	13897,36	2,64	0,02%
0,00	100,00	0,00	13888,47	11,53	0,08%
-100,00	-100,00	100,00	13896,85	3,15	0,02%
-100,00	100,00	100,00	13882,93	17,07	0,12%
100,00	100,00	100,00	13892,99	7,01	0,05%
100,00	-100,00	100,00	13883,62	16,38	0,12%
-100,00	-100,00	0,00	13883,79	16,21	0,12%
-100,00	100,00	0,00	13883,10	16,90	0,12%
100,00	100,00	0,00	13872,56	27,44	0,20%
100,00	-100,00	0,00	13877,89	22,11	0,16%
-100,00	-100,00	-100,00	13889,93	10,07	0,07%
-100,00	100,00	-100,00	13884,72	15,28	0,11%
100,00	100,00	-100,00	13895,24	4,76	0,03%
100,00	-100,00	-100,00	13895,81	4,19	0,03%

Anhang 7 - Rpic Parameter: Rendereinstellungen¹¹⁵(Auswahl)

-pt frac	Pixel-Sample-Toleranz <i>Bruch beschreibt den maximalen prozentualen Helligkeitsunterschied zwischen zwei Pixeln, bis eine weitere Berechnung zwischen diesen ausgeführt wird</i>
-pj frac	Pixel-Sample-Jittering <i>Bruch gibt an wie stark die Proben innerhalb eines Pixels zufällig verteilt werden. = bedeutet, dass alle in die Pixelmitte gehen. Empfohlen: 0,5-0,8</i>
-dt frac	Direct Threshold <i>Bruch definiert Schwellenwert (im Verhältnis zu bisher berechnetem Wert) ab welchem weitere Beiträge von Lichtquellen statistisch approximiert, statt berechnet werden.</i>
-dc frac	Direct Certainty <i>Bestimmt, wie genau die direkte Beleuchtungsberechnung ist. 1 sorgt für vollständige Berechnungen, 0 berechnet nur Schatten, welche zu größerem Kontrastwechsel führen als in -dt festgelegt.</i>
-dr N	Direct Reflections (Secondary Sources) <i>Bestimmt, wie viele Generationen sekundärer Lichtquellen berechnet werden. Sekundäre Lichtquellen entstehen überall dort, wo Licht spekulär reflektiert wird.</i>
-dp D	Sekundäre Quelle Preresampling-Dichte <i>Steuert, Anzahl der Proben pro Steradian¹¹⁶, um zu entscheiden, ob die Schattenprüfung für einen sekundären Lichtquellenpfad durchzuführen ist. 0 prüft alle.</i>
-ss samp	Specular Sampling <i>Gibt an, wie viele Proben für die spekulare Reflexion des Materials genommen werden. 0 = keine diffuse Reflexion <1 = grobe Highlights/Glanzlichter auf den Oberflächen >1 = genauere Berechnung der Glanzlichter, mit wenig rauschen</i>
-st frac	Spekulare Sampling-Schwelle <i>Definiert Schwellenwert für die notwendige Intensität von Glanzlichtern zur Simulation. Bei 0 werden alle genau simuliert, bei 1 erfolgt eine Approximation über -av.</i>
-av r g b	Ambient Value (Umgebungslichtwert) <i>Ersetzt genaue Einzelberechnungen durch konstante indirekte Lichtquelle.</i>
-aw N	Relatives Gewicht des Umgebungswertes <i>Steuert wie stark der -av Wert durch Berechnungen angepasst wird. 0 keine Anpassung, 1 gleichmäßige Anpassung, >1 Dominanz des -av Wertes.</i>
-ab N	Ambient Bounces <i>Definiert die Anzahl der simulierten diffusen Reflexionen. Im Vergleich zu -dr nur diffuse Reflexionen. Ermöglicht Simulation von glow, sonst nur spotlight, light, illum.</i>
-ar res	Ambient Resolution <i>Definiert wie dicht die Berechnung der indirekten Beleuchtung erfolgt. Beeinflusst Interpolation der Zwischenwerte auf Oberflächen.</i>
-aa acc	Ambient Accuracy <i>Gibt den maximalen Fehler an, der bei der Interpolation von indirekter Beleuchtung akzeptiert wird. 0 = keine Interpolation.</i>
-ad N	Ambient Divisions <i>Legt die Anzahl der Unterteilungen fest, die bei der Berechnung der indirekten Beleuchtung verwendet werden. (Monte-Carlo-Methode)</i>
-as N	Ambient Super-Samples <i>Definiert wie viele zusätzliche Stichproben an komplexen Stellen durchgeführt werden. Punkrtartige genauere Berechnung gegenüber -ad.</i>
-i	Irradiance <i>Verarbeitung von Bestrahlungsstärke (Irradiance) statt Strahldichte (Radiance).</i>
-lr N	Limit Reflection <i>Legt die maximale Anzahl an Reflexionen fest, die für Lichtstrahlen während der Berechnung berücksichtigt werden. Bei 0 [lw>0] wird Russian Roulette auf Basis der verbleibenden Energie des Lichtstrahls verwendet. Bei <0 wird Anzahl begrenzt & Russian Roulette angewandt.</i>
-lw frac	Limit Weight <i>Gibt den prozentualen Mindestwert für das Gewicht eines Strahls an, um weiterverfolgt zu werden. Strahlen mit geringerem geschätzten Beitrag werden abgebrochen.</i>

¹¹⁵ (Ward 1999)

¹¹⁶ Raumeinheit für die Messung von Lichtstrahlen in alle Richtungen

Anhang 8 - Pfilt: Parameter¹¹⁷

-x res	maximale Bildauflösung in X-Richtung (horizontal) <i>definiert die Pixelanzahl</i>
-y res	maximale Bildauflösung in Y-Richtung (vertikal) <i>definiert die Pixelanzahl</i>
-p rat	Definiert das Seitenverhältnis der Pixel. <i>Ein Wert von 0 bedeutet, dass die maximale horizontale und vertikale Auflösung verwendet wird.</i>
-c	Korrigiert das Seitenverhältnis der Pixel. <i>Dabei wird PIXASPECT nicht in der Ausgabedatei definiert.</i>
-e exp	Passt die Belichtung an. <i>Ohne Vorzeichen wird exp als Multiplikator interpretiert; mit + oder - in Blendenstufen (Potenzen von zwei). Es gibt auch spezifische Optionen für Farbkanäle (-er, -eg, -eb).</i>
-t lamp	Farbkorrektur <i>basierend auf einer angegebenen Lampenart.</i>
-f lampdat	Lampendatentabelle <i>Verwendet eine benutzerdefinierte Lampendatentabelle statt der Standardtabelle</i>
-1	Einfache Ausführung <i>Führt nur einen Durchlauf aus, um die Belichtung absolut zu steuern. (schneller, aber ohne Mittelwertanpassung).</i>
-2	Zweifache Durchführung (Standard) <i>Führt zwei Durchläufe aus, um die Belichtung präzise anzupassen. (langsamer, aber mit Mittelwertanpassung).</i>
-b	Box-Filterung (Standard) <i>Verwendet Box-Filterung, die die Eingabepixel mittelt. Scharfe Kanten und starke Kontraste werden reduziert. Bild kann verschwommen wirken. Reduziert Bildgröße & Artefakte.</i>
-r rad	Gauß-Filter <i>Verwendet einen Gauß-Filter mit einem Radius rad relativ zur Ausgabepixelgröße. Werte um 0.6 erzeugen qualitativ hochwertige Bilder.</i>
-m frac	Beschränkt den Einfluss eines Eingabepixels auf einen Anteil von frac. <i>Reduziert Sampling-Probleme, kann aber leicht verschwommen wirken.</i>
-h lvl	Sternmuster ¹¹⁸ -Level <i>Setzt die Intensität für „heiße“ Bereiche (=Glanzlichter), oberhalb derer Sternmuster auftreten können. (Standard: 100 W/sr/m²)</i>
-n N	Sternmuster-Punkte <i>Legt die Anzahl der Punkte für Sternmuster fest. Ein Wert von 0 deaktiviert Sternmuster.</i>
-s val	Sternmuster Verteilung <i>Bestimmt die Verteilung der Sternmuster bis zum Rand des Bildes (Standard: 0.0001)</i>
-a	Belichtung über „heiße“ Bereiche (=Glanzlichter) <i>Bezieht heiße Bereiche in die Belichtungsrechnung ein (Standard: ausgeschlossen).</i>

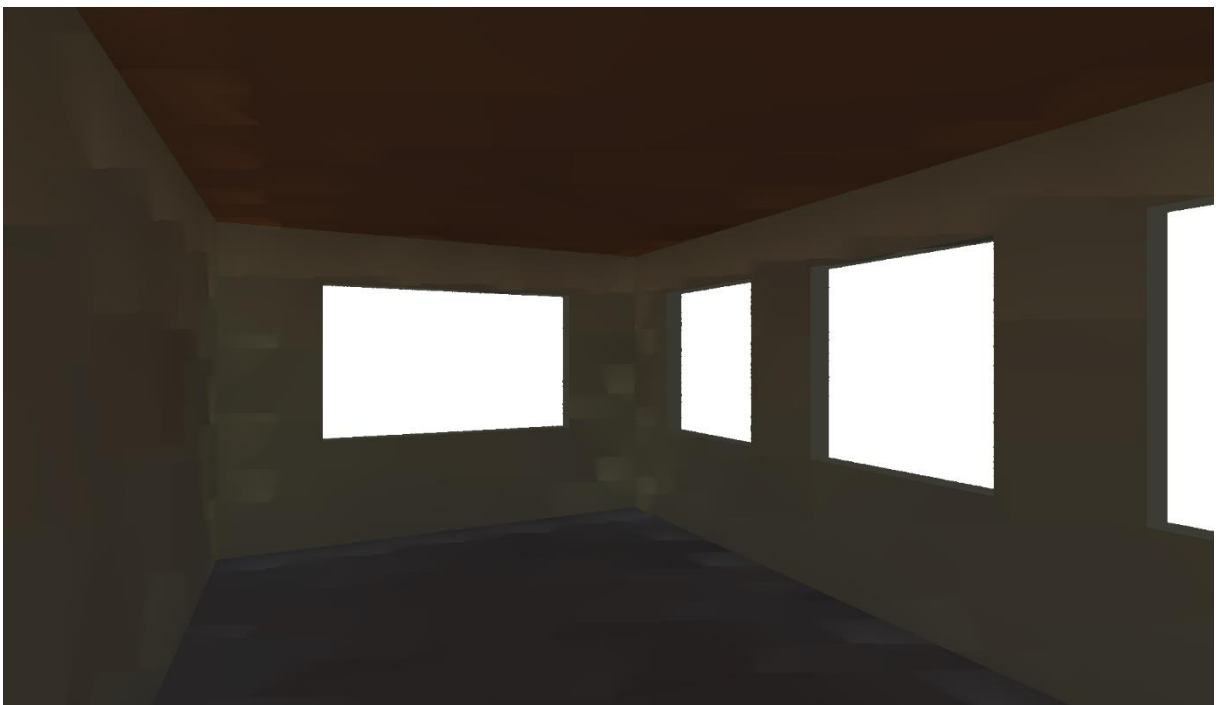
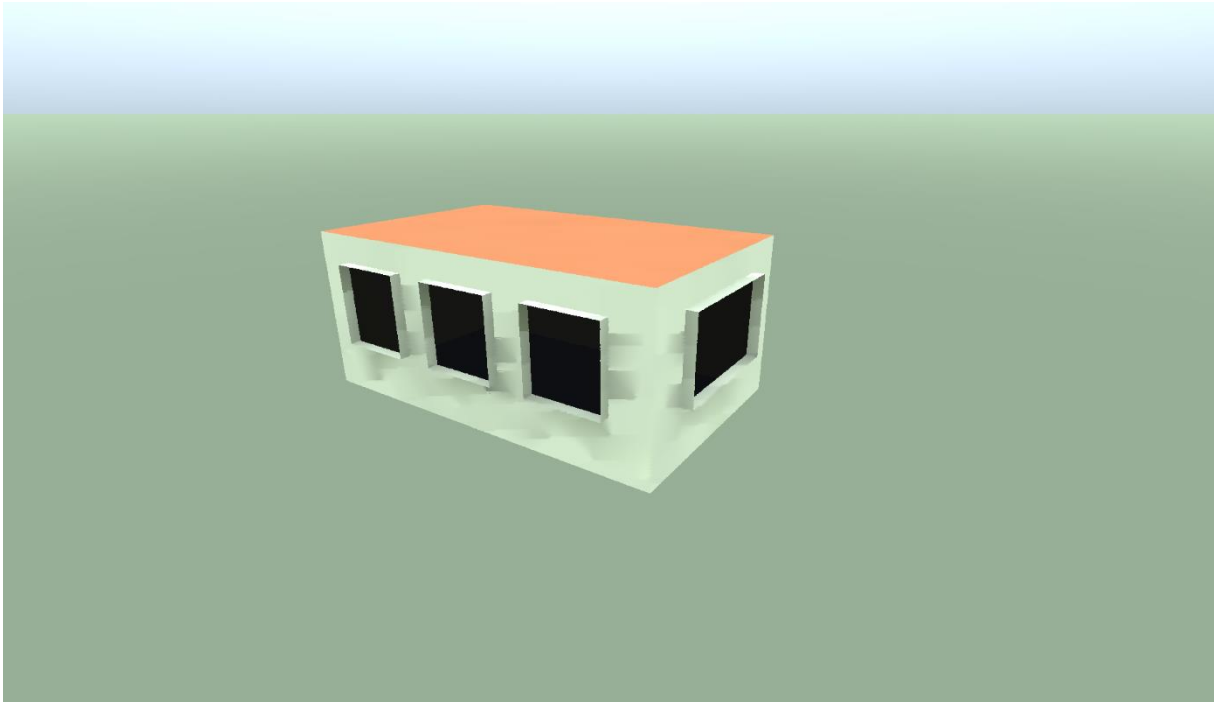
¹¹⁷ (Ward 1996)

¹¹⁸ Sternmuster (englisch "star patterns") sind visuelle Effekte, die oft verwendet werden, um helle Lichtquellen in Bildern realistischer oder ästhetisch ansprechender darzustellen. Diese Muster simulieren die Streuung des Lichts in optischen Systemen, z. B. durch Beugung an den Rändern einer Kamera-linse.

Anhang 9 - Rpict Voreinstellungen & resultierende Ergebnisbilder

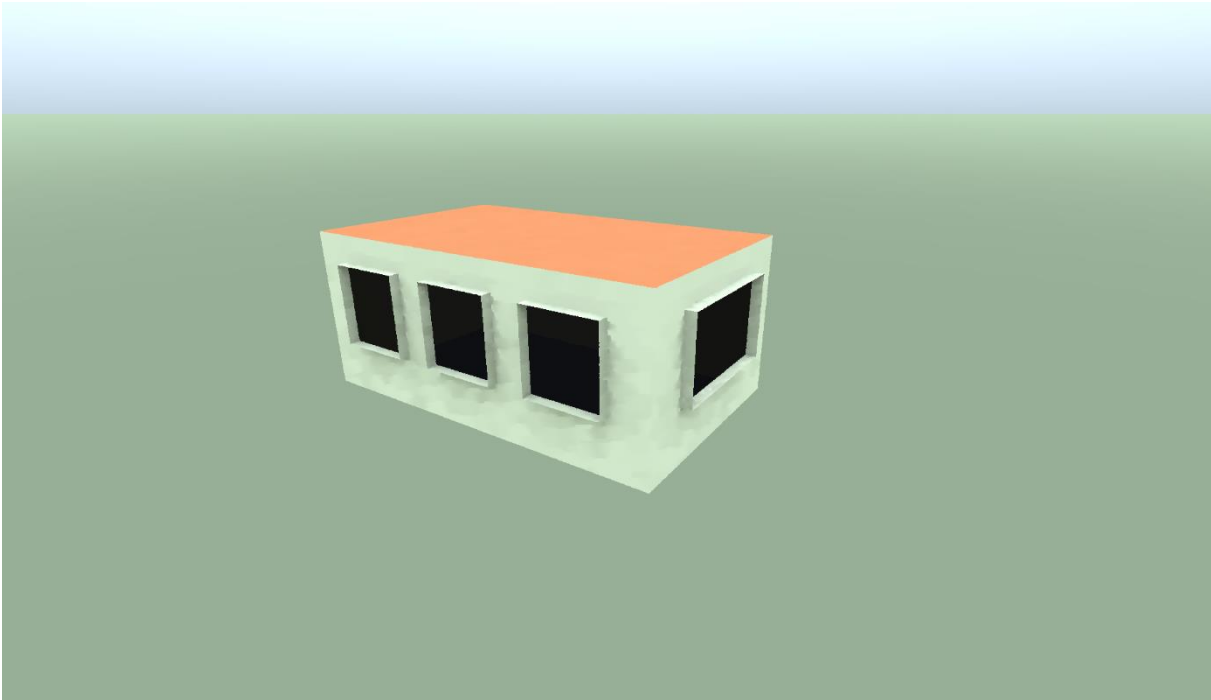
Min

-x 1920 -y 1080 -av 0.1 0.1 0.1 -pj 0.6 -pt 0.5 -dt 0.5 -dc 0 -dr 1 -dp 4 -ss 0 -st 1 -aw 0 -ab 1 -ar 8 -
aa 0.5 -ad 1 -as 1 -lr 1 -lw 0.5



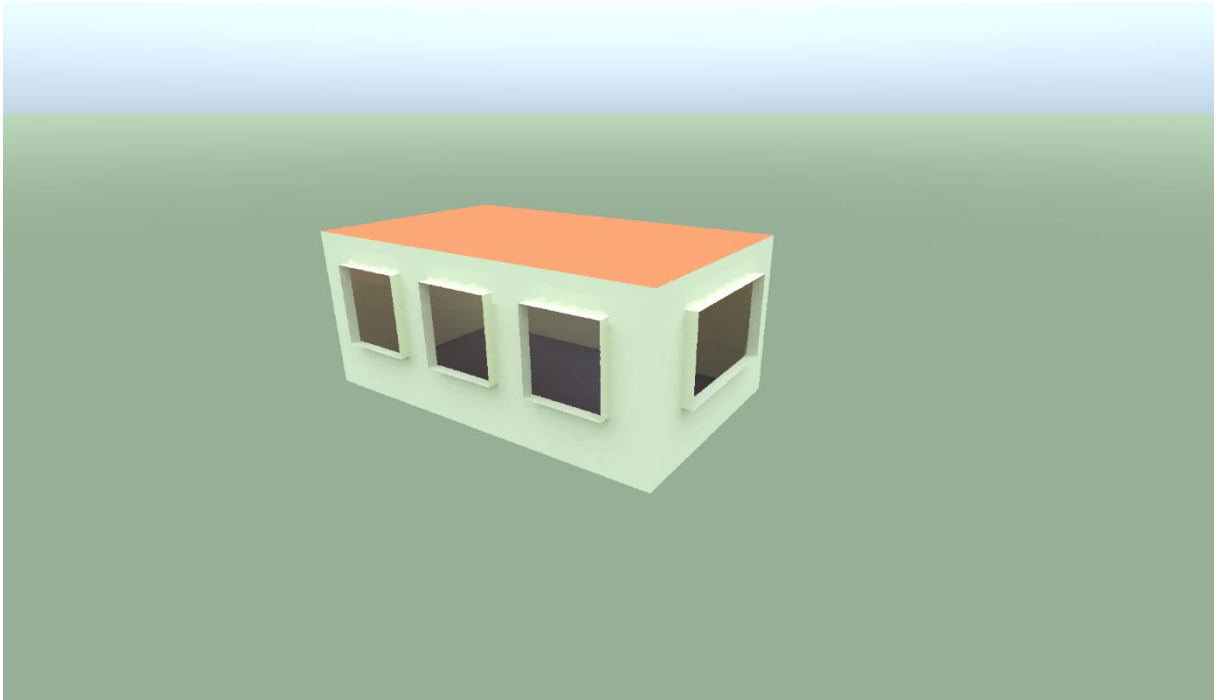
Fast

-x 1920 -y 1080 -av 0.1 0.1 0.1 -pj 0.6 -pt 0.25 -dt 0.2 -dc 0.25 -dr 1 -dp 32 -ss 0.5 -st 0.75 -aw 0 -
ab 1 -ar 32 -aa 0.2 -ad 32 -as 32 -lr 2 -lw 0.5



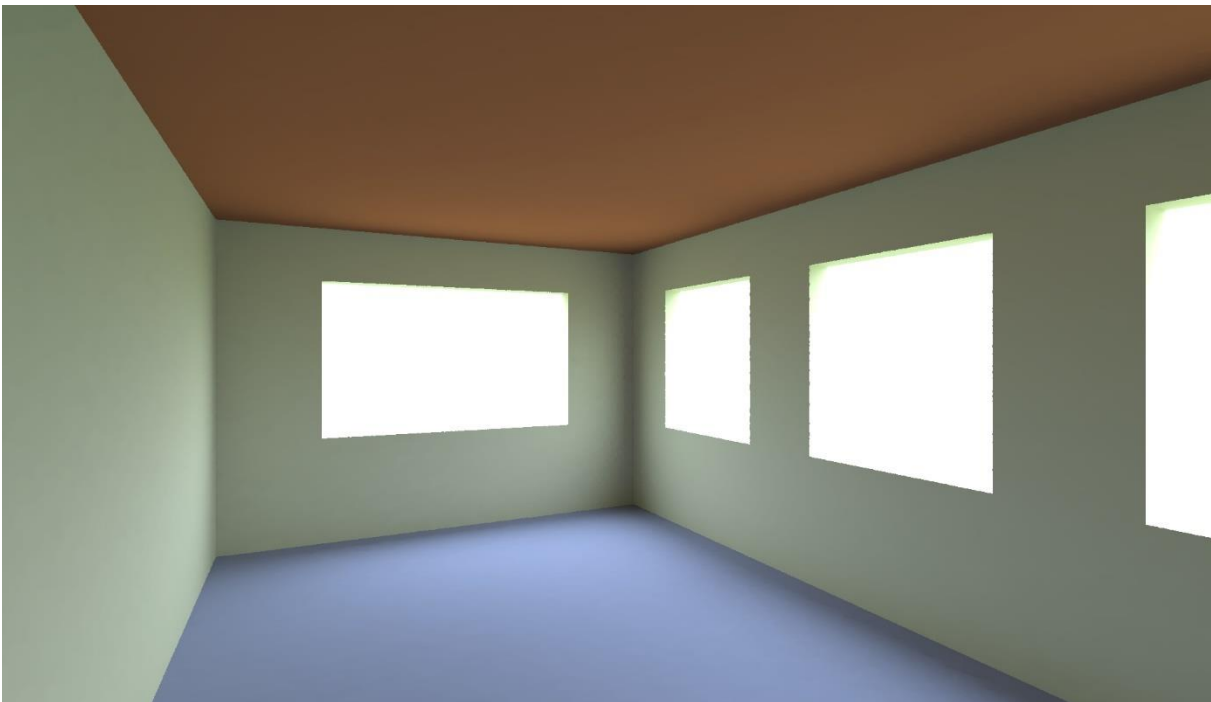
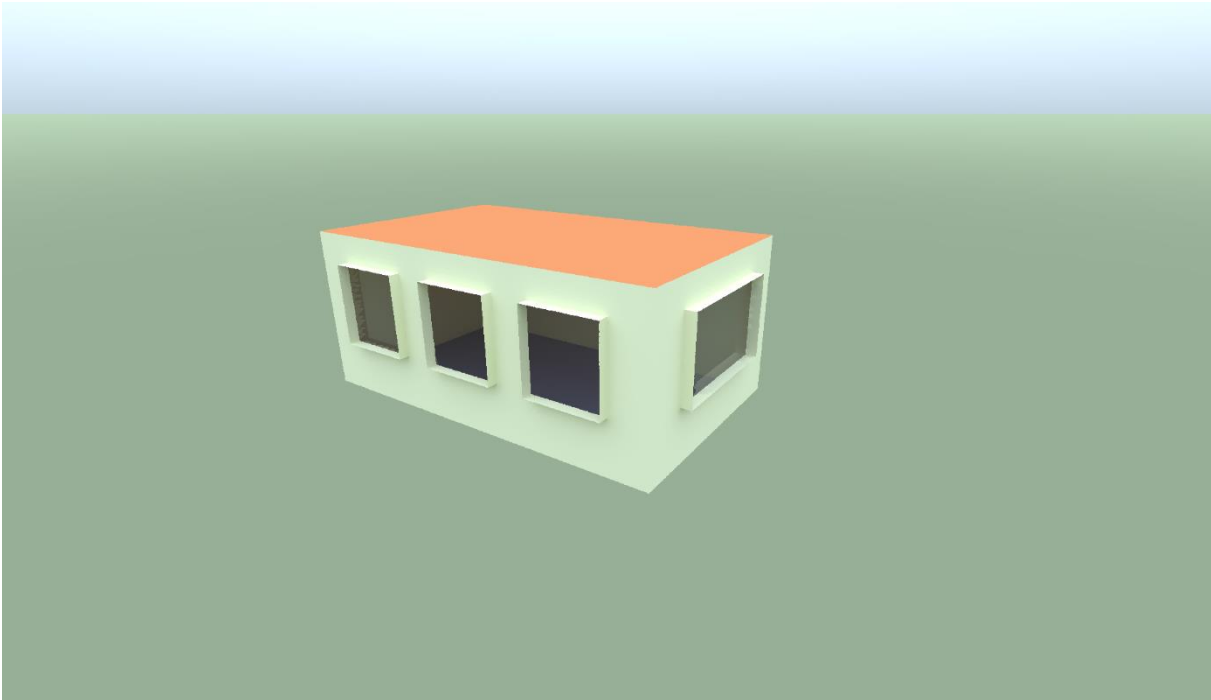
Normal

-x 1920 -y 1080 -av 0.1 0.1 0.1 -pj 0.6 -pt 0.2 -dt 0.1 -dc 0.5 -dr 2 -dp 256 -ss 1 -st 0.5 -aw 1 -ab 2 -
ar 128 -aa 0.15 -ad 512 -as 256 -lr 4 -lw 0.25



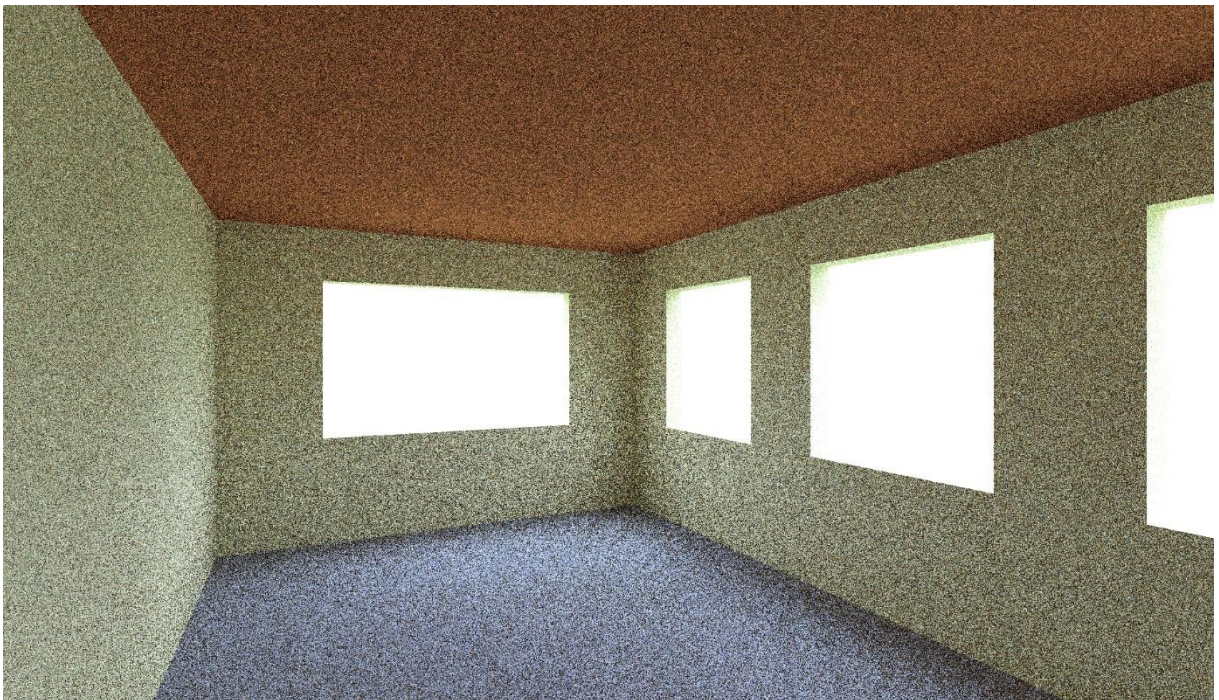
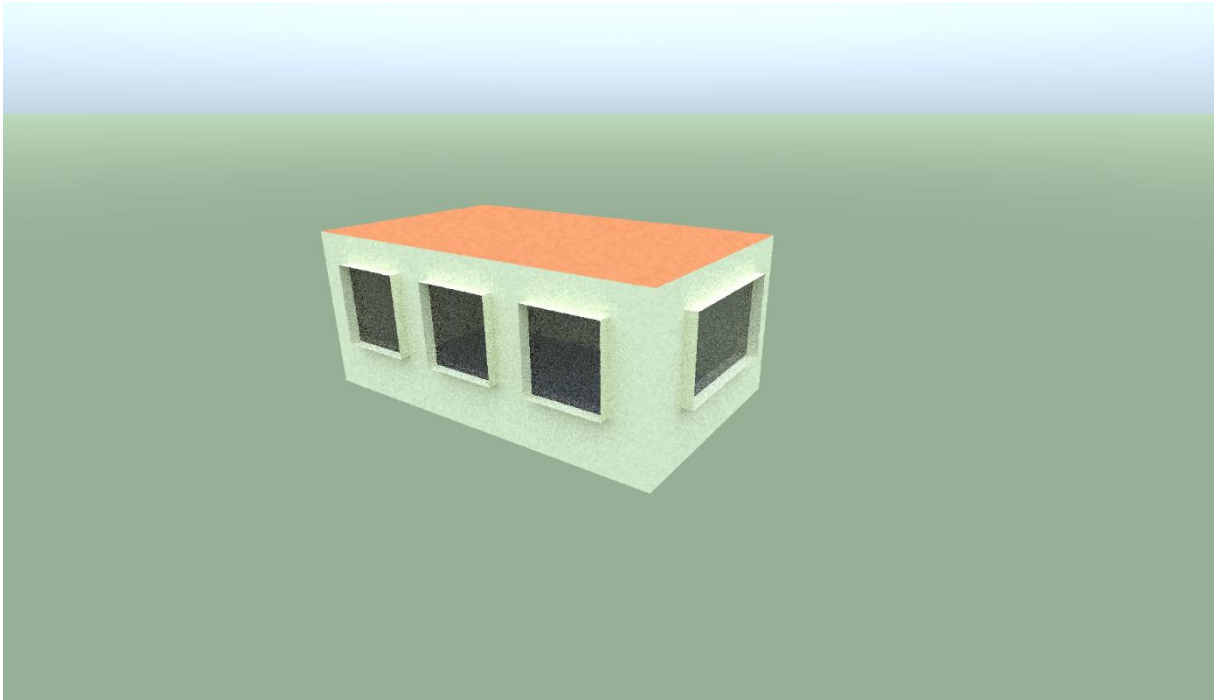
Genau

-x 1920 -y 1080 -av 0.1 0.1 0.1 -pj 0.6 -pt 0.15 -dt 0.05 -dc 0.75 -dr 4 -dp 512 -ss 4 -st 0.25 -aw 1 -
ab 5 -ar 512 -aa 0.08 -ad 2048 -as 512 -lr 16 -lw 0.1



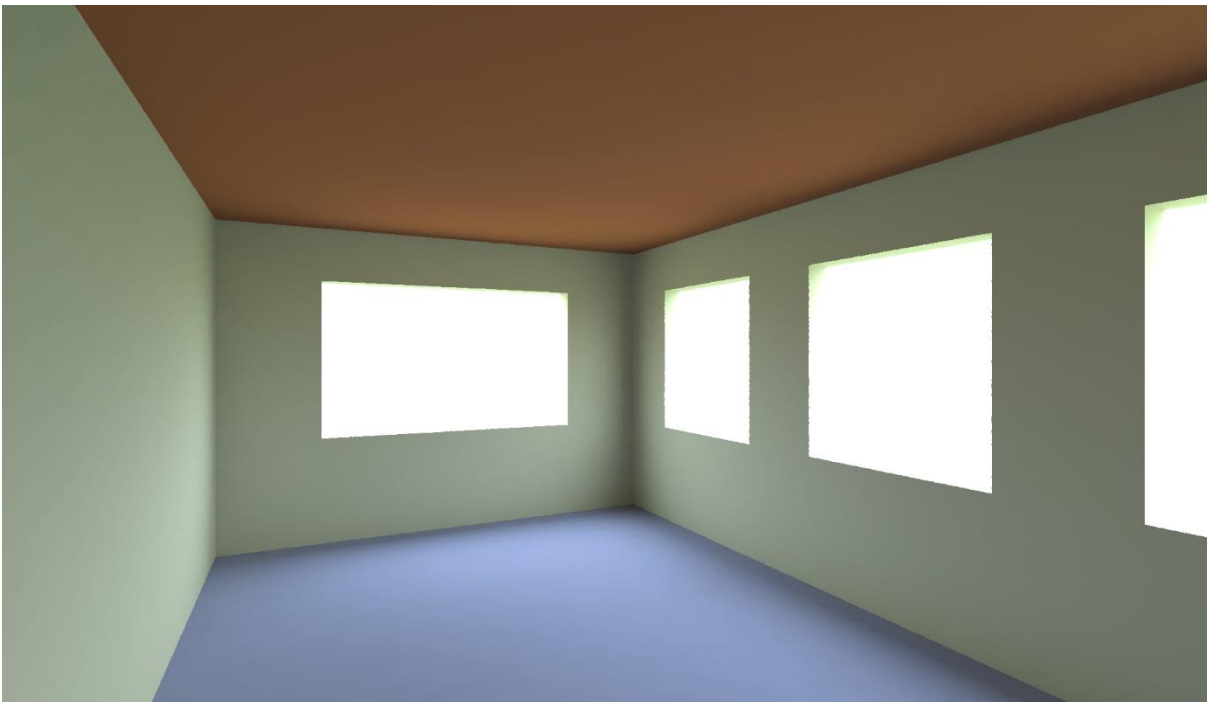
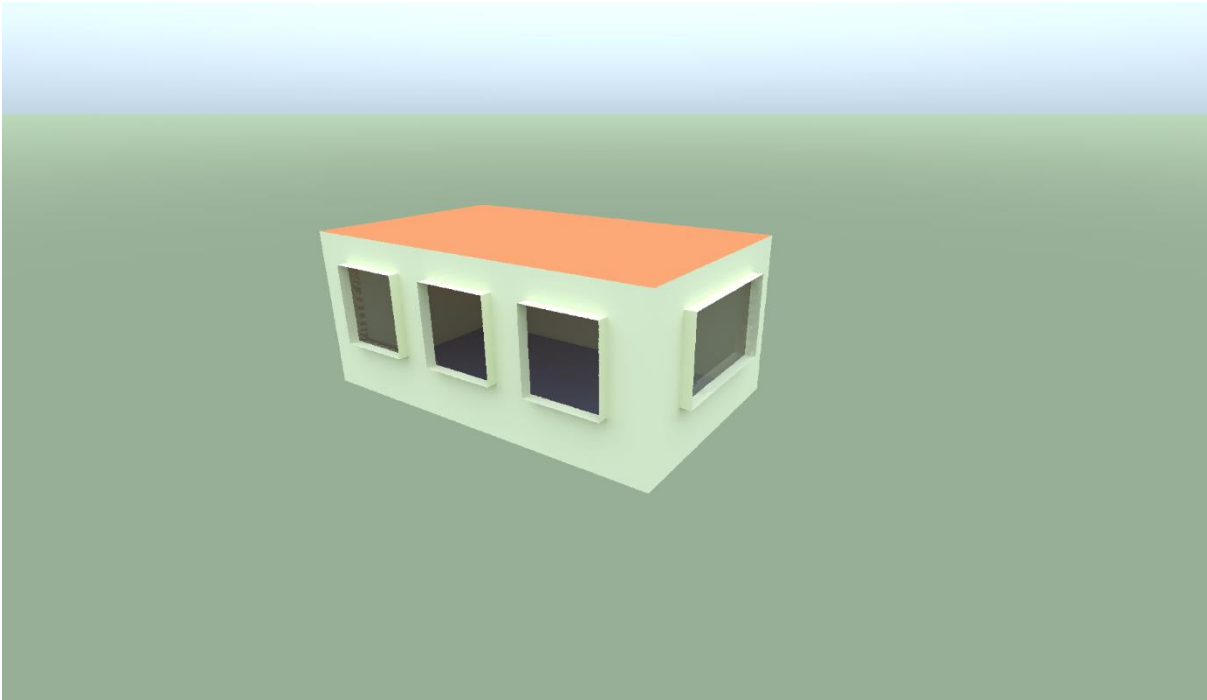
Max (Alt)

-x 1920 -y 1080 -av 0.1 0.1 0.1 -pj 0.6 -pt 0.1 -dt 0.02 -dc 1 -dr 6 -dp 0 -ss 16 -st 0 -aw 1 -ab 8 -ar 0
-aa 0 -ad 4096 -as 1024 -lr 0 -lw 0.05



Max (angepasst)

-x 1920 -y 1080 -av 0.1 0.1 0.1 -pj 0.6 -pt 0.1 -dt 0.02 -dc 1 -dr 6 -dp 0 -ss 16 -st 0 -aw 1 -ab 8 -
ar 0 -aa 0.08 -ad 2048 -as 1024 -lr 32 -lw 0.1



Anhang 10 - Rpict Rechenzeiten in Abhängigkeit der Parameter

pt	dt	dc	dr	dp	ss	st	aw	ab	ar	aa	ad	as	lr	lw	Rechenzeit
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.08	2048	512	16	0.1	03:36,03
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.08	2048	512	0	0.05	14:59,09
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	8	0	0.05	4096	1024	16	0.1	19:29,14
0.15	0.05	0.75	4	512	16	0	1	5	512	0.08	2048	512	16	0.1	03:34,97
0.15	0.05	1	6	0	4	0.25	1	5	512	0.08	2048	512	16	0.1	03:40,16
0.1	0.02	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.08	2048	512	16	0.1	03:37,55
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.08	2048	512	16	0.05	03:24,53
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.08	2048	512	0	0.1	> 1h
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.08	2048	1024	16	0.1	04:18,11
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.08	4096	512	16	0.1	07:24,25
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	512	0.05	2048	512	16	0.1	08:53,11
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	5	0	0.08	2048	512	16	0.1	03:43,79
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	8	512	0.08	2048	512	16	0.1	03:35,30
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	8	0	0.08	2048	1024	16	0.05	04:04,14
0.15	0.05	0.75	4	512	4	0.25	1	8	0	0.08	2048	1024	32	0.05	04:03,75
0.1	0.02	1	6	0	16	0	1	8	0	0.08	2048	1024	32	0.05	04:07,71

Die Parameteranpassung erfolgte ausgehend von der Stufe "Genau", deren Werte hier grau dargestellt sind. Die angepassten Werte, sowie Auffälligkeiten in der Rechenzeit, wurden hervorgehoben.

Anhang 11 - Falsecolor Parameter¹¹⁹

Eingabe/Ausgabe

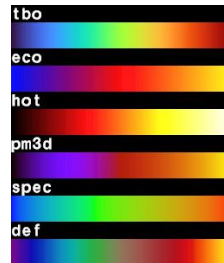
- i *file* Definiert Eingabebild (Radiance Bild im HDR-Format)
- p *file* Definiert Hintergrundbild (hinter Konturlinien, vgl. -cl)
- ip *file* Definiert ein Bild als Eingabe- & Hintergrundbild

Skalierung

- s *scale* Definiert Höchstwert der Skala. Mit „a“ erfolgt eine automatische Skalierung anhand des Höchstwertes im Bild.
- log *decades* Wechselt von linearer Skalierung zu logarithmischer Skalierung.
- m *mult* Definiert individuellen Multiplikator.
Standardwert ist 179, was einer Umrechnung von Strahldichte oder Bestrahlungsstärke in Leuchtdichte oder Beleuchtungsstärke entspricht.

Darstellung und Farben

- pal *_* Wählt eine der vorgefertigten Farbpaletten:
def – Standardpalette
spec – Spektralfarben
tbo – „Turbo“-Farbskala
hot – Thermische Farbschattierung
eco – Balu-Rot-Gelb-Skala
pm3d – Abwandlung Standardpalette



- palettes Erstellt ein Bild mit allen Paletten.
- r -g -b Definition benutzerdefinierter Farbzusammenordnungen
- cl Erzeugt Konturlinien statt flächigem Falschfarbenbild.
- cb Erzeugt Bänder statt flächigem Falschfarbenbild.
- cp Erzeugt Posterisation statt flächigem Falschfarbenbild.

Legende

- l *label* Definiert Beschriftungseinheit. (bspw. Lux oder cd/m²)
- d *digits* Bestimmt Anzahl der Dezimalstellen. (Standard: 3)
- n *ndivs* Bestimmt Anzahl der Legendenunterteilungen. (Standard: 8)
- lw *lwidth* Definiert die Breite & Höhe der Legende im Bild. (Standard: 100x200)
- lh *lheight* Bei 0 wird keine Legende generiert.

Analyse

- e Erzeugt Koordinatenausgabe für den hellsten & dunkelsten Pixel im Bild.

¹¹⁹ (Ward et al. 2011)

Anhang 12 - Rtrace Parameter (Auswahl)¹²⁰

Ausgabeformat

-fio	i...input format o...output format	a = ASCII f/d = single/double-precision floating point c = 4-byte RGBE (Radiance) color format
-ospec	Definiert das Ausgabeformat:	
	<i>o</i> origin (input)	<i>c</i> local (u,v) coordinates
	<i>d</i> direction (normalized)	<i>p</i> point of intersection
	<i>v</i> value (radiance)	<i>n</i> normal at intersection
	<i>V</i> contribution (radiance)	(perturbed)
	<i>w</i> weight	<i>N</i> normal at intersection (un-
	<i>W</i> color coefficient	perturbed)
	<i>l</i> effective length of ray	<i>s</i> surface name
	<i>L</i> first intersection distance	<i>m</i> modifier name
		<i>M</i> material name
		<i>r</i> mirrored value contribution
		<i>x</i> unmirrored value contribu-
		tion
		<i>R</i> mirrored ray length
		<i>X</i> unmirrored ray length
		<i>~</i> tilde (end of trace marker)
-l	Berechnung der Bestrahlungsstärke anstelle der Strahldichte. Eingabeursprung und Richtung werden als Messpunkt und Orientierung interpretiert	
-h	Bestimmt ob in der Ausgabedatei ein „Header“ (Informationszeile“ vorhanden ist	
-x res	maximale Bildauflösung in X-Richtung	
-y res	maximale Bildauflösung in Y-Richtung	

Verarbeitung

-u	+ unkorreliertes Monte-Carlo-Sampling (weniger rauschen durch mehr Zufall) - niedrig-diskrepante Sequenzen (z. B. Quasi-Monte-Carlo)
-n nproc	Gibt die Anzahl der Prozesse an, die parallel ausgeführt werden sollen <i>Sollte mit der Anzahl von CPU-Kernen übereinstimmen.</i> <i>Nicht mit -P oder -PP kompatibel</i>
-e efile	Fehlermeldungen & Fortschrittsberichte werden an <i>efile</i> übergeben.
-w	Unterdrückt Warnmeldungen
-P pfile	Persistenzmodus <i>pfile = Steuerdatei mit Informationen zum laufenden rtrace-Prozess</i> <i>Nach Abschluss der Eingabe bleibt der Prozess aktiv (im Hintergrund), bis er erneut mit demselben -P-Parameter aufgerufen wird, oder explizit gestoppt wird.</i>
-PP pfile	Erweiterter Persistenzmodus Funktioniert analog -P, allerdings werden mehrerer Prozesse für gleichzeitige Anfragen gestartet. Arbeitet auf mehreren CPU-Kernen.

Die **Rendereinstellungen** für die Bildgeneration mit rtrace sind identisch zu denen von rpict.
[vgl. Anhang 7]

¹²⁰ (Ward 1997)

Anhang 13 - Beispieleingabe für die Erstellung von Punktlisten mit vwrays

Festlegen der Bilddimensionen (entspricht indirekt der Rasterung des Gitters):

```
set PictDimensions=-x 400 -y 400
```

Erstelle Rays & Wandle Sie in eine Punktliste um:

```
vwrays %PictDimensions% -vf View.vf > Rays.txt
rcalc -e "$1=$1;$2=$2;$3=.85;$4=$4;$5=$5;$6=1" Rays.txt > Points.pnt
```

Verwendete View.vf Datei:

```
rvu -vtl -vp -1 4 5 -vd 0 0 -1 -vv 7.07 -vh 4.245 -vu -1 1 0
```

Anhang 14 - Beispieleingabe für die Erstellung von Slices

Erstelle Rays für bestimmte Bildgröße & Wandle Sie in eine Punktliste um:

```
set PictDimensions=-x 400 -y 400
vwrays %PictDimensions% -vf View.vf > Rays.txt
rcalc -e "$1=$1;$2=$2;$3=.85;$4=$4;$5=$5;$6=1" Rays.txt > Points.pnt
```

Frage x-y-Dimension (Bildformat) auf Basis der View-Datei ab

```
vwrays -d -vf View.vf %PictDimensions% > Dimensions.txt
```

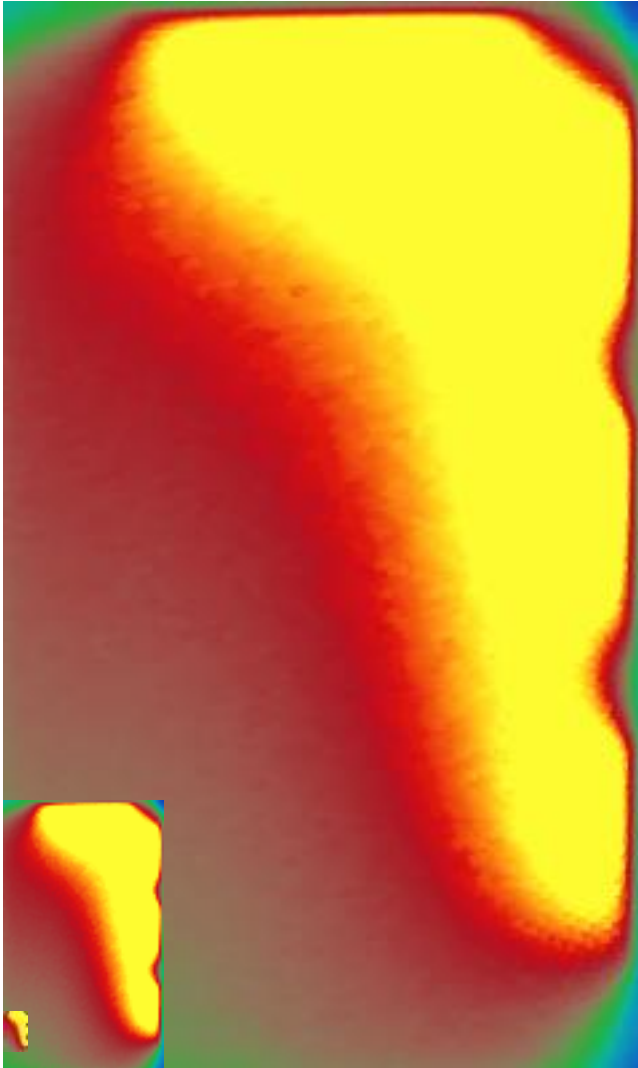
Erstelle HDR-Bild auf einer fiktiven Ebene (Vereinfachte Einstellungen)

```
rtrace -ab 2 -fac -w -l -ov @PictDimensions.txt Szene.oct < Points.pnt > Slice.hdr
```

Formatiere die HDR-Datei in ein Falschfarbenbild

```
falsecolor -l Lux -lw 0 -n 10 -s 1000 -ip Slice.hdr > FCSlice.hdr
ra_bmp FCSlice.hdr > FCSlice.bmp
```

Anhang 15 - Größenvergleich der Slices der Stufe "Genau"



Anhang 16 - Musterbericht: Textvorlage zu "Normgrundlage DIN EN 17037"

Der folgende Nachweis der Tageslichtversorgung erfolgt auf Grundlage der in DIN EN 17037 „Tageslicht in Gebäuden“. Aus dieser Normung werden die folgenden Begriffe übernommen:

Tageslichtöffnung

jeder Bereich einer Gebäudehülle, der geeignet ist, Tageslicht in einen Innenraum eindringen zu lassen

Tageslichtversorgung

über einen Teil einer Bezugsebene erreichte Beleuchtungsstärke für einen Anteil der Tageslichtstunden innerhalb eines Raums

diffuse horizontale Beleuchtungsstärke (vom Himmel)

durch Himmelslicht auf einer horizontalen Fläche auf der Erde erzeugte Beleuchtungsstärke

globale horizontale Beleuchtungsstärke

durch Tageslicht auf einer horizontalen Fläche auf der Erde erzeugte Beleuchtungsstärke

Bezugsebene

Ebene in einem Raum, auf der Beleuchtungsstärken und/oder Tageslichtquotienten berechnet, festgelegt oder gemessen werden [festgelegt auf 0,85 m Höhe über dem Fußboden]

Im Rahmen des Nachweises der Tageslichtversorgung im Gebäudeinneren werden die Verfügbarkeit von Tageslicht am Standort durch den bewölkten Himmel, sowie die Eigenschaften des Raumes durch ein entsprechendes 3D Simulationsmodell berücksichtigt. Die Kennwerte werden auf einer Bezugsfläche in 0,85 m Höhe ermittelt, welche an allen Seiten 0,5 m Abstand zu den Wänden einhält. Auf ihr erstreckt sich ein einheitliches Raster aus Berechnungspunkten.

Beleuchtungsstärke des Himmels: *Beleuchtungsstärke in Lux [Standort]*¹²¹

Maximaler Punktabstand des Berechnungsgitters: *Maximaler Abstand in Metern*

Im Folgenden werden beide Verfahren zur Beurteilung der Tageslichtversorgung nach DIN EN 17037 angewandt:

- 1) Berechnungsverfahren unter Verwendung von Tageslichtquotienten auf der Bezugsebene
- 2) Verfahren zur Berechnung der Beleuchtungsstärken auf der Bezugsebene

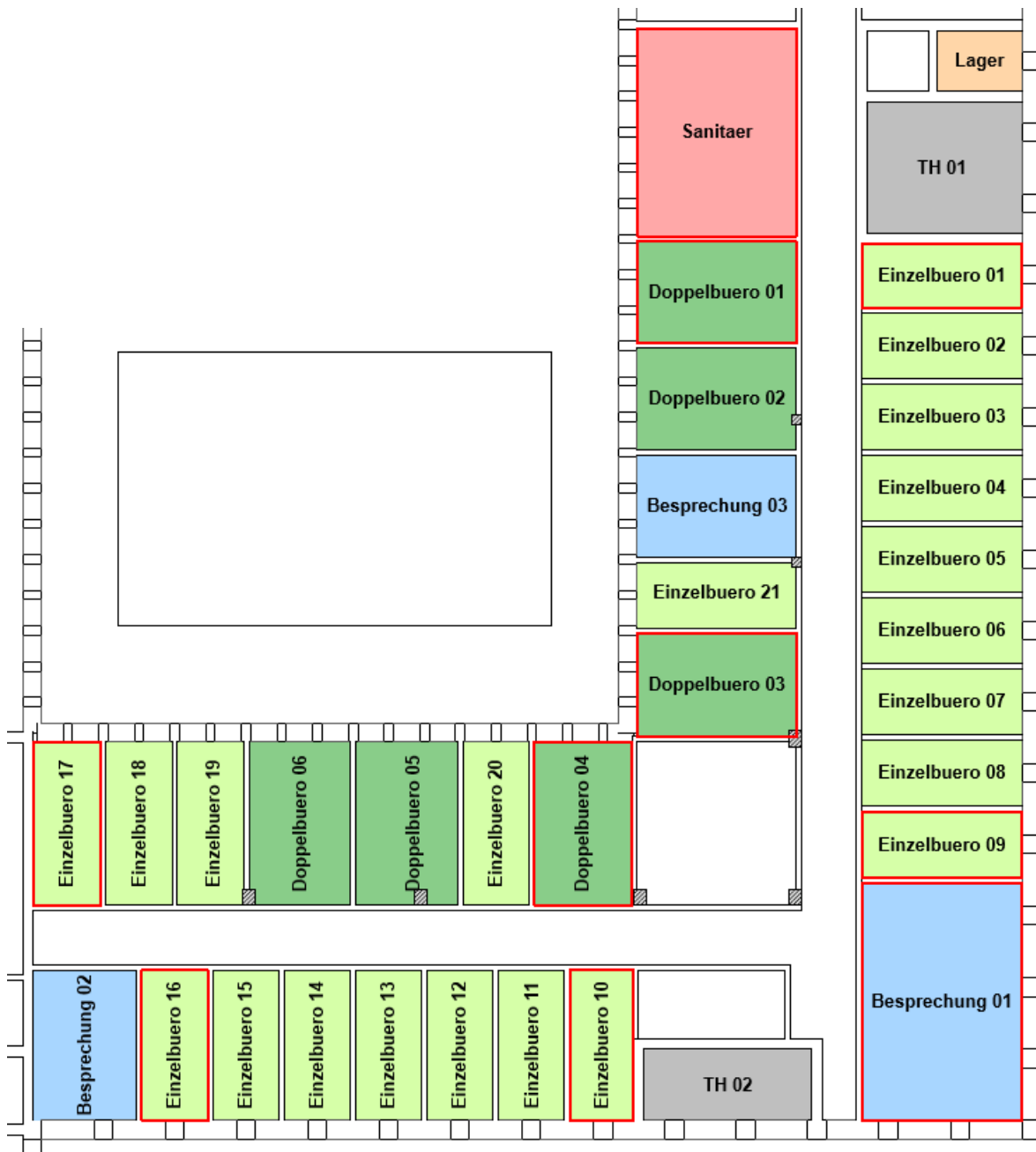
In beiden Verfahren werden je drei Empfehlungsstufen definiert, welche auf die (Mindest-) Zielbeleuchtungsstärke angewandt werden. Die Zielbeleuchtungsstärke beschreibt dabei jeweils einen Mindestwert für Beleuchtungsstärke/Tageslichtquotienten, welcher für die Hälfte der Tageslichtstunden auf 50% der Bezugsfläche zu erreichen ist. Bei der Mindestzielbeleuchtungsstärke liegt der Flächenanteil bei 95%.

¹²¹ Bei den grün markierten Texten handelt es sich um automatisch ergänzte Inhalte.

Anhang 17 - Materialzuweisung Beispielgebäude nach Raumkategorien

	Bueros/Besprechung	TH/Lager	Sanitaer	Gebäudepolygone
Decke	#FFFFFF0	#b3b3b3	#ffffff	#39312d
	255 255 240	179 179 179	255 255 255	57 49 45
	1,000 1,000 0,941	0,702 0,702 0,702	1,000 1,000 1,000	0,224 0,192 0,176
	#Rauputz leicht void plastic identifier	#Mittlerer gestrichener Beton void plastic identifier	#Rauputz leicht hell void plastic identifier	#Dachpappe void plastic identifier
	0 0 5 1 1 0.941 0 0.3	0 0 5 0.702 0.702 0.702 0 0.2	0 0 5 1 1 1 0 0.3	0 0 5 0.224 0.192 0.176 0 0.6
Wand	#f9f2ec	#e6e6e6	#f2f2f2	#e2d9d0
	249 242 236	230 230 230	242 242 242	226 217 208
	0,976 0,949 0,925	0,902 0,902 0,902	0,949 0,949 0,949	0,886 0,851 0,816
	#Rauputz Eierschale void plastic identifier	#Heller gestrichener Beton void plastic identifier	#Fliesen hell void plastic identifier	#Fassade void plastic identifier
	0 0 5 0.976 0.949 0.925 0 0.5	0 0 5 0.902 0.902 0.902 0 0.2	0 0 5 0.949 0.949 0.949 0.05 0.1	0 0 5 0.886 0.851 0.816 0 0.2
Boden	#bf8040	#b3b3b3	#666666	Hex
	191 128 64	179 179 179	102 102 102	R G B
	0,749 0,502 0,251	0,702 0,702 0,702	0,400 0,400 0,400	R _{rad} G _{rad} B _{rad}
	# Building material: Parquet Wood void plastic identifier	#Mittlerer gestrichener Beton void plastic identifier	#Fliesen dunkel void plastic identifier	Ersatz durch Primitive
	0 0 5 0.309 0.165 0.083 0.03 0.1	0 0 5 0.702 0.702 0.702 0 0.2	0 0 5 0.4 0.4 0.4 0.05 0.1	

Anhang 18 - Grundrissausschnitt 2.OG des Beispielgebäudes



Alle rot markierten Räume werden in einer detaillierten Art nach Vorlage des Musterberichtes ausgewertet. Für alle sonstigen Räume wird lediglich eine Empfehlungsstufe ermittelt.

Anhang 19 - Mittlere Abweichungen zwischen den Parametrierungsvarianten in den Räumen des Beispielgebäudes

ID	Raumname	Abweichung zwischen Variante 1 & 2	Abweichung zwischen Variante 3 & 4
62021	Besprechung 01	13,40%	10,20%
62140	Besprechung 02	10,42%	9,11%
61850	Besprechung 03	21,28%	17,78%
60117	Einzelbuero 01	9,97%	9,22%
60359	Einzelbuero 02	12,77%	12,49%
61610	Einzelbuero 03	14,65%	13,14%
61438	Einzelbuero 04	20,88%	14,74%
60595	Einzelbuero 05	22,80%	24,84%
61223	Einzelbuero 06	25,42%	20,06%
61841	Einzelbuero 07	26,12%	28,67%
60286	Einzelbuero 08	27,15%	22,75%
61093	Einzelbuero 09	25,82%	19,93%
60383	Einzelbuero 10	9,89%	8,65%
60456	Einzelbuero 11	8,61%	9,08%
62690	Einzelbuero 12	11,32%	9,63%
60622	Einzelbuero 13	7,15%	7,53%
60693	Einzelbuero 14	9,49%	10,40%
60201	Einzelbuero 15	11,38%	12,54%
62060	Einzelbuero 16	14,23%	12,21%
61565	Einzelbuero 17	30,74%	50,36%
60392	Einzelbuero 18	29,18%	47,83%
62109	Einzelbuero 19	15,05%	13,88%
61132	Einzelbuero 20	18,22%	45,89%
61280	Einzelbuero 21	25,41%	19,39%
61598	Doppelbuero 01	21,50%	16,15%
62359	Doppelbuero 02	22,19%	18,12%
61806	Doppelbuero 03	22,75%	18,83%
62679	Doppelbuero 04	16,74%	11,66%
62359	Doppelbuero 05	16,76%	22,54%
60989	Doppelbuero 06	37,99%	42,11%
60341	TH 01	6,71%	5,57%
60782	TH 02	7,31%	5,27%
61331	Lager	6,43%	5,80%
61162	Sanitaer	19,74%	15,23%

Abweichung zwischen Variante 1 & 2 im Mittel: **17,63 %**

Abweichung zwischen Variante 3 & 4 im Mittel: **17,99 %**

Literatur- und Quellenverzeichnis

- („admin“ 2021) „admin“ (2021): Rendering with Radiance.
In: <https://www.radiance-online.org/learning/documentation/book>
(26.11.2024).
- (ASR 3.4 2023) ASR 3.4 (2023): Technische Regeln für Arbeitsstätten. Beleuchtung und Sichtverbindung. Ausschuss für Arbeitsstätten.
- (Bachmann 2024) Bachmann, Viktoria (2024): Unzureichende Tageslichtexposition führt zur Entwicklung psychischer Störungen.
In: Lichtblicke (2024), S. 12 ff.
- (BG Bau 2022) BG Bau (2022): DGUV Information 215-211. Tageslicht am Arbeitsplatz und Sichtverbindung nach außen.
- (Building Technologies Department 2020) Building Technologies Department (Hg.) (2020): The Radiance 5.3 Synthetic Imaging System.
- (Cakir et al. 2016) Cakir, G./Cornelius, W./Rosemann, A./Schmits, P. W. (2016): Expertise zum Umgang von Tageslicht in Innenräumen.
In: https://www.researchgate.net/profile/Alp-Rosemann/publication/305767037_Expertise_zum_Umgang_von_Tageslicht_in_Innenraumen/links/579fc86208aece1c72156906/Expertise-zum-Umgang-von-Tageslicht-in-Innenraeumen.pdf. (11.10.24)
- (DIN 4108-2 2013) DIN 4108-2 (2013): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- (DIN 18599-2 2018) DIN 18599-2 (2018): Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen.
- (DIN EN 12665 2018) DIN EN 12665 (2018): Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung.
- (DIN EN 17037 2022) DIN EN 17037 (2022): Tageslicht in Gebäuden.
- (Doris Haas-Arnd/ Fred Ranft/ Energieagentur NRW 2006) Doris Haas-Arnd/Fred Ranft/Energieagentur NRW (2006): Tageslichttechnik in Gebäuden. Heidelberg: Hüthig Jehle Rehm.
- (Ficker 2024) Ficker, Carsten (2024): Vorteile von Oberlichtern und Fassadenfenstern im Arbeitsalltag.
In: Lichtblicke (2024), S. 24 ff.
- (Google 2025) Google (2025): Fakultätsgebäude II.
In: <https://www.google.de/maps/@50.1290484,8.6694223,1201m/data=!3m1!1e3> (16.01.25)
- (ISO 15469) ISO 15469: Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky.
- (Jacobs 2012) Jacobs, Axel (2012): Radiance Tutorial.
- (Jacobs 2014) Jacobs, Axel (2014): Radiance Cookbook.
- (Jacobs) Jacobs, Axel: Jaloxa - Radiance Colour Picker.
In: https://www.jaloxa.eu/resources/radiance/colour_picker.shtml. (05.11.24)
- (Jakobiak 2021) Jakobiak, Roman (2021): Tageslicht in Innenräumen: die neue Norm DIN EN 17037.
In: <https://www.dabonline.de/bautechnik/tageslicht-in-gebaeuden-innen-raeume-neue-norm-din-en-17037/>. (15.10.24)
- (Koch 2024) Koch, Ulrich (2024): So wichtig ist natürliches Licht am Arbeitsplatz.
In: Lichtblicke (2024), S. 28 ff.

(licht.de)	licht.de: Bestrahlungsstärke. In: https://www.licht.de/de/grundlagen/lichtlexikon/details-lichtlexikon/bestrahlungsstaerke#topnav-5064 . (05.02.25)
(MBO 2019)	MBO (2019): Musterbauordnung.
(National Institute of General Medical Sciences 2023)	National Institute of General Medical Sciences (2023): Circadian Rhythms. In: https://www.nigms.nih.gov/education/fact-sheets/Pages/circadian-rhythms.aspx#:~:text=Circadian%20rhythms%20are%20the%20physical,and%20temperature%20also%20affect%20them. (09.10.24)
(RFritz/AMcneil 2019)	RFritz/AMcneil (2019): About Radiance. In: https://www.radiance-online.org/about (10.10.24).
(roma 2025)	roma (2025): K25.
(Scholl Glas 2021)	Scholl Glas (2021): GEWE-therm® – PRODUKTPROGRAMM. Barsinghausen.
(Spektrum Akademischer Verlag 1998)	Spektrum Akademischer Verlag (1998): Strahldichte. Lexikon der Physik. In: https://www.spektrum.de/lexikon/physik/strahldichte/13952 . (05.02.25)
(U.S. Central Intelligence Agency (CIA) 2024)	U.S. Central Intelligence Agency (CIA) (2024): World Time Zones Map. In: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_Time_Zones_Map.png?uselang=de . (20.11.24)
(VICUS Software GmbH)	VICUS Software GmbH: VICUS BUILDINGS. In: https://vicus-software.com/vicus-buildings/ . (10.10.24)
(VisionDoctor)	VisionDoctor: Licht - Physikalische Eigenschaften. In: https://www.vision-doctor.com/physial-eigenschaften-licht.html . (09.10.24)
(Ward 1996)	Ward, Greg (1996): pfilt - filter a RADIANCE picture.
(Ward 1997)	Ward, Greg (1997): rtrace - trace rays in RADIANCE scene.
(Ward 1998)	Ward, Greg (1998): gensky - generate a RADIANCE description of the sky.
(Ward 1999)	Ward, Greg (1999): rpict - generate a RADIANCE picture.
(Ward et al. 2011)	Ward, Greg/Jacobs, Axel/Geisler-Moroder, David/Stephen Wasilewski (2011): falsecolor – make a false color RADIANCE picture.

Eigenständigkeitserklärung

Bearbeiterin: Jessica Donau

Titel der Arbeit: Tageslichtsimulation

Untersuchungen zur Einbindung in eine thermische Gebäudesimulationsplattform & Entwicklung einer Auswertungsmethodik

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne fremde Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Dresden, 19.02.2025

Unterschrift