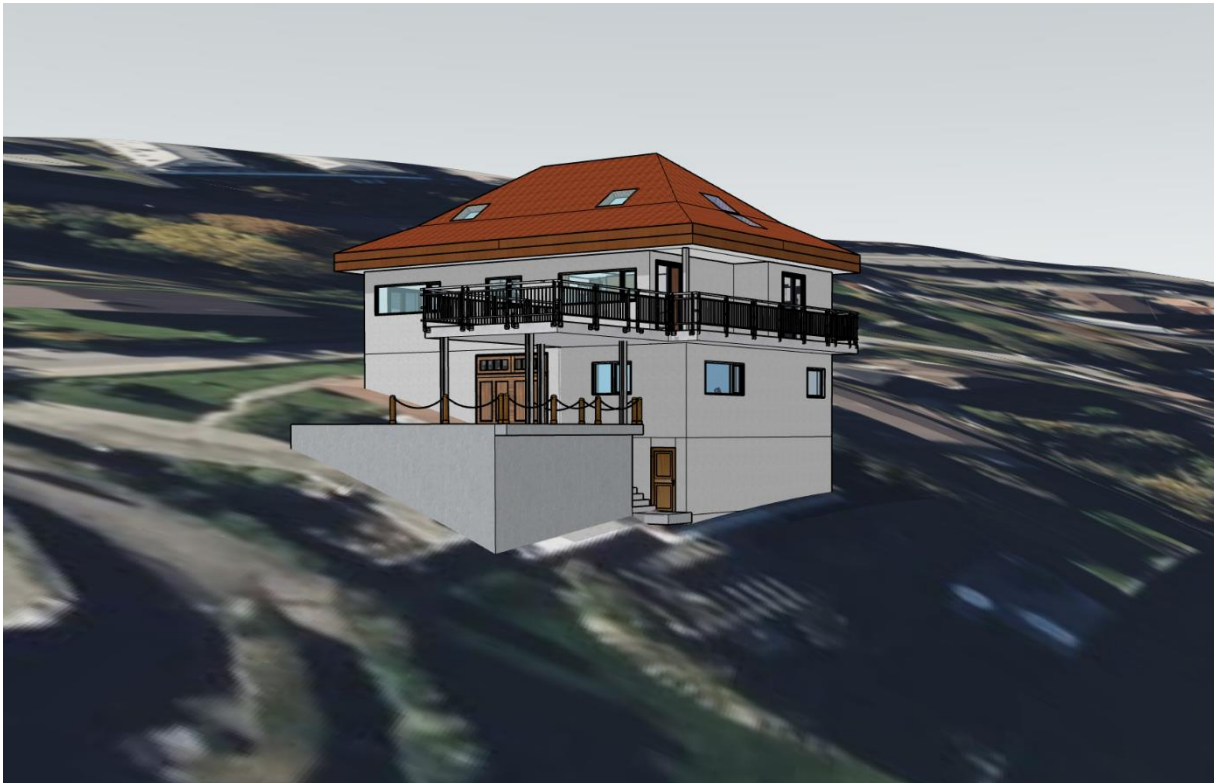


Diplomarbeit  
von  
Silvan Michael Schläfli

# Klimaangepasste Architektur: Analyse und Anpassungsstrategien für ein bestehendes Wohngebäude



Dozentin: Frau Elsi Hischier

Bern, 28. Oktober 2024

TEKO Bern

Dipl. Energie- und Umwelttechniker:in HF

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>2</b>
<b>MANAGEMENT SUMMARY</b> .....	<b>5</b>
<b>BERUFLICHER WERDEGANG</b> .....	<b>7</b>
<b>PROJEKTZIEL UND AUFGABENBESCHREIBUNG</b> .....	<b>8</b>
<b>TERMINPLAN</b> .....	<b>10</b>
<b>1 EINLEITUNG: DER WEG ZUR ENERGIEEFFIZIENTEN ARCHITEKTUR</b> .....	<b>11</b>
1.1    MOTIVATION UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT .....	11
1.2    RELEVANZ DER THEMATIK .....	11
1.3    METHODISCHER ANSATZ .....	11
<b>2 GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG</b> .....	<b>13</b>
2.1    AKTUELLEN TRENDS UND TECHNOLOGIEN ZUR ENERGIEEINSPARUNG .....	13
2.1.1 <i>Vorteil der Digitalisierung im Bauwesen</i> .....	14
2.2    EINFLUSS VON FENSTERFLÄCHEN UND VERGLASUNGEN .....	14
2.2.1 <i>Fenstergrössen und -lagen</i> .....	14
2.2.2 <i>Rahmenmaterialien und Konstruktionen</i> .....	15
2.3    KLIMADATEN ALS SCHLÜSSEL ZUR OPTIMIERUNG .....	15
2.3.1 <i>Bedeutung von Klimadaten in der Gebäudeplanung</i> .....	15
2.3.2 <i>Klimadaten in der Simulation und Analyse</i> .....	15
<b>3 WERKZEUGE DER ZUKUNFT: VORSTELLUNG DER SOFTWARELÖSUNGEN</b> .....	<b>17</b>
3.1    METEONORM: DAS KLIMA IN ZAHLEN .....	17
3.1.1 <i>Funktionen von Meteonorm</i> .....	17
3.2    SKETCHUP: VOM GEDANKEN ZUM DIGITALEN MODELL .....	17
3.2.1 <i>Einführung in SketchUp als 3D-Modellierungswerkzeug</i> .....	17
3.3    SEFAIRA: ENERGIEANALYSE LEICHT GEMACHT .....	18
3.3.1 <i>Beschreibung von Sefaira</i> .....	18
3.3.2 <i>Integration in SketchUp zur Energie- und Tageslichtanalyse</i> .....	18
3.3.3 <i>Energieanalyse</i> .....	19
3.3.4 <i>Tageslichtanalyse</i> .....	19
<b>4 METHODIK: VON DER IDEE ZUR SIMULATION</b> .....	<b>20</b>
4.1    SCHRITT FÜR SCHRITT ZUM 3D-MODELL .....	20
4.2    VARIANTENENTWICKLUNG: SECHS WEGE ZUR KLIMARESILIENZ .....	26
4.2.1 <i>Variante 1: Entfernung der Terrasse auf der Ostseite (2015 neu erstellt)</i> .....	27
4.2.2 <i>Variante 2: Vergrösserung der Fensterflächen auf der Südseite</i> .....	28
4.2.3 <i>Variante 3: Reduzierung der Fensterflächen auf Nord-, Ost- und Westseite</i> .....	28
4.2.4 <i>Variante 4: Allgemeine Erhöhung der Glasflächen</i> .....	29
4.2.5 <i>Variante 5: Verwendung von energieeffizienten Verglasungen</i> .....	30
4.2.6 <i>Variante 6: Erhöhung der Verschattung des Daches</i> .....	31
4.3    SIMULATION MIT SEFAIRA: BLICK INS INNERE .....	32
4.4    VORBEREITUNG DES MODELLS FÜR DIE SIMULATION .....	32
4.5    DURCHFÜHRUNG DER SIMULATIONEN IN DER SEFAIRA WEB-APP .....	33
4.6    PRÄSENTATION DER ERGEBNISSE .....	33
4.6.1 <i>Ist-Zustand</i> .....	33
4.6.2 <i>Variante 1: Entfernung der Terrasse auf der Ostseite</i> .....	35
4.6.3 <i>Variante 2: Vergrösserung der Fensterflächen auf der Südseite</i> .....	37

4.6.4	<i>Variante 3: Reduzierung der Fensterflächen auf Nord-, Ost- und Westseite</i>	39
4.6.5	<i>Variante 4: Allgemeine Erhöhung der Glasflächen</i>	41
4.6.6	<i>Variante 5: Verwendung von energieeffizienten Verglasungen</i>	43
4.6.7	<i>Variante 6: Erhöhung der Dachverschattung</i>	45
4.7	KLIMADATENANALYSE MIT METEONORM	47
4.7.1	<i>Aktuelle Klimadaten für Spiez (Referenzjahr 2005)</i>	48
4.7.2	<i>Klimaprojektionen unter verschiedenen RCP-Szenarien im Jahr 2100</i>	50
4.8	DATENZUSAMMENFÜHRUNG UND VERGLEICH	56
4.8.1	<i>Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch</i>	56
4.8.2	<i>Datenaufbereitung und Normalisierung</i>	57
4.8.3	<i>Gewichtung der Einflussfaktoren</i>	57
4.8.4	<i>Korrelation der Klimadaten mit dem Energieverbrauch</i>	58
4.8.5	<i>Auswirkungen der RCP-Szenarien auf den Energieverbrauch</i>	59
4.8.6	<i>Schlussfolgerung</i>	61
4.9	VERGLEICH DER ENERGETISCHEN PERFORMANCE DER VARIANTEN UNTER DIV. RCP-SZENARIEN	62
4.9.1	<i>Interpretation des Ist-Zustands und der Varianten im aktuellen Klima</i>	62
4.9.2	<i>Auswirkungen der RCP-Szenarien auf den Energieverbrauch</i>	64
<b>5</b>	<b>VALIDIERUNG: ABGLEICH MIT DER REALITÄT</b>	<b>67</b>
5.1	JAHRESVERBRAUCH – SIMULIERTE VS. REALE DATEN	67
5.2	WINTERMONATE	68
5.3	SOMMERMONATE	68
5.4	ÜBERGANGSMONATE	69
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE, ERKENNTNISSE UND DISKUSSION</b>	<b>70</b>
6.1	PRÄSENTATION DER ERGEBNISSE	70
6.1.1	<i>Energetische Performance der Varianten unter RCP-Szenarien</i>	70
6.1.2	<i>Vergleich simulierte vs. reale Energiedaten</i>	71
6.2	INTERPRETATION DER ERGEBNISSE	71
6.2.1	<i>Effizienz der Varianten</i>	71
6.2.2	<i>Einfluss der RCP-Szenarien</i>	72
6.3	DISKUSSION DER ERKENNTNISSE	73
6.3.1	<i>Vergleich mit bestehender Forschung</i>	73
6.3.2	<i>Praktische Implikationen</i>	73
6.3.3	<i>Theoretische Implikationen</i>	74
6.4	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	74
<b>7</b>	<b>FAZIT UND AUSBLICK: AUF DEM WEG ZU NACHHALTIGEN GEBÄUDEN</b>	<b>75</b>
7.1	ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERKENNTNISSE	75
7.2	EMPFEHLUNGEN FÜR ZUKÜNFTIGE PROJEKTE	75
7.3	AUSBLICK AUF ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN	76
7.4	SCHLUSSBEMERKUNG	76
<b>8</b>	<b>METHODENKRITIK UND GRENZEN DER ARBEIT</b>	<b>77</b>
8.1	KRITISCHE ANALYSE DER VERWENDETEN METHODEN	77
8.1.1	<i>Gebäudemodellierung mit SketchUp</i>	77
8.1.2	<i>Energetische Simulation mit Sefaira</i>	77
8.1.3	<i>Klimadatenanalyse mit Meteonorm</i>	78
8.2	GRENZEN DER VALIDIERUNG MIT REALEN DATEN	78
8.3	METHODISCHE EINSCHRÄNKUNGEN UND IHRE AUSWIRKUNGEN	79
8.3.1	<i>Vereinfachte Annahmen in der Simulation</i>	79
8.3.2	<i>Beschränkte Berücksichtigung von Anlagentechnik</i>	79

---

8.3.3	<i>Nicht berücksichtigte ökologische und ökonomische Faktoren</i> .....	79
8.4	MÖGLICHKEITEN ZUR VERBESSERUNG UND ZUKÜNFTIGE FORSCHUNG .....	79
8.4.1	<i>Verfeinerung der Simulationsmodelle</i> .....	79
8.4.2	<i>Erweiterte Datenerhebung</i> .....	80
8.4.3	<i>Integration weiterer Faktoren</i> .....	80
8.5	ÜBERBLICK DER METHODISCHEN HERAUSFORDERUNGEN .....	80
8.6	RESÜMEE AUS DER METHODENKRITIK .....	80
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>81</b>
<b>10</b>	<b>ABKÜRZUNGEN</b> .....	<b>85</b>
<b>11</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>87</b>
<b>12</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>90</b>
	<b>PERSÖNLICHES SCHLUSSWORT, VERDANKUNGEN</b> .....	<b>91</b>
	<b>EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG</b> .....	<b>92</b>
	<b>ANHANG</b> .....	<b>93</b>

## Management Summary

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Einfamilienhaus an der Bubenbergstrasse 7 in Spiez einer detaillierten Energieanalyse unterzogen, mit der Vision, das Gebäude zukunftsfähig und klimaresilient zu machen. Der Energieverbrauch soll durch bauliche Anpassungen und moderne Technologien reduziert werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind aufschlussreich für Bauherr:innen, Planer:innen und Architekt:innen.

Die Energieanalyse wurde mit den Softwaretools Sefaira, Meteonorm und SketchUp durchgeführt. Es wurden Simulationen mit historische Klimadaten und Klimaprojektionen für 2100 unter RCP 2.6, 4.5 und 8.5 durchgeführt. Diese Daten wurden mit real erfassten Energiedaten validiert, was die Zuverlässigkeit der Simulation unterstreicht. Die atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen stabilisierten sich angemessen, woraufhin sich auch die Temperaturerwärmung einigermassen stabilisierte.

Die Simulationen basieren auf Energieberechnungen für sechs Strukturvarianten, die sich auf unterschiedliche Aspekte der Gebäudehülle und -nutzung konzentrierten. Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

Die beiden energieeffizientesten Optionen, d.h. die dritte und sechste Variante, senken den jährlichen Energieverbrauch im Vergleich zum Basisszenario um bis zu 15 %. Bei Variante 3 reduziert eine deutliche Verringerung der Fensterflächen an der Nord-, Ost- und Westseite den Heizbedarf im Winter erheblich. Eine 20-prozentige Reduzierung in den Wintermonaten Januar und Dezember und ein jährlicher Energieverbrauch bei rund 21.000 kWh. Bei Variante 6 mit mehr Dachbeschattung wird ein hoher Wert bei der Reduzierung des Kühlbedarfs im Sommer verzeichnet. Der Kühlungsbedarf in den Monaten Juli und August sinkt um 30 %, während der jährliche Energieverbrauch stabil bei 22.000 kWh bleibt.

Höhere Solargewinne im Winter werden tatsächlich durch Varianten mit grösseren Fensterflächen (Varianten 2 und 4) ermöglicht. Von den RCP-Szenarien zeigt insbesondere das 8.5-Szenario die grössten Veränderungen mit einer Reduzierung des Heizbedarfs um bis zu 30 %.

Die Analysen haben ergeben, dass durch konsequente bauliche Massnahmen eine erhebliche Reduzierung des Energieverbrauchs erreicht werden kann. Sie belegen insbesondere, dass sich die Varianten mit veränderten Fensterflächen und verstärkter Beschattung, als diejenigen mit dem grössten Einsparpotenzial herausgestellt haben. Dies wird weitreichende Konsequenzen für die zukünftige Gebäudeplanung und -sanierung haben, da es die Ausrichtung des Energieverbrauchs und der Klimaanpassung fördern kann.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann allgemein empfohlen werden, bei Planungen und Renovierungen auf Flächenoptimierung zu achten und dabei weniger sonnenexponierte Teile zu reduzieren, um Heizenergie im Winter einzusparen. Die Dachbeschattung sollte weiter ausgebaut werden, insbesondere in warmen Klimazonen oder unter den RCP 8.5-Szenarien der neuen Klimasituation, um den Kühlbedarf zu minimieren. Daten sollten aufgrund des Klimas bei zukünftigen Hüllkurvenanpassungen schon lange im Voraus in Planungsprozesse integriert werden. Es gibt enorme Potenziale zur Reduzierung des Energiebedarfs durch die Modernisierung des

bestehenden Gebäudebestands mittels gezielter Massnahmen wie energieeffiziente Fenster und Beschattungssysteme.

Die Diplomarbeit zeigt, dass die Verbesserung bestehender Gebäude an zukünftige Klimaanforderungen bzw. -entwicklungen von zentraler Bedeutung ist. Aufgrund der zunehmenden Klimaveränderungen werden passive Strategien in Zukunft immer wichtiger. Detailliertere Forschungsrichtungen umfassen die Integration von Smart-Home-Technologien und die Sicherstellung optimaler Energiespeichersysteme, um den Energieverbrauch weiter zu senken und den höchstmöglichen Wohnkomfort zu gewährleisten.

## Beruflicher Werdegang

Meine berufliche Laufbahn begann im Juli 2015 mit der Lehre als Sanitärinstallateur EFZ bei der Steiner-Stehlin AG in Thun, die ich erfolgreich im Juli 2018 abschloss. Neben der Ausbildung besuchte ich die Berufsmaturitätsschule in Bern, welche ich ebenfalls im Juli 2018 erfolgreich beendete. Danach arbeitete ich als temporärer Sanitärinstallateur EFZ bei der Temprom Personal GmbH. Dabei konnte ich für verschiedene Unternehmen tätig sein und mithin weitere praktische Erfahrungen sammeln und Einblicke in unterschiedliche Betriebe gewinnen.

Zwischen Januar und Mai 2019 absolvierte ich meinen Militärdienst bei der Pz RS 21-1 als Fahrer. Anschliessend entschied ich mich im Zivildienst zu arbeiten und war von Juli 2019 bis Januar 2020 als Mitarbeiter Technik bei der Spital STS AG in Thun tätig. Dabei war ich insbesondere für den Gebäudeunterhalt zuständig und wurde im Hauswartdienst eingesetzt. Ich arbeitete erstmals in einem hochkomplexen Gebäude, bei welchem das Energie- und Ressourcenmanagement eine grosse Rolle spielt. Dabei reifte in mir der Wunsch, mich vermehrt mit der Gebäude-/Energietechnik auseinanderzusetzen. Nach der Absolvierung des Zivildienstes arbeitete ich erneut für ein halbes Jahr bei der Temprom Personal GmbH.

Im August 2020 entschloss ich mich, ein Studium im Bereich Gebäudetechnik HLSK an der Hochschule Luzern (HSLU) aufzunehmen. Dieses Vollzeitstudium setzte ich jedoch nicht fort, weil mir die Kombination von Theorie und Praxis fehlte. So entschied ich mich im August 2021 wieder in meinen Beruf als Sanitärinstallateur EFZ zurückzukehren. So arbeitete ich ab Oktober 2021 bis heute in verschiedenen Betrieben mit unterschiedlichen Kundensegmenten.

Parallel zu meiner beruflichen Tätigkeit begann ich im Oktober 2022 das Studium zum Techniker Energie und Umwelt HF an der TEKO Bern, um mein Fachwissen im Bereich Energie- und Umwelttechnik zu vertiefen. Seit Juli 2023 arbeite ich daneben bei der Binder AG in Bern als Sanitärinstallateur EFZ. Daneben konnte ich im August 2023 erfolgreich die Zertifizierung als Projektleiter SAQ abschliessen.

## Projektziel und Aufgabenbeschreibung

In meiner Arbeit widme ich mich der energetischen und klimaresilienten Neugestaltung unseres Familienhauses an der Bubenbergstrasse 7 in Spiez. Das Einfamilienhaus, das meiner Familie Schläfli-Müller gehört, liegt idyllisch am Hang mit Blick auf den Thunersee und die umliegenden Berge. Es wurde in den 1940er Jahren erbaut und ist seit dem Jahr 2003 im Besitz meiner Familie. Angesichts der aktuellen und zukünftigen klimatischen Herausforderungen möchten wir unser Zuhause fit für die Zukunft machen, indem wir den Energieverbrauch senken. Das Haus zeichnet sich durch seine sichtbaren Holzbalken und grossen Fensterfronten aus, die viel Tageslicht hereinlassen. Aktuell wohnen meine Eltern zu zweit in dem Haus und mein Bruder und ich besuchen sie regelmässig. Da mein Vater bereits frühpensioniert ist, nutzt er seine freien Stunden, um das Haus und den Umschwung zu pflegen.

Um das Ziel der Neugestaltung zu erreichen, führe ich eine detaillierte Bestandsaufnahme unseres Hauses durch. Ich studiere die alten Baupläne, führe vor Ort Messungen durch und erstelle daraus ein präzises 3D-Modell des Gebäudes. Mithilfe der Software Sefaira analysiere ich den aktuellen Energieverbrauch und identifiziere Schwachstellen in der Gebäudehülle.

Ein zentraler Bestandteil meiner Arbeit ist die Entwicklung von sechs Anpassungsvarianten, die darauf abzielen, die energetische Performance unseres Hauses zu verbessern. Diese Varianten habe ich basierend auf den Ergebnissen der Bestandsaufnahme und den spezifischen Bedürfnissen unseres Hauses definiert. Sie umfassen verschiedene Massnahmen wie die Optimierung der Fensterflächen, den Einsatz energieeffizienter Verglasungen oder die Installation effektiver Beschattungssysteme. Jede Variante konzentriert sich auf unterschiedliche Aspekte und bietet spezifische Lösungsansätze, um den Energieverbrauch zu senken und gleichzeitig den Charakter des Hauses zu erhalten.

Um die ideale Variante auszuwählen, erstelle ich alle sechs Modelle mit der 3D-Modellierungssoftware SketchUp. Anschliessend teste ich mithilfe der Simulationsprogramme Sefaira und Meteororm unter verschiedenen Klimaszenarien, wie sich die einzelnen Varianten auf den Energieverbrauch und den Wohnkomfort auswirken. Die zukünftigen Klimadaten erhalte ich aus Meteororm, einer Software, die auf Basis von Klimaprojektionen des IPCC verschiedene Szenarien für die kommenden Jahrzehnte bereitstellt. So kann ich beurteilen, wie sich unser Haus unter veränderten klimatischen Bedingungen verhält.

Die fehlenden Daten, wie genaue Informationen zu der Raumaufteilung oder zur weiteren Sanierungsarbeiten, überwinde ich durch eigene Messungen vor Ort. So kann ich realistische Annahmen für die Simulationen treffen und Datenlücken schliessen.

Nach der Durchführung der Simulationen analysiere ich die Ergebnisse sorgfältig. Ich prüfe, welche Variante die grösste Energieeinsparung bietet, ohne den Wohnkomfort zu beeinträchtigen. Letztendlich wähle ich die Variante aus, die die beste Balance zwischen Energieeffizienz und Wohnqualität bietet. Diese Idealvariante kombiniert die effektivsten Massnahmen aus den sechs entwickelten Varianten.

*Meine Vorgehensweise umfasst folgende Schritte:*

- Bestandsaufnahme und Datenerhebung: Sammlung und Analyse aller verfügbaren Daten zum Gebäude, einschliesslich Bauplänen, Energieverbrauch und technischen Installationen.
- Definition der Massnahmen: Identifizierung von Schwachstellen und Entwicklung spezifischer Massnahmen, um diese zu beheben.
- Erstellung von Anpassungsvarianten: Entwicklung von sechs unterschiedlichen Varianten, die verschiedene Massnahmenkombinationen enthalten.
- Simulation und Analyse: Durchführung von energetischen Simulationen unter Verwendung von aktuellen und zukünftigen Klimadaten.
- Auswahl der Idealvariante: Vergleich der Ergebnisse und Auswahl der Variante mit dem besten Verhältnis von Energieeffizienz und Wohnkomfort.

Ein wichtiger Erfolgsfaktor ist die genaue Datenerfassung als Grundlage für das Modell. Durch die flexible Gestaltung des Planungsprozesses kann ich auf neue Erkenntnisse reagieren und Anpassungen vornehmen. Die Sensibilisierung meiner Familie für energieeffizientes Verhalten trägt ebenfalls zur Wirksamkeit der Massnahmen bei.

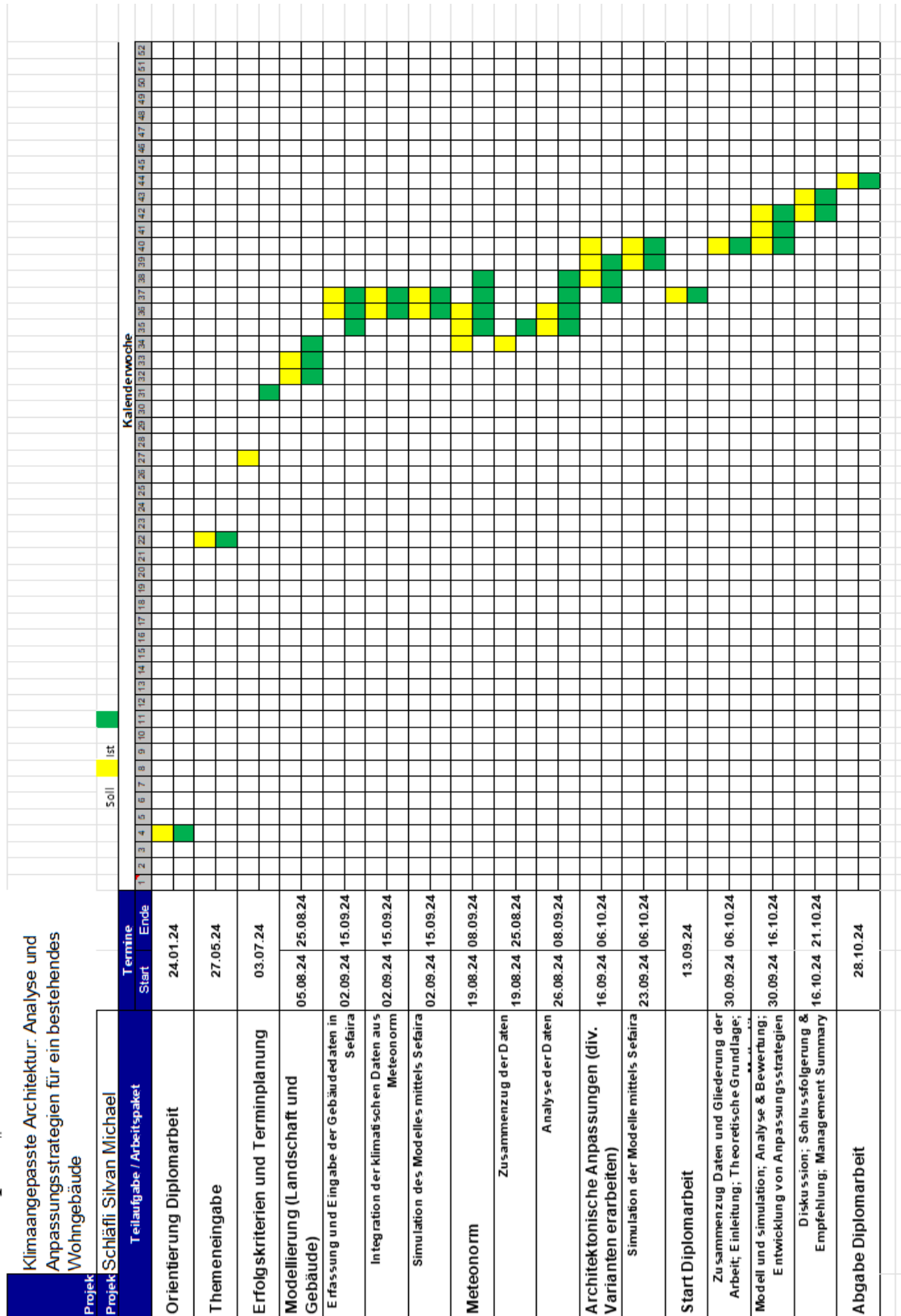
*Die Erfolgskriterien meiner Arbeit sind:*

- Verbesserung der Klimaresilienz unseres Hauses durch gezielte architektonische Veränderungen, sodass es besser auf extreme Wetterbedingungen vorbereitet ist.
- Fundierte Analyse der klimatischen Veränderungen mit Darstellung der Trends und der konkreten Auswirkungen auf unser Wohngebäude in Spiez, um faktenbasierte Entscheidungen treffen zu können.
- Bewertung der Leistung des umgesetzten Gebäudes anhand von Simulationen und realen Verbrauchsdaten, um die Effektivität der Massnahmen nachzuweisen.
- Entwicklung von praktischen Empfehlungen, die als umsetzbare Strategien dienen und auch auf andere Gebäude oder Eigentümer:innen übertragen werden können, um einen breiteren Nutzen zu erzielen.

Die komplexen Daten und Ergebnisse bereite ich mithilfe von Grafiken und Tabellen so auf, dass sie leicht verständlich sind. So kann ich nicht nur meiner Familie, sondern auch anderen Interessierten aufzeigen, wie bestehende Gebäude nachhaltig und energieeffizient gestaltet werden können.

Durch diesen durchdachten Ansatz gelingt es mir, ein nachhaltiges und energieeffizientes Wohngebäude zu schaffen, das den aktuellen und zukünftigen Klimaherausforderungen gerecht wird. Gleichzeitig erhöhen wir den Wohnkomfort und tragen aktiv zum Klimaschutz bei.

# Terminplan



# 1 Einleitung: Der Weg zur energieeffizienten Architektur

Die globale Erwärmung und der fortschreitende Klimawandel zählen zu den drängendsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014). Der Gebäudesektor spielt dabei eine zentrale Rolle, da er weltweit für etwa 36 % des Endenergieverbrauchs und nahezu 40 % der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich ist (*World Energy Outlook 2021 – Analysis*, 2021). In der Schweiz entfallen sogar rund 45 % des Endenergieverbrauchs auf Gebäude (Bundesamt für Energie (BFE), 2021). Diese Zahlen unterstreichen die Notwendigkeit, bestehende Gebäude energieeffizienter und klimaresilienter zu gestalten.

## 1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist, das Einfamilienhaus an der Bubenbergstrasse 7 in Spiez durch gezielte architektonische Anpassungen zukunftsfähig zu gestalten. Das Haus soll so modifiziert werden, dass es gegenüber den lokalen Klimabedingungen resilient wird. Dazu soll der Energieverbrauch minimiert werden bei gleichzeitiger Erhöhung des Wohnkomforts. Da das Haus im Eigentum der Eltern des Autors ist, haben alle Beteiligten Interesse am Ergebnis dieser Arbeit.

Ein zentraler Aspekt dieser Arbeit ist die Berücksichtigung zukünftiger Klimabedingungen. Durch die Einbindung von Klimaprojektionen können Anpassungen vorgenommen werden, die das Gebäude langfristig resilient machen. Darüber hinaus wird das Nutzerverhalten als entscheidender Faktor für den tatsächlichen Energieverbrauch betrachtet. Studien zeigen, dass edukative Massnahmen zur Sensibilisierung der Bewohner:innen für energieeffizientes Verhalten einen wesentlichen Beitrag leisten können (Bundesamt für Energie (BFE), 2020). Ein weiterer wichtiger Input ist die Integration erneuerbarer Energien wie Photovoltaik-Anlagen, um den verbleibenden Energiebedarf mit nachhaltigen Ressourcen zu decken (Müller & Meier, 2020). Die Kombination passiver und aktiver Massnahmen kann zu einer ganzheitlichen Optimierung führen.

## 1.2 Relevanz der Thematik

Die Anpassung von Bestandsgebäuden an veränderte klimatische Bedingungen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ältere Gebäude, wie das Elternhaus in Spiez, bieten ein hohes Potenzial für energetische Optimierungen und Klimaanpassungen (Bundesamt für Energie (BFE), 2020). Zu renovieren ist zudem oft nachhaltiger und ressourcenschonender als ein Neubau, da bereits vorhandene Strukturen weiterverwendet bzw. angepasst werden können (Feist, 2015). Durch die Integration moderner Technologien und architektonischer Konzepte kann der Energieverbrauch reduziert und die Widerstandsfähigkeit gegenüber klimatischen Extremereignissen erhöht werden (F.-J. G. Bürger, 2024).

## 1.3 Methodischer Ansatz

Für die vorliegende Arbeit werden die Softwaretools SketchUp, Sefaira und Meeonorm eingesetzt. In SketchUp wird das 3D-Gebäude erstellt. Sefaira dient der detaillierten Bauleistungsanalyse, bei der durch einen iterativen Prozess die Performance des Gebäudes bewertet wird.

Dabei werden die Einflussfaktoren identifiziert und Optimierungsmassnahmen entwickelt, die über traditionelle Energiemodelle hinausgehen (Sefaira, 2021). Meteonorm wird ergänzend für die Bereitstellung genauer und repräsentativer klimatischer Daten für den Standort des Hauses genutzt. Zur sprachlichen Überarbeitung und Optimierung der Texte wurde das KI-Sprachmodell ChatGPT von OpenAI (2024) eingesetzt.(OpenAI, 2024) Die finalen Inhalte wurden sorgfältig geprüft und an den persönlichen Schreibstil angepasst, um die wissenschaftliche Qualität der Arbeit sicherzustellen. Durch die Einbeziehung historischer Daten sowie zukünftiger Klimaprojektionen können typische Zeit-, Jahres- und Zukunftsreihen berücksichtigt werden (Meteotest, 2020).

Dieser iterative Prozess umfasst folgende Schritte:

- Datenerfassung und -aufbereitung: Sammlung von Gebäudedaten und klimatischen Informationen.
- Simulation und Analyse: Durchführung von Energiesimulationen mit Sefaira unter Verwendung der von Meteonorm bereitgestellten Klimadaten.
- Identifikation von Optimierungspotenzialen: Analyse der Simulationsergebnisse zur Identifikation von Massnahmen mit hoher Wirksamkeit.
- Implementierung von Anpassungen: Entwicklung architektonischer und technischer Lösungen zur Verbesserung der Gebäudeperformance.
- Evaluierung der Ergebnisse: Bewertung der Effektivität der umgesetzten Massnahmen hinsichtlich Energieeffizienz und Klimaresilienz.

## 2 Grundlagen und Stand der Forschung

Die Energieeffizienz im Bauwesen ist ein zentraler Schwerpunkt moderner Architektur und Ingenieurwissenschaften (Zimmermann et al., 2019). Angesichts der globalen Bemühungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und zur Bekämpfung des Klimawandels ist die Optimierung des Energieverbrauchs von Gebäuden von entscheidender Bedeutung (Müller & Meier, 2020).

Dieses Kapitel widmet sich den aktuellen Trends und Technologien zur Energieeinsparung, dem Einfluss von Fensterflächen und Verglasungen auf den Energieverbrauch sowie der Bedeutung von Klimadaten für die Gebäudeanalyse und -planung.

### 2.1 Aktuellen Trends und Technologien zur Energieeinsparung

- Hocheffiziente Dämmmaterialien: Moderne Dämmstoffe wie Aerogele, Vakuuminisulationspaneele und Phase-Change-Materials (PCM) bieten hervorragende thermische Eigenschaften und ermöglichen eine Reduktion des Heiz- und Kühlbedarfs (Klein & Schubert, 2012). PCM können Wärme speichern und bei Bedarf wieder abgeben, was zu einer Stabilisierung der Raumtemperatur führt.
- Passivhaus-Standard: Das Passivhaus-Konzept setzt auf eine hochgedämmte Gebäudehülle, dreifach verglaste Fenster, Wärmebrückenfreiheit und eine kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung. Dadurch kann der Heizenergiebedarf auf unter 15 kWh/m<sup>2</sup>a reduziert werden (Feist, 2015).
- Niedrigstenergie- und Plusenergiegebäude: Niedrigstenergiegebäude zielen darauf ab, den Energiebedarf auf ein Minimum zu reduzieren, während Plusenergiegebäude mehr Energie erzeugen als sie verbrauchen, beispielsweise durch Photovoltaik-Anlagen (Müller & Lehmann, 2018). Diese Konzepte tragen zur Dekarbonisierung des Energiesystems bei und ermöglichen sogar eine aktive Teilnahme am Energiemarkt.
- Intelligente Gebäudetechnik und Automation: Smarte Steuerungssysteme, Sensorik und das Internet der Dinge (IoT) ermöglichen eine bedarfsgerechte Regelung von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK-Systemen). Adaptive Systeme passen sich automatisch an die Bedürfnisse der Nutzer und die Umweltbedingungen an, was zu erheblichen Energieeinsparungen führt (Dieterle & Müller, 2019).
- Erneuerbare Energien und Energiespeicher: Die Integration von erneuerbaren Energien wie Solarthermie, Photovoltaik und Geothermie in Gebäuden wird durch die Entwicklung effizienter Energiespeichertechnologien ergänzt. Batteriespeicher und thermische Speicher ermöglichen die zeitliche Entkopplung von Energieerzeugung und -verbrauch (Bundesamt für Energie (BFE), 2020).
- Nachhaltige Baumaterialien: Die Verwendung von ökologischen Baustoffen mit geringem Energieinhalt und niedrigen Emissionen über den Lebenszyklus trägt zur Gesamteffizienz von Gebäuden bei. Holz, recycelte Materialien und lokal verfügbare Ressourcen reduzieren den ökologischen Fussabdruck von Gebäuden (Zimmermann et al., 2019).

### 2.1.1 Vorteil der Digitalisierung im Bauwesen

Die Digitalisierung im Bauwesen, bekannt als Building Information Modeling (BIM), ermöglicht eine integrale Planung und Optimierung von Gebäuden. Durch die Simulation verschiedener Szenarien können Energieeffizienzmassnahmen bereits in der Planungsphase bewertet und optimiert werden. Darüber hinaus fördert die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen die Wiederverwendung und das Recycling von Baumaterialien, was langfristig Ressourcen schont und den Energieverbrauch reduziert.

## 2.2 Einfluss von Fensterflächen und Verglasungen

Fenster sind essenzielle Elemente der Gebäudehülle und beeinflussen massgeblich den Energieverbrauch, den thermischen Komfort und die Tageslichtversorgung eines Gebäudes (Attia et al., 2012). Die Grösse, Lage und Art der Verglasung sind entscheidende Faktoren, die bei der Gebäudeplanung berücksichtigt werden müssen.

### 2.2.1 Fenstergrössen und -lagen

Orientierung: Die Ausrichtung der Fenster beeinflusst die solaren Gewinne und Verluste. Südorientierte Fenster maximieren im Winter die solaren Gewinne, was den Heizbedarf reduziert. Allerdings können sie im Sommer zu Überhitzung führen, wenn keine adäquaten Verschattungsmassnahmen vorhanden sind (Gustavsen et al., 2011). Nordorientierte Fenster bieten gleichmässiges Tageslicht, tragen jedoch wenig zu solaren Wärmegewinnen bei.

Grösse der Fensterflächen: Grosse Fensterflächen ermöglichen eine bessere Tageslichtnutzung und visuelle Verbindung zur Aussenwelt, erhöhen aber auch das Risiko von Wärmeverlusten im Winter und Überhitzung im Sommer (Loonen et al., 2013). Ein ausgewogenes Verhältnis zwischen transparenten und opaken Flächen ist daher essenziell.

Verschattungssysteme: Externe Verschattungselemente wie Lamellen, Markisen oder Bäume können solare Gewinne im Sommer reduzieren, ohne den Tageslichteinfall wesentlich zu beeinträchtigen. Automatisierte Systeme, die sich an die Sonnenposition und die Wetterbedingungen anpassen, erhöhen die Effizienz (Loonen et al., 2013).

Mehrfachverglasungen: Zweifach- und Dreifachverglasungen mit gasgefüllten Zwischenräumen und Low-E-Beschichtungen reduzieren Wärmeverluste und verbessern den U-Wert des Fensters. Dreifachverglasungen sind insbesondere in kalten Klimazonen von Vorteil.

Sonnenschutzverglasungen: Spezielle Beschichtungen können die solare Energiedurchlässigkeit (g-Wert) reduzieren und so den Kühlbedarf senken. Dies ist besonders in Gebäuden mit grossen Fensterflächen und in warmen Klimazonen relevant (Köhler & Knaack, 2018).

Schaltbare Verglasungen: Elektrochrome oder thermochrome Verglasungen können ihre optischen Eigenschaften ändern und somit die solare Einstrahlung dynamisch regulieren. Diese Technologien erhöhen den Komfort und reduzieren den Energieverbrauch (Baetens et al., 2016).

## 2.2.2 Rahmenmaterialien und Konstruktionen

Wärmebrückenfreiheit: Fensterrahmen sollten thermisch optimiert sein, um Wärmebrücken zu minimieren. Materialien wie Holz, Kunststoff oder thermisch getrenntes Aluminium sind geeignet, um den Wärmedurchgangskoeffizienten zu reduzieren (Oberrauch & Ebner, 2018).

Dichtheit: Eine hohe Luftdichtheit verhindert unkontrollierte Luftströmungen, die zu Energieverlusten und Komforteinbussen führen können. Hochwertige Dichtungen und professionelle Montage sind hierfür entscheidend (Feist, 2015).

## 2.3 Klimadaten als Schlüssel zur Optimierung

Die Berücksichtigung von Klimadaten ist unerlässlich für die energieeffiziente und klimaresiliente Gebäudeplanung. Sie liefern die Grundlage für die Auswahl geeigneter Baumaterialien, die Gestaltung der Gebäudehülle und die Dimensionierung technischer Anlagen. Zudem ermöglichen sie die Simulation und Vorhersage des Energieverbrauchs sowie des thermischen Komforts.

### 2.3.1 Bedeutung von Klimadaten in der Gebäudeplanung

Lokale Klimadaten: Klimadaten wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung variieren je nach geografischer Lage erheblich. Die Kenntnis dieser Parameter ermöglicht es, die Gebäude optimal an die lokalen Bedingungen anzupassen. Beispielsweise können in Regionen mit hohen solaren Einstrahlungswerten passive solare Strategien effektiv genutzt werden.

Mikroklimatische Einflüsse: Topografische Gegebenheiten, städtische Bebauung und Vegetation beeinflussen das Mikroklima eines Standorts. Diese Faktoren können zu Temperaturabweichungen, veränderten Windmustern oder unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit führen. Die Berücksichtigung mikroklimatischer Daten ermöglicht eine präzisere Planung.

### 2.3.2 Klimadaten in der Simulation und Analyse

Energiesimulationen: Softwaretools wie Sefaira nutzen Klimadaten, um den Energiebedarf für Heizung, Kühlung, Beleuchtung und Lüftung zu berechnen (Sefaira, 2021). Diese Simulationen helfen dabei, verschiedene Designvarianten auf energetischer Sicht zu bewerten und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Zukunftsszenarien und Klimawandel: Zuverlässige Klimaprojektionen sind für die kommenden Jahrzehnte entscheidend, um Gebäude klimaresilient zu gestalten. Bei der Planung von Gebäuden muss nicht nur der Ist-Zustand beachtet werden, sondern die gesamte projektierte Lebensdauer. Durch die Verwendung von Daten aus Klimamodellen können mögliche Veränderungen von Temperatur und Niederschlag berücksichtigt werden (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014).

Verwendung von Meteonorm: Meteonorm ist eine Software, die weltweite Klimadaten bereitstellt. Sie ermöglicht die Erstellung von typischen meteorologischen Jahresreihen (TMY) und berücksichtigt sowohl historische Daten als auch zukünftige Klimaprojektionen (Meteotest,

2020). Durch die Nutzung von Meteonorm können standortspezifische und repräsentative Klimadaten in die Gebäudesimulation integriert werden.

### 3 Werkzeuge der Zukunft: Vorstellung der Softwarelösungen

Die Verwendung fortschrittlicher Softwaretools ist notwendig, um komplexe energetische Analysen und simulationsgestützte Planungen effizient durchführen zu können. In diesem Kapitel werden die Softwarelösungen vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommen.

#### 3.1 Meteonorm: Das Klima in Zahlen

Die präzise Kenntnis klimatischer Bedingungen ist eine Grundvoraussetzung für die energetische Gebäudeplanung und -optimierung. Meteonorm ist eine Software, die als umfassende Datenquelle für meteorologische Informationen dient. Sie liefert weltweit Klimadaten und ermöglicht es, standortspezifische Wetterdaten für energetische Simulationen und Berechnungen zu generieren (Meteotest, 2020).

##### 3.1.1 Funktionen von Meteonorm

Meteonorm bietet eine Vielzahl von Funktionen, die für Architekt:innen, Ingenieur:innen und Wissenschaftler:innen von Bedeutung sein können:

- Globale Klimadatenbank: Meteonorm enthält Wetterdaten von über 8'300 Wetterstationen weltweit und deckt damit nahezu jeden Ort der Erde ab. Dies ermöglicht eine standortspezifische Analyse klimatischer Bedingungen (Remund et al., 2015).
- Generierung von Zeitreihen: Die Software kann stündliche, tägliche oder monatliche Zeitreihen von meteorologischen Parametern wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit etc. erzeugen. Diese Daten sind wichtig für detaillierte Gebäudesimulationen (Bianchi Janetti et al., 2019).
- Klimaprojektionen: Meteonorm ermöglicht die Einbindung zukünftiger Klimaszenarien basierend auf Daten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Dadurch können Gebäude auf zukünftige klimatische Veränderungen vorbereitet werden (Meteotest, 2020).
- Datenexport: Die generierten Klimadaten können in verschiedenen Formaten exportiert werden, die mit gängigen Simulationsprogrammen kompatibel sind.

#### 3.2 SketchUp: Vom Gedanken zum digitalen Modell

In der modernen Architektur und im Bauingenieurwesen spielen digitale Werkzeuge eine entscheidende Rolle bei der Visualisierung, Planung und Umsetzung von Bauprojekten. (Trimble Inc., 2021).

##### 3.2.1 Einführung in SketchUp als 3D-Modellierungswerkzeug

SketchUp wurde im Jahr 2000 von @Last Software entwickelt und später von Google Inc. übernommen, bevor es 2012 durch Trimble Inc. akquiriert wurde (Chopra, 2012). Das Programm zeichnet sich durch eine intuitive Benutzeroberfläche und einfache Handhabung aus, die es ermöglicht, schnell und effizient dreidimensionale Modelle zu erstellen. Diese Eigenschaften machen SketchUp zu einem idealen Werkzeug für die Konzeptentwicklung und die Entwurfsphase von Bauprojekten (Boeykens, 2011a).

Zu den Hauptfunktionen von SketchUp gehören:

- Einfache Geometrieerstellung: Durch die Verwendung von Grundelementen wie Linien, Flächen und Volumenkörpern können komplexe Strukturen modelliert werden.
- Präzisionswerkzeuge: Funktionen wie das Massband, der Winkelmesser und die Möglichkeit zur direkten Eingabe numerischer Werte ermöglichen eine genaue Modellierung.
- Schatten- und Sonnenstandanalysen: SketchUp erlaubt die Simulation von Sonnenverläufen zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten, was für die energetische Planung und Ausrichtung von Gebäuden von Bedeutung ist (Rasmussen & Tobiasson, 2010).
- Geolokalisierung: Modelle können mit realen geografischen Koordinaten versehen und in Google Earth visualisiert werden, um sie in den Kontext ihrer Umgebung zu setzen.

Ein Merkmal von SketchUp ist zudem die Möglichkeit zur Erweiterung mittels Plugins und Zusatzmodule, die die Funktionalität des Programms erweitern. Über den Extension Warehouse bietet SketchUp Zugriff auf tausende von Erweiterungen, die von der Nutzgemeinschaft und Drittanbietern entwickelt wurden (Trimble Inc., 2021).

### 3.3 Sefaira: Energieanalyse leicht gemacht

In der modernen Architektur und im Bauwesen ist die frühzeitige Bewertung der energetischen Performance von Gebäuden von entscheidender Bedeutung. Sefaira ist ein Software-Tool, das speziell entwickelt wurde, um Architekt:innen und Ingenieur:innen zu ermöglichen, Energie- und Tageslichtanalysen direkt während des Entwurfsprozesses durchzuführen.

#### 3.3.1 Beschreibung von Sefaira

Sefaira ist eine cloudbasierte Plattform für die Echtzeit-Analyse von Gebäudeenergie und Tageslicht. Sie ermöglicht es, verschiedene Designoptionen hinsichtlich ihrer energetischen Performance zu vergleichen und zu optimieren. Zu den Hauptfunktionen von Sefaira gehören:

- Energieanalyse: Berechnung des Energieverbrauchs für Heizung, Kühlung, Beleuchtung und Belüftung unter Berücksichtigung von Standortklimadaten und Gebäudeeigenschaften.
- Tageslichtanalyse: Bewertung der natürlichen Lichtverhältnisse im Innenraum, um den Bedarf an künstlicher Beleuchtung zu reduzieren und den visuellen Komfort zu erhöhen.
- Echtzeit-Feedback: Sofortige Rückmeldung zu Designänderungen, wodurch der Entwurfsprozess iterativ und informativ gestaltet wird.
- Berücksichtigung von Normen und Standards: Einhaltung von Energieeffizienzstandards wie ASHRAE, LEED und anderen internationalen Richtlinien.

#### 3.3.2 Integration in SketchUp zur Energie- und Tageslichtanalyse

Die Integration von Sefaira in SketchUp ermöglicht es, energetische Analysen direkt innerhalb der vertrauten Modellierungsumgebung durchzuführen. Dies bietet mehrere Vorteile:

- Nahtlose Benutzererfahrung: Architekt:innen können ohne Wechsel der Softwareumgebung arbeiten, was den Workflow effizienter gestaltet.
- Echtzeit-Analysen: Designentscheidungen können sofort auf ihre energetischen Auswirkungen überprüft werden, was eine optimierte Entscheidungsfindung ermöglicht.
- Visualisierung von Ergebnissen: Analysedaten werden direkt im 3D-Modell dargestellt, was die Interpretation erleichtert und die Kommunikation mit Stakeholder:innen verbessert.

### 3.3.3 Energieanalyse

Sefaira nutzt detaillierte Klimadaten und Gebäudemodelle, um präzise Energieprognosen zu erstellen. Die Software berücksichtigt dabei:

- Gebäudehülle: Einfluss von Materialien, Dämmung, Fensterflächen und Verglasungsarten auf den Energieverbrauch.
- Gebäudetechnik: Auswirkungen von Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystemen auf die Gesamtenergieeffizienz.
- Nutzerverhalten: Annahmen über Belegungszeiten, interne Lasten und Nutzerinteraktionen.

### 3.3.4 Tageslichtanalyse

Die Tageslichtanalyse in Sefaira ermöglicht es, die Qualität und Quantität des natürlichen Lichts im Innenraum zu bewerten. Dies trägt dazu bei:

- Energieeinsparungen: Reduzierung des Bedarfs an künstlicher Beleuchtung.
- Komfortsteigerung: Verbesserung des visuellen Komforts und des Wohlbefindens der Bewohnenden.
- Gestaltung: Optimierung der Fensterplatzierung und -grösse für eine ausgewogene Lichtverteilung.

## 4 Methodik: Von der Idee zur Simulation

### 4.1 Schritt für Schritt zum 3D-Modell

Die präzise Erstellung eines dreidimensionalen Modells des Elternhauses in Spiez bildete die fundamentale Grundlage für die nachfolgenden energetischen Analysen und Simulationen. Durch die Kombination historischer Baupläne und eigener Vermessungen konnte ein detailliertes und realitätsnahes Abbild des Gebäudes erzeugt werden.

Zu Beginn wurden die vorhandenen Baupläne aus dem Jahr 1945, dem ursprünglichen Baujahr des Hauses, sorgfältig ausgewertet. Diese Pläne lieferten Informationen über die ursprüngliche Architektur, die Raumaufteilungen sowie Details der Konstruktion. Da das Gebäude im Laufe der Jahrzehnte mehreren Veränderungen unterzogen wurde, insbesondere einer Sanierung und einem Umbau im Jahr 2003, war es notwendig, diese Umbauarbeiten im Modell zu berücksichtigen. Leider lagen für manche baulichen Massnahmen keine Pläne vor, was eine Herausforderung darstellte.

Um diese Lücke zu schliessen, wurden eigene Vermessungen am Objekt durchgeführt. Mithilfe von Massband und Laserdistanzmessgeräten wurden die aktuellen Raumdimensionen, Wandstärken und Positionen von Türen und Fenstern erfasst. Besonderes Augenmerk lag auf den Bereichen, die von den Umbauten betroffen waren, um ein möglichst genaues Abbild des heutigen Zustandes zu erhalten.

Für einen Teil der Terrasse standen neuere Pläne aus dem Jahr 2015 zur Verfügung, die bei der damaligen Erweiterung erstellt worden waren. Diese Unterlagen ermöglichten eine präzise Modellierung dieses Gebäudeteils und ergänzten die vorhandenen Daten optimal.

Anhand der gesammelten Informationen begann die Modellierung in SketchUp. Stockwerk für Stockwerk wurde das Gebäude digital nachgebildet. Dabei wurden zunächst die Grundrisse erstellt, indem die abgelesenen Masse aus den Plänen und Vermessungen eingegeben wurden. Wände, Böden und Decken wurden mit den exakten Abmessungen gezeichnet, um die räumliche Struktur des Gebäudes realistisch abzubilden.

Die Wände wurden mit den entsprechenden Materialien versehen, die visuell definiert wurden. Basierend auf den Baujahren und den damals üblichen Baumaterialien wurde beispielsweise für die Aussenwände massives Mauerwerk und für die Innenwände Leichtbaukonstruktionen angenommen. Die Materialdefinition ist für die spätere energetische Simulation wichtig, da sie Einfluss auf das thermische Verhalten des Gebäudes hat.

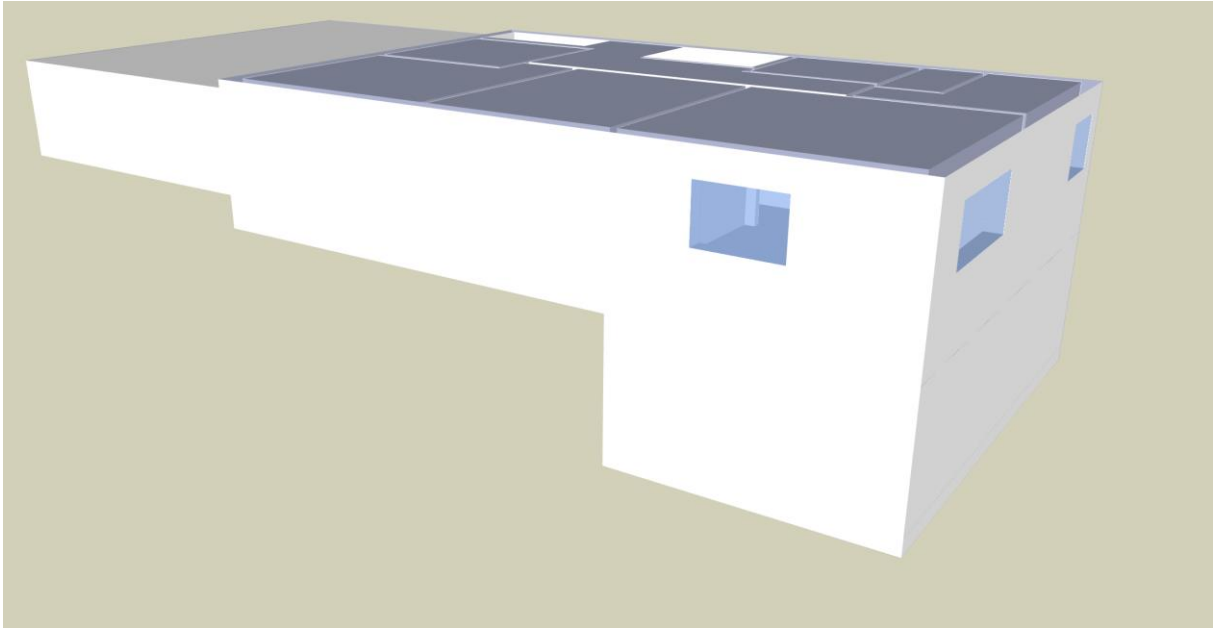


Abbildung 2: SketchUP Zeichnung 1. + 2. UG, roh

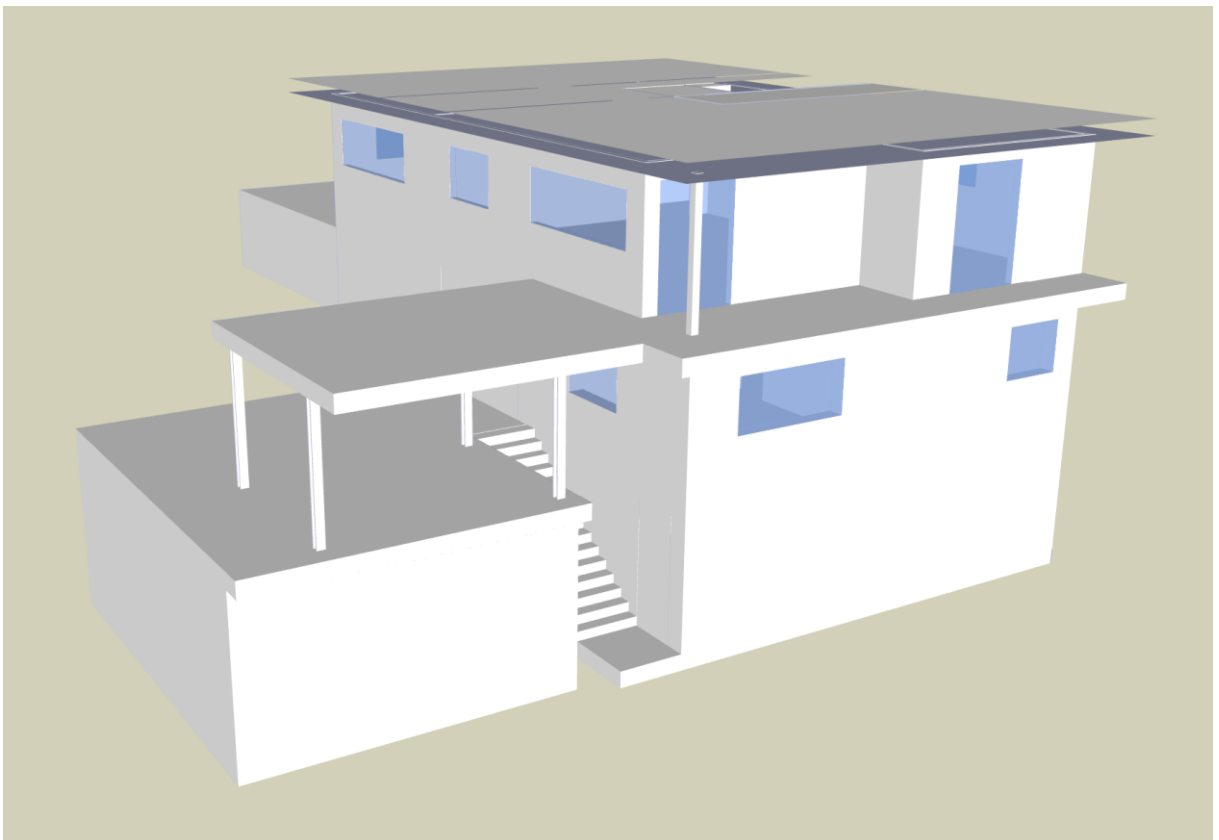


Abbildung 3: SketchUP Zeichnung 1. + 2. UG + EG, roh

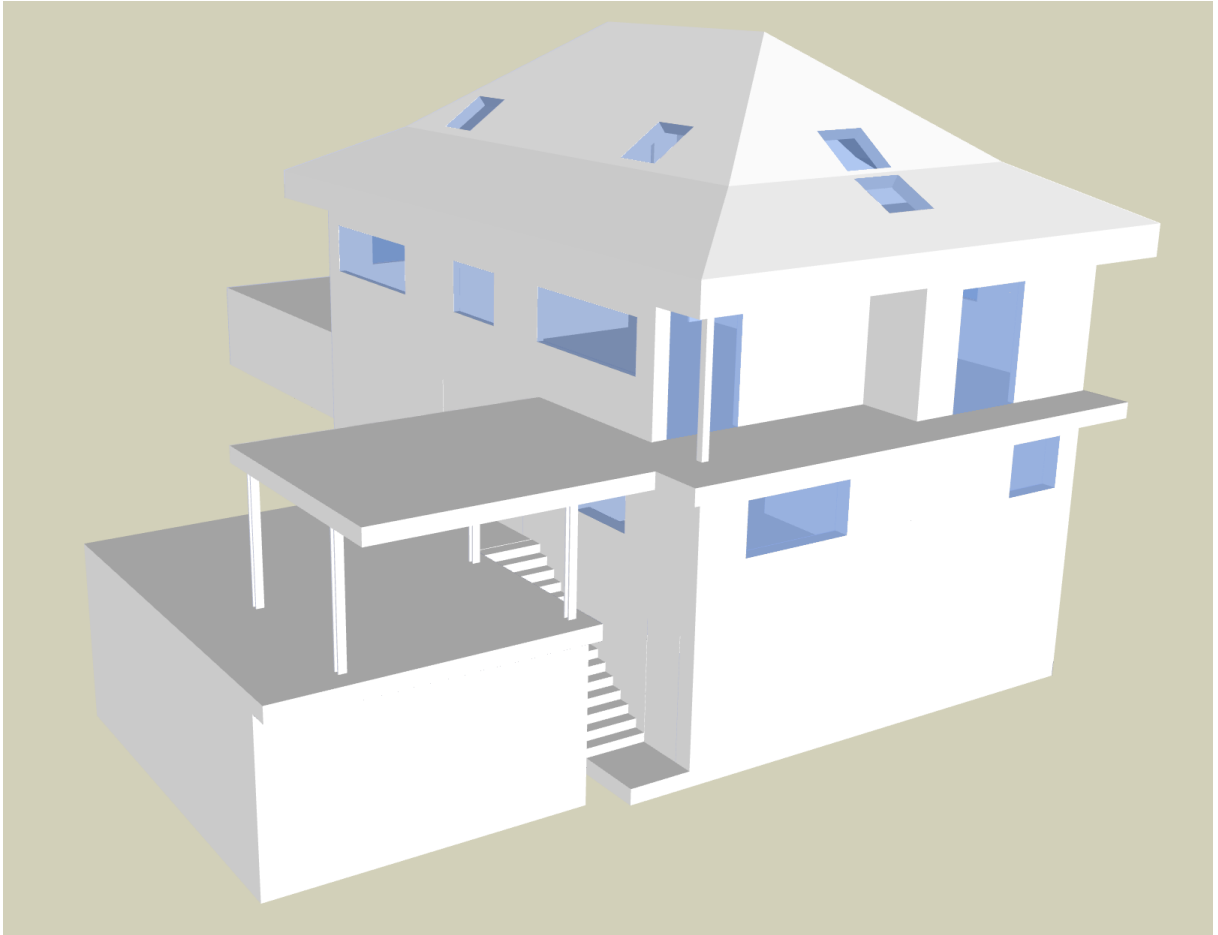


Abbildung 4: SketchUP Zeichnung komplettes Haus, roh

Die Einrichtung der Innenräume erfolgte nach der tatsächlichen Nutzung. Küche, Bäder, Wohn- und Schlafräume wurden mit typischen Möbeln und Einrichtungsgegenständen ausgestattet.



Abbildung 5: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, Wohnzimmer



Abbildung 6: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, Küche



Abbildung 7: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, Bad EG



Abbildung 8: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, Dachstock

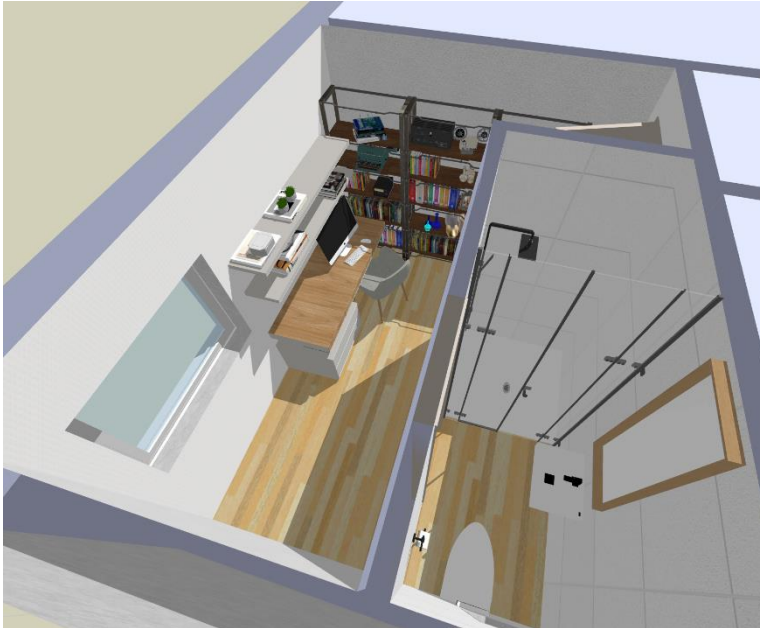


Abbildung 9: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, 1. UG Büro und Bad



Abbildung 10: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, 2. UG Werkraum

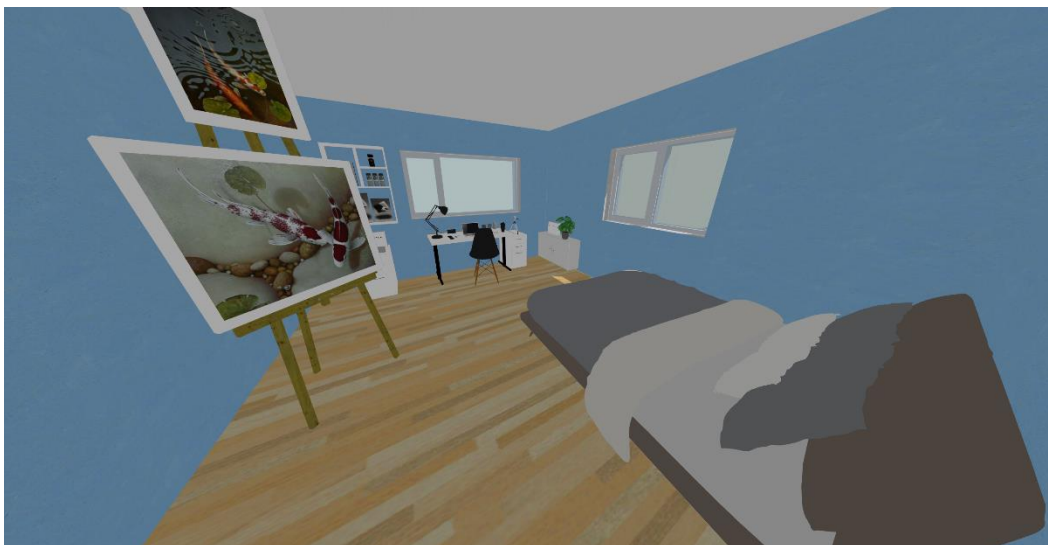


Abbildung 11: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, 1. UG Büro bzw. Schlafzimmer



Abbildung 12: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, 2. UG Technikraum

Der nächste Schritt war die Geolokalisierung des Gebäudes. Durch die Eingabe der genauen geografischen Koordinaten von Spiez konnte eine 3D Karte geladen werden. Das Modell wurde daraufhin in SketchUp integriert. Die Integration ermöglicht die Berücksichtigung standortspezifischer klimatischer Bedingungen, wie Sonneneinstrahlung und Verschattung, die einen erheblichen Einfluss auf die energetische Performance haben. Die Ausrichtung nach den Himmelsrichtungen wurde exakt eingestellt, um eine korrekte Simulation der solaren Gewinne und Verluste zu gewährleisten. Zudem werden mögliche Verschattungen von u.a. Hügel und Berge (Niesen) berücksichtigt.



Abbildung 13: SketchUP Zeichnung Landschaftsansicht von Osmordost



Abbildung 14: SketchUP Zeichnung Landschaftsansicht von Westsüdwest

Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Integration der Umbauten von 2003 gelegt. Da keine offiziellen Pläne vorhanden waren, basieren diese Teile des Modells ausschliesslich auf eigenen Vermessungen und Beobachtungen. Dies erforderte eine präzise und sorgfältige Vorgehensweise, um die Veränderungen gegenüber dem ursprünglichen Bauwerk korrekt abzubilden. Die hierbei gewonnenen Daten wurden direkt in das bestehende Modell integriert, wodurch ein aktueller und umfassender Datensatz entstand.

Die Qualitätssicherung des Modells spielte eine wichtige Rolle. Nach Abschluss der Modellierung wurden sämtliche Masse und Strukturen erneut überprüft, um mögliche Fehler oder Ungenauigkeiten zu identifizieren und zu korrigieren. Dieser Schritt ist von entscheidender Bedeutung, da bereits kleine Abweichungen zu Fehlern in der Simulation führen können.

## 4.2 Variantenentwicklung: Sechs Wege zur Klimaresilienz

Um das Elternhaus in Spiez klimaangepasst zu gestalten, wurden sechs verschiedene Varianten entwickelt, die sich gezielt auf solare Gewinne und Verschattung konzentrieren. Es wurden sechs Varianten gewählt, da daraus eine ausreichende Breite an Möglichkeiten vorliegt.

Jede Variante zielt darauf ab, das Gebäude energetisch zu optimieren, den Wohnkomfort zu erhöhen und das Gebäude besser auf die aktuellen und zukünftigen klimatischen Bedingungen abzustimmen. Im Folgenden werden die Überlegungen hinter den Anpassungen beschrieben, um die erhofften Verbesserungen zu veranschaulichen.

#### 4.2.1 Variante 1: Entfernung der Terrasse auf der Ostseite (2015 neu erstellt)

Die erste Variante beinhaltet die Entfernung der im Jahr 2015 neu errichteten Terrasse auf der Ostseite des Hauses. Durch diesen Schritt erhofft man sich eine Reduzierung unerwünschter solarer Gewinne am Morgen, insbesondere während der heissen Sommermonate. Die Ostseite ist der aufgehenden Sonne ausgesetzt, was zu einer frühzeitigen Erwärmung der Innenräume führen kann. Wird die Terrasse entfernt, kann die Ostfassade neu gestaltet werden, um passive Verschattungsmassnahmen zu integrieren, wie beispielsweise vertikale Lamellen oder begrünte Fassadenelemente.

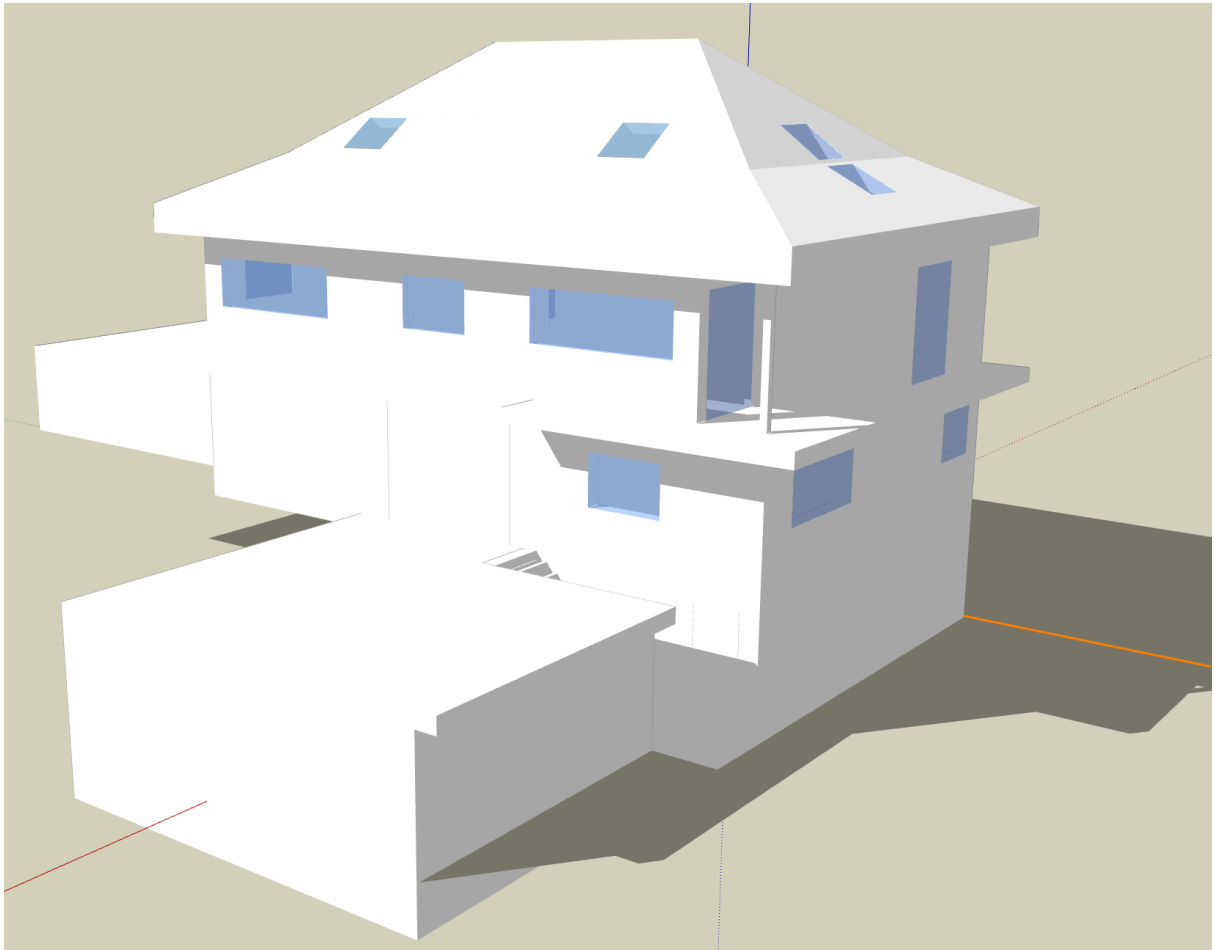


Abbildung 15: SketchUP Variante 1 Entfernen der Terrasse

Diese Anpassung soll dazu beitragen, die Überhitzung der Innenräume zu vermeiden und den Kühlbedarf zu reduzieren. Gleichzeitig eröffnet sie die Möglichkeit, die Fassade energetisch zu optimieren, indem wärmedämmende Materialien eingesetzt werden. So kann die thermische Behaglichkeit gesteigert und der Energieverbrauch gesenkt werden.

#### 4.2.2 Variante 2: Vergrößerung der Fensterflächen auf der Südseite

In dieser Variante werden die Fensterflächen auf der Südseite des Hauses um ca. 80 % vergrößert. Ziel ist es, die passiven solaren Gewinne während der Heizperiode zu maximieren. Durch grössere Fenster kann mehr Sonnenenergie in die Wohnräume eindringen, was zu einer natürlichen Erwärmung führt und den Heizenergiebedarf im Winter reduziert.

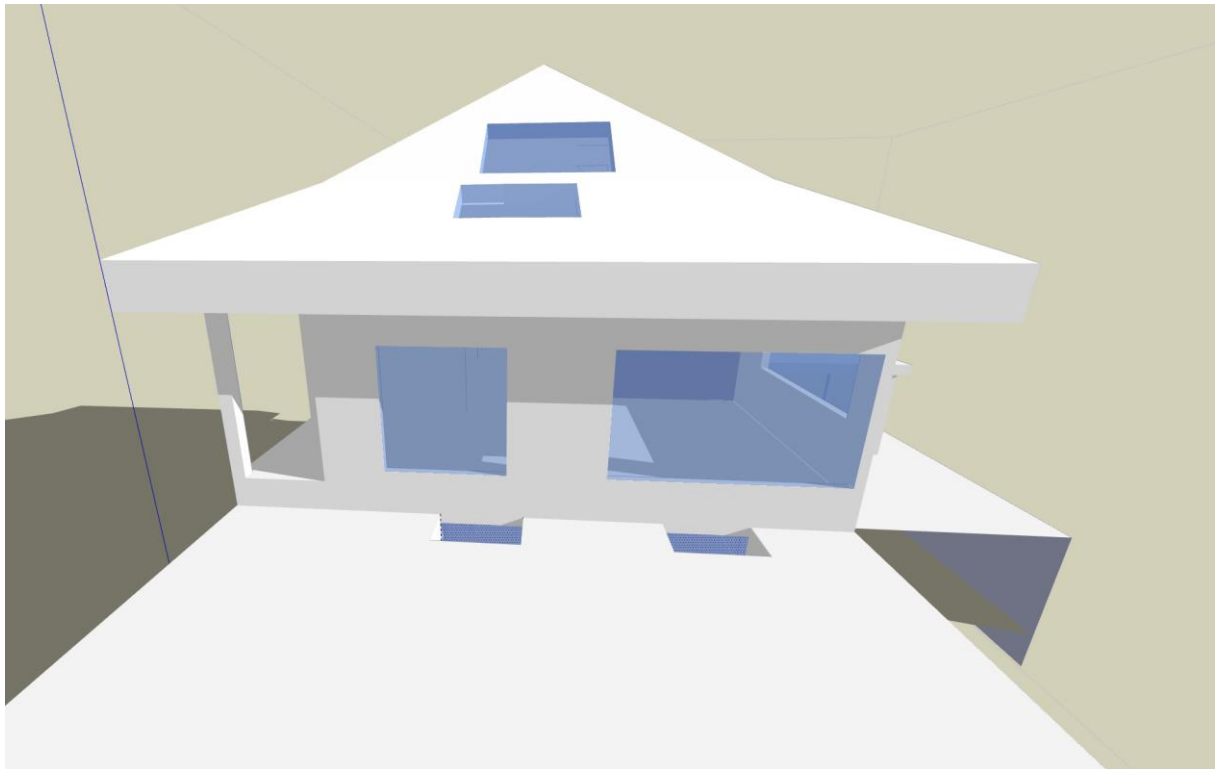


Abbildung 16: SketchUP Variante 2 Grössere Fensterfläche auf der Südseite

Die erhoffte Verbesserung liegt in der effizienten Nutzung der Sonnenenergie zur Steigerung des Wohnkomforts und zur Senkung der Energiekosten. Um eine Überhitzung im Sommer zu vermeiden, sollten aussenliegende Verschattungselemente wie Markisen oder Lamellen installiert werden. Diese können flexibel gesteuert werden und ermöglichen es, die Sonneneinstrahlung zu regulieren.

#### 4.2.3 Variante 3: Reduzierung der Fensterflächen auf Nord-, Ost- und Westseite

Die dritte Variante fokussiert auf die Reduzierung der Fensterflächen an den Nord-, Ost- und Westfassaden. Da die Nordseite keine direkte Sonneneinstrahlung erhält und die Ost- und Westseiten vor allem in den Morgen- und Abendstunden von niedriger Sonnenposition betroffen sind, können grosse Fensterflächen hier zu unerwünschten Wärmeverlusten im Winter führen. Aus diesem Grund sollte man die Fensterfläche um 60 – 70 % reduzieren.

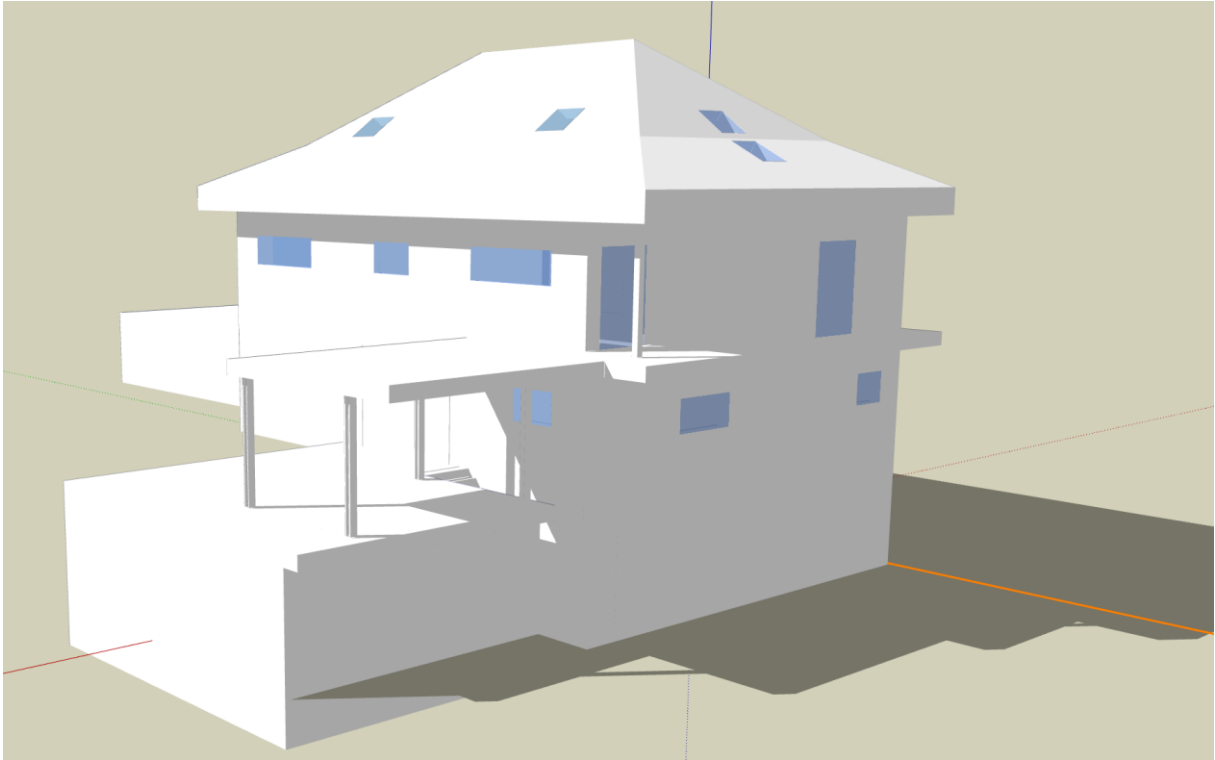


Abbildung 17: SketchUP Variante 3 Reduzierung der Fensterfläche

Durch die Verringerung der Fensterflächen an diesen Fassaden erhofft man sich eine Verbesserung der thermischen Gebäudehülle. Dies führt zu einer Senkung des Heizbedarfs im Winter. Um dennoch ausreichend Tageslicht in die Innenräume zu bringen, können schlanke, hoch platzierte Fenster oder Lichtschächte verwendet werden.

#### 4.2.4 Variante 4: Allgemeine Erhöhung der Glasflächen

Die vierte Variante sieht eine allgemeine Erhöhung (ca. 60 %) der Glasflächen im gesamten Gebäude vor, um die Tageslichtnutzung zu maximieren. Mehr natürliches Licht kann den Bedarf an künstlicher Beleuchtung reduzieren und das Wohlbefinden der Bewohnenden steigern. Die erhoffte Verbesserung besteht darin, ein helles und freundliches Wohnambiente zu schaffen und gleichzeitig mehr Energie durch solare Gewinne zu erzielen.

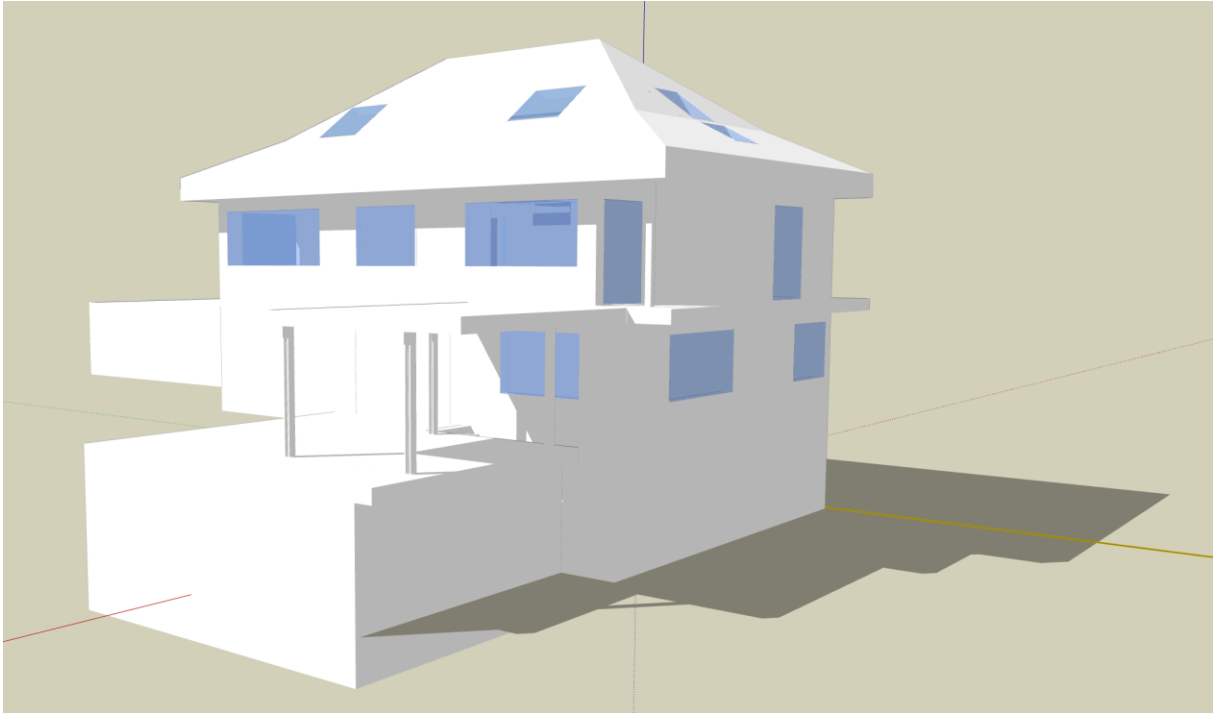


Abbildung 18: SketchUP Variante 4 Glasfläche Allgemein erhöhen

#### 4.2.5 Variante 5: Verwendung von energieeffizienten Verglasungen

Bei dieser Variante wird die bestehende Verglasung durch hochwertige, energieeffiziente Fenster ersetzt. Moderne Verglasungen mit niedrigem U-Wert reduzieren die Wärmeverluste im Winter, während ein optimierter g-Wert die solaren Gewinne steuert.

Die erhoffte Verbesserung liegt in der Senkung des Energieverbrauchs für Heizung und Kühlung. Zudem kann durch spezielle Beschichtungen der Einsatz von Sonnenlicht für die Beleuchtung maximiert werden, ohne dass es zu Überhitzung kommt. Diese Massnahme erhöht die Energieeffizienz des Gebäudes erheblich und trägt zur nachhaltigen Nutzung bei.

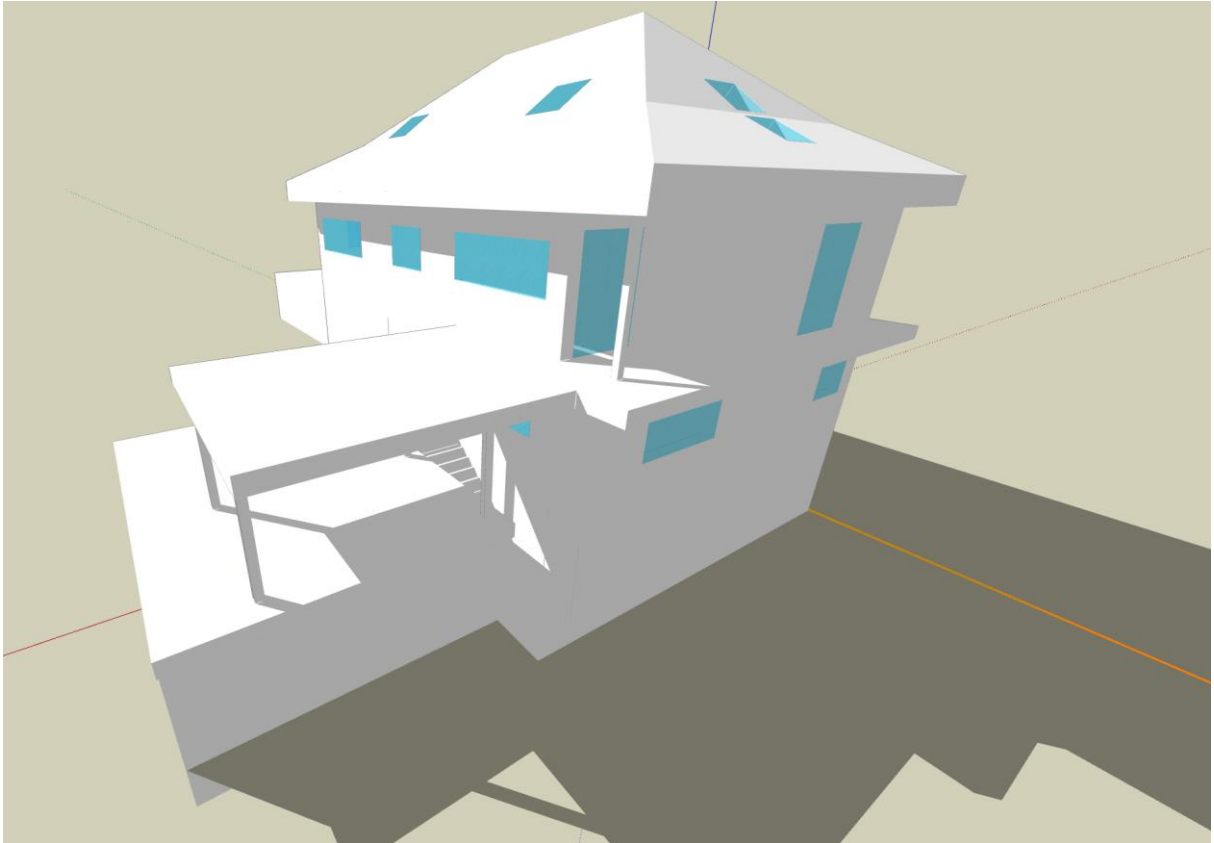


Abbildung 19: SketchUP Variante 5 Verwendung von energieeffizienterer Verglasung

#### 4.2.6 Variante 6: Erhöhung der Verschattung des Daches

Die sechste Variante konzentriert sich auf die Erhöhung ( $117.66 \text{ m}^2$  vs.  $32.88 \text{ m}^2$ ) der Verschattung des Daches. Durch die Installation von grösseren Dachüberständen die zusätzlich als Verschattung dienen, soll die Sonneneinstrahlung auf das Dach und die oberen Stockwerke kontrolliert werden.

Die erhoffte Verbesserung besteht darin, die Überhitzung der Innenräume während der Sommermonate zu reduzieren und gleichzeitig durch die Photovoltaik-Anlagen erneuerbare Energie zu gewinnen. Im Winter, wenn die Sonne tiefer steht, bleiben die solaren Gewinne weitgehend erhalten, was den Heizbedarf senkt.

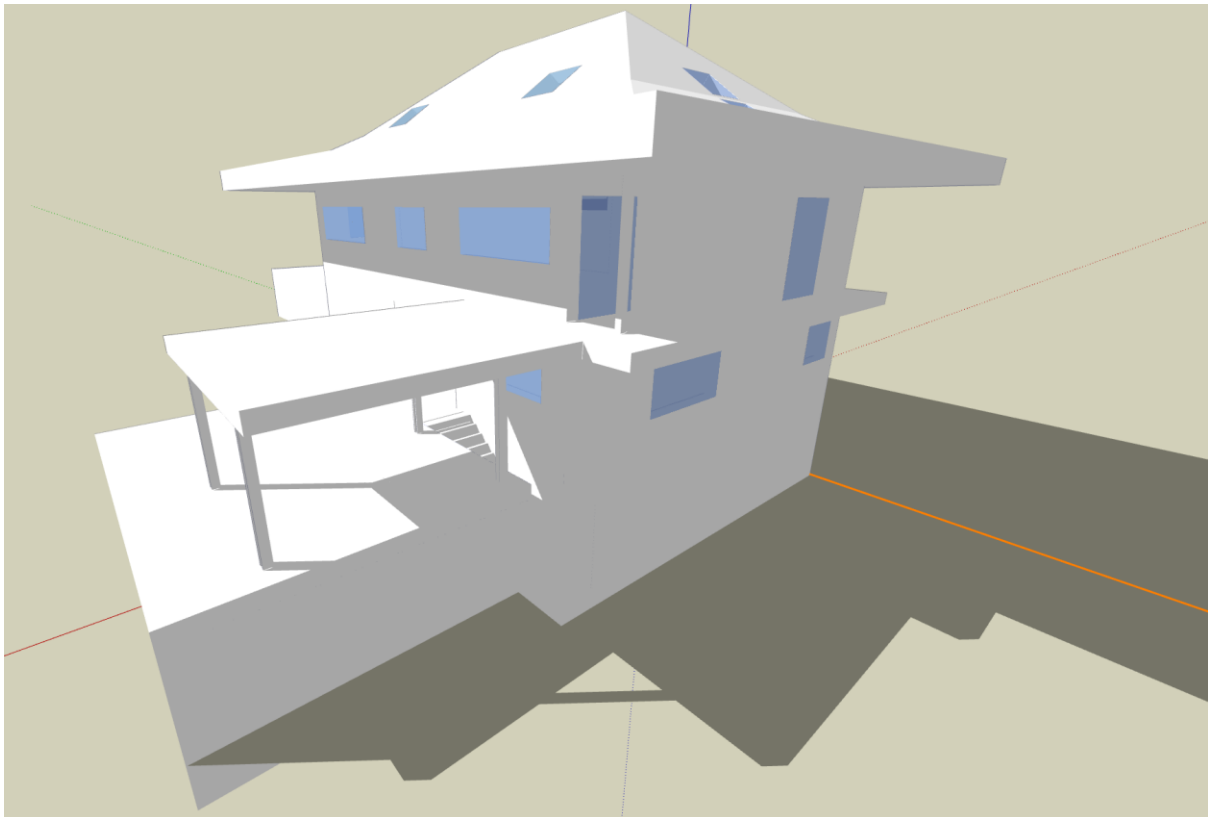


Abbildung 20: SketchUP Variante 6 Erhöhung der Verschattung des Daches

### 4.3 Simulation mit Sefaira: Blick ins Innere

Im nächsten Schritt wurden die zuvor erarbeiteten Varianten mithilfe der Sefaira Web-App energetisch analysiert. Sefaira ermöglicht es, Gebäudeentwürfe hinsichtlich Energieeffizienz und Tageslichtnutzung zu simulieren und zu optimieren. Durch die Integration in SketchUp und die Nutzung der Web-App konnte ein nahtloser Workflow gewährleistet werden.

### 4.4 Vorbereitung des Modells für die Simulation

Zunächst wurde das erstellte 3D-Modell des Gebäudes in die Sefaira Web-App importiert. Dabei wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Modellbereinigung: Das SketchUp-Modell wurde überprüft, um sicherzustellen, dass es für die Simulation geeignet ist. Dabei wurden geschlossene Volumen sichergestellt und unnötige Details entfernt, um die Rechenzeit zu optimieren.
- Festlegung der thermischen Zonen: Das Gebäude wurde in thermische Zonen unterteilt, um unterschiedliche klimatische Bedingungen und Nutzungen innerhalb des Gebäudes abzubilden.
- Definition der Baustoffe: Materialien für Wände, Dächer, Böden und Fenster wurden mit ihren thermischen Eigenschaften hinterlegt. Diese Details sind entscheidend für die Berechnung von Wärmeverlusten und solaren Gewinnen.

## 4.5 Durchführung der Simulationen in der Sefaira Web-App

Nach der Präparation des Modells wurden die Simulationen für den Ist-Zustand sowie die sechs Varianten durchgeführt. Das Vorgehen basierte auf den Empfehlungen aus der Sefaira-Dokumentation (Sefaira Support, 2021):

Die Parameter wie Anlagentechnik, Nutzungsprofile und Lüftungsstrategien wurden zentral festgelegt. Um den Einfluss der baulichen Änderungen isoliert betrachten zu können, blieben diese Einstellungen für alle Varianten gleich.

## 4.6 Präsentation der Ergebnisse

Die Simulationen mit Sefaira haben für den Ist-Zustand sowie für jede der sechs Varianten detaillierte Daten geliefert. Diese Daten umfassen die Tageslichtverteilung in den Innenräumen und den monatlichen sowie jährlichen Energiebedarf. Im Folgenden werden die Ergebnisse für jede Variante präsentiert und kurz erläutert. Die entsprechenden Grafiken unterstützen die Darstellung der Auswirkungen der Anpassungen.

### 4.6.1 Ist-Zustand

Der Ist-Zustand zeigt in der Tageslichtanalyse (siehe Abbildung 21) eine ungleichmässige Verteilung des natürlichen Lichts im Gebäude. Insbesondere die unteren Geschosse sowie Räume auf der Nordseite erhalten deutlich weniger Tageslicht, was zu einem erhöhten Bedarf an künstlicher Beleuchtung führt. Die oberen Stockwerke, insbesondere unter dem Dach, weisen hingegen eine bessere Tageslichtverfügbarkeit auf.

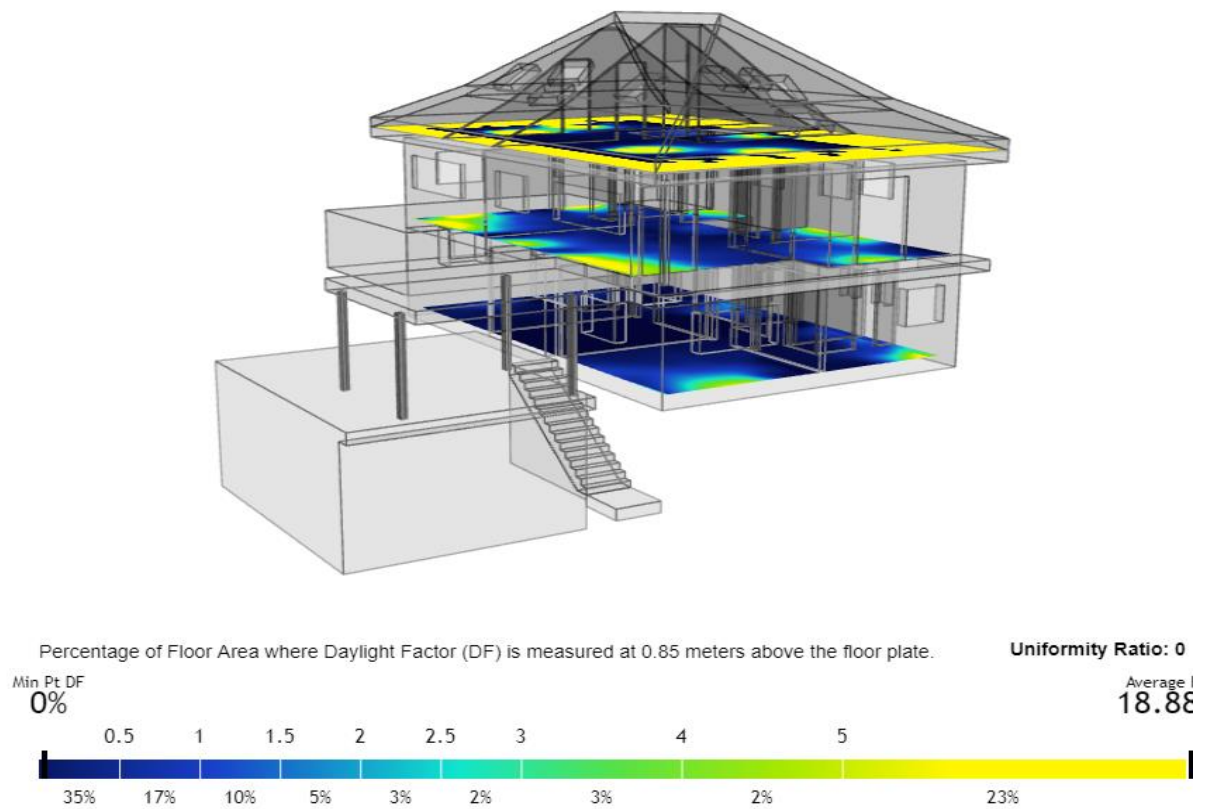


Abbildung 21: Sefaira-Daylighting-snapshot\_Ist-Zustand Quelle: Sefaira Plugin

Der monatliche Energiebedarf (Abbildung 22) zeigt einen stark erhöhten Heizenergiebedarf in den Wintermonaten (Januar bis März sowie Dezember), der über 3'500 kWh im Januar liegt. In den Sommermonaten (Mai bis September) ist der Energiebedarf deutlich geringer, wobei der Beleuchtungs- und Gerätebedarf nahezu konstant bleibt. Kühlung spielt eine untergeordnete Rolle, was auf die begrenzte Sonneneinstrahlung auf die unteren Geschosse und die Nordseite zurückzuführen sein könnte.

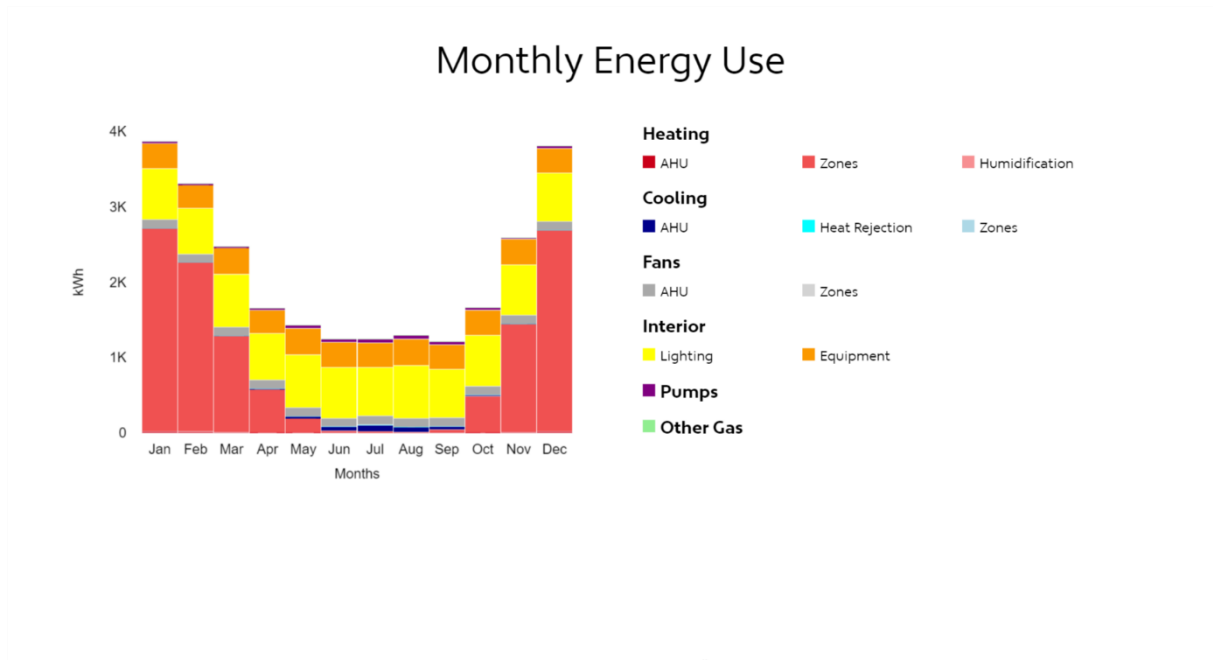


Abbildung 22: Sefaira-Monthly\_energy\_Ist-Zustand Quelle: Sefaira WebApp

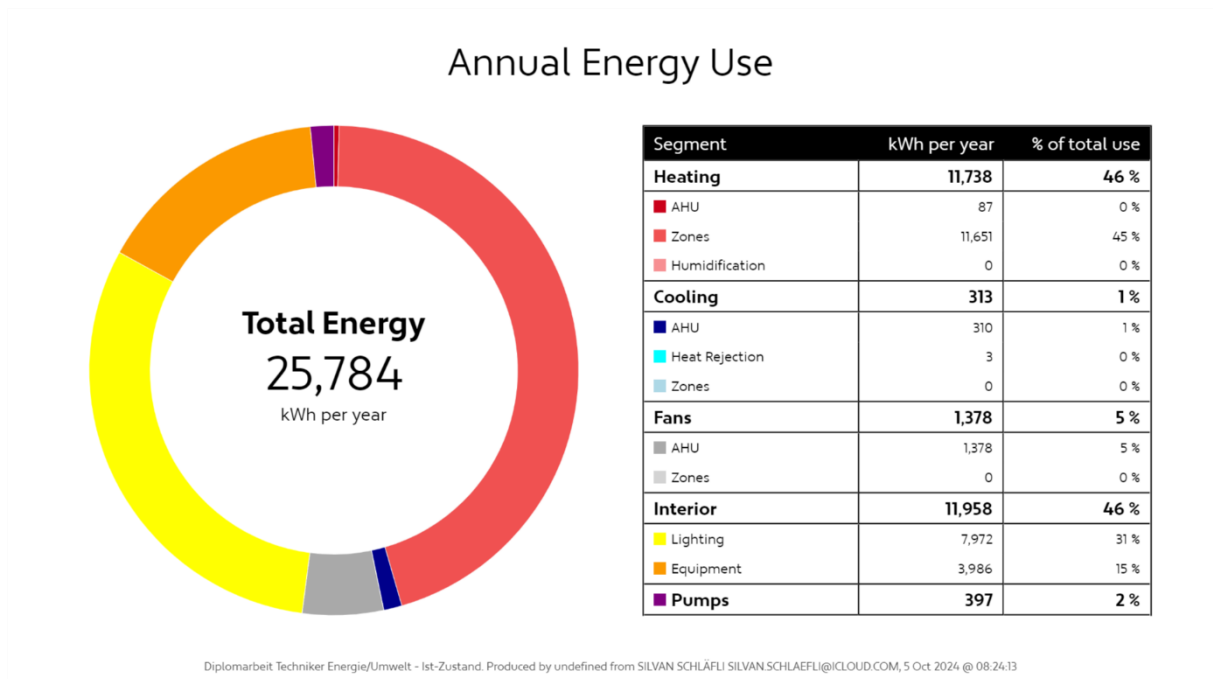


Abbildung 23: Sefaira-Annual\_Use\_energy\_Ist-Zustand Quelle: Sefaira WebApp

#### 4.6.2 Variante 1: Entfernung der Terrasse auf der Ostseite

Durch die Entfernung der Terrasse auf der Ostseite verändert sich die Geometrie der Fassade, was sowohl die Tageslichtverteilung als auch den Energiebedarf beeinflusst. Die Tageslichtanalyse (Abbildung 24) zeigt nur geringfügige Veränderungen, da die Fensterflächen unverändert bleiben. Lediglich in den angrenzenden Räumen gibt es eine leichte Reduktion der Tageslichtverfügbarkeit.

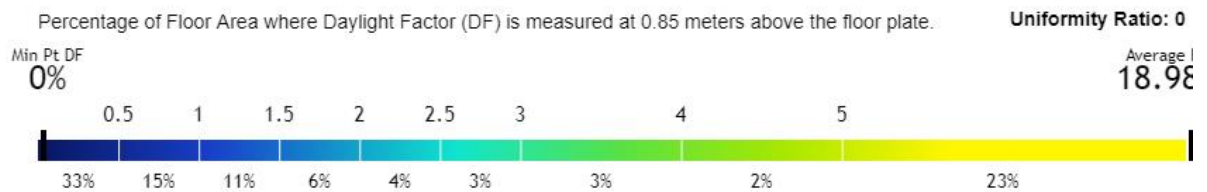
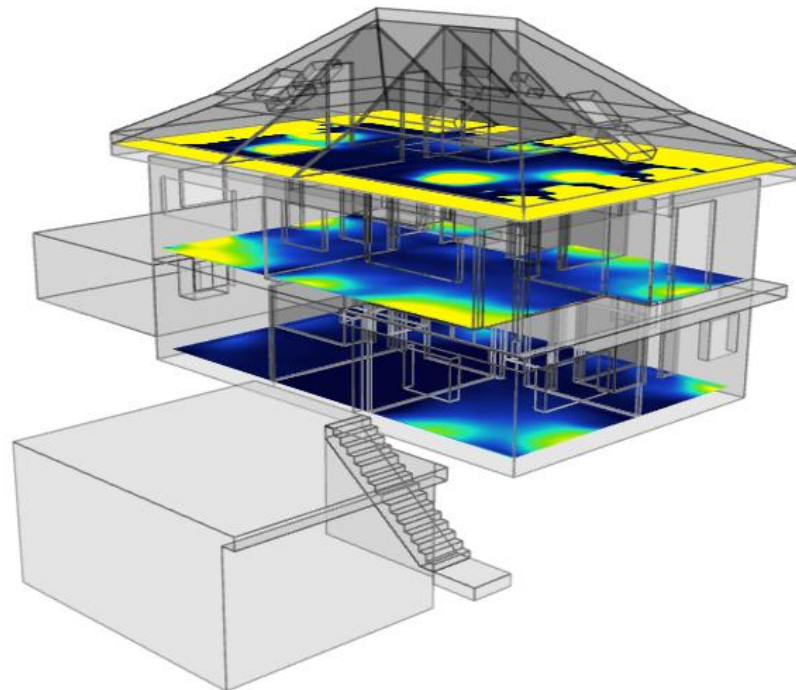


Abbildung 24: Sefaira-Daylighting-snapshot\_Variante 1 Quelle: Sefaira Plugin

Energetisch zeigt diese Variante (Abbildung 25) eine marginale Reduktion des Heizenergiebedarfs in den Übergangsmonaten (April und Oktober), was auf den höheren Wärmegewinn durch die entfernte Terrasse (Verschattung) zurückzuführen ist. Der Heizbedarf im Winter bleibt jedoch nahezu identisch mit dem Ist-Zustand.

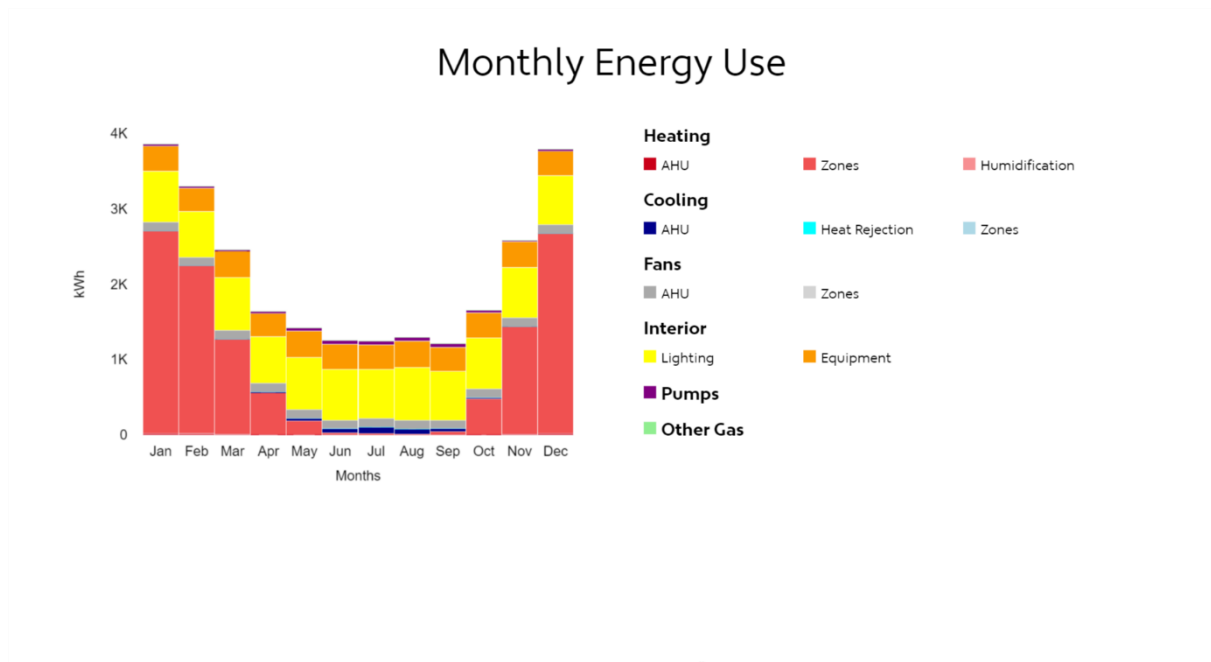


Abbildung 25: Sefaira-Monthly\_energy\_Variante 1 Quelle: Sefaira WebApp

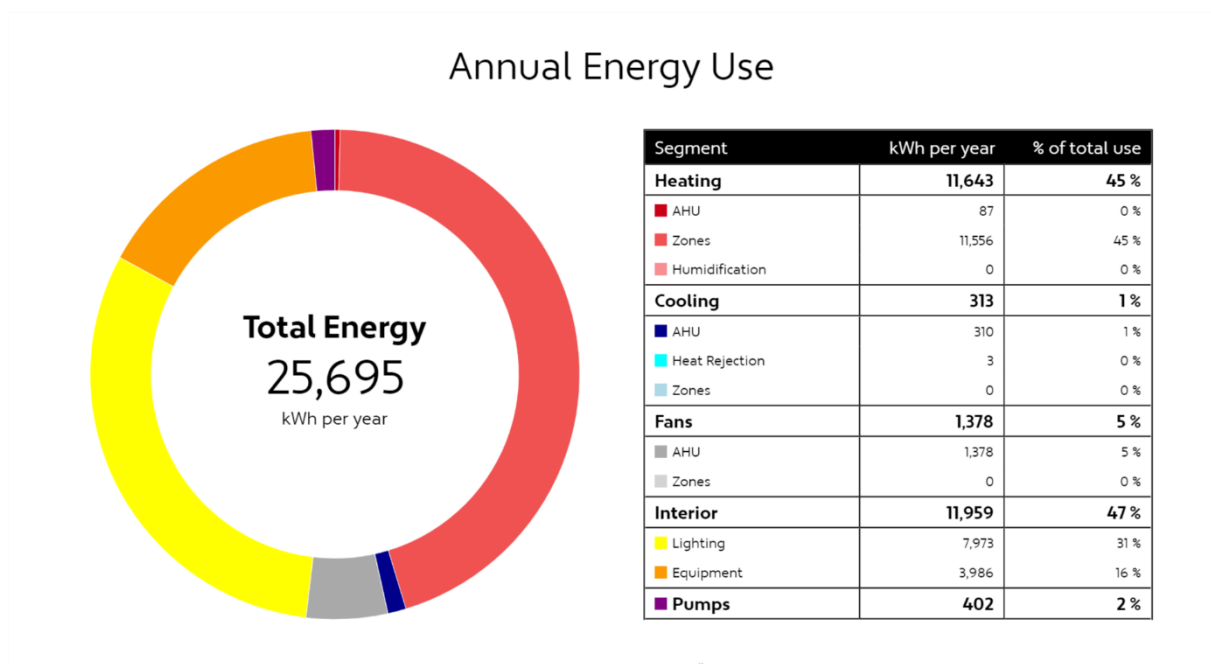


Abbildung 26: Sefaira-Annual\_Use\_energy\_Variante 1 Quelle: Sefaira WebApp

#### 4.6.3 Variante 2: Vergrößerung der Fensterflächen auf der Südseite

Die Vergrößerung der Fensterflächen auf der Südseite führt zu einer erheblichen Verbesserung der Tageslichtverfügbarkeit in den südlich ausgerichteten Räumen, wie die Tageslichtanalyse (Abbildung 27) verdeutlicht. Somit ist der Bedarf an künstlicher Beleuchtung reduziert. In den unteren und nördlich gelegenen Räumen bleibt die Tageslichtnutzung jedoch auf einem niedrigeren Niveau.

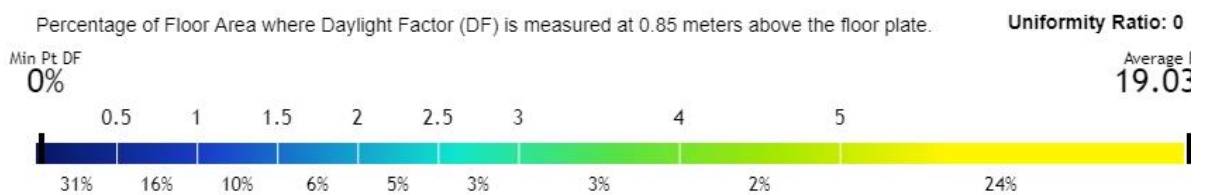
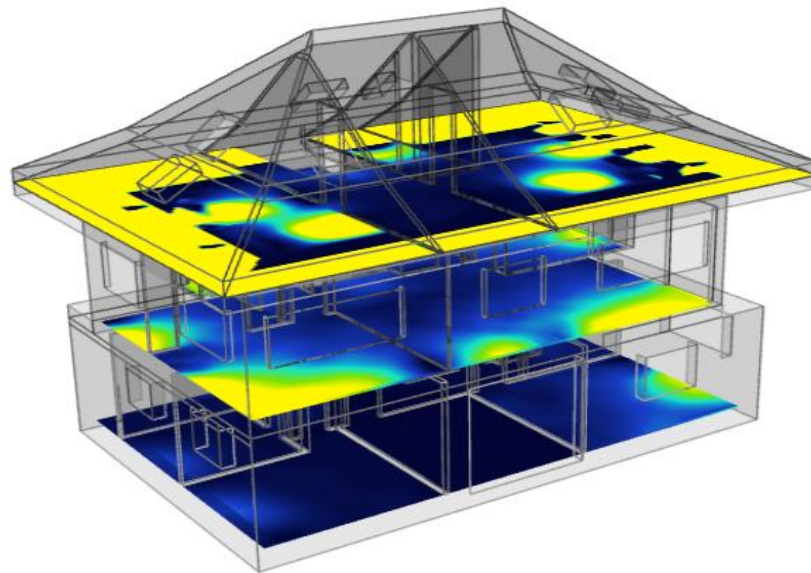


Abbildung 27: Sefaira-Daylighting-snapshot\_Variante 2 Quelle: Sefaira Plugin

Der monatliche Energiebedarf (Abbildung 28) zeigt eine deutliche Reduktion des Heizbedarfs in den Wintermonaten, da die solaren Gewinne durch die grösseren Fensterflächen maximiert werden. Allerdings steigt der Kühlbedarf in den Sommermonaten leicht an, was möglicherweise durch entsprechende Verschattungsmassnahmen kompensiert werden müsste.

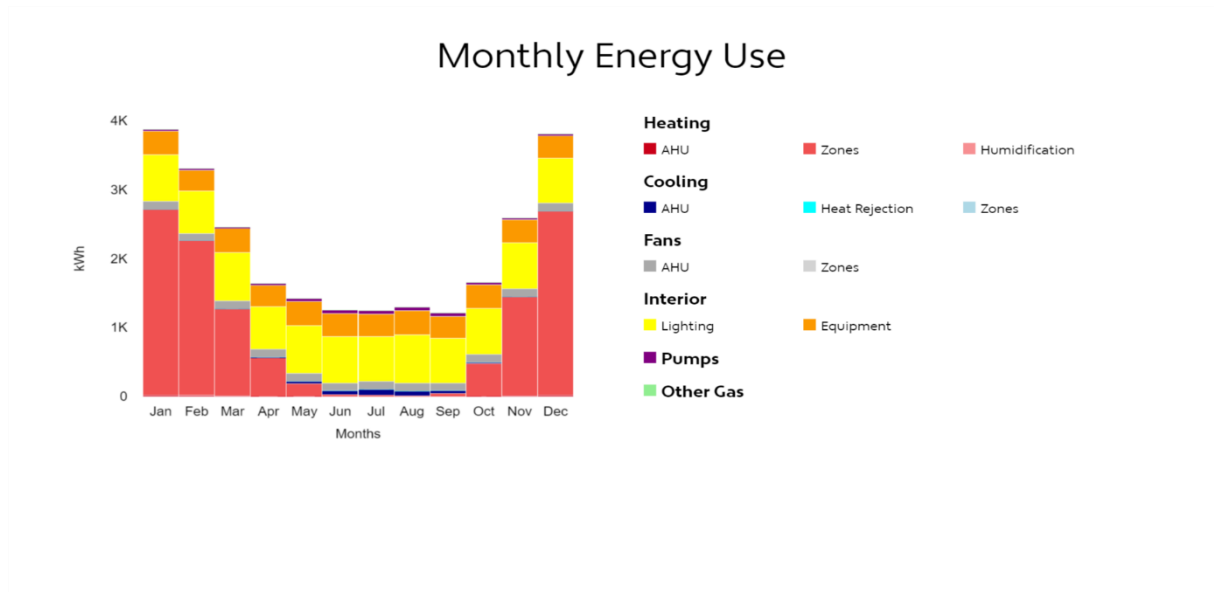


Abbildung 28: Sefaira-Monthly\_energy\_Variante 2 Quelle: Sefaira WebApp

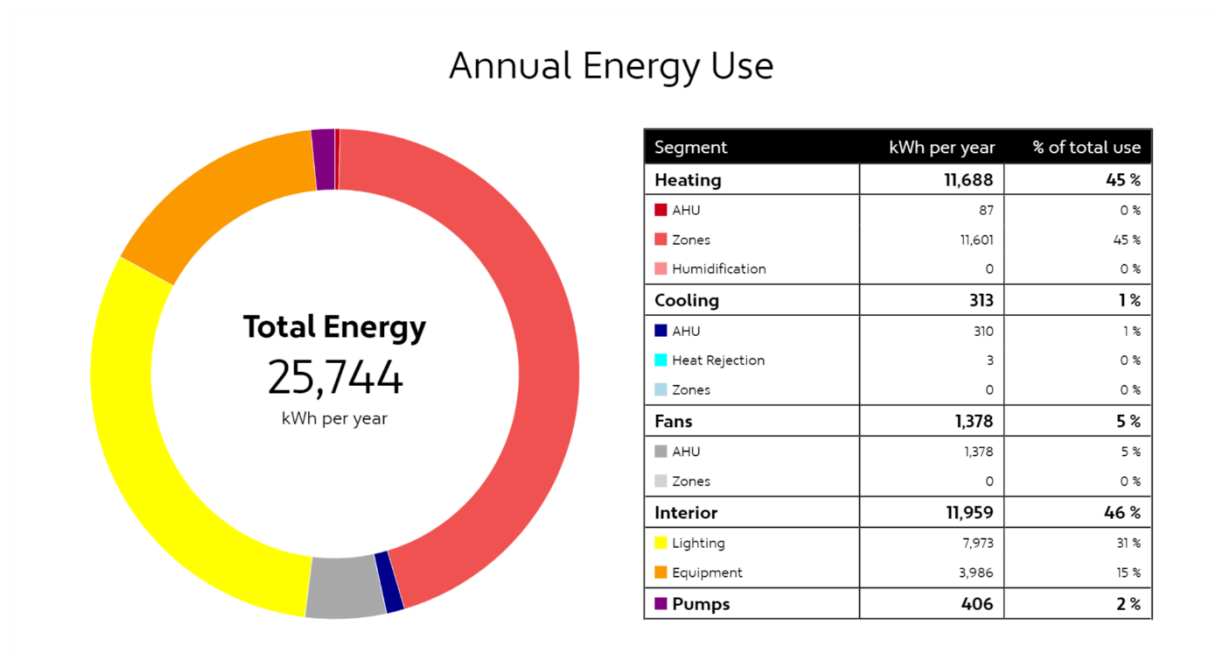
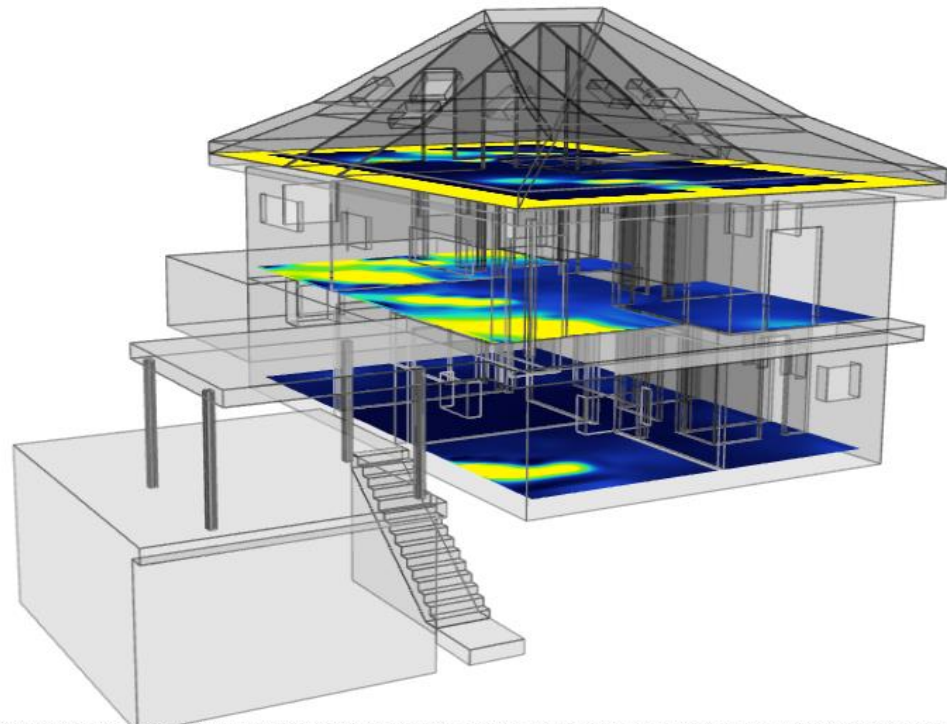


Abbildung 29: Sefaira-Annual\_Use\_energy\_Variante 2 Quelle: Sefaira WebApp

#### 4.6.4 Variante 3: Reduzierung der Fensterflächen auf Nord-, Ost- und Westseite

Durch die Reduzierung der Fensterflächen auf den weniger sonnenexponierten Fassaden wird die Tageslichtverfügbarkeit in den betroffenen Räumen deutlich vermindert, wie die Tageslichtanalyse (Abbildung 30) zeigt. Dies könnte den Einsatz von zusätzlicher künstlicher Beleuchtung notwendig machen.



Lux levels on March 1 at 9AM measured at 0.85 meters above the floor plate. Time does not take into account daylight savings time.



Abbildung 30: Sefaira-Daylighting-snapshot\_Variante 3 Quelle: Sefaira Plugin

Energetisch zeigt diese Massnahme (Abbildung 31) jedoch eine Reduktion des Heizenergiebedarfs in den Wintermonaten, da die Wärmeverluste reduziert werden. Diese Variante bietet eine deutliche Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz, indem sie den Heizbedarf reduziert. Die Optimierung geschieht jedoch zulasten der Tageslichtverfügbarkeit.

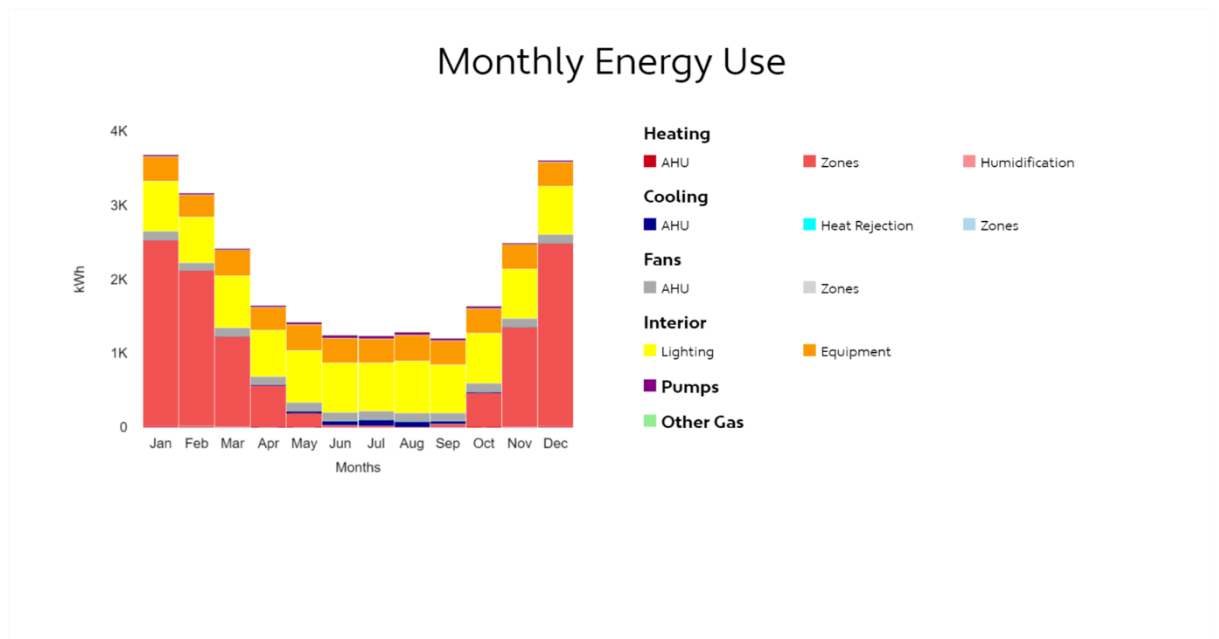


Abbildung 31: Sefaira-Monthly\_energy\_Variante 3 Quelle: Sefaira WebApp

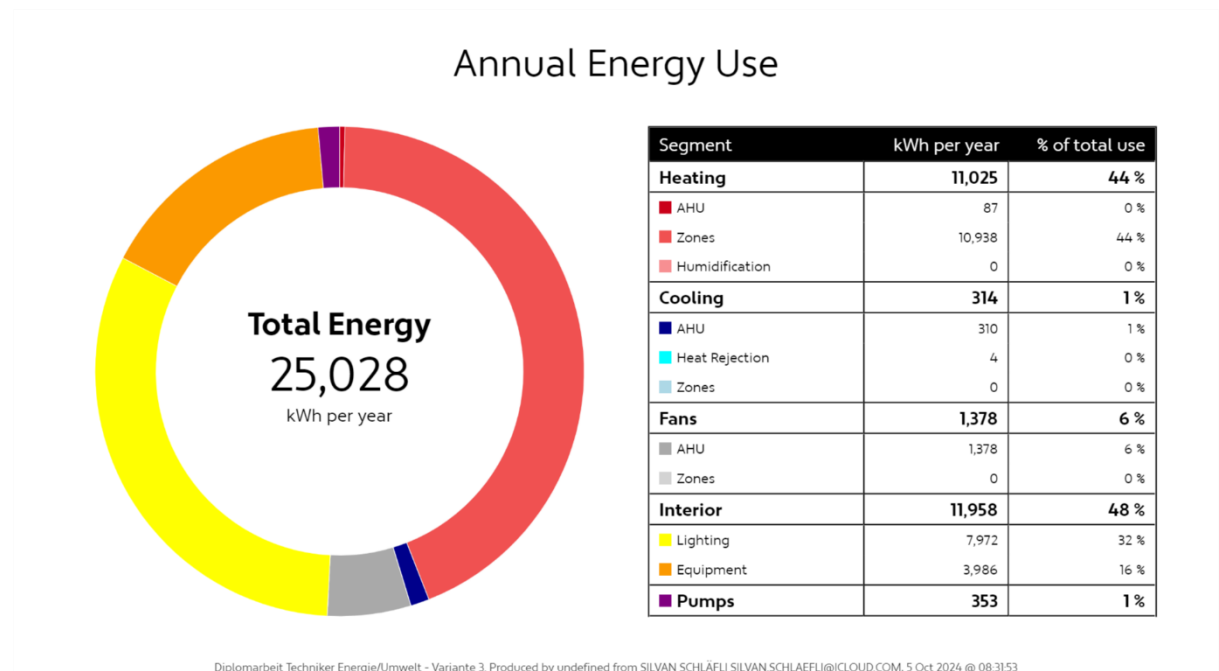


Abbildung 32: Sefaira-Annual\_Use\_energy\_Variante 3 Quelle: Sefaira WebApp

#### 4.6.5 Variante 4: Allgemeine Erhöhung der Glasflächen

Die allgemeine Erhöhung der Glasflächen führt zu einer besseren Tageslichtnutzung im gesamten Gebäude, wie die Tageslichtanalyse (Abbildung 33) zeigt. Besonders die oberen Geschosse profitieren von einer hohen Tageslichtverfügbarkeit, während die unteren Stockwerke ebenfalls besser versorgt werden. Allerdings besteht das Risiko von Überhitzung in den Sommermonaten, falls keine ausreichenden Verschattungsmassnahmen vorgesehen sind.

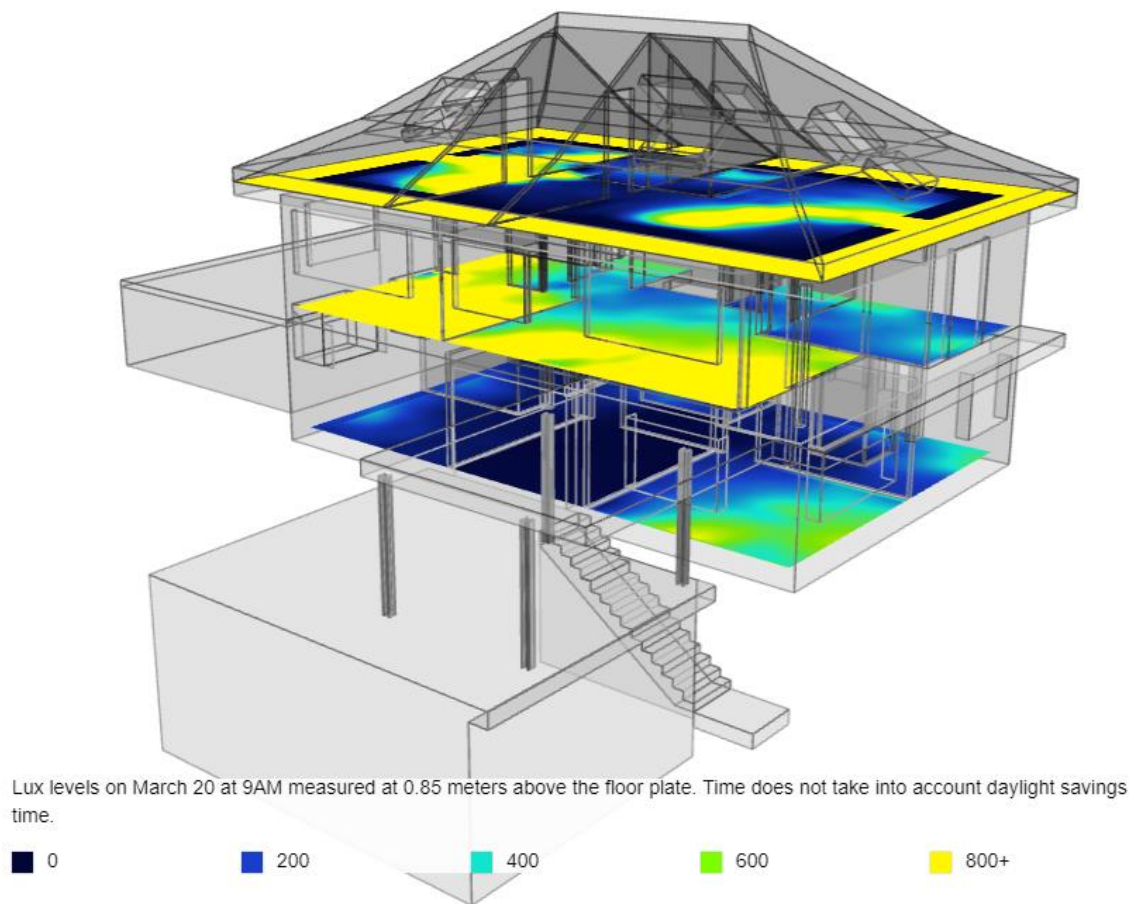


Abbildung 33: Sefaira-Daylighting-snapshot\_Variante 4 Quelle: Sefaira Plugin

Der monatliche Energiebedarf (Abbildung 34) zeigt sowohl in den Winter - wie auch in den Sommermonaten höhere Heiz- und Kühlbedarfe. Der erhöhte solare Eintrag führt zu Wärme-gewinnen im Winter, aber auch zu einem Anstieg des Kühlbedarfs im Sommer.

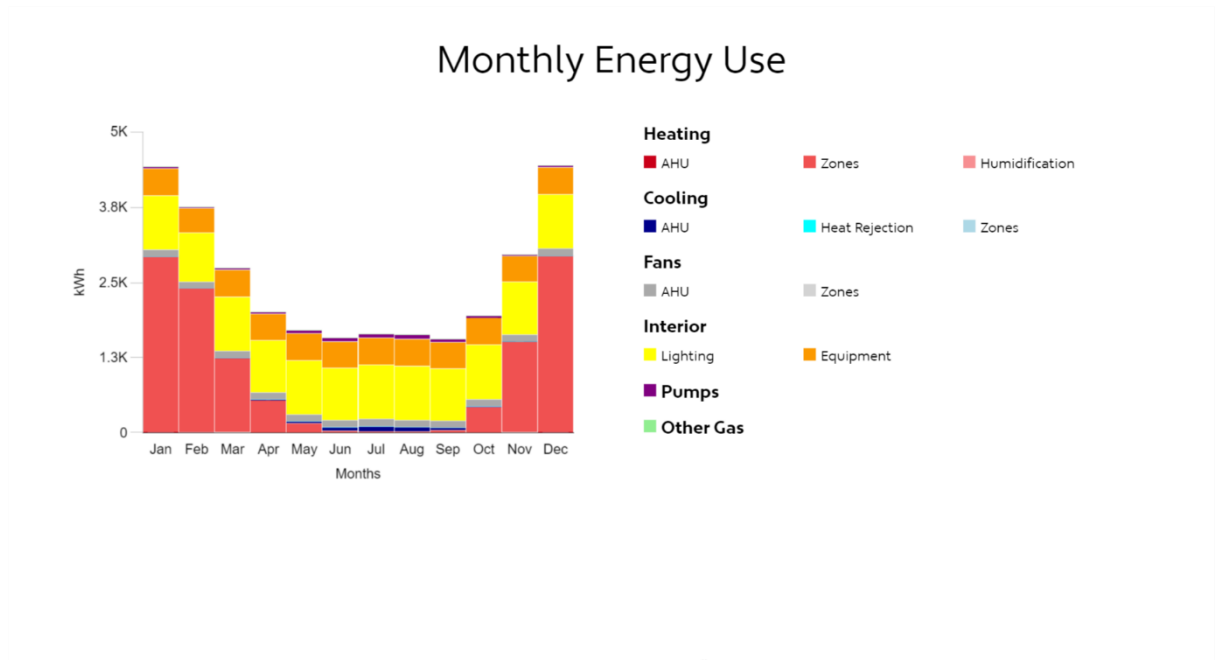


Abbildung 34: Sefaira-Monthly\_energy\_Variante 4 Quelle: Sefaira WebApp

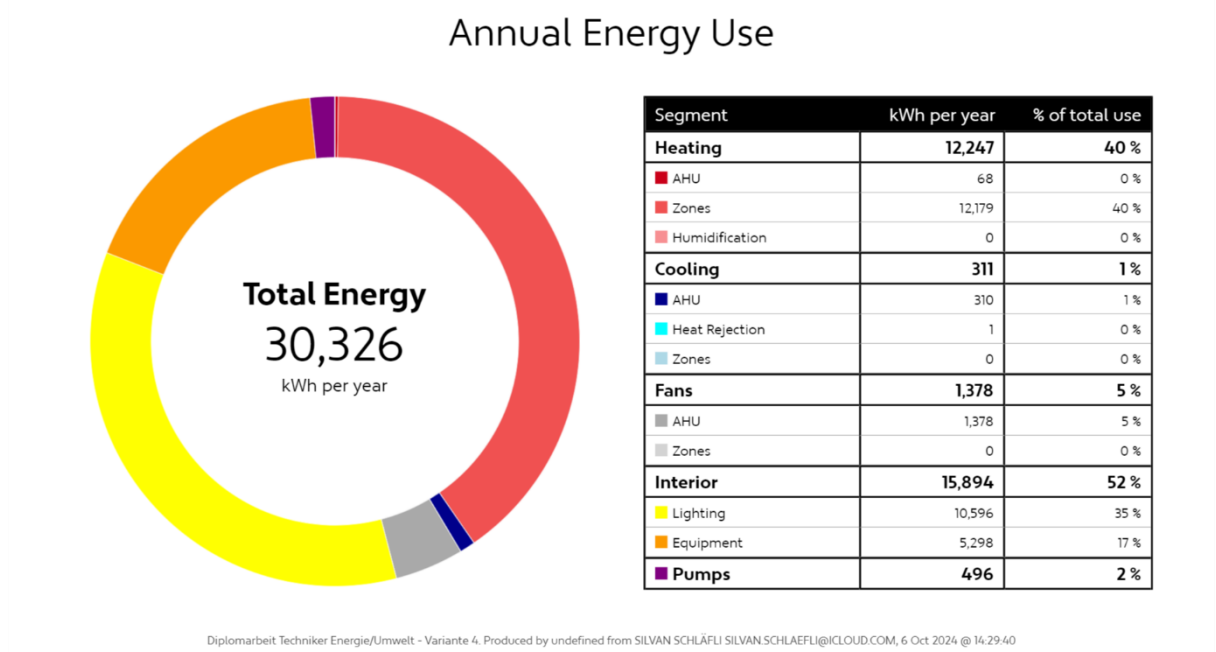
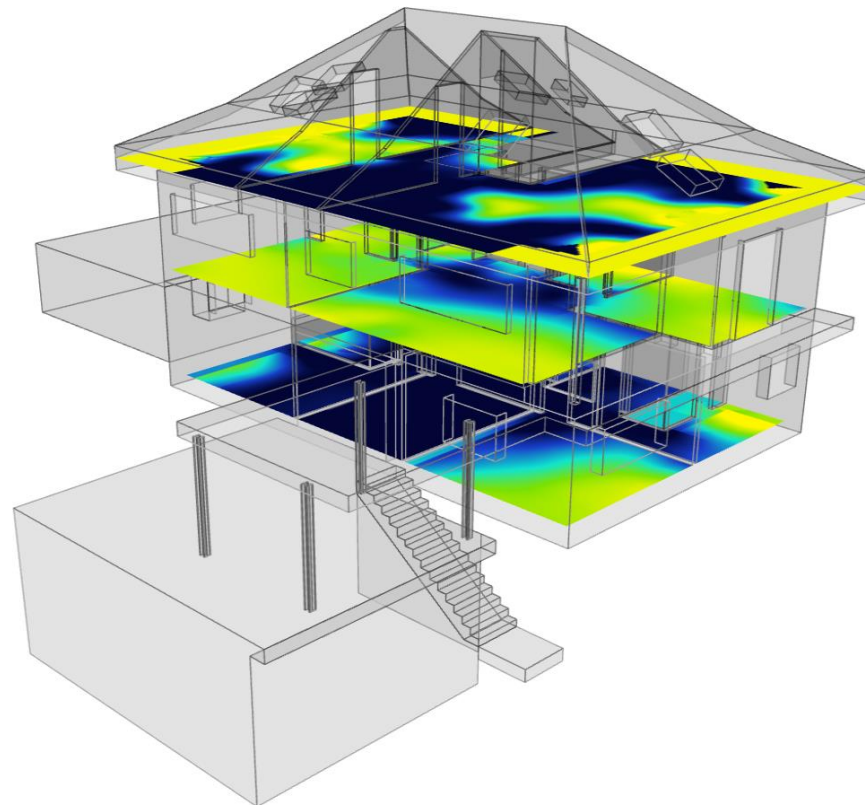


Abbildung 35: Sefaira-Annual\_Use\_energy\_Variante 4 Quelle: Sefaira WebApp

#### 4.6.6 Variante 5: Verwendung von energieeffizienten Verglasungen

Die Verwendung energieeffizienter Verglasungen zeigt in der Tageslichtanalyse (Abbildung 36) keine Veränderungen gegenüber dem Ist-Zustand, da die Fensterflächen in dieser Variante nicht verändert wurden. Die Tageslichtverteilung bleibt somit nahezu identisch.



Percentage of occupied hours where illuminance is at least 300 lux, measured at 0.85 meters above the floor plate.



Abbildung 36: Sefaira-Daylighting-snapshot\_Variante 5 Quelle: Sefaira Plugin

Energetisch zeigt sich jedoch eine deutliche Verbesserung (Abbildung 37). Der Heizbedarf in den Wintermonaten sinkt, ohne dass der Kühlbedarf im Sommer nennenswert ansteigt. Diese Variante bestätigt die Vorteile moderner Verglasungstechnologien, die sowohl die thermische Effizienz als auch die Tageslichtnutzung optimieren können (Gustavsen et al., 2011).

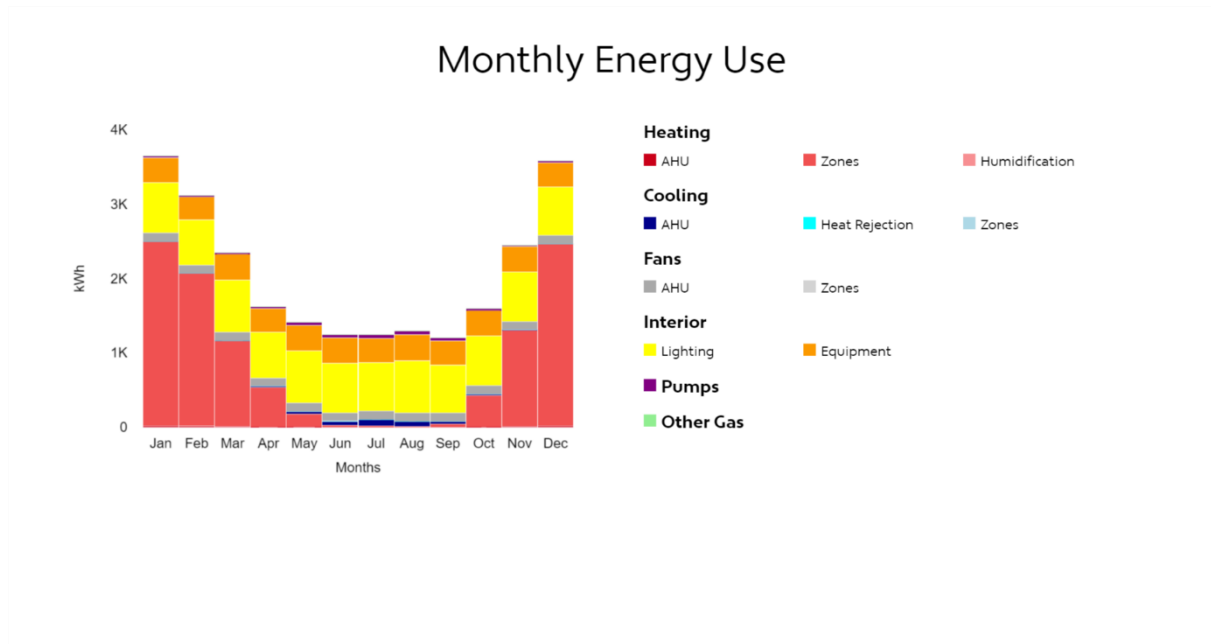


Abbildung 37: Sefaira-Monthly\_energy\_Variante 5 Quelle: Sefaira WebApp

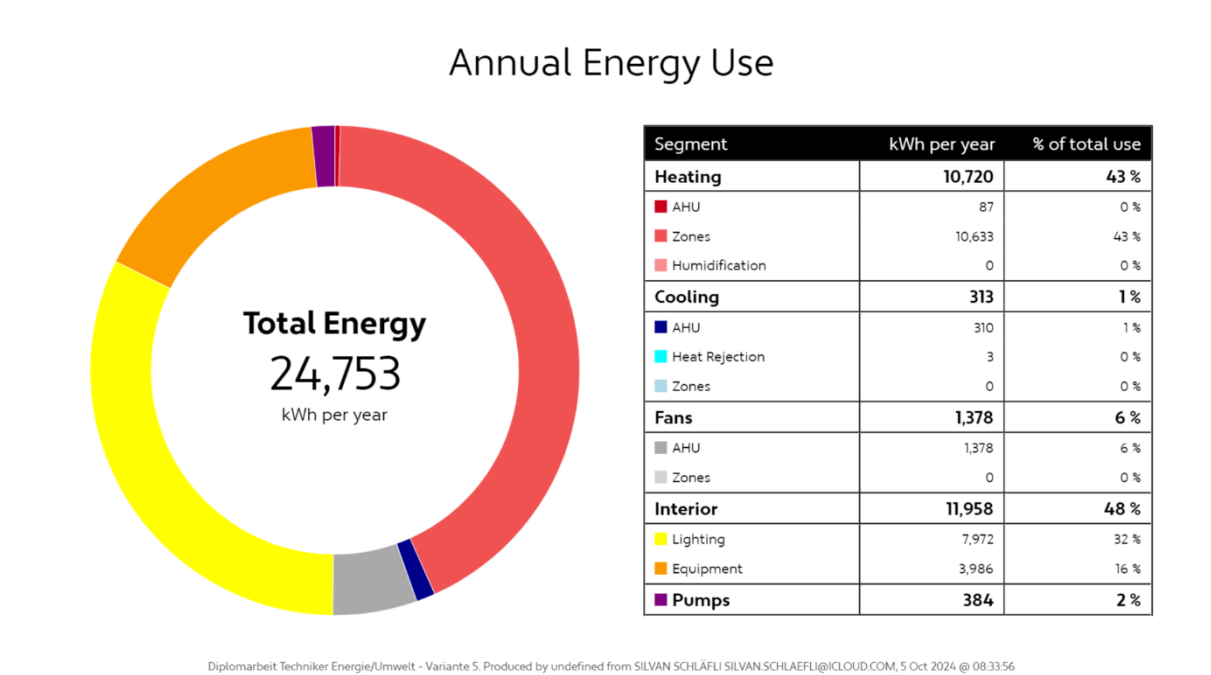


Abbildung 38: Sefaira-Annual\_Use\_energy\_Variante 5 Quelle: Sefaira WebApp

#### 4.6.7 Variante 6: Erhöhung der Dachverschattung

Die Erhöhung der Dachverschattung hat eine deutliche Reduktion der Tageslichtverfügbarkeit in den oberen Stockwerken zur Folge, wie Abbildung 39 zeigt. Dies betrifft insbesondere das Erdgeschoss, das in dieser Variante weniger direktes Sonnenlicht erhält.

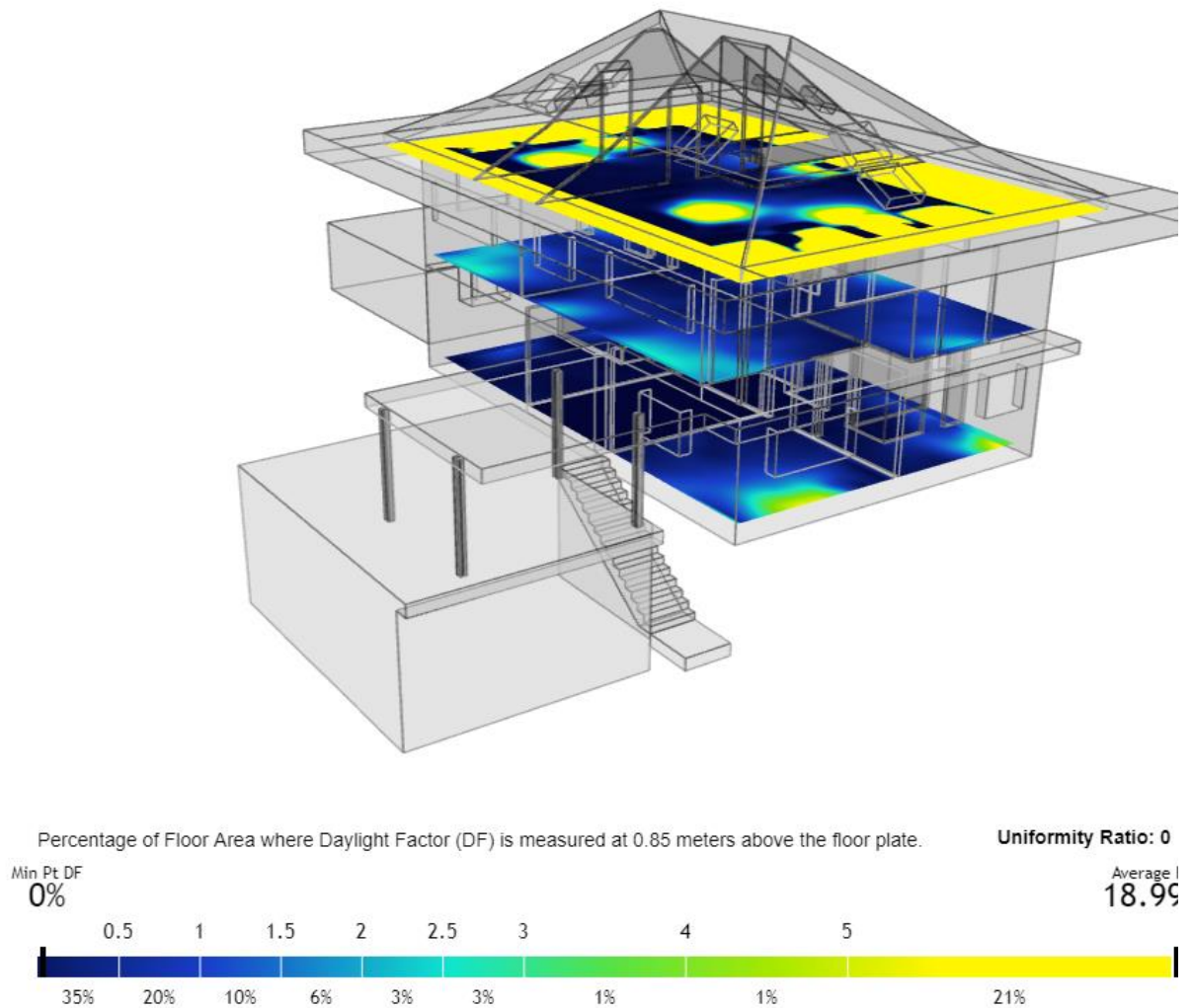


Abbildung 39: Sefaira-Daylighting-snapshot\_Variante 6 Quelle: Sefaira Plugin

Der monatliche Energiebedarf (Abbildung 40) zeigt eine Reduktion des Kühlbedarfs in den Sommermonaten, da die Sonneneinstrahlung durch die zusätzliche Verschattung reduziert wird. Gleichzeitig steigt der Heizbedarf im Winter leicht an. Insgesamt bietet diese Massnahme eine ausgewogene Energiebilanz, da sie die sommerliche Überhitzung verhindert und auch den Energiebedarf im Sommer senkt. Diese Anpassung ist im Kontext steigender sommerlicher Temperaturen sinnvoll (Kolokotsa & Santamouris, 2013).

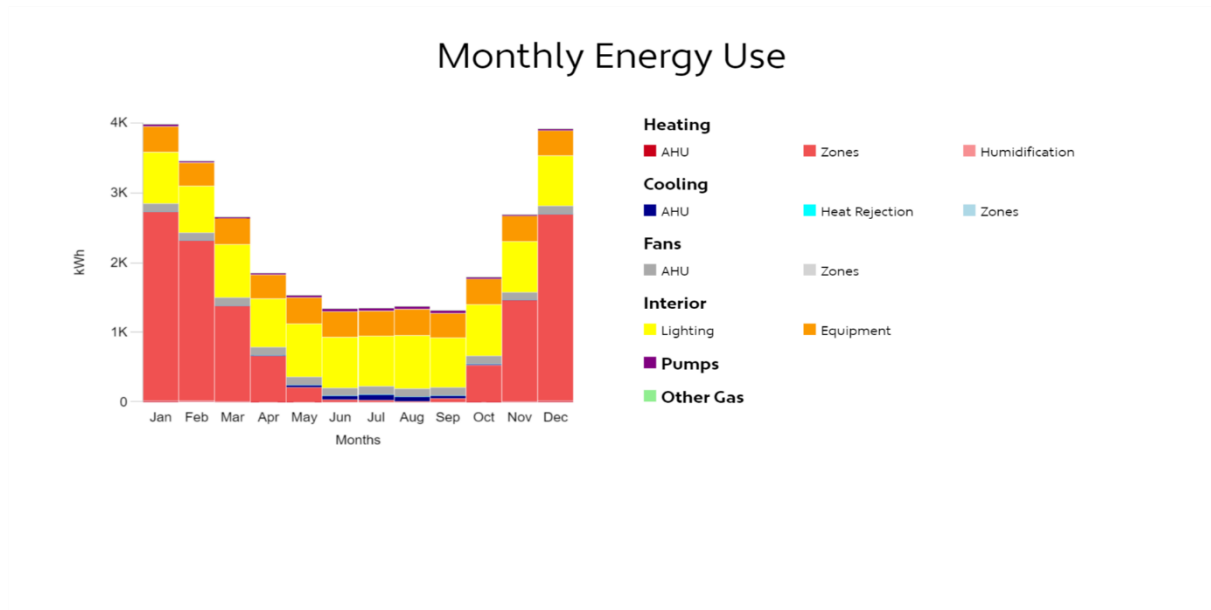


Abbildung 40: Sefaira-Monthly\_energy\_Variante 6 Quelle: Sefaira WebApp

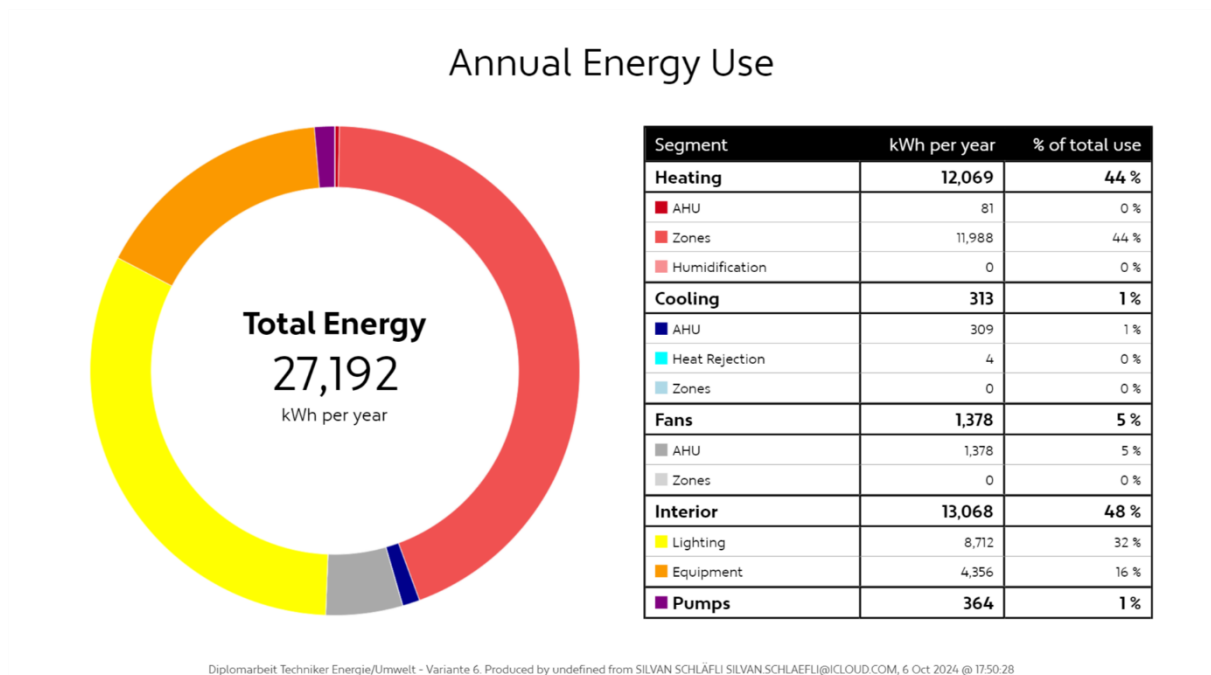


Abbildung 41: Sefaira-Annual\_Use\_energy\_Variante 6 Quelle: Sefaira WebApp

## 4.7 Klimadatenanalyse mit Meteonorm

Die Analyse der Klimadaten ist ein entscheidender Schritt für die energetische Simulation und die klimaangepasste Gebäudeplanung. Sie liefert grundlegende Informationen über die standortspezifischen klimatischen Bedingungen, die direkten Einfluss auf den Energiebedarf, den thermischen Komfort und die Planung von Bauelementen wie Fenster und Verschattungssysteme haben.

Für die vorliegende Untersuchung wurden die Klimadaten des Standorts Spiez mithilfe der Software Meteororm generiert und analysiert. Die Daten umfassen sowohl historische Klimadaten des Jahres 2005 als auch zukünftige Klimaprojektionen basierend auf den Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6, 4.5 und 8.5. Diese RCPs sind Szenarien, die vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entwickelt wurden, um mögliche Entwicklungen der Treibhausgaskonzentrationen zu modellieren (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014).

#### 4.7.1 Aktuelle Klimadaten für Spiez (Referenzjahr 2005)

Die Klimadaten des Jahres 2005 dienen als Referenz für die aktuellen klimatischen Bedingungen in Spiez. Sie umfassen wichtige Parameter wie Globalstrahlung, Lufttemperatur und Niederschlag.

##### 4.7.1.1 Globalstrahlung auf die Fassaden

Die Globalstrahlung bezeichnet die gesamte auf eine Fläche auftreffende solare Strahlung und setzt sich aus direkter und diffuser Strahlung zusammen. Für die energetische Bewertung eines Gebäudes ist die Strahlung auf die verschiedenen Fassadenorientierungen von grosser Bedeutung.

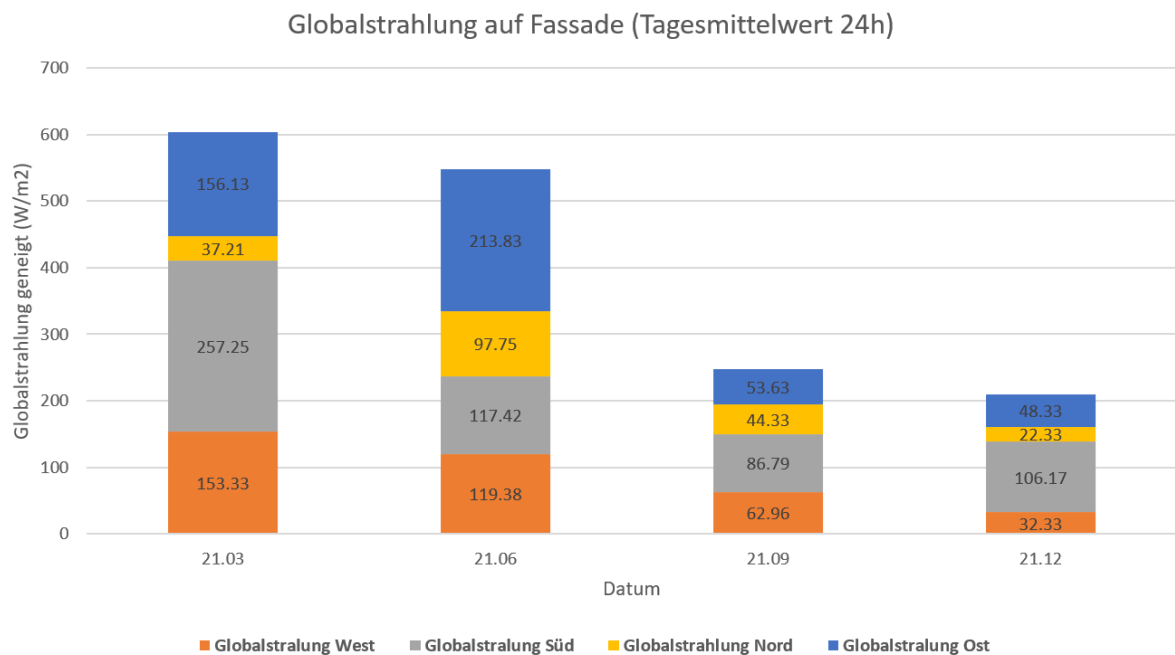


Abbildung 42: Mittlere tägliche Globalstrahlung auf die Fassaden in Spiez (Aktuell 2005)

Die Globalstrahlungswerte für die Fassaden (Nord, Ost, Süd und West) variieren je nach Jahreszeit. Die Abbildung 42 zeigt die mittleren täglichen Globalstrahlungswerte für ausgewählte Tage im Jahr 2005:

Diese Daten verdeutlichen, dass die Südseite insbesondere im Frühjahr und Winter die höchsten Einstrahlungswerte aufweist, während im Sommer die Ost- und Westfassaden grössere Strahlungsanteile verzeichnen. Diese Erkenntnisse sind entscheidend für die Planung von Verschattungssystemen, die im Sommer notwendig sind, um eine Überhitzung zu verhindern.

#### 4.7.1.2 Tägliche und monatliche Globalstrahlung sowie Diffusanteil

Die täglichen Werte der Globalstrahlung auf horizontaler Fläche ( $G_{GH}$ ), der diffusen horizontalen Strahlung ( $G_{DH}$ ) und der Diffusanteil geben Aufschluss über die Verteilung der solaren Einstrahlung über das Jahr.

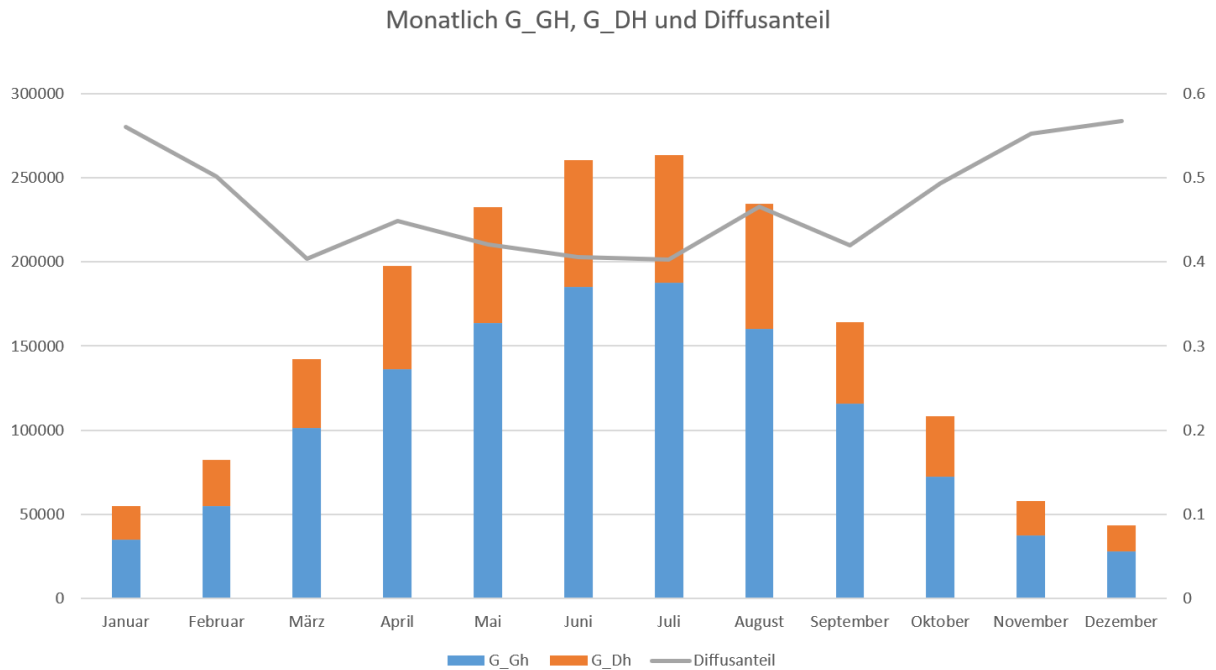


Abbildung 43: Globalstrahlung auf horizontaler Fläche ( $G_{GH}$ ), der diffusen horizontalen Strahlung ( $G_{DH}$ ) und der Diffusanteil (Aktuell 2005)

Abbildung 43 zeigt die monatlichen Summen der Globalstrahlung und den Diffusanteil. Diese Daten verdeutlichen saisonale Schwankungen, wobei die höchsten Einstrahlungswerte im Juni und Juli erreicht werden, was für die Auslegung von Verschattungssystemen und die Nutzung von Solarenergie relevant ist. Der Diffusanteil ist im Winter höher, was auf häufigere Bewölkung zurückzuführen ist.

#### 4.7.1.3 Temperaturverlauf

Die Lufttemperatur hat einen direkten Einfluss auf den Heiz- und Kühlbedarf eines Gebäudes. Der Temperaturverlauf zeigt deutliche saisonale Schwankungen, wie in Abbildung 44 zu sehen ist. Die durchschnittlichen Temperaturen im Winter liegen um den Gefrierpunkt, während sie im Sommer Spitzen von über 25 °C erreichen können. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines effizienten Wärmeschutzes im Winter sowie von Kühlstrategien im Sommer.

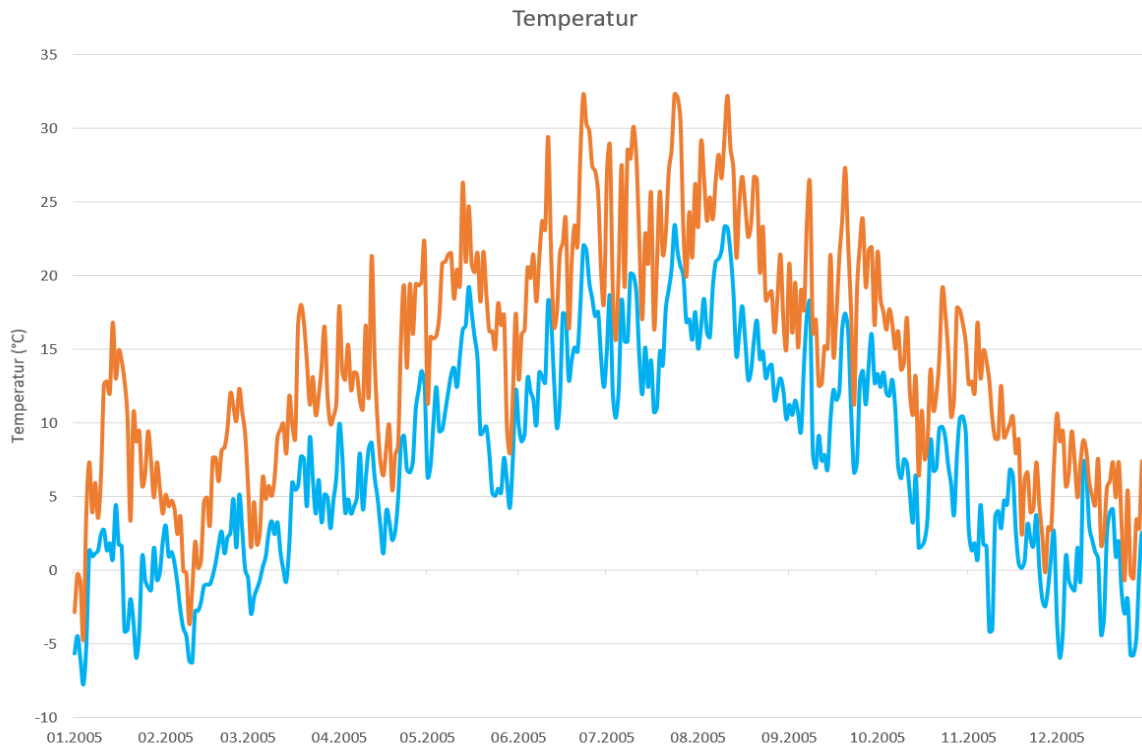


Abbildung 44: Temperaturverlauf über ein Jahr (Aktuell 2005)

#### 4.7.1.4 Niederschlag

Die Niederschlagsmengen und die Anzahl Niederschlagstage beeinflussen die Feuchtebelastung eines Gebäudes und müssen bei der Planung der Gebäudehülle berücksichtigt werden. Die monatlichen Niederschlagsmengen sind gleichmässig über das Jahr verteilt, mit leicht höheren Werten in den Sommermonaten.

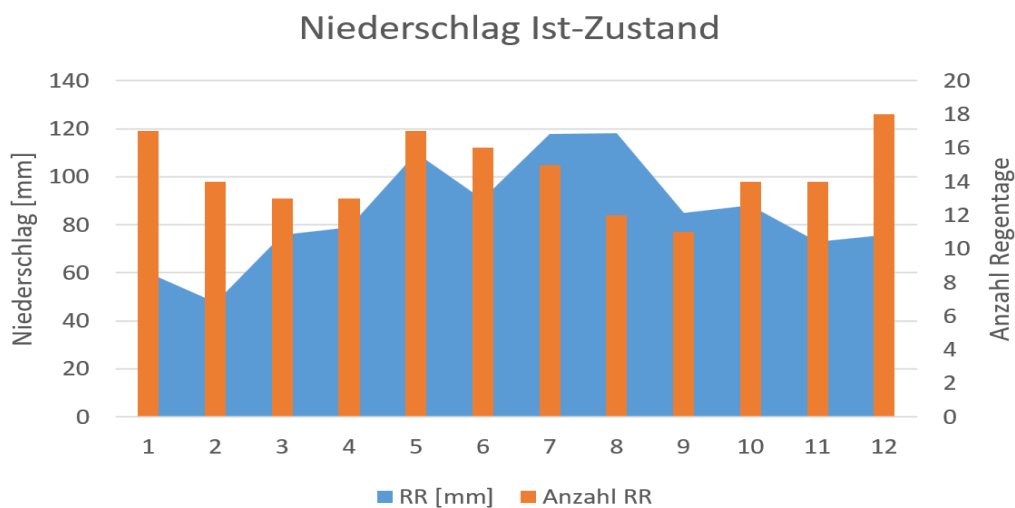


Abbildung 45: Niederschlagsmenge und Regentage (Aktuell 2005)

#### 4.7.2 Klimaprojektionen unter verschiedenen RCP-Szenarien im Jahr 2100

Zur Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels wurden Klimaprojektionen für verschiedene Szenarien (RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5) bis zum Jahr 2100 erstellt. Diese

Szenarien modellieren unterschiedliche Entwicklungen der Treibhausgaskonzentrationen und deren Einfluss auf das Klima (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014).

#### 4.7.2.1 RCP 2.6

Dieses Szenario geht von einer starken Reduktion der Treibhausgasemissionen aus und zielt darauf ab, die globale Erwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen. Die Temperaturanstiege sind moderat, wie in Abbildung 46 zu sehen ist. Die durchschnittlichen Sommertemperaturen steigen leicht an, was zu einem geringfügig erhöhten Kühlbedarf führen kann. Die Globalstrahlungswerte bleiben weitgehend unverändert.

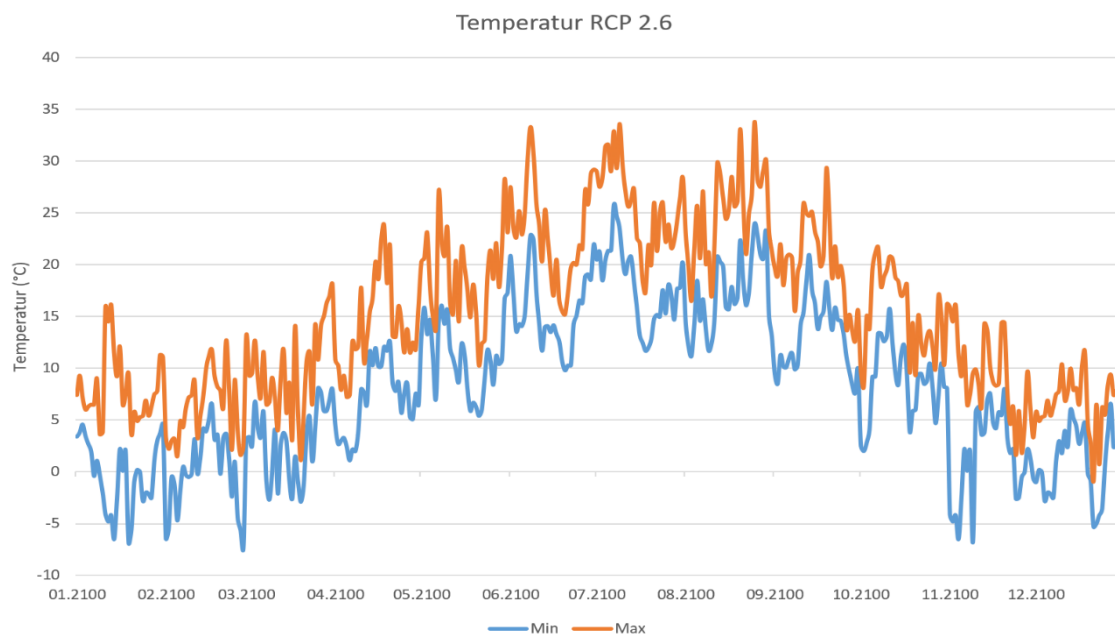


Abbildung 46: Temperaturverlauf über ein Jahr (RCP 2.6 2100)

Unter diesem Szenario bleibt die Globalstrahlung stabil, mit leichten Schwankungen im Sommer. Die monatlichen Globalstrahlungswerte sind am höchsten im Juli und August, mit Spitzenwerten von etwa 220 kWh/m<sup>2</sup>. Im Winter sinken die Werte, wobei der Anteil der diffusen Strahlung in den kalten Monaten ansteigt, was auf häufigere Bewölkung hinweist (Meteotest, 2020).

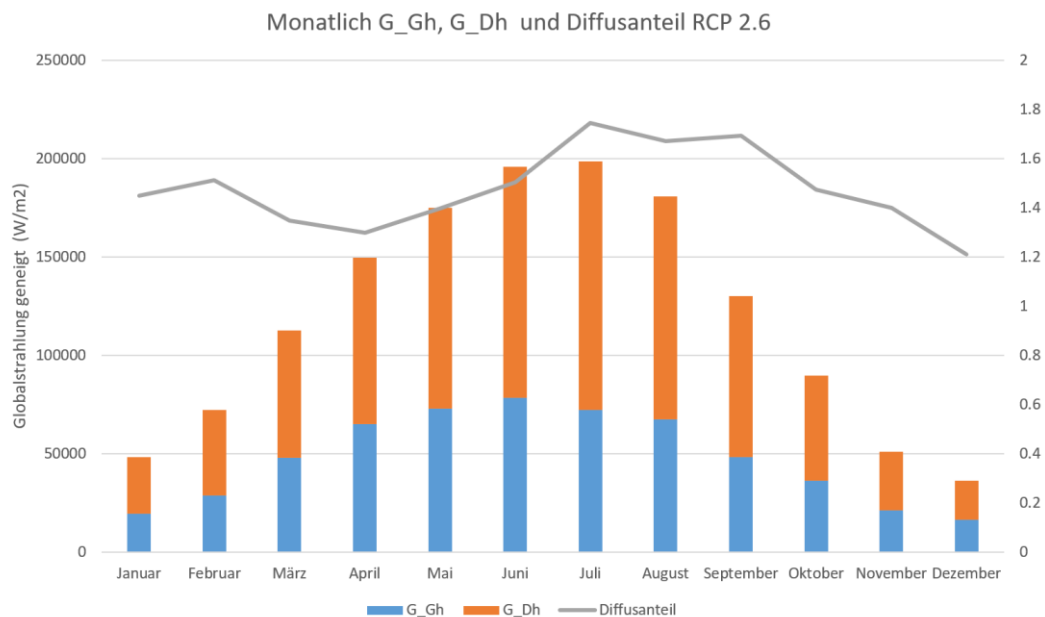


Abbildung 47: Globalstrahlung auf horizontaler Fläche (G\_Gh), der diffusen horizontalen Strahlung (G\_Dh) und der Diffusanteil (RCP 2.6 2100)

Dieses Szenario zeigt insgesamt eine konstante Verteilung der Niederschlagsmengen im Jahresverlauf. Die monatliche Niederschlagsmenge liegt im Durchschnitt bei etwa 80mm, mit Spitzenwerten im Mai und Juni. Die Anzahl der Regentage variiert zwischen 12 und 18 Tagen pro Monat. Die Niederschlagsmengen bleiben gegenüber dem Ist-Zustand nahezu unverändert, was auf eine stabile klimatische Situation hinweist.

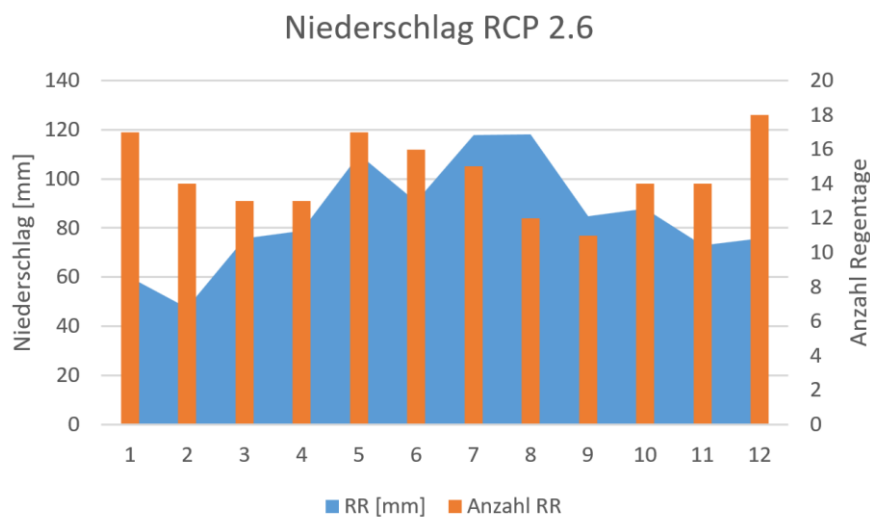


Abbildung 48: Niederschlagsmenge und Regentage (RCP 2.6 2100)

#### 4.7.2.2 RCP 4.5

Das mittlere Szenario zeigt einen deutlicheren Anstieg der Temperaturen bis zum Jahr 2100, insbesondere in den Sommermonaten (siehe Abbildung 49). Die durchschnittlichen Temperaturen können um 2 bis 3 °C steigen, was zu einem erhöhten Kühlbedarf führt, und die Heizperioden verkürzt.

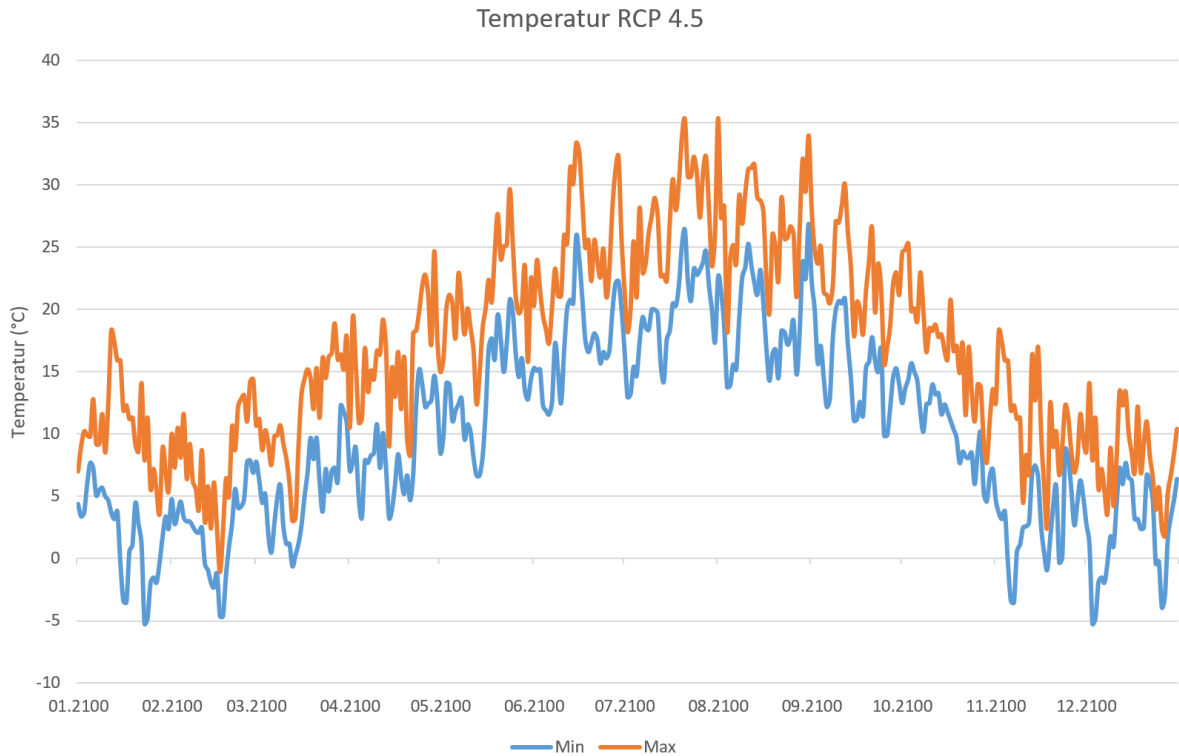


Abbildung 49: Temperaturverlauf über ein Jahr (RCP 4.5 2100)

Hier zeigen die Daten eine leichte Zunahme der Globalstrahlung in den Sommermonaten, mit einem Maximum im Juni und Juli von etwa 240 kWh/m<sup>2</sup>. Der Anteil der diffusen Strahlung bleibt stabil, allerdings kann in den Sommermonaten eine erhöhte direkte Strahlung zu einer Überhitzungsgefahr führen, was eine verstärkte Verschattung erfordert (Kuhn, 2017).

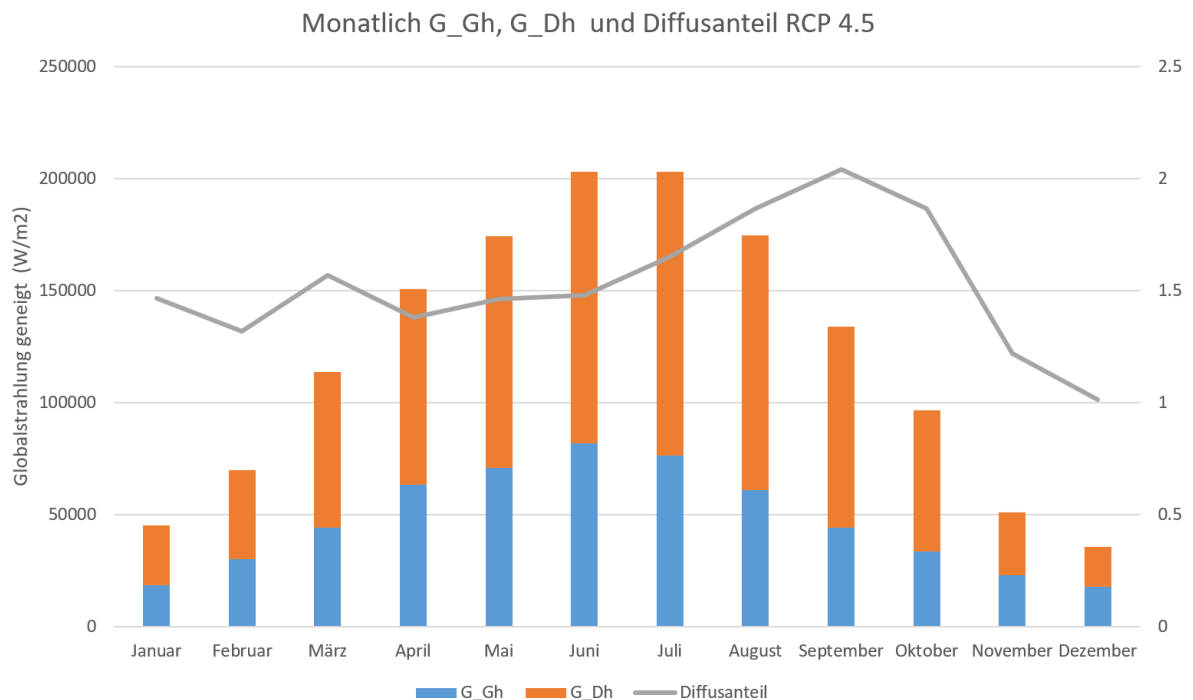


Abbildung 50: Globalstrahlung auf horizontaler Fläche (G\_Gh), der diffusen horizontalen Strahlung (G\_Dh) und der Diffusanteil (RCP 4.5 2100)

Gestützt auf dieses Szenario kommt es zu einer Zunahme der Niederschläge in den Sommermonaten, insbesondere im Juni, mit Regenmengen von bis zu 110 mm. Die Anzahl der Regentage bleibt ähnlich wie bei RCP 2.6, allerdings weist der Juli eine leicht erhöhte Anzahl von Niederschlagstagen auf. Im Vergleich zum Ist-Zustand sind die Änderungen moderat, aber spürbar, was auf eine Zunahme der Intensität der Regenfälle hindeutet.

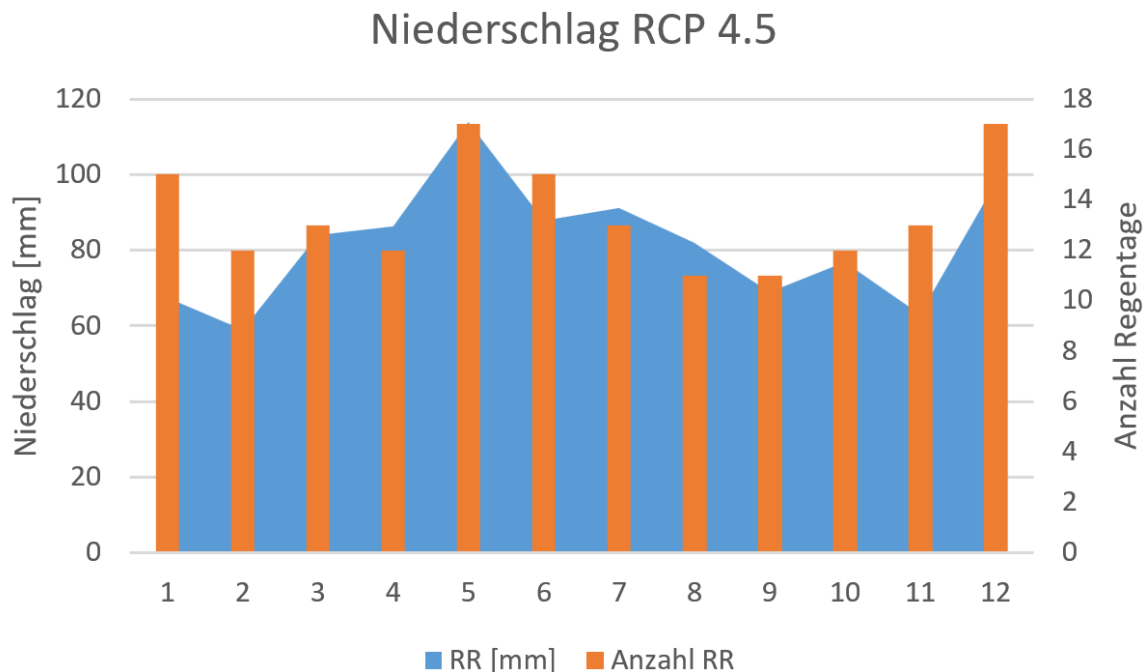


Abbildung 51: Niederschlagsmenge und Regentage (RCP 4.5 2100)

#### 4.7.2.3 RCP 8.5

In diesem Szenario, welches vom ungebremsten Ausstoss von Treibhausgasemissionen ausgeht, sind die Auswirkungen besonders prägend. Abbildung 52 zeigt einen drastischen Temperaturanstieg im Sommer von 5 °C oder mehr gegenüber dem Referenzjahr 2005. Dies würde zu erheblichen Herausforderungen für die Gebäudekühlung führen und umfassende Anpassungen notwendig machen.

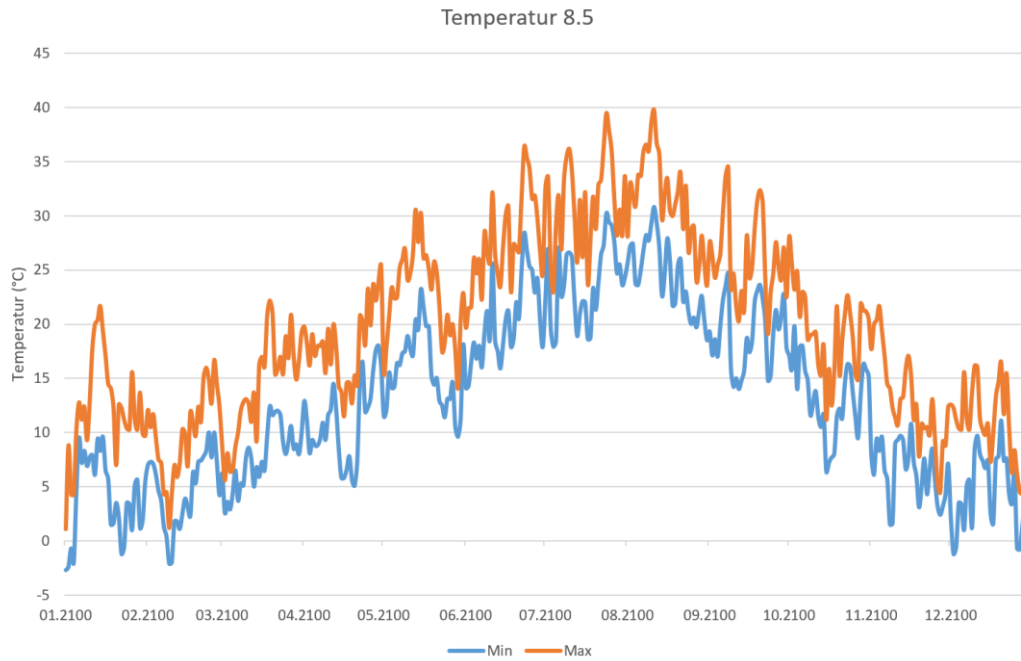


Abbildung 52: Temperaturverlauf über ein Jahr (RCP 8.5 2100)

Dieses Szenario zeigt die deutlichste Zunahme der Globalstrahlung. In den Sommermonaten sind Spitzenwerte von über 250 kWh/m<sup>2</sup> zu verzeichnen. Dies bedeutet eine höhere Wärmebelastung für Gebäude im Sommer, was eine wesentliche Herausforderung für die Gebäudekühlung darstellt (Voss & Musall, 2012). Der Anteil der diffusen Strahlung sinkt in den Sommermonaten, was auf eine zunehmende direkte Sonneneinstrahlung hindeutet.

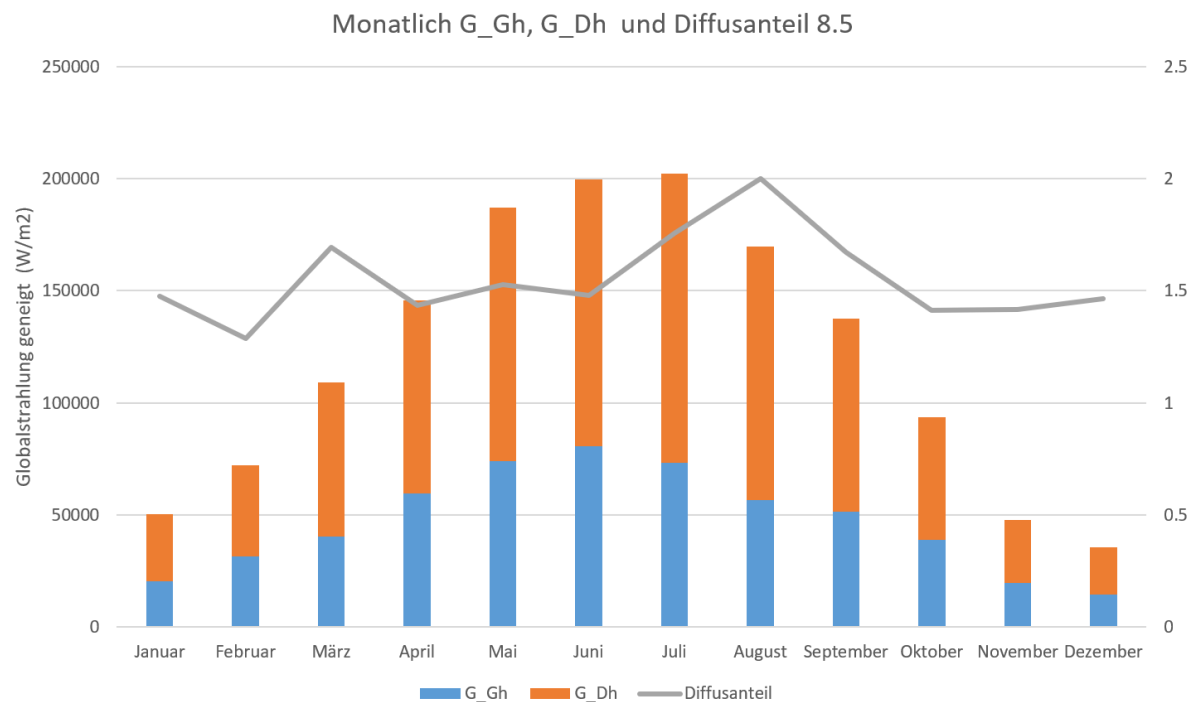


Abbildung 53: Globalstrahlung auf horizontaler Fläche (G\_Gh), der diffusen horizontalen Strahlung (G\_Dh) und der Diffusanteil (RCP 8.5 2100)

Im extremen Szenario steigt die Niederschlagsintensität im Frühsommer und Herbst deutlich an. Besonders im Juni sind Niederschlagsmengen von über 120 mm zu verzeichnen, was auf eine Zunahme extremer Wetterereignisse wie Starkregen hindeutet (Bundesamt für Umwelt, 2017). Die Anzahl der Regentage bleibt konstant, jedoch sind die Regenereignisse im Sommer intensiver.

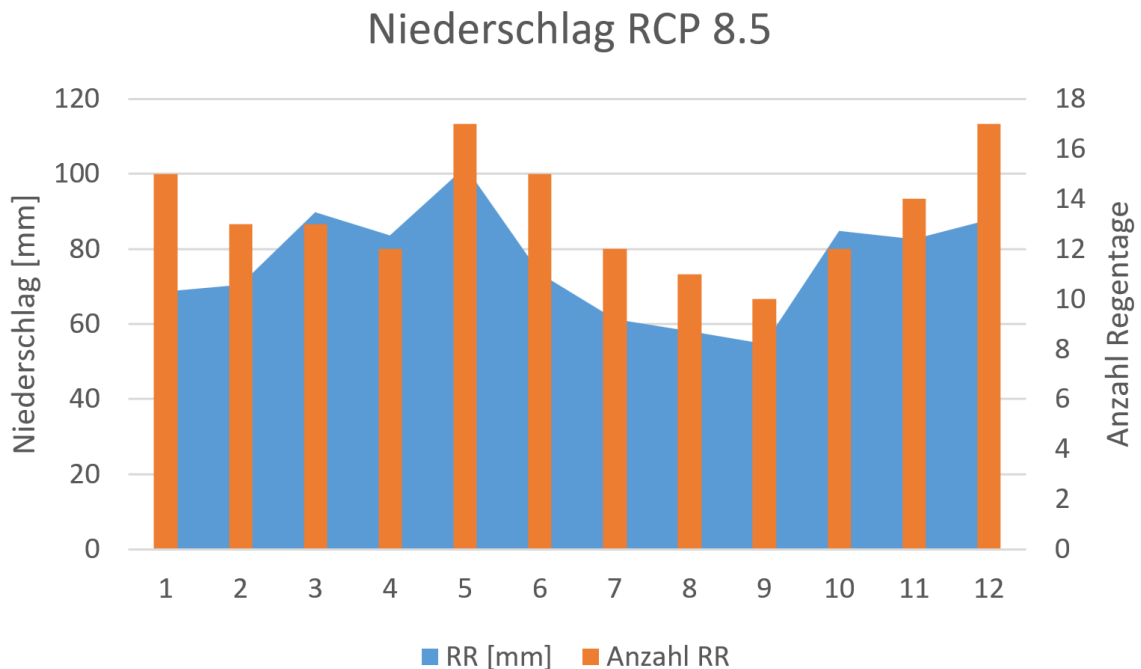


Abbildung 54: Niederschlagsmenge und Regentage (RCP 8.5 2100)

## 4.8 Datenzusammenführung und Vergleich

Die Klimadaten von Meteonorm, insbesondere Sonnenscheindauer, Lufttemperaturen und Niederschläge sind essenzielle Parameter, die direkt in die Berechnungen des Energieverbrauchs eines Gebäudes eingehen (Remund et al., 2015). Um eine aussagekräftige und valide Analyse durchzuführen, wurde eine detaillierte Korrelation der klimatischen Einflüsse mit den Energieverbrauchsdaten aus der Sefaira-Simulation durchgeführt. Dies ermöglicht eine tiefere Einsicht in die saisonalen Schwankungen des Energieverbrauchs sowie eine verbesserte Vorhersage der Auswirkungen zukünftiger klimatischer Veränderungen (Zimmermann, 2017).

### 4.8.1 Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch

Die drei primären klimatischen Faktoren, die den Energieverbrauch des Gebäudes beeinflussen, sind:

- **Lufttemperatur ( $T_a$ ):** Sie bestimmt direkt den Heiz- und Kühlbedarf des Gebäudes. Bei niedrigen Temperaturen wird vermehrt Energie für das Heizen benötigt, während hohe Temperaturen den Kühlbedarf ansteigen lassen (DIN EN ISO 52016-1, 2018).
- **Sonnenscheindauer:** Sie beeinflusst die solaren Gewinne des Gebäudes, die sowohl den Heiz- als auch den Kühlbedarf beeinflussen. Eine längere Sonnenscheindauer im Winter reduziert den Heizbedarf durch passive Solarenergiegewinne, während

im Sommer hohe solare Einstrahlungen den Kühlbedarf erhöhen können (Hastings, 2015).

- Niederschlagsmenge (RR): Niederschläge haben in erster Linie einen indirekten Einfluss auf den Energieverbrauch, vor allem durch den Zusammenhang mit der Luftfeuchtigkeit, die wiederum das thermische Komfortempfinden beeinflusst (DIN 4108-3, 2018).

#### 4.8.2 Datenaufbereitung und Normalisierung

Es gibt viele verschiedene Faktoren, welche das Wetter beeinflussen, und diese werden auf unterschiedliche Weise gemessen. Damit diese Faktoren besser verglichen werden können, wurden alle Zahlen so angepasst, dass sie zwischen 0 und 1 liegen. So ist leichter ersichtlich, wie die einzelnen Elemente zusammenhängen. Das hilft zu verstehen, welche Punkte wichtig sind sowie wie sie sich gegenseitig beeinflussen.

#### 4.8.3 Gewichtung der Einflussfaktoren

Um den kombinierten Einfluss der klimatischen Faktoren auf den Energieverbrauch zu ermitteln, wurden die normalisierten Werte gewichtet. Folgende Gewichtung wurde auf Basis der Relevanz für den Energieverbrauch gewählt:

- Lufttemperatur: 60 % – Sie hat den grössten Einfluss auf den Energieverbrauch, da die Temperatur sowohl den Heiz- als auch den Kühlbedarf direkt bestimmt (DIN EN ISO 52016-1, 2018).
- Sonnenscheindauer: 30 % – Sie ist wesentlich für solare Gewinne und den Komfort im Gebäude (Hastings, 2015).
- Niederschlagsmenge: 10 % – Sie hat einen Einfluss durch Feuchtigkeit und Komfort, jedoch geringer im Vergleich zu den anderen Faktoren (DIN 4108-3, 2018).

Monat	Temp. norm	Sonnenschein norm	Niederschlag norm	Kombinierter Faktor	Energieverbrauch Aktuell (kWh)	Tatsächlicher Energieverbrauch Seifaira (kWh)
Januar	0.99528	0.95845	0.17730	0.90243	3647.12	3870
Februar	0.96919	0.74850	0	0.80606	3257.65	3309
März	0.71981	0.57244	0.4	0.64362	2601.15	2474
April	0.55768	0.39949	0.44539	0.49899	2016.66	1657
Mai	0.33096	0.29577	0.88510	0.37582	1518.85	1426
Juni	0.08467	0.13117	0.61134	0.15129	611.44	1248
Juli	0	0	0.99574	0.09957	402.42	1246
August	0.12134	0.10082	1	0.20305	820.62	1293
September	0.31773	0.29979	0.53049	0.33363	1348.34	1210
Oktober	0.58777	0.63336	0.57446	0.60012	2425.34	1659
November	0.86634	0.89825	0.35886	0.82516	3334.85	2588
Dezember	1	1	0.40141	0.94014	3799.50	3804

Tabelle 1: Aufarbeitung der Daten mit Energieverbrauch (Aktuell 2005)

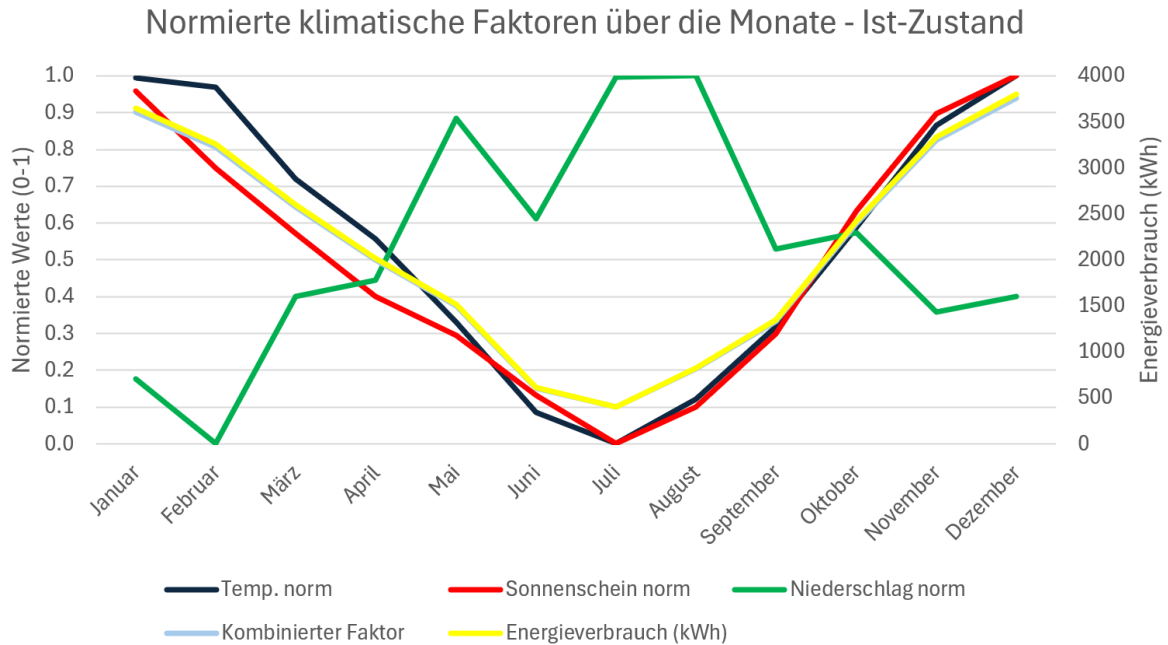


Abbildung 55: Normierte klimatische Faktoren über ein Jahr - Ist-Zustand

#### 4.8.4 Korrelation der Klimadaten mit dem Energieverbrauch

Nach der Normalisierung und Gewichtung der Daten wurde eine Korrelation der klimatischen Faktoren mit den monatlichen errechneten Energieverbrauchsdaten durchgeführt. Dies ermöglichte die Identifikation von möglichen Mustern und dem quantitativen Einfluss der Klimavariablen auf den Energieverbrauch. Anschliessend wurden die monatlichen Daten von Sefaira genutzt, um mögliche Abweichungen festzustellen.

- Wintermonate (Januar, Februar, Dezember): Es zeigt sich ein starker Zusammenhang zwischen niedrigen Temperaturen und hohem Heizenergieverbrauch. Die Sonnenscheindauer ist in diesen Monaten ebenfalls gering, was zu einem hohen Gesamtenergieverbrauch führt (Meteotest, 2005).
- Übergangsmonate (April und Oktober): Die Temperaturen beginnen zu steigen/fallen, was den Heizbedarf reduziert/ansteigen lässt. Gleichzeitig nimmt die Sonnenscheindauer zu/ab, wodurch die solaren Gewinne erhöht/gesenkt und der Gesamtenergieverbrauch gesenkt/erhöht wird (Zimmermann, 2017).

**Sommermonate (Juni, Juli, August):** Höhere Temperaturen führen zu einem Anstieg des Kühlbedarfs, während die längeren Sonnenstunden im Sommer solare Gewinne maximieren. Zudem ist der Energieverbrauch in den Sommermonaten im Vergleich zum Winter nochmals geringer, da die Kühlsysteme in diesem Szenario energieeffizienter sind (Gwerder et al., 2008).

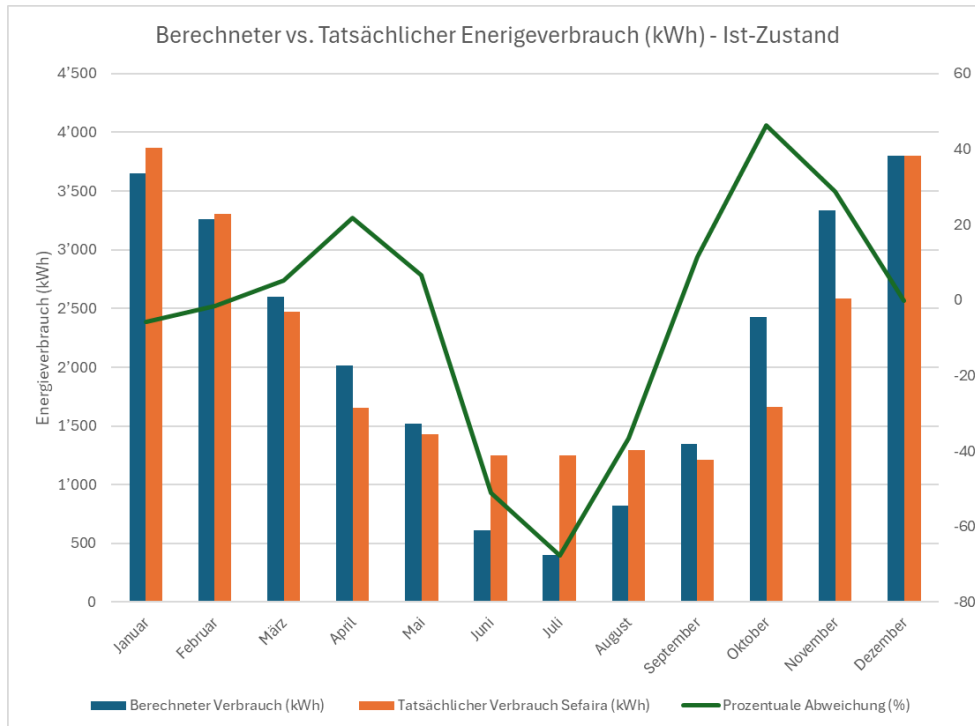


Abbildung 56: Berechneter vs. Tatsächlicher Energieverbrauch (Ist-Zustand - Aktuell)

#### 4.8.5 Auswirkungen der RCP-Szenarien auf den Energieverbrauch

Neben der Analyse der aktuellen Klimadaten wurden auch zukünftige Klimaszenarien (RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5) in die Analyse einbezogen, um mögliche Veränderungen des Energieverbrauchs in Abhängigkeit von klimatischen Veränderungen zu untersuchen.

##### 4.8.5.1 RCP 2.6

- **Heizbedarf:** Es wird eine Reduktion um ca. 6–9 % erwartet. Diese Schätzung basiert auf einem Temperaturanstieg von 1–1,5 °C, wobei pro Grad Celsius Temperaturanstieg eine Reduktion des Heizenergiebedarfs von etwa 6 % angenommen wird (Feist et al., 2015).

Berechnung:  $1\text{ °C} \times 6\% = 6\%$  bis  $1,5\text{ °C} \times 6\% = 9\%$

- **Kühlbedarf:** Geringfügige Zunahme, ist deshalb vernachlässigbar.
- **Gesamtenergieverbrauch:** Mögliche Reduktion um ca. 5 – 8 %, da der reduzierte Heizbedarf den leicht erhöhten Kühlbedarf überwiegt.

Monat	Temperatur Norm	Sonnenschein Norm	Niederschlag Norm	Kombinierter Faktor	Energieverbrauch RCP 2.6 (kWh)
Januar	1.0000	0.9487	0.3367	0.9183	3459.11
Februar	0.9949	0.7685	0.0000	0.8275	3117.03
März	0.8062	0.5857	0.4828	0.7077	2666.04
April	0.5957	0.4292	0.7497	0.5611	2113.78
Mai	0.3505	0.3359	0.9327	0.4044	1523.20
Juni	0.1270	0.1604	0.6760	0.1919	722.96
Juli	0.0000	0.0000	0.7992	0.0799	301.07
August	0.0409	0.1406	1.0000	0.1667	628.05
September	0.2840	0.3065	0.4790	0.3103	1168.82
Oktober	0.5214	0.6299	0.4587	0.5477	2063.14
November	0.8127	0.8918	0.2770	0.7828	2948.96
Dezember	0.9629	1.0000	0.5794	0.9357	3524.81

Tabelle 2: Aufarbeitung der Daten mit Energieverbrauch (RCP 2.6 2100)

#### 4.8.5.2 RCP 4.5

- **Heizbedarf:** Reduktion um ca. 12 – 18 % aufgrund eines Temperaturanstiegs von 2 – 3 °C.

Berechnung:  $2\text{ °C} \times 6\% = 12\%$  bis  $3\text{ °C} \times 6\% = 18\%$

- **Kühlbedarf:** Moderater Anstieg, könnte bis zu 5 % des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen (Gwerder et al., 2008).
- **Gesamtenergieverbrauch:** Mögliche Reduktion um ca. 10 – 15 %, da die Einsparungen beim Heizbedarf die Zunahme beim Kühlbedarf übersteigen.

Monat	Temperatur Norm	Sonnenschein Norm	Niederschlag Norm	Kombinierter Faktor	Energieverbrauch RCP 4.5 (kWh)
Januar	1.0000	0.9518	0.1548	0.9010	3308.88
Februar	0.9745	0.7734	0.0000	0.8167	2999.24
März	0.7774	0.6035	0.4572	0.6932	2545.82
April	0.5776	0.4300	0.4973	0.5253	1928.95
Mai	0.3285	0.3425	1.0000	0.3999	1468.39
Juni	0.1101	0.1897	0.5282	0.1758	645.51
Juli	0.0000	0.0000	0.5883	0.0588	216.06
August	0.0067	0.1597	0.4208	0.0940	345.32
September	0.2286	0.3020	0.1840	0.2462	904.01
Oktober	0.5101	0.6349	0.3279	0.5293	1943.89
November	0.8080	0.9083	0.0765	0.7649	2809.13
Dezember	0.9461	1.0000	0.7067	0.9383	3445.79

Tabelle 3: Aufarbeitung der Daten mit Energieverbrauch (RCP 4.5 2100)

#### 4.8.5.3 RCP 8.5

- **Heizbedarf:** Reduktion um ca. 24 – 30 % infolge eines Temperaturanstiegs von 4 – 5 °C.

Berechnung:  $4\text{ °C} \times 6\% = 24\%$  bis  $5\text{ °C} \times 6\% = 30\%$

- **Kühlbedarf:** Deutlicher Anstieg, könnte bis zu 10 – 15 % des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen (Voss & Musall, 2012).
- **Gesamtenergieverbrauch:** Mögliche Reduktion um ca. 15 – 20 %, wobei die erheblichen Einsparungen beim Heizbedarf durch den stark erhöhten Kühlbedarf teilweise kompensiert werden.

Monat	Temperatur Norm	Sonnenschein Norm	Niederschlag Norm	Kombinierter Faktor	Energieverbrauch RCP 8.5 (kWh)
Januar	1.0000	0.9655	0.2936	0.9190	3059.03
Februar	0.9858	0.7775	0.3340	0.8582	2856.46
März	0.8093	0.5957	0.7468	0.7390	2459.80
April	0.6341	0.4185	0.6149	0.5675	1888.99
Mai	0.4078	0.3257	1.0000	0.4424	1472.60
Juni	0.1857	0.1308	0.3957	0.1902	633.08
Juli	0.0130	0.0000	0.1404	0.0219	72.77
August	0.0000	0.1178	0.0723	0.0426	141.68
September	0.2597	0.3182	0.0000	0.2513	836.39
Oktober	0.5558	0.6286	0.6383	0.5859	1950.23
November	0.8318	0.9137	0.5915	0.8323	2770.53
Dezember	0.9503	1.0000	0.7021	0.9404	3130.25

Tabelle 4: Aufarbeitung der Daten mit Energieverbrauch (RCP 8.5 2100)

#### 4.8.6 Schlussfolgerung

Die Analyse der Energieverbräuche unter den verschiedenen RCP-Szenarien verdeutlicht die Notwendigkeit, die Gebäudeplanung an zukünftige klimatische Bedingungen anzupassen.

Insbesondere die Reduktion des Heizbedarfs in den Wintermonaten bietet erhebliche Potenziale zur Senkung des Gesamtenergieverbrauchs (Feist et al., 2015). Gleichzeitig stellt der steigende Kühlbedarf in den Sommermonaten eine Herausforderung dar, die bei der Auswahl geeigneter Kühltechnologien sowie der Optimierung der Gebäudehülle berücksichtigt werden muss (Kuhn, 2017). Das RCP 8.5-Szenario verdeutlicht, dass die grössten klimatischen Veränderungen gravierende Auswirkungen auf den Gesamtenergieverbrauch haben können, wobei die Heizkostenreduktionen den stark ansteigenden Kühlbedarf teilweise kompensieren.

In Abbildung 57 sind die Energieverbräuche für das aktuelle Klima sowie die drei RCP-Szenarien dargestellt, zusammen mit den prozentualen Änderungen im Vergleich zum Ist-Zustand.

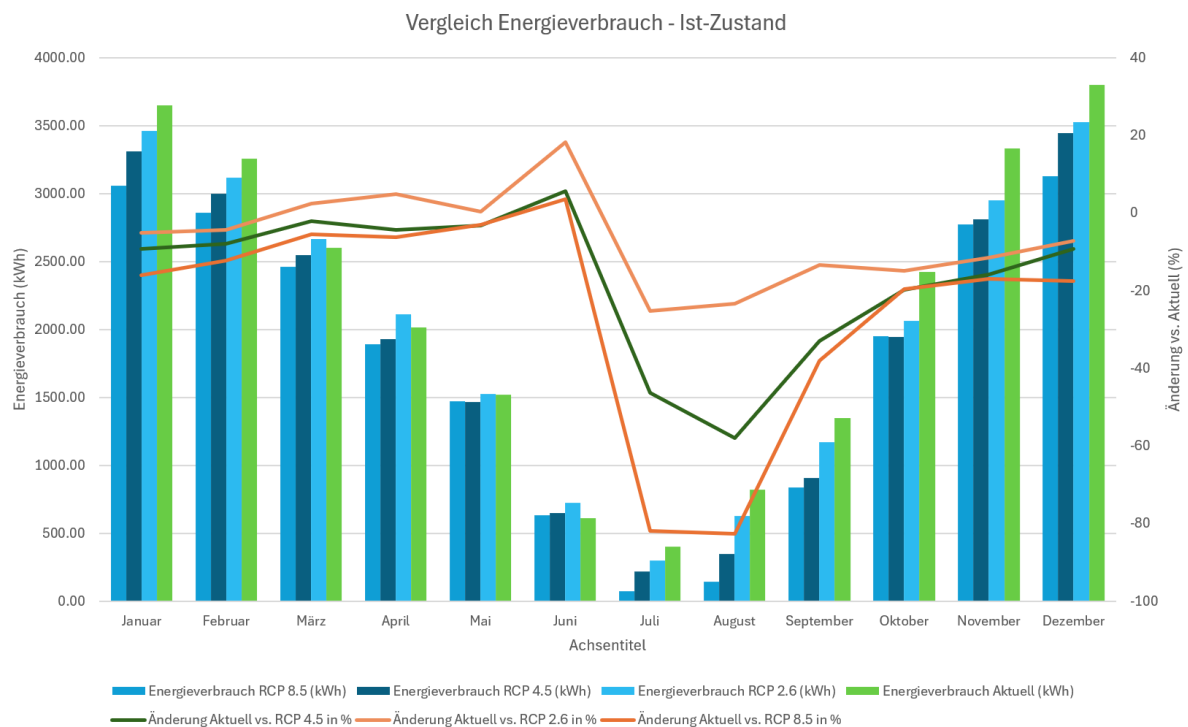


Abbildung 57: Energieverbrauch Ist-Zustand (Aktuell vs. RCP 2100)

Die Daten zeigen, dass der Gesamtenergieverbrauch im Jahresverlauf unter den verschiedenen RCP-Szenarien tendenziell abnimmt. Die prozentualen Änderungen verdeutlichen:

- Unter RCP 2.6 reduziert sich der Energieverbrauch in den meisten Monaten um etwa 5 – 15 %, mit leichten Zunahmen in den Monaten März bis Mai.
- Unter RCP 4.5 sind die Reduktionen stärker ausgeprägt, insbesondere in den Sommermonaten Juli und August mit Einsparungen von über 45 %.
- Unter RCP 8.5 zeigen sich die grössten Veränderungen, mit erheblichen Energieeinsparungen in den Sommermonaten von bis zu 82 %, was auf den stark reduzierten Heizbedarf und Veränderungen im Kühlbedarf zurückzuführen ist.

## 4.9 Vergleich der energetischen Performance der Varianten unter div. RCP-Szenarien

### 4.9.1 Interpretation des Ist-Zustands und der Varianten im aktuellen Klima

Die monatlichen Energieverbräuche für den Ist-Zustand und die Varianten unter den aktuellen klimatischen Bedingungen sind in der Abbildung 58 dargestellt.

Der Ist-Zustand zeigt einen hohen Energieverbrauch in den Wintermonaten, insbesondere im Januar und Dezember, was auf den erhöhten Heizbedarf aufgrund niedriger Aussentemperaturen zurückzuführen ist (DIN EN ISO 52016-1, 2018).

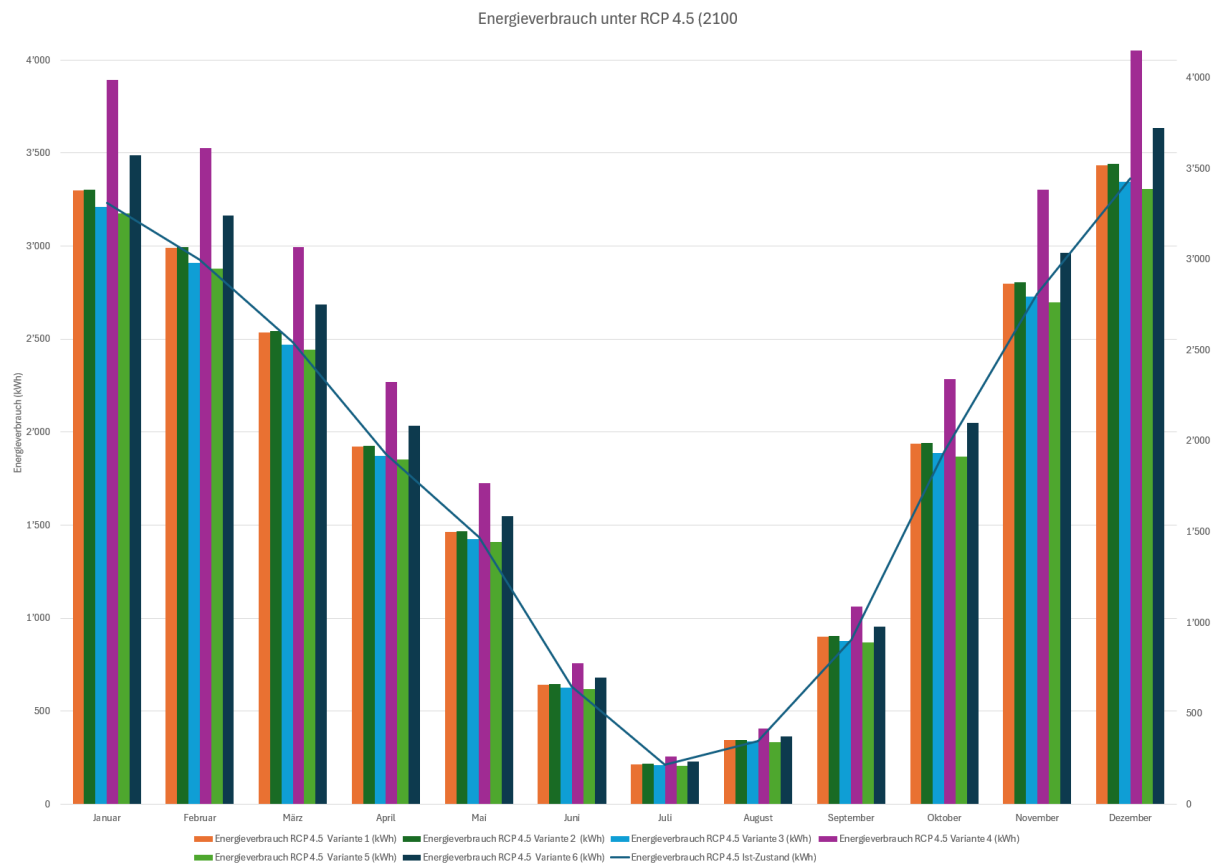


Abbildung 58: Interpretation des Ist-Zustands und der Varianten im aktuellen Klima

- Variante 1 und Variante 2 weisen nur geringfügige Unterschiede zum Ist-Zustand auf, mit minimalen Energieeinsparungen. Dies kann auf kleine Anpassungen in der Gebäudehülle oder Verglasung zurückgeführt werden.
- Variante 3 zeigt eine moderate Reduktion des Energieverbrauchs in den Wintermonaten. Die verbesserten thermischen Eigenschaften und mögliche Optimierungen der Gebäudehülle tragen zu einer effizienteren Energienutzung bei.
- Variante 4 hat durchgehend höhere Energieverbräuche als der Ist-Zustand, insbesondere in den Wintermonaten. Dies deutet auf erhöhte Wärmeverluste oder ineffiziente bauliche Massnahmen hin.
- Variante 5 und Variante 6 weisen niedrigere Energieverbräuche auf, was auf den Einsatz von energieeffizienten Technologien, verbesserten Verglasungen und effektiven Verschattungsmassnahmen zurückzuführen sein könnte (Feist, 2015).

### 4.9.2 Auswirkungen der RCP-Szenarien auf den Energieverbrauch

#### Variante 1

**Interpretation:** Die Variante 1 zeigt eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs im Jahresverlauf unter den verschiedenen RCP-Szenarien; insbesondere im Sommer.

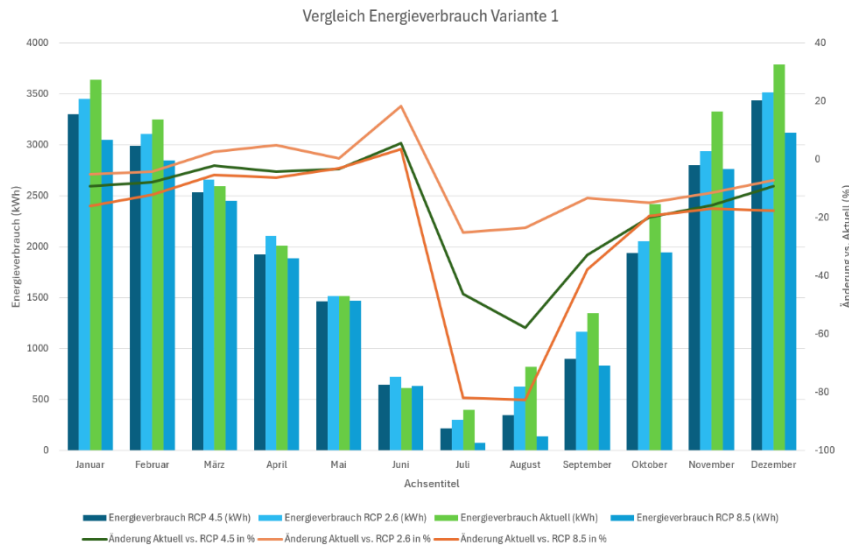


Abbildung 59: Energieverbrauch Variante 1 (Aktuell vs. RCP 2100)

**Vergleich zum Ist-Zustand:** Diese Variante zeigt, dass die optimierten baulichen Massnahmen zu einer deutlichen Senkung des Energieverbrauchs in allen Szenarien führen. Besonders der Sommer profitiert durch den stark reduzierten Kühlbedarf.

#### Variante 2

**Interpretation:** Die Variante 2 zeigt eine ähnliche Reduktion wie Variante 1, jedoch ist die Reduktion im Sommer weniger ausgeprägt.

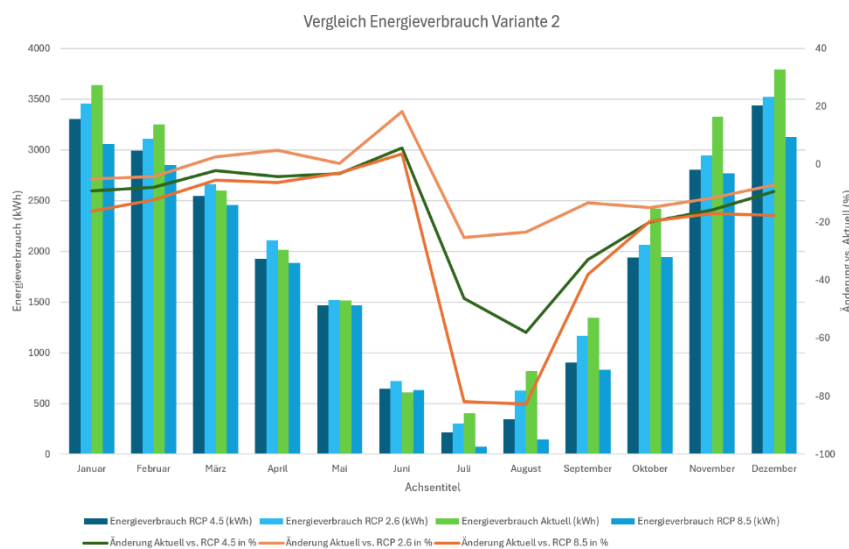


Abbildung 60: Energieverbrauch Variante 2 (Aktuell vs. RCP 2100)

**Vergleich zum Ist-Zustand:** Die Variante 2 ist insgesamt ähnlich effizient wie Variante 1, mit etwas geringeren Einsparungen im Sommer. Der Winter bleibt nahezu unverändert.

Variante 3

**Interpretation:** Die Variante 3 zeigt eine moderate Reduktion des Energieverbrauchs in den Wintermonaten, jedoch eine geringere Einsparung im Sommer im Vergleich zu den anderen Varianten.

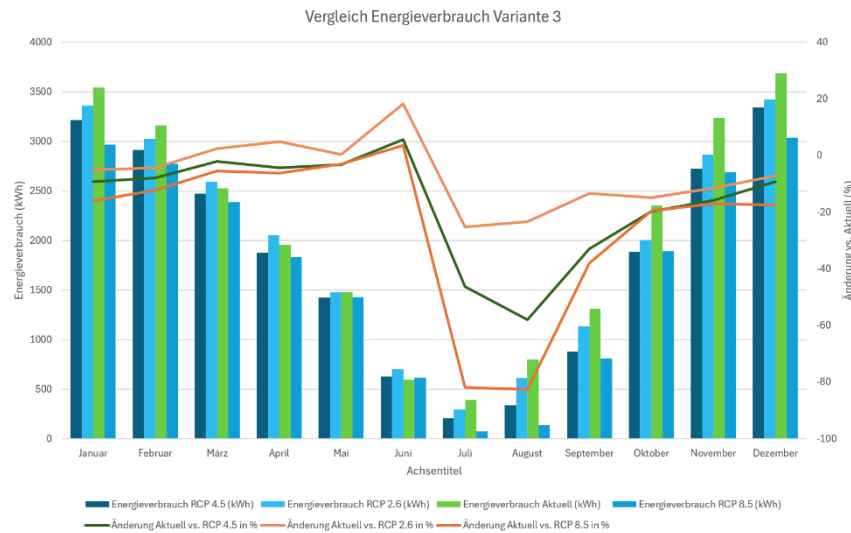


Abbildung 61: Energieverbrauch Variante 3 (Aktuell vs. RCP 2100)

**Vergleich zum Ist-Zustand:** Die Variante 3 zeigt durchgehend geringere Energieeinsparungen als die Varianten 1 und 2, besonders im Winter, was auf weniger optimierte bauliche Massnahmen hindeutet.

Variante 4

**Interpretation:** Die Variante 4 weist im Vergleich zu den anderen Varianten höhere Energieverbräuche auf, insbesondere in den Wintermonaten.

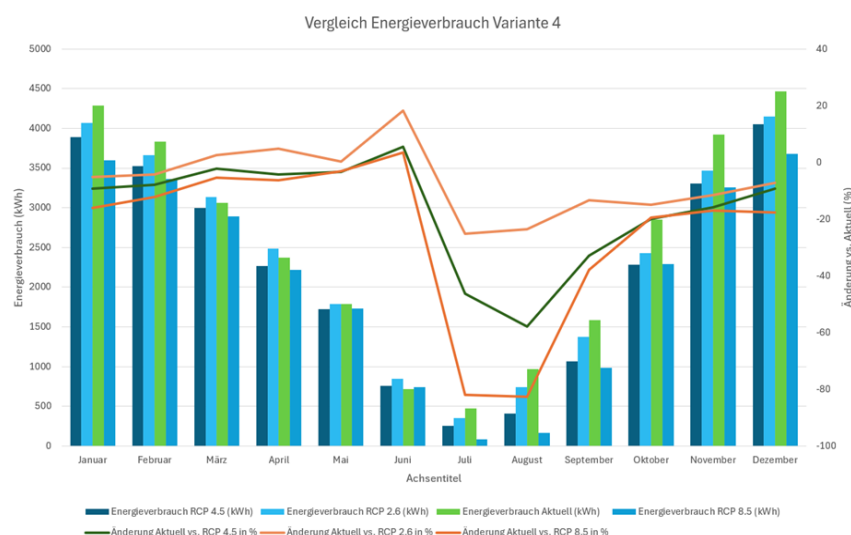


Abbildung 62: Energieverbrauch Variante 4 (Aktuell vs. RCP 2100)

**Vergleich zum Ist-Zustand:** Die Variante 4 zeigt durchgehend höhere Energieverbräuche als der Ist-Zustand, insbesondere im Winter. Dies deutet auf erhöhte Wärmeverluste oder ineffiziente bauliche Massnahmen hin.

Variante 5

**Interpretation:** Die Variante 5 zeigt insgesamt moderate Einsparungen im Energieverbrauch, insbesondere im Sommer.

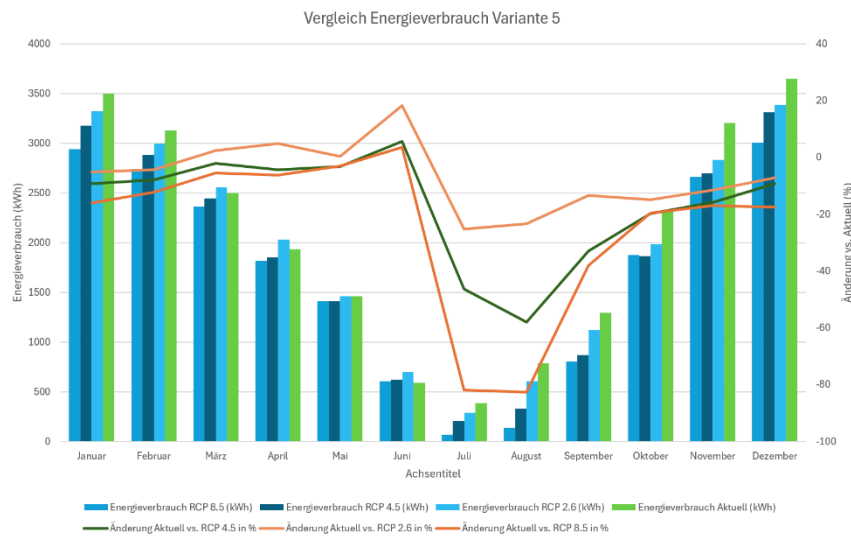


Abbildung 63: Energieverbrauch Variante 5 (Aktuell vs. RCP 2100)

**Vergleich zum Ist-Zustand:** Die Variante 5 zeigt moderate Verbesserungen im Energieverbrauch im Vergleich zum Ist-Zustand, besonders im Sommer. Der Winterverbrauch bleibt jedoch fast unverändert.

Variante 6

**Interpretation:** Die Variante 6 zeigt eine Reduktion des Energieverbrauchs, insbesondere im Sommer. Diese Variante scheint besonders in Bezug auf den Sommer optimiert zu sein.

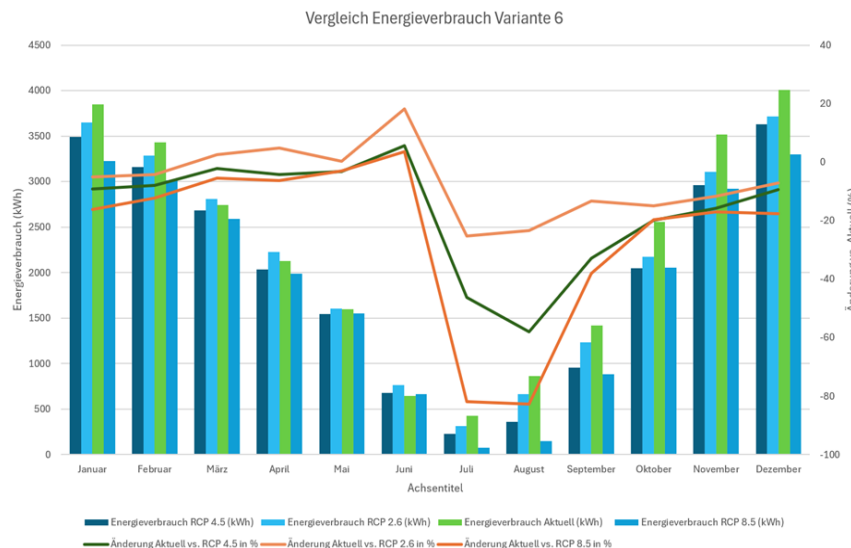


Abbildung 64: Energieverbrauch Variante 6 (Aktuell vs. RCP 2100)

**Vergleich zum Ist-Zustand:** Die Variante 6 ist besonders im Sommer effizient, während der Winterverbrauch stabil bleibt. Diese Variante scheint auf die Maximierung der Energieeffizienz im Sommer ausgelegt zu sein.

## 5 Validierung: Abgleich mit der Realität

Um die Genauigkeit des Simulationsmodells zu überprüfen, wurde der simulierte Energieverbrauch mit den realen, aufgezeichneten Daten des Gebäudes an der Bubenbergstrasse 7 in Spiez verglichen. Dieser Vergleich ermöglicht Rückschlüsse auf die Präzision der Annahmen und Berechnungen, die im Modell verwendet wurden. Die folgenden Abschnitte erläutern die Ergebnisse dieses Vergleichs detailliert.

### 5.1 Jahresverbrauch – simulierte vs. reale Daten

Die simulierten Ergebnisse basieren auf Annahmen zu Heiz- und Beleuchtungslasten und zeigen eine ausgeprägte saisonale Abhängigkeit, mit einem klaren Anstieg des Energieverbrauchs im Winter und einem deutlichen Rückgang in den Sommermonaten (Abbildung 65 und Abbildung 66) Der berechnete Energieverbrauch liegt im Januar bei 3.647 kWh und fällt bis zum Sommer auf 402 kWh im Juli, um im Dezember wieder auf 3.799 kWh anzusteigen.

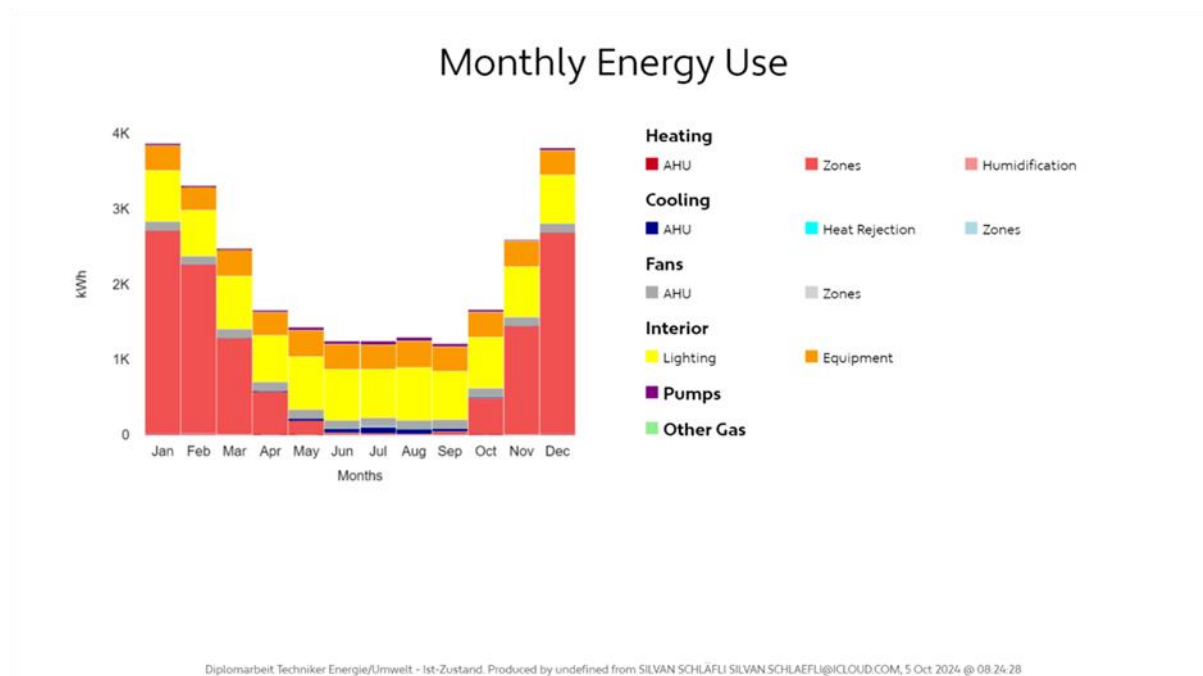


Abbildung 65: Sefaira-Monthly\_energy\_Ist-Zustand Quelle: Sefaira WebApp

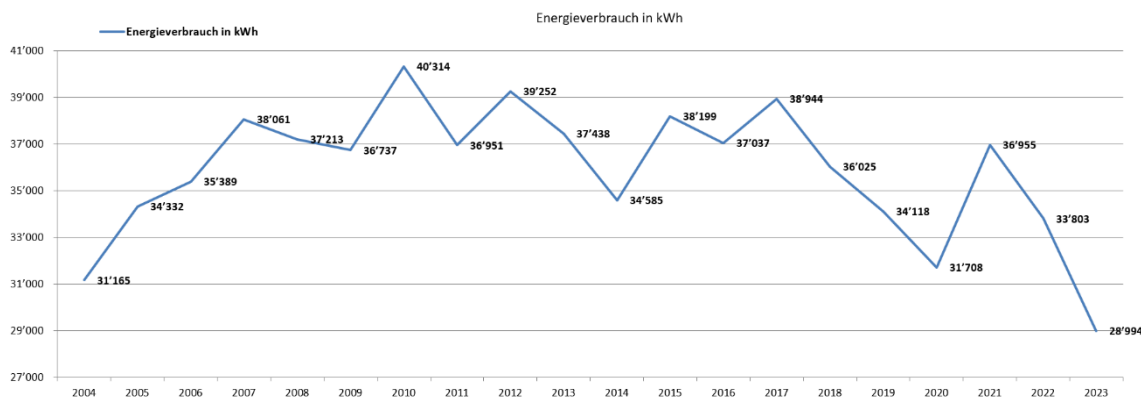


Abbildung 66: Energieverbrauch an der Bubenbergstrasse 7 in 3700 Spiez Quelle: Heiner Schläfli

Die realen, gemessenen Daten weisen ein leicht abweichendes Muster auf. Während auch hier ein Anstieg im Winter und ein Rückgang im Sommer beobachtet wird, fallen die tatsächlichen Verbräuche, wie in den historischen Messungen von 2004 bis 2023 ersichtlich, im Allgemeinen höher aus, insbesondere in den Sommermonaten (Abbildung 67).

## 5.2 Wintermonate

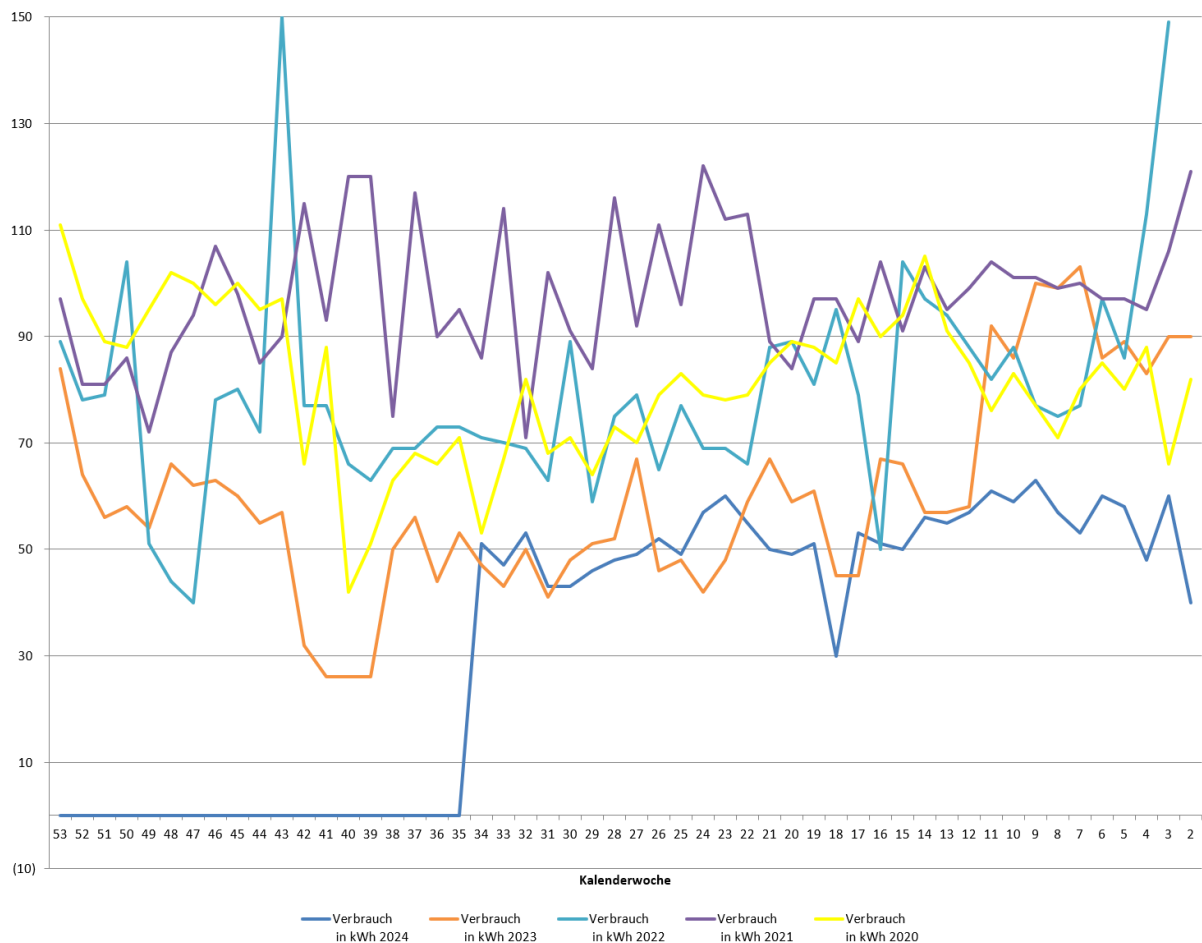


Abbildung 67: Stromverbrauch an der Bubenbergstrasse 7 in 3700 Spiez Quelle: Heiner Schläfli

In den Wintermonaten stimmen die simulierte und gemessenen Verbräuche besser überein, was darauf hinweist, dass die Annahmen über die Heizlasten im Modell relativ genau sind. So liegt der simulierte Energieverbrauch im Januar bei 3.647 kWh, während der reale Verbrauch in früheren Jahren im Bereich von 3.500 bis 4.000 kWh schwankt. Diese Übereinstimmung deutet darauf hin, dass die Heizlast im Modell realistisch abgebildet ist.

## 5.3 Sommermonate

In den Sommermonaten zeigt sich eine Abweichung zwischen den simulierten und gemessenen Daten. Die Simulation weist für Juni und Juli sehr geringe Verbräuche von 611 kWh bzw. 402 kWh aus, während der tatsächliche Verbrauch in den gemessenen Daten tendenziell höher liegt, oft über 1.000 kWh. Diese Differenz lässt sich durch zusätzliche elektrische Lasten wie Klimaanlage, Warmwasserbereitung oder Geräte erklären, die in der Simulation nicht berücksichtigt wurden.

## 5.4 Übergangsmonate

In den Übergangsmonaten zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Sommer: Die simulierten Daten zeigen eine moderate Nutzung von Energie, was hauptsächlich auf den reduzierten Heizbedarf zurückzuführen ist. Der reale Verbrauch ist jedoch höher, insbesondere in den Monaten März und November, was ebenfalls auf zusätzliche Energieverbräuche zurückzuführen ist, die im Simulationsmodell fehlen.

## 6 Ergebnisse, Erkenntnisse und Diskussion

Das vorliegende Kapitel zielt darauf ab, die durchgeführten Simulationen und Analysen vorzustellen, die energetische Performance der entwickelten Varianten zu bewerten und die Validität des Simulationsmodells zu überprüfen. Darüber hinaus werden die Ergebnisse im Hinblick auf zukünftige Klimaveränderungen und deren Bedeutung für die Gebäudekonzeption diskutiert. Es bildet somit die Grundlage für die abschliessenden Kapitel 7 und 8, die das Fazit sowie die Methodenkritik und Grenzen der Arbeit behandeln.

### 6.1 Präsentation der Ergebnisse

#### 6.1.1 Energetische Performance der Varianten unter RCP-Szenarien

Die Simulationen der energetischen Performance für die sechs Varianten unter den RCP 4.5 Szenarien zeigt Unterschiede im Energieverbrauch (Tabelle 5). Varianten 3 und 6 erweisen sich als besonders effizient, indem sie den Heiz- und Kühlbedarf effektiv reduzieren.

Monat	Ist-Zustand	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
Januar	3459.11	3447.04	3453.61	3357.28	4068.18	3321.06	3647.47
Februar	3117.03	3106.15	3112.08	3025.28	3665.87	2992.64	3286.76
März	2666.04	2656.74	2661.80	2587.56	3135.48	2559.65	2811.22
April	2113.78	2106.40	2110.41	2051.55	2485.96	2029.42	2228.88
Mai	1523.20	1517.89	1520.78	1478.37	1791.41	1462.42	1606.15
Juni	722.96	720.43	721.81	701.68	850.26	694.11	762.33
Juli	301.07	300.02	300.59	292.21	354.08	289.06	317.47
August	628.05	625.85	627.05	609.56	738.63	602.98	662.24
September	1168.82	1164.74	1166.96	1134.41	1374.62	1122.17	1232.46
Oktober	2063.14	2055.94	2059.86	2002.40	2426.41	1980.80	2175.48
November	2948.96	2938.66	2944.27	2862.15	3468.21	2831.27	3109.54
Dezember	3524.81	3512.50	3519.20	3421.05	4145.45	3384.14	3716.74

Tabelle 5: Monatliche Energieverbräuche der Varianten unter den RCP-Szenarien 4.5 im Vergleich (in kWh)

Die Ergebnisse in Tabelle 5 verdeutlichen, dass die Anpassungsvarianten unterschiedliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben. Besonders hervorzuheben sind die Varianten 3 und 6, die durch gezielte bauliche Massnahmen den Heiz- bzw. Kühlbedarf reduzieren können. Variante 3, welche die Fensterflächen auf den Nord-, Ost- und Westseiten reduziert, zeigt eine deutliche Senkung des Heizbedarfs. Variante 6, die eine verstärkte Dachverschattung implementiert, führt zu einer Reduktion des Kühlbedarfs, besonders unter den intensiven Klimaszenarien RCP 4.5 und 8.5.

## 6.1.2 Vergleich simulierte vs. reale Energiedaten

Die realen Energiedaten zeigen ein ähnliches saisonales Muster wie die simulierten Verbräuche, jedoch mit insgesamt höheren Verbräuchen, insbesondere in den Sommermonaten. Dies liegt vor allem daran, dass im realen Verbrauch zusätzliche elektrische Lasten wie Klimaanlage, Warmwasserbereitung und Haushaltsgeräte berücksichtigt werden, die im Simulationsmodell nicht vollständig abgebildet sind. Trotz dieser Abweichungen zeigt der Vergleich eine robuste Validität des Simulationsmodells für die Heizlastberechnungen in den Wintermonaten. Insbesondere deswegen, weil Faktoren wie Warmwasseraufbereitung und Haushaltsgeräte weder durch die Varianten noch durch die Klimaszenarien wesentlich beeinflusst werden und folglich für die Auswertung nicht von Relevanz sind.

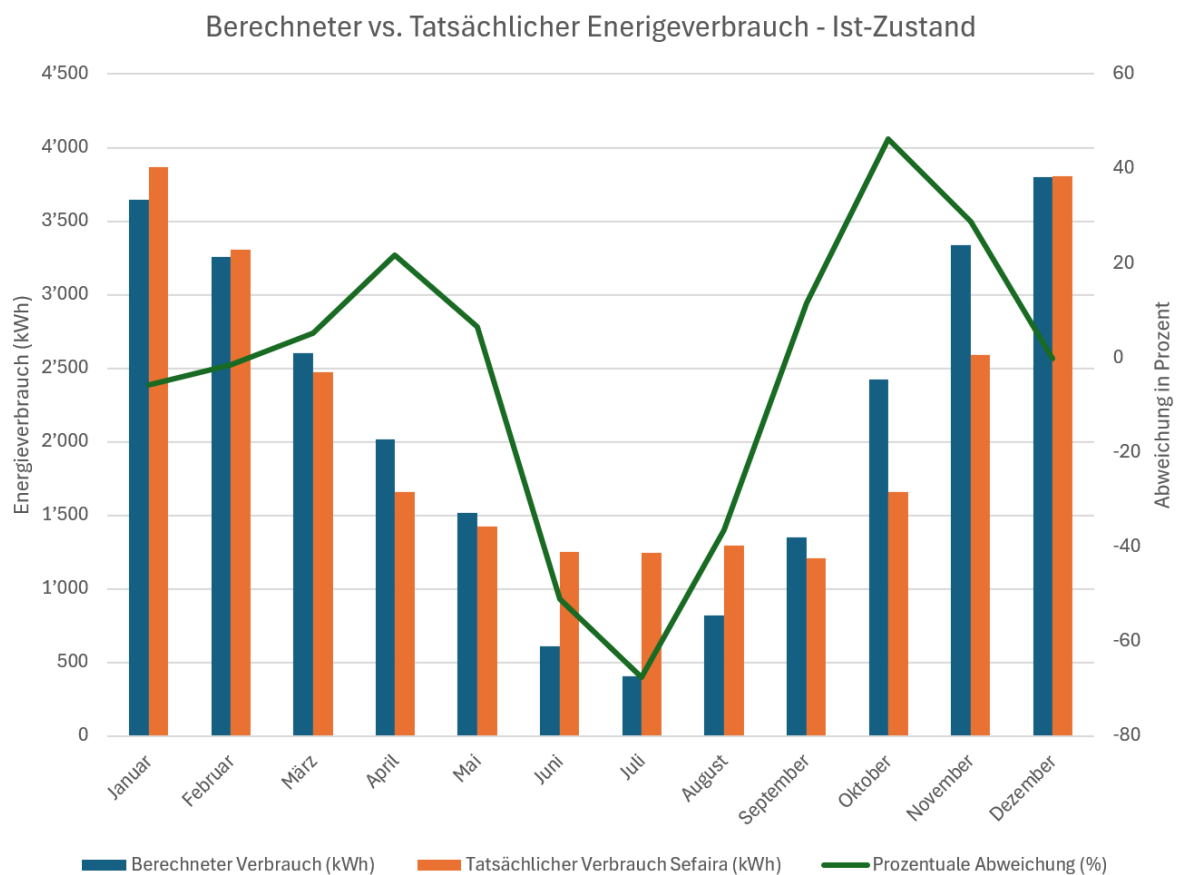


Abbildung 68: Vergleich des simulierten und realen Jahresenergieverbrauchs

## 6.2 Interpretation der Ergebnisse

### 6.2.1 Effizienz der Varianten

Die untersuchten Varianten zeigten unterschiedliche Wirkungen auf den Energieverbrauch, insbesondere hinsichtlich Heiz- und Kühlbedarf. Varianten 3 und 6 erwiesen sich als besonders effizient. Variante 3 reduziert den Heizbedarf durch die Minimierung der Fensterflächen auf den Nord-, Ost- und Westseiten, während Variante 6 durch verstärkte Dachverschattung den Kühlbedarf senkt. Variante 5, die energieeffiziente Verglasungen einsetzt, weist ebenfalls erhebliche Einsparungen beim Heizbedarf auf, ohne den Kühlbedarf wesentlich zu erhöhen. Im

Gegensatz dazu führt Variante 4, die die Glasflächen allgemein erhöht, zu einem erhöhten Energieverbrauch, insbesondere in den Sommermonaten aufgrund von Überhitzung.

#### *Erwartungen und Ursachen:*

Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen, dass gezielte bauliche Anpassungen den Energieverbrauch senken können. Die Reduktion der Fensterflächen in Variante 3 minimiert Wärmeverluste im Winter und reduziert gleichzeitig das Risiko von Überhitzung im Sommer. Dies entspricht den theoretischen Annahmen, dass eine optimierte Gebäudehülle den Energiebedarf senken kann. Variante 6, durch die verstärkte Dachverschattung, reduziert die direkte Sonneneinstrahlung auf das Dach und die oberen Stockwerke, was den Kühlbedarf insbesondere unter intensiven Klimaszenarien reduziert. Diese Massnahmen zeigen, dass durch gezielte Eingriffe in die Gebäudestruktur Energieeinsparungen erzielt werden können.

#### *Folgen der Ergebnisse:*

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass durch die Implementierung effizienter baulicher Massnahmen nicht nur der Energieverbrauch gesenkt, sondern auch der Wohnkomfort erhöht werden kann. Varianten 3 und 6 zeigen, dass eine Balance zwischen Heiz- und Kühlbedarf erreicht werden kann, was zu einer nachhaltigen und klimaresilienten Gebäudegestaltung beiträgt. Zudem zeigen die Ergebnisse die Bedeutung der Integration passiver Klimastrategien zur Optimierung der Energieeffizienz.

### 6.2.2 Einfluss der RCP-Szenarien

Die verschiedenen RCP-Szenarien verdeutlichen die Notwendigkeit klimaangepasster Planung. Unter RCP 8.5, dem Szenario mit den stärksten Klimaveränderungen, sinkt der Heizbedarf deutlich, während der Kühlbedarf erheblich ansteigt.

#### *Interpretation:*

- RCP 2.6: Dieses Szenario zeigt moderate Veränderungen mit geringfügigen Einsparungen im Energieverbrauch. Es verdeutlicht, dass selbst bei optimierten Massnahmen die klimatischen Veränderungen eine spürbare, aber überschaubare Auswirkung auf den Energieverbrauch haben.
- RCP 4.5: Beim mittleren Szenario zeigen sich unter allen Varianten Einsparungen beim Heizbedarf und einen moderaten Anstieg beim Kühlbedarfs. Dies spiegelt die steigenden Temperaturen wider, die eine Anpassung der Kühlstrategien notwendig machen.
- RCP 8.5: Beim dritten Szenario kommt es zu extremen klimatischen Veränderungen, mit drastischen Temperaturanstiegen im Sommer und damit verbundenem erheblichen Kühlbedarf. Die Ergebnisse zeigen, dass ohne entsprechende Anpassungsmassnahmen der Energieverbrauch erheblich steigen wird.

## 6.3 Diskussion der Erkenntnisse

### 6.3.1 Vergleich mit bestehender Forschung

Die Ergebnisse dieser Arbeit stimmen mit der aktuellen Literatur überein, die eine Reduktion des Heizbedarfs und einen Anstieg des Kühlbedarfs durch den Klimawandel prognostiziert. Die erzielten Einsparungen durch bauliche Massnahmen wie die Minimierung der Fensterflächen und verstärkte Verschattung bestätigen frühere Studien zur Wirksamkeit passiver Klimastrategien (Feist, 2015).

#### *Erwartungen und Forschungseinordnung:*

Die Erwartungen, dass gezielte bauliche Anpassungen den Energieverbrauch senken können, wurden erfüllt. Dies entspricht den theoretischen Annahmen, dass eine optimierte Gebäudehülle den Energiebedarf senken kann. Die gesteigerte Effizienz der Varianten 3 und 6 bestätigt die Wirksamkeit dieser Massnahmen und ergänzt den bestehenden Forschungsstand durch praktische Anwendungsergebnisse.

#### *Neue Erkenntnisse:*

Die Arbeit zeigt, dass durch die Kombination von passiven und aktiven Massnahmen eine Reduktion des Energieverbrauchs erreicht werden kann, ohne den Wohnkomfort zu beeinträchtigen. Insbesondere die verstärkte Dachverschattung in Variante 6 bietet einen effektiven Weg, den Kühlbedarf unter intensiven Klimaszenarien zu reduzieren, was in der Literatur bisher weniger detailliert behandelt wurde.

### 6.3.2 Praktische Implikationen

Für die Praxis bedeuten die Ergebnisse, dass bestehende Gebäude durch gezielte Massnahmen wie energieeffiziente Fenster, verbesserte Dämmungen und effektive Verschattungssysteme an zukünftige klimatische Bedingungen angepasst werden können. Diese Anpassungen tragen nicht nur zur Reduktion des Energieverbrauchs bei, sondern können auch den Wohnkomfort und die Nachhaltigkeit der Gebäude erhöhen.

#### *Konkrete Anwendungen:*

- **Bestandsgebäude:** Ältere Gebäude wie das untersuchte Einfamilienhaus bieten erhebliches Potenzial für energetische Optimierungen durch Nachrüstungen und bauliche Anpassungen (M. Bürger, 2024).
- **Renovationsstrategien:** Renovationen sind oft nachhaltiger und ressourcenschonender als Neubauten, da bestehende Strukturen weiterverwendet und angepasst werden können (Feist, 2015).
- **Energieeinsparungen:** Durch die Nutzung der effizientesten Varianten können Energieeinsparungen erzielt werden, was sowohl ökonomische wie auch ökologische Vorteile mit sich bringt.

### 6.3.3 Theoretische Implikationen

Die Erkenntnisse dieser Arbeit tragen zur Weiterentwicklung der Theorie klimaangepasster Architektur bei und unterstreichen die Bedeutung integrierter Ansätze zur Energieeinsparung. Die Kombination passiver und aktiver Massnahmen zeigt, wie Gebäude ganzheitlich optimiert werden können, um den aktuellen als auch den zukünftigen klimatischen Herausforderungen gerecht zu werden.

*Theoretische Beiträge:*

- Ganzheitliche Ansätze: Die Arbeit verdeutlicht, dass eine Kombination aus Fensterflächenoptimierung, Verschattung und energieeffizienten Verglasungen eine effektive Strategie zur Reduktion des Energieverbrauchs darstellt. Dies erweitert das Verständnis darüber, wie verschiedene Massnahmen synergistisch wirken können, um eine maximale Effizienzsteigerung zu erzielen.
- Klimaanpassung: Die Integration von Klimaprojektionen in die Gebäudeplanung ermöglicht eine vorausschauende Gestaltung, die auf zukünftige klimatische Veränderungen vorbereitet ist. Dies betont die Notwendigkeit, langfristige Klimadaten in die Planung und Optimierung von Gebäuden einzubeziehen.
- Interdisziplinäre Ansätze: Die Arbeit zeigt die Wichtigkeit der Zusammenarbeit zwischen Architektur, Ingenieurwesen und Klimaforschung zur Entwicklung nachhaltiger Gebäudekonzepte. Durch die Nutzung von Softwaretools wie SketchUp, Sefaira und Meteororm wird die Effizienz und Genauigkeit der energetischen Analysen verbessert, was einen interdisziplinären Ansatz fördert.

## 6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vorliegenden Ergebnisse verdeutlichen, dass durch gezielte bauliche Massnahmen eine Reduktion des Energieverbrauchs in Bestandsgebäuden erreicht werden kann. Insbesondere die Varianten 3 und 6, die die Fensterflächen optimieren und die Dachverschattung erhöhen, zeigen das grösste Einsparpotenzial.

Die Auswirkungen der verschiedenen RCP-Szenarien zeigen, dass eine klimaangepasste Planung unerlässlich ist, um den zukünftigen energetischen Herausforderungen gerecht zu werden. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit der bestehenden Forschung und erweitern das Verständnis darüber, wie durch die Kombination passiver und aktiver Massnahmen nachhaltige und energieeffiziente Gebäudekonzepte realisiert werden können.

## 7 Fazit und Ausblick: Auf dem Weg zu nachhaltigen Gebäuden

### 7.1 Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse

Die zentralen Ergebnisse der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Effektivität gezielter baulicher Massnahmen: Die entwickelten Varianten zeigen, dass durch Anpassungen wie die Optimierung der Fensterflächen (Variante 3) und die Erhöhung der Dachverschattung (Variante 6) signifikante Energieeinsparungen erzielt werden können. Diese Massnahmen reduzieren sowohl den Heiz- als auch den Kühlbedarf und tragen zur Verbesserung des thermischen Komforts bei (Zimmermann et al., 2019).
- Bedeutung von Klimadaten und Projektionen: Die Nutzung von historischen Klimadaten sowie zukünftigen Klimaprojektionen (RCP 2.6, 4.5 und 8.5) sind entscheidend für eine realistische Bewertung der energetischen Performance und die Planung klimaresilienter Gebäude. Die Ergebnisse zeigen, dass der Klimawandel den Energieverbrauch von Gebäuden erheblich beeinflussen wird, was eine vorausschauende Planung erfordert (Bundesamt für Energie (BFE), 2020).
- Validität des Simulationsmodells: Der Abgleich der simulierten Energieverbräuche mit den realen Verbrauchsdaten bestätigt die Genauigkeit des Modells in den Winter- und teilweise den Übergangsmonaten. Die Abweichungen in den Sommermonaten weisen auf zusätzliche elektrische Lasten hin, die im Modell künftig berücksichtigt werden sollten (Müller & Meier, 2020).
- Kombination passiver und aktiver Massnahmen: Die Arbeit unterstreicht die Wirksamkeit einer ganzheitlichen Herangehensweise, die passive bauliche Anpassungen mit aktiven Technologien wie erneuerbaren Energiesystemen kombiniert. Dies ermöglicht eine nachhaltige Optimierung des Energieverbrauchs und erhöht die Resilienz gegenüber klimatischen Veränderungen (Hastings, 2015; Voss & Musall, 2012).
- Relevanz für die Praxis: Die Erkenntnisse sind nicht nur für das untersuchte Gebäude von Bedeutung, sondern bieten auch wertvolle Ansätze für die energetische Sanierung und Klimaanpassung anderer Bestandsgebäude. Durch die Anwendung der beschriebenen Massnahmen können Eigentümer:innen und Planer:innen einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen leisten (Bundesamt für Energie (BFE), 2020).

### 7.2 Empfehlungen für zukünftige Projekte

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich folgende Empfehlungen für zukünftige Projekte ableiten:

- Einbeziehung detaillierter Nutzungsprofile: Um die Genauigkeit von Simulationen zu erhöhen, sollten detaillierte Daten zum Nutzerverhalten und zu internen Lasten erfasst und ins Modell integriert werden (DIN EN ISO 52016-1, 2018).
- Erweiterung des Simulationsmodells: Die Berücksichtigung zusätzlicher elektrischer Verbraucher, wie Klimaanlage und Haushaltsgeräte, ermöglicht eine präzisere Abbildung des Gesamtenergieverbrauchs (Zimmermann et al., 2019).

- Adaptive Verschattungssysteme: Die Implementierung automatisierter Verschattungssysteme kann den Kühlbedarf weiter reduzieren und den Wohnkomfort steigern (Kuhn, 2017).

### 7.3 Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Der Klimawandel stellt den Bausektor vor erhebliche Herausforderungen, bietet jedoch auch Chancen für Innovation und nachhaltige Entwicklung. Zukünftige Forschungen könnten sich auf folgende Bereiche konzentrieren:

- Integration smarter Technologien: Die Weiterentwicklung intelligenter Gebäudetechnik und Automationssysteme kann die Energieeffizienz weiter steigern und die Anpassungsfähigkeit von Gebäuden an wechselnde klimatische Bedingungen erhöhen (Attia et al., 2012).
- Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Die Förderung von Recycling und Wiederverwendung von Baumaterialien trägt zur Ressourcenschonung bei und reduziert den ökologischen Fussabdruck von Gebäuden (Zimmermann et al., 2019).
- Interdisziplinäre Zusammenarbeit: Die enge Zusammenarbeit zwischen Architekt:innen, Ingenieur:innen, Klimaforscher:innen und Soziolog:innen ist bedeutend, um ganzheitliche und nachhaltige Lösungen zu entwickeln (Voss & Musall, 2012).
- Anpassung von Normen und Standards: Die Weiterentwicklung von Bauvorschriften und Energieeffizienzstandards sollte die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse berücksichtigen und Anreize für klimaresilientes Bauen schaffen (DIN EN ISO 52016-1, 2018).

### 7.4 Schlussbemerkung

Die Arbeit hat gezeigt, dass durch fundierte Analyse, sorgfältige Planung und gezielte Massnahmen erhebliche Verbesserungen in der Energieeffizienz und Klimaanpassung von Bestandsgebäuden erreicht werden können. Es liegt in der Verantwortung aller Akteur:innen im Bausektor, diese Erkenntnisse umzusetzen und aktiv zur Gestaltung einer nachhaltigen Zukunft beizutragen (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014).

## 8 Methodenkritik und Grenzen der Arbeit

### 8.1 Kritische Analyse der verwendeten Methoden

#### 8.1.1 Gebäudemodellierung mit SketchUp

Die Erstellung des 3D-Gebäudemodells in SketchUp bildete die Grundlage für die weiteren Simulationen. SketchUp ist für seine Benutzerfreundlichkeit bekannt und ermöglicht eine schnelle Modellierung (Boeykens, 2011b). Jedoch weist das Programm auch Einschränkungen auf, die die Genauigkeit des Modells beeinflussen können.

*Kritische Punkte:*

- Detailgenauigkeit des Modells: SketchUp eignet sich gut für konzeptionelle Modelle, jedoch kann die Abbildung komplexer baulicher Details eingeschränkt sein. Dies kann zu Vereinfachungen führen, die die Genauigkeit der Simulationen beeinträchtigen (Chopra, 2012).
- Materialdefinitionen: Die Zuweisung von thermischen Eigenschaften zu Materialien in SketchUp ist begrenzt. Ohne detaillierte Materialdaten können wichtige Aspekte wie Wärmebrücken oder spezifische Dämmqualitäten nicht präzise berücksichtigt werden (Attia et al., 2012).

#### 8.1.2 Energetische Simulation mit Sefaira

Die Verwendung von Sefaira ermöglichte eine schnelle energetische Bewertung der verschiedenen Varianten. Die Integration in SketchUp erleichterte den Workflow und lieferte unmittelbares Feedback.

*Kritische Punkte:*

- Vereinfachte Simulationsalgorithmen: Sefaira ist für die frühe Entwurfsphase konzipiert und nutzt vereinfachte Berechnungsmodelle. Komplexe thermische Prozesse oder detaillierte Anlagentechnik werden nur rudimentär abgebildet (Attia et al., 2012).
- Standardisierte Nutzungsprofile: Die Simulationen basieren auf vordefinierten Nutzungsprofilen, die das tatsächliche Nutzerverhalten nicht vollständig widerspiegeln. Individuelle Gewohnheiten der Bewohner:innen können jedoch erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch haben (O'Brien & Gunay, 2017).
- Klimadatenintegration: Obwohl Sefaira die Einbindung von Klimadaten ermöglicht, ist die Berücksichtigung mikroklimatischer Besonderheiten begrenzt. Lokale Effekte wie Verschattung durch umliegende Gebäude oder Vegetation wurden möglicherweise nicht vollständig erfasst.

### 8.1.3 Klimadatenanalyse mit Meteonorm

Meteonorm lieferte umfassende Klimadaten für den Standort Spiez und ermöglichte die Analyse verschiedener Klimaszenarien.

*Kritische Punkte:*

- Unsicherheiten in Klimaprojektionen: Klimamodelle unterliegen natürlichen Schwankungen und Unsicherheiten. Die Genauigkeit der RCP-Szenarien hängt von zahlreichen Annahmen ab, die nicht vollständig kontrolliert werden können (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014).
- Datenauflösung: Meteonorm verwendet Wetterdaten von nahegelegenen Stationen und modelliert daraus standortspezifische Daten. Die räumliche und zeitliche Auflösung der Daten kann begrenzt sein, was zu Ungenauigkeiten führt (Remund et al., 2015).

## 8.2 Grenzen der Validierung mit realen Daten

Der Abgleich der simulierten Energieverbräuche mit den realen Verbrauchsdaten zeigte gute Übereinstimmungen in den Wintermonaten, jedoch Abweichungen im Sommer.

*Kritische Punkte:*

- Nicht erfasste elektrische Lasten: Die Simulationen berücksichtigten nicht alle elektrischen Verbraucher wie Haushaltsgeräte oder Warmwasserbereitung. Dies führt zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Energieverbrauchs in den Sommermonaten (Gill et al., 2010).
- Annahmen über Nutzerverhalten: Variationen im Lüftungsverhalten, der Nutzung von Klimaanlage oder der Anwesenheit der Bewohner:innen wurden nicht detailliert modelliert. Individuelles Verhalten kann jedoch signifikante Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben (O'Brien & Gunay, 2017).
- Messgenauigkeit der Verbrauchsdaten: Die realen Verbrauchsdaten stammen aus Abrechnungen, die möglicherweise nicht die exakte Aufteilung zwischen Heizung, Kühlung und anderen Verbrauchern wiedergeben.

## 8.3 Methodische Einschränkungen und ihre Auswirkungen

### 8.3.1 Vereinfachte Annahmen in der Simulation

Die Simulationen basieren auf vereinfachten thermischen Modellen, die komplexe physikalische Prozesse nicht vollständig abbilden können.

*Auswirkungen:*

- Wärmebrücken und Luftdichtheit: Diese Faktoren wurden möglicherweise nicht detailliert berücksichtigt, obwohl sie erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch haben können (Feist, 2015).
- Interne Wärmequellen: Die interne Wärmeproduktion durch Geräte oder Beleuchtung wurde standardisiert angenommen, was zu Abweichungen führen kann.

### 8.3.2 Beschränkte Berücksichtigung von Anlagentechnik

Die Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (HLK) wurde in den Simulationen nur vereinfacht dargestellt.

*Auswirkungen:*

- Effizienz der Systeme: Unterschiede in der Effizienz und Steuerung der HLK-Systeme können erhebliche Auswirkungen auf den Energieverbrauch haben (Crawley et al., 2008).
- Regelstrategien: Komplexe Regelungsmechanismen oder intelligente Steuerungen wurden nicht modelliert, obwohl sie zur Optimierung beitragen könnten.

### 8.3.3 Nicht berücksichtigte ökologische und ökonomische Faktoren

Die Arbeit konzentrierte sich auf die energetische Performance und liess andere wichtige Aspekte unberücksichtigt.

*Auswirkungen:*

- Lebenszyklusanalyse: Die graue Energie der verwendeten Materialien oder die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus wurden nicht betrachtet (Cabeza et al., 2014).
- Kosteneffizienz: Wirtschaftliche Analysen wie Investitionskosten, Amortisationszeiten oder Betriebskosten fehlen, obwohl sie für die praktische Umsetzung wichtig sind (Mahlia et al., 2011).

## 8.4 Möglichkeiten zur Verbesserung und zukünftige Forschung

### 8.4.1 Verfeinerung der Simulationsmodelle

- Einsatz detaillierterer Software: Die Verwendung von Simulationsprogrammen wie EnergyPlus oder TRNSYS könnte eine präzisere Abbildung thermischer Prozesse und der Anlagentechnik ermöglichen (Crawley et al., 2008).
- Individuelle Nutzungsprofile: Durch die Erfassung realer Nutzungsdaten könnten die Simulationen besser an die tatsächlichen Verhältnisse angepasst werden.

#### 8.4.2 Erweiterte Datenerhebung

- Messungen vor Ort: Thermografische Analysen und Luftdichtheitsmessungen könnten helfen, Schwachstellen im Gebäude zu identifizieren.
- Langzeitmonitoring: Die Installation von Sensoren zur kontinuierlichen Erfassung von Energieverbräuchen und Klimadaten würde eine bessere Validierung der Simulationen ermöglichen (Foucquier et al., 2013).

#### 8.4.3 Integration weiterer Faktoren

- Ökonomische Bewertung: Eine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse könnte die Wirtschaftlichkeit der vorgeschlagenen Massnahmen bewerten.
- Soziale Akzeptanz: Die Einbeziehung der Bewohner:innen in den Planungsprozess und die Untersuchung ihrer Bereitschaft zur Verhaltensänderung könnten den Erfolg der Massnahmen steigern (Dieterle & Müller, 2019).

### 8.5 Überblick der methodischen Herausforderungen

Die angewandten Methoden lieferten wertvolle Einblicke in die energetische Performance des Gebäudes und die Wirkung verschiedener Anpassungsmassnahmen. Dennoch unterliegen sie bestimmten Einschränkungen, die die Generalisierbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen.

#### *Wesentliche Erkenntnisse:*

- Notwendigkeit detaillierterer Analysen: Vereinfachte Modelle bieten einen guten ersten Überblick, reichen jedoch nicht aus, um alle komplexen Wechselwirkungen abzubilden.
- Bedeutung qualitativer Daten: Präzise Eingangsdaten sind entscheidend für verlässliche Simulationsergebnisse.
- Interdisziplinärer Ansatz: Die Kombination technischer, ökonomischer und sozialer Aspekte ist notwendig, um ganzheitliche und praktikable Lösungen zu entwickeln.

### 8.6 Resümee aus der Methodenkritik

Die kritische Auseinandersetzung mit den verwendeten Methoden zeigt, dass trotz der erreichten Ergebnisse Verbesserungsbedarf besteht. Um die Energieeffizienz und Klimaresilienz von Gebäuden nachhaltig zu steigern, sind detailliertere Analysen und ein breiteres Methodenspektrum erforderlich.

#### *Empfehlungen:*

- Weiterentwicklung der Modelle: Einsatz fortschrittlicher Simulationswerkzeuge und Methoden zur genaueren Abbildung der realen Bedingungen.
- Ganzheitliche Betrachtung: Integration von Lebenszyklusanalysen, ökonomischen Bewertungen und sozialen Faktoren in zukünftige Untersuchungen.
- Praxisnahe Validierung: Durchführung von Feldstudien und Monitoring zur Überprüfung der Simulationsergebnisse und Anpassung der Modelle.

## 9 Literaturverzeichnis

- Attia, S., Hensen, J. L. M., Beltrán, L., & De Herde, A. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.028>
- Bianchi Janetti, M., Wullschleger, L., & Orehounig, K. (2019). Validation of Meteonorm Generated Typical Years for Building Energy Simulation in Different Climates. *Energy Procedia*, 158, 3509–3514. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.910>
- Boeykens, S. (2011a). Using 3D Design Software, BIM and Game Engines for Architectural Historical Reconstruction. *Proceedings of the 2011 14th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures*, 93–108. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0728-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0728-9_7)
- Boeykens, S. (2011b). Using SketchUp for BIM: capabilities, workflows, and extensions. *Proceedings of the 2011 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, 75–82.
- Bundesamt für Energie (BFE). (2020). *Erneuerbare Energien in der Schweiz – Statistik 2019*. Bundesamt für Energie.
- Bundesamt für Energie (BFE). (2021). *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2020*. Bundesamt für Energie.
- Bundesamt für Umwelt. (2017). *Hochwasser und Murgänge in der Schweiz 1972–2016*. BAFU. <https://www.bafu.admin.ch/>
- Bürger, F.-J. G. (2024). *Energieeffizientes Bauen: Grundlagen*. Springer Vieweg.
- Bürger, M. (2024). *Klimaanpassung und energetische Renovation*.
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416.

- Chopra, S. (2012). *Trimble to Acquire SketchUp from Google*. <https://www.trimble.com/news/release.aspx?id=042612a>
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661–673.
- Dieterle, G., & Müller, S. (2019). *Intelligente Gebäudetechnik und Automation*. Carl Hanser Verlag.
- DIN EN ISO 52016-1. (2018). *Energiebedarf und Innenraumtemperaturen von Gebäuden – Teil 1: Verfahren zur Berechnung der Stunden- und Monatswerte des Raumheiz- und -kühlbedarfs*. Beuth Verlag.
- Feist, W. (2015). *Passivhaus-Bauteilkatalog: Ökologisch bewertete Konstruktionen*. Springer-Verlag.
- Foucquier, A., Robert, S., Suard, F., Stéphan, L., & Jay, A. (2013). State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 272–288.
- Gill, Z. M., Tierney, M. J., Pegg, I. M., & Allan, N. (2010). Low-energy dwellings: The contribution of behaviours to actual performance. *Building Research & Information*, 38(5), 491–508.
- Gustavsen, A., Arasteh, D., Jelle, B. P., Goudey, H., & Hart, R. (2011). Key elements of and material performance targets for highly insulating window frames. *Energy and Buildings*, 43(10), 2583–2594. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.016>
- Hastings, R. (2015). *Solar Energy System Design: The Art and Science*. Earthscan.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- Klein, T., & Schubert, J., Klaus und Köhler. (2012). *Energieeffizientes Bauen: Grundlagen und Planungshilfen*. Carl Hanser Verlag.

- Kolokotsa, D., & Santamouris, S., Matheos und Zerefos. (2013). Techniques for heat island mitigation in Europe: A review. *Energy and Buildings*, 64, 58–68.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.030>
- Kuhn, T. E. (2017). *Solare Architektur: Konzepte, Technologien, Beispiele*. Fraunhofer IRB Verlag.
- Loonen, R. C. G. M., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. M. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.016>
- Mahlia, T. M. I., Razak, H. A., & Nursahida, M. A. (2011). Cost-benefit analysis and emission reduction of energy efficiency measures in residential buildings. *Energy and Buildings*, 43(9), 2349–2353.
- Meteotest. (2020). *Meteonorm Version 8.0*. <https://www.meteonorm.com>
- Müller, L., & Lehmann, S. (2018). *Plusenergiehäuser: Konzepte und Technologien*. Birkhäuser Verlag.
- Müller, L., & Meier, F. (2020). *Innovative Gebäudetechnologien für energieeffizientes Bauen*. Verlag Schweizer Technik.
- O'Brien, W., & Gunay, H. B. (2017). Influence of occupant behavior on energy performance and comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 753–757.
- OpenAI. (2024). *ChatGPT (Version Oktober 2024)* [Software]. <https://chat.openai.com/>
- Rasmussen, O., & Tobiasson, W. (2010). Energy Modeling in SketchUp with OpenStudio. *Proceedings of SimBuild 2010*, 142–149.
- Remund, J., Müller, S., Schilter, C., & Rüesch, A. (2015). *Meteonorm Handbook Part II: Theory*. Meteotest.
- Sefaira. (2021). *Sefaira: Building Performance Analysis Software*. [sefaira.sketchup.com](https://sefaira.sketchup.com). [sefaira.sketchup.com](https://sefaira.sketchup.com)

Sefaira Support. (2021). *Getting Started in Sefaira's Web App*. <https://support.sefaira.com/hc/en-us/articles/360001511871-Section-6-Getting-Started-in-Sefaira-s-Web-App>

Trimble Inc. (2021). *Trimble Connect*. <https://connect.trimble.com/>

Voss, K., & Musall, E. (2012). *Net Zero Energy Buildings: International Projects of Carbon Neutrality in Buildings*. Detail.

*World Energy Outlook 2021 – Analysis*. (2021, Oktober 13). IEA. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>

Zimmermann, M., Keller, B., & Hofmann, A. (2019). *Nachhaltige Architektur und Energieeffizienz*. Birkhäuser Verlag.

## 10 Abkürzungen

3D	Dreidimensional
AG	Aktiengesellschaft
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BFE	Bundesamt für Energie
BIM	Building Information Modeling
bzw.	beziehungsweise
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
d.h.	das heisst
EG	Erdgeschoss
EFZ	Eidgenössisches Fähigkeitszeugnis
EN	Europäische Norm
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
G_Dh	Diffuse horizontale Strahlung
G_Gh	Globale Strahlung auf horizontaler Fläche
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HF	Höhere Fachschule
HLK	Heizung, Lüftung, Klima
HLSK	Heizung, Lüftung, Sanitär, Klima
HSLU	Hochschule Luzern
Inc.	incorporated
IoT	Internet der Dinge
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
ISO	International Organization for Standardization
kWh	Kilowattstunde
kWh/m <sup>2</sup> a	Kilowattstunde pro Quadratmeter und Jahr
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
Low-E	Low-Emissivity (Niedrige Emissivität)
mm	Millimeter

---

PCM	Phase-Change Material (Phasenwechselmaterial)
Pz RS	Panzer Rekrutenschule
RCP	Representative Concentration Pathway (Repräsentativer Konzentrationspfad)
RR	Niederschlagsmenge
SAQ	Schweizerische Vereinigung für Qualitäts- und Management-Systeme
STS AG	Spital Thun-Simmental Aktiengesellschaft
Ta	Lufttemperatur
TEKO	Technische Kaufmännische Schule
TMY	Typisches meteorologisches Jahr
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
u.a.	unter anderem
UG	Untergeschoss
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
Web-App	World Wide Web - Anwendungssoftware
°C	Grad Celsius

## 11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SketchUp Modell in Landschaft Quelle: Eigene Aufnahme .....	1
Abbildung 2: SketchUP Zeichnung 1. + 2. UG, roh .....	21
Abbildung 3: SketchUP Zeichnung 1. + 2. UG + EG, roh.....	21
Abbildung 4: SketchUP Zeichnung komplettes Haus, roh.....	22
Abbildung 5: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, Wohnzimmer.....	22
Abbildung 6: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, Küche .....	23
Abbildung 7: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, Bad EG.....	23
Abbildung 8: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, Dachstock.....	23
Abbildung 9: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, 1. UG Büro und Bad .....	24
Abbildung 10: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, 2. UG Werkraum.....	24
Abbildung 11: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, 1. UG Büro bzw. Schlafzimmer .....	24
Abbildung 12: SketchUP Zeichnung Einrichtung Haus, 2. UG Technikraum.....	25
Abbildung 13: SketchUP Zeichnung Landschaftsansicht von Ostnordost.....	25
Abbildung 14: SketchUP Zeichnung Landschaftsansicht von Westsüdwest .....	26
Abbildung 15: SketchUP Variante 1 Entfernen der Terrasse.....	27
Abbildung 16: SketchUP Variante 2 Grössere Fensterfläche auf der Südseite.....	28
Abbildung 17: SketchUP Variante 3 Reduzierung der Fensterfläche .....	29
Abbildung 18: SketchUP Variante 4 Glasfläche Allgemein erhöhen .....	30
Abbildung 19: SketchUP Variante 5 Verwendung von energieeffizienterer Verglasung.....	31
Abbildung 20: SketchUP Variante 6 Erhöhung der Verschattung des Daches.....	32
Abbildung 21: Sefaira-Daylighting-snapshot_Ist-Zustand Quelle: Sefaira Plugin .....	34
Abbildung 22: Sefaira-Monthly_energy_Ist-Zustand Quelle: Sefaira WebApp.....	35
Abbildung 23: Sefaira-Annual_Use_energy_Ist-Zustand Quelle: Sefaira WebApp.....	35
Abbildung 24: Sefaira-Daylighting-snapshot_Variante 1 Quelle: Sefaira Plugin.....	36
Abbildung 25: Sefaira-Monthly_energy_Variante 1 Quelle: Sefaira WebApp .....	37
Abbildung 26: Sefaira-Annual_Use_energy_Variante 1 Quelle: Sefaira WebApp .....	37
Abbildung 27: Sefaira-Daylighting-snapshot_Variante 2 Quelle: Sefaira Plugin.....	38
Abbildung 28: Sefaira-Monthly_energy_Variante 2 Quelle: Sefaira WebApp .....	39
Abbildung 29: Sefaira-Annual_Use_energy_Variante 2 Quelle: Sefaira WebApp .....	39
Abbildung 30: Sefaira-Daylighting-snapshot_Variante 3 Quelle: Sefaira Plugin.....	40
Abbildung 31: Sefaira-Monthly_energy_Variante 3 Quelle: Sefaira WebApp .....	41
Abbildung 32: Sefaira-Annual_Use_energy_Variante 3 Quelle: Sefaira WebApp .....	41
Abbildung 33: Sefaira-Daylighting-snapshot_Variante 4 Quelle: Sefaira Plugin.....	42
Abbildung 34: Sefaira-Monthly_energy_Variante 4 Quelle: Sefaira WebApp .....	43
Abbildung 35: Sefaira-Annual_Use_energy_Variante 4 Quelle: Sefaira WebApp .....	43

Abbildung 36: Sefaira-Daylighting-snapshot_Variante 5 Quelle: Sefaira Plugin.....	44
Abbildung 37: Sefaira-Monthly_energy_Variante 5 Quelle: Sefaira WebApp .....	45
Abbildung 38: Sefaira-Annual_Use_energy_Variante 5 Quelle: Sefaira WebApp .....	45
Abbildung 39: Sefaira-Daylighting-snapshot_Variante 6 Quelle: Sefaira Plugin.....	46
Abbildung 40: Sefaira-Monthly_energy_Variante 6 Quelle: Sefaira WebApp .....	47
Abbildung 41: Sefaira-Annual_Use_energy_Variante 6 Quelle: Sefaira WebApp .....	47
Abbildung 42: Mittlere tägliche Globalstrahlung auf die Fassaden in Spiez (Aktuell 2005) .....	48
Abbildung 43: Globalstrahlung auf horizontaler Fläche (G_Gh), der diffusen horizontalen Strahlung (G_Dh) und der Diffusanteil (Aktuell 2005).....	49
Abbildung 44: Temperaturverlauf über ein Jahr (Aktuell 2005).....	50
Abbildung 45: Niederschlagsmenge und Regentage (Aktuell 2005).....	50
Abbildung 46: Temperaturverlauf über ein Jahr (RCP 2.6 2100).....	51
Abbildung 47: Globalstrahlung auf horizontaler Fläche (G_Gh), der diffusen horizontalen Strahlung (G_Dh) und der Diffusanteil (RCP 2.6 2100) .....	52
Abbildung 48: Niederschlagsmenge und Regentage (RCP 2.6 2100) .....	52
Abbildung 49: Temperaturverlauf über ein Jahr (RCP 4.5 2100).....	53
Abbildung 50: Globalstrahlung auf horizontaler Fläche (G_Gh), der diffusen horizontalen Strahlung (G_Dh) und der Dif-fusanteil (RCP 4.5 2100).....	53
Abbildung 51: Niederschlagsmenge und Regentage (RCP 4.5 2100) .....	54
Abbildung 52: Temperaturverlauf über ein Jahr (RCP 8.5 2100).....	55
Abbildung 53: Globalstrahlung auf horizontaler Fläche (G_Gh), der diffusen horizontalen Strahlung (G_Dh) und der Dif-fusanteil (RCP 8.5 2100).....	55
Abbildung 54: Niederschlagsmenge und Regentage (RCP 8.5 2100) .....	56
Abbildung 55: Normierte klimatische Faktoren über ein Jahr - Ist-Zustand.....	58
Abbildung 56: Berechneter vs. Tatsächlicher Energieverbrauch (Ist-Zustand - Aktuell).....	59
Abbildung 57: Energieverbrauch Ist-Zustand (Aktuell vs. RCP 2100) .....	62
Abbildung 58: Interpretation des Ist-Zustands und der Varianten im aktuellen Klima .....	63
Abbildung 59: Energieverbrauch Variante 1 (Aktuell vs. RCP 2100).....	64
Abbildung 60: Energieverbrauch Variante 2 (Aktuell vs. RCP 2100).....	64
Abbildung 61: Energieverbrauch Variante 3 (Aktuell vs. RCP 2100).....	65
Abbildung 62: Energieverbrauch Variante 4 (Aktuell vs. RCP 2100).....	65
Abbildung 63: Energieverbrauch Variante 5 (Aktuell vs. RCP 2100).....	66
Abbildung 64: Energieverbrauch Variante 6 (Aktuell vs. RCP 2100).....	66
Abbildung 65: Sefaira-Monthly_energy_Ist-Zustand Quelle: Sefaira WebApp.....	67
Abbildung 66: Energieverbrauch an der Bubenbergstrasse 7 in 3700 Spiez Quelle: Heiner Schläfli ..	67
Abbildung 67: Stromverbrauch an der Bubenbergstrasse 7 in 3700 Spiez Quelle: Heiner Schläfli .....	68
Abbildung 68: Vergleich des simulierten und realen Jahresenergieverbrauchs.....	71



## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufarbeitung der Daten mit Energieverbrauch (Aktuell 2005).....	57
Tabelle 2: Aufarbeitung der Daten mit Energieverbrauch (RCP 2.6 2100) .....	60
Tabelle 3: Aufarbeitung der Daten mit Energieverbrauch (RCP 4.5 2100) .....	60
Tabelle 4: Aufarbeitung der Daten mit Energieverbrauch (RCP 8.5 2100) .....	61
Tabelle 5: Monatliche Energieverbräuche der Varianten unter den RCP-Szenarien 4.5 im Vergleich (in kWh).....	70

## Persönliches Schlusswort, Verdankungen

Am Schluss dieser Arbeit möchte ich einige persönliche Gedanken teilen und mich bei den Menschen bedanken, die mich auf diesem Weg unterstützt haben. Die Auseinandersetzung mit der energieeffizienten und klimaresilienten Gestaltung des Einfamilienhauses an der Bubenbergstrasse 7 in Spiez war eine spannende und lehrreiche Reise. Dabei habe ich nicht nur fachlich viel gelernt, sondern auch wertvolle Einblicke in die Bedeutung nachhaltiger Architektur gewonnen.

Besonders herausfordernd waren die komplexen Simulationen, die unübersichtlichen Excel-Zeilen und die ständige Anpassung der Modelle an neue Erkenntnisse. Doch genau diese Herausforderungen haben mich motiviert, tiefer zu graben und kreative Lösungen zu finden. Ich bin stolz darauf, wie sich die verschiedenen Anpassungsvarianten entwickelt haben und wie sie zur Optimierung des Energieverbrauchs beitragen können.

### *Danksagung*

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich während der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben. Ein grosses Dankeschön geht an meine Familie und Freunde. Eure unerschütterliche Unterstützung und euer Verständnis haben mir in stressigen Zeiten Kraft gegeben und mich motiviert, dranzubleiben.

Diese Arbeit ist nicht nur ein akademischer Meilenstein, sondern auch ein Zeugnis der Gemeinschaft und Unterstützung, die mich auf diesem Weg begleitet hat. Vielen Dank!

## Eigenständigkeitserklärung

Ich bestätige, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst und alle benutzten Quellen gekennzeichnet habe. Diese Arbeit wurde weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits einer Prüfungskommission vorgelegt.

Ort / Datum / Unterschrift:

Bern, Montag, 28. Oktober 2024

Name / Vorname:

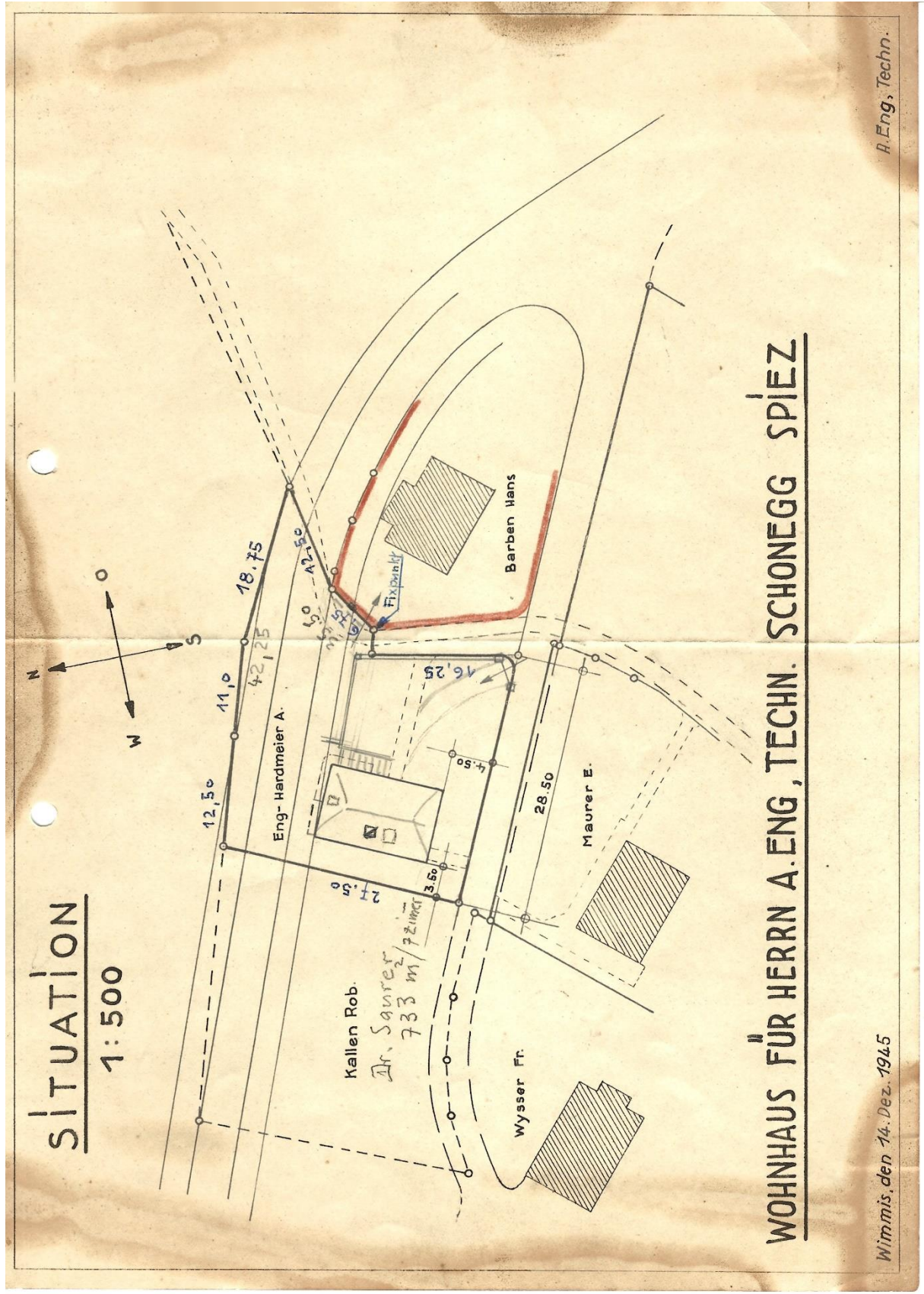
Schläfli Silvan Michael



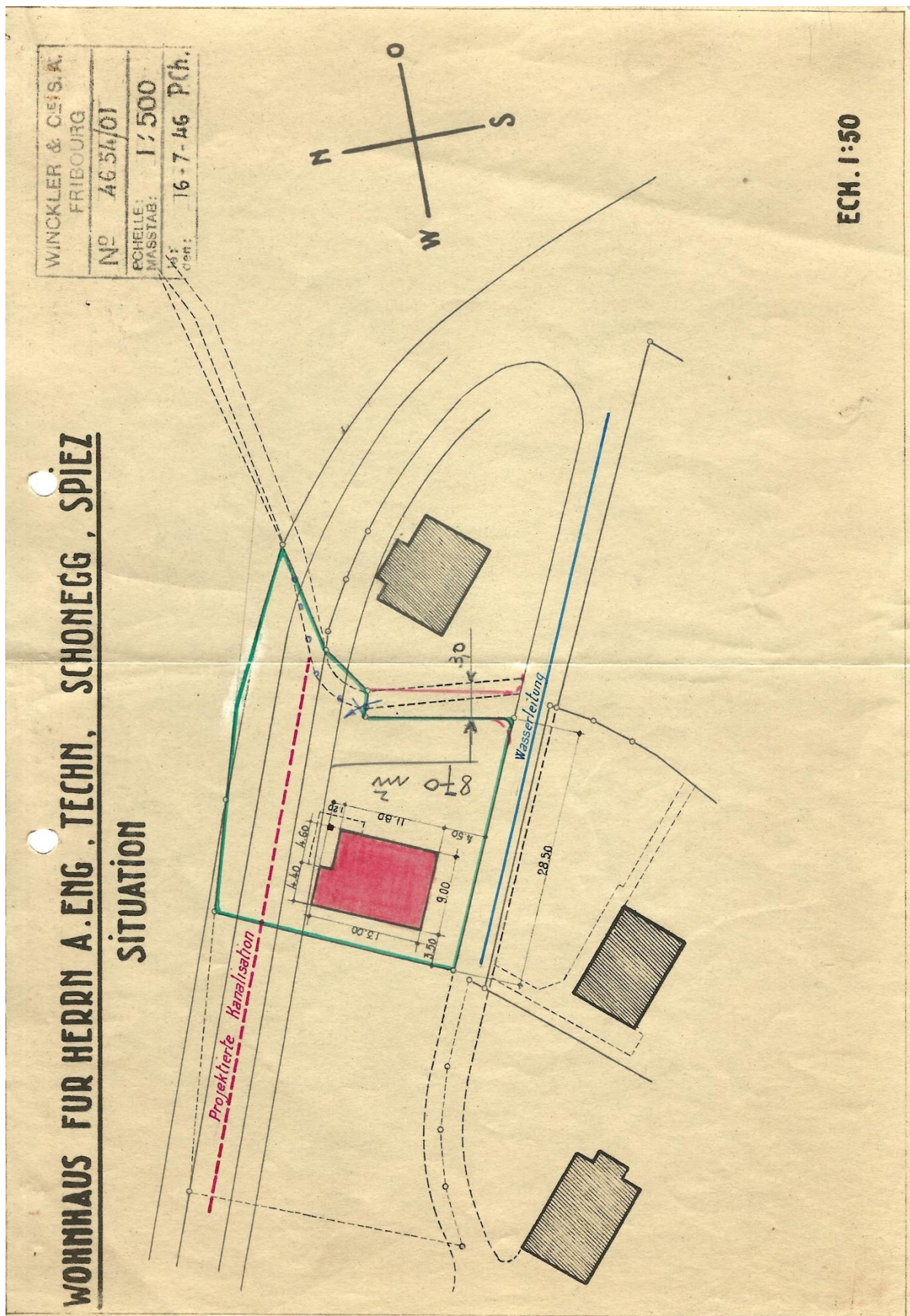
# Anhang

## I. Pläne Gebäude

### a. Situation 1:500 (14. Dezember 1945)

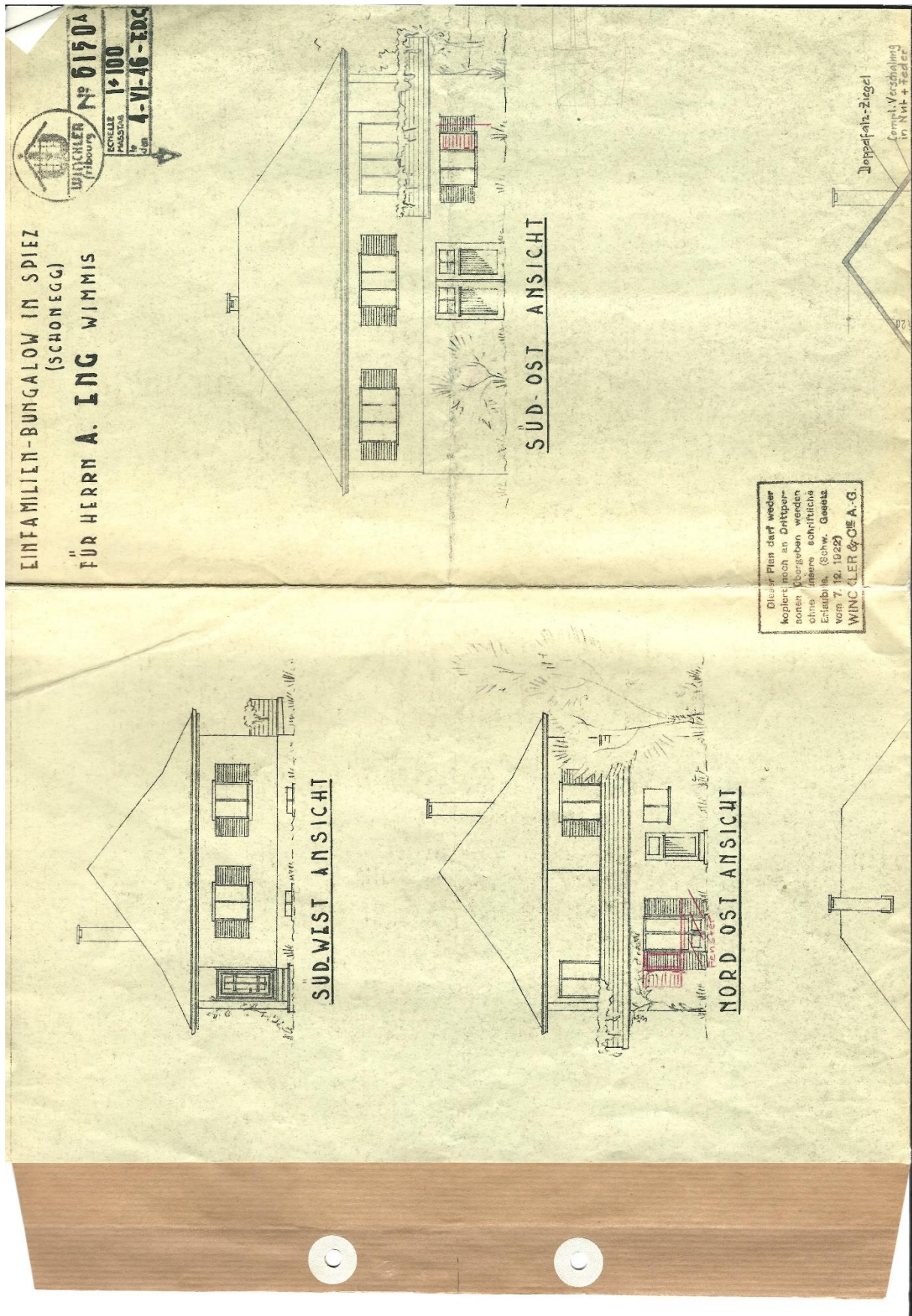


b. Situation Wohnhaus M 1:500 (16. Juli 1946)



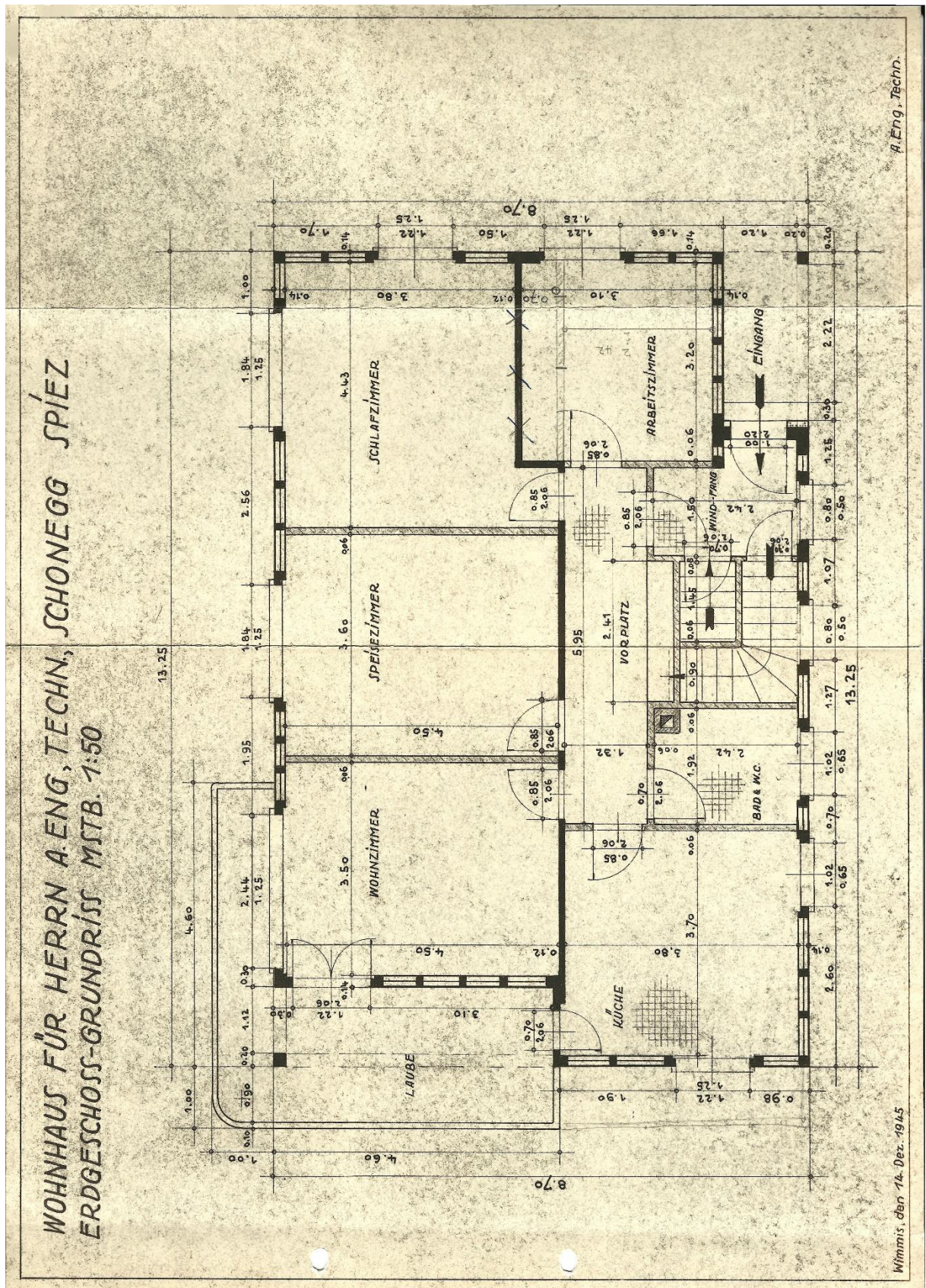


d. Einfamilienhaus-Bungalow in Spiez (Schonegg)



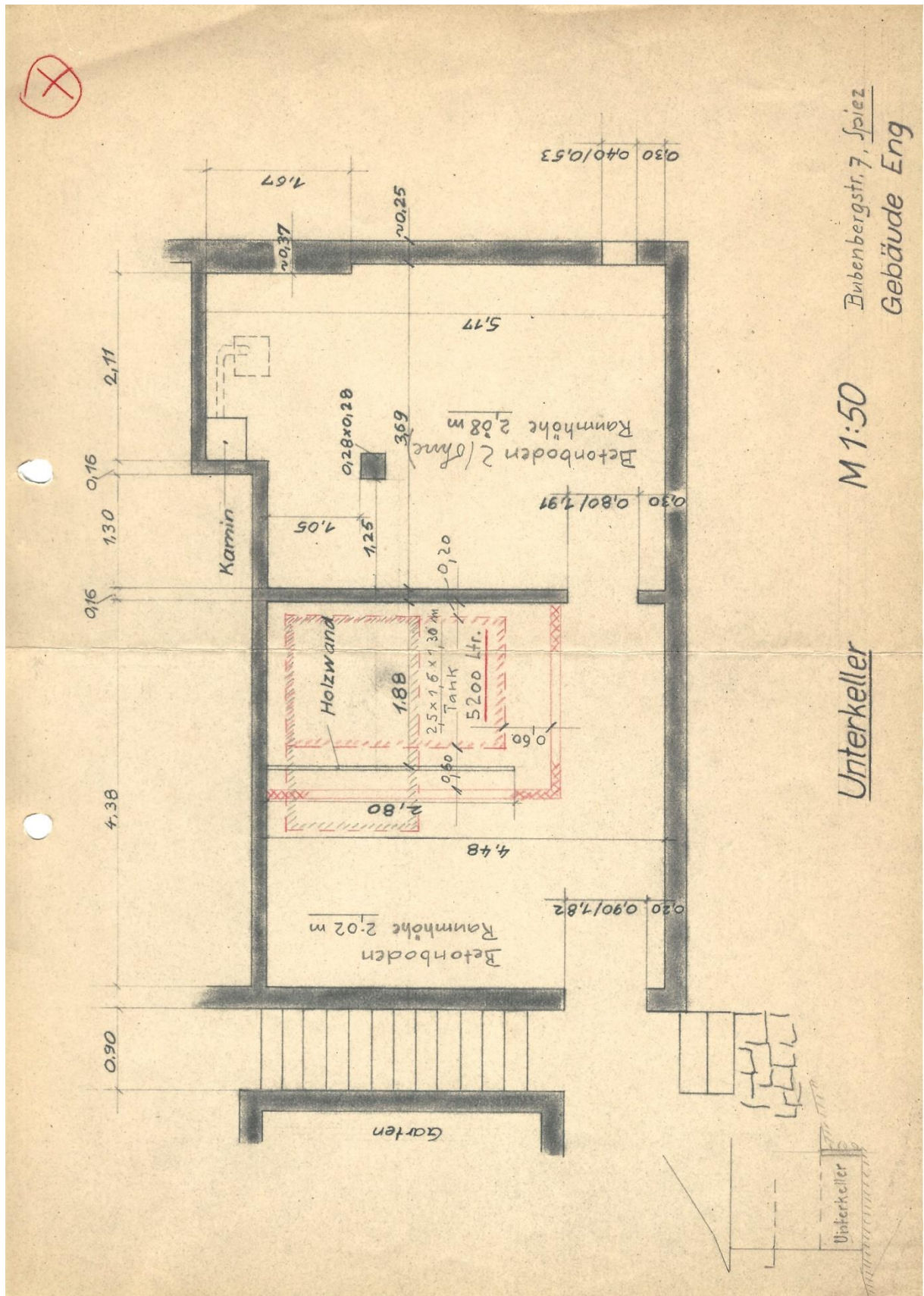


e. Erdgeschoss Grundriss M 1:50 (14. Dezember 1945)





g. Unterkeller Grundriss M 1:50

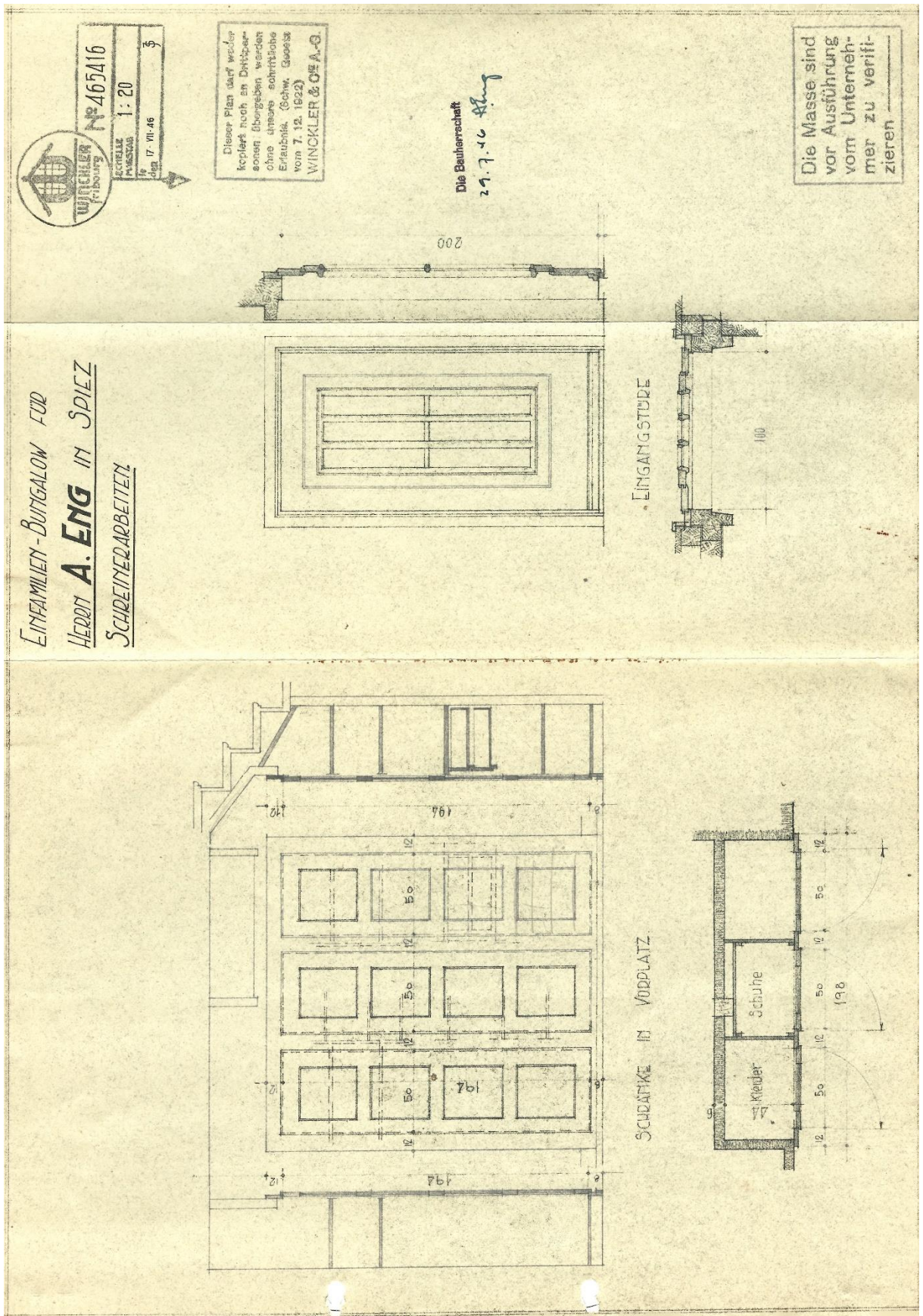


Bubenbergstr, 7, Spiez  
Gebäude Eng

M 1:50

Unterkeller

h. Schreinerarbeit M 1:20 (29. Juli 1946)





j. Ansichten Terrasse (23. Juli 2015)

# Nordostfassade

Wimmis, 02. April 2015  
rev. 13. Mai 2015  
rev. 23. Juli 2015

**Legende**

- Bestehend
- Abbruch
- Neu

**Baueingabe**

Genehmigter Plan  
31. JULI 2015  
Abteilung bau Spiez  
*Hummer*

Die Bauherrschaft: *[Signature]*

Der Projektverfasser: *[Signature]*

**LEHNHERR ARCHITEKTUR AG**

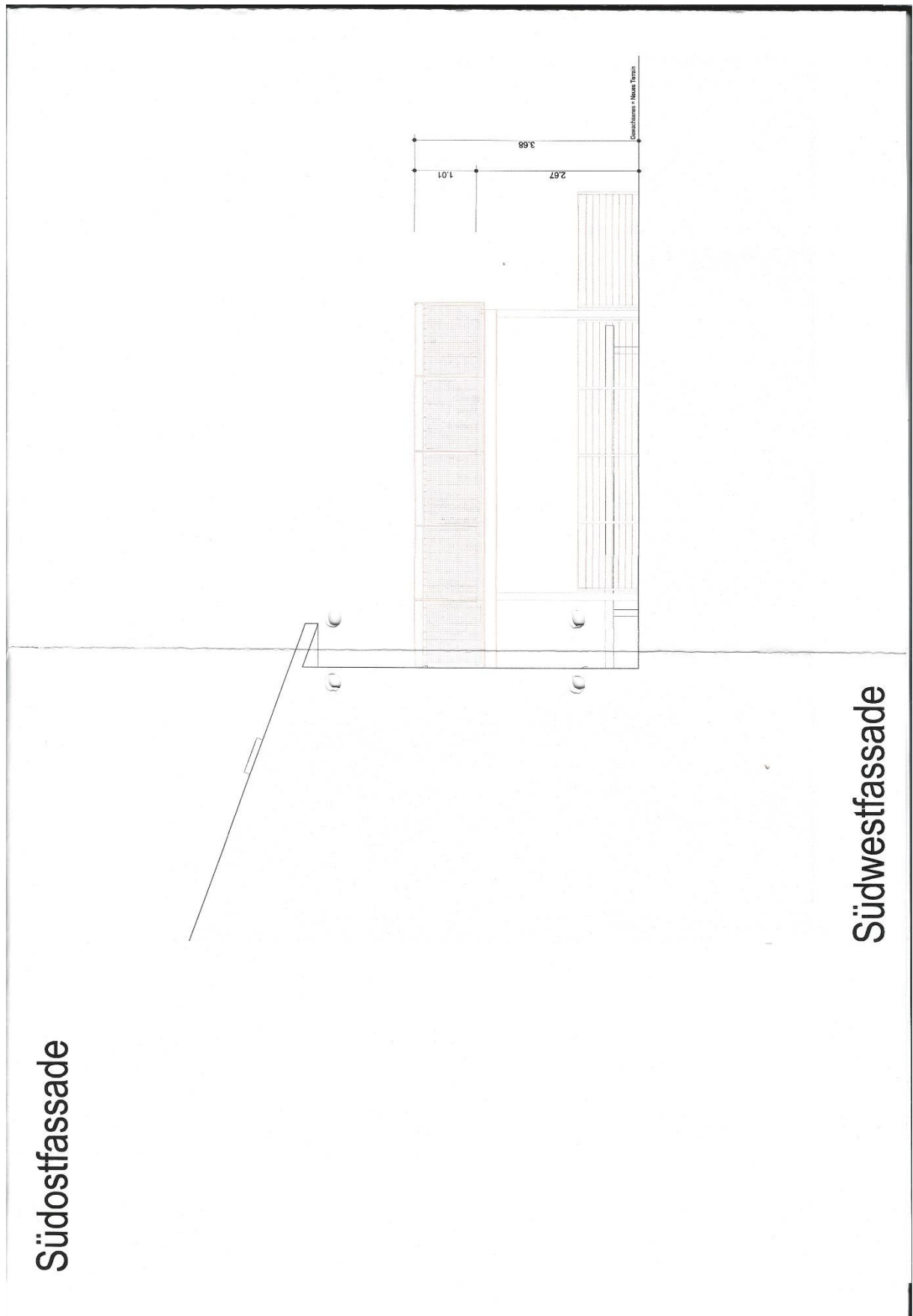
Planung und Baumanagement

Philippus 17  
PF 311, CH-3752 Wimmis  
Telefon +41 33 857 24 75  
info@lehnerrarchitektur.ch  
www.lehnerrarchitektur.ch

C. Müller + H. Schläfli, Bubenbergr. 7, 3700 Spiez  
Anbau Terrasse

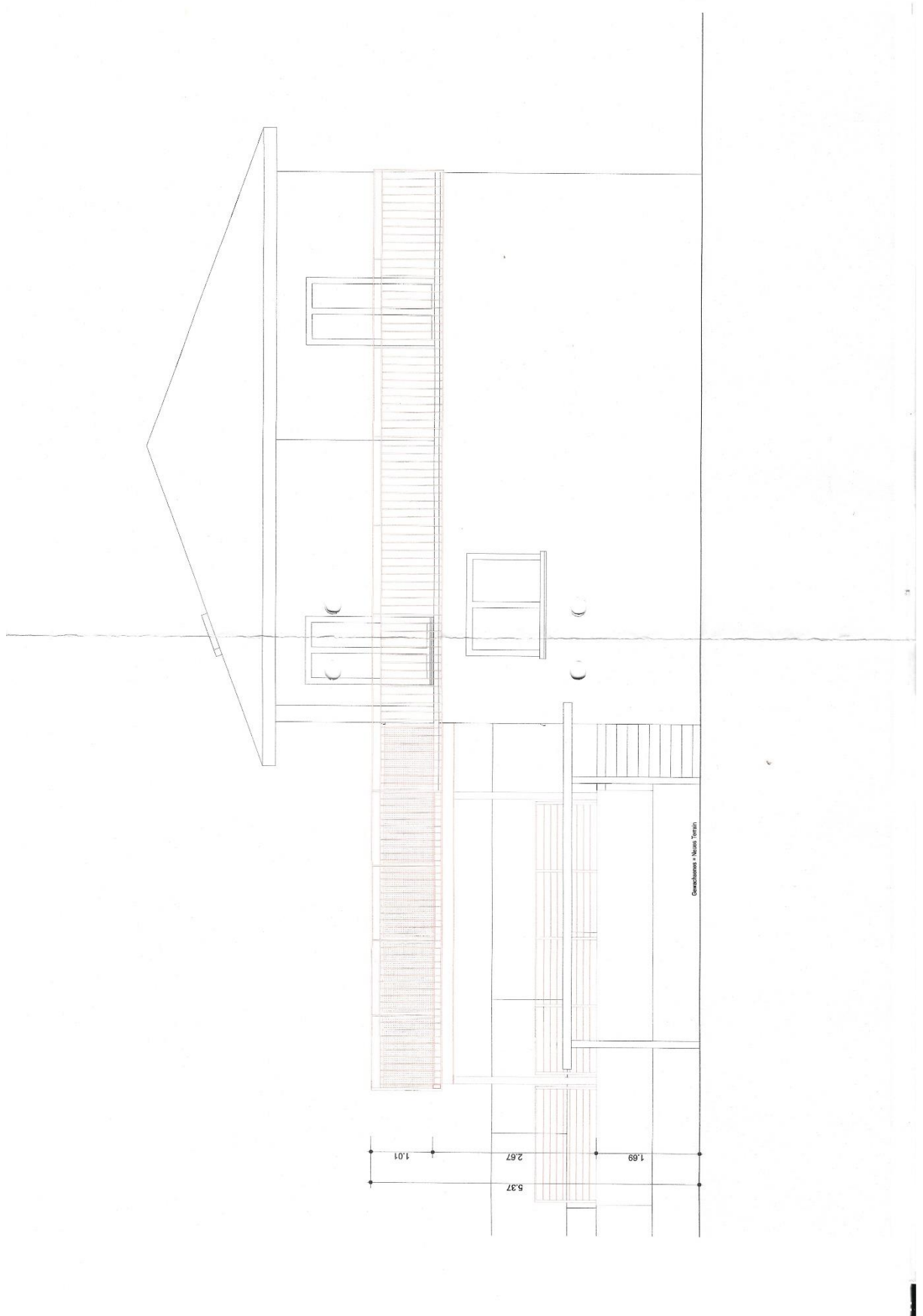
Ansichten

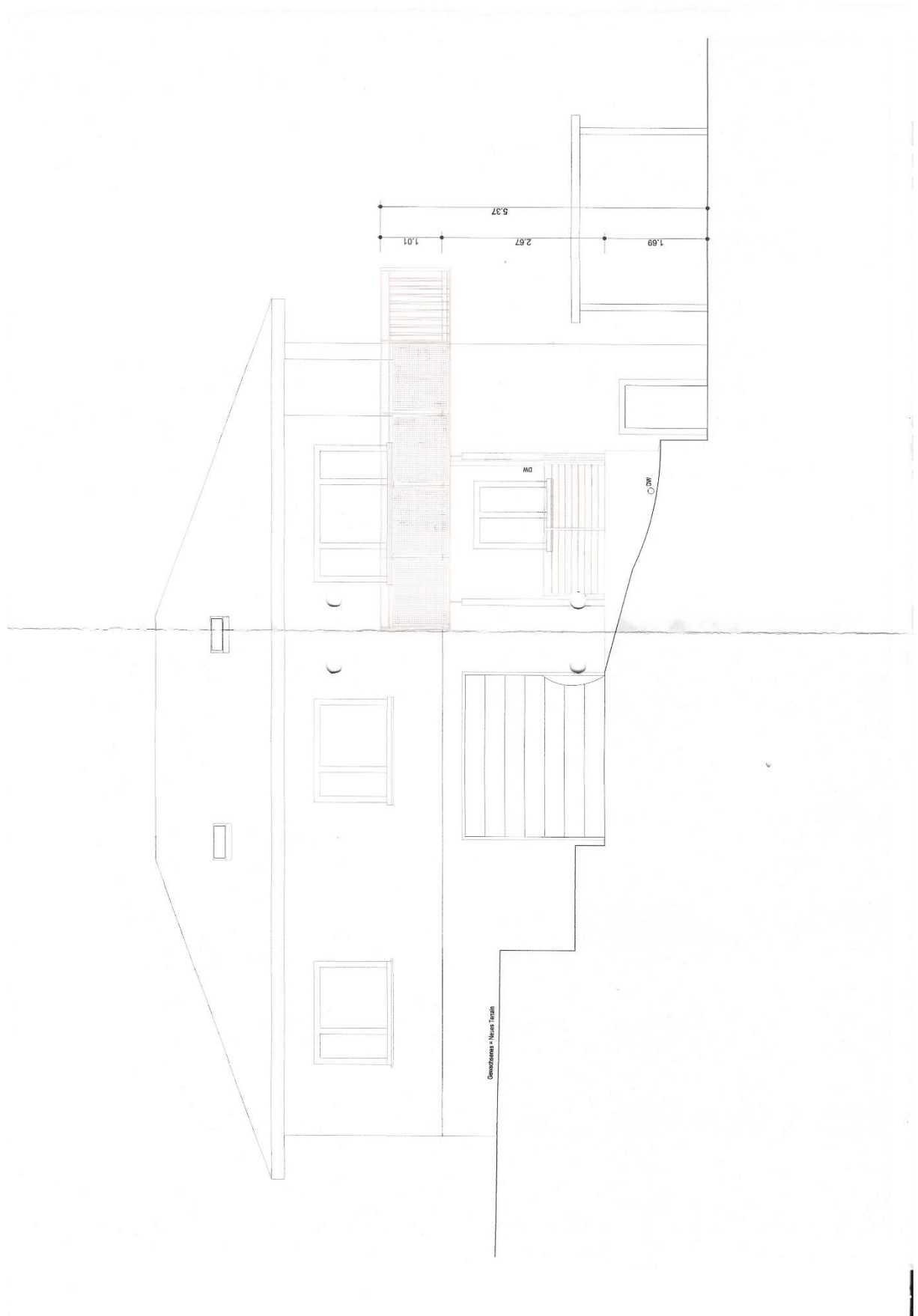
Gezeichnet	EH
Maßstab	1:50
Format	84/60
Datum	02.04.2015
Plan Nr.	765-11-2



Südostfassade

Südwestfassade





k. Grundriss und Schnitt Terrasse (23. Juli 2015)

Grundriss EG

**Legende**

- Bestehend
- Abbruch
- Neu

**Genehmigter Plan**  
**31. JULI 2015**  
 Abteilung Bau-Spiez  
*Hummel*



Wimmis, 02. April 2015  
 rev. 13. Mai 2015  
 rev. 23. Juli 2015

**Raueingabe**

Die Bauherrenschäft:

Der Projektverfasser:

**LEHNHERR ARCHITEKTUR AG**

Planung und Baumanagement

Pinakgasse 17  
 PF 31 / CH-3752 Wimmis  
 Telefon ++41 33 857 24 75  
 info@lehnerr-architektur.ch  
 www.lehnerr-architektur.ch

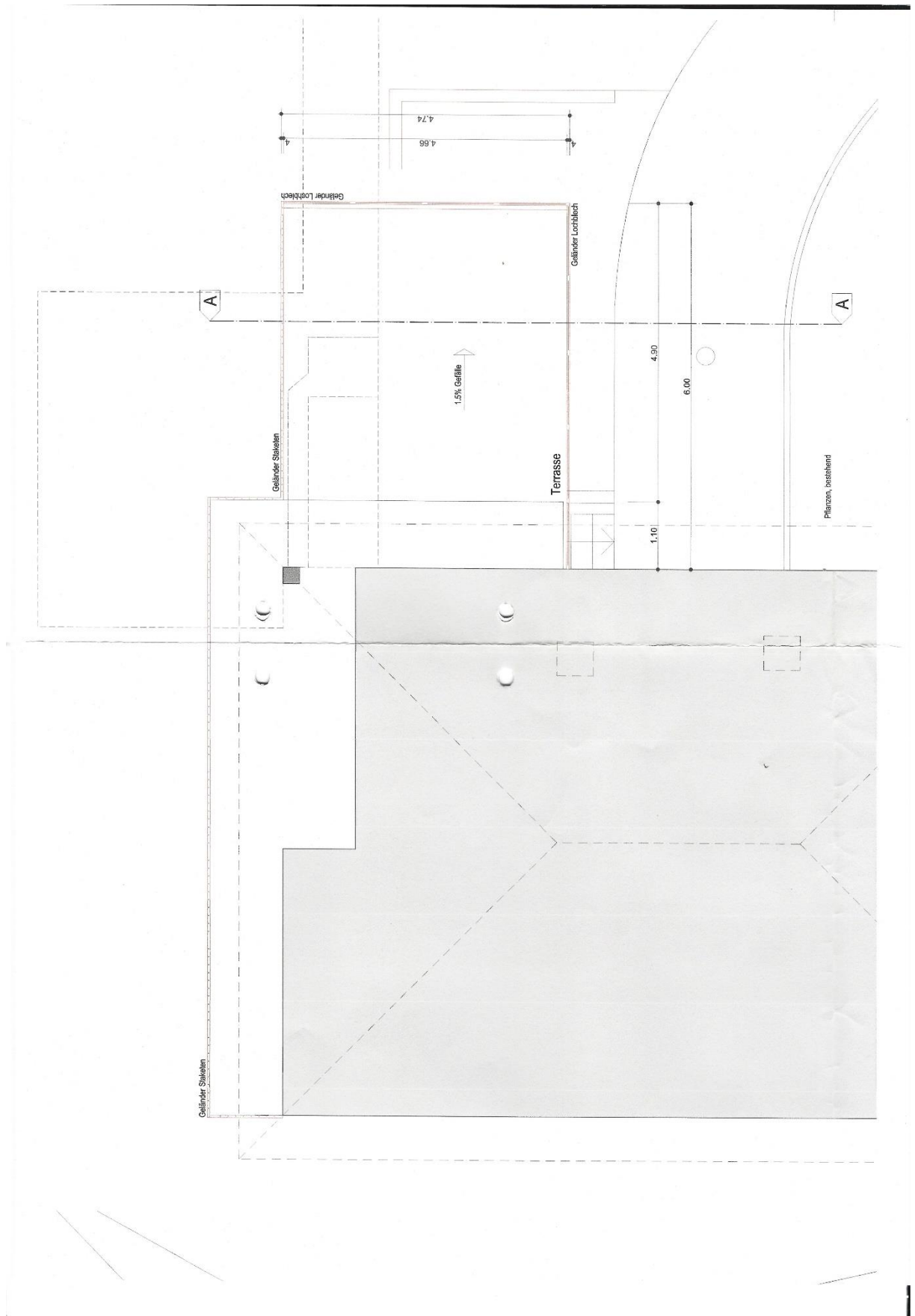
C. Müller + H. Schläfli, Bubenbergrstr. 7, 3700 Spiez  
 Anbau Terrasse

**Grundrisse und Schnitt**

Gezeichnet:	EH
Maßstab:	1:50
Format:	84/60
Datum:	02.04.2015
Plan-Nr.:	765-10-2

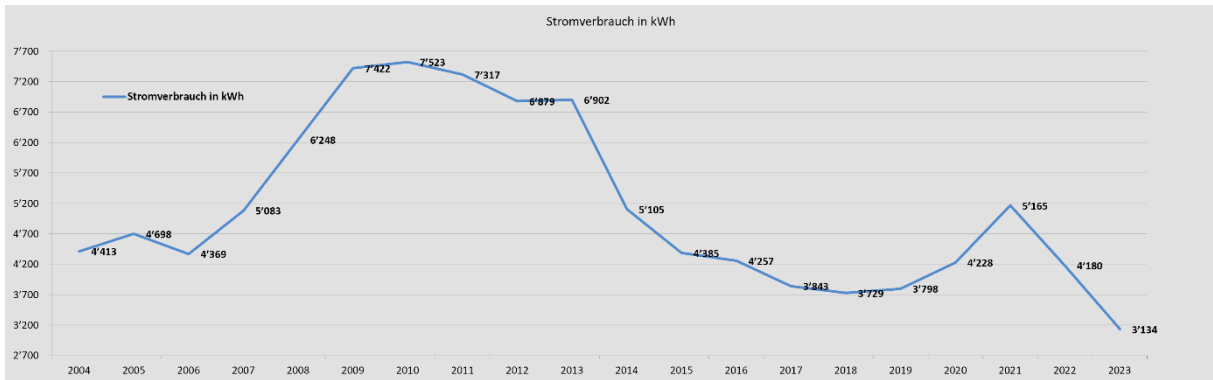




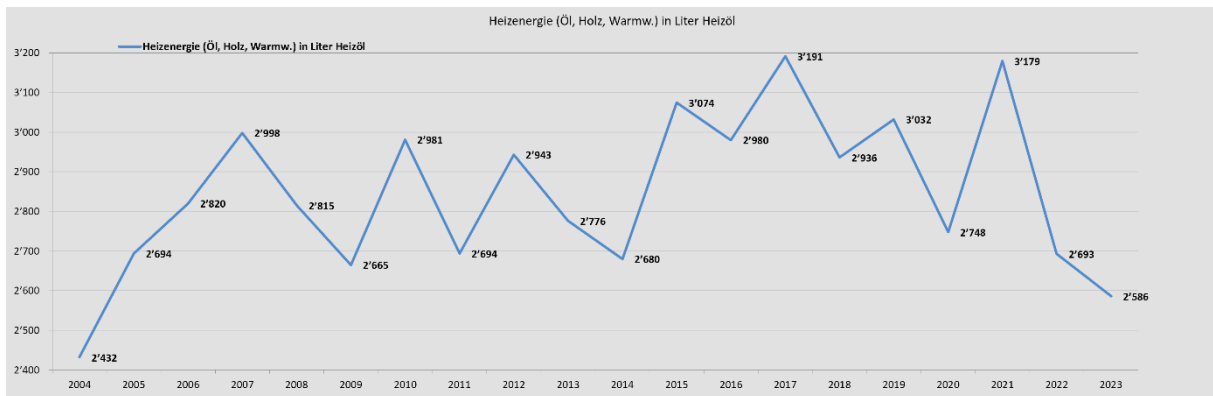


## II. Gemessene Daten aus Spiez

### a. Stromverbrauch über die Jahre in kWh (Quelle: Heiner Schläfli)

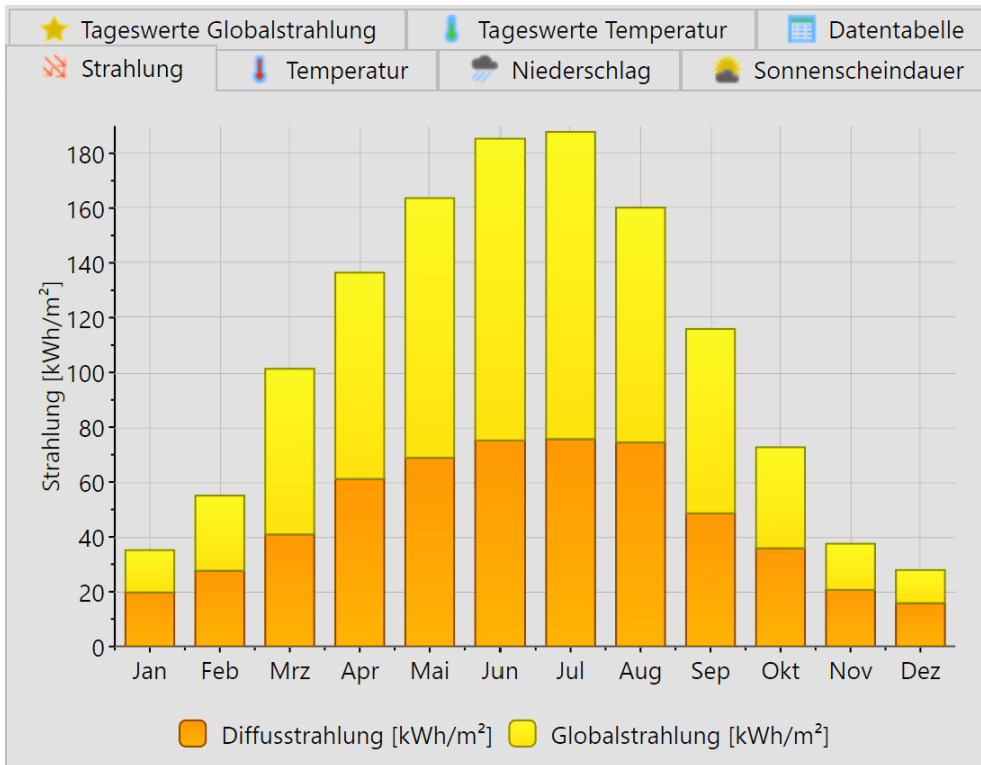


### b. Heizenergie über die Jahre in Liter Heizöl (Quelle: Heiner Schläfli)

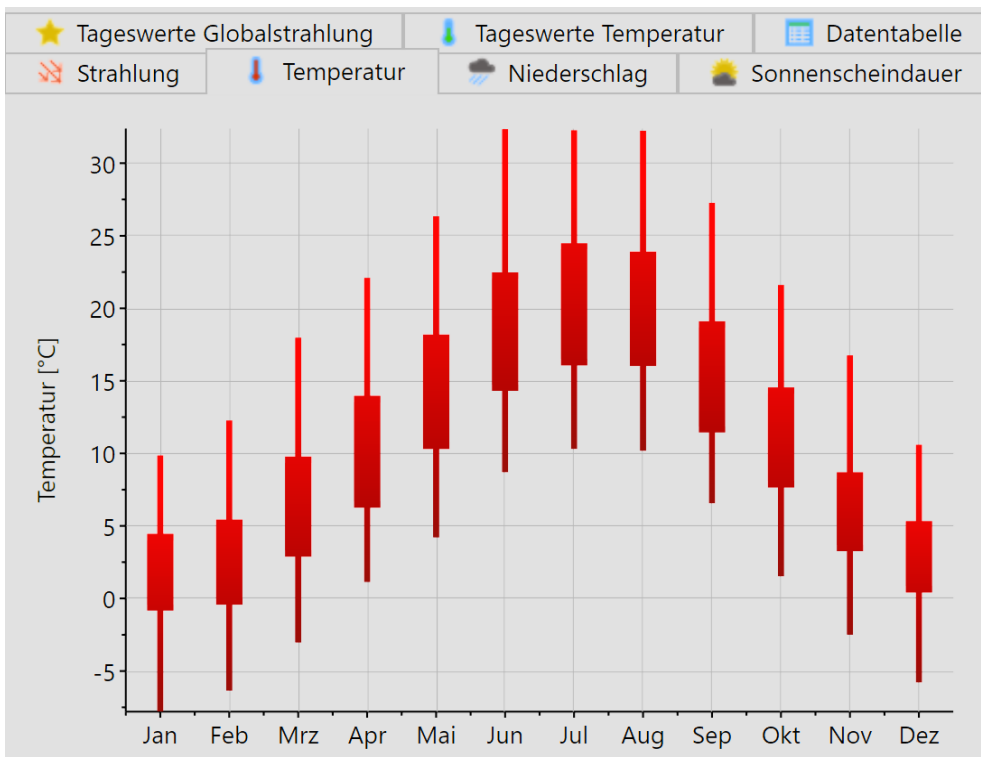


### III. Meteonorm

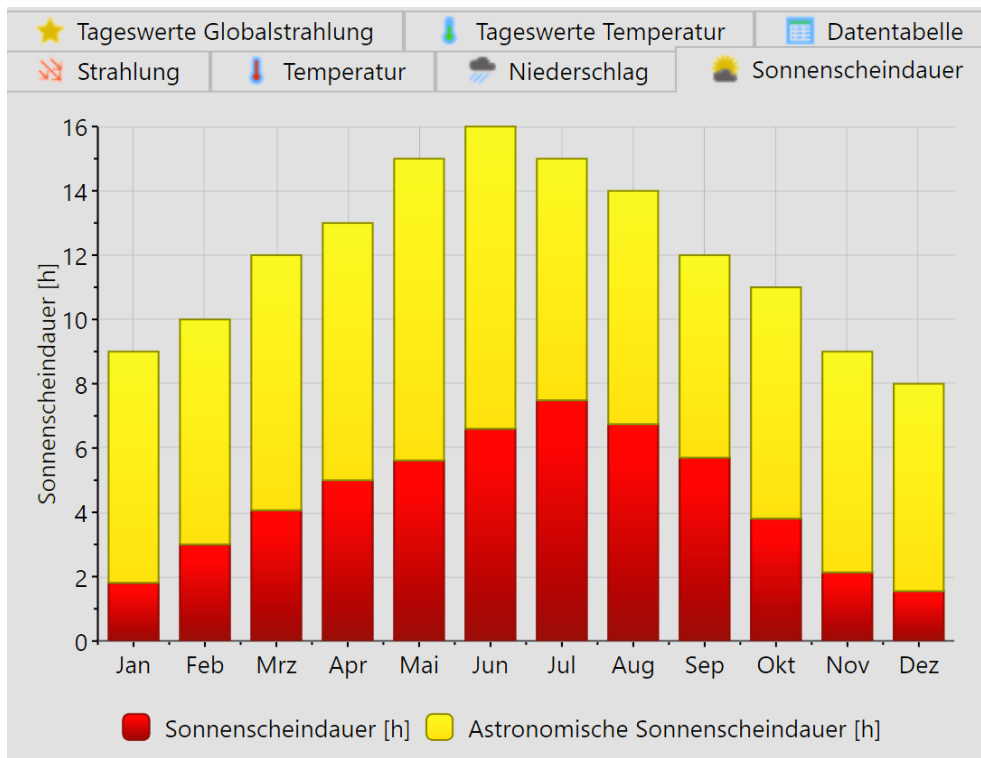
#### a. Strahlung Aktuell 2005 (Quelle: Meteonorm)



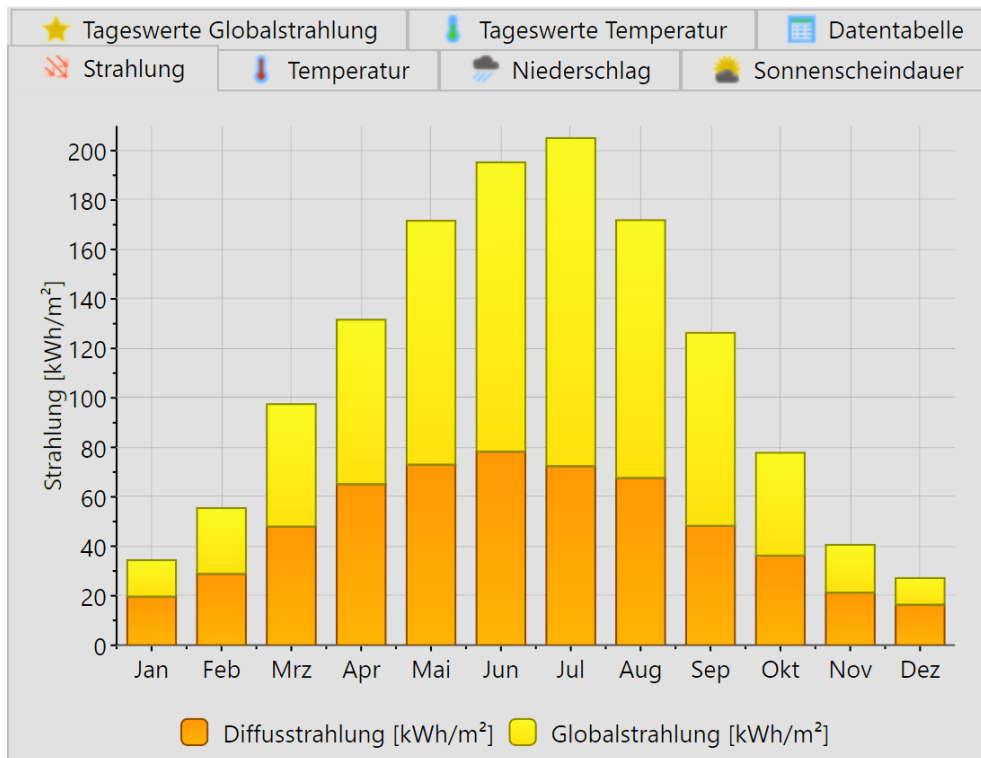
#### b. Temperatur Aktuell 2005 (Quelle: Meteonorm)



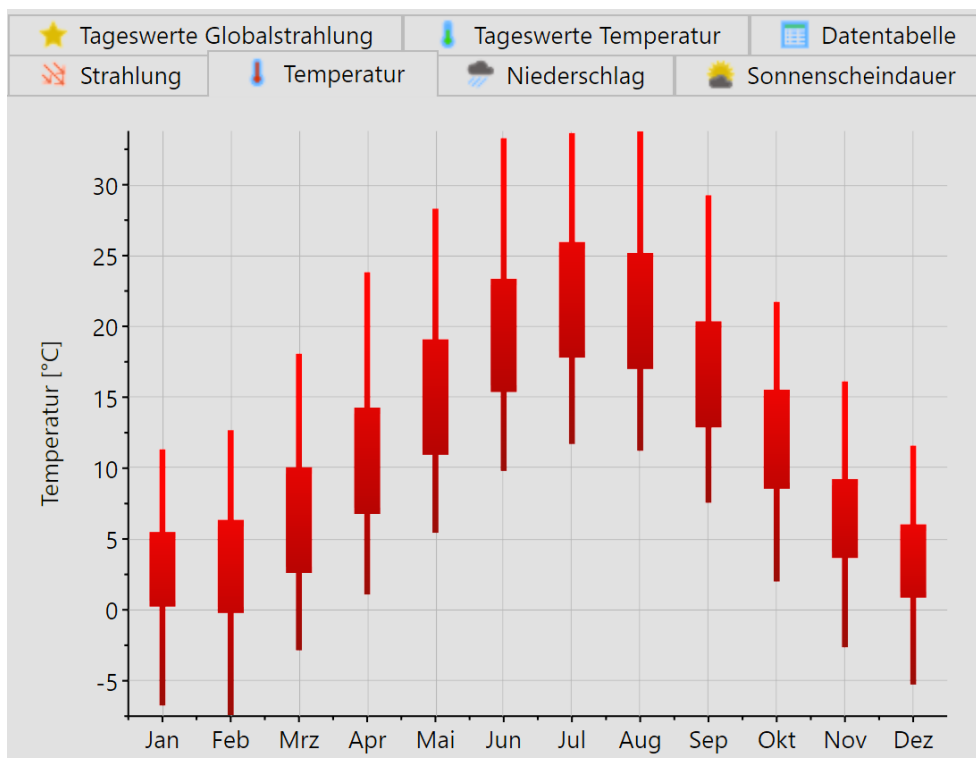
c. Sonnenscheindauer Aktuell 2005 (Quelle: Meteonorm)



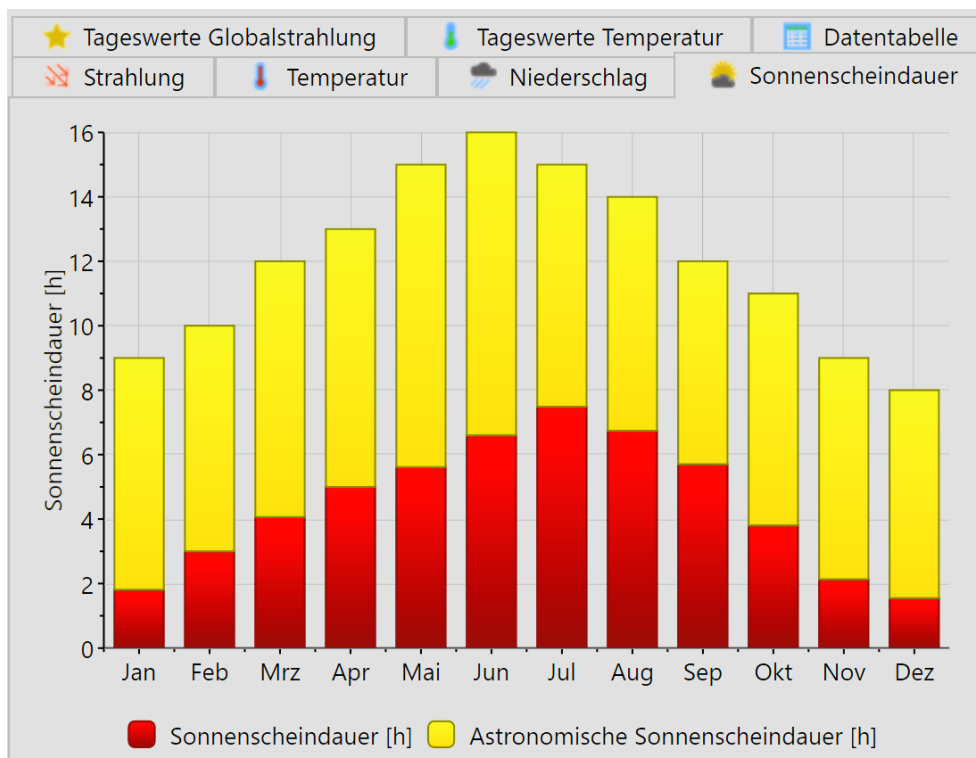
d. Strahlung RCP 2.6 2100 (Quelle: Meteonorm)



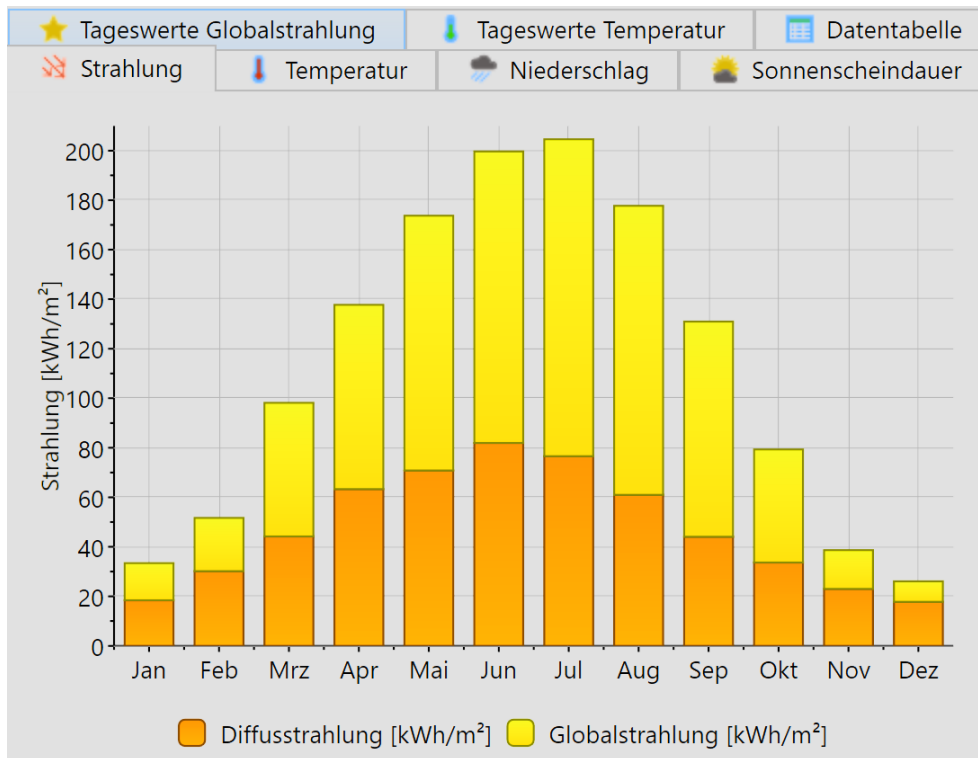
e. Temperatur RCP 2.6 2100 (Quelle: Meteonorm)



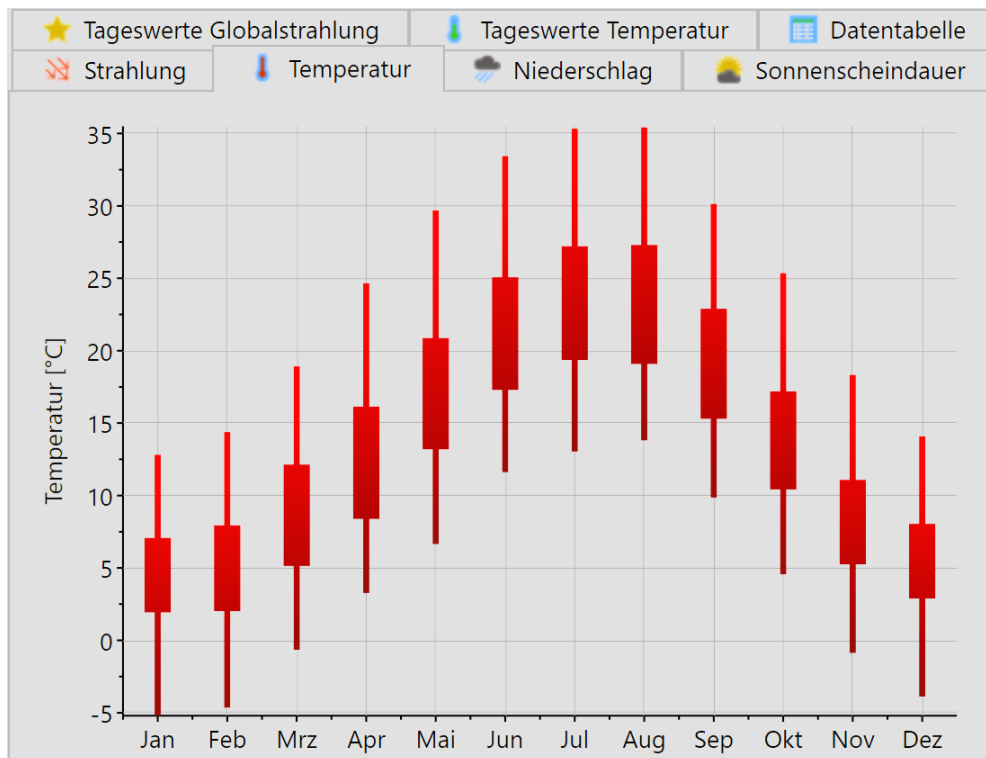
f. Sonnenscheindauer RCP 2.6 2100 (Quelle: Meteonorm)



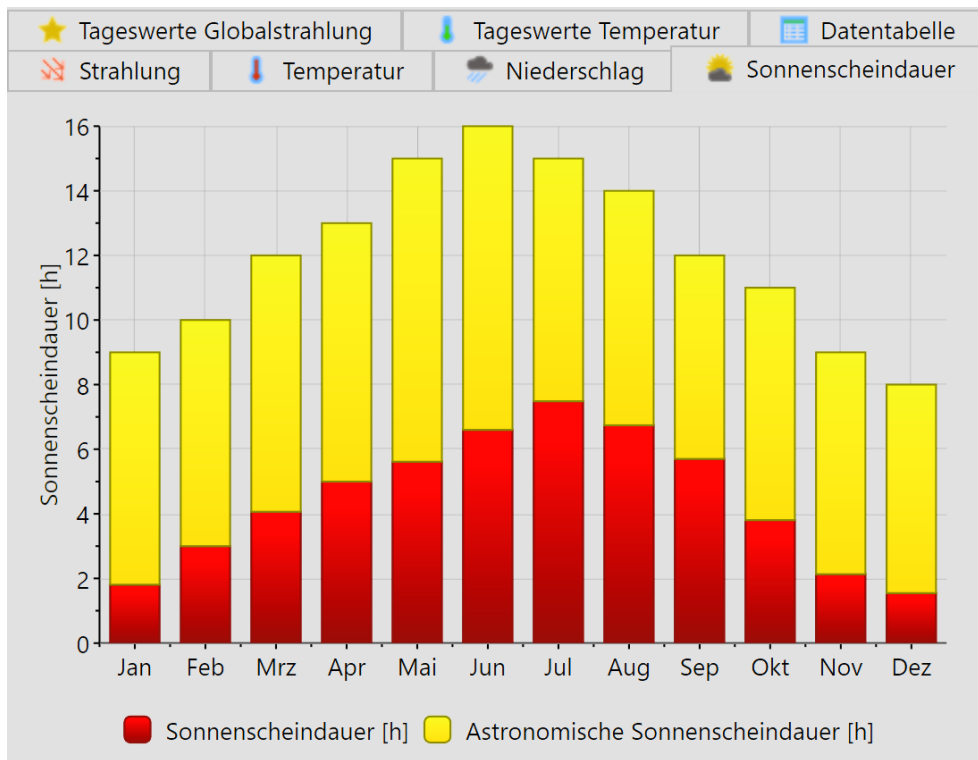
g. Strahlung RCP 4.5 2100 (Quelle: Meteonorm)



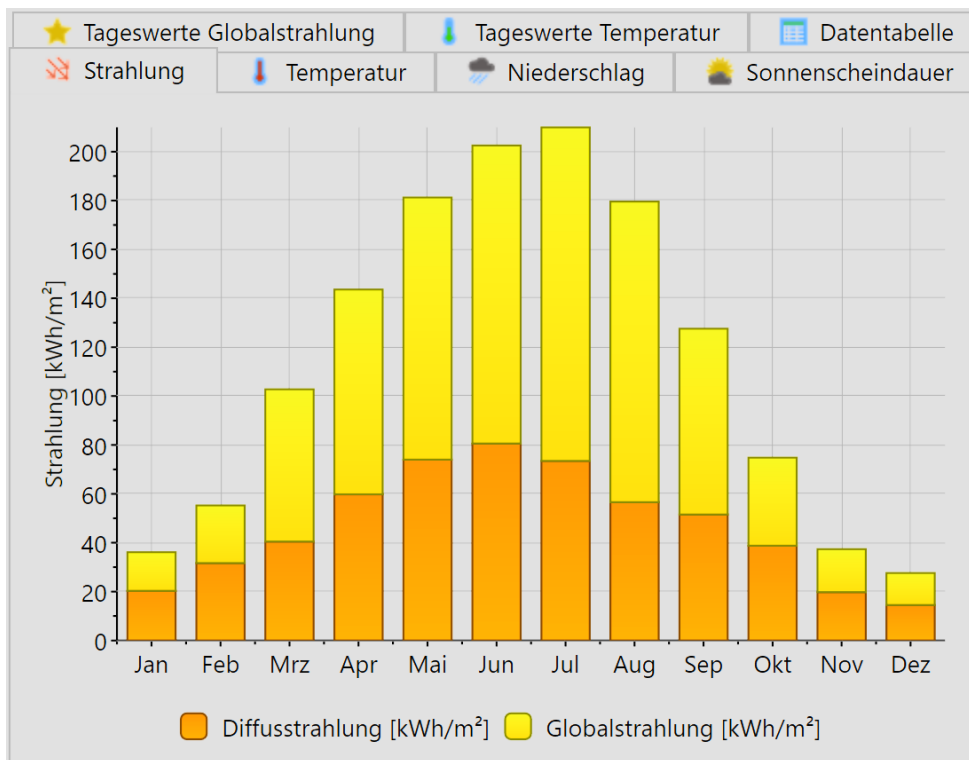
h. Temperatur RCP 4.5 2100 (Quelle: Meteonorm)



i. Sonnenscheindauer RCP 8.6 2100 (Quelle: Meteonorm)



j. Strahlung RCP 8.5 2100 (Quelle: Meteonorm)



k. Temperatur RCP 8.5 2100 (Quelle: Meteonorm)

