

Sunfactory Tramelan

Vorabklärungen Pilotprojekt

Ausgearbeitet durch

Amstein + Walthert AG

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Juni 2005

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie
Forschungsprogramm „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“

Auftragnehmer:

Amstein + Walther AG
Andreasstrasse 11
8050 Zürich

Autoren:

Christine Kulemann
Elia Zaccheddu
Erich Füglistner

Begleitgruppe:

Bauart Architekten, Bern
Viktor Dorer, EMPA, Dübendorf
M. Zimmermann / H. Bertschinger, Programmleitung BFE, EMPA, Dübendorf

2005

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Vertrieb: EMPA ZEN, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, www.empa-ren.ch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Schlussfolgerungen Architekten (Bauart Architekten)

1.	Einleitung	1
2.	Zielsetzungen	1
2.1	Übergeordnete Zielsetzung	1
2.2	Zu beantwortende Fragen	1
3.	Vorgehen.....	2
3.1	Simulationsmodelle	2
3.2	Simulationen und Berechnungen	2
3.3	Beurteilung	2
3.4	Eingesetzte Software	2
4.	Randbedingungen.....	3
4.1	Klimadaten.....	3
4.2	Erdreich	4
5.	Gebäudekonzept	5
5.1	Annahmen Glashalle	5
5.1.1	Anforderungen Glashalle.....	10
5.2.	Annahmen Einbauten.....	11
5.2.1	Anforderungen Einbauten	14
6.	Voruntersuchungen Glashalle	15
6.1	Verglasung Fassade und Dach	15
6.1.1	Rahmenprofile Fassade und Dach.....	17
6.2	Erdreich Speichermasse	18

6.3	Einbauten Speichermasse	19
6.4	Photovoltaikverglasung	20
7.	Resultate Glashalle	22
7.1	Luftströmung	22
7.1.1	Luftgeschwindigkeit	23
7.1.2	Temperaturverteilung	25
7.2	Lüftungskonzept	27
7.2.1	Abluftfläche	27
7.2.2	Nachtlüftung	28
7.3	Temperaturen	29
7.4	Solarstrahlung	31
7.5	Luftfeuchte	32
8.	Resultate Einbauten	34
8.1	Temperaturen	34
8.1.1	Bürogebäude	34
8.1.2	Werkhalle	36
8.2	Energiebilanz	38
8.3	Heizwärmebedarf	39
9.	Nachweise	40
9.1	Heizwärmebedarf SIA 380/1	40
9.2	MINERGIE	40
10.	Beurteilung	41
10.1	Sunfactory in Tramelan	41
10.2	Energetische Optimierungsansätze	42
10.3	Generelle Effizienz Glashalle	44
11.	Kostenschätzung (Bauart Architekten)	45

Zusammenfassung

Das unter der Führung von Bauart Architekten stehende Projekt "Sunfactory" am Standort Tramelan sieht eine grosse Glashalle mit einzelnen Gebäuden im Innenraum (Einbauten) für Gewerbe- und Industrienutzungen vor. Ziel dieser Glashülle ist es, einen Wildwuchs von Gewerbebauten zu verhindern, einen Träger für ein Solarkraftwerk zu schaffen und für die Einbauten eine aus energetischer Sicht günstige Klimaverschiebung zu bewirken. Geplant ist hierfür eine kostengünstige Glashalle im Gewächshaus- oder Industriebaustandard mit individuell zu gestaltenden Einbauten. Grundsätzliche Projektanforderungen sind Frostfreiheit der unbeheizten Glashalle und Einbauten im MINERGIE-Standard.

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Sunfactory Tramelan" wird die Zweckmässigkeit einer künstlichen Klimahülle mittels entsprechender Computersimulationen überprüft. Im Zentrum des Interesses stehen die Aspekte thermischer Behaglichkeit, Heizwärmebedarf und Feuchtigkeit.

Mit den angenommenen Einbauten gemäss Kapitel 5 ist in Tramelan die unbeheizte Glashalle mit Industrieverglasung ($U\text{-Wert} \leq 2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.76$) frostfrei zu realisieren. Hinsichtlich des thermischen Komforts in Glashalle und Einbauten wird empfohlen, die Speichermasse von Erdreich und Einbauten zu nutzen. Hierzu sollte die unbebaute, erdberührte Bodenfläche der Glashalle ohne Dämmung und die Einbauten in massiver Bauart ausgeführt werden.

Die Lufttemperaturen im Mikroklima der Glashalle sind im Winter höher und im Sommer vergleichbar mit dem Aussenklima. Die Klimaverschiebung in der Glashalle wirkt sich somit positiv auf den thermischen Komfort der Einbauten aus. Gleichzeitig bietet die Glashalle Schutz vor Wind, Regen und unerwünschter Solarstrahlung. Hinsichtlich des Komforts wird die Glashalle insgesamt positiv bewertet.

Einfachere Konstruktionen der Einbauten lassen im Mikroklima der Glashalle zudem Kosteneinsparungen erwarten und machen damit die Grundstücksflächen für potenzielle Nutzer attraktiv.

Unter städtebaulichen Aspekten ist eine Glashalle mit Einbauten (z.B. Verhinderung des Wildwuchses von Gewerbebauten), zum Schutz vor Emissionen (Luftverschmutzung, Lärm etc.), ein interessanter und gleichzeitig architektonisch ansprechender Entwurfsansatz.

Die Ausführung der südorientierten Dachflächen mit Photovoltaikverglasung zur Stromerzeugung wirkt sich positiv auf das sommerliche Hallenklima aus. Gleichzeitig steigen mit zunehmendem PV-Anteil Heizwärmebedarf der Einbauten, sowie Strombedarf für Kunstlicht in Glashalle und Einbauten. Im Einzelfall ist eine detaillierte Energiebilanz zu Stromerzeugung und -bedarf aufzustellen, um den optimalen PV-Anteil zu definieren. Pilotprojekte wie die Sunfactory liefern generell wichtige Beiträge, die Energieerzeugung mittels regenerativer Energien wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Für das Projekt Sunfactory, geplant als kostengünstige Glashalle mit Industrieverglasung und individuell zu gestaltenden Gewerbeeinbauten, wird das Verhältnis Kostenaufwand zu Reduktion Heizwärmebedarf als wenig effizient bewertet. Eine Glashalle ist hinsichtlich der Minimierung des Heizbedarfs der Einbauten generell im Aussenklima mit kalten Aussentemperaturen und geringer Solarstrahlung am effizientesten. Heizwärmebedarf, sowie energetische Einsparpotenziale der Einbauten hängen jedoch stark vom Zusammenspiel Glashalle und Einbauten ab. Die Definition der energetischen Zweckmässigkeit einer Glashalle kann somit nur für Gesamtkonzepte von Architektur und Gebäudetechnik für die Funktionseinheit "Glashalle mit Einbauten" erfolgen. Heutzutage bietet der Markt mit gut gedämmten Aussenbauteilen, kontrollierten Lüftungen mit Wärmerückgewinnung etc. zahlreiche Möglichkeiten zur Minimierung des Heizwärmebedarfs. Der zusätzliche Bedarf für die Glashülle (Kosten, Material, Grundfläche etc.) ist den Energie- und Kosteneinsparungen der Einbauten somit im Einzelfall gegenüber zu stellen und zu bewerten.

Die Funktionseinheit "Glashalle mit Einbauten" erfordert Definition und Planung von Geometrie, Nutzung, Konstruktion und Gebäudetechnik. Hierbei sind maximale Einsparpotenziale des Heizwärmebedarfs der Einbauten mit folgenden Planungsansätzen zu erzielen:

Glashalle

- Transparente Hülle mit kleinem U-Wert und grossem g-Wert (≥ 0.6)
- Gebäudelängsachse Ost-West-orientiert
- Möglichst grosse Aussenflächen mit Südorientierung
- Kleine Gebäudehüllzahl A/EBF

Einbauten

- Gebäudenutzung mit geringer Emissionsbelastung (Verwaltung etc.)
- Tag- und Nachtnutzungen (Hotel, Wohnen etc.)
- Hohe Bebauungsdichte (beheizt)
- Massivbauweise

Schlussfolgerungen Architekten

Im Jahre 2001 hat das Hochbauamt des Kantons Bern das Büro Bauart Architekten und Planer AG mit einer Machbarkeitstudie über eine Industriezone in Tramelan beauftragt.

Tramelan ist eine Stadt im Jura mitten in der Natur. Eine Industriezone in einem solchen Umfeld zu entwickeln kann sich nicht nach dem herkömmlichen Konzept richten, welches besagt, dass jedes Unternehmen ein eigenes, unabhängiges Gebäude realisiert. Die Reaktion der Architekten war, den kleinsten gemeinsamen Nenner der Bedürfnisse der Unternehmen zu finden, die interessiert sind, sich in einer Industriezone von etwa 17'000 m² einzurichten. Die erste Variante sah ein grosses Dach vor, das die zukünftigen Bauten umfasst. Dieses Dach schuf eine geschützte Zone, welche aber noch keine deutlichen finanziellen und technologischen Vorteile bot. Das Konzept wurde erweitert, indem man Glaswände hinzugefügt hat. Die Basis des Konzeptes beinhaltete eine Kiste aus Glas, die ein Zwischenklima schafft, das die zukünftigen Unternehmen nutzen können.

Aber wie kann eine solche Hülle funktionieren und was könnten die Vorteile sein? Das konstruktive System der Glashülle musste möglich günstig sein. Das Prinzip des Gewächshauses entsprach den technischen und finanziellen Absichten der Verfasser. Die Grundfunktion des Gewächshauses besteht darin, ein ausgeglichenes Klima zu schaffen, in dem Pflanzen wachsen können. Dies muss mit relativ günstigen technischen und finanziellen Mitteln erreicht werden, da Pflanzen ein Tiefpreisprodukt sind.

Außerdem wurde die Dachfläche aufgewertet, indem man 6'500 m² photovoltaische Solarzellen integriert hat, die 450'000 kWh/Jahr Strom produzieren können.

Das primäre Ziel, einen zusammenhängenden industriellen Komplex zu entwickeln, wird so erreicht. Die High-Tech-Glashülle "Sunfactory" ist bereit, interessierte Unternehmen zu empfangen. Mit einer lichten Höhe von 10 Metern kann das Volumen zwei Bürogeschosse oder die Höhe einer Montagehalle aufnehmen. Die inneren Gebäude profitieren von reduzierten konstruktiven Anforderungen wie z.B. der Wärmedämmung, die dank des Zwischenklimas verringert werden können.

Die Technik, mit der die Glashülle ausgestattet wird, muss die Spitzenwerte der Temperaturschwankungen aufnehmen können. Im Sommer führt der natürliche Luftwechsel zu einem angenehmen Innenklima. Im Winter erlauben die grossen Glasflächen die Wärmespeicherung und wärmen den Zwischenraum.

Nach mehreren Analysen hat sich das Projekt als realisierbar erwiesen. Die Ergebnisse der klimatischen Studie haben bewiesen, dass die Ziele nicht ganz erreicht werden. Die daraus resultierenden Konsequenzen sind hauptsächlich finanzieller Art. Um diese zu minimieren, ist eine etappierte Konstruktion nur denkbar, wenn die zwei ersten Drittel der ersten Phase verwirklicht werden können. Zusätzlich sollten die eingemieteten Betriebe Produkte mit hohem Mehrwert herstellen und zu Gunsten der Nachhaltigkeit und des Images der "Sunfactory" bereit sein, höhere Kosten in Kauf zu nehmen.

Eine vergleichende Studie basierend auf einem ausgeführten Gebäude eines Hochtechnologieunternehmens beweist, dass die Kosten für die Errichtung einer solchen Nutzung innerhalb der "Sunfactory" ungefähr 15 % höher sind als mit einer herkömmlichen Konstruktion.

"Schlussfolgerungen Architekten" aufgestellt von:

Bauart Architekten und Planer AG, Bern und Neuenburg

Bern am 10. Juni 2005 / fm

1. Einleitung

Mit der "Sunfactory" in Tramelan wird beabsichtigt, mittels einer grossen Glashalle (Grundfläche 16'700 m², Höhe 12 m) einen Wildwuchs von Gewerbebauten zu verhindern, einen Träger für ein Solarkraftwerk zu schaffen und für die Einbauten eine aus energetischer Sicht günstige Klimaverschiebung zu bewirken. Die Glashalle bildet den Raum für eine Gewerbezone, in der die einzelnen Einbauten individuell gestaltet werden können und weder Wind noch Regen ausgesetzt sind, was eine entsprechend einfachere Konstruktion zulässt.

Das Projekt steht unter der Führung von Bauart Architekten Bern, an einer Umsetzung interessiert sind unter anderem der Kanton Bern (Wirtschaftsförderung) und die Gemeinde Tramelan. Ziel ist eine zusammenhängende industrielle Gesamtheit zu entwickeln, die den Ansprüchen einer umfassenden Nachhaltigkeit gerecht wird.

2. Zielsetzungen

2.1 ÜBERGEORDNETE ZIELSETZUNG

Ziel dieses Forschungsprojekts ist der Funktionsnachweis einer solchen Glashalle mittels entsprechender Computersimulationen. Im Zentrum des Interesses stehen Aspekte wie Behaglichkeit, Energie und Feuchtigkeit. Problemfelder sollen möglichst frühzeitig erkannt und Lösungen verifiziert werden.

Einerseits soll die generelle Zweckmässigkeit des Bauens einer künstlichen Klimahülle überprüft werden und andererseits sind möglichst konkrete Aussagen zum Projekt Sunfactory Tramelan zu gewinnen. Grundsätzliche Anforderungen an das Projekt sind eine unbeheizte Halle sowie das Erreichen des MINERGIE-Standards für die Einbauten (unter Berücksichtigung des entsprechenden Mikroklimas).

Die Simulationen sollen Vertrauen ins Projekt schaffen und so mithelfen, das Objekt für Investoren und potenzielle Mieter attraktiv und glaubwürdig zu machen. Die Resultate dienen als Verkaufsargument und geben die nötige Sicherheit, dass das Konzept "Sunfactory" mit den entsprechenden Randbedingungen funktioniert.

2.2 ZU BEANTWORTENDE FRAGEN

Im Wesentlichen geht es darum, die zu erwartenden Klimaverhältnisse in der Halle zu verifizieren, bzw. zu definieren. Zudem soll aufgezeigt werden, welche Auswirkungen die erwartete Klimaverschiebung auf die Bauweise bzw. auf den Energiebedarf der Einbauten haben (MINERGIE-Standard). Die Klimaverschiebung soll ohne Beheizung erreicht werden und ermöglicht zusätzliche Nutzungen in der Halle.

Im Zentrum der Untersuchungen stehen folgende Aspekte, die einen wesentlichen Einfluss auf die Konzeptionierung der Halle haben:

- Erwartete Erdreichtemperaturen unterhalb der Glashalle definieren
- Voruntersuchung Verglasung der Glashülle zur Gewährleistung der geforderten Frostfreiheit der unbeheizten Halle
- Zu erwartende Temperaturen in Halle und Einbauten, örtliche Temperaturverteilung und thermisches Verhalten der Halle (Klimaverschiebung)
- Natürliche Belüftung der Halle, Luftströmung und Temperaturverteilung in der Halle
- Wechselwirkungen zwischen den Einbauten und dem Halleninnenraum (Luft- und Energieaustausch)
- Energiebedarf der Einbauten (vereinfachte Betrachtung): Heizen (380/1); MINERGIE

- Luftfeuchtigkeit: Quantitatives Festlegen der zulässigen Feuchtelasten (Pflanzen, freie Wasseroberflächen etc.), damit kein Kondensatrisiko entsteht.

Die Simulationen sollen zeigen, ob sowohl die Halle wie auch die Einbauten, die geforderten (Temperatur-)Kriterien im Sommer und im Winter erfüllen können. Des Weiteren wird der Einfluss der Glashalle auf den Energiebedarf der Einbauten untersucht.

3. Vorgehen

3.1 SIMULATIONSMODELLE

- Modell für thermische Simulationen (*TRNSYS*) des Erdreichs. Berechnung der Erdreichtemperaturen (Randbedingung Hallentemperaturen) bis 6 m Tiefe.
- Simulationsmodell für CFD-Berechnung (*CFX*) der Luftströmung und Temperaturverteilung in der Glashalle. Berechnungen werden für die worst-case-Situation, den Sommerfall ohne Wind, durchgeführt.
- Thermisches Simulationsmodell (*TRNSYS*) Halle und Einbauten. Ergebnisse der CFD-Berechnungen bestimmen, ob eine Zonierung der Halle infolge hoher Temperaturgradienten in eine oder mehrere Richtungen nötig ist oder nicht.

3.2 SIMULATIONEN UND BERECHNUNGEN

- Berechnung Luftströmung, Luftgeschwindigkeit und Temperaturen (Schichtung) der Glashalle.
- Definition der zu erwartenden Lufttemperaturen Glashalle und Einbauten mit *TRNSYS*.
- Untersuchung der Solarstrahlung in der Glashalle mit *TRNSYS*.
- Berechnung der Wärmeverluste und -gewinne der Einbauten nach SIA 380/1.
- Nachweise und Beurteilungen nach SIA 380/1, MINERGIE, SIA 180.
- Definition der maximal zulässigen Feuchtelasten, zur Vermeidung von Kondensatanfall in der Glashalle.

3.3 BEURTEILUNG

- Beurteilung der Sunfactory in Tramelan anhand der Ergebnisse und Nachweise.
- Gesamtbeurteilung der generellen Effizienz einer Glashülle.

3.4 EINGESETZTE SOFTWARE

- *TRNSYS 15*
- *CFX*
- *THERMO, Version 2.1*
- *Meteonorm, Version 5.1*

4. Randbedingungen

4.1 KLIMADATEN

Als Klimadaten werden Werte von *Meteonorm 5.1* verwendet. *Meteonorm* ist eine globale meteorologische Datenbank für Solarenergie und angewandte Meteorologie und hat sich auch bei der Dimensionierung in der Energie- und Gebäudetechnik etabliert (siehe auch www.meteotest.ch). Bei den Meteodaten handelt es sich um statistische Klimadaten über ein Jahr, die aus realen Messwerten generiert wurden.

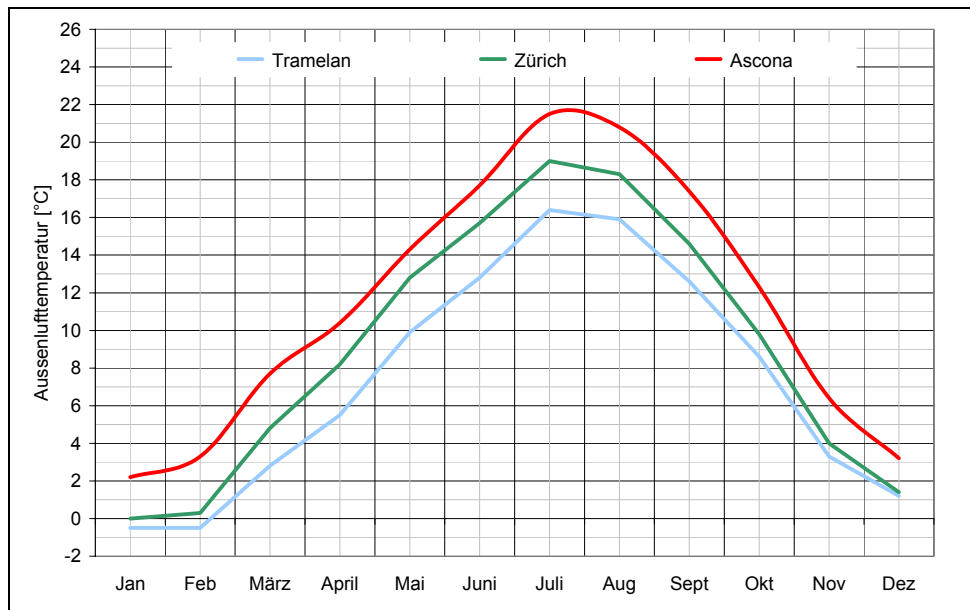


Fig. 1: Klima — Aussenlufttemperaturen im Monatsmittel

Die Monatsmittel-Aussenlufttemperaturen von Tramelan, Zürich und Ascona sind in Fig. 1 dargestellt. Das Klima von Tramelan zeichnet sich ganzjährig durch kühlere Temperaturen als Zürich und Ascona aus.

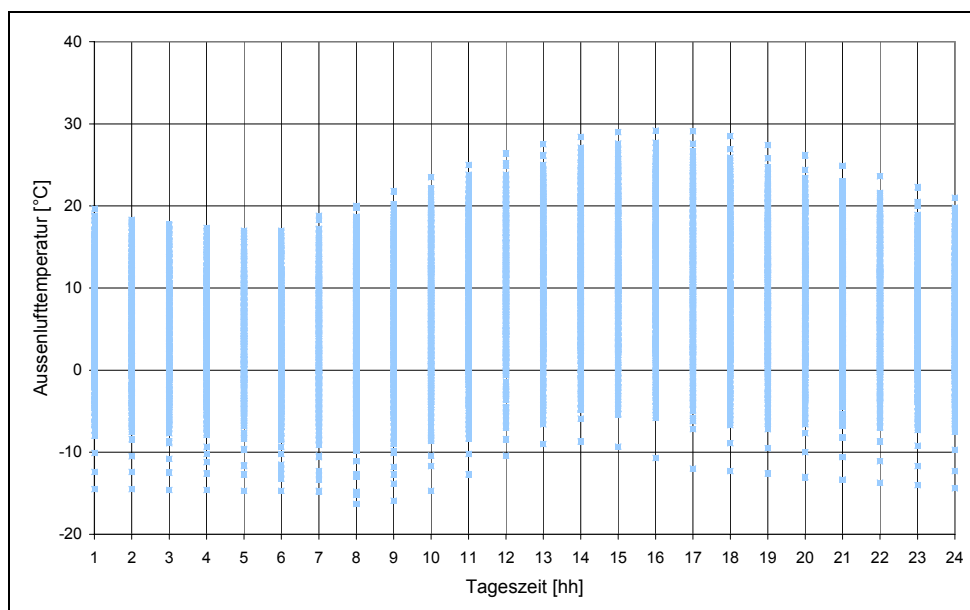


Fig. 2: Tramelan – Stündliche Aussenlufttemperaturen

In Fig. 2 sind die stündlichen Aussenlufttemperaturen in Tramelan in Abhängigkeit von der Tageszeit dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass im Jahresverlauf Lufttemperaturen von $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ auftreten.

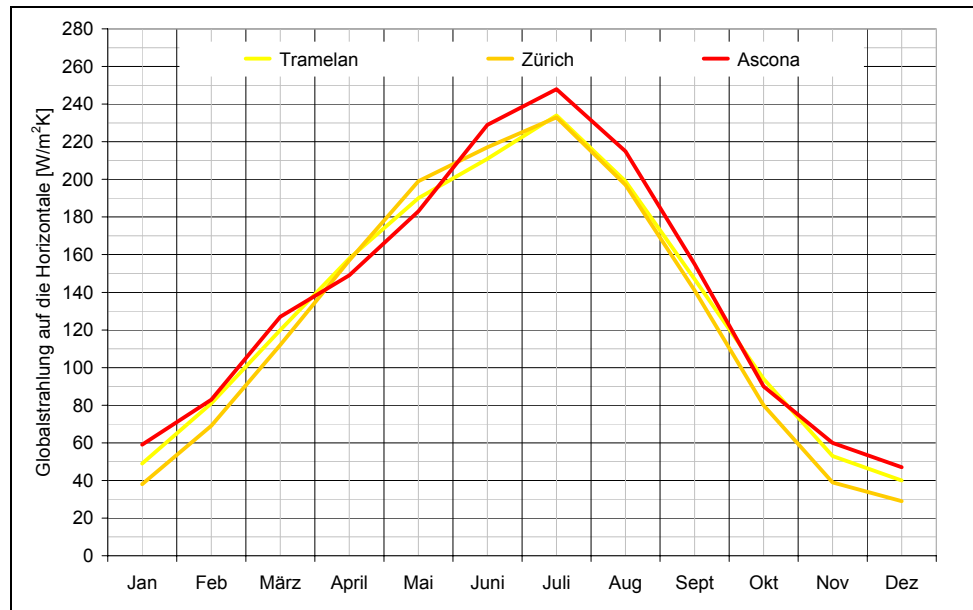


Fig. 3: Klima – Globalstrahlung im Monatsmittel

Der monatliche Mittelwert der Globalstrahlung von Tramelan, Zürich und Ascona ist in Fig. 3 dargestellt. Während der Heizperiode ist die Globalstrahlung in Tramelan höher als in Zürich und ist in etwa mit Ascona vergleichbar.

4.2 ERDREICH

Für den Standort Tramelan werden die Erdreichtemperaturen unterhalb der Glashalle mit dem thermischen Simulationsprogramm *TRNSYS* dynamisch berechnet. Nachfolgend sind die Monatsmitteltemperaturen des Erdreichs bis 6 m Tiefe dargestellt.

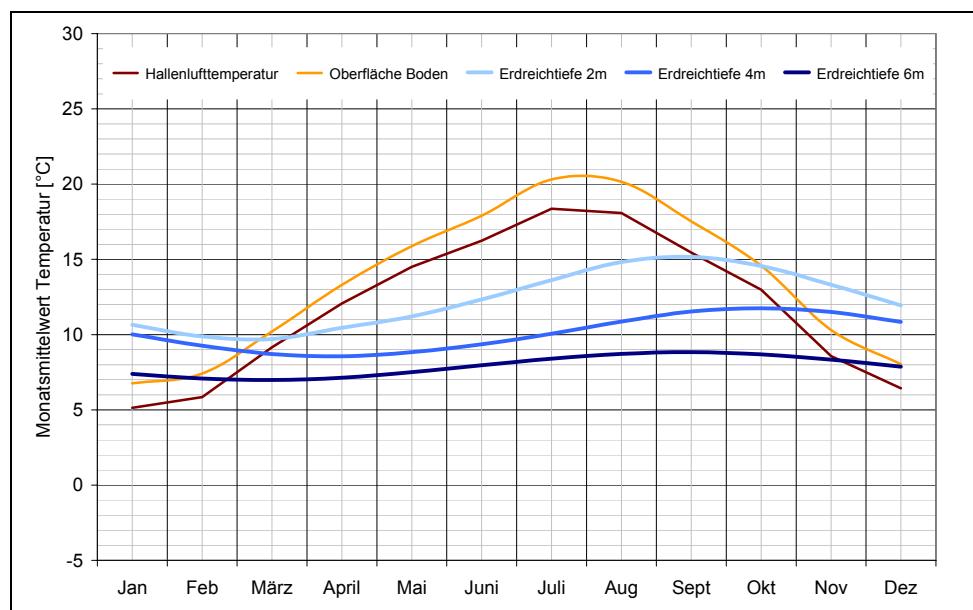


Fig. 4: Erdreich unterhalb Glashalle – Temperaturen im Monatsmittel

Fig. 4 zeigt die monatlichen Temperaturverläufe in Glashalle und Erdreich. Die jährlichen Temperaturschwankungen des Erdreichs nehmen typischerweise mit zunehmender Tiefe ab. Unterhalb der Glashalle liegt in 6 m Tiefe die Erdreichtemperatur im Jahresmittel bei etwa $8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. Gebäudekonzept

5.1 ANNAHMEN GLASHALLE

Mit der "Sunfactory" in Tramelan wird beabsichtigt, mittels einer grossen Glashalle (Grundfläche 16'700 m², Höhe 12 m) einen Wildwuchs von Gewerbebauten zu verhindern, einen Träger für ein Solarkraftwerk zu schaffen und für die Einbauten eine aus energetischer Sicht günstige Klimaverschiebung zu bewirken. Die Glashalle bildet den Raum für eine Gewerbezone, in der die einzelnen Einbauten individuell gestaltet werden können und weder Wind noch Regen ausgesetzt sind, was eine entsprechend einfachere Konstruktion zulässt.

Das Projekt steht unter der Führung von Bauart Architekten Bern, an einer Umsetzung interessiert sind unter anderem der Kanton Bern (Wirtschaftsförderung) und die Gemeinde Tramelan. Ziel ist eine zusammenhängende industrielle Gesamtheit zu entwickeln, die den Ansprüchen einer umfassenden Nachhaltigkeit gerecht wird.

Den Simulationsannahmen liegt die Entwurfsplanung der Glashalle (Stand August 2002) von Bauart Architekten Bern zugrunde.

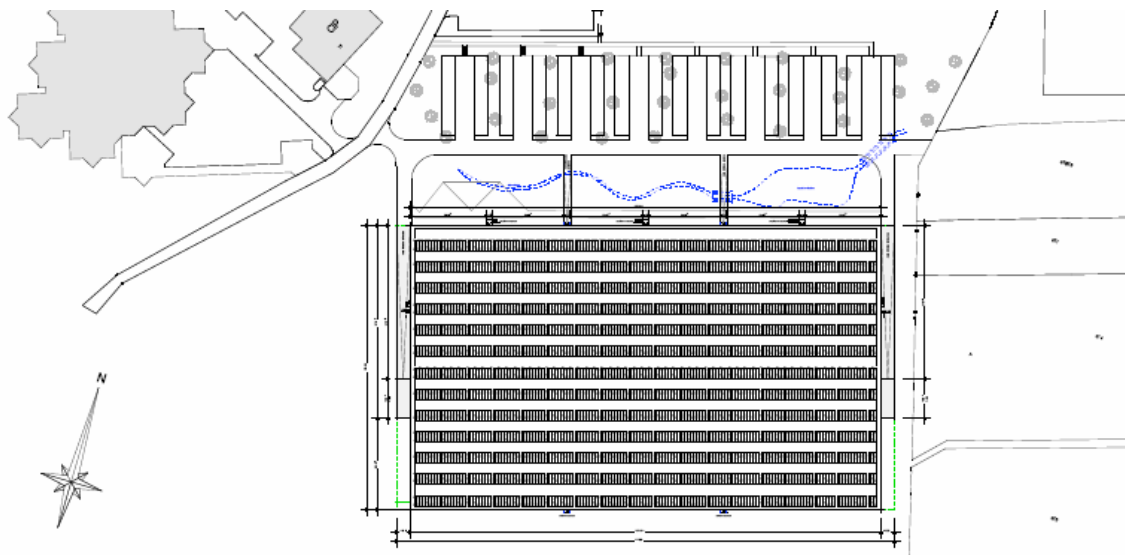


Fig. 5: Lageplan Sunfactory in Tramelan

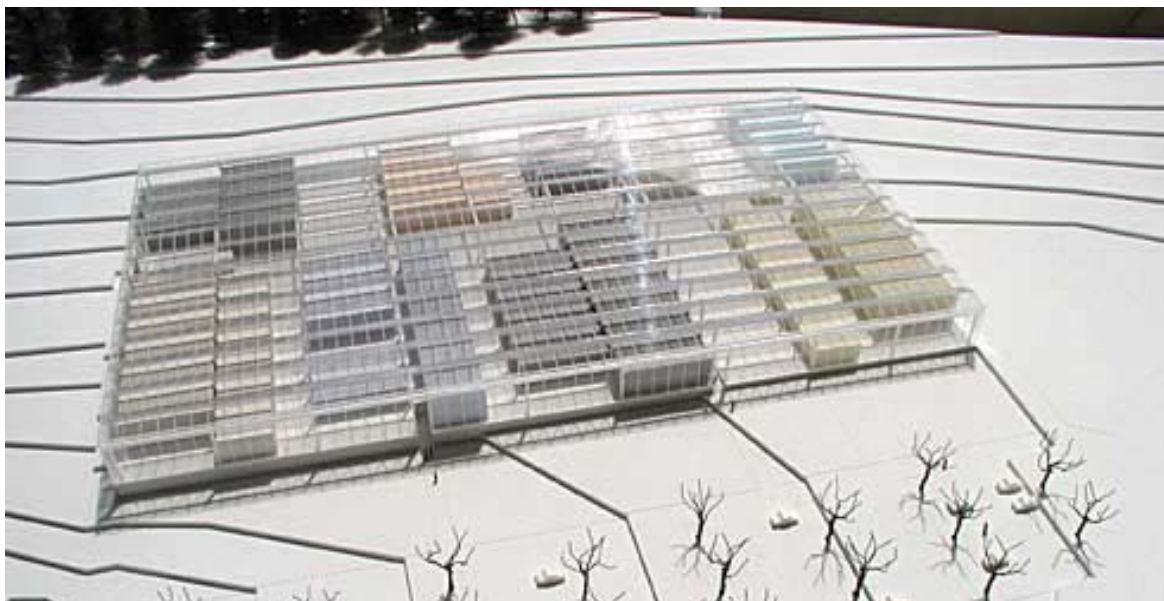


Fig. 6: Modell Glashalle – Perspektivansicht von Nord



Fig. 7: Glashalle – Perspektive Innenraum



Fig. 8: Glashalle – Perspektive Aussenraum

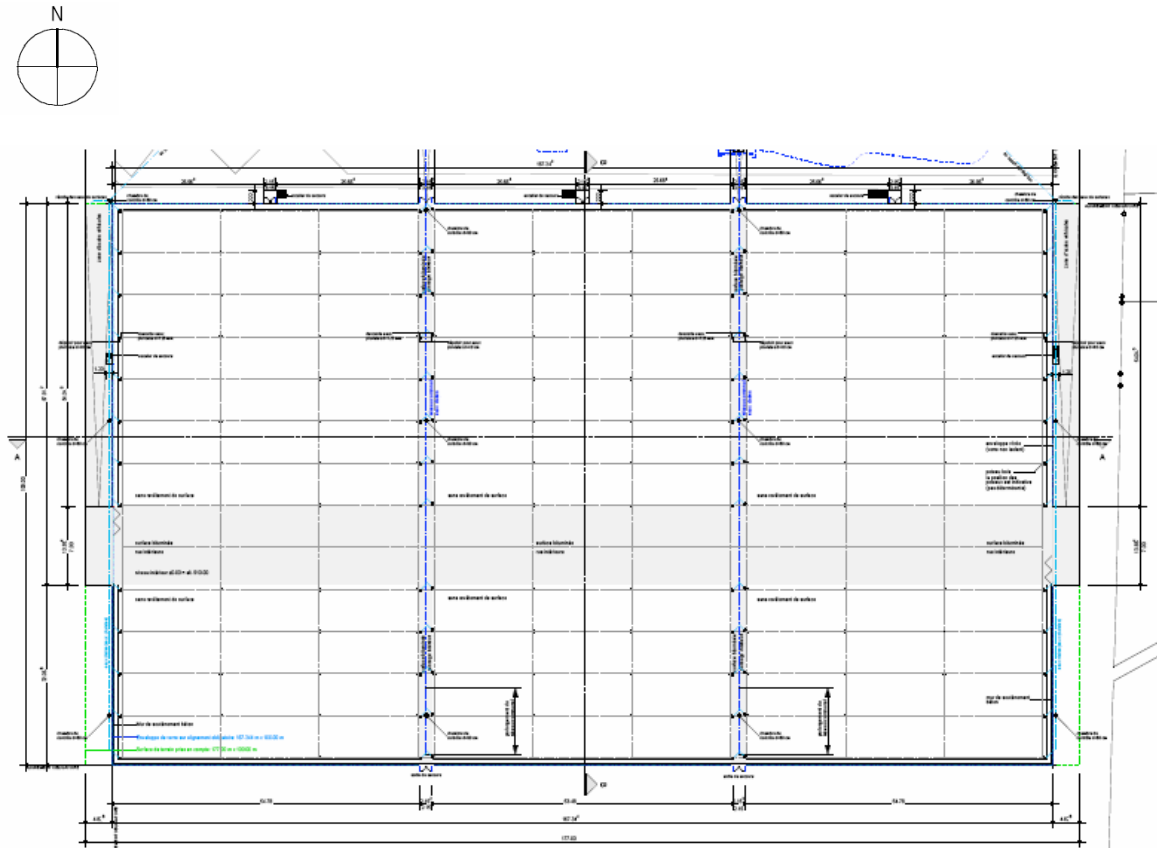


Fig. 9: Glashalle – Grundriss

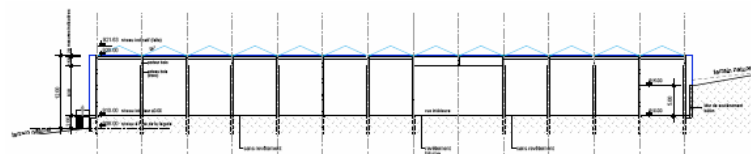


Fig. 10: Glashalle – Querschnitt

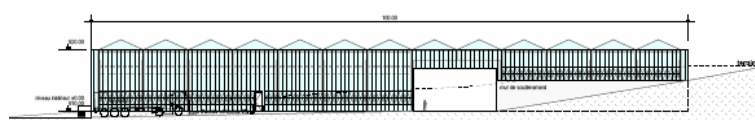


Fig. 11: Glashalle – Ansicht West

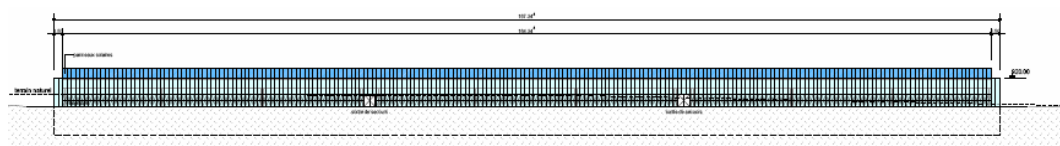


Fig. 12: Glashalle – Ansicht Süd

Geometrie

- Abmessungen (L x B x H): 167.3 m x 100 m x 10 m, Höhe im First: 11.6 m, Dachneigung: 24 °
- Südfassade weicht um 14 ° von der Nord-Süd-Achse ab
- Fassadenflächen (nach Ausrichtung; Verglasung/geschlossene Bauteile):
 - Süd: 837 m² Verglasung, 837 m² Wand gegen Erdreich
 - Nord: 1'673 m² Verglasung
 - West: 920 m² Verglasung, 80 m² Aussenwand, 80 m² Wand gegen Erdreich
 - Ost: 920 m² Verglasung, 80 m² Aussenwand, 80 m² Wand gegen Erdreich
- Dachfläche (nach Ausrichtung; Verglasung/ Photovoltaikverglasung):
 - 18'260 m² geneigte Dachfläche (16'730 m² Projektion auf die Horizontale), davon:
 - Süd: 3'800 m² Verglasung, Dachneigung 24°
 - 5'000 m² Photovoltaikverglasung, Dachneigung 24 °
 - Nord: 8'800 m² Verglasung, Dachneigung 24 °
 - Horizontal: 660 m² Verglasung umlaufend
- Bodenfläche:
 - 16'730 m² Bodenfläche, davon:
 - 2'500 m² Asphaltbelag (Wege und Strassen)
 - 8'750 m² mit Einbauten überbaut
 - 5'480 m² Kiesbelag

Konstruktion (optimiert)

- Glasfassaden/-dächer
 - Industrieverglasung mit U-Wert = 2.8 W/m²K und g = 0.76; Rahmenprofile mit Dichtung, thermisch getrennt mit U-Wert = 2.8 W/m²K (Rahmenanteil 10 %)
 - Photovoltaikverglasung auf 60% der südorientierten Dachflächen, solarer Transmissionswert = 0.2 (gemäss Angaben 3S Swiss Sustainable Systems AG).
- Geschlossene Bauteile
 - Betonaussenwände und Boden ungedämmt, U-Wert = 2.3 W/m²K.
- Sonnenschutz
 - Innenliegender Sonnenschutz auf etwa 70 % der horizontalen Dachfläche, unterhalb der horizontalen und geneigten Dachflächen mit Industrieverglasung. Sonnenschutz geschlossen, wenn Aussenlufttemperatur im Tagesmittel > 8 °C und Globalstrahlung horizontal > 100 W/m².

Haustechnik

- Heizung/Kühlung
 - Es ist keine aktive Heizung und/oder Kühlung der Glashalle geplant. Lediglich die aus den Büros in die Glashalle strömende Abluft sorgt im Winter für Erwärmung und im Sommer für Abkühlung.

- Lüftungskonzept

Die Glashalle wird natürlich belüftet. Die Zuluftflächen werden in Lage und Grösse gemäss Architektenplanung Stand 2002 angenommen. Die Abluftfläche entspricht der im Rahmen der Simulationen optimierten Fläche.

Zuluft: 460 m² Öffnungsfläche in Fassade, horizontal umlaufend
(Zuluftfläche ~ 3 % von Bodenfläche Glashalle)

Abluft: 670 m² Öffnungsfläche in nordorientierten Dachflächen (optimiert)
(Abluftfläche ~ 4 % von Bodenfläche Glashalle)

Die über natürliche Fensterlüftung und Infiltration einströmende Luftmenge bestimmt den stündlichen Luftwechsel in der Glashalle. Mit der Temperaturdifferenz zwischen Aussenklima und Mikroklima Glashalle wird der Luftwechsel dynamisch wie folgt gerechnet:

$$\text{Differenzdruck } \Delta p \text{ [Pa]} = 0.5 \times \frac{\rho_{\text{Halle}} \times g \times h_{\text{Halle}} \times (T_{\text{Halle}} - T_{\text{Aussen}})}{T_{\text{Aussen}} + 273.15}$$

$$\text{Infiltration } LW_{\text{Inf}} \text{ [h}^{-1}\text{]} = \frac{a_F \times l_{\text{Fugen}} \times \Delta p^m}{V_{\text{Halle}}}$$

$$\text{Natürliche Lüftung } LW_{\text{NatLüft}} \text{ [h}^{-1}\text{]} = \frac{\sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\xi \times \rho_{\text{Halle}}}} \times A \times 3600}{V_{\text{Halle}}}$$

$$\rho_{\text{Halle}} = \text{Rohdichte Luft Glashalle} = 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = \text{Erdbeschleunigung} = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$h_{\text{Halle}} = \text{Höhe Glashalle in m}$$

$$T_{\text{Halle}} = \text{Lufttemperatur Glashalle in } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{Aussen}} = \text{Aussenlufttemperatur in } ^\circ\text{C}$$

$$a_F = \text{Fugendurchlasskoeffizient} = 0.3 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \times \text{m} \times \text{Pa}^{2/3}}$$

$$l_{\text{Fugen}} = \text{Fugenlänge Glashalle in m}$$

$$m = \text{Exponent} = \frac{2}{3}$$

$$V_{\text{Halle}} = \text{Luftvolumen Glashalle in m}^3$$

$$\xi = \text{Widerstandsbeiwert Zeta, dynamisch in Abhängigkeit von geöffneter Zu- und Abluftfläche}$$

$$A = \text{Abluftfläche, dynamische Regelung (siehe unten)}$$

Die folgenden Regelstrategien sind hinsichtlich der Einschaltkriterien mittels thermischer Simulationen optimiert worden.

Nutzungszeit

Während der Nutzungszeit erfolgt die Regelung der natürlichen Lüftung in Abhängigkeit von Aussentemperatur, Wind, Niederschlag und hygienisch erforderlichem Mindest-Luftwechsel der Einbauten.

Der Anteil der geöffneten Zu- und Abluftflächen wird wie nachfolgend beschrieben über die Aussenlufttemperatur geregelt. Unter 10 °C sind die Öffnungen geschlossen. Von 10 °C bis 20 °C Aussentemperatur steigt der Anteil der geöffneten Fläche dann linear von 0 % auf 100 %. Über 20 °C sind die Öffnungen zu 100 % geöffnet.

Bei Schlagregen, sowie bei Windgeschwindigkeiten über 8 m/s bleiben die Öffnungen geschlossen.

Für die Gewährleistung des hygienisch erforderlichen Luftwechsels der Einbauten ist in der Glashalle ein Mindest-Luftwechsel von 0.31 h⁻¹ erforderlich. Während der Nutzungszeit ist die Einhaltung dieses minimal erforderlichen Luftaustausches der vorgenannten Regelstrategie übergeordnet.

Nachtlüftung Glashalle

Wenn die Tagesmittel-Aussenlufttemperatur 12 °C überschreitet, sind ausserhalb der Nutzungszeit die Zu- und Abluftflächen der Glashalle zu 100 % geöffnet. Bei Schlagregen, sowie bei Windgeschwindigkeiten über 8 m/s bleiben die Öffnungen geschlossen.

Nutzung/Interne Lasten

- Nutzungszeit: Montag bis Freitag, von 07:00 bis 19:00
- Interne Gewinne (maximal) während der Nutzungszeit

Personen	0.5 W/m ²	(50 Personen in der Glashalle)
Geräte	0 W/m ²	
- Grundbeleuchtung Strassen, Wege und unbebaute Grundstücksflächen

Kunstlicht	1 W/m ²	(Kunstlicht 'AN', wenn Strahlung in Glashalle < 30 W/m ² (trüber Wintertag))
------------	--------------------	---
- Abwärme Einbauten

Die Raumluft der Einbauten steht über Lüftung und Infiltration im Luftaustausch mit der Glashallenluft. Hierüber erwärmt die hygienisch nutzbare Abluft der Einbauten im Winter die Glashallenluft. Der permanente Luftaustausch mittels Temperaturdifferenzen über Infiltration, Undichtigkeiten der Konstruktion, wird dynamisch (gemäss Kapitel 5.2, Haustechnik) berücksichtigt. Während der Nutzungszeit wird zusätzlich die Lüftungsabwärme der Einbauten gemäss Abbildung Fig. 13 berücksichtigt.

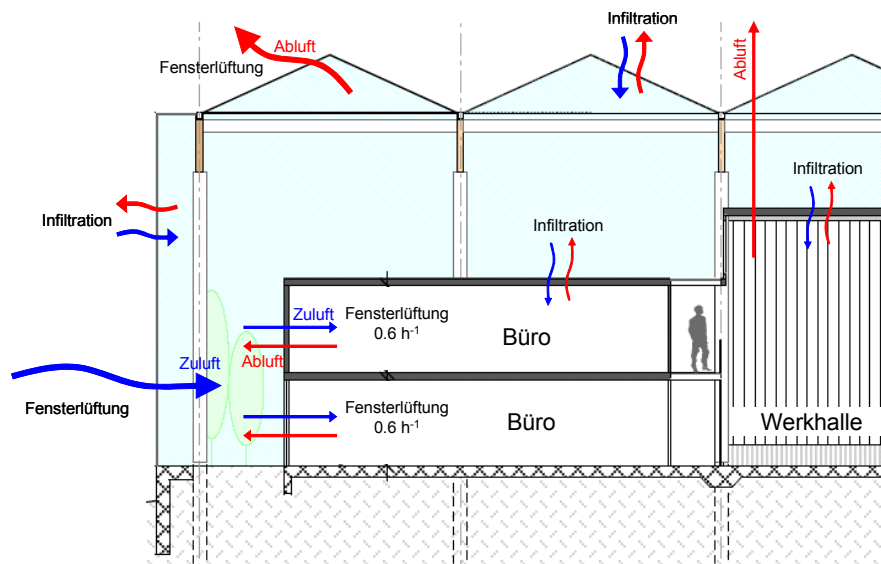


Fig. 13: Nutzungszeit (Luftaustausch im Winter)

5.1.1 Anforderungen Glashalle

- Temperaturen und Komfort

Die Aussenhülle ist unbeheizt, trotzdem sollen -3 °C möglichst nicht unterschritten werden (Frostfreiheit). Im Sommer soll die Hallenlufttemperatur möglichst wenig über der Aussenlufttemperatur liegen.

Keine weiteren Anforderungen betreffend Behaglichkeit (Temperaturen, Luftströmungen), d.h. keine Anforderungen nach SIA für Aufenthalts- oder Arbeitsbereiche.
- Luftfeuchtigkeit und Kondensat

Unter Berücksichtigung zusätzlicher Feuchtelasten (durch Personen, Begrünungen, Wasserflächen etc.) werden Angaben über das Kondensationsrisiko in der Glashalle gemacht (auf Basis der mittleren Hallenluftfeuchtigkeit).

5.2 ANNAHMEN EINBAUTEN

Im Rahmen des von Bauart Architekten geplanten Projekts "Sunfactory" bietet die Glashalle sechs Grundstücksflächen für Einbauten mit Gewerbe- und Industrienutzung (Uhren, Elektronik, neue Technologien). Einschränkungen der vorstellbaren Gewerbenutzungen hinsichtlich Emission und Immission sind nicht definiert. Die Gebäude können nach Nutzerbedarf in Entwurf und Konstruktion individuell gestaltet werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Einbauten als typische Gewerbebauten in kostengünstiger Leichtbauweise erstellt werden.

Das Büro Bauart Architekten hat im Juli 2002 mit dem Vorprojekt Précitrame die Planung eines möglichen Gewerbebetriebs in der Glashalle durchgeführt. Da die übrigen potenziellen Nutzer noch unbekannt sind, existiert zurzeit noch kein festgelegter Quartierplan für die Sunfactory. Die Einbauten werden somit in den Simulationen in Geometrie, Konstruktion und Nutzung analog des Vorprojekts Précitrame angenommen und auf die gesamte Bebauung der Glashalle hochgerechnet. Hieraus resultierend sind 52 % der Hallengrundfläche bebaut. In den Simulationen wird nach der Nutzung in Verwaltung (Bürogebäude) und Produktion (Werkhalle) unterschieden.

Modell (Vorprojekt Précitrame)

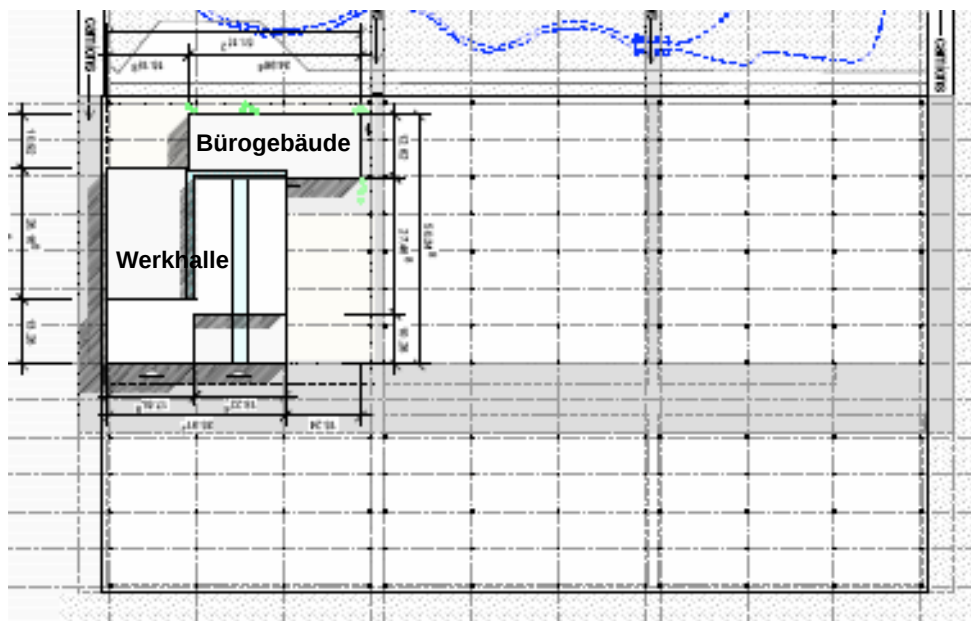
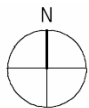


Fig. 14: Lageplan

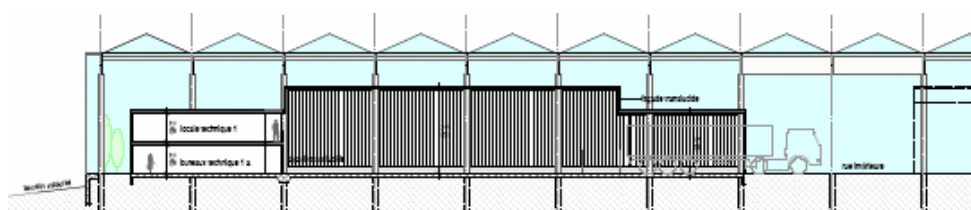


Fig. 15: Längsschnitt

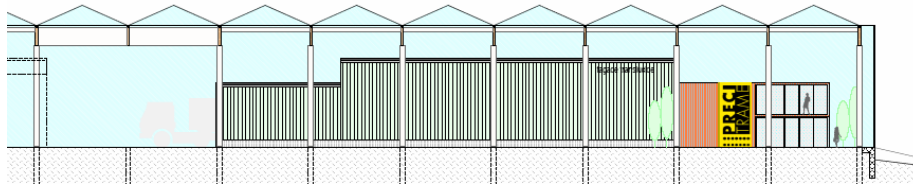


Fig. 16: Ansicht Ost

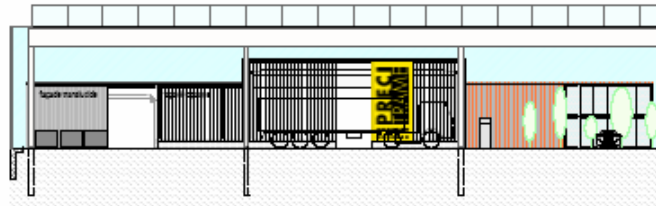


Fig. 17: Ansicht Süd

Geometrie

- Abmessungen; Länge, Breite, Höhe gemäss Projekt Précitrame, Stand Juli 2002
- Einbauten 5 bis 7 m Bruttohöhe
- Werkhalle eingeschossig; Fensterflächenanteil zu Bodenfläche 65 %
- Bürogebäude zweigeschossig; Fensterflächenanteil zu Bodenfläche 24 %
- Fassaden-/Dachflächen (nach Ausrichtung; Verglasung/geschlossene Bauteile):

Süd:	1'389 m ² Verglasung, 208 m ² Aussenwand
Nord:	986 m ² Verglasung, 610 m ² Aussenwand
West:	687 m ² Verglasung, 908 m ² Aussenwand
Ost:	1'427 m ² Verglasung, 168 m ² Aussenwand
Horizontal:	885 m ² Verglasung, 7'865 m ² Dach
- Bodenfläche:

8'750 m ² Bodenfläche gegen Erdreich

Konstruktion (optimiert)

- Glasfassaden/Fenster
Wärmeschutz-Verglasung ($U\text{-Wert} = 1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.61$) und gedämmte Rahmenprofile
- Geschlossene Bauteile
Betonwände mit aussenliegender Dämmung, $U\text{-Wert} = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$
Kiesdach, Betondecke mit aussenliegender Dämmung, $U\text{-Wert} = 0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$
Betonsohle mit Dämmung und Bodenbelag, $U\text{-Wert} = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Sonnenschutz
Glasfassaden/Fenster ohne Sonnenschutz

Haustechnik

- Heizung/Kühlung

Die Heizung ist gemäss SIA 380/1 (3.4.1.1, Tabelle 4 Standardnutzung: Innentemperatur) geplant: Verwaltungsnutzung 20°C, Industrie/Lagerräume 18 °C.

Es ist keine aktive Kühlung vorgesehen.

- Lüftungskonzept Einbauten

Nutzungszeit

Über natürliche Lüftung strömt die Zuluft direkt aus der Glashalle in die Einbauten. Während der Nutzungszeit wird der Luftwechsel zur Gewährleistung des Hygienischen-Mindestluftwechsels in den Büros mit 0.6 h^{-1} und in den Werkhallen mit 0.9 h^{-1} angenommen. Die zusätzliche Fensterlüftung ist möglich, wird aber in den Simulationen nicht berücksichtigt.

Nachtlüftung Einbauten

Ausserhalb der Nutzungszeit wird im Sommer angenommen, dass bei Hallenlufttemperaturen von 18 °C – 26 °C die Fenster der Einbauten geöffnet sind. Die Zuluftmenge von Bürogebäude und Werkhalle wird anteilig von dem stündlich errechneten Luftwechsel der Glashalle vereinfacht definiert.

Die zwischen Glashalle und Einbauten über Infiltration ausgetauschte Luft wird für Bürogebäude und Werkhalle getrennt ermittelt. Für beide Nutzungszonen wird die Infiltration jeweils dynamisch mit dem stündlichen Luftwechsel wie folgt berücksichtigt:

$$\text{Differenzdruck } \Delta p \text{ [Pa]} = 0.5 \times \frac{\rho_{\text{Einbau}} \times g \times h_{\text{Einbau}} \times (T_{\text{Einbau}} - T_{\text{Halle}})}{T_{\text{Halle}} + 273.15}$$

$$\text{Infiltration } LW_{\text{Inf}} \text{ [h}^{-1}\text{]} = \frac{a_F \times l_{\text{Fugen}} \times \Delta p^m}{V_{\text{Einbau}}}$$

$$\rho_{\text{Einbau}} = \text{Rohdichte Luft Einbauten} = 1.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g = \text{Erdbeschleunigung} = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$h_{\text{Einbau}} = \text{Höhe Einbauten in m}$$

$$T_{\text{Einbau}} = \text{Lufttemperatur Einbauten in } ^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{Halle}} = \text{Lufttemperatur Glashalle in } ^\circ\text{C}$$

$$a_F = \text{Fugendurchlasskoeffizient} = 0.3 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \times \text{m} \times \text{Pa}^{2/3}}$$

$$l_{\text{Fugen}} = \text{Fugenlänge Einbauten in m}$$

$$m = \text{Exponent} = \frac{2}{3}$$

$$V_{\text{Einbau}} = \text{Luftvolumen Einbauten in m}^3$$

Gemäss Fig. 13 strömt während der Nutzung die Abluft der Bürogebäude in die Glashalle (im Winter Erwärmung der Hallenluft). Die Abluft aus den Werkhallen wird aus hygienischen Gründen (Gerüche, Staub etc.) direkt über das Glashallendach an die Aussenluft abgeführt.

Nutzung/Interne Lasten

- Analog des Vorprojekts Précitrame werden die Einbauten mit Gewerbe- und Industrienutzung (Uhren, Elektronik, neue Technologien) angenommen. Die Gebäude gliedern sich in Bürogebäude (Verwaltung, Planung) und Werkhalle (Fertigung, Produktion). Die Annahmen zu Nutzungszeit und internen Lasten erfolgt auf Grundlage der SWKI Richtlinie 95-3 "Jährlicher Energiebedarf von Lüftungstechnischen Anlagen".

- Bürogebäude (SWKI 95-3 - Standardnutzung "Einzel/Gruppenbüro")

In Anlehnung an Précitrame werden etwa 40 % der Netto-Grundfläche des Bürogebäudes als Einzel- und Gruppenbüros, mit Nutzungszeit und Wärmelasten gemäss SWKI Richtlinie 95-3, angenommen. Die verbleibende Grundfläche beherbergt Nebennutz- und Verkehrsflächen, für die während der Nutzungszeit interne Gewinne durch Kunstlicht berücksichtigt werden.

Nutzungszeit: Montag bis Freitag, von 08:00 bis 19:00

Interne Gewinne (maximal) Bürogebäude während der Nutzungszeit:

Personen	5 W/m ² (14 m ² Bürofläche/Person)
Geräte	7 W/m ²
Kunstlicht	6.5 W/m ² (Kunstlicht "AN", wenn Globalstrahlung < 200 W/m ²)

- Werkhalle (SWKI 95-3 - Standardnutzung "Werkstatt")

Die Werkhalle wird in Anlehnung an Précitrame mit 60 % der Netto-Grundfläche als Werkstattfläche, mit Nutzungszeit und Wärmelasten gemäss SWKI Richtlinie 95-3, gerechnet. Die verbleibende Grundfläche dient Lagerzwecken und wird ohne interne Lasten angenommen.

Nutzungszeit: Montag bis Freitag, von 07:00 bis 17:00

Interne Gewinne (maximal) Werkhalle während der Nutzungszeit:

Personen	3 W/m ² (25 m ² Werkstattfläche/Person)
Geräte	15 W/m ²
Kunstlicht	7 W/m ² (Kunstlicht "AN", wenn Globalstrahlung < 200 W/m ²)

5.2.1 Anforderungen Einbauten

- Temperaturen und Komfort

Zur Gewährleistung des thermischen Komforts sind Raumlufttemperaturen nach SIA 180 und SIA 380/1 einzuhalten.

- Heizwärmebedarf

Die Einbauten sollen den MINERGIE-Standard erfüllen.

6. Voruntersuchungen Glashalle

6.1 VERGLASUNG FASSADE UND DACH

Die transparente Aussenhülle wird hinsichtlich der Forderung nach einer unbeheizt frostfreien Glashalle untersucht. Von Architektenseite ist eine kostengünstige Hallenhülle mit Einfach- oder Industrieverglasung und südorientierten Dachflächen mit PV-Verglasung geplant. Der Einfluss der Verglasung auf die Hallenlufttemperaturen wird mit den Annahmen aus Kapitel 5 untersucht.

Entscheidende Parameter für die Hallentemperatur sind die bauphysikalischen Eigenschaften (U-Wert und g-Wert) der Aussenhülle. Ziel dieser Studie ist die Definition einer Glashülle, welche die wirtschaftlichen und thermischen Anforderungen erfüllt. Hierfür werden hinsichtlich unterschiedlicher bauphysikalischer Eigenschaften heutige Standardmaterialien miteinander verglichen.

Es ist eine möglichst hohe Ausnutzung des Tageslichts anzustreben, um in Glashalle und Einbauten einen minimalen Strombedarf für Kunstlicht, sowie einen hohen visuellen Komfort zu erreichen. In Folge dessen werden für die Aussenhülle der Glashalle ausschliesslich transparente Materialien untersucht.

Einfachverglasungen mit einem U-Wert um $5.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem g-Wert um 0.83 entsprechen der von Architektenseite geplanten Glashalle im Gewächshausstandard. Diese Verglasung stellt hinsichtlich möglicher U- und g-Werte von transparenten Materialien die obere Grenze dar.

Transparente Standardmaterialien mit mittelmässig guten U-Werten liegen bei $2.5 - 2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ und weisen g-Werte um $0.6 - 0.8$ auf. Dieser Bereich entspricht typischen Industrieverglasungen wie z.B. Acrylglas-Stegdoppelplatten (g-Werte bis 0.8 erhältlich) und U-Profilglas (g-Wert um 0.6).

Heutige Isolierverglasungen weisen standardmässig gute U-Werte um $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ und g-Werte von maximal 0.6 auf. Bei Isolierverglasungen führt die Verkleinerung des U-Wertes auch gleichzeitig zu geringeren g-Werten.

Heutzutage bilden transparente Materialien um $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ die untere Grenze verfügbarer U-Werte. Diese Wärmeschutzverglasungen werden aufgrund höherer Investitionskosten nicht untersucht.

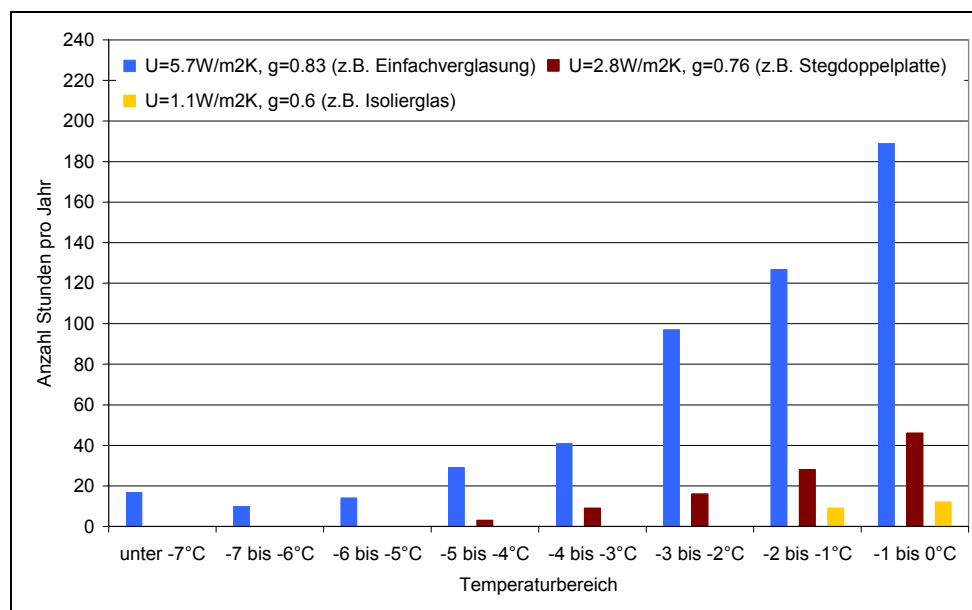


Fig. 18: Hülle Glashalle – Stundenhäufigkeit minimale Hallenlufttemperatur im Jahr

Fig. 18 zeigt die Anzahl der Stunden im Jahr, in denen die Lufttemperatur in der Glashalle 0 °C unterschreitet. Mit der von Architektenseite geplanten Einfachverglasung sind an zahlreichen Stunden Raumlufttemperaturen unter 0 °C zu erwarten, der Grenzwert von -3 °C wird deutlich unterschritten. Die Anforderung einer unbeheizt frostfreien Glashalle kann erst durch den Einsatz eines transparenten Materials mit einem U-Wert $\leq 2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ erfüllt werden.

Im folgenden Diagramm sind die maximal zu erwartenden Lufttemperaturen in der Glashalle dargestellt.

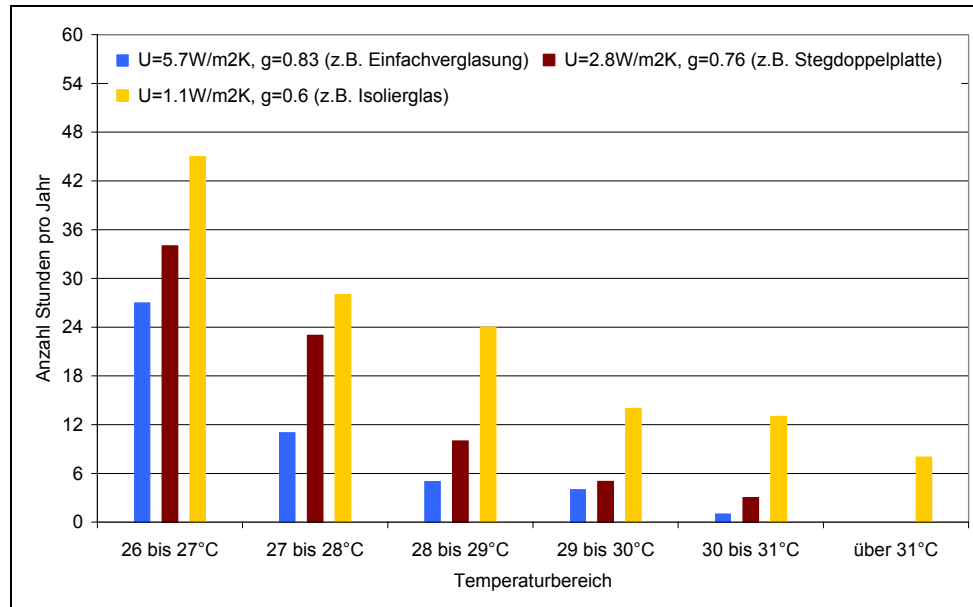


Fig. 19: Hülle Glashalle – Stundenhäufigkeit maximale Hallenlufttemperatur im Jahr

Im Sommer ist bei Materialien mit guten U-Werten um $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ die Stundenhäufigkeit mit Hallentemperaturen $> 26 \text{ °C}$ am höchsten. Als ganzjähriger Kompromiss bieten sich aus thermischen und ökonomischen Gründen Materialien mit mittelmässigem U-Wert und hohem g-Wert an.

Für die kostengünstige Realisierung der ohne Beheizung geforderten frostfreien Glashalle sind Industrieverglasungen wie z.B. Stegdoppelplatten aus Acrylglas (U-Wert um $2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ und g-Wert um 0.8) für die Aussenhülle der Glashalle optimal geeignet.

Bei Ausführung der Hülle im Gewächshausstandard (Einfachverglasung und ungedämmte Rahmenprofile) muss die Glashalle für die Gewährleistung der Frostfreiheit beheizt werden.

6.1.1 Rahmenprofile Fassade und Dach

Der Dämmwert eines Rahmenprofils von Glasfassaden und -dächern beeinflusst die Raumtemperatur von Gebäuden. Im Folgenden wird der Einfluss der Rahmenprofile auf die minimal zu erwartenden Temperaturen in der Glashalle untersucht. Für die Simulationen wird die Aussenhülle mit Stegdoppelplatten gemäss Kapitel 6.1 und einem Rahmenanteil von 10 % angenommen. Es werden gedichtete Aluminiumprofile in gedämmter und ungedämmter Ausführung verglichen.

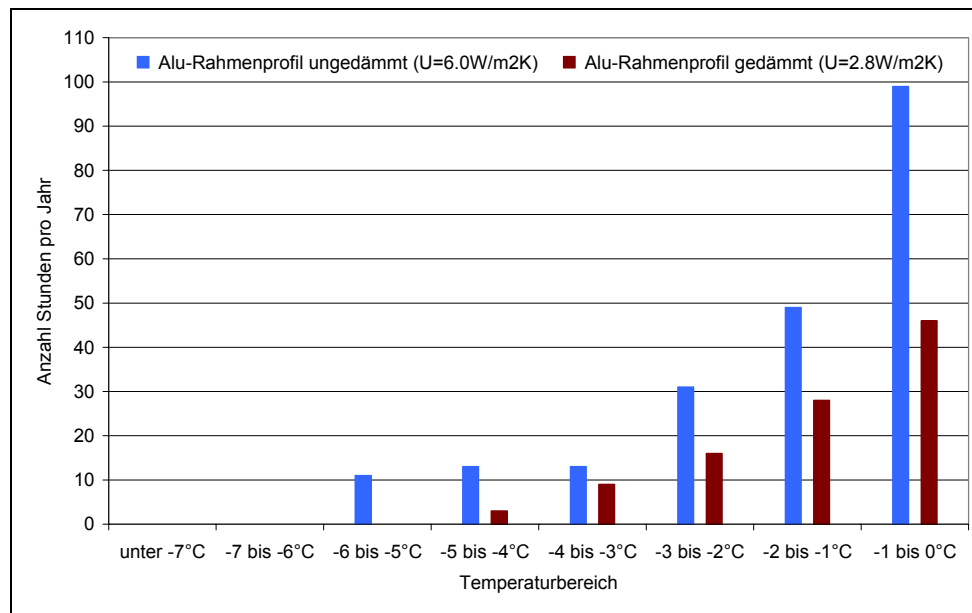


Fig. 20: Rahmen Glashalle – Stundenhäufigkeit minimale Hallenlufttemperatur im Jahr

Fig. 20 zeigt, dass beim gedämmten Rahmenprofil deutlich weniger Stunden im Jahr mit Hallentemperaturen unter 0 °C zu erwarten sind. Für die Frostfreiheit der Glashalle wird somit ein gedämmtes Rahmenprofil empfohlen.

6.2 ERDREICH SPEICHERMASSE

Erdreich weist im Vergleich zu Luft eine wesentlich höhere Speicherkapazität auf. Dadurch speichert das Erdreich einerseits länger aufgenommene Wärme als Luft, andererseits dauert die Aufwärmung jedoch auch deutlich länger.

In der unbeheizten Glashalle wird am Tag die unbebaute Bodenoberfläche (Kies- bzw. Asphaltfläche) durch Solarstrahlung und Hallenlufttemperatur erwärmt. Bei ungedämmter Ausführung dieser Bodenoberfläche erfolgt ein ungehinderter Wärmeaustausch mit dem Erdreich, wodurch die hohe Speicherkapazität des Erdreichs das Hallenklima beeinflusst.

In den beheizten Einbauten ist die Dämmung der erdberührten Bauteile sowohl für den thermischen Komfort (Strahlungsasymmetrie), wie auch für die Minimierung des Heizwärmebedarfs erforderlich. Infolge der gedämmten Bodenflächen kommt die Speichermasse des Erdreichs im Bereich der Einbauten also nicht zum Tragen.

Der Einfluss des Erdreichs im Bereich der unbebauten Bodenfläche der Glashalle auf die Hallentemperatur wird mit den Annahmen zu Glashalle und Einbauten gemäss Kapitel 5 im Folgenden dargestellt und bewertet.

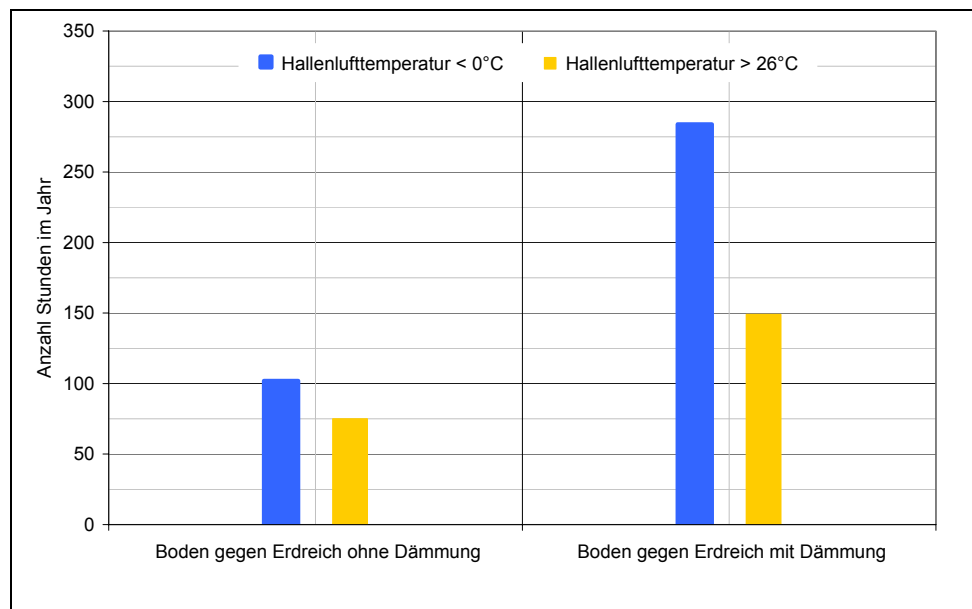


Fig. 21: Glashalle Erdreich – Stundenhäufigkeit Extremtemperaturen im Jahr

Fig. 21 zeigt die Anzahl der Stunden im Jahr, in denen die Lufttemperatur in der Glashalle 0 °C unterschreitet und 26 °C überschreitet. Die Speichermasse des Erdreichs reduziert sowohl im Sommer, wie auch im Winter die Stundenhäufigkeit mit Extremtemperaturen. Somit sollten die unbauten, erdberührten Bauteile der Glashalle ohne Dämmung ausgeführt werden, um in diesen Bereichen die Speichermasse des Erdreichs nutzen zu können.

6.3 EINBAUTEN SPEICHERMASSE

Im Rahmen des von Bauart Architekten geplanten Projekts "Sunfactory" wird davon ausgegangen, dass die Einbauten als typische Gewerbebauten in kostengünstiger Leichtbauweise erstellt werden. Mit den Annahmen aus Kapitel 5 wird untersucht, wie sich die Speichermasse der Einbauten auf die Hallentemperaturen auswirkt.

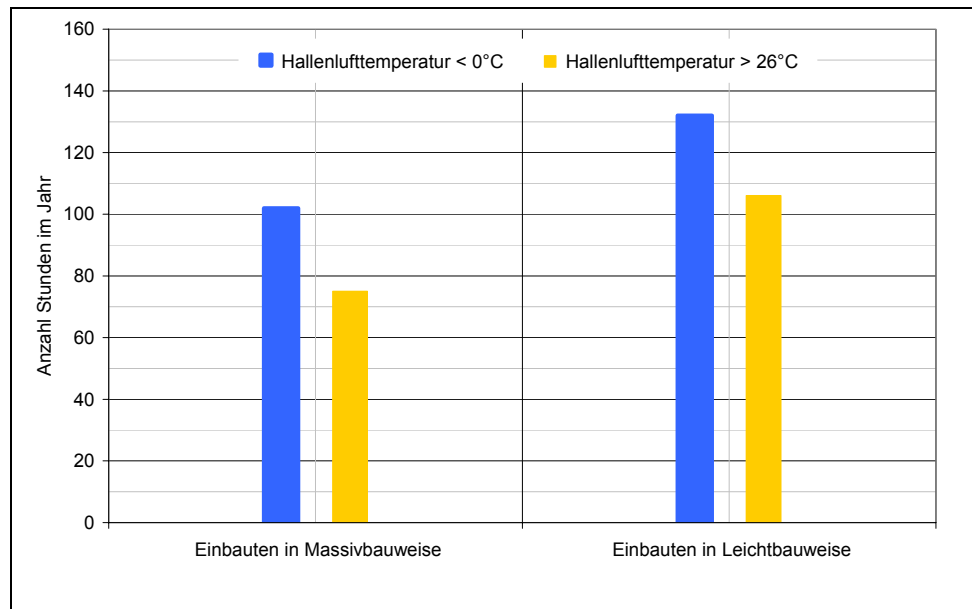


Fig. 22: Glashalle Einbauten – Stundenhäufigkeit Extremtemperaturen im Jahr

Wie in Fig. 22 zu erkennen ist, wirken sich die Einbauten in Massivbauweise im Vergleich zu den Einbauten in Leichtbauweise insgesamt positiv auf die Extremtemperaturen aus. Aus thermischer Sicht wird somit die Ausführung der Einbauten in Massivbauweise empfohlen.

6.4 PHOTOVOLTAIKVERGLASUNG

Der Einfluss der Photovoltaikverglasung auf die Hallenlufttemperaturen wird ohne innenliegenden Sonnenschutz unterhalb der verglasten Dachflächen untersucht. Ansonsten erfolgt die Simulation mit den Annahmen aus Kapitel 5. Als Ausgangsszenario wird gemäss Architektenplanung die gesamte nach Süden orientierte Dachfläche mit Photovoltaikverglasung angenommen. Diese Fläche von 8'800 m² entspricht etwa einem Anteil von 50 % Photovoltaikfläche zu Bodenfläche. In den weiteren Szenarien wird die Photovoltaikverglasung (g-Wert ~ 0.2) anteilig durch eine Industrieverglasung (g-Wert = 0.76) ersetzt.

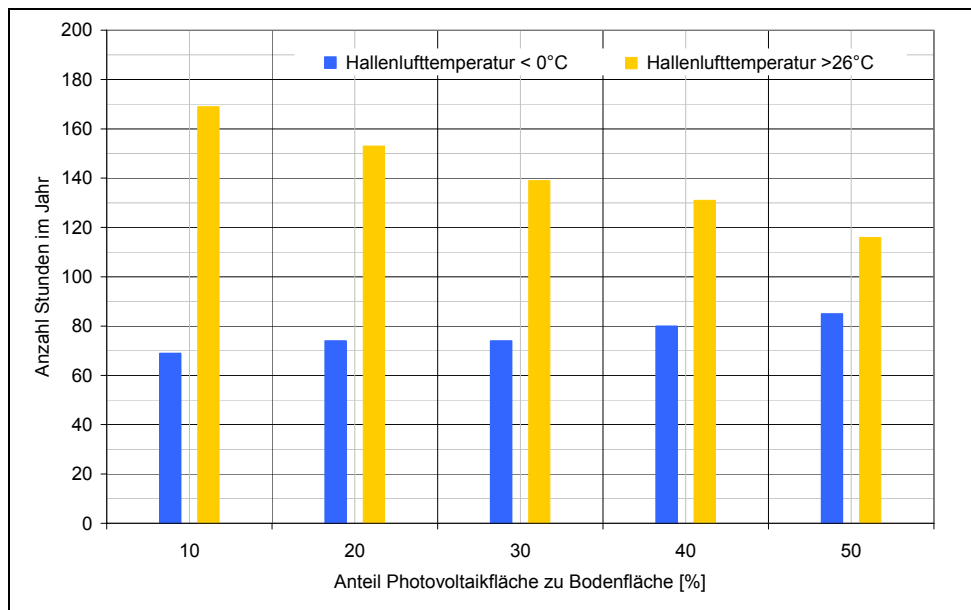


Fig. 23: Glashalle Photovoltaikfläche – Stundenhäufigkeit Extremtemperaturen im Jahr

In Fig. 23 ist zu erkennen, dass mit sinkendem Photovoltaikanteil die Stundenhäufigkeit mit Hallenlufttemperaturen unter 0 °C geringfügig sinkt. Gleichzeitig steigen die Stunden mit Temperaturen über 26 °C vergleichsweise deutlich an. Aus thermischer Sicht ist somit optimalerweise die gesamte nach Süden orientierte Dachfläche mit Photovoltaikverglasung zu versehen.

Südorientierte Flächen erhalten in der Heizperiode die höchste Globalstrahlung. Somit bieten sich nach Süden orientierte Glasflächen mit hohen g-Werten an, um über passive Solarnutzung den Heizwärmebedarf effizient zu reduzieren. Die Südorientierung ist aber ebenfalls für die Energieerzeugung mittels Photovoltaikelementen am effizientesten. Im Folgenden wird der Einfluss des Photovoltaikanteils auf die Solargewinne in der Glashalle untersucht.

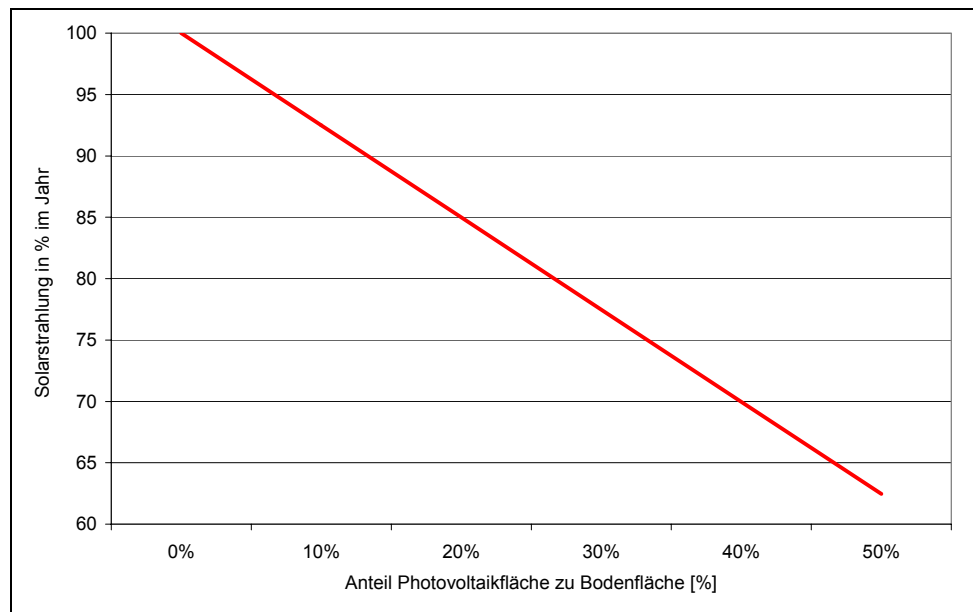


Fig. 24: Glashalle Photovoltaikfläche – Solarstrahlung im Jahr

Wie in Fig. 24 zu erkennen ist, werden in der Glashalle die Solargewinne mit steigendem Photovoltaikanteil deutlich reduziert.

Hinsichtlich des visuellen Komforts wird die Photovoltaikverglasung somit auch die Blendungsgefahr in der Glashalle reduzieren.

Energetisch betrachtet reduzieren sich mit steigendem PV-Anteil die Solargewinne in der Glashalle. Infolge dessen erhöhen sich der Heizwärmebedarf der Einbauten sowie der Strombedarf für Kunstlicht in Glashalle und Einbauten. Die Beurteilung, welcher Photovoltaikanteil aus energetischer Sicht am effizientesten ist, kann erst mittels einer detaillierten Energiebilanz erfolgen. Hierzu sind für verschiedene Himmelsrichtungen und Photovoltaikanteile über ein Jahr betrachtet der erzeugte Strom dem Energiebedarf für Kunstlicht und Heizung gegenüberzustellen. Die detaillierte Energiebilanz wird im Rahmen dieser Studie nicht erstellt. Es ist aber vorstellbar, dass infolge einer positiven Bilanz auf Stromerzeugerseite ein hoher PV-Anteil dem energetischen Optimum entspricht.

Ökonomisch rechnet sich die grossflächige Photovoltaikverglasung infolge hoher Investitionskosten und langer Amortisationszeiten heutzutage vermutlich noch nicht. Pilotprojekte wie die Sunfactory liefern aber wichtige Beiträge, die Energieerzeugung mittels regenerativer Energien auch wirtschaftlich attraktiv zu machen.

In dieser Studie wird im Folgenden die Fläche der Photovoltaikverglasung pauschal vereinfacht auf 30 % der Bodenfläche verkleinert. Die verbleibende Photovoltaikfläche beträgt etwa 5'000 m² und nimmt knapp 60 % der südorientierten Dachflächen ein.

7. Resultate Glashalle

7.1 LUFTSTRÖMUNG

Für den Sommerfall ohne Wind (worst-case) wird untersucht, ob die geplanten Lüftungsöffnungen hinsichtlich Hygiene und Wärmeabfuhr (Vermeidung von Überhitzung) eine hinreichende Durchlüftung der Glashalle gewährleisten. Wenn im Sommer bei Windstille ein ausreichender Luftaustausch stattfindet, bestehen diesbezüglich mit Wind keine Bedenken. Im Winter ist es das Ziel, die Lüftungsverluste der Glashalle so gering wie möglich zu halten. Die Zu- und Abluftflächen werden also lediglich zur Aufrechterhaltung des Hygienischen-Mindestluftwechsels in Halle und Einbauten geöffnet. Die resultierenden Temperaturgradienten (horizontal und vertikal) bestimmen, ob und wie die Halle für die thermischen Simulationen in *TRNSYS* allenfalls zu zonieren ist.

Das Strömungsmodell basiert auf der Architektenplanung der Glashalle, Stand August 2002, mit einem vereinfachten Layout der Einbauten. Die Belüftung der Glashalle erfolgt über horizontal durchlaufende Fensterbänder im Bereich der Fassadenflächen und die Abluft über Oberlichtöffnungen in den nordorientierten Satteldächern.

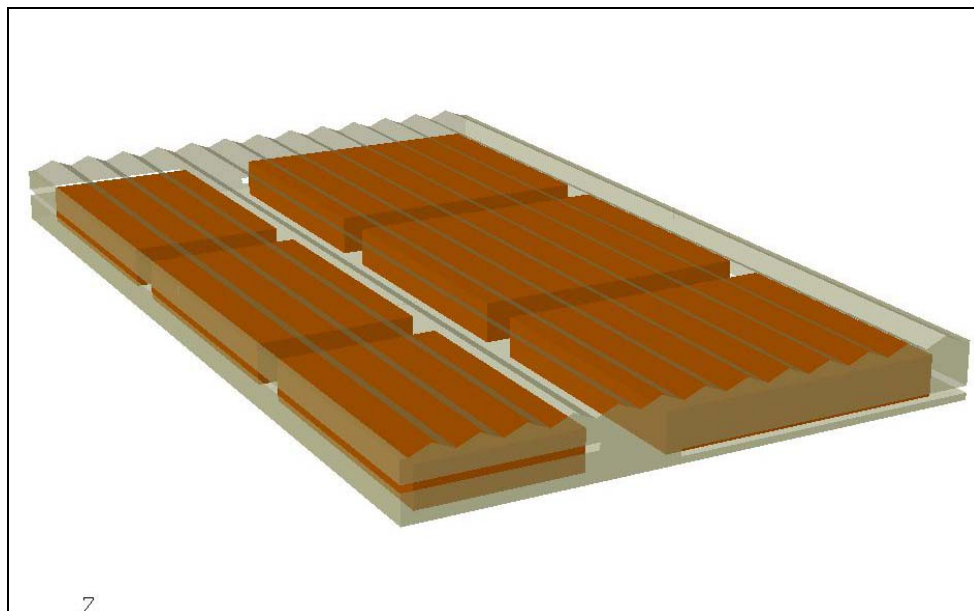


Fig. 25: Modell Strömungssimulation – Glashalle mit Einbauten

Annahmen Strömungsmodell:

Aussenlufttemperatur:	25 °C
Globalstrahlung horizontal:	850 W/m ²
Zuluftöffnungen (Fassade):	460 m ²
Abluftöffnungen (Oberlichter Dach):	2'400 m ² , 16 % der Bodenfläche (Architektenplanung)
Höhe Einbauten:	6 m

7.1.1 Luftgeschwindigkeit

Ob die geplanten Zu- und Abluftflächen für die Belüftung der Halle ausreichend dimensioniert sind, wird anhand der Luftgeschwindigkeit in der Glashalle überprüft.

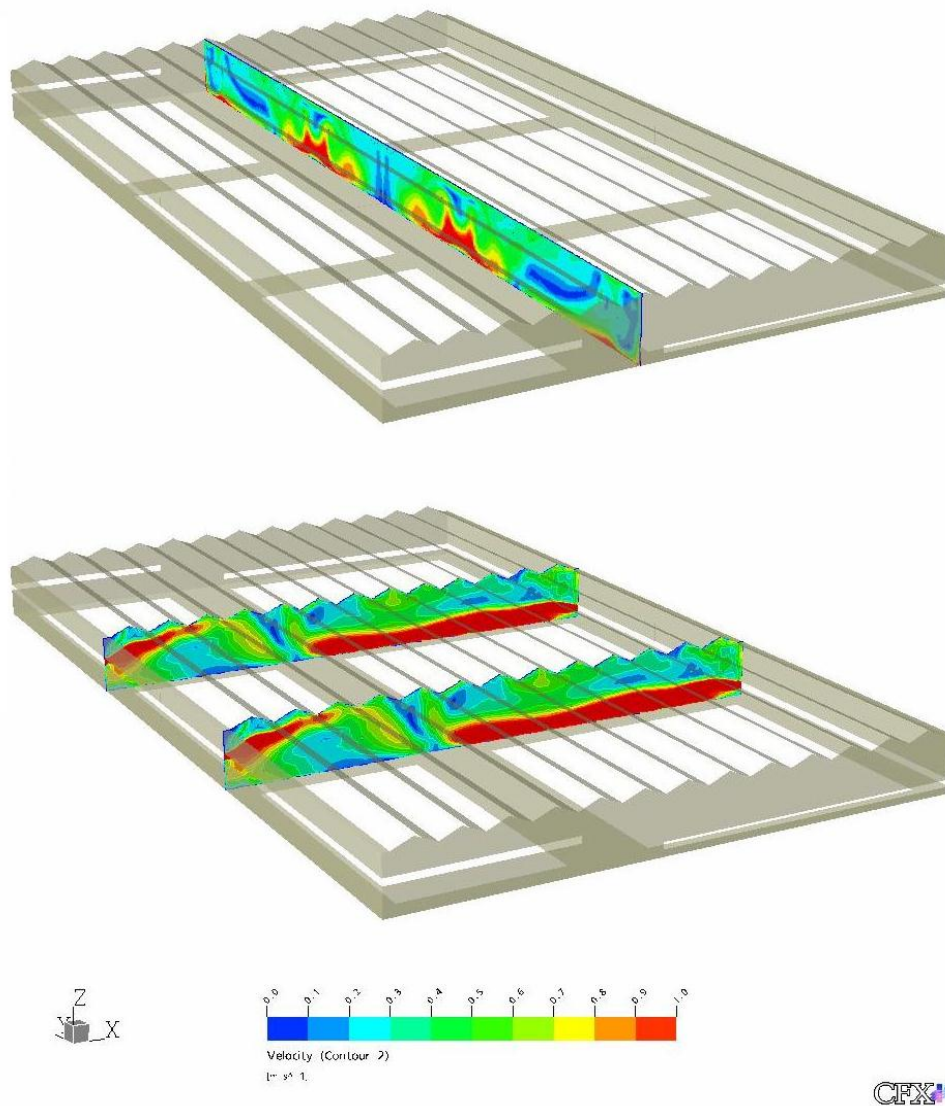


Fig. 26: Glashalle mit Einbauten – Luftgeschwindigkeit in der Glashalle

Fig. 26 zeigt, dass über die geplanten Zu- und Abluftflächen eine ausreichende Luftdurchströmung der Halle erfolgt. Die Luftgeschwindigkeit unterschreitet 0.1 m/s an praktisch keiner Stelle in der Glashalle.

Nachfolgend werden die Luftgeschwindigkeiten an den geplanten Abluftflächen dargestellt.

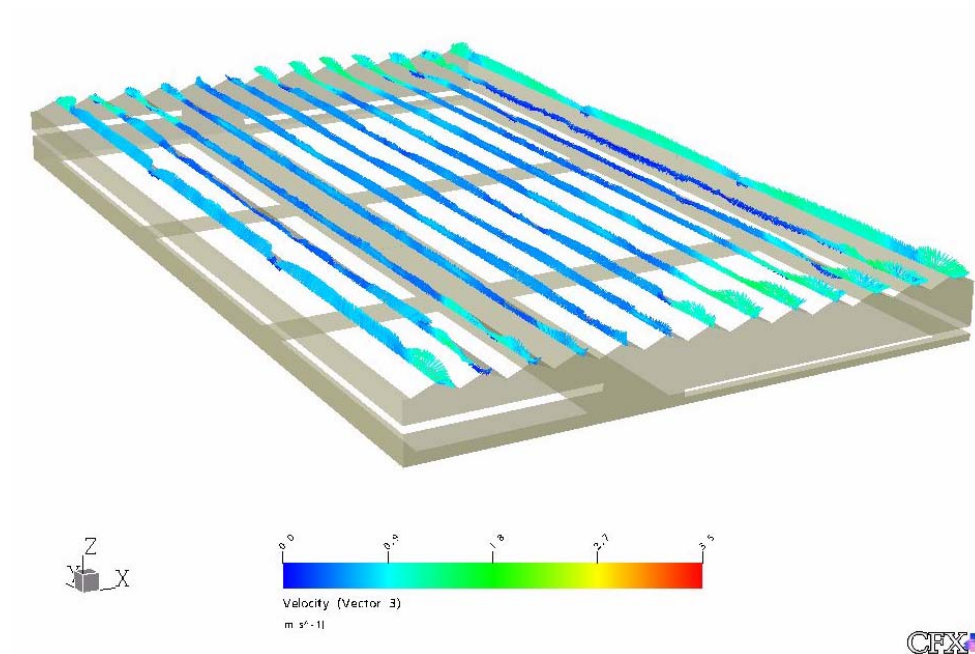


Fig. 27: Glashalle mit Einbauten – Luftgeschwindigkeit an den Abluftöffnungen

Fig. 27 zeigt, dass bei den Abluftflächen die höchsten Luftgeschwindigkeiten in den Dachrandbereichen auftreten. In diesen Bereichen strömt die über die Fensterflächen einströmende Zuluft direkt über die Abluftflächen wieder ab. Für die Optimierung der Hallendurchströmung sollten die Abluftflächen insbesondere an den Dachrandbereichen minimiert werden.

7.1.2 Temperaturverteilung

Die folgende Figur zeigt die horizontale Temperaturverteilung in der Glashalle. Das obere Modell stellt die Temperaturen in 2 m Höhe (Aufenthaltsbereich) und das untere Modell die Temperaturverteilung in 7.5 m Höhe (oberhalb der Einbauten) dar.

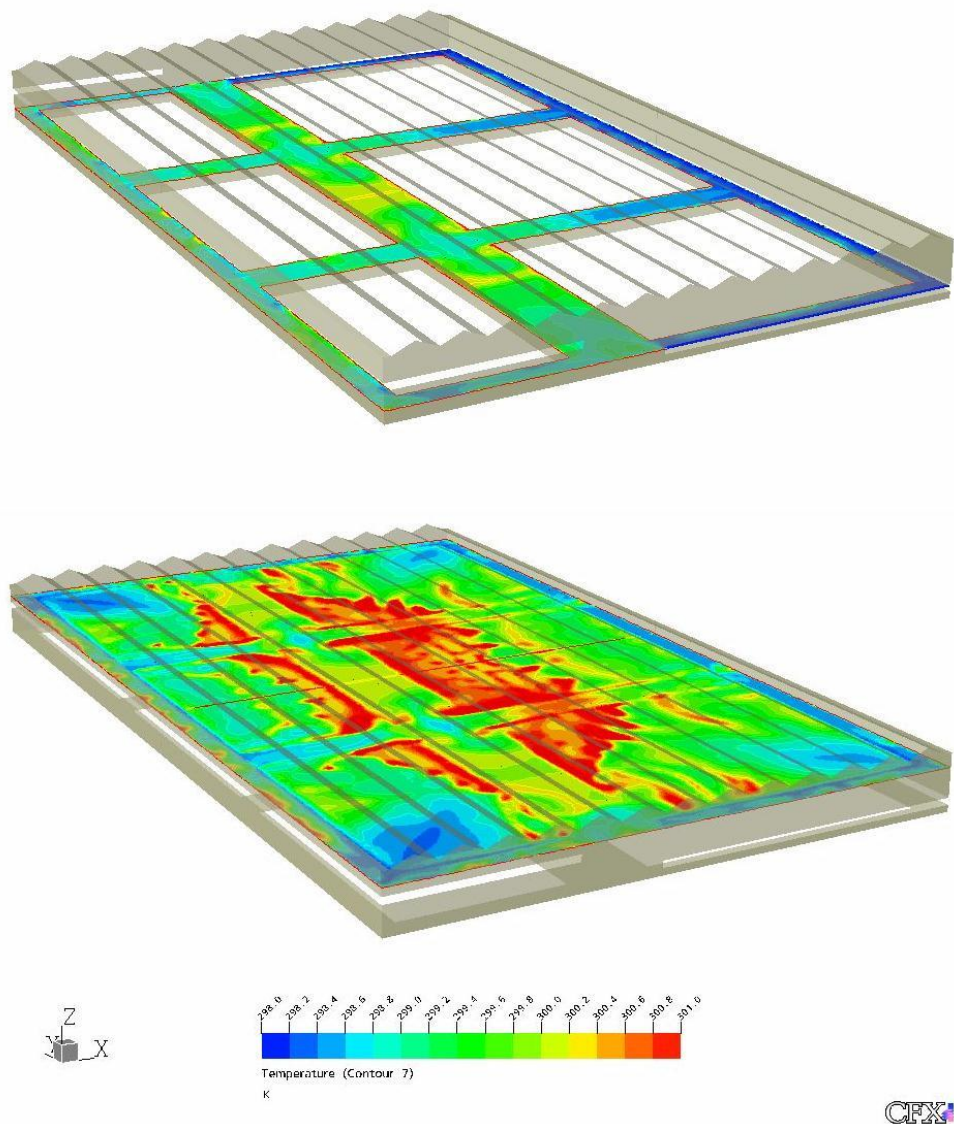


Fig. 28: Glashalle mit Einbauten – Horizontale Temperaturverteilung 2 m und 7.5 m über Boden

Wie in Fig. 28 zu erkennen ist, schwanken die Lufttemperaturen in der Glashalle horizontal um maximal 3 K. Für die thermischen Simulationen wird von der horizontalen Zonierung der Halle infolge dieser Temperaturgradienten abgesehen.

Die vertikale Temperaturverteilung in der Glashalle wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

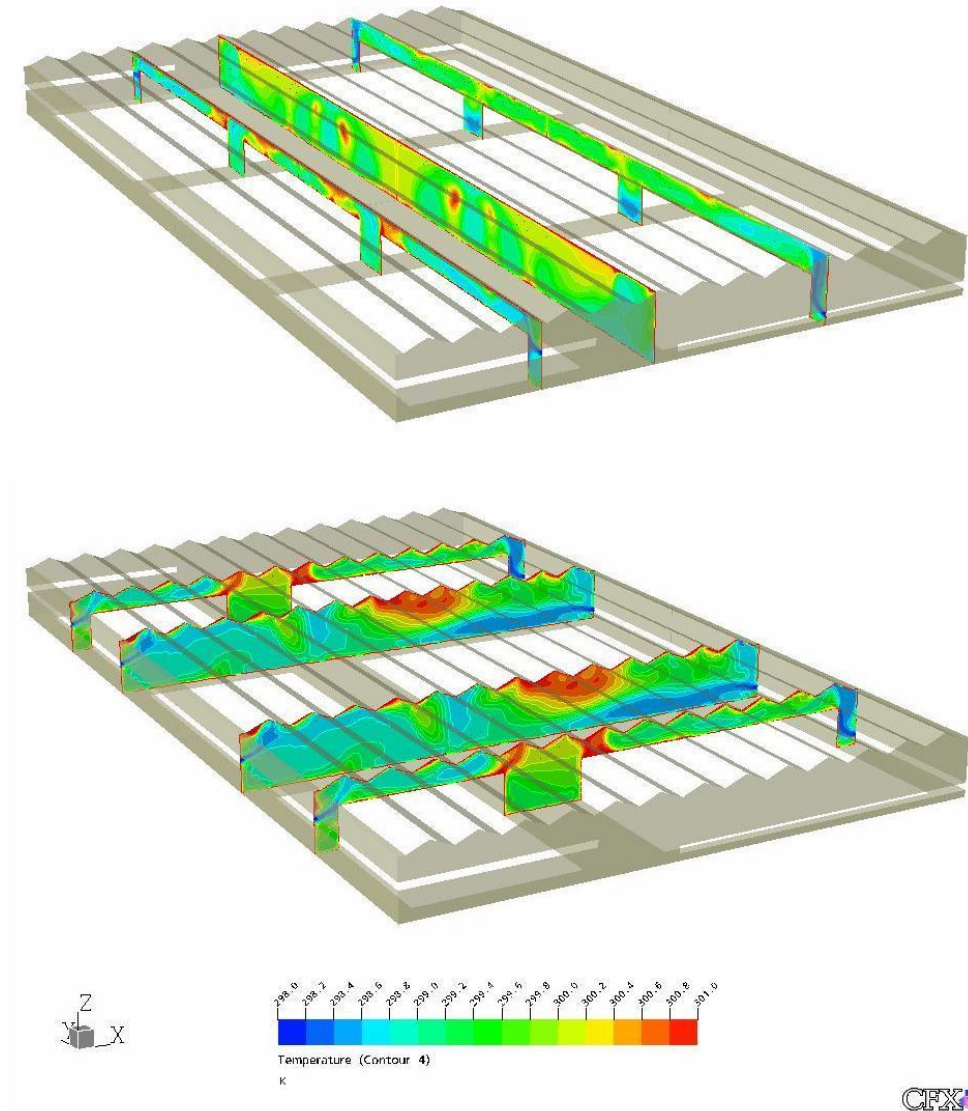


Fig. 29: Glashalle mit Einbauten –Vertikale Temperaturverteilung Quer- und Längsrichtung

In Fig. 29 ist die vertikale Temperaturverteilung in der Glashalle dargestellt. Die Lufttemperaturen schwanken vertikal um maximal 3 K. Von der vertikalen Zonierung der Halle wird infolge dieser Temperaturgradienten abgesehen.

Somit ist die vertikale Zonierung der Halle, infolge hoher Temperaturgradienten in eine oder mehrere Richtungen, für die thermischen Simulationen nicht erforderlich.

Über die Fensteröffnungen mit niedriger Brüstung strömt die Zuluft zwischen den Einbauten auf dem Fussboden tief in die Halle hinein. Die hohen Fensterbrüstungen führen hingegen dazu, dass die in die Halle strömende Zuluft über die Oberlichter abströmt. Niedrige Brüstungen von Zuluftöffnungen in der Fassade und Abluftöffnungen im Dach, unter Verzicht auf Abluftöffnungen im Dachrandbereich, führen zu einer optimalen Luftdurchströmung der Halle.

7.2 LÜFTUNGSKONZEPT

Die Regelung der natürlichen Lüftung erfolgt in Abhängigkeit von Aussentemperatur, Wind, Niederschlag und hygienisch erforderlichem Mindest-Luftwechsel gemäss Kapitel 5.

Die über natürliche Lüftung und Infiltration einströmende Luftmenge wird mit Öffnungsfläche und Temperaturdifferenz gemäss Kapitel 5 dynamisch gerechnet.

7.2.1 Abluftfläche

Die Strömungssimulation hat gezeigt, dass die von Architektenseite geplante Zuluftfläche (etwa 460 m²) im Bereich der Glasfassaden ausreichend dimensioniert ist, um in der Glashalle einen hinreichenden Luftaustausch zu gewährleisten. Für die Optimierung der Hallendurchströmung sollte jedoch die Abluftfläche im Bereich der Oberlichter an den Dachrandabschlüssen reduziert werden. Mit den Annahmen aus Kapitel 5 wird der thermische Einfluss der Abluftfläche auf das sommerliche Hallenklima untersucht.

Als Ausgangsszenario wird die in der Strömungssimulation mit 2'400 m² angenommene Abluftfläche gewählt. Diese Fläche entspricht 16 % der Bodenfläche (etwa 30 % der nordorientierten Satteldachflächen).

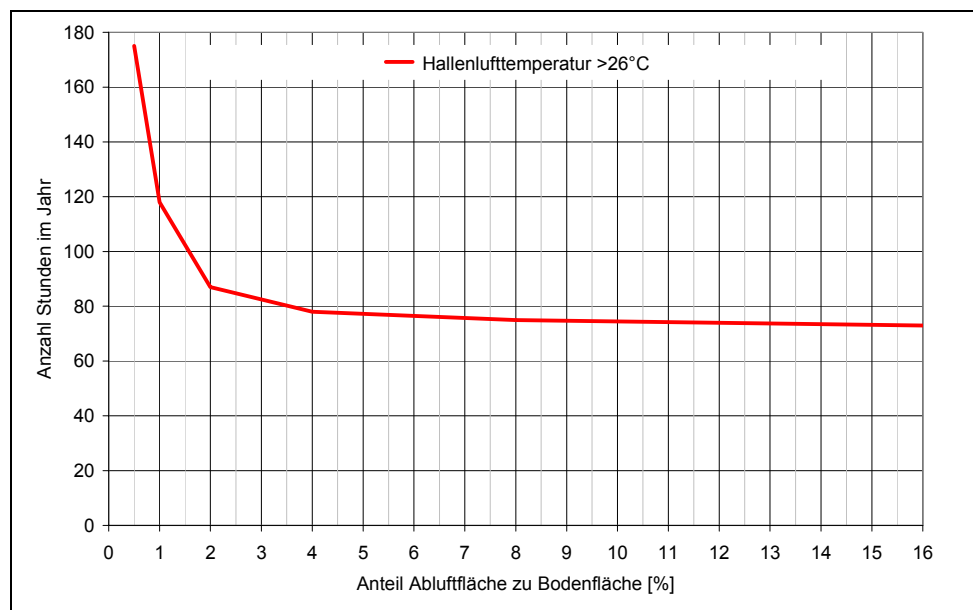


Fig. 30: Glashalle Abluftfläche – Stundenhäufigkeit Extremtemperaturen im Sommer

In Fig. 30 wird der Einfluss der Abluftfläche auf die Stundenhäufigkeit der Hallenlufttemperaturen über 26 °C im Sommer dargestellt. Wenn das Verhältnis Abluftfläche zu Bodenfläche 4 % (etwa 670 m² Abluftfläche) unterschreitet, steigt die Stundenhäufigkeit mit Hallenlufttemperaturen über 26 °C deutlich an. Für die Wärmeabfuhr im Sommer kann die Abluftfläche somit auf 4 % der Bodenfläche reduziert werden.

7.2.2 Nachtlüftung

Der Einfluss der gemäss Kapitel 5 angenommenen natürlichen Nachtlüftung auf die Hallentemperatur wird nachfolgend untersucht.

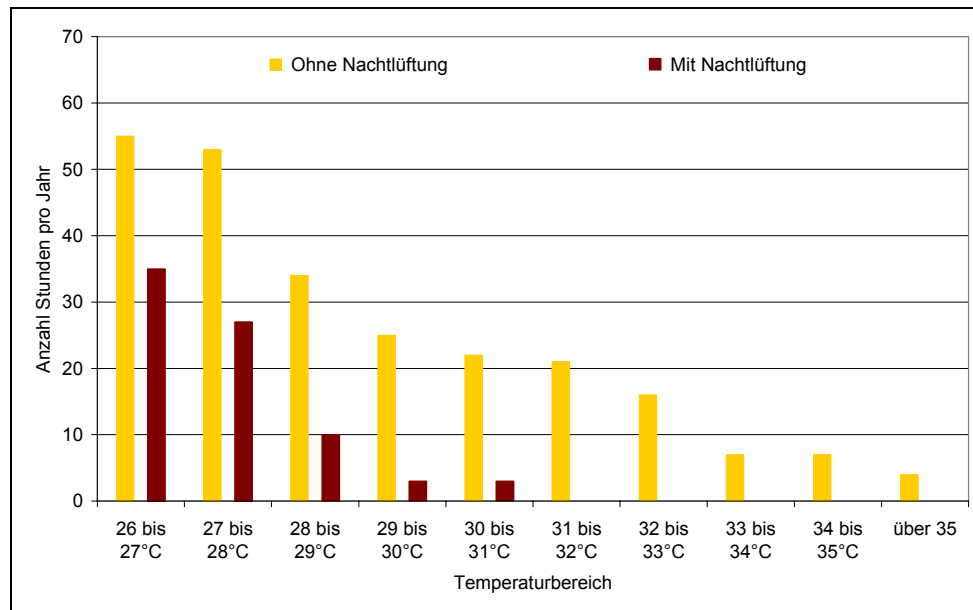


Fig. 31: Glashalle Nachtlüftung – Stundenhäufigkeit Extremtemperaturen im Sommer

Wie in Fig. 31 zu erkennen ist, sinkt mit der angenommenen Nachtlüftung die Stundenanzahl mit Hallentemperaturen über 26 °C deutlich. Gemäss Komfortanforderung soll im Sommer die Hallenlufttemperatur ‚möglichst‘ wenig über der Aussenlufttemperatur liegen. Die maximal zu erwartende Aussentemperatur in Tramelan liegt bei 30 °C. Somit ist ohne Nachtlüftung mit Hallentemperaturen über 35 °C die Komfortanforderung nicht erfüllt. Mittels natürlicher Nachtlüftung kann die maximal zu erwartende Hallentemperatur um etwa 4 K auf 31 °C gesenkt werden, so dass die Komfortanforderung erfüllt ist.

7.3 TEMPERATUREN

Die zu erwartenden Lufttemperaturen in der Glashalle werden mit den Annahmen aus Kapitel 5 untersucht.

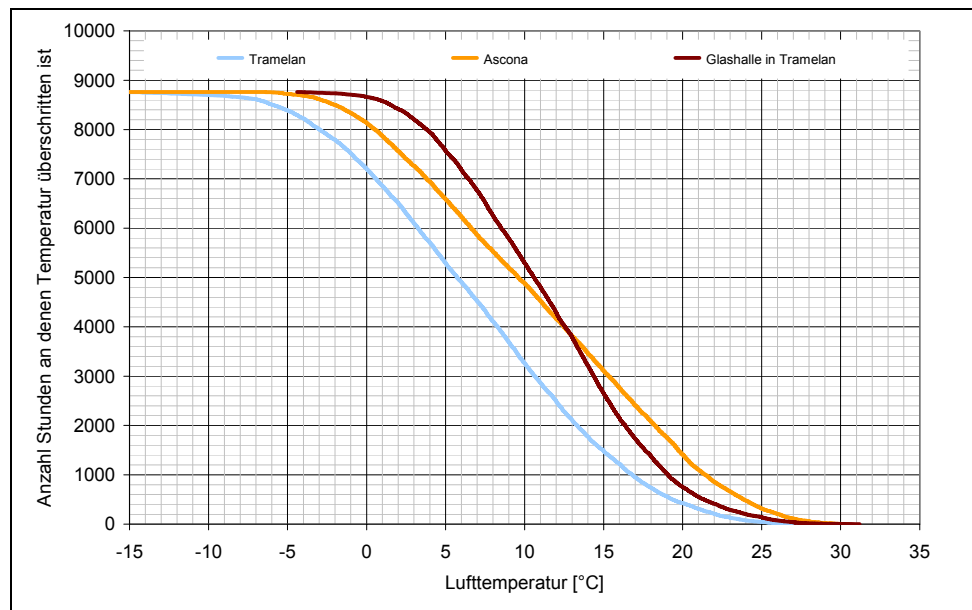


Fig. 32: Glashalle – Anzahl Stunden mit Raumlufttemperatur überschritten im Jahr

Die Hallentemperaturen nähern sich dem Klima von Ascona an, jedoch zeichnet sich die Hallentemperatur im Sommer und im Winter durch moderatere Temperaturen aus. Im Vergleich mit den Temperaturkurven von Tramelan treten in der Glashalle deutlich mehr Stunden mit Lufttemperaturen über 0 °C auf.

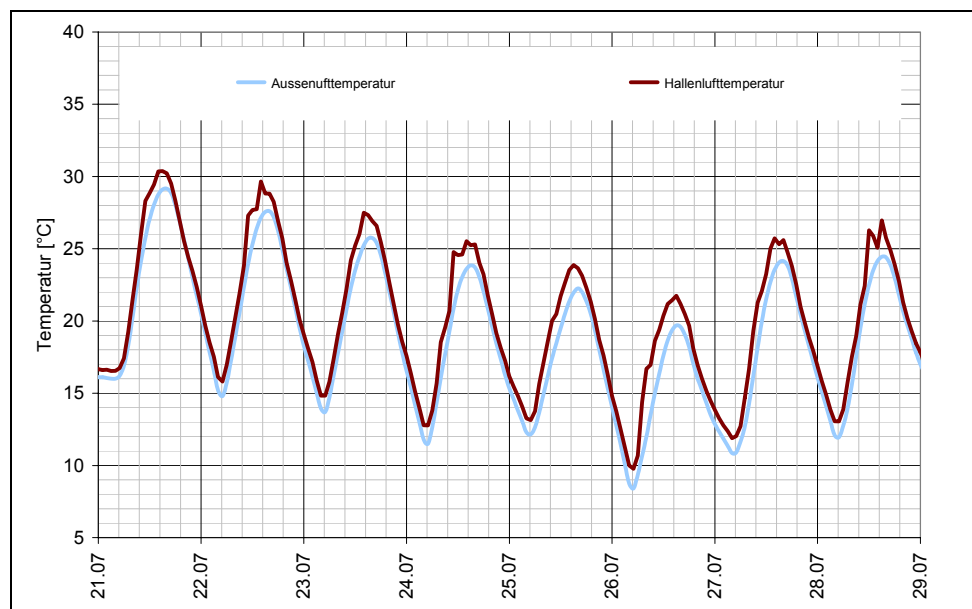


Fig. 33: Glashalle – Temperaturen im Sommer

Die Hallenlufttemperatur schwankt in einer heißen Sommerwoche zwischen 10 °C und 31 °C. Die Temperatur der Glashalle weicht um 1 – 2 K von der Aussentemperatur ab. Die Komfortbedingungen an Hitzetagen sind somit erfüllt.

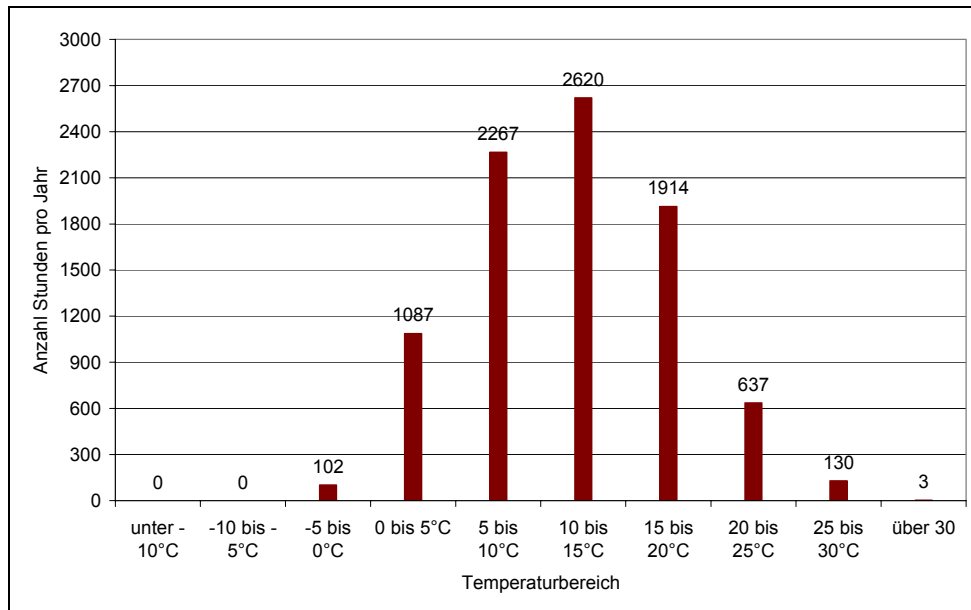


Fig. 34: Glashalle – Häufigkeitsverteilung der Hallenlufttemperatur

Fig. 34 zeigt eine statistische Auswertung der Hallenlufttemperaturwerte (Stundenwerte) über ein Jahr. In der Glashalle treten an wenigen Stunden im Jahr Lufttemperaturen unter 0 °C auf. Bei optimaler Regelung von natürlicher Lüftung und Sonnenschutz sind im Sommer Hallenlufttemperaturwerte über 30 °C praktisch nicht zu erwarten; die thermischen Komfortanforderungen sind somit erfüllt.

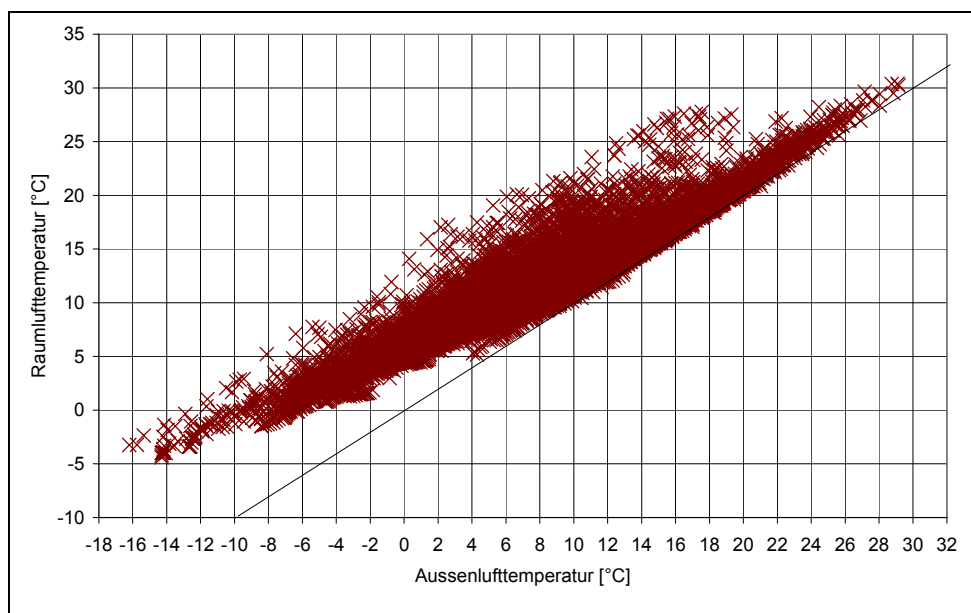


Fig. 35: Glashalle – Streuplott Raumlufttemperaturen

Der Zusammenhang zwischen (momentaner) Aussenlufttemperatur und (momentaner) Hallenlufttemperatur wird in Fig. 35 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der minimale Grenzwert von -3 °C nur an einzelnen Stunden bei Aussenlufttemperaturen unter -12 °C unterschritten wird. Die minimal zu erwartenden Hallentemperaturen werden hinsichtlich Frostgefahr deshalb nicht als problematisch erachtet.

Allgemein ist zu erkennen, dass die Hallentemperaturen im Winter etwa 10 K über der Aussentemperatur liegen und in der heissen Jahreszeit in etwa der Aussentemperatur entsprechen.

7.4 SOLARSTRAHLUNG

Mit den Annahmen aus Kapitel 5 wird der Einfluss der Glashülle auf die Solarstrahlung untersucht. Glasfassaden, horizontale und nordorientierte Glasdächer, sowie etwa 40 % der südorientierten Dachflächen sind mit Isolierverglasung ($g = 0.76$) vorgesehen. Die verbleibenden 60 % der südorientierten Dachflächen sind mit Photovoltaikverglasung (solare Transmission = 0.2) angenommen.

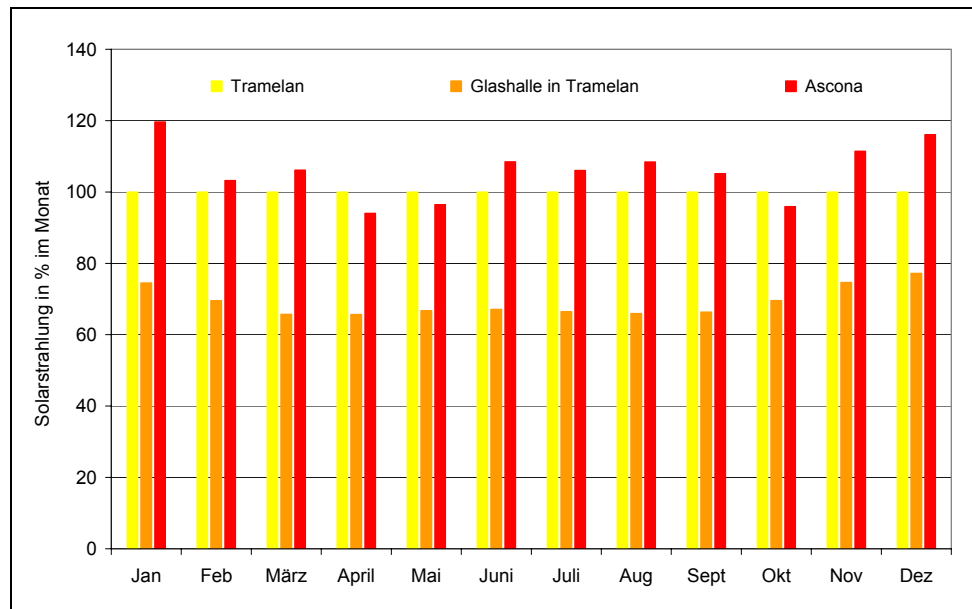


Fig. 36: Klima – Vergleich der monatlichen Solarstrahlung

Wie in Fig. 36 gut zu erkennen ist, reduziert die angenommene Glashülle in Tramelan die Solarstrahlung um etwa 30 – 35 %. Die Solarstrahlung in der Glashalle liegt im Jahresmittel damit etwa 40 % unterhalb der Solarstrahlung von Ascona.

7.5 LUFTFEUCHTE

Die Luftfeuchte in der Glashalle hängt von der Luftfeuchtigkeit der natürlichen Zuluft, sowie von internen Feuchtquellen ab. Hohe zusätzliche Feuchtelasten, wie z.B. durch Personen, Bepflanzungen, Wasserflächen etc., führen in Glashalle und an Innenoberflächen der Aussenhülle eventuell zur Kondensation. Mit den Annahmen aus Kapitel 5 wird der Einfluss zusätzlicher Feuchtelasten auf die Stundenhäufigkeit mit Kondensatanfall untersucht. Hierzu werden stündlich Hallenlufttemperatur und mittlere innere Oberflächentemperatur des Glasdaches mit der entsprechenden Taupunkttemperatur verglichen. Unterschreiten Luft- bzw. Oberflächentemperatur die Taupunkttemperatur, kommt es zu Kondensatanfall.

In dem Ausgangsszenario wird hierfür die Glashalle ohne zusätzliche Feuchtelasten durch Personen angenommen. Eine zusätzliche Feuchtelast von 60 kg/h entspricht etwa einer Feuchtabgabe von z.B. 100 Personen mit je 60 g/h, 700 mittelgrossen Pflanzen mit je 20 g/h und 850 m² Wasserflächen mit 40 g/h je m².

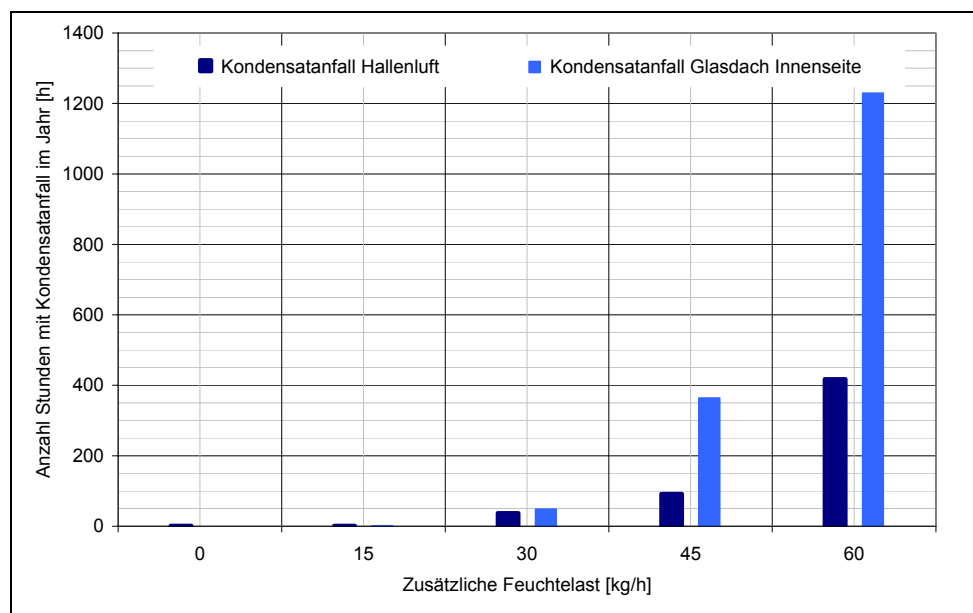


Fig. 37: Glashalle Feuchtelasten – Stundenhäufigkeit Kondensatanfall im Jahr

Es ist zu erkennen, dass bis zu einer zusätzlichen Feuchtelast von 15 kg/h praktisch nicht und bis 45 kg/h nur in einzelnen Stunden mit Kondensatanfall zu rechnen ist. Erst bei einer sehr hohen zusätzlichen Feuchtelast von 60 kg/h steigt, insbesondere auf den Innenoberflächen des Glasdaches, die Stundenhäufigkeit mit Kondensatanfall rapide an.

Die Resultate stellen eine Grundtendenz der zulässigen zusätzlichen Feuchtelast dar. Örtliche Wärmebrücken, in welchen die Stundenhäufigkeit mit Kondensatanfall höher ausfallen wird, sind in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Für die zusätzliche Feuchtelast von 60 kg/h wird der Zusammenhang von Kondensatanfall und Hallenlufttemperatur untersucht.

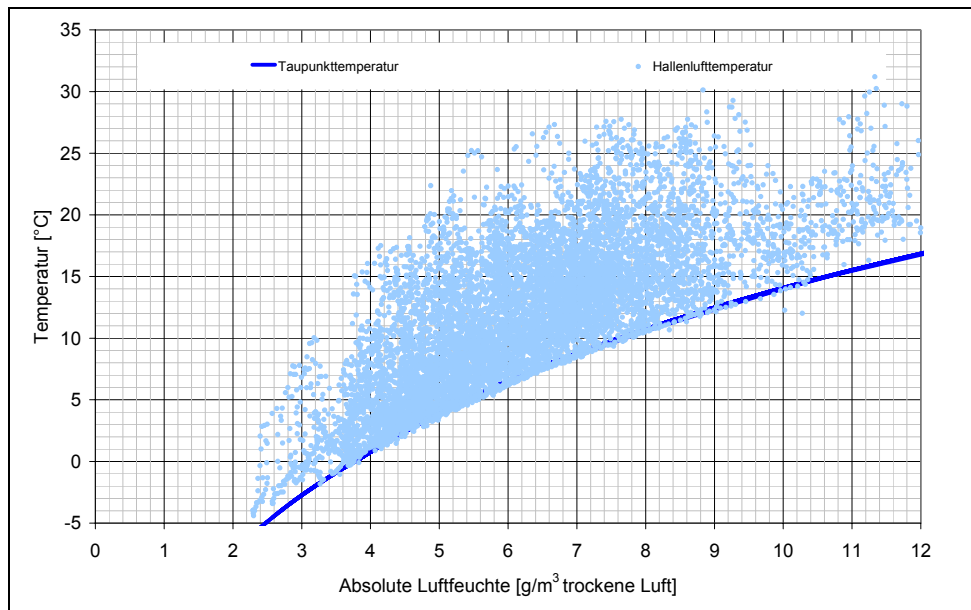


Fig. 38: Glashalle 60 kg/h Feuchtelast – Absolute Luftfeuchte im Jahr

In Fig. 38 wird das Wertepaar Lufttemperatur und absolute Luftfeuchte in der Glashalle untersucht. Wenn die Hallenlufttemperatur die Taupunkttemperatur erreicht bzw. unterschreitet, beträgt die relative Luftfeuchte 100 % und Kondensat fällt an. Wie in diesem Diagramm zu erkennen ist, treten die Stunden mit Kondensatanfall bei Hallenlufttemperaturen von -2 °C bis 14 °C auf. Die relative Luftfeuchte sinkt mit steigender Lufttemperatur. Somit ist durch die Kondensation in der Glashalle bei Hallenlufttemperaturen < 14 °C nicht mit Feuchtigkeitsproblemen in den höher temperierten Einbauten (Lufttemperaturen > 18 °C bzw. > 20 °C) zu rechnen.

Zusätzliche Feuchtelasten in der Glashalle, durch Personen, Pflanzen und Wasserflächen etc., sind also grundsätzlich ohne Feuchtigkeitsprobleme in der Glashalle möglich. Optimalerweise überschreiten die Feuchtelasten nicht 15 kg/h (z.B. 50 Personen, 200 mittelgrosse Pflanzen und 200 m² Wasserfläche).

8. Resultate Einbauten

8.1 TEMPERATUREN

Mit den Annahmen zu Glashalle und Einbauten gemäss Kapitel 5 werden die zu erwartenden Lufttemperaturen in den Einbauten untersucht und bewertet. Die im Mikroklima der Glashalle befindlichen Einbauten werden infolge unterschiedlicher Nutzung und Komfortanforderung in Bürogebäude und Werkhalle unterschieden

8.1.1 Bürogebäude

In Anlehnung an das Vorprojekt Précitrame beherbergt das Gebäude Büroräume, Nebennutz- sowie Verkehrsflächen. Mit 24 % weist es einen geringen Fensterflächenanteil zu Bodenfläche auf. Die internen Gewinne der Büroräume sind entsprechend SWKI 95-3 mit einer durchschnittlichen Büronutzung angenommen.

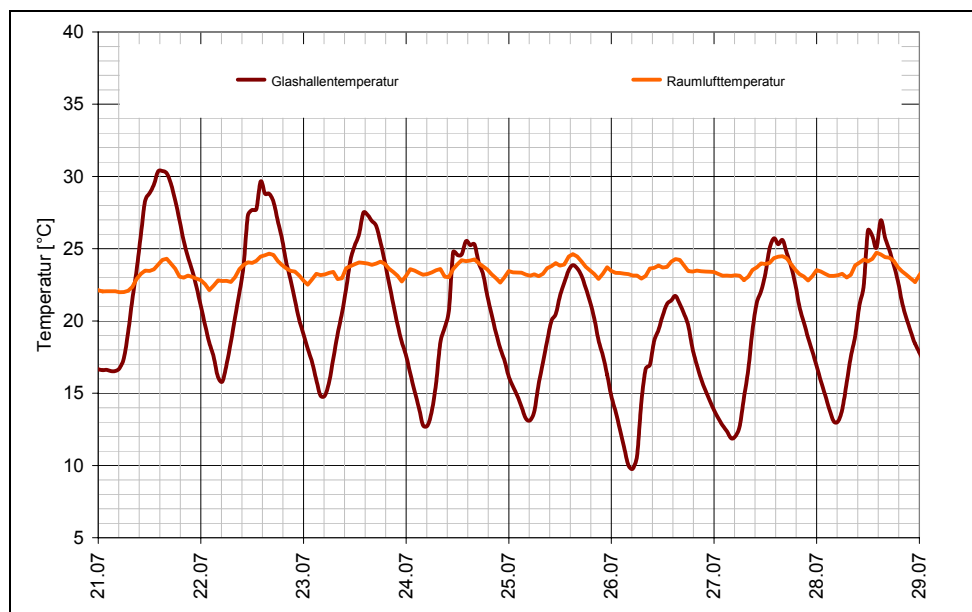


Fig. 39: Bürogebäude – Temperaturen im Sommer

Fig. 39 zeigt den Temperaturverlauf in einer heissen Sommerwoche. Die Hallenlufttemperatur liegt zwischen 10 °C (nachts) und 31 °C (tags). Die Raumlufttemperatur im Bürogebäude schwankt in einer heissen Sommerwoche zwischen 22 °C und 25 °C. Unter der Annahme, dass durch den Nutzer eine angemessene natürliche Fensterlüftung stattfindet, sind die Komfortbedingungen an Hitzetagen erfüllt.

Fig. 40 zeigt eine statistische Auswertung der Raumlufthtemperaturwerte (Stundenwerte) über ein Jahr. Berücksichtigt werden nur Werte während den Nutzungszeiten.

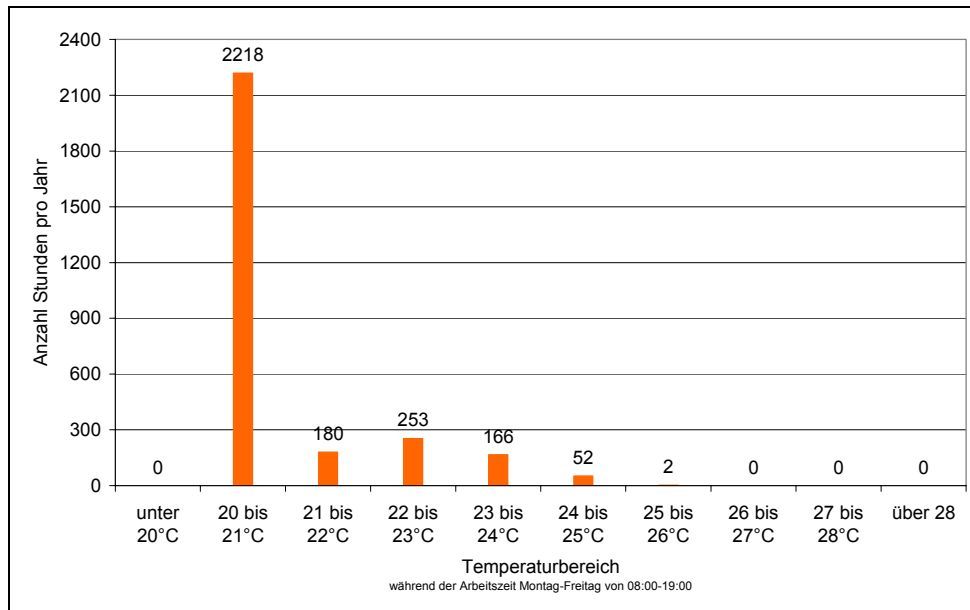


Fig. 40: Bürogebäude – Häufigkeitsverteilung der Raumlufthtemperatur

Raumtemperaturwerte über 26 °C und unter 20 °C sind nicht zu erwarten. Bei angemessener natürlicher Fensterlüftung durch den Nutzer liegen die Raumlufthtemperaturen im Komfortbereich.

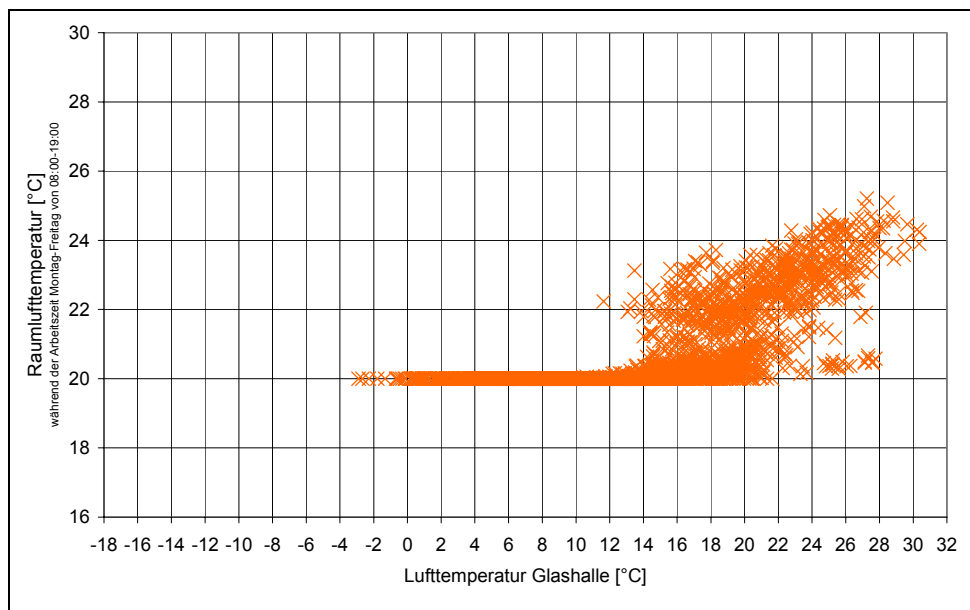


Fig. 41: Bürogebäude – Streuplott Raumlufthtemperaturen

Der Zusammenhang zwischen (momentaner) Umgebungslufttemperatur und (momentaner) Raumlufthtemperatur wird in Fig. 41 dargestellt. Im Winter wird die in SIA 380/1 (Kapitel 3.4.1.1) für Büronutzungen geforderte Innentemperatur von 20 °C über statische Heizflächen gewährleistet. Die in SIA Norm 180 (Kapitel 2.1.4) für den Winterfall empfohlenen Raumtemperaturen zwischen 19 und 24 °C werden eingehalten. Im Sommer sind die gemäss SIA 180 (Kapitel 2.1.5) empfohlenen Raumtemperaturen zwischen 23.5 und 26.5 °C praktisch immer zu erwarten.

8.1.2 Werkhalle

Die Werkhalle dient in Anlehnung an Précitrame Produktions- und Lagerzwecken. Der Fensterflächenanteil zu Bodenfläche ist mit 65 % im Vergleich mit dem Bürogebäude höher. Gleichzeitig sind die internen Gewinne nach SWKI 95-3 in der Werkhalle infolge der Maschinenabwärme höher als in dem Bürogebäude.

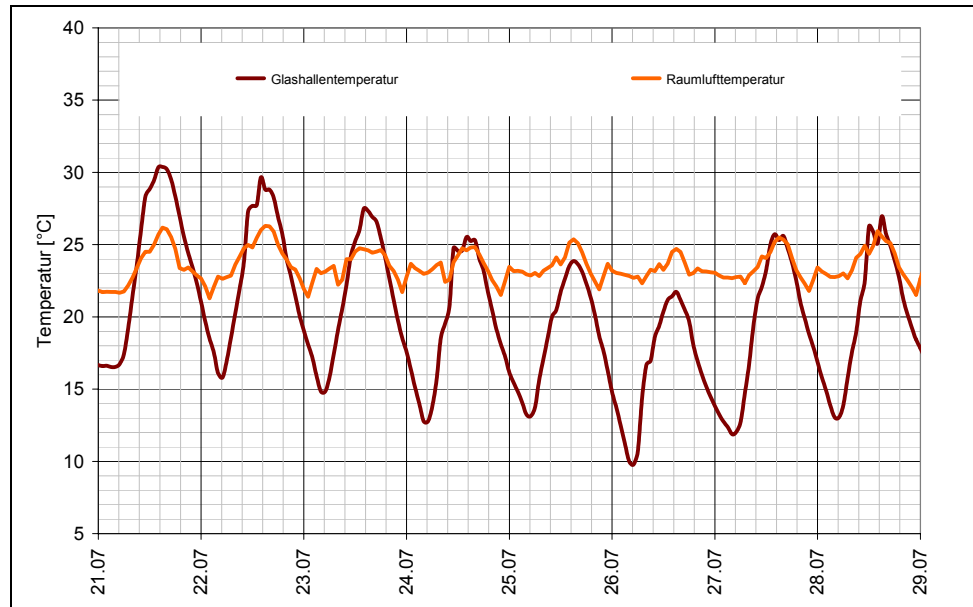


Fig. 42: Werkhalle – Temperaturen im Sommer

Die Raumlufttemperatur in der Werkhalle schwankt in einer heissen Sommerwoche zwischen 22 °C und 26 °C. Bei angemessener natürlicher Fensterlüftung durch den Nutzer sind die Komfortbedingungen an Hitzetagen somit erfüllt.

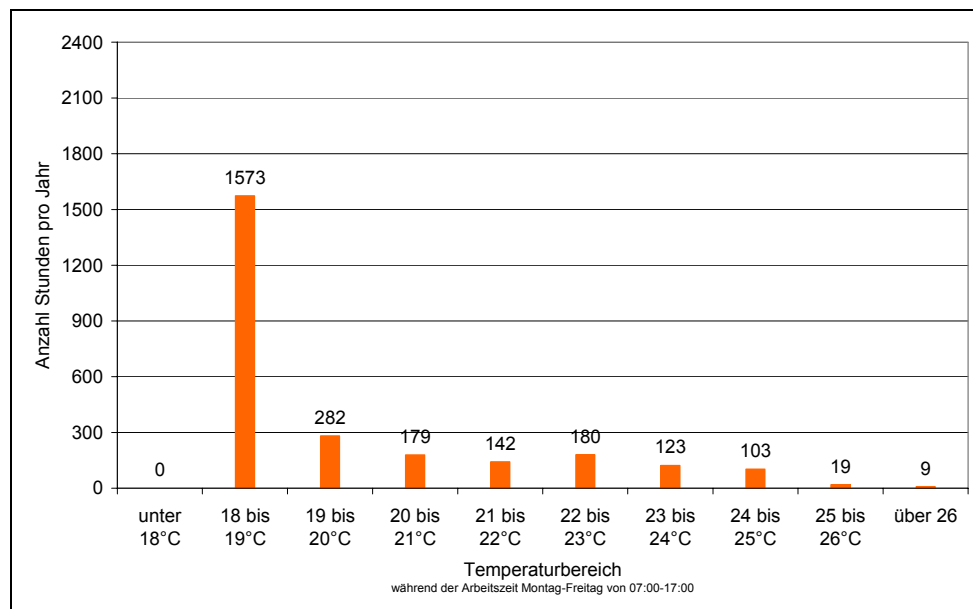


Fig. 43: Werkhalle – Häufigkeitsverteilung der Raumlufttemperatur

Fig. 43 zeigt eine statistische Auswertung der Raumlufttemperaturwerte (Stundenwerte) über ein Jahr. Berücksichtigt werden nur Werte während den Nutzungszeiten. Raumtemperaturwerte unter 18 °C und über 26 °C sind praktisch nicht zu erwarten. Bei angemessener natürlicher Fensterlüftung durch den Nutzer liegen die Raumlufttemperaturen während der Nutzungszeit im Komfortbereich.

In Fig. 44 wird der Zusammenhang zwischen (momentaner) Umgebungslufttemperatur und (momentaner) Raumlufthtemperatur dargestellt.

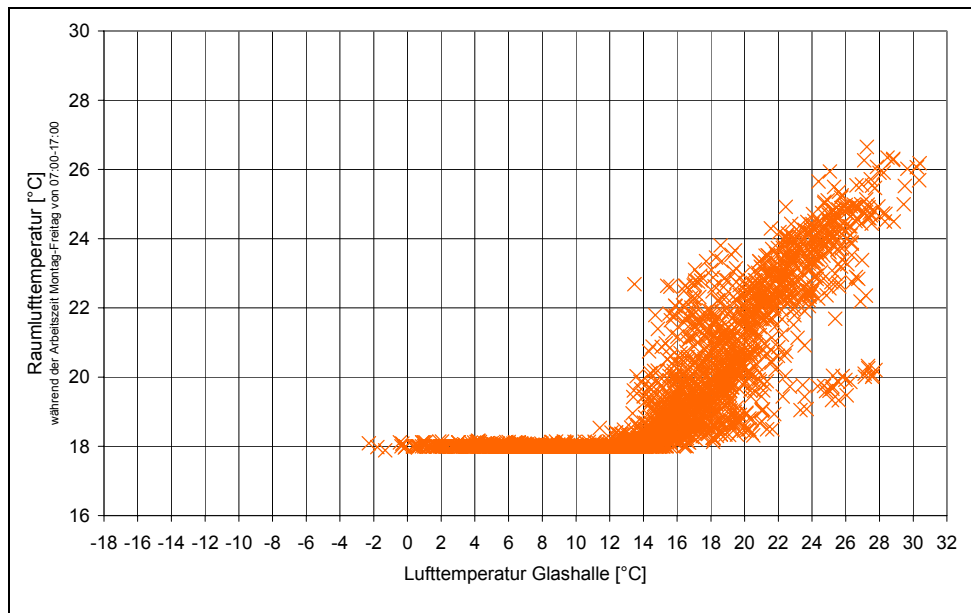


Fig. 44: Werkhalle – Streuplott Raumlufthtemperaturen

In Fig. 44 ist zu erkennen, dass im Winter die in SIA 380/1 geforderte Innentemperatur von 18 °C für Industrie- und Lagernutzungen über statische Heizflächen gewährleistet ist. Im Sommer sind gemäss SIA 180 empfohlene Raumtemperaturen zwischen 23.5 und 26.5 °C nahezu immer zu erwarten.

8.2 ENERGIEBILANZ

Im Vergleich mit dem Aussenklima zeichnet sich das Mikroklima der Glashalle durch höhere Lufttemperaturen und geringere Solarstrahlungswerte aus. Die Gewinne und Verluste der Einbauten im Mikroklima der Halle und im Aussenklima von Tramelan werden während der Heizperiode miteinander verglichen. Die Berechnung der Wärmegewinne und -verluste erfolgt nach SIA 380/1 mit dem Programm *THERMO*.

Das Verhältnis von Gebäudehüllfläche A zu Energiebezugsfläche EBF ist grundsätzlich einer der entscheidenden Parameter für die Höhe von Verlusten und Gewinnen über die Aussenhülle. Je kleiner die gemäss SIA 380/1 definierte Gebäudehüllzahl A/EBF ist, desto geringer ist infolge dessen auch der Heizwärmebedarf im Winter. Die Geometrie der Sunfactory weist mit 0.5 eine sehr kleine Gebäudehüllzahl auf und ist somit energetisch betrachtet optimal.

Die Annahmen der Berechnungen von Glashalle und Einbauten entsprechen Kapitel 5. Für das Aussenklima werden Klimadaten aus *Meteonorm* verwendet. Das Mikroklima in der Glashalle ist Ergebnis der *TRNSYS*-Simulationen. Die Berechnung für Bürogebäude und Werkhalle ist zunächst getrennt erfolgt. Die Einzelergebnisse sind unter dem Oberbegriff "Einbauten" zusammengefasst.

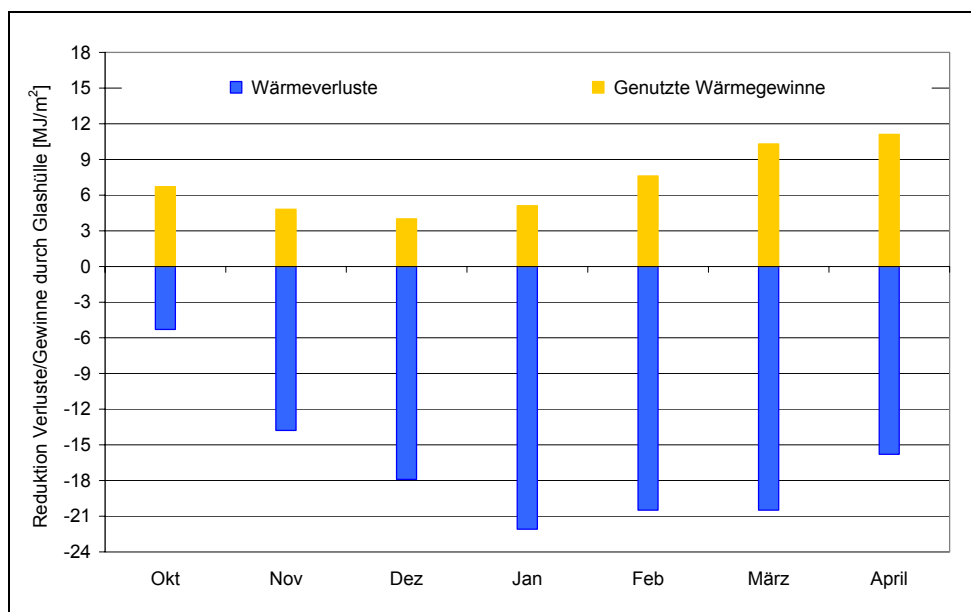


Fig. 45: Energiebilanz – Einfluss Glashalle auf Verluste/Gewinne in Heizperiode

Wie in Fig. 45 gut zu erkennen ist, reduziert die Glashalle während der Heizperiode sowohl Wärmeverluste (über Transmission und Lüftung), wie auch genutzte Wärmegewinne (Solargewinne). Hierbei werden die Verluste stärker reduziert als die Solargewinne.

8.3 HEIZWÄRMEBEDARF

Mit den Annahmen aus Kapitel 5 wird der Heizwärmebedarf der Einbauten gerechnet. Die Berechnung erfolgt nach SIA 380/1 als Systemnachweis mit dem Programm *THERMO*. Der Heizwärmebedarf wird für Tramelan und Zürich, sowohl für das Aussenklima, wie auch für das Mikroklima in der Glashalle, berechnet. Für beide Standorte werden die Resultate von Aussenklima und Mikroklima Glashalle verglichen und bewertet. Hinsichtlich des Heizwärmebedarfs bedeuten positive Werte einen Anstieg und negative Werte eine Reduktion.

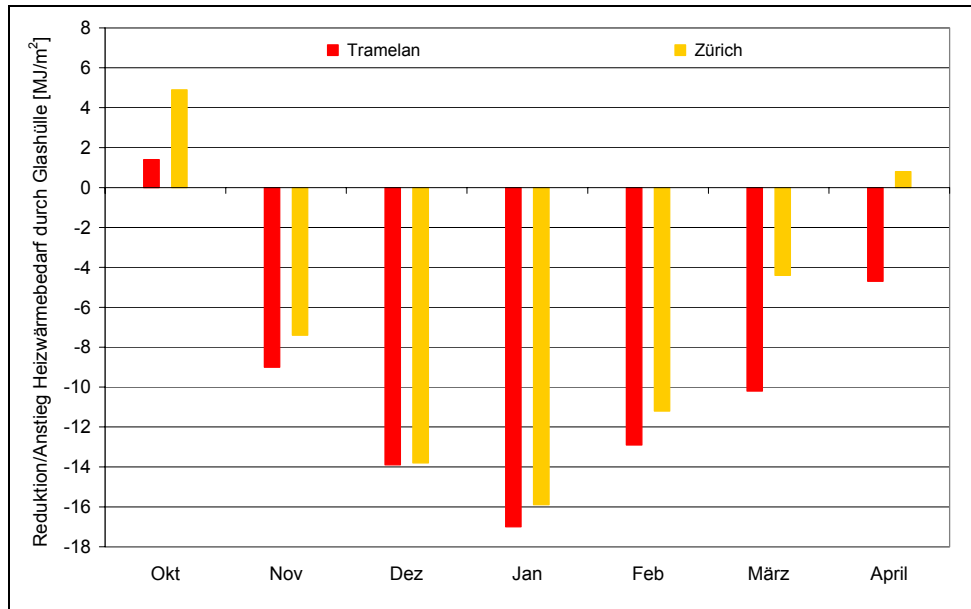


Fig. 46: Einbauten – Reduktion/Anstieg Heizwärmebedarf im Jahr

Wie in Fig. 46 zu erkennen ist, reduziert die Glashalle erwartungsgemäss an beiden Standorten den Heizwärmebedarf der Einbauten. Während der Heizperiode reduziert sich der Heizwärmebedarf durch die Glashalle in Tramelan um 19 % und in Zürich um 14 %.

9. Nachweise

Die Nachweise Heizwärmebedarf und MINERGIE werden mit den Annahmen aus Kapitel 5 für die Einbauten mit dem Programm *THERMO* nach SIA 380/1 als Systemnachweis gerechnet. Die Berechnung erfolgt für die Standorte Tramelan, Ascona und Zürich. Weiterführend wird für Tramelan und Zürich jeweils nach Aussenklima und Mikroklima in der Glashalle unterschieden.

Die Berechnung für Bürogebäude und Werkhalle ist zunächst getrennt erfolgt. Die Ergebnisse sind dann anschliessend unter dem Oberbegriff "Einbauten" zusammengefasst.

9.1 HEIZWÄRMEBEDARF SIA 380/1

Annahmen und Resultate der Heizwärmebedarfsberechnung nach SIA 380/1 als Systemnachweis sind in folgender Tabelle dargestellt.

Standort		Tramelan		Ascona	Zürich	
		Aussenklima	Mikroklima	Aussenklima	Aussenklima	Mikroklima
Opake Bauteile U-Wert [W/m ² K]	Aussenwand	0.5				
	Boden	0.5				
	Dach	0.45				
	Fenster	1.5				
Fenster g-Wert [-]	Fenster	0.61				
Heizwärmebedarf [MJ/m ²]	Grenzwert Hg SIA 380/1	167.1	158.9	140.9	155.9	154.5
	Qh SIA 380/1	139	117.9	85.3	136.1	121.8
Nachweis Heizwärmebedarf SIA 380/1		Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt
Reduktion Heizwärmebedarf [%]		0%	15%	39%	0%	11%

Fig. 47: Einbauten – SIA 380/1 Nachweis jährlicher Heizwärmebedarf

In Fig. 47 ist der Heizwärmebedarf der Einbauten in Abhängigkeit des Umgebungsklimas dargestellt. An allen untersuchten Standorten liegt der errechnete Heizwärmebedarf der Einbauten unter dem jeweiligen Grenzwert des Systemnachweises. Mit U-Werten der Aussenbauteile von 0.45 bzw. 0.5 W/m²K (Dämmstärke 60 – 70 mm) sind die Anforderungen an den Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 somit an allen Standorten erfüllt.

Die Glashalle in Tramelan reduziert den jährlichen Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 um etwa 15 % und in Zürich um etwa 11 %. Im Vergleich dazu, liegt der Heizwärmebedarf in Ascona 39 % tiefer als in Tramelan. Der Heizbedarf in dem Mikroklima der Glashalle in Tramelan ist somit etwa noch 28 % höher als in Ascona.

9.2 MINERGIE

Mit den Annahmen der Heizwärmebedarfsberechnung aus Unterkapitel 9.1 wird der MINERGIE-Nachweis geführt.

Standort		Tramelan		Ascona	Zürich	
		Aussenklima	Mikroklima	Aussenklima	Aussenklima	Mikroklima
Heizwärmebedarf [MJ/m ²]	Grenzwert MINERGIE	133.7	127.1	112.7	124.7	123.6
	Qh SIA 380/1	139	117.9	85.3	136.1	121.8
MINERGIE-Standard		Nicht erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	Nicht erfüllt	Erfüllt

Fig. 48: Einbauten – MINERGIE-Nachweis jährlicher Heizwärmebedarf

Die Einbauten im Mikroklima der Glashalle und in Ascona erfüllen mit U-Werten der Aussenbauteile von 0.45 bzw. 0.5 W/m²K den MINERGIE-Standard. Dagegen sind für die Erfüllung des MINERGIE-Standards in dem Aussenklima von Tramelan und Zürich Aussenbauteile mit geringeren U-Werten erforderlich.

10. Beurteilung

10.1 SUNFACTORY TRAMELAN

Das unter der Führung von Bauart Architekten stehende Projekt "Sunfactory" am Standort Tramelan sieht eine grosse Glashalle mit sechs Grundstücksflächen für Gewerbe- und Industrienutzungen vor. Ziel dieser Glashülle ist es, einen Wildwuchs von Gewerbebauten zu verhindern, einen Träger für ein Solarkraftwerk zu schaffen und für die Einbauten eine aus energetischer Sicht günstige Klimaverschiebung zu bewirken. Geplant ist hierfür eine kostengünstige Glashalle im Gewächshaus- oder Industriebaustandard mit individuell zu gestaltenden Einbauten.

Grundsätzliche Projektanforderungen sind Frostfreiheit der unbeheizten Glashalle und Einbauten im MINERGIE-Standard.

Da die Nutzer zur Zeit noch unbekannt sind, werden die Einbauten in den Simulationen analog des Vorprojekts Précitrame angenommen. Von Architektenseite wird davon ausgegangen, dass die Einbauten als typische Gewerbebauten in kostengünstiger Leichtbauweise erstellt werden.

Mit den angenommenen Einbauten ist in Tramelan die unbeheizte Glashalle mit Industrieverglasung ($U\text{-Wert} \leq 2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 0.76$) frostfrei zu realisieren. Hinsichtlich des thermischen Komforts in Glashalle und Einbauten wird empfohlen, die Speichermasse von Erdreich und Einbauten zu nutzen. Hierzu sollte die unbebaute, erdberührte Bodenfläche der Glashalle ohne Dämmung und die Einbauten in massiver Bauart ausgeführt werden.

Mit Annahmen gemäss Kapitel 5 sind im Winter im Vergleich zur Aussentemperatur in der Glashalle etwa 10 K höhere Lufttemperaturen zu erwarten. Im Sommer liegen die zu erwartenden Hallenlufttemperaturen, bei optimaler Regelung der natürlichen Lüftung und des innenliegenden Sonnenschutzes, mit 1 – 2 K nur geringfügig über der Aussentemperatur. Die Anforderungen an Temperaturen und thermischen Komfort der Glashalle sind somit erfüllt. In den auf dem Vorprojekt Précitrame basierenden Einbauten ist der thermische Komfort nach SIA 380/1 und 180 erfüllt.

Zur Vermeidung von Kondensatanfall in der Glashalle wird eine maximal zusätzliche Feuchtelast von 15 kg/h (z.B. Feuchtabgabe von 50 Personen, 200 mittelgrossen Pflanzen und 200 m² Wasserflächen) empfohlen. Bei höheren zusätzlichen Feuchtelasten ist bei Hallenlufttemperaturen < 14 °C mit Kondensatanfall zu rechnen. Da die relative Feuchte mit steigender Lufttemperatur sinkt, sind infolge der Kondensation in der Glashalle in den höher temperierten Einbauten keine Feuchtigkeitsprobleme zu erwarten.

Da die Einbauten in dem Mikroklima der Glashalle weder Wind noch Regen ausgesetzt sind, werden einfachere Konstruktionen, Verzicht auf Oberflächenschutz etc. möglich. Die im Vergleich zum vorherrschenden Aussenklima höheren Umgebungstemperaturen in der Glashalle lassen zudem bei den Einbauten, bei gleich bleibendem Heizwärmebedarf, geringere U-Werte der Aussenbauteile zu. In dem Mikroklima der Glashalle sind also Kosteneinsparungen bei den Konstruktionen der Einbauten zu erwarten.

Für den Heizwärmebedarf der Einbauten ist neben der Umgebungstemperatur ebenso die nutzbare Solarstrahlung entscheidend. Das Mikroklima in der Glashalle zeichnet sich im Vergleich mit dem Aussenklima durch höhere Lufttemperaturen im Winter und durch ganzjährig geringere Solarstrahlung aus. Mit den gemäss Kapitel 5 getroffenen Annahmen reduziert die Glashalle den Heizwärmebedarf der Einbauten nach SIA 380/1 in Tramelan um 15 % und in Zürich um 11 %. Im Vergleich dazu reduziert eine Absenkung der Heizgrenztemperatur um 1K den Heizwärmebedarf bereits um etwa 8 %. Für eine kostengünstige Glashalle mit Industrieverglasung und individuell zu gestaltenden Gewerbeeinbauten wird das Verhältnis Kostenaufwand zu Reduktion Heizwärmebedarf somit als wenig effizient bewertet.

Die in Tramelan angenommene Glashalle mit Industrieverglasung und individuell zu gestaltenden Gewerbe-/Industrieeinbauten erfüllt somit die thermischen und ökonomischen Projektanforderungen. Energetisch führt die Glashalle mit den getroffenen Annahmen bei den Einbauten jedoch nur zu geringen Einsparpotentialen des Heizwärmebedarfs.

10.2 ENERGETISCHE OPTIMIERUNGSANSÄTZE

Die Einbauten stehen im permanenten Luft- und Wärmeaustausch mit der Glashalle. Das Hallenklima resultiert also aus Glashalle (Hülle, Orientierung, Form etc.) und Einbauten (Nutzung, Bebauungsdichte und Konstruktion). Die Einbauten nehmen somit Einfluss auf ihr eigenes Umgebungsklima und damit auf den eigenen Heizwärmebedarf.

Die Aussenhülle der Glashalle reduziert für die Einbauten sowohl die Wärmeverluste, wie auch die nutzbaren Solargewinne. Je kleiner der U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) der Glashalle, desto geringer sind die Wärmeverluste der Einbauten über Transmission und Lüftung. Je grösser der g-Wert (Energiedurchlassgrad) der Glashalle, desto höher sind die passiv nutzbaren Solargewinne der Einbauten. Für einen möglichst geringen Heizwärmebedarf der Einbauten ist somit bauphysikalisch betrachtet eine Glashülle mit einem kleinen U-Wert und einem grossen g-Wert optimal. Industrieverglasungen, wie z.B. Stegdoppelplatten aus Acrylglas, zeichnen sich bei einem U-Wert um $2.5 - 2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ gleichzeitig durch hohe g-Werte > 0.7 aus. Hinsichtlich Hallenklima und Kosten stellen Stegdoppelplatten den optimalen Kompromiss dar. Bei Isolierverglasungen geht die Minimierung des U-Werts mit der Reduktion des g-Werts, sowie höheren Kosten einher. Aus energetischer Sicht bieten sich jedoch Isolierverglasungen, mit U-Werten um $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ und g-Werten um 0.6 , an. Die Ausführung der Glashalle mit heutiger Standard-Isolierverglasung anstelle der angenommenen Industrieverglasung wird den ermittelten Heizwärmebedarf der Einbauten reduzieren. Gleichzeitig werden die geringeren g-Werte von Isolierverglasungen den Strombedarf für Kunstlicht in Glashalle und Einbauten geringfügig erhöhen. Im Vergleich mit den Simulationsresultaten wird der Gesamtenergiebedarf von Glashalle und Einbauten sinken. Infolge der Isolierverglasung steigen die Lufttemperaturen in der Glashalle. Die Überhitzung muss im Sommer mittels entsprechender Lüftungsstrategien, Sonnenschutzmassnahmen und eventueller Kühlung abgeführt werden. Ob ganzheitlich eine Isolierverglasung das optimale Hüllmaterial für Glashallen ist, muss im Einzelfall hinsichtlich Ökonomie, Komfort und Energiebedarf untersucht werden.

Im Winter sind Globalstrahlungsgewinne auf Süd orientierte Flächen am grössten. Damit bieten Süd orientierte Fassaden und Dächer optimale Voraussetzungen für die Reduktion des Heizwärmebedarfs über passive Solarnutzung. Gleichzeitig ist im Sommer die Globalstrahlung von Süd im Vergleich mit Ost- und West orientierten Hüllflächen moderat. Weiterer Vorteil der Südorientierung ist, dass die im Sommer steil einfallende Südstrahlung leichter abgeschattet werden kann als die flach einfallende Ost- und Weststrahlung. Südorientierte Glasfassaden und -dächer bergen somit im Sommer eine geringere Überhitzungsgefahr als Ost- und Westorientierte Glasflächen. Infolge des jährlichen Solarstrahlungsverlaufs sollte die Gebäudelängsachse in Ost-West-Richtung verlaufen und grosse Glasfassaden und -dächer nach Süden orientiert sein. Die Längsachse der Sunfactory verläuft richtigerweise in Ost-West-Richtung. Positiv sind ebenso die grossen nach Süden orientierten Dachflächen zu erwähnen. Bedingt durch die gegebene Geländetopographie ist jedoch die kleine Längsfassade nach Süden und die grosse Längsfassade nach Norden orientiert. Eine Drehung der Halle um 180° wäre somit energetisch optimal. Infolge der im Vergleich zu den grossen Dachflächen ($\sim 75\%$) nur kleinen Fassadenflächen ($\sim 25\%$), würde die Drehung der Glashalle im Fall der Sunfactory den ermittelten Heizwärmebedarf der Einbauten jedoch nur geringfügig reduzieren.

Die Gebäudeform bestimmt das Verhältnis von Gebäudehüllfläche A zu Energiebezugsfläche EBF. Je kleiner die gemäss SIA 380/1 definierte Gebäudehüllzahl A/EBF ist, desto geringer ist der Heizwärmebedarf im Winter. Die Glashalle der Sunfactory weist mit 0.5 eine sehr kleine Gebäudehüllzahl auf und ist somit energetisch betrachtet bereits optimal.

Die energetischen Einsparpotentiale infolge einer Glashalle können nur bei ganzheitlicher Betrachtung der Funktionseinheit "Glashalle mit Einbauten" bewertet werden.

Die Nutzung der Einbauten bestimmt, ob und wann die Abwärme genutzt werden kann, um die Glashallenluft im Winter zu erwärmen. Im Fall der Sunfactory sind die Einbauten als Gewerbe- und Industriebauten geplant. Welche Art von Betrieben (Uhren, neue Technologien etc.) sich dort ansiedeln werden, hängt von zur Zeit noch unbekannten Interessenten ab. Es muss also davon ausgegangen werden, dass im worst-case die Abluft aller Gewerbeflächen hygienisch nicht nutzbar ist und somit nicht für die Erwärmung der Glashalle genutzt werden kann. Für die Einbauten sind also optimalerweise Nutzungen festzulegen, deren Abluft keine bis wenig Emissionen aufweist. Hier kommen z.B. Verwaltungsbauten, Versammlungsstätten etc. in Frage. Positiv auf Hallenklima und Heizwärmebedarf der Einbauten wirken sich ebenso Nachnutzungen, wie z.B. bei Hotels und Wohnbauten, aus.

Die Aussenhülle der Einbauten beeinflusst mit Konstruktion und bauphysikalische Eigenschaften (Dichtigkeit, Speichermasse, U-Wert, g-Wert etc.) das Hallenklima und damit den eigenen Heizwärmebedarf. Die in den Simulationen bereits angenommene hohe Speichermasse, sowie die Isolierverglasung mit g-Werten um 0.6 führen zu einem minimalen Heizwärmebedarf. Je höher Undichtigkeit und U-Wert der Konstruktion sind, desto mehr Wärme wird mit der Glashalle ausgetauscht. Einerseits steigen damit die Verluste der Einbauten, andererseits steigt die Umgebungstemperatur. Ob der Heizwärmebedarf infolge dieser Austauschprozesse steigt oder sinkt muss im Einzelfall untersucht werden.

Basierend auf dem Vorprojekt Précitrame ergibt sich bei der Sunfactory eine Bebauungsdichte der Einbauten von etwa 29 % des Glashallenvolumens. Unter Einhaltung von verkehrs- und brandschutztechnischen Mindestabständen der Einbauten zu Glashalle und Nachbareinbauten liesse sich die in den Simulationen angenommene Bebauungsdichte etwa verdoppeln. Infolge höherer Abwärmemengen und Speichermasse, sowie eines grösseren höhertemperierten Raumvolumens der Einbauten, sinkt der Heizwärmebedarf mit steigender Belegungsdichte.

Erst im optimalen Zusammenspiel kann das Gesamtprojekt "Glashalle mit Einbauten" den Heizwärmebedarf der Einbauten nennenswert senken. Damit die energetische Effizienz einer Glashalle bewertet werden kann, sind ganzheitliche Planungskonzepte erforderlich. Hierfür sind Glashalle und Einbauten als Einheit zu betrachten, in welcher die Einbauten in Nutzung, Geometrie, Konstruktion und Gebäudetechnik definiert sind.

10.3 GENERELLE EFFIZIENZ GLASHALLE

Die Lufttemperaturen im Mikroklima der Glashalle sind im Vergleich zum Aussenklima im Winter höher und im Sommer vergleichbar. Die Klimaverschiebung in der Glashalle wirkt sich somit positiv auf den thermischen Komfort der Einbauten aus. Gleichzeitig bietet die Glashalle Schutz vor Wind, Regen und unerwünschter Solarstrahlung. Hinsichtlich des Komforts wird die Glashalle insgesamt positiv bewertet.

Einfachere Konstruktionen der Einbauten lassen im Mikroklima der Glashalle zudem Kosteneinsparungen erwarten und machen damit die Grundstücksflächen für potenzielle Nutzer attraktiv.

Unter städtebaulichen Aspekten ist eine Glashalle mit Einbauten (z.B. Verhinderung des Wildwuchses von Gewerbebauten), zum Schutz vor Emissionen (Luftverschmutzung, Lärm etc.), ein interessanter und gleichzeitig architektonisch ansprechender Entwurfsansatz.

Die Ausführung der südorientierten Dachflächen mit Photovoltaikverglasung zur Stromerzeugung wirkt sich positiv auf das sommerliche Hallenklima aus. Gleichzeitig steigen mit zunehmendem PV-Anteil Heizwärmebedarf der Einbauten, sowie Strombedarf für Kunstlicht in Glashalle und Einbauten. Im Einzelfall ist eine detaillierte Energiebilanz zu Stromerzeugung und -bedarf aufzustellen, um den optimalen PV-Anteil zu definieren. Pilotprojekte wie die Sunfactory liefern wichtige Beiträge, die Energieerzeugung mittels regenerativer Energien wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Die Glashalle ist hinsichtlich Minimierung des Heizbedarfs der Einbauten generell im Aussenklima mit kalten Aussentemperaturen und geringer Solarstrahlung am effizientesten. Heizwärmebedarf, sowie energetische Einsparpotentiale der Einbauten hängen stark vom Zusammenspiel Glashalle und Einbauten ab. Die Definition der energetischen Zweckmässigkeit einer Glashalle kann somit nur für Gesamtkonzepte von Architektur und Gebäudetechnik für die Funktionseinheit "Glashalle mit Einbauten" erfolgen. Heutzutage bietet der Markt mit gut gedämmten Aussenbauteilen, kontrollierten Lüftungen mit Wärmerückgewinnung etc. zahlreiche Möglichkeiten zur Minimierung des Heizwärmebedarfs. Der zusätzliche Bedarf an Kosten, Material, Grundfläche etc. für die Glashülle ist Energie- und Kosteneinsparungen der Einbauten somit im Einzelfall gegenüber zu stellen und zu bewerten.

Die Funktionseinheit "Glashalle mit Einbauten" erfordert Definition und Planung von Geometrie, Nutzung, Konstruktion und Gebäudetechnik. Hierbei sind maximale Einsparpotentiale des Heizwärmebedarfs der Einbauten mit folgenden Planungsansätzen zu erzielen:

Glashalle

- Transparente Hülle mit kleinem U-Wert und grossem g-Wert (≥ 0.6)
- Gebäudelängsachse Ost-West-orientiert
- Möglichst grosse Aussenflächen mit Südorientierung
- Kleine Gebäudehüllzahl A/EBF

Einbauten

- Gebäudenutzung mit geringer Emissionsbelastung (Verwaltung etc.)
- Tag- und Nachtnutzungen (Hotel, Wohnen etc.)
- Hohe Bebauungsdichte (beheizt)
- Massivbauweise

11. Kostenschätzung

Die individuelle Investition entspricht der Konstruktion der inneren, unabhängigen und flexiblen Gebäude.

Die gemeinsame Investition entspricht der Rentabilität der Glashülle und der gemeinsamen Infrastruktur, das heisst die Erschliessung des Terrains, die Fundamente, die Tragstruktur und die Glashülle.

Die Solaranlage ist nicht in den Kosten enthalten. Sie ist ein unabhängiges Element, das sich dank dem produzierten Strom selbst finanzieren muss.

Kosten, Teil der gemeinsamen Investition

BKP	Arbeiten	Kostenschätzung
1	Vorbereitungsarbeiten	3'410'000.-
2	Gebäude	11'060'600.-
21	Rohbau 1 (Fundamente, Tragstruktur)	1'850'000.-
22	Rohbau 2 (Glashülle)	6'680'600.-
23 - 24	Technische Anlagen	2'530'000.-
5	Baunebenkosten und Übergangskosten	100'000.-
	Honorare	1'000'000.-
	MwSt.	1'183'366.-
	TOTAL (abgerundet)	17'000'000.-

Fig. 49: Baukosten – Teil der gemeinsamen Investition

Damit die Investition rentabel ist, ist es notwendig, 2/3 der Glashülle von der ersten Phase an zu bauen.

Gebaute Fläche	Kosten
16'730 m ² (Gesamt)	17'000'000.-
11'000 m ² (2/3)	13'200'000.- ¹⁾

Fig. 50: Baukosten – Bauphasen

¹⁾ Entspricht nicht 2/3 der Gesamtinvestition, sondern mehr. Eine der 4 Glaswände wird in der ersten Phase gebaut und wird in der Endphase verschoben.

Kosten pro m²

Industrielle Fläche (gemeinsame Investition)	1'200 .-
Innere Gebäude (individuelle Investition)	1'300.- bis 1'800.- ²⁾
Gesamtinvestition pro m²	2'500.- bis 3'000.-

Fig. 51: Baukosten – Kosten pro m²

²⁾ Kostenschätzung, die auf Grund eines detaillierten Projekts für das Hochtechnologieunternehmen Précitrame in Tramelan gemacht wurde. Diese Studie hat Mehrkosten von ungefähr 15 % hinsichtlich einer herkömmlichen Konstruktion aufgezeigt.

Komparative Beispiele, Kosten pro m²

Uhrenindustriefabrik CORUM in La Chaux-de-fonds	3'000.-
Fabrik in Ebikon	2'260.-
Betriebsgebäude	2'050.-

Fig. 52: Baukosten – Kostenvergleich pro m²

Die Wirtschaftspotenziale befinden sich in einer Optimierung und einer Rationalisierung der Konstruktion, in der Etappierung, unter den Bedingungen der Vergebung der Arbeiten und in der Wahl der Materialien.

Kapitel "11. Kostenschätzung" aufgestellt von:

Bauart Architekten und Planer AG, Bern und Neuenburg

Bern am 10. Juni 2005 / fm