

## A1 Anhang zum Themenbereich: Tragwerk, Architektur und Wandelbarkeit



Verfasser: Dipl.-Ing. Dirk Peissl

Technische Universität Berlin  
Institut für Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Entwerfen u. Konstruieren - Massivbau

### Inhalt:

#### - Variantenstudien (Plananhang)

- Schulungsgewächshaus Bezirksgärtnerei : **Standort A** : Neubau auf Wiese, Nordwestlicher Teil der Bezirksgärtnerei der Bezirksgärtnerei Charlottenburg-Wilmersdorf

#### - finale Variante (Plananhang):

- Schulungsgewächshaus Bezirksgärtnerei : **Standort B** : Neubau auf Bestandsfundament des Öltanklagers, Mittiger Teil der Bezirksgärtnerei Charlottenburg-Wilmersdorf

#### - Mock-Up und Modellstudien (Plananhang):

- Konzeption und Bau Mock-Up – Gesamtkonzept
- Konzeption und Bau: Mock-Up wandelbarer Verschattungen (Fassadenebene)
- Konzeption und Bau : Mock-Up wandelbarer Verschattungen (Dachebene)

## A1 Anhang zum Themenbereich:

### Tragwerk, Architektur und Wandelbarkeit

(AZ 35216/01-25) Berlin, 31.10.2025

Verfasser: Dipl.-Ing. Dirk Peissl

Technische Universität Berlin  
Institut für Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Entwerfen u. Konstruieren – Massivbau  
Prof. Dr. Sc. techn. Mike Schlaich



**- Variantenstudien Standort A (Plananhang):**

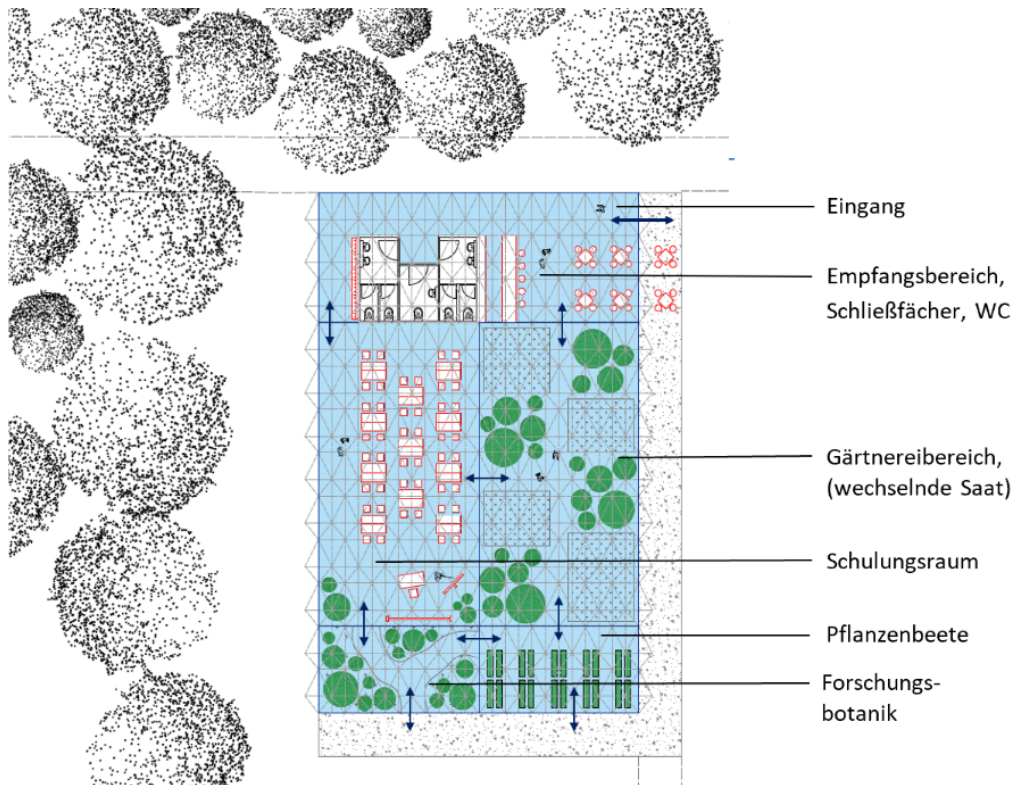
- Schulungsgewächshaus Bezirksgärtnerei: **Standort A:** Neubau auf Wiese, Nordwestlicher Teil der Bezirksgärtnerei der Bezirksgärtnerei Charlottenburg-Wilmersdorf

sämtliche Grafiken und Pläne erstellt von:

Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Entwerfen u. Konstruieren – Massivbau, Dipl.-Ing. Dirk Peissl



**Abb.** Skizze des Lageplans des Prototyps in der Bezirksgärtnerei B-Charlottenburg



**Abb.** Schema der Variantenstudie des kombinierten Nutzungskonzeptes des Neubaus



**- finale Variante Standort B (Plananhang):**

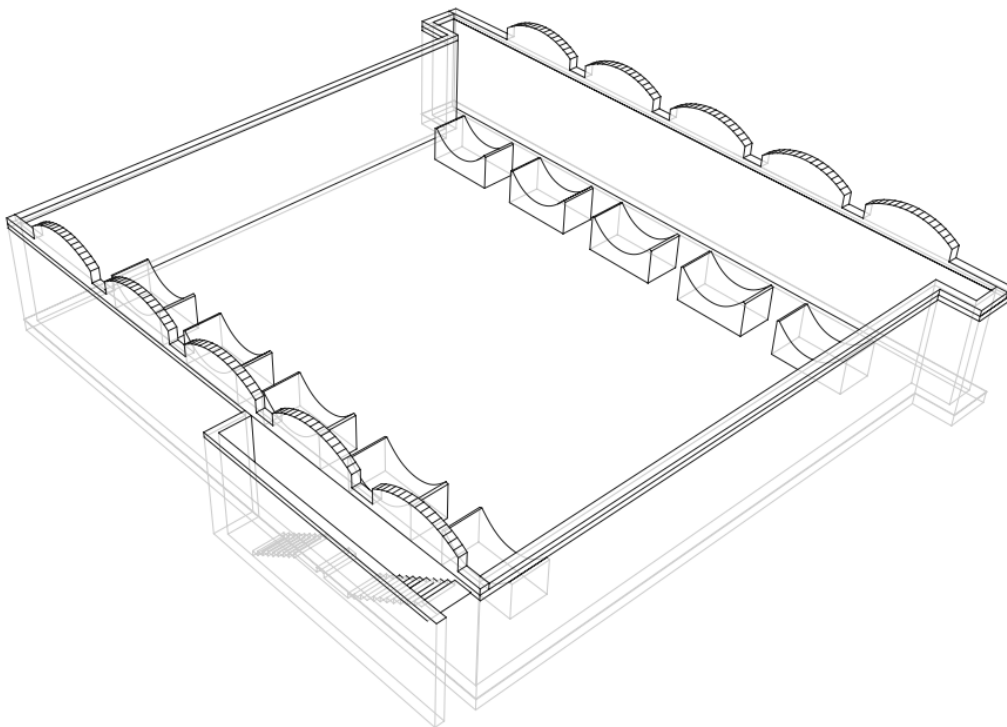
- Schulungsgewächshaus Bezirksgärtnerei: **Standort B** : Neubau auf Bestandsfundament des Öltanklagers, Mittiger Teil der Bezirksgärtnerei Charlottenburg-Wilmersdorf

sämtliche Grafiken und Pläne erstellt von:

Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Entwerfen u. Konstruieren – Massivbau, Dipl.-Ing. Dirk Peissl

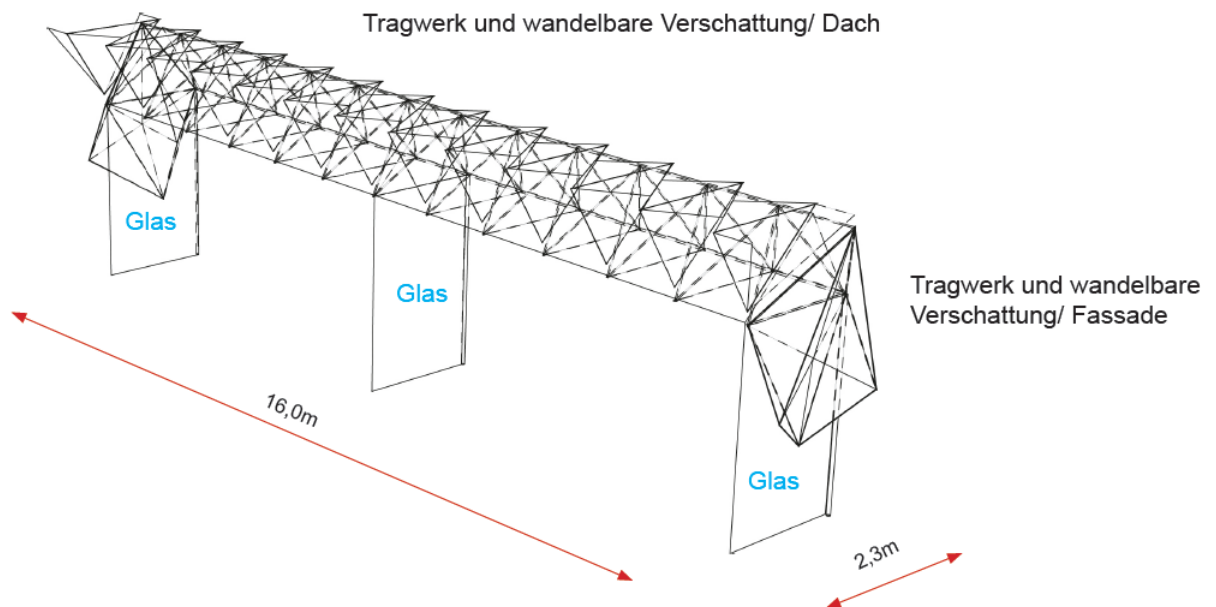


**Abb.** Luftbild der Bezirksgärtnerei B-Charlottenburg und Lageplans des Prototyps



**Abb.** 3D-Modell des Fundamentes des Öltanklagers / Bezirksgärtnerei B-Charlottenburg

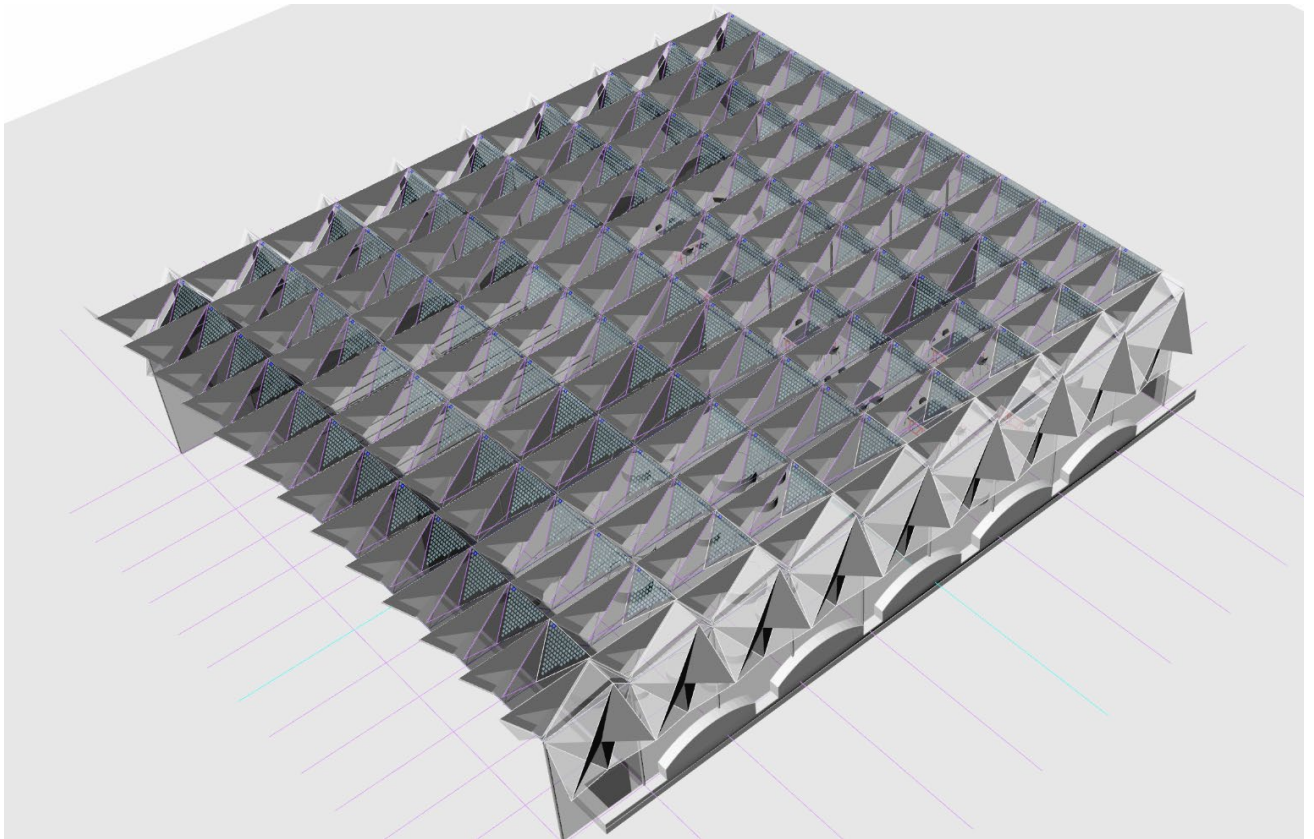




**Abb.** 3D-Modell und Proportionen eines Tragwerkmoduls mit wandelbaren Verschattungen



**Abb.** 3D-Modell+ Collage des kombinierten Nutzungskonzeptes mit Pflanz- und Schulungsbereichen



**Abb.** 3D-Modell mit dachintegrierter Photovoltaik



**Abb.** Rendering Schulungsgewächshaus über dem Fundament des Öltanklagers

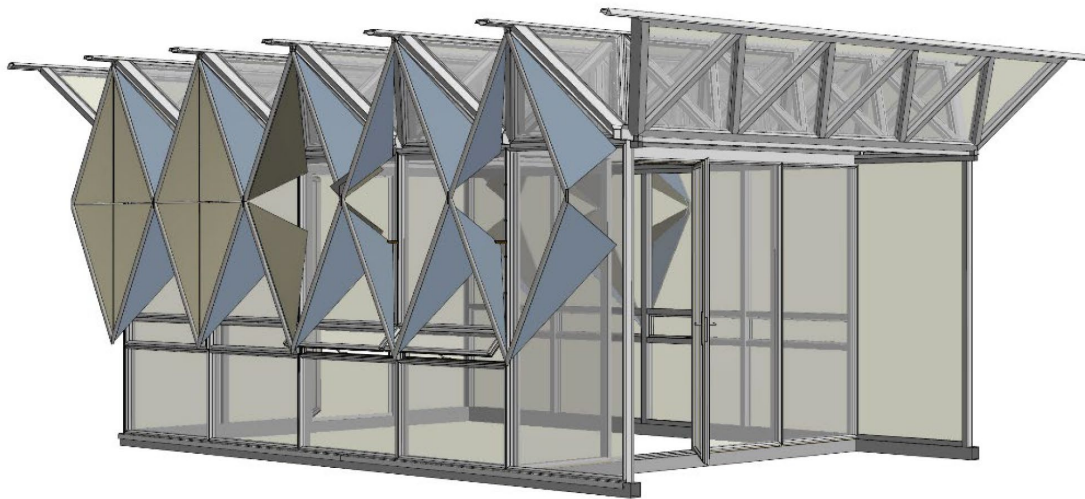
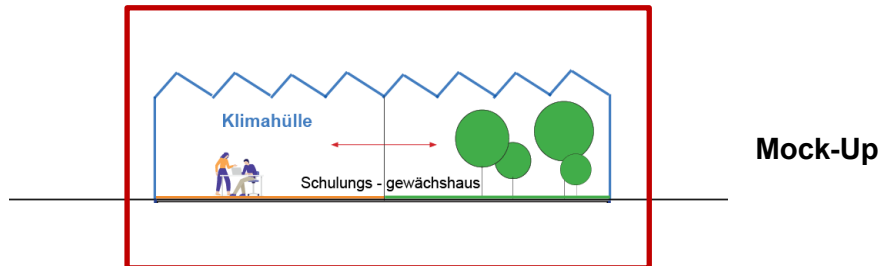


**- Mock-Up und Modellstudien (Plananhang):**

- Konzeption und Bau Mock-Up– Gesamtkonzept

sämtliche Grafiken, Fotos und Pläne erstellt von:

Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Entwerfen u. Konstruieren – Massivbau, Dipl.-Ing. Dirk Peissl



**Abb.** 3D-Modell Mock-Up geschlossene Verschattungen



**Abb.** Aufbau des fertigen Mock-Ups ohne Verschattungen, Versuchshalle TU Berlin



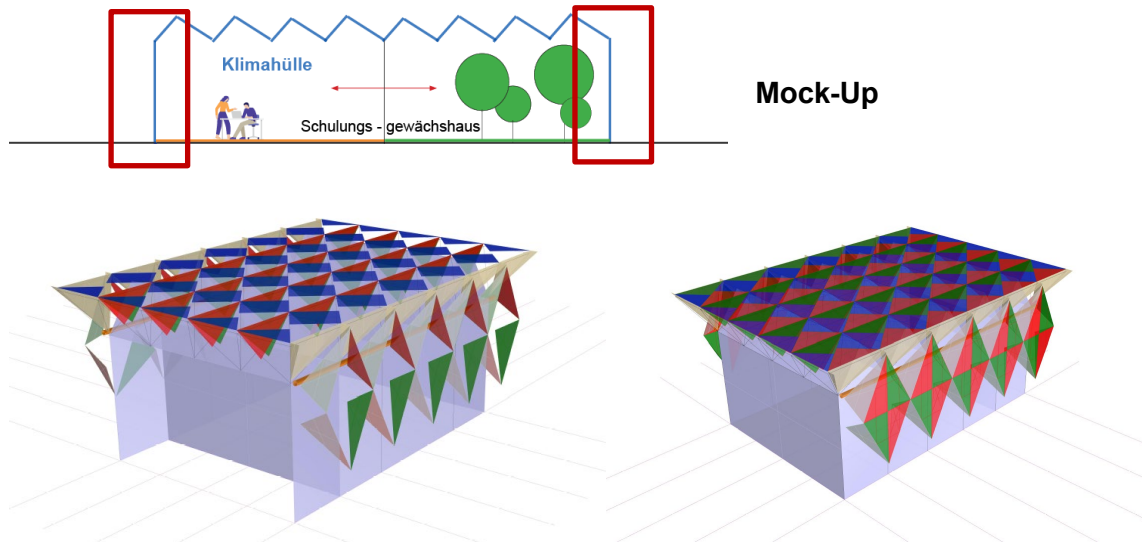
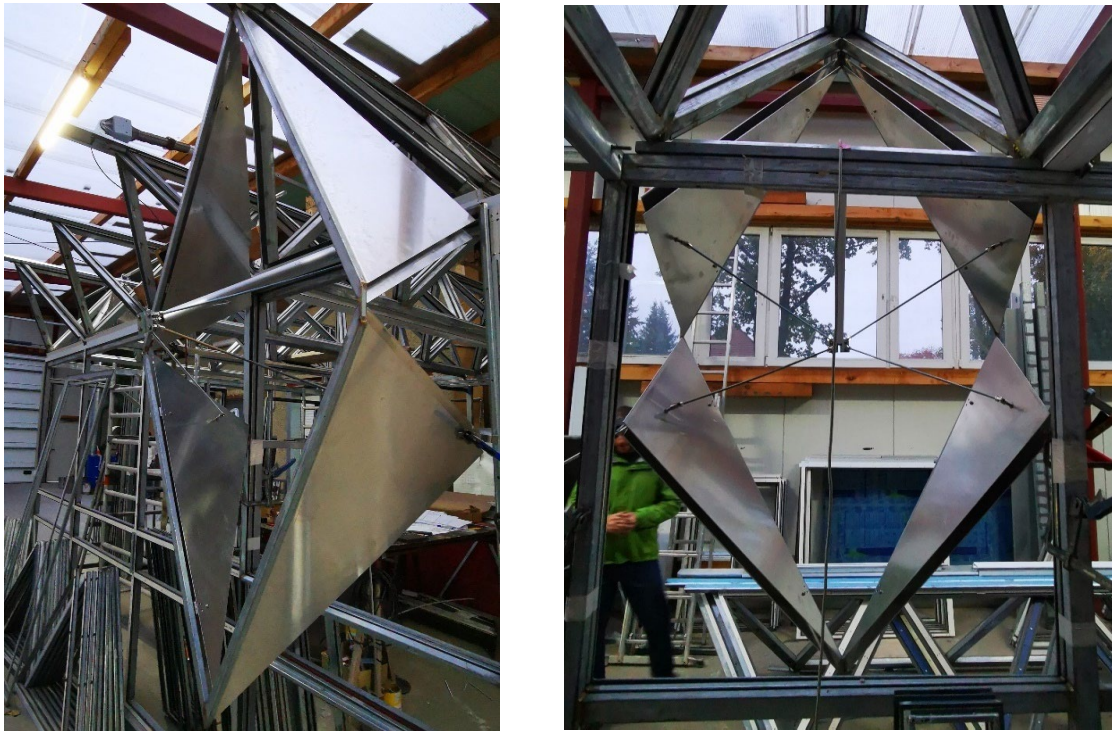
**- Mock-Up und Modellstudien (Plananhang):**

Konzeption wandelbarer Verschattungen (Fassadenebene)

sämtliche Grafiken, Fotos und Pläne erstellt von:

Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen

Fachgebiet Entwerfen u. Konstruieren – Massivbau , Dipl.-Ing. Dirk Peissl

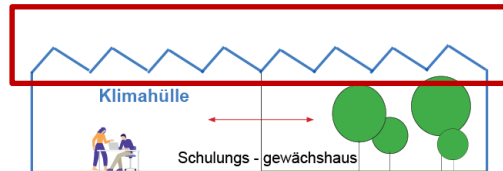
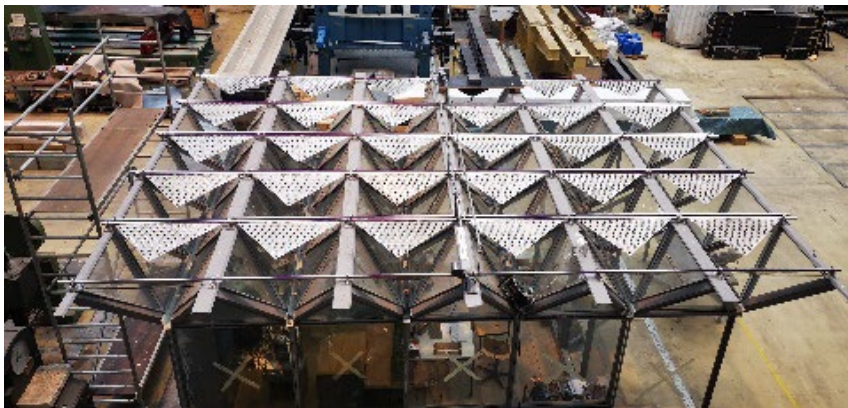
**Abb.** 3D-Modell Mock-Up offene und geschlossene Verschattungen, Versuchshalle TU Berlin**Abb.** Bau der Verschattungselemente, Werkstatt Modesta

**-Mock-Up und Modellstudien (Plananhang):**

Konzeption wandelbarer Verschattungen (Dachebene)

sämtliche Grafiken, Fotos und Pläne erstellt von:

Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Entwerfen u. Konstruieren – Massivbau, Dipl.-Ing. Dirk Peissl

**Mock-Up****Abb.** Aufbau des fertigen Mock-Ups mit wandelbaren Dachverschattungselementen, Versuchshalle TU Berlin

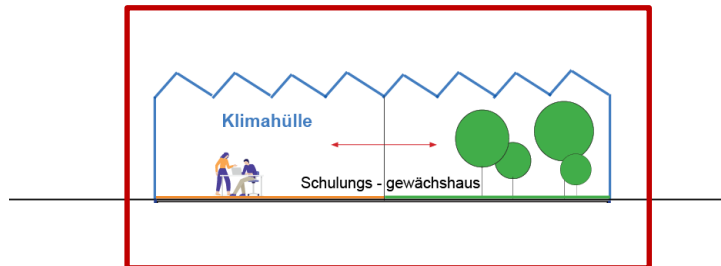


**- Mock-Up und Modellstudien (Medien):**

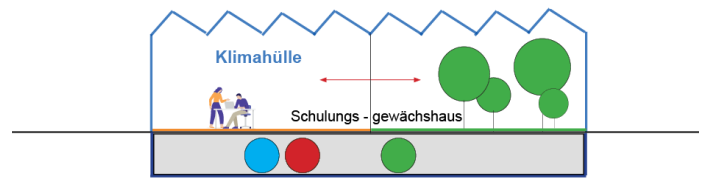
- Vermittlung der Forschungsergebnisse

sämtliche Grafiken, Fotos und Pläne erstellt von:

Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Entwerfen u. Konstruieren – Massivbau, Dipl.-Ing. Dirk Peissl

**Mock-Up****Abb** Videosequenz des Mock-Up-Baus der Zwischenwand mit Pflanzen (Quelle: rbb/2023)**Abb** Videosequenz des Mock-Up-Baus der wandelbaren Dachverschattung (Quelle: rbb/2023)





## A2 Anhang zum Themenbereich: Energie und Klimatechnik

**sbp**sonne

Verfasser: Dr. Gerhard Weinrebe, Vanessa Lippert, Fabian Gross, Gabriele Furlan, Alf Oschatz  
**sbp sonne gmbh**

### Inhalt:

- Übersicht
- Zusammenfassung der Studien und Planungen
- 
- **Energietechnische Studie des Gebäudekonzeptes, Simulation des Innenklimas, sowie der Heiz- und Kühllast des Schulungsgewächshauses:**
- Simulation der finalen Variante
- Ergebnisse, Verbrauch
- Konstruktionsdetails (Glasfassade/ Verschattungen)
- Thermische Behaglichkeit
- Lüftungskonzept
- Stromerzeugung mit PV
- Heiz- / Kühllkonzept
- Anforderungen



**Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen,  
wandelbaren Gebäudeprototypen für die symbiotische  
Nutzung eines energieautarken Schulungs-  
Gewächshauses in Berlin (AZ 35216/01-25)**

A2 Anhang zum Themenbereich: Energie und  
Klimatechnik

**Consulting Engineers  
for Renewable Energy**

Schwabstrasse 43

70197 Stuttgart

Phone: +49 711 64871-0

E-Mail: [solarinfo@sbp.de](mailto:solarinfo@sbp.de)

[www.sbp.solar](http://www.sbp.solar)



|                            |                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Projekt</b>             | Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen, wandelbaren Gebäudeprototypen für die symbiotische Nutzung eines energieautarken Schulungs-Gewächshauses in Berlin                                                                        |
| <b>Ort</b>                 | Charlottenburg, Berlin                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Projektförderung</b>    | Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Engineering</b>         | <b>sbp sonne gmbh</b><br>Consulting Engineers<br>for Renewable Energy                                                                                                                                                                    |
| <b>Verfasst von</b>        | Vanessa Lippert, Gabriele Furlan, Fabian Gross,<br>Gerhard Weinrebe, Alf Oschatz                                                                                                                                                         |
| <b>Kooperationspartner</b> | Technische Universität Berlin / Fachgebiet<br>Entwerfen und Konstruieren – Massivbau,<br>Fa. Viessmann GmbH,<br>Fa. Modesta Betriebs-GmbH & Co. KG,<br>Bezirksamt Charlottenburg-Wilmersdorf von<br>Berlin,<br>Freie Universität Berlin, |
| <b>Datum</b>               | 30.07.2025                                                                                                                                                                                                                               |

## Content

|          |                                                                                                                                     |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Nomenklatur .....</b>                                                                                                            | <b>4</b>  |
| <b>2</b> | <b>Entwicklung der Planung .....</b>                                                                                                | <b>5</b>  |
| 2.1      | Ursprünglicher Standort .....                                                                                                       | 5         |
| 2.2      | Umplanung für Öllager .....                                                                                                         | 5         |
| 2.3      | Anpassung der Ausrichtung .....                                                                                                     | 6         |
| 2.4      | Anpassung der Eindeckung .....                                                                                                      | 7         |
| 2.5      | Anpassung der Gebäudegröße .....                                                                                                    | 7         |
| <b>3</b> | <b>Energietechnische Studie des Gebäudekonzeptes, Simulation des Innenklimas, sowie der Heiz- und Kühllast der Klimahülle .....</b> | <b>9</b>  |
| 3.1      | Konstruktionsdetails .....                                                                                                          | 9         |
| 3.1.1    | Glasfassade .....                                                                                                                   | 9         |
| 3.1.2    | Innenräume .....                                                                                                                    | 9         |
| 3.1.3    | Verschattung .....                                                                                                                  | 9         |
| 3.1.4    | Hinterlüftung PV-Anlagen .....                                                                                                      | 12        |
| 3.1.5    | Abhängung der Kühl-/Heizdecke .....                                                                                                 | 12        |
| 3.2      | Lüftungskonzept .....                                                                                                               | 12        |
| 3.3      | Heiz- / Kühlkonzept .....                                                                                                           | 13        |
| 3.4      | Energiebedarf .....                                                                                                                 | 13        |
| 3.4.1    | Ursprüngliche Anforderungen .....                                                                                                   | 13        |
| 3.4.2    | Vorläufige Heiz- und Kühllasten .....                                                                                               | 13        |
| 3.4.3    | Solareintrag und Temperaturverlauf .....                                                                                            | 15        |
| 3.4.4    | Vorausschauende Betriebsweise .....                                                                                                 | 17        |
| 3.4.5    | Anpassung von Geometrie und Verschattung .....                                                                                      | 20        |
| 3.4.6    | Engere Temperaturtoleranz .....                                                                                                     | 22        |
| 3.4.7    | Anpassung der Gebäudegröße und Skalierung der Heiz- und Kühllasten .....                                                            | 24        |
| 3.5      | Strom .....                                                                                                                         | 25        |
| 3.5.1    | Strombedarf für Beleuchtung .....                                                                                                   | 25        |
| 3.5.2    | Stromerzeugung .....                                                                                                                | 25        |
| <b>4</b> | <b>Zusammenfassung und Bewertung .....</b>                                                                                          | <b>27</b> |
| <b>5</b> | <b>Quellen und Verweise .....</b>                                                                                                   | <b>28</b> |

### 1 Nomenklatur

| Begriff             | Erklärung                                                                                                                                        |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gefühlte Temperatur | Effektive Temperatur als bioklimatisches Maß für thermisches Wohlbefinden unter Berücksichtigung von Lufttemperatur, Wind, Feuchte und Strahlung |
| Lufttemperatur      | Von einem verschatteten Thermometer gemessen                                                                                                     |
| LW                  | Luftwechsel [1/h]                                                                                                                                |
| PV                  | Photovoltaik                                                                                                                                     |



## 2 Entwicklung der Planung

Die Besonderheit des Schulungsgewächshauses liegt in der einen Klimahülle, die in sich Gewächshausbereiche und Räume für Menschen vereint. Die unterschiedlichen Nutzungen benötigen andere Mengen an Licht, Kohlendioxid, Sauerstoff und Temperatur. Diese gekoppelten Randbedingungen machen die im Folgenden beschriebenen Studien und Planungen anspruchsvoll.

### 2.1 Ursprünglicher Standort

Die erste Phase untersucht das Schulungsgewächshaus als eigenständiges, neues Gebäude.

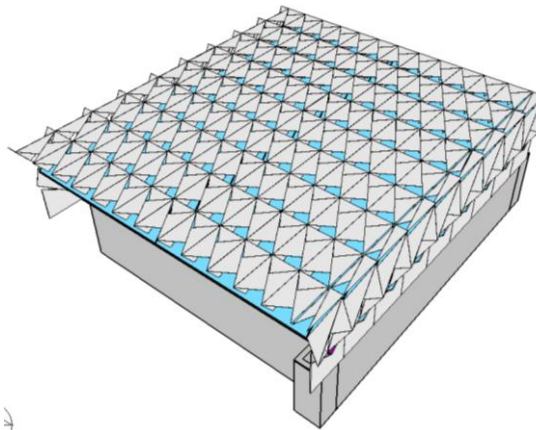


Abb. 2.1 Schema für Klimahülle um Schulungsgewächshaus mit variabler Verschattung

### 2.2 Umplanung für Öllager

Auf dem Gelände der Gärtnerei im Grunewald befindet sich die Betonwanne mit ehemaligem Öllager. Der neue Standort bringt neue Fundamente, ein größeres Gebäude und Kellerräume mit sich, die für Wärme/Kältespeicher genutzt werden können. Die Umnutzung des Öllagers verhindert die unnötige Bodenversiegelung.

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

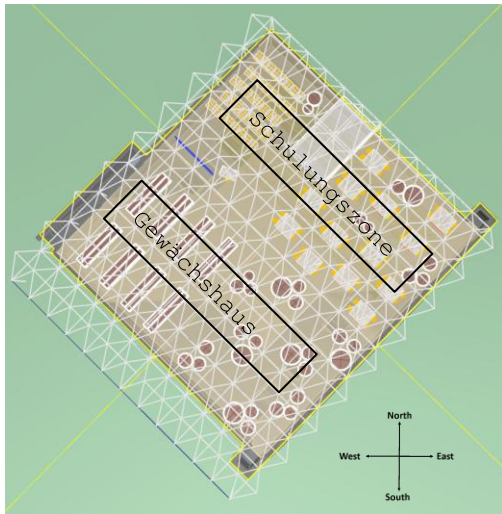


Abb. 2.2 Die ursprüngliche Planung sieht den Eingang von Nordosten in die Schulungszone vor. Dabei befindet sich die Schulungszone auf der Ostseite, was zu verstärkter Aufheizung am Morgen führt. [Peissl2025]

Die ursprüngliche Planung sieht eine Trennung entlang der Nordwest-Südostrichtung vor, wobei der Bereich für Menschen zunächst auf der östlichen Seite vorgeschlagen worden ist.

Für diese Konfiguration werden erste Klimastudien gerechnet.

### 2.3 Anpassung der Ausrichtung

Die beiden Zonen der Klimahülle benötigen deutlich unterschiedliche Mengen an Licht: Während im Gewächshaus Pflanzen möglichst viel Licht zur Photosynthese bekommen sollen, stört und heizt Licht unnötig beim Arbeiten oder Vorträge halten im Schulungsteil.

Dies führt zu weniger Wohlbefinden oder höheren Betriebskosten für die Klimatisierung und Beleuchtung.

Daher wird die Raumaufteilung umgeplant und der Pflanzenbereich wird für die Südosthälfte umgeplant, die mehr Sonnenstrahlung empfängt als die kühler/dunklere Nordwesthälfte.

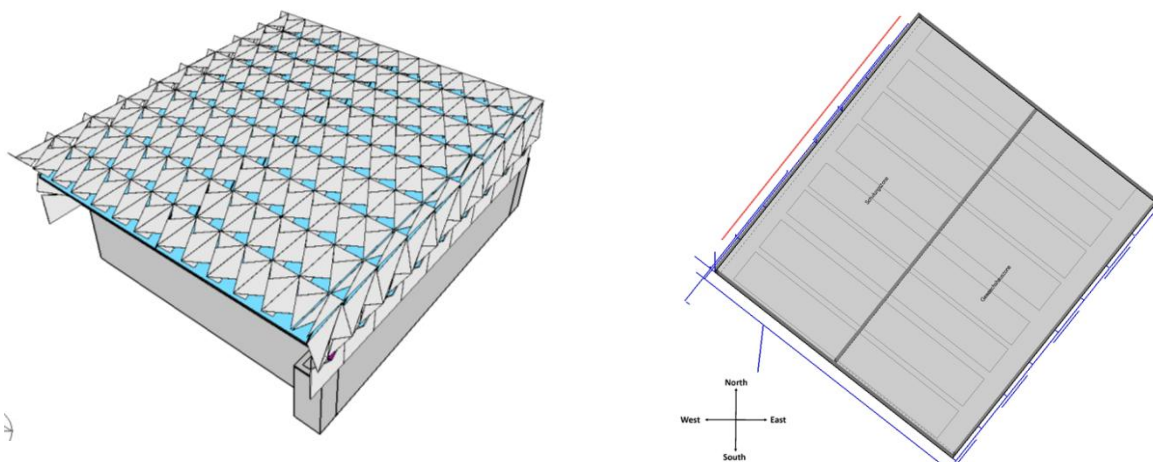


Abb. 2.3 Zwischenzeitlicher Klimahüllenentwurf mit einheitlichem Dach, lediglich die Glastransparenz ist über der Schulungszone deutlich niedriger.

## 2.4 Anpassung der Eindeckung

Da der Lichtbedarf zwischen Pflanzen (zwischenzeitlich maximales Licht, Verschattung nur gegen Überhitzung) und Menschen (möglichst kein direktes Licht, das beim Lesen, Schreiben oder Betrachten von Präsentationen störte) deutlich unterschiedlich ist, wird vorgeschlagen die Dacheindeckung zu ändern:

- Feste Verschattung (statt teilverschattet mit darunterliegendem Glas) über dem Schulungsbereich mit mehr Photovoltaik (PV) und
- angepasster variable Verschattung über dem Gewächshaus

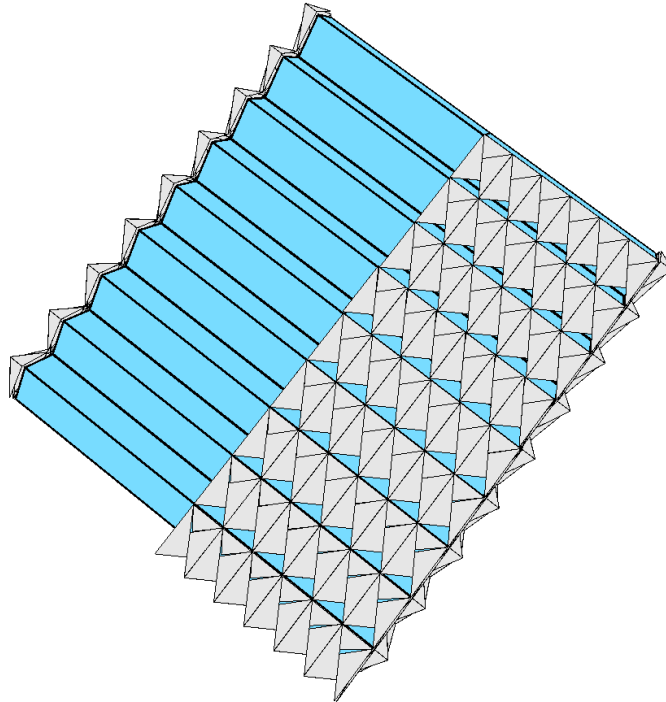


Abb. 2.4 Nach Südwesten geschlossene Shed-Dächer mit PV über der Schulungszone und variable, externe Verschattung für das Gewächshaus

Für den Schulungsbereich sind dadurch das Verwenden von günstigeren Materialien mit zweckdienlichen Eigenschaften (Kosten, Isolierung, State-of-the-Art-PV-Module mit hoher Effizienz) möglich. Die Zwischenräume zwischen den PV-Modulen sind teil-transluzent und erlauben mildes, diffuses Licht. Die Nordostseite der Shed-Dächer sind nicht verschattet und lassen vor allem diffuses Licht eindringen.

Bei allen Klimahüllenvarianten sind Seitenhecken und Vordach nach Süden geplant, um einen übermäßigen Licht- und Wärmeeintrag im Sommer zu verhindern. Im Winter kommt direktes Licht der tiefstehenden Sonne ins Innere und die laubabwerfenden Hecken sind lichtdurchlässiger.

## 2.5 Anpassung der Gebäudegröße

Die weitere Planung durch Haas-Architekten vergrößert die nutzbare Fläche, trägt die Lasten auf einem umlaufenden Streifenfundament ab und ermöglicht die Weiternutzung des Kellers. Dabei wird nur wenig zusätzliche Fläche versiegelt.



## Klimahülle Schulungsgewächshaus

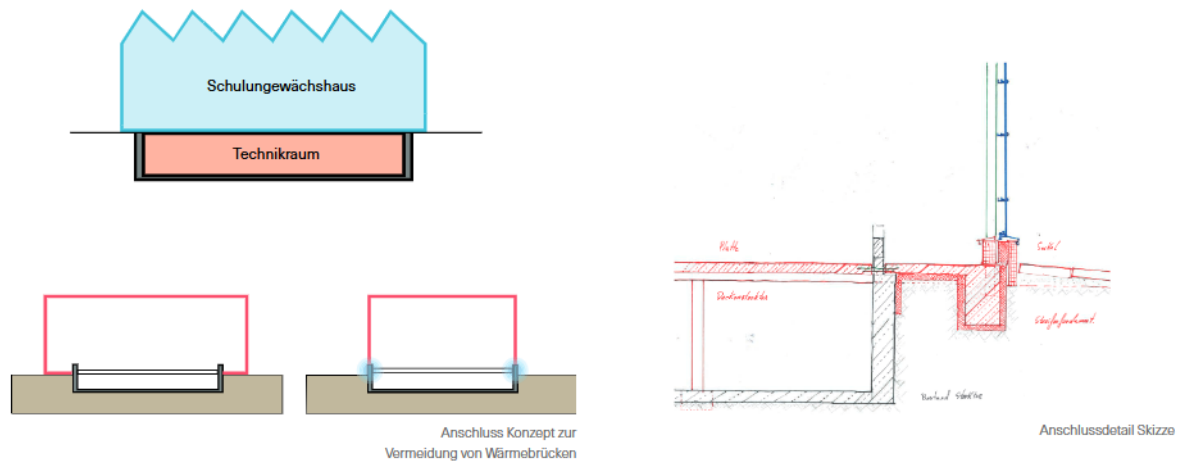


Abb. 2.5 Vergrößerte Innenfläche [Peissl2025]

### **3           Energietechnische Studie des Gebäudekonzeptes, Simulation des Innenklimas, sowie der Heiz- und Kühllast der Klimahülle**

Im Folgenden werden energetische Aspekte des neuen Entwurfs einer Klimahülle für das Schulungsgewächshaus in Charlottenburg betrachtet.

Zuerst wird ein Einblick in das Gesamtenergiekonzept gegeben. Im Anschluss werden einige Konstruktionsdetails der Klimahülle betrachtet, die Einfluss auf Heiz- und Kühlenergiebedarf haben. Anschließend wird das Lüftungskonzept vorgestellt und Heiz- und Kühlvorrichtungen behandelt. Darauf folgend wird die Stromerzeugung anhand von PV-Modulen auf der Klimahülle betrachtet.

#### **3.1           Konstruktionsdetails**

Im Folgenden werden einige Konstruktionsdetails vorgestellt.

##### **3.1.1           Glasfassade**

Die Glasfassade der Klimahülle umfasst alle vier Gebäudeseiten und die Shed-Dächer. Dies ermöglicht natürliche Beleuchtung für Pflanzen und Menschen und mittels variabler Außenverschattung werden die Kühllasten verringert. Die moderne Mehrfachverglasung dient als wirkungsvolle Isolierung.

- Die Glasfassade des Gewächshauses ist mit Dreifachverglasung geplant, die hohe Transmission von 90 % aufweist. Der U-Wert ist  $2.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- SGG XT 60-28 6/16/4 für den Schulungsteil und Trennwand ( $1.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).
- SGG Diamant 8/16/4 für Gewächshaus ( $2.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

##### **3.1.2           Innenräume**

In der Klimahülle gibt es zwei Zonen mit unterschiedlichen Anforderungen an Temperatur, Licht, Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalt. Die Belüftung sollte kaskadiert erfolgen, so dass die Abwärme (Winter) und  $\text{CO}_2$  der Menschen anschließend im Pflanzenbereich genutzt werden kann. Die Belüftung folgt den Anforderungen für Frischluft und Temperierung.

Für das Fundament wird bewehrter Beton mit 300 mm Wandstärke und U-Wert von  $3.03 \text{ W/m}^2\text{K}$  angesetzt.

Die beheizten Böden im EG werden mit U-Wert  $0.432 \text{ W/m}^2\text{K}$  modelliert.

##### **3.1.3           Verschattung**

Die Verschattung wird außerhalb der Klimahülle angebracht. Es handelt sich dabei um eine Kombination aus fest installierten und variablen Elementen, die sich intelligent steuern lassen.

Die stabile Außenverschattung kann auch bei stärkerem Wind betrieben werden, während leichte Lamellenjalousien längst beschädigt würden. Die spezielle Geometrie wird von Rhino in DesignBuilder übertragen und die Beweglichen Elemente durch Bauteile mit im Verschattungs-Fahrplan wechselnder Transparenz nachgebildet.

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

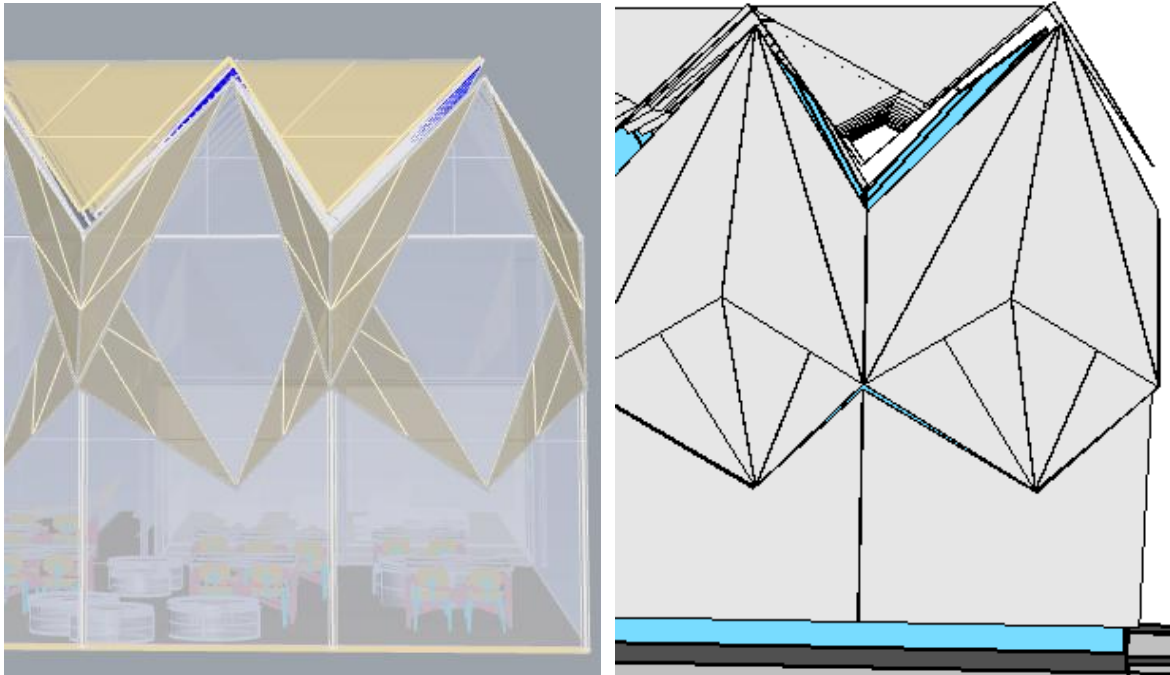


Abb. 3.1 Verschattung in Rhino [Peissl2025] und DesignBuilder

Die zunächst erwogene variable Verschattung über der Schulungszone wird durch eine Eindeckung mit PV ersetzt (siehe Abschnitt 2.4), da eine niedrige Lichttransmission gewünscht ist, die Baukosten sinken und so mehr Strom geerntet werden kann. In der neuen Geometrie sinkt die unfreiwillige Verschattung der PV-module und über dem Gewächshausteil lassen sich Verschattungselemente verwenden, die aufgeklappt planparallel zum Sheddach sind und für hohe Lichttransmission wie Schmetterlingsflügel aufgeklappt werden können.

Durch die Höhe der Seitenverschattung auf Ost- und Westfassade besteht keine Gefahr für Besucher:innen, sich im Verschattungs-Mechanismus einzuklemmen. Hecken ergänzen die variable Verschattung, die durch Laubabwurf im Winter mehr Licht ins Gebäude lässt. Es wird angenommen, dass dieser im Sommer zu 30 % und im Winter nicht verschattet.

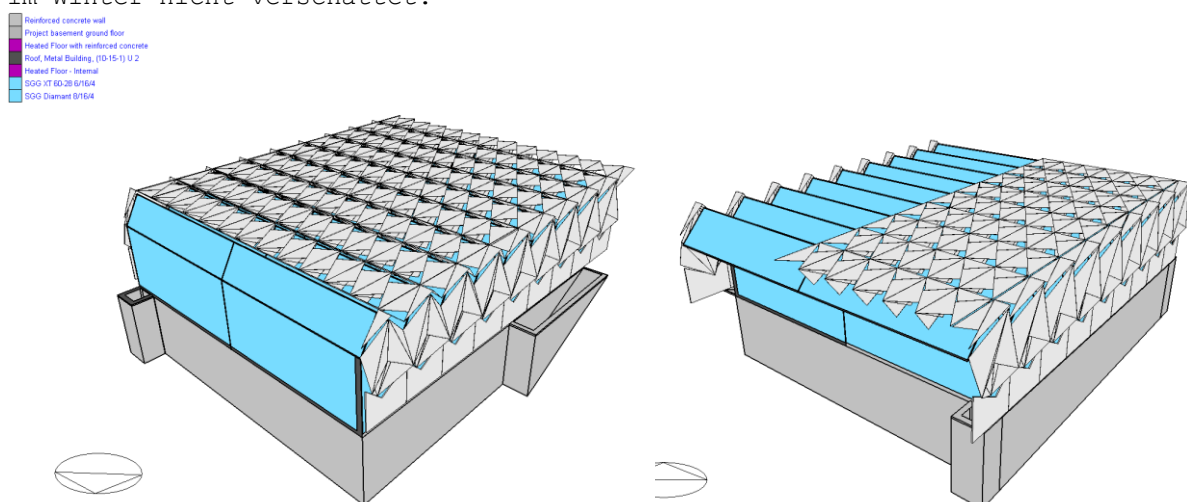


Abb. 3.2 Anpassung der variablen Dachverschattung

# Klimahülle Schulungsgewächshaus

Durch die Umgestaltung der Verschattung (Abb. 3.4) können erheblich günstigere Standard-PV-Module genutzt werden, die bei der geneigten Südwestausrichtung als Teil des Sheddachs auch einen vernünftigen Jahresertrag erwarten lassen. Typischerweise sind dann auch die PV-Erträge höher, wenn mehr Klimatisierungsbedarf besteht.

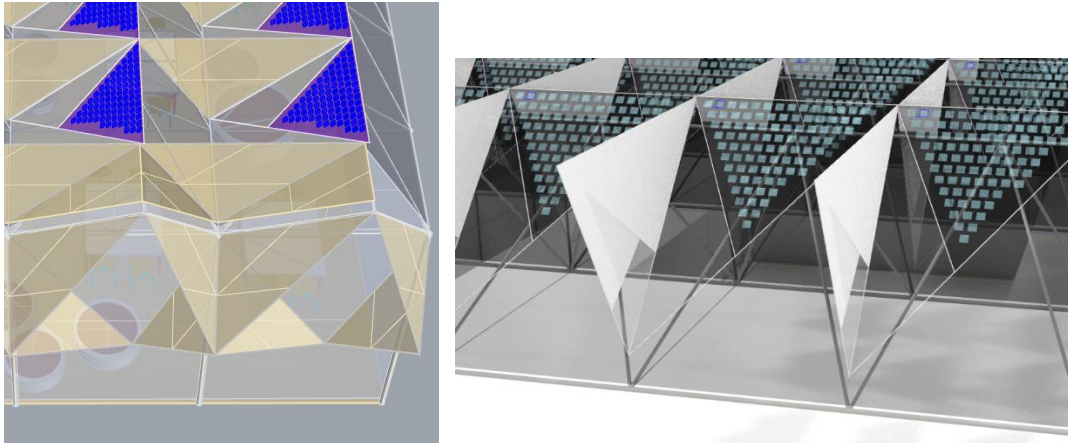


Abb. 3.3 Ehemalige PV-Planung mit Spezialmodulen (blau), die bei niedrigem Sonnenstand auch von der eingeklappten ursprünglichen Verschattung teilverschattet worden wären. [Peissl2025]

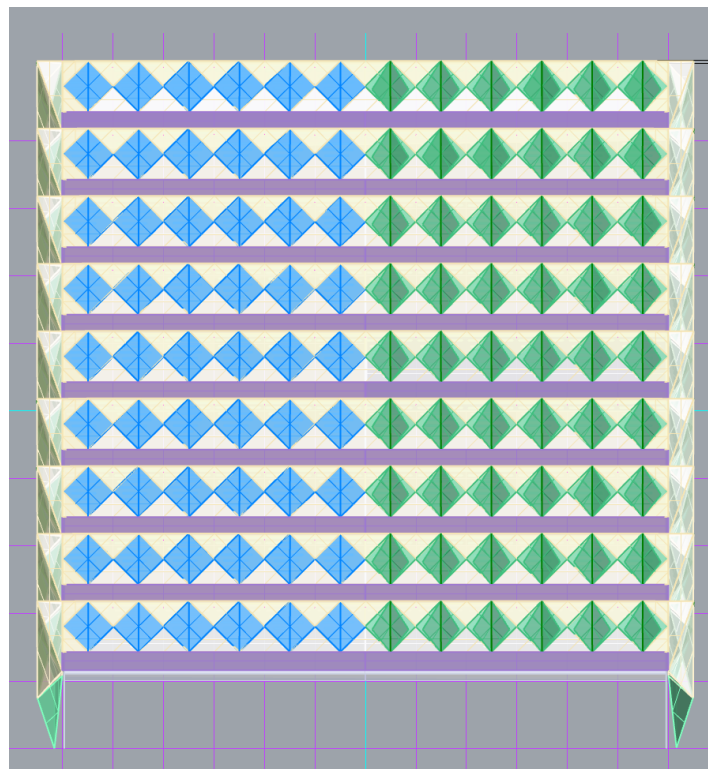


Abb. 3.4 PV-Elemente (blau) über Schulungsbereich, variable Verschattung (grün) über Gewächshaus. [Peissl2025]



## Klimahülle Schulungsgewächshaus

Durch den Überstand der Verschattung nach Südwesten wird gerade an heißen Sommertagen durch den hohen Sonneneinfallswinkel dennoch der Großteil des Klimahülleninnenraums verschattet.

### 3.1.4 Hinterlüftung PV-Anlagen

Im Falle einer standardmäßigen Dachaufbringung von PV-Modulen sind diese möglichst mit 10 bis 20 cm Abstand zum Dach selbst aufzubringen, um eine ausreichende Hinterlüftung zu gewährleisten. Auch für den Aufbau auf der Klimahülle kann dieser Wert als Richtwert verwendet werden. Der freie Bereich hinter den PV-Modulen sollte am besten mindestens 20 cm betragen, denn je mehr Abstand vorliegt, desto besser wird die Hinterlüftung sowie generell die Lüftung der Klimahülle gewährleistet.

### 3.1.5 Abhängung der Kühl-/Heizdecke

Je nach Hersteller variiert der Abstand der Kühl-/Heizdecke von der Gebäudedecke zwischen etwa 10 cm und 50 cm.

## 3.2 Lüftungskonzept

Die Lüftung ist so ausgelegt, dass zu Betriebszeiten 3 Luftwechsel/h durch die Kombination von natürlicher und mechanischer Lüftung sichergestellt sind.

Grundsätzlich ist die Temperatur in der Klimahülle höher als die Außentemperatur, da sich die Luft durch solare Einstrahlung aufheizt.

In den kälteren Monaten von Oktober bis April ist die Aufwärmung gewünscht und wird durch möglichst geringe Lüftung unterstützt. Um dennoch eine angenehme Luftqualität in der Klimahülle zu haben, wird der Luftwechsel in der Klimahülle von 8 - 18 Uhr unter der Woche mit 3/h angesetzt.

In den wärmsten Monaten von Mai bis August heizt sich die Klimahülle schnell auf. Um eine Abkühlung speziell durch die nachts kühlere Umgebungsluft zu ermöglichen, kann in diesen Monaten durchgehend 6 Luftwechsel/h (LW/h) vorgesehen werden. Es macht Sinn, die Luftwechselzahl weiter zu erhöhen, wenn die entsprechenden Umgebungsbedingungen vorliegen.

Regen- und Einbruchschutz aller Öffnungsflächen ist notwendig, um diese durchgehend - auch am Wochenende - öffnen bzw. geöffnet lassen zu können.

Der für die Simulation genutzte Lüftungszeitplan ist in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1 Lüftungsplan der Klimahüllenöffnungen

| Gebäudeteil | Unter der Woche    | Wochenende         |
|-------------|--------------------|--------------------|
| Schulung    | 8 - 18 Uhr, 3 LW/h | Durchgehend 0 LW/h |
| Gewächshaus | Durchgehend 3 LW/h | Durchgehend 3 LW/h |

Die Fenster der Schulräume selbst sind während den Betriebszeiten zwischen 8 und 18 Uhr jede Stunde für 10 Minuten zu öffnen. Die Öffnungsflächen wurden als 20 % der Gesamtfläche der Glasfronten modelliert [EnergyPlus, DesignBuilder].

Im Lüftungskonzept ist durchgehend natürliche Lüftung vorgesehen. Manuelle und automatische Lüftung werden kombiniert, so dass eine ausreichende Versorgung mit Frischluft sichergestellt werden kann. In die Steuerung der Öffnung der Klimahüllenöffnungen wird ein CO<sub>2</sub>-Messgerät integriert, das für eine ausreichende Mindestlüftung sorgt. Zusätzlich kann die Steuerung mit

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

Temperaturmessgeräten kombiniert werden, so dass intelligent gesteuert werden kann, wodurch die benötigte Kühl- und Heizenergie minimiert wird. Die Möglichkeit, die Fenster zusätzlich manuell öffnen zu können, sorgt nachweislich für ein höheres Wohlbefinden.

### 3.3 Heiz- / Kühlkonzept

Im Schulungsbereich soll es im Winter wärmer und im Sommer kühler als im Gewächshaus sein.

Außerdem steigert die Atemluft der Besucher:innen im Schulungsbereich den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft, was als Dünger fungiert. Dadurch bietet sich eine kaskadierte Heizung/Kühlung durch Weiterleitung der Schulungsluft zum Gewächshaus an.

### 3.4 Energiebedarf

#### 3.4.1 Ursprüngliche Anforderungen

Die Temperierung von Klimahülle und Innenräumen erfolgt nach dem in Abb. 3.5 gezeigten Prinzip. Durch die großflächige Heizung bzw. Kühlung wird die Raumtemperatur wärmer bzw. kühler wahrgenommen.

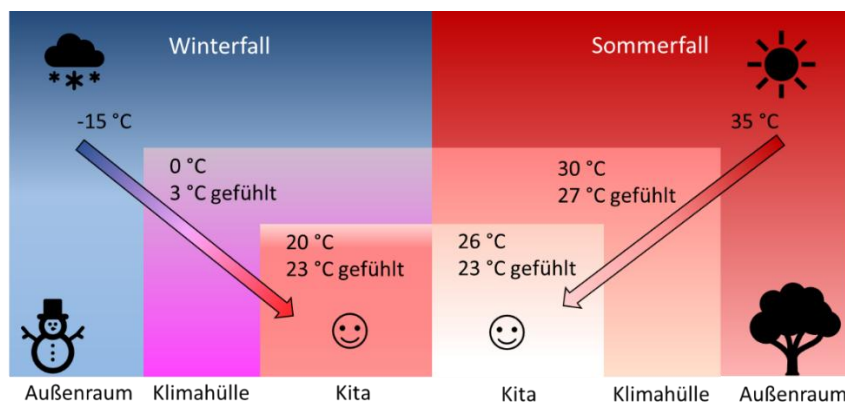


Abb. 3.5 Temperierung von Klimahülle und Innenräumen [Peissl2025]

#### 3.4.2 Vorläufige Heiz- und Kühllasten

Aus der Simulation ergeben sich folgende Werte für den jährlichen Energie- und Leistungsbedarf für Charlottenburg/Berlin (52.49°N, 13.25°O) in Tabelle 3.2:

Tabelle 3.2 Heiz- und Kühllasten

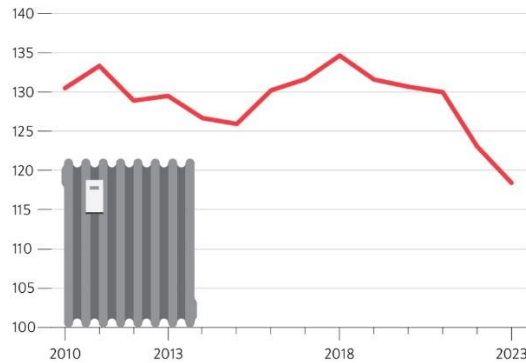
|                            |                      | Schulungszone | Gewächshaus |
|----------------------------|----------------------|---------------|-------------|
| Schwellwert Heizen         | °C                   | 17            | 2           |
| Schwellwert Kühlen         | °C                   | 32            | 40          |
| Heizenergie                | MWh/a                | 38,8          | 10,7        |
| Heizenergie je Grundfläche | MWh/a/m <sup>2</sup> | 0,21          | 0,06        |
| Max. Heizleistung          | kW                   | 62,6          | 20,2        |
| Kühlenergie                | MWh/a                | 2,5           | 0,9         |
| Max. Kühlleistung          | kW                   | 16,3          | 11,6        |

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

Der spezifische Heizbedarf liegt in der ursprünglichen Auslegung etwa doppelt so hoch wie der deutsche Wohngebäudebestand (0.12 MWh/a/m<sup>2</sup>).

### Heizenergiebedarf in Zwei- und Mehrparteienhäusern

Jährlicher Heizenergiebedarf in Kilowattstunden je Quadratmeter beheizter Wohnfläche, temperaturbereinigt



Anmerkung: Die Werte für 2023 sind vorläufig.  
Quelle: Ista SE, eigene Berechnungen

Abb. 3.6 Spezifischer Heizbedarf in Deutschland (kWh/a/m<sup>2</sup>) [DIW]



Abb. 3.7 Klimasimulation für Schulungszone mit hohem Heizbedarf und geringer Kühllast wegen Verschattung. In der Schulungszone zeigt sich das wöchentliche Betriebsmuster mit Lüftung und Klimatisierung an Wochentagen.

# Klimahülle Schulungsgewächshaus

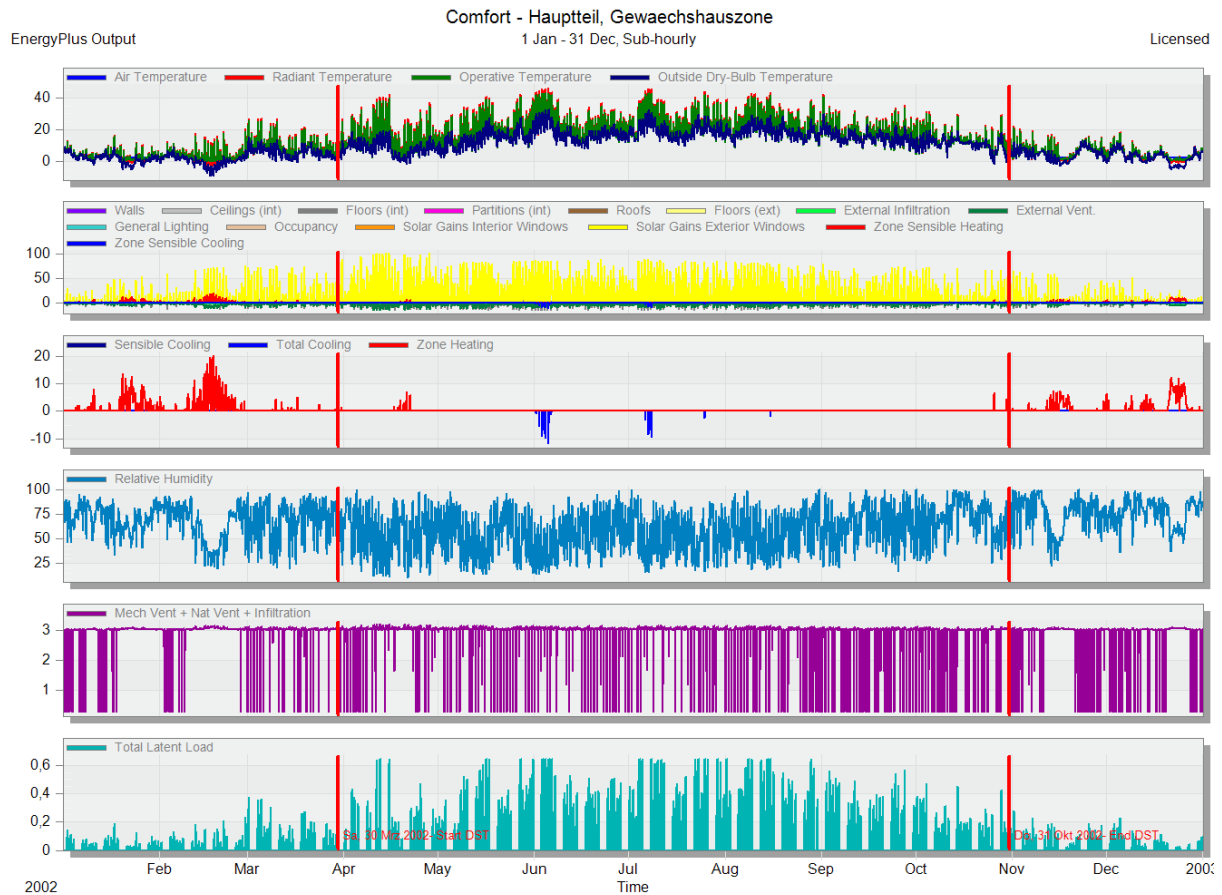


Abb. 3.8 Klimasimulation des Gewächshauses mit geringer Heizung wegen hohem Solargewinn. Durch die weitere Spanne an akzeptablen Temperaturen sind die Heiz/Kühlkosten in der Gewächshauszone deutlich geringer. Der Solar-/Lichteintrag ist verwendungsgemäß deutlich größer.

## 3.4.3 Solareintrag und Temperaturverlauf

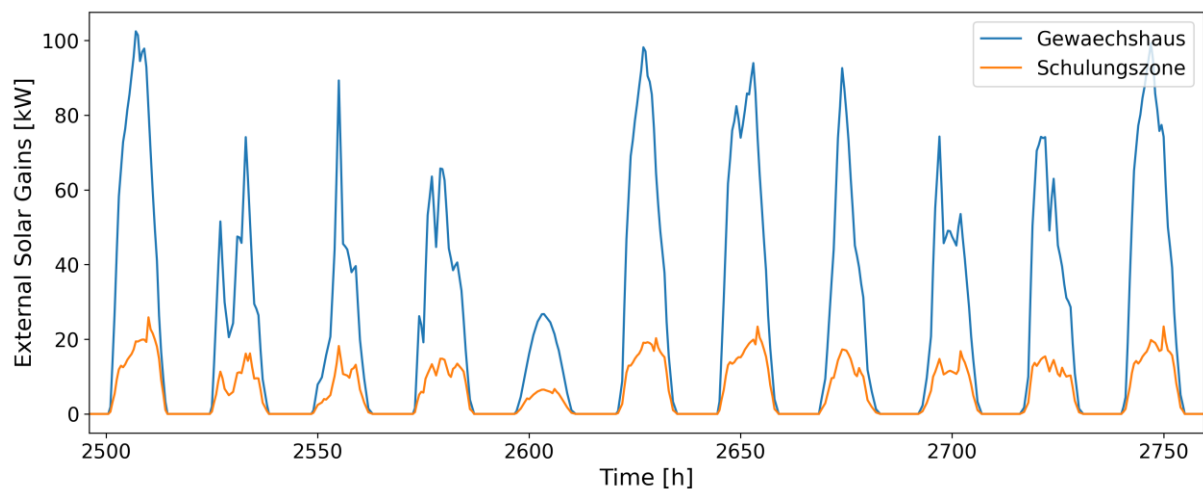


Abb. 3.9 Solare Gewinne sind im Gewächshaus (blau) wegen der hohen Transparenz der Decke wegen der variablen Verschattung, die nur bei Bedarf geschlossen wird, viel höher als in der Schulungszone (orange).



## Klimahülle Schulungsgewächshaus

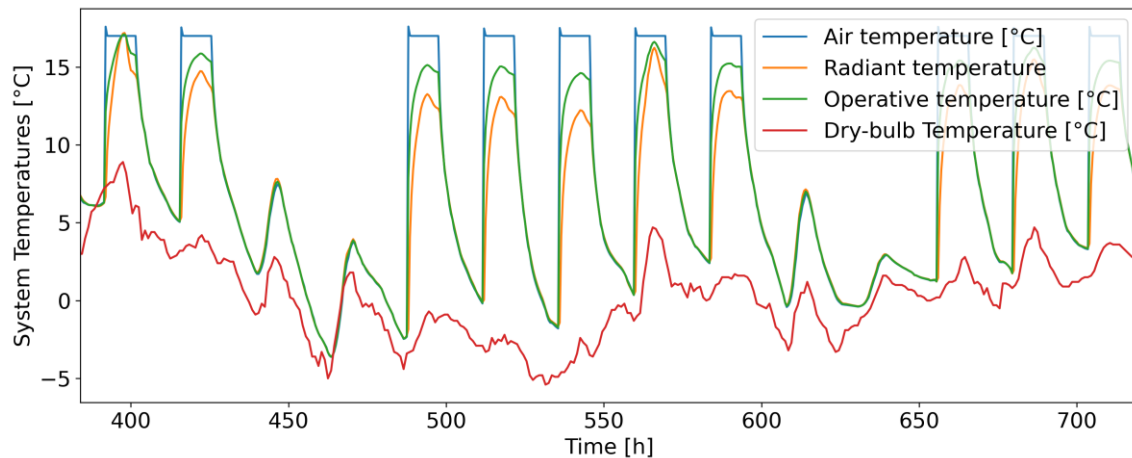


Abb. 3.10 Temperaturverlauf im Januar in der Schulungszone bei Soll-Temperatur von 17°C

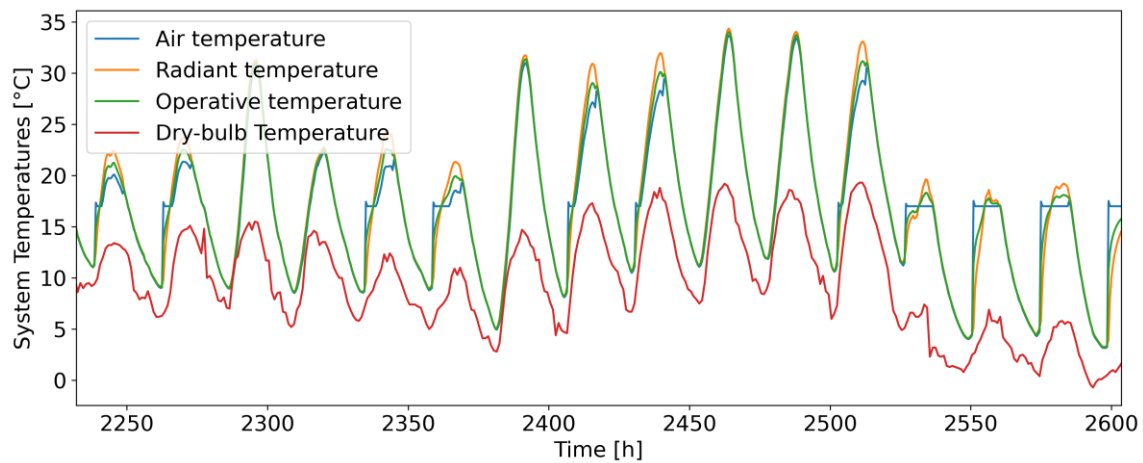


Abb. 3.11 Temperaturverlauf im April in der Schulungszone bei Soll-Temperatur von 17°C mit Temperaturspitzen bis 32°C

Da die Temperaturtoleranz beim Gewächshausteil als 2-40°C angenommen wurde, müssen Heizung und Kühlung weniger intervenieren.

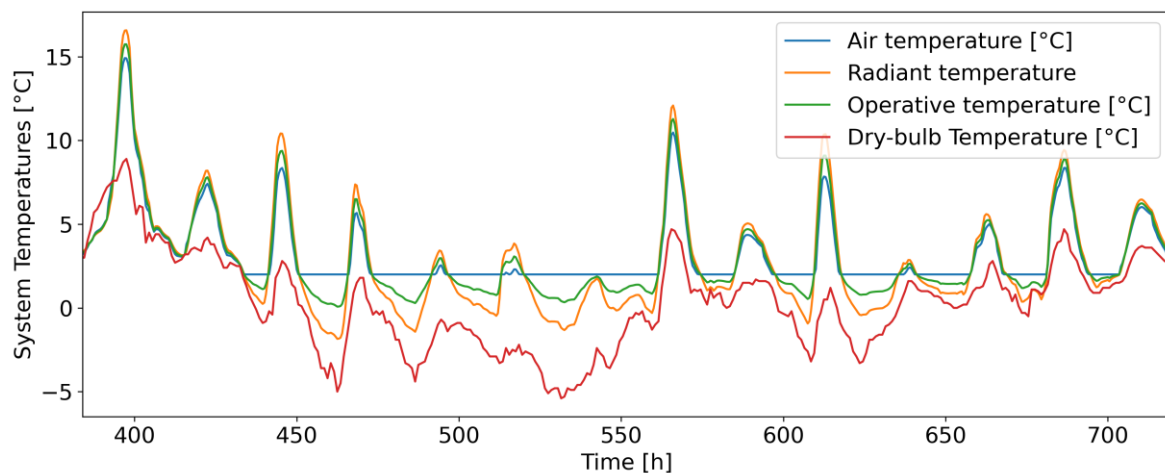


Abb. 3.12 Gewächshaustemperatur im Januar

# Klimahülle Schulungsgewächshaus

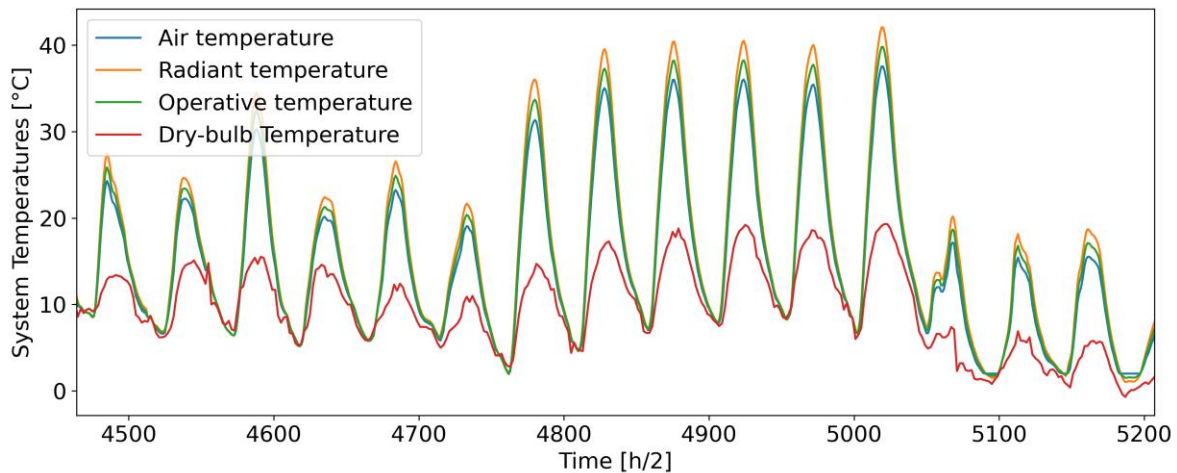


Abb. 3.13 Temperaturverlauf im Juli im Gewächshaus: Temperaturen bis 40 °C werden toleriert.

## 3.4.4 Vorausschauende Betriebsweise

Die hohen Leistungsspitzen (62 kW) für das Heizen und Kühlen (16 kW) ergeben sich aus dem Fahrplan (Betrieb von 8-18 Uhr von Montag bis Freitag), v.a. aus dem plötzlichen Ändern der Solltemperatur morgens um 8 Uhr. Die Spitzen lassen sich durch vernünftige Regelung (rechtzeitiges Einschalten) erheblich glätten, was die Haustechnik – kleinere Aggregate und gleichmäßigerer Betrieb – in Anschaffung und Betrieb günstiger machen sollte.

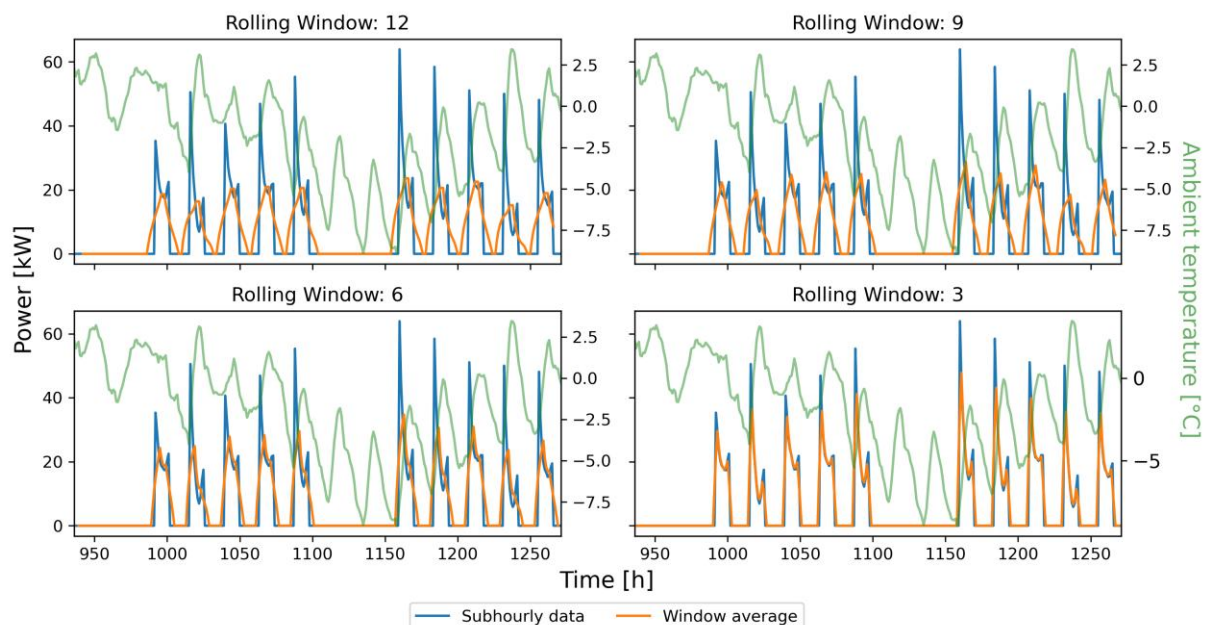


Abb. 3.14 Verringerung der Spitzenwerte der Heizlasten für Schulungszone durch vorausschauende Betriebsweise auf ca. 1/3 bzw. 1/2 gegenüber kurzfristiger Fahrweise. Die Spitzenleistung ist vor allem morgens und nach dem Wochenende besonders hoch.

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

Da die Pflanzen nie kälter als 2°C werden, gibt es ein tiefes Auskühlen und das plötzliche Anheizen nicht und die Glättung verringert die Peaks kaum.

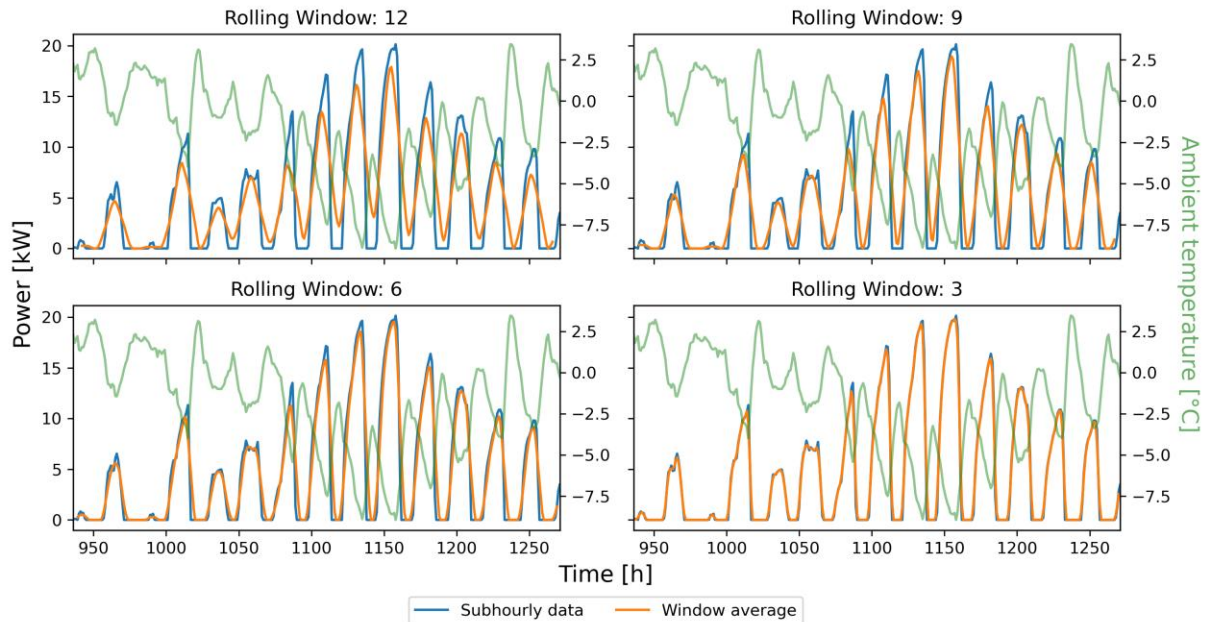


Abb. 3.15 Schulungszone mit Glättung der Heizleistung, Februar,

Das Kühlen im Sommer kann auch etwas „auf Vorrat“ erfolgen und so die Spitzenleistung reduzieren.

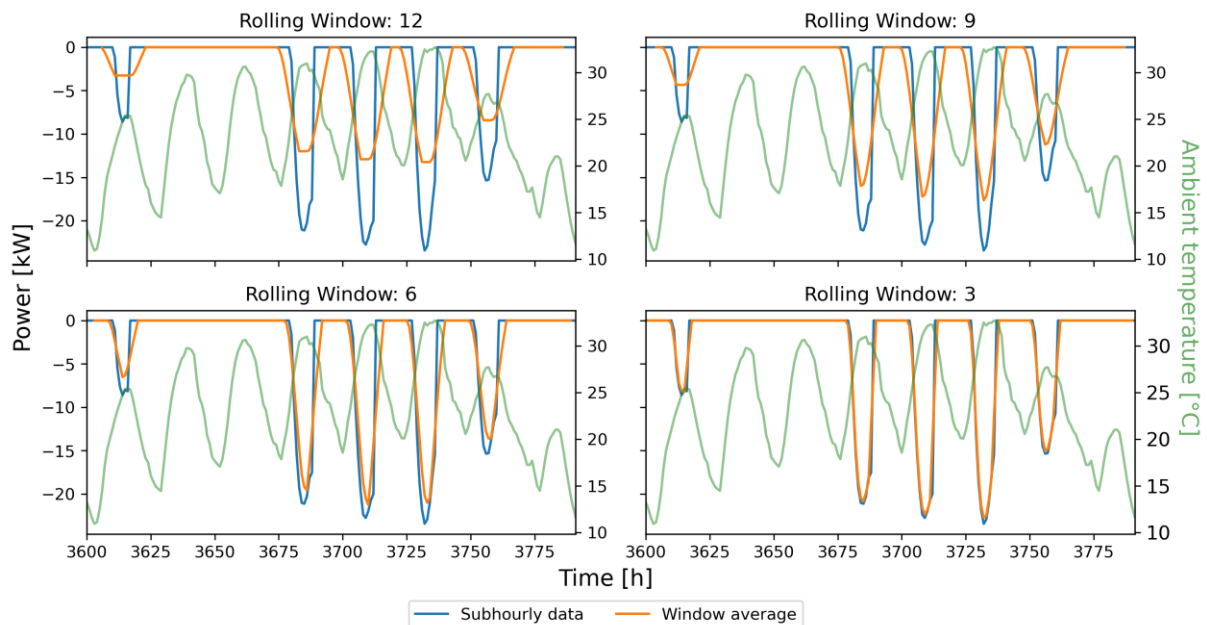


Abb. 3.16 Kühlung der Schulungszone (Betrieb 8-18 h, Mo-Fr) im Juni

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

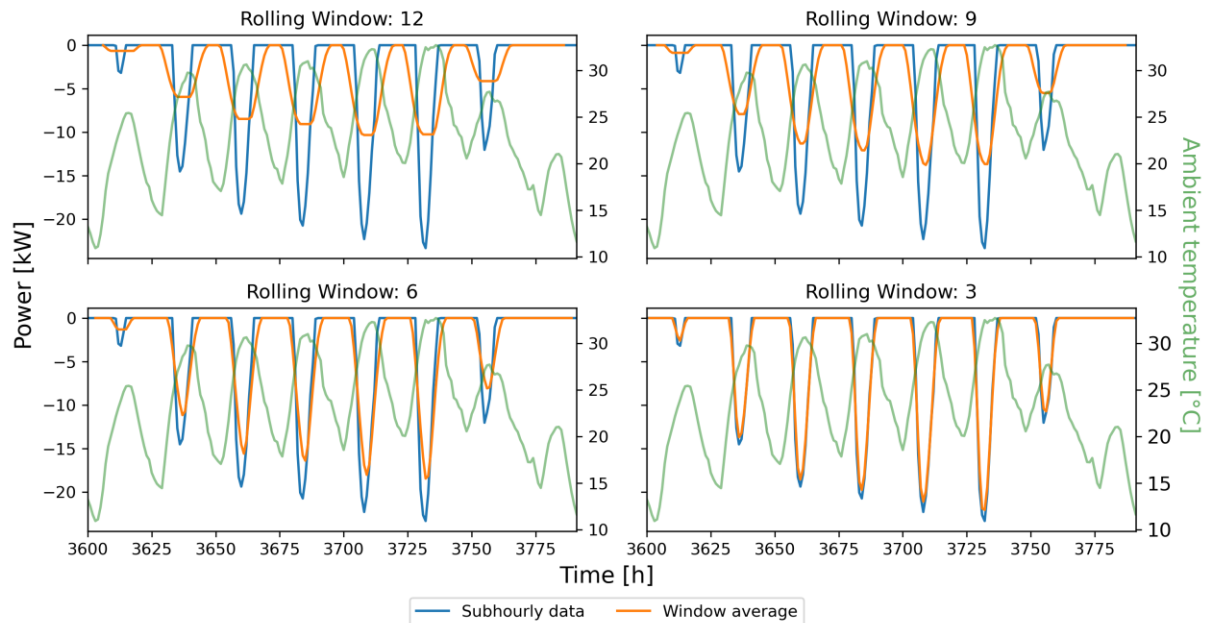


Abb. 3.17 Gewächshaus mit 24/7-Betrieb im Sommer (Juni) kann auf Vorrat gekühlt werden, um die maximale Kühlleistung zu minimieren.



### 3.4.5 Anpassung von Geometrie und Verschattung

Durch die Anpassung der Geometrie und Verschattung ergeben sich neue Werte, vor allem wird der Heizenergiebedarf etwa halbiert, s. Tabelle 3.3:

Tabelle 3.3 Heiz- und Kühllasten für angepasste Geometrie und Dacheindeckung

|                                          |                      | Schulungszone | Gewächshaus |
|------------------------------------------|----------------------|---------------|-------------|
| Schwellwert Heizen                       | °C                   | 17            | 2           |
| Schwellwert Kühlen                       | °C                   | 32            | 40          |
| Heizenergie                              | MWh/a                | 21,7          | 5,3         |
| Heizenergie je Grundfläche               | MWh/a/m <sup>2</sup> | 0,12          | 0,03        |
| Max. Heizleistung                        | kW                   | 64            | 20          |
| Max. Heizleistung bei Glättung über 5 h  | kW                   | 39            | 20          |
| Kühlenergie                              | MWh/a                | 1,5           | 1,1         |
| Max. Kühllleistung                       | kW                   | 23            | 23          |
| Max. Kühllleistung bei Glättung über 5 h | kW                   | 22            | 20          |
| Strom zur Beleuchtung                    | MWh/a                | 1,0           | 1,0         |
| Max. Strom zur Beleuchtung               | kW                   | 2             | 2           |

Der spezifische Heizbedarf ist nun halbiert und entspricht für den Schulungsteil dem typischer Bestandswohngebäude (~0.1 MWh/a/m<sup>2</sup>) während der Gewächshaus teil dank der hohen Temperaturtoleranz fasst an ein Passivhaus heranreicht. Kaskadierung der Lüftung oder Wärmerückgewinnung kann den Energiebedarf weiter reduzieren.

## Klimahülle Schulungsgewächshaus



Abb. 3.18 Temperaturverlauf, Wärmebilanz und Heiz-/Kühllasten sowie Lüftung in der Schulungszone

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

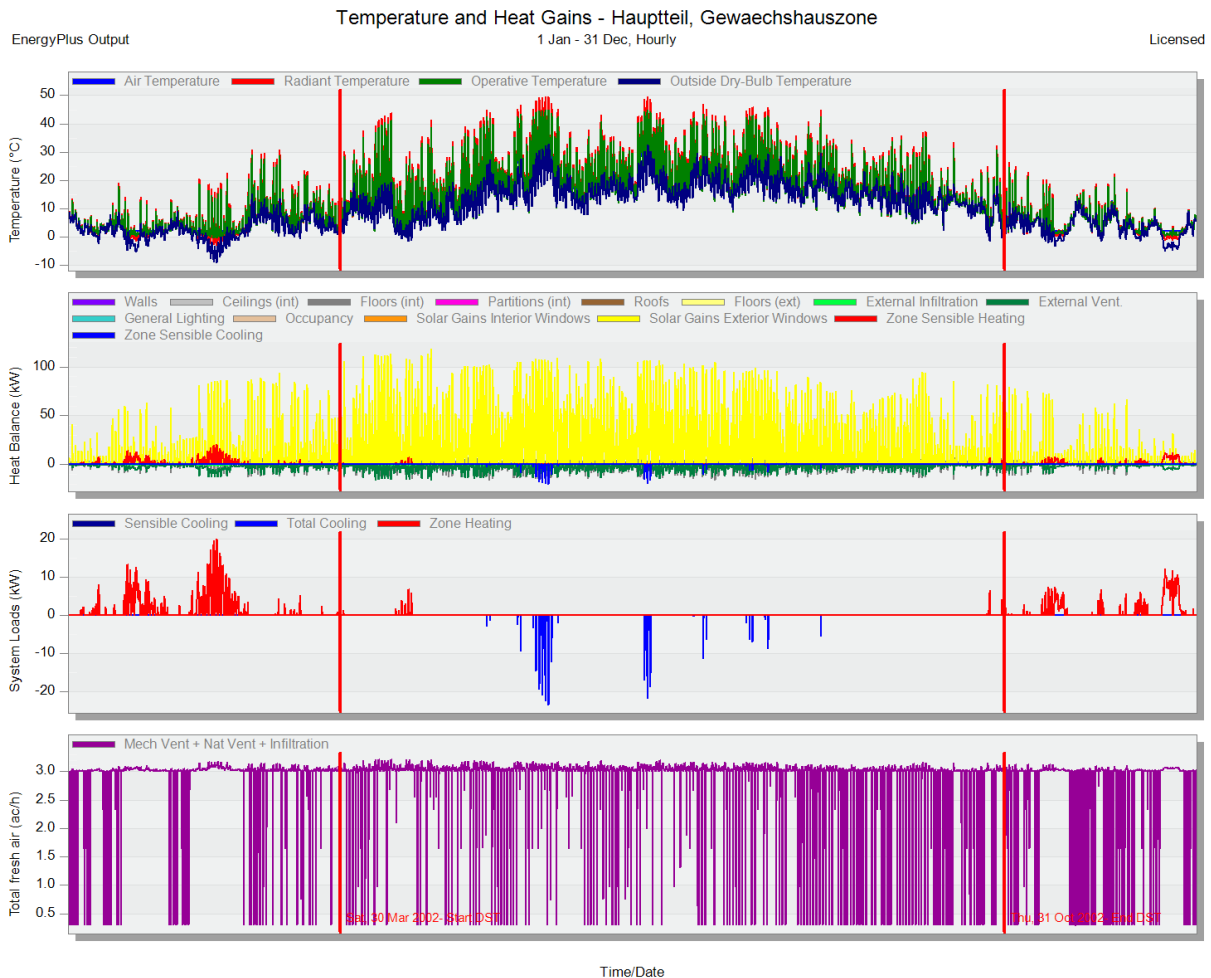


Abb. 3.19 Das Gewächshaus hat wegen der variablen Verschattung, die nur bei drohender Überhitzung geschlossen werden soll, auf der gleichen Grundfläche fast den dreifachen Solareintrag.

Die Glättung der Wärmebereitstellung reduziert die Peak-Lasten wie in Abschnitt 3.4.4 erheblich.

### 3.4.6 Engere Temperaturtoleranz

Die Temperaturanforderungen werden zu Gunsten eines höheren Komforts in der Schulungszone verschärft und die Maximaltemperatur von 32°C auf 27°C abgesenkt. Dadurch muss im Sommer mehr gekühlt werden.

Die neue Kühlungsspitzenlast wurde durch Simulation eines Sommertages bestimmt, um die sehr aufwändige Gesamtsimulation zu vermeiden.

Die Jahresenergie für Kühlung wurde durch Regressionsanalyse abgeschätzt.

Die Kühllasten vergrößern sich durch die niedrigere Maximaltemperatur und die maximale Leistung steigt auf 28 kW, siehe Abb. 3.20. Abb. 3.20 Gesteigerte Kühllast für Schulungszone für abgesenkte maximale Temperatur  $T < 27^{\circ}\text{C}$ .

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

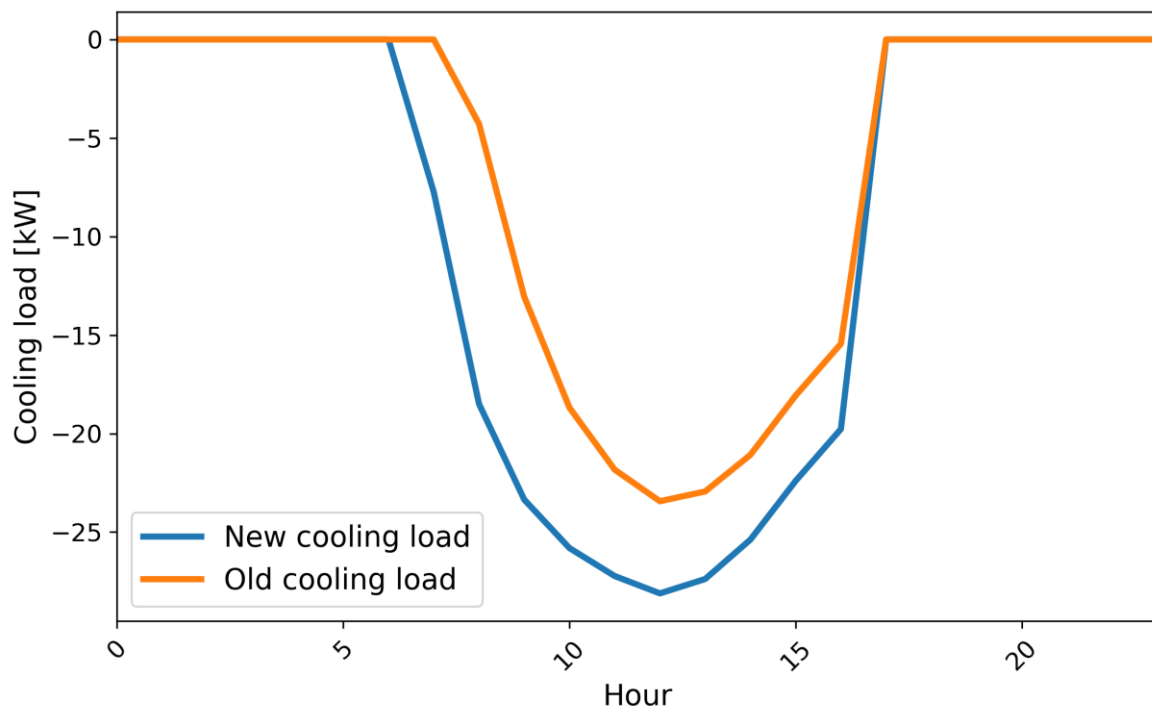


Abb. 3.20 Gesteigerte Kühllast für Schulungszone für abgesenkte maximale Temperatur  $T < 27^{\circ}\text{C}$ .

Bei der Analyse der vorherigen Kühllasten wurde eine starke Korrelation mit der Außentemperatur ermittelt, siehe Abb. 3.21. Dieser Zusammenhang wird um den Offset ( $32^{\circ}\text{C} \rightarrow 27^{\circ}\text{C}$ ) um  $5^{\circ}\text{C}$  verschoben, um aus den in der Zeitreihe vorliegenden Außentemperaturen die neue Kühlleistung abzuleiten.

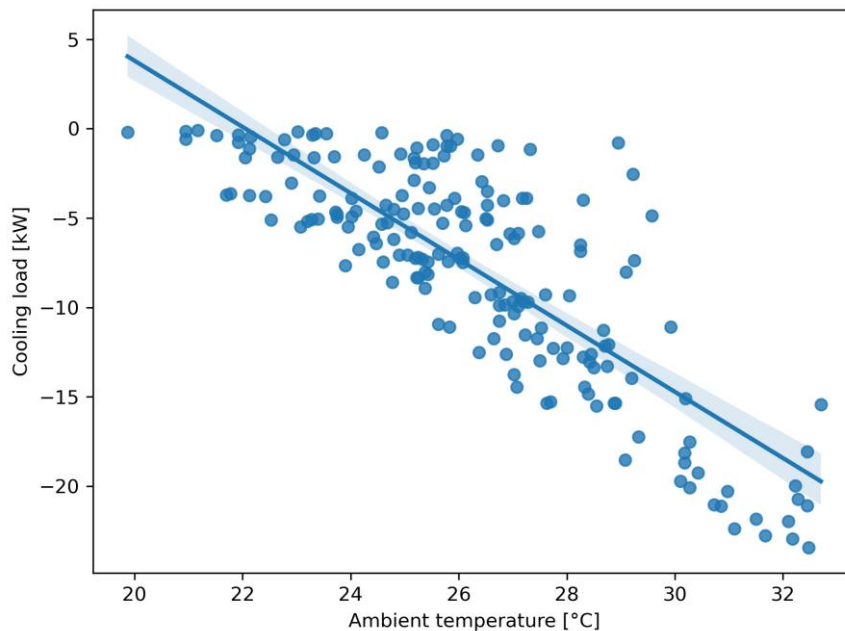


Abb. 3.21 Korrelation der Kühllasten mit der Außentemperatur

Die abgeschätzte Kühlleistung (blau) ist höher (28 kW) und führt zu einem etwa 3x so großen Kühlungsbedarf von 4.3 MWh / a.



# Klimahülle Schulungsgewächshaus

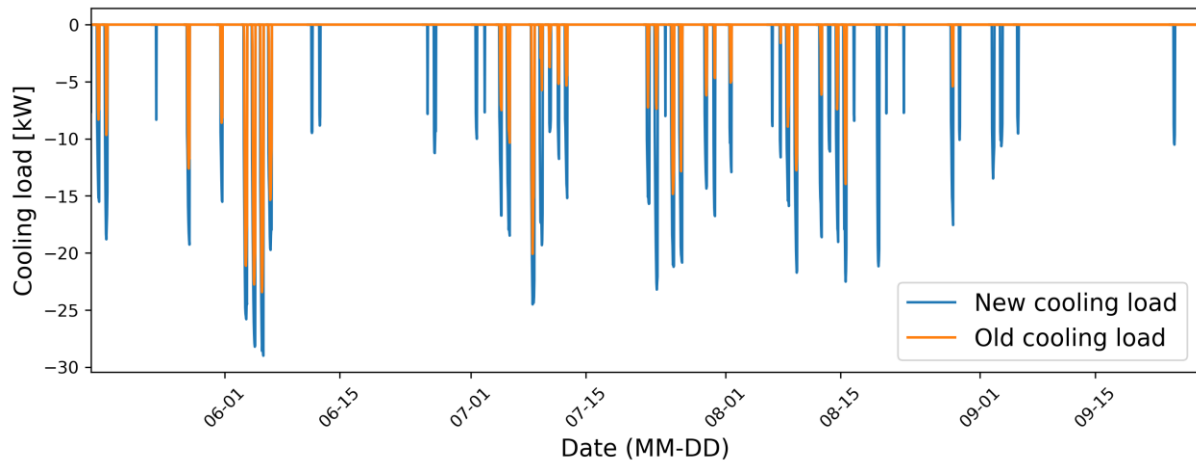


Abb. 3.22 Abgeschätztes Kühllastprofil bei  $T < 27^{\circ}\text{C}$  in der Schulungszone

Tabelle 3.4 Heiz- und Kühllasten bei reduzierter Maximaltemperatur

|                                         |                    | Schulungszone | Gewächshaus |
|-----------------------------------------|--------------------|---------------|-------------|
| Schwellwert Heizen                      | $^{\circ}\text{C}$ | 17            | 2           |
| Schwellwert Kühlen                      | $^{\circ}\text{C}$ | <b>27</b>     | 40          |
| Heizenergie                             | MWh/a              | 21,7          | 5,3         |
| Max. Heizleistung                       | kW                 | 64            | 20          |
| Max. Heizleistung bei Glättung über 5 h | kW                 | 39            | 20          |
| Kühlenergie                             | MWh/a              | <b>4,3</b>    | 1,1         |
| Max. Kühlleistung                       | kW                 | <b>28</b>     | 23          |
| Max. Kühlleistung bei Glättung über 5 h | kW                 | 25            | 20          |
| Strom zur Beleuchtung                   | MWh/a              | 1,0           | 1,0         |

## 3.4.7 Anpassung der Gebäudegröße und Skalierung der Heiz- und Kühllasten

Die finale Abschätzung der Heiz- und Kühllasten beruht auf der Annahme eines konstanten Energieverbrauchs pro Grundfläche und skaliert entsprechend mit der Gebäudegröße.

Während die Untersuchungen bisher auf einer Klimahülle beruhten, die direkt über den Grundmauern des Öllagers errichtet wird, ist jetzt eine größere Klimahülle auf einem neuen Streifenfundament geplant, das 1 m Abstand zu den Bestandsmauern hält und diese vor Witterung schützt.

Die bisherige Grundfläche beider Bereiche direkt auf Öllager betrug:

Schulung = Gewächshaus =  $9,23 \times 20 \text{ m}^2 = 185 \text{ m}^2$ .

Durch das 1 m weiter außen liegende Fundament vergrößert sich die Fläche je Zone auf  $11,23 \times 22 \text{ m}^2 = 247 \text{ m}^2$ .

Entsprechend sind bei konstantem Energieverbrauch je Grundfläche mit 1/3 höheren Heiz-/Kühllasten zu rechnen.

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

Wenn die Solaranlage entsprechend mitskaliert wird, erreicht sie mit 72 Modulen eine Spitzenleistung von 17 kWp und einen Jahresertrag von 15 MWh / a.

### 3.5 Strom

#### 3.5.1 Strombedarf für Beleuchtung

Der Beleuchtungsbedarf richtet sich an der Mindestbeleuchtungsstärke und betrifft fast ausschließlich den Winter, da die Nordseiten der Sheddächer und die teil-transluzenten Südflächen viel natürliches Licht bereitstellen.

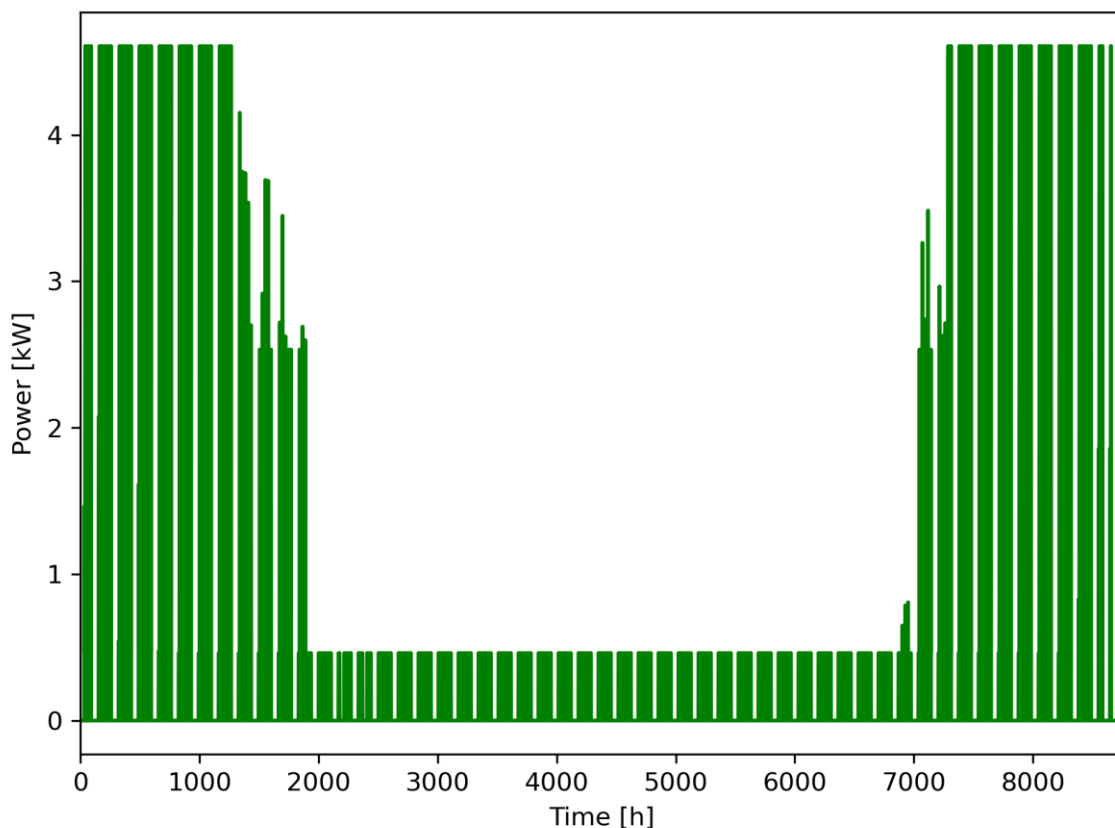


Abb. 3.23 Strombedarf für Beleuchtung

#### 3.5.2 Stromerzeugung

Zur Stromversorgung der Klimahülle und der Schulräume sind PV-Module auf den Süd-Sheds der Klimahülle vorgesehen. Von solarthermischen Solarkollektoren wird hier abgesehen. Das aufwändige System mit Spezialmodulen und zusätzlicher variabler Verschattung wird vereinfacht (siehe 2.4). Es können 54 Module zu 1.25 m<sup>2</sup> mit insgesamt ca. 70 m<sup>2</sup> PV-Module mit einer Gesamtspitzenleistung von 15 kWp installiert werden.

Eine durchschnittliche Modulleistung liegt bei etwa 220 W/m<sup>2</sup> (für ein modernes monokristallines PV-Modul sogar 240 W/m<sup>2</sup>).

Der durchschnittliche Stromertrag in Berlin beträgt 910 kWh/kWp/a. Durch die Ausrichtung in Richtung Süd-Ost mit 45° Neigung ergibt sich eine sehr gute Effizienz von 95 % (siehe Abb. 3.24) der theoretisch möglichen Ausbeute bei optimaler Ausrichtung.

## Klimahülle Schulungsgewächshaus

Die zu erwartende Stromproduktion beträgt ca. 13 MWh / a und ist somit etwa 6x so hoch wie der Strombedarf zur Beleuchtung.

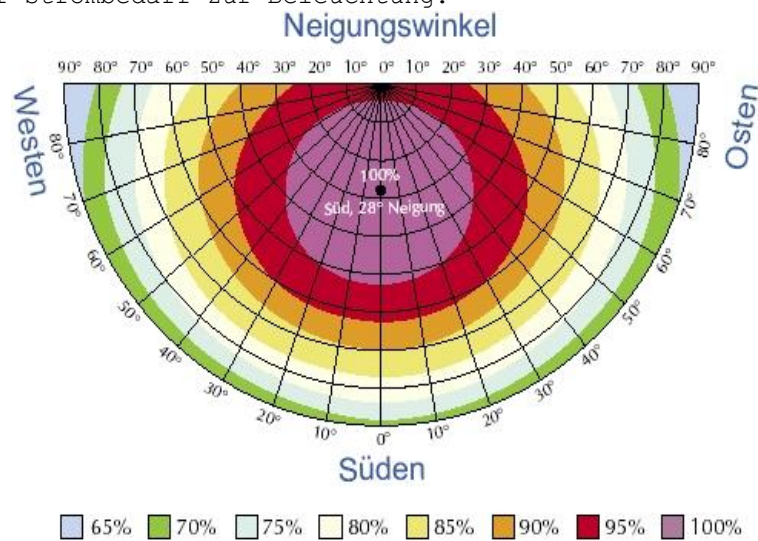


Abb. 3.24 PV-Ertrag in Abhängigkeit der Ausrichtung (Quelle: <http://www.pv-ertrag.com/neigung-und-ausrichtung>)

Mit einer Wärmepumpe mit COP von  $4 \pm 1$  kann mit dem Strom eine Wärmeenergie von 52 MWh / a bereitgestellt werden, was dem doppelten Bedarf (3.4.5) entspricht – leider sind Stromproduktion aus PV und -bedarf jahreszeitlich verschoben.

#### **4 Zusammenfassung und Bewertung**

Der überarbeitete Klimahüllenentwurf dieser Studie reagiert in seiner Form, Größe und technischen Ausprägung einerseits auf die besondere Doppelnutzung und andererseits auf das Umfeld des botanischen Gartens mit seinem Bauplatz.

Die Klimahülle passt optisch in das Gartengelände und liefert mit den zwei unterschiedlich klimatisierten und doch gekoppelten Bereichen (Kaskadenheizung, CO<sub>2</sub>-Düngung) eine Doppelnutzung.

Im Verlauf der Planung wurde auf den Bauplatz reagiert, die Nutzungsprofile in der Geometrie und Ausrichtung des Gebäudes reflektiert und durch den gezielten Einsatz von PV- und variabler Verschattung der Energiebedarf verringert und die Selbstversorgung erhöht.

Eine unmittelbare Energieautarkie ist vor allem im Winter mit geringer Einstrahlung und hohem Heizbedarf ohne Speicher nicht zu leisten.

Die mit der PV gesammelte Energie ist aber so hoch wie der Jahresstromverbrauch bei der Verwendung moderner Wärmepumpen.

### 5 Quellen und Verweise

[EnergyPlus] Gebäudeenergiesimulation, <https://energyplus.net/>

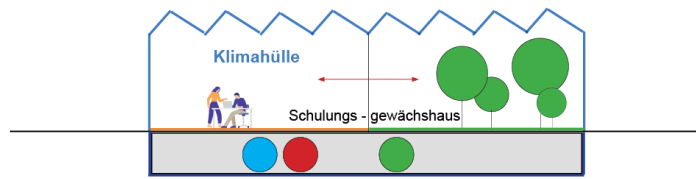
[DesignBuilder] Gebäudeenergiesimulation, <https://designbuilder.co.uk/>

[Peissl2019] TU Berlin FG Entwerfen und Konstruieren – Massivbau: Peissl, D., Schlaich, M., sbp sonne gmbh: Weinrebe, G.; „Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen, wandelbaren Gebäudeprototypen für die symbiotische Nutzung eines energieautonomen Schulungs-Gewächshauses in Berlin“ 2019, Forschungsantrag.

[Peissl2025] TU Berlin FG Entwerfen und Konstruieren – Massivbau: Peissl, D., Schlaich, M., sbp sonne gmbh: Gross, F. et al.; „Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen, wandelbaren Gebäudeprototypen für die symbiotische Nutzung eines energieautonomen Schulungs-Gewächshauses in Berlin“ 2015, Schlussbericht.

[DIW] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin,  
[https://www.diw.de/de/diw\\_01.c.932519.de/100\\_jahre\\_diw/diw-waermemonitor\\_\\_\\_\\_ein\\_rueckblick\\_auf\\_die\\_forschung\\_zum\\_thema\\_heizenergieverbrauch\\_im\\_gebaudesektor.html](https://www.diw.de/de/diw_01.c.932519.de/100_jahre_diw/diw-waermemonitor____ein_rueckblick_auf_die_forschung_zum_thema_heizenergieverbrauch_im_gebaudesektor.html)





## **A3 Anhang zum Themenbereich: Bioklimatisches Monitoring**



Verfasser: M.Sc. Thomas Gentsch, Dr. Fred Meier

Technische Universität Berlin  
Institut für Ökologie  
Fachgebiet Klimatologie

### **Inhalt:**

- Einleitung, Zielsetzung und Hintergrund
- Zusammenfassung der Studien und Planungen:
  - Messtechnik
  - Messaufbau und Versuche
  - Methoden zur Qualitätssicherung und Visualisierung
  - Auswertung – Bioklima
  - Auswertung – CO<sub>2</sub>
  - Grenzen der Messungen

# Abschlussbericht

## Prototyp eines bioklimatischen Schulungs- Gewächshauses



1 Mock-Up Schulungsgewächshaus in der Peter-Behrens Halle (Peissl 2023).

*"Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen, wandelbaren Gebäudeprototypen für die symbiotische Nutzung eines energieautonomen Schulungs-Gewächshauses in Berlin"*

Projektbeteiligte vom FG Klimatologie:

Thomas Gentsch

Dr. Fred Meier

# Inhaltsverzeichnis

## Bioklimatisches Monitoring:

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Einleitung.....                                          | 1  |
| Zielsetzung und Hintergrund .....                        | 2  |
| Standort.....                                            | 6  |
| Messtechnik.....                                         | 8  |
| Messaufbau und Versuche .....                            | 12 |
| Methoden zur Qualitätssicherung und Visualisierung ..... | 13 |
| Auswertung – Bioklima.....                               | 15 |
| Auswertung – CO <sub>2</sub> .....                       | 23 |
| Erkenntnisse .....                                       | 26 |
| Grenzen der Messungen .....                              | 26 |
| Literaturverzeichnis .....                               | 28 |

# Bioklimatisches Monitoring:

## Einleitung

Energieeffizientes Wohnen und Arbeiten gewinnt in unserer Gesellschaft zunehmend an Bedeutung. Dabei rücken die Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt verstärkt in den Fokus und erfordern innovative Konzepte zur Gestaltung nachhaltiger Lebens- und Arbeitsräume. Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Technischen Universität Berlin werden Synergien zwischen Mensch und Pflanze in einem eigens konzipierten Schulungsgewächshaus untersucht. Dieses Gewächshaus geht über die traditionelle Pflanzenproduktion hinaus, indem es eine symbiotische Interaktion zwischen Mensch und Pflanze fördert, die zur Steigerung der Lebensqualität beider beiträgt. Ziel ist es, ein optimal abgestimmtes bioklimatisches Umfeld zu schaffen, dessen klimatische Bedingungen gezielt gesteuert werden.

Das Fachgebiet Klimatologie der TU Berlin verantwortet in diesem Projekt die Entwicklung und Implementierung eines umfassenden bioklimatischen Monitoringsystems. Dieses System basiert auf kosteneffizienten, multifunktionalen Messstationen, die zentrale Umweltparameter wie Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Lichtintensität, Strahlungstemperatur, UV-Intensität, CO<sub>2</sub>-Gehalt und Windgeschwindigkeit erfassen. Die gewonnenen Daten dienen der präzisen Steuerung der Klimabedingungen im Büro zur Gewährleistung eines thermisch komfortablen Arbeitsumfeldes. Der Universal Thermal Climate Index (UTCI) spielt hierbei eine wesentliche Rolle, da er meteorologische und physiologische Parameter integriert und so eine differenzierte Bewertung der thermischen Bedingungen ermöglicht.

Ein zentraler Bestandteil des Monitoringsystems ist das biometeorologische Messinstrument „BioMet“. Dieses Gerät nutzt eine Vielzahl spezialisierter Sensoren zur Erfassung der Umweltparameter und speichert die Daten sowohl lokal als auch auf der IoT-Plattform ThingSpeak. Die fortlaufende Erhebung und Analyse dieser Daten dient der Optimierung der Wachstumsbedingungen für Pflanzen, der Verbesserung der Arbeitsbedingungen für Menschen und der Reduzierung des Energieverbrauchs. Das Projekt liefert somit wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklung nachhaltiger Gebäudetechnologien, die langfristig zur Steigerung der Energieeffizienz und Lebensqualität in solchen hybriden Räumen beitragen können.

## Zielsetzung und Hintergrund

Thermischer Stress stellt neben Luftschadstoffen ein wachsendes Gesundheitsrisiko dar. Zahlreiche Studien zeigen eine Korrelation zwischen thermischem Stress und erhöhter Mortalität und Morbidität, insbesondere bei Herz-Kreislauf- und Atemwegserkrankungen (Gosling et al. 2009; Bobb et al. 2014; Gasparrini et al. 2015). Während Hitzestress die körpereigene Temperaturregulation belastet und das Risiko für kardiovaskuläre und respiratorische Probleme erhöht, führt Kältestress zu einer Verengung der Blutgefäße und einer Erhöhung der Blutviskosität, was das Herz-Kreislaufsystem ebenfalls beansprucht (Ryti et al. 2016; Berko et al. 2014). Besonders gefährdete Gruppen sind ältere Menschen und Personen mit chronischen Erkrankungen (Åström et al. 2011). Die dramatischen Auswirkungen extremer Temperaturen wurden eindrücklich während der Hitzewelle 2003 in Europa dokumentiert, die über 70.000 zusätzliche Todesfälle verursachte (Robine et al. 2008).

Die Lufttemperatur allein beschreibt jedoch die gesundheitlichen Effekte von Hitze und Kälte nicht vollständig. Weitere Faktoren wie Luftfeuchtigkeit, Wind und Strahlung tragen signifikant zur thermischen Belastung bei. Tropennächte, in denen die Temperaturen nicht unter 20 °C fallen, stellen eine besondere Belastung dar, da sie die notwendige nächtliche Erholung des Herz-Kreislaufsystems verhindern (Kovats und Hajat 2008; Scherer und Endlicher 2014). Studien bestätigen, dass die Kombination von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wind die Thermoregulation und das Komfortempfinden des Körpers stark beeinflusst (Seldenrich 2015; Fiala et al. 2012).

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Forschungsprojekt an der TU Berlin das Ziel, ein bioklimatisches Monitoring im Schulungsgewächshaus zu etablieren. Der Einsatz des Universal Thermal Climate Index (UTCI) ermöglicht eine detaillierte Bewertung der thermischen Bedingungen, indem meteorologische Parameter und physiologische Faktoren integriert werden. Ziel des Projekts ist ein besseres Verständnis der Gesundheitsrisiken durch extreme thermische Bedingungen und die Schaffung eines optimal regulierten Raumklimas zur Verbesserung des Komforts und der Sicherheit der Nutzer.

### **Der bioklimatische Parameter: UTCI**

Die Human-biometeorologie zielt auf eine präzise Bewertung und Vorhersage thermischer Umweltbedingungen ab. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass auch moderate Temperaturerhöhungen sich nachteilig auf Morbidität und Mortalität auswirken können. Diese physiologi-



schen Reaktionen unterstreichen die Notwendigkeit bioklimatischer Indizes wie UTCI zur quantitativen Erfassung der thermischen Belastung und zur Unterstützung präventiver Maßnahmen.

### **Entwicklung des UTCI**

Bereits vor über drei Jahrzehnten entwickelte der Deutsche Wetterdienst (DWD) das Klima-Michel-Modell (KMM) zur Bewertung thermischer Bedingungen im Freien auf Basis der PMV-Gleichung (Predicted Mean Vote) von Fanger (1970), die ursprünglich für Innenräume konzipiert war (Jendritzky et al. 1979; Jendritzky 1990). In den späten 1990er Jahren wurde das Modell durch den Äquivalenztemperaturansatz ergänzt, der als „Gefühlte Temperatur“ bekannt ist und seitdem breite Anwendung findet (Staiger et al. 1997).

Angesichts der Begrenzungen bestehender Indizes wie PMV, PET (Physiologically Equivalent Temperature) und SET (Standard Effective Temperature) hinsichtlich ihrer Thermoregulationsmodelle (Jendritzky et al. 2007), schlug Höppe (1999) die Entwicklung eines umfassenderen „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI) vor. Der UTCI zielt auf eine und differenzierte Bewertung thermischer Belastungen ab, die die physiologischen und meteorologischen Einflussfaktoren des menschlichen Wärmehaushalts integriert. Entwickelt wurde das UTCI-Modell unter der International Society of biometeorology (ISB) und berücksichtigt die Anpassung der Bekleidungsisolation sowie eine Reduktion des Bekleidungswiderstands durch Wind und Bewegung.

### **Modellierung und Anwendung des UTCI**

Der UTCI basiert auf dem Konzept der Äquivalenttemperatur und kombiniert die Variablen Lufttemperatur ( $T_a$ ), Windgeschwindigkeit ( $v_{el}$ ), mittlere Strahlungstemperatur ( $T_{mrt}$ ) und Luftfeuchtigkeit ( $rH$ ,  $h_{usp}$ ), um die thermische Belastung umfassend zu bewerten.

Der UTCI basiert auf dem Konzept der Äquivalenttemperatur, das heißt, er stellt die Temperatur unter idealisierten Referenzbedingungen dar, die der tatsächlich empfundenen thermischen Belastung in einer bestimmten Situation entspricht. Die Referenzbedingungen sind so definiert, dass die Luftfeuchtigkeit bei 50 % liegt, kein Wind herrscht und die Strahlungstemperatur der Lufttemperatur entspricht. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass sich die Person mit einer Geschwindigkeit von 4 km/h bewegt (Jendritzky et al. 2007). Der UTCI übersetzt die kombinierte Wirkung der Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwin-

digkeit und Strahlung auf den menschlichen Körper in eine einzige Temperaturangabe, die das subjektiv empfundene thermische Empfinden beschreibt.

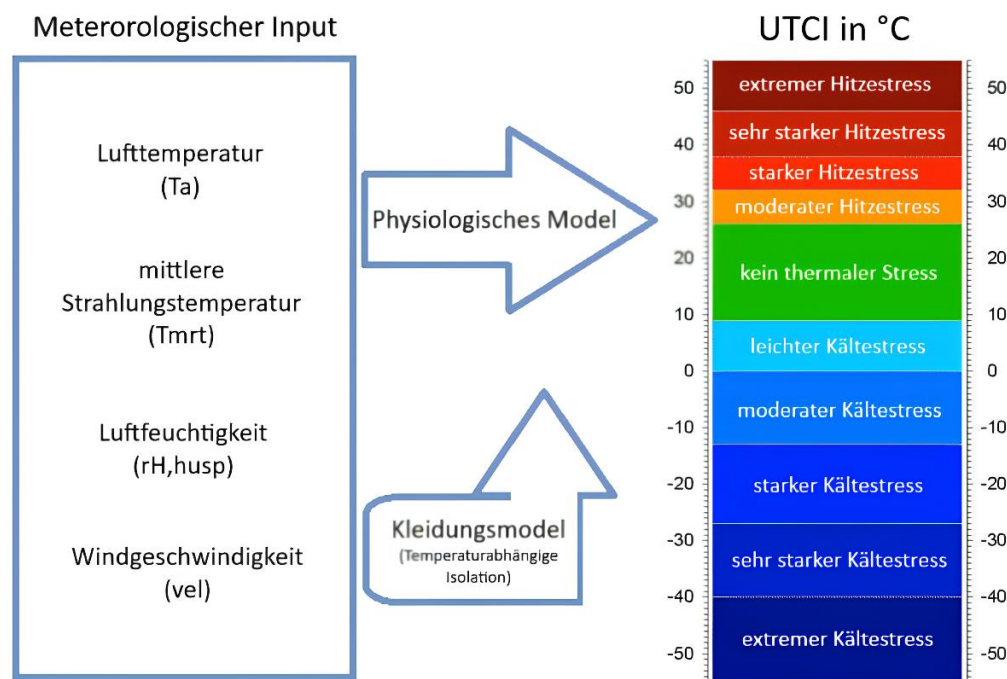


Abb. 1 UTCI Modell - Die Abbildung von Błażczyk et al. (2013) und Broede et al. (2013) wird hier in modifizierter Form dargestellt.

Das zugrundeliegende Modell für den UTCI umfasst verschiedene physiologische Reaktionen des Körpers auf Temperaturveränderungen. Zu diesen Anpassungsreaktionen gehören unter anderem Schwitzen, die Verengung oder Erweiterung der Blutgefäße sowie Zittern. Diese Mechanismen helfen dem Körper, Wärme zu gewinnen oder abzugeben (Fiala et al. 1999, 2001; Jendritzky et al. 2007). Aufgrund der Komplexität dieser Berechnungen und des hohen Rechenaufwands wird der UTCI in der Praxis mithilfe von vereinfachten, aber validierten Regressionsgleichungen berechnet (Jendritzky et al. 2009; Gasparrini et al. 2012).

### Die mittlere Strahlungstemperatur ( $T_{mrt}$ )

Ein zentraler Parameter für die Berechnung des UTCI ist die mittlere Strahlungstemperatur ( $T_{mrt}$ ). Die  $T_{mrt}$  repräsentiert die Temperatur einer idealisierten Umgebung, in der die Strahlungsbilanz der realen Umgebung entspricht. Anstelle der Messung von kurz- und langwelliger Strahlung, kann die  $T_{mrt}$  auch über die Globetemperatur ermittelt, die das Strahlungsklima eines Ortes annähernd erfasst. Damit liefert die  $T_{mrt}$  eine Grundlage für die Bewertung

des Strahlungseinflusses auf den menschlichen Körper und ist unverzichtbar für eine differenzierte Analyse thermischer Umweltbedingungen. Der Windchill-Effekt bei niedrigen Temperaturen und die verstärkte Belastung durch hohe Luftfeuchtigkeit bei Hitze verdeutlichen zudem, dass die Lufttemperatur allein nicht ausreicht, um die thermische Belastung umfassend zu bewerten.

## Standort

Das Schulungsgewächshaus befindet sich in der historischen Peter-Behrens-Halle (s. Bild 2), die in der Hussitenstraße 26-31 im Berliner Ortsteil Wedding gelegen ist. Die Halle wurde ursprünglich 1912 von Peter Behrens für die AEG als Hochspannungsfabrik entworfen und zählt heute zu den bekanntesten Beispielen der Industriearchitektur (Berlin Tourismus & Kongress GmbH o.J.). Mit einer Länge von 190 m ist sie die größte Versuchshalle der Technischen Universität Berlin. Die flexible Infrastruktur bietet vielseitige Nutzungsmöglichkeiten, darunter Experimente an großformatigen Bauteilen und Baukonstruktionen im Maßstab 1:1 (TU Berlin o.J.). Diese Eigenschaften machen die Halle zu einem idealen Standort für das Forschungsprojekt (s. Bild 3).



2 Peter-Behrens Halle von außen (Architekturbüro Creutzfeldt 2018).



3 Peter-Behrens Halle von innen (Achim Bleicher 2005).



## Messtechnik

Die BioMet-Stationen sind mit einer Vielzahl von Sensoren zur Erfassung zentraler Umweltparameter ausgestattet und wurden mithilfe von Arduino-Programmierung und 3D-gedruckten Gehäusen auf die spezifischen Anforderungen der Umgebung angepasst (s. Abb. 2). Zum Abgleich der CO<sub>2</sub>-Messungen wurden externe, kabellose Stationen (Aranet) integriert, die eine unabhängige Validierung der Daten ermöglichen.

### Aufbau der BioMet-Stationen

Die Gehäuse der BioMet-Stationen wurden mittels 3D-Druck gefertigt und auf die Anforderungen der Einsatzumgebung optimiert (s. Abb. 2). Die Stationen erfassen biometeorologische Parameter und integrieren mehrere spezialisierte Sensoren, die über einen ESP32-Controller gesteuert werden (s. Abb 3 – Abbildung des Schaltkreises).

- **Temperatur- und Feuchtemessungen:** Ein Sensor (Si7021) für Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit ist in einem externen Strahlenschutzgehäuse untergebracht. Das Gehäuse ist mit Schlitzen versehen, um eine natürliche Belüftung zu gewährleisten. Außerdem werden Sensoren vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt und ermöglichen somit weitgehend strahlungsunabhängige Messungen.
- **Globetemperatur-Messung:** Die Strahlungstemperatur wird oberhalb der Station über einen speziell präparierten Tischtennisball gemessen. Dieser ist mit schwarzer Farbe beschichtet und enthält ein Bohrloch zur Einführung des Temperatursensors (DS18B20), um die Strahlungseinwirkung zu erfassen.
- **Kohlenstoffdioxidensor:** Ein CO<sub>2</sub>-Sensor (MH-Z19C Infrarot-Gasmodul) nutzt das nichtdispersive Infrarot (NDIR) Prinzip zur Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Umgebungsluft.
- **UV- und Belichtungssensoren:** Löcher in der Gehäusedecke sorgen für ausreichende Lichteinstrahlung auf die UV-Sensoren (Veml6075) und den Beleuchtungsstärkesensor (BH1750), wodurch präzise Daten zur UV-Strahlung und Lichtintensität erfasst werden.
- **Echtzeit-Visualisierung:** Ein 2,7-Zoll-ePaper-Display (Waveshare) auf der Station visualisiert die erfassten Daten in Echtzeit und bietet dem Benutzer kontinuierliches Feedback.

Die Sensoren werden über einen ESP32-Mikrocontroller gesteuert, der die Messdaten mittels eines PHP-Skripts über WiFi an einen Server überträgt. Die Programmierung erfolgte in der Arduino-Umgebung auf Basis der Sprachen C und C++. Die Daten werden sowohl lokal gespeichert als auch auf der IoT-Plattform ThingSpeak gesichert, was eine kontinuierliche Überwachung, detaillierte Visualisierungen und umfassende Datenexportoptionen bietet.

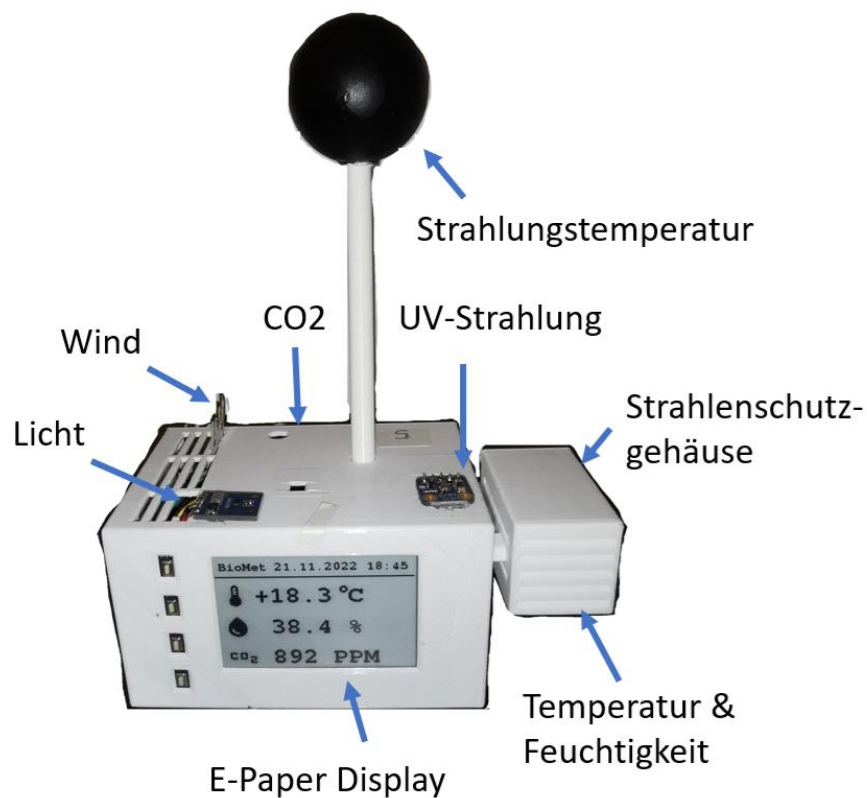


Abb. 2 BioMet Station mit Darstellung der Sensorik

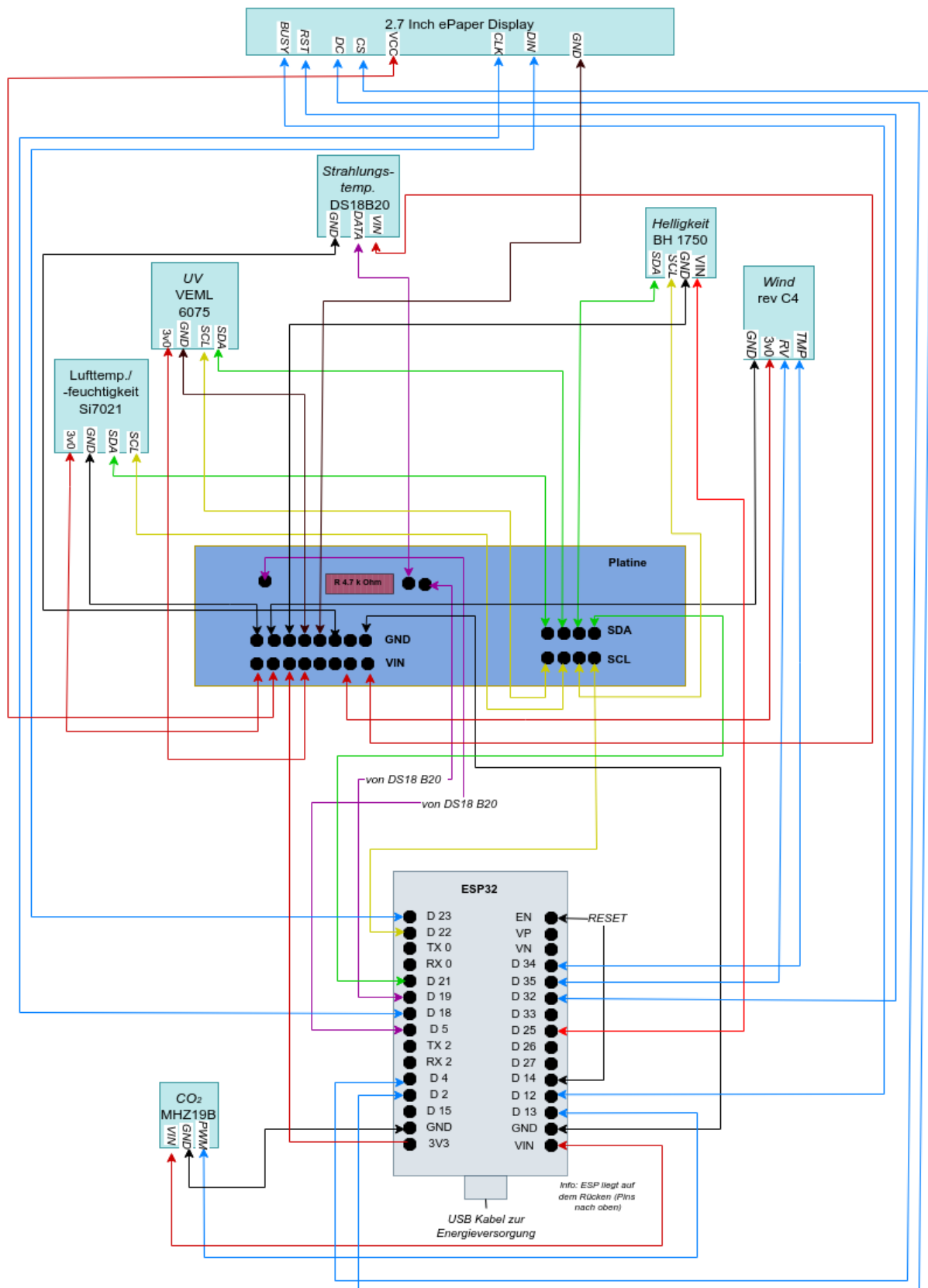


Abb. 3 Darstellung des Schaltkreises der BioMet Station

### **Steuerung des Luftaustausches**

Zur Regulierung der Luftqualität und der klimatischen Bedingungen im Gewächshaus sind Lüfter integriert, die bei Überschreitung definierter Schwellenwerte aktiviert werden. Die Lüftersteuerung erfolgt basierend auf folgenden Differenzen zwischen den Messwerten im Gewächshaus und dem angrenzenden Büroraum:

- **CO<sub>2</sub>-Konzentration:** 400 ppm
- **Lufttemperatur:** 8 °C
- **Relative Luftfeuchtigkeit:** 50 %

Sinken die Differenzen unter folgende Werte, deaktivieren sich die Lüfter automatisch:

- **CO<sub>2</sub>-Konzentration:** 100 ppm
- **Lufttemperatur:** 2 °C
- **Relative Luftfeuchtigkeit:** 10 %

Diese Schwellenwerte wurden festgelegt, um eine energieeffiziente Lüftung nur bei Bedarf zu gewährleisten.

### **Sensorspezifische Messgenauigkeit**

Die BioMet-Stationen sind auf eine Erfassungsrate von einer Minute pro Intervall eingestellt.

Die garantierten Messgenauigkeiten sind wie folgt:

- **Temperatur- und Feuchtigkeitssensor:**  $\pm 3$  % relative Luftfeuchtigkeit im Bereich von 0 bis 80 % RH und  $\pm 0,4$  °C im Bereich von -10 bis +85 °C.
- **CO<sub>2</sub>-Sensor:**  $\pm 50$  ppm plus 3 % des Messwertes.

### **Vergleichsmessung durch Aranet-Stationen**

Zur Validierung der CO<sub>2</sub>-Messungen der BioMet-Stationen wurden kabellose Aranet-Stationen als Referenzsensoren in das Messsystem integriert. Diese batteriebetriebenen Stationen erfassen die Werte in Intervallen von zehn Minuten und dienen der Qualitätssicherung und der Überprüfung der CO<sub>2</sub>-Messgenauigkeit im Gewächshaus.

Für die Entwicklung und Evaluierung des bioklimatischen Monitoringsystems wird ein Pilot-aufbau bestehend aus einem Gewächshaus und einem Büroraum realisiert. Dieser Untersuchungsraum ist, wie in Abb. 4a dargestellt, innerhalb der Peter-Behrens-Halle installiert. Beide Räume sind voneinander getrennt und gegenüber der Außenumgebung abgeschlossen, sodass kontrollierte mikroklimatische Bedingungen geschaffen werden können.

Zur Erfassung der thermischen und atmosphärischen Bedingungen werden BioMet-Stationen in den Bereichen „Büro“, „Gewächshaus“ sowie auf dem „Dach“ installiert.





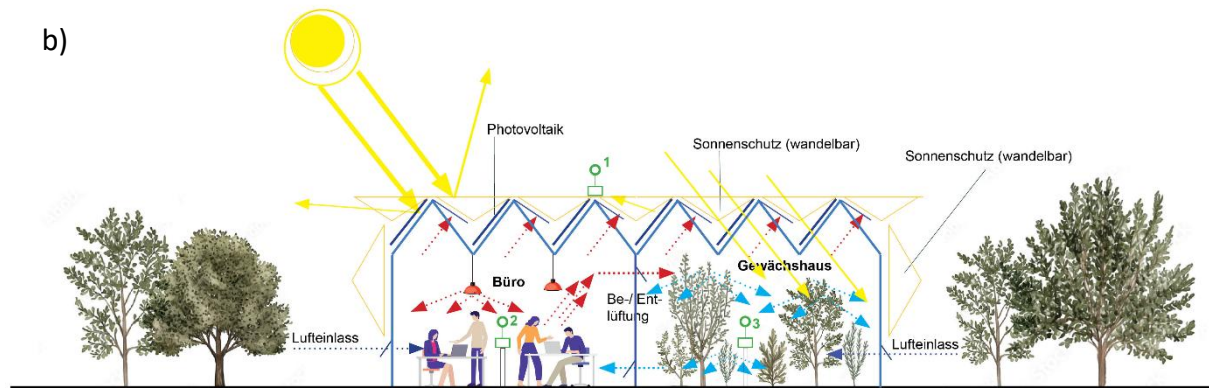


Abb. 4 Schematische Darstellung des Untersuchungsraumes und geplanter Anwendungsszenarien (Peissl und Schlaich 2025).  
a) Aktueller Pilotaufbau von Gewächshaus und Büroraum in der Peter-Behrens-Halle. b) Konzeptskizze möglicher zukünftiger Nutzungskonfigurationen im Außenbereich.

### Experimentbeschreibung:

Vom 25.06.2024 bis zum 28.06.2024 wurde eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Büro simuliert, indem eine  $\text{CO}_2$ -Gaskartusche bei geschlossenen Türen und Fenstern täglich zur Mittagszeit eingesetzt wurde. Dabei wurde ein  $\text{CO}_2$ -Wert von mindestens 1000 ppm erreicht, der den Schwellenwert zur Aktivierung der Lüftersteuerung überschritt. Nach Auslösung der Lüfterverteilung wurde das Gas gleichmäßig in beiden Räumen verteilt, um die Abbauprozesse und Verteilungsdynamik der erhöhten  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu untersuchen.

## Methoden zur Qualitätssicherung und Visualisierung

In diesem Kapitel werden die Datenqualität und die Visualisierungstechniken zur Analyse der bioklimatischen und  $\text{CO}_2$ -Messdaten des Schulungsgewächshauses beschrieben. Die Auswertung gliedert sich in zwei Abschnitte: den bioklimatischen Bereich und den  $\text{CO}_2$ -Bereich.

### Datenqualität und Einflussfaktoren

Um die Qualität der erhobenen Daten sicherzustellen, wurden umfassende Datenbereinigungsmaßnahmen durchgeführt. Potenzielle Ausreißer, die auf fehlerhafte Messungen oder unplausible Werte hindeuteten, wurden zunächst automatisiert gefiltert und anschließend

manuell auf Plausibilität geprüft. Die angewandten Filtermethoden variierten dabei je nach statistischer Verteilung der Variablen.

Für normalverteilte Variablen wie die Temperatur wurden extreme Ausreißer anhand des Interquartilsabstands (IQR)  $\times 1,5$  auf Monatsbasis gefiltert, um Werte außerhalb des erwarteten Bereichs zu identifizieren. Bei schiefen Verteilungen, wie der Beleuchtungsstärke oder  $\text{CO}_2$ , wurde stattdessen eine percentil-basierte Filterung auf Monatsbasis angewendet, wobei die obersten 5 % (95. Perzentil) entfernt wurden. Alle gefilterten Datenpunkte wurden abschließend manuell überprüft, um eine hohe Plausibilität der bereinigten Datensätze zu gewährleisten.

Das Schulungsgewächshaus-Mock-Up ist in der Peter-Behrens-Halle (s. [Image 2](#)) installiert, wodurch die Messungen größtenteils von äußeren Witterungseinflüssen abgeschirmt sind. Jedoch ist zu beachten, dass zur Gewährleistung der Belüftung und Pflanzenpflege Türen und Fenster regelmäßig geöffnet wurden. Diese periodischen Öffnungen stellen eine zusätzliche Einflussvariable dar, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss, da sie zu unkontrollierten Schwankungen der  $T_a$ , Hum und  $\text{CO}_2$ -Konzentration führen können. Um die Feuchtigkeit in der Luft unabhängig von Temperatur und Luftdruck in der Analyse zu berücksichtigen, wird der Wasserdampfgehalt, auch spezifische Luftfeuchtigkeit (husp) genannt, berechnet.

### Visualisierung und Analyse der bioklimatischen Messungen

Zur Analyse der bioklimatischen Messungen wurden mehrere Visualisierungsmethoden verwendet, um die Dynamiken und Verteilungen der verschiedenen Umweltparameter darzustellen:

- **Boxplots:** Diese Diagramme bieten eine Übersicht über die Wertebereiche und die Verteilung der Messwerte für  $T_a$ ,  $T_{mrt}$ , husp und UTCI in den unterschiedlichen Räumen. Sie visualisieren Extremwerte, Median und Streuung der Daten und erlauben so einen direkten Vergleich zwischen den Beobachtungsräumen.
- **Isoplethendiagramme:** Diese Diagramme visualisieren die zeitlichen und räumlichen Differenzen spezifischer Variablen zwischen den Räumen „Gewächshaus“ und „Büro“.

Sie verdeutlichen insbesondere die Beziehungen zwischen  $T_a$ , UTCI und  $h_{usp}$  und ermöglichen so eine differenzierte Analyse der Variabilität dieser Parameter.

- **Exemplarische Zeitreihendiagramm zu verschiedenen Szenarien:** Zur Veranschaulichung der Schwankungen der bioklimatischen Bedingungen in den verschiedenen Räumen bei verschiedenen Szenarien wurden Zeitreihen erstellt. In der ersten Periode vom 01.06. bis zum 06.06. waren die Räume nach außen hin geöffnet. In der zweiten Periode vom 25.06. bis 30.06. wurden die Räume geschlossen gehalten. Lediglich die auf Grenzwertüberschreitung basierende Lüftersteuerung zwischen den Räumen war aktiv. Diese Verläufe erlauben detaillierte Einblicke in die täglichen Dynamiken und die Unterschiede zwischen den Räumen, insbesondere in Bezug auf  $h_{usp}$ ,  $T_a$  und UTCI.

### Visualisierung und Analyse der CO<sub>2</sub>-Messungen

Die CO<sub>2</sub>-Messungen wurden gezielt für bestimmte Zeiträume ausgewertet, in denen Experimente durchgeführt wurden. Dabei wurden folgende Szenarien betrachtet:

- **Exemplarische Zeitreihendiagramme bei Experimenten:** Für ausgewählte Zeiträume, in denen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gezielt durch Experimente beeinflusst wurden, wurden die Ergebnisse separat visualisiert. Diese Darstellungen dienen der Analyse des CO<sub>2</sub>-Abbaus in den unterschiedlichen Räumen unter spezifischen Umweltbedingungen.
- **Gemittelte Tagesverläufe ohne Störung:** Zur Analyse der natürlichen CO<sub>2</sub>-Dynamik ohne externe Eingriffe wurde der gemittelte Tagesverlauf für einen Zeitraum ohne gezielte Experimente dargestellt. Diese Darstellung gibt Aufschluss über die ungestörten CO<sub>2</sub>-Schwankungen in den Räumen und bildet eine Referenz für die weitere Analyse.

## Auswertung – Bioklima

### Boxplots

Die saisonale Analyse zeigt deutliche Unterschiede in den thermischen Bedingungen der Innenräume (s. Abb. 5). Im Frühling, Sommer und Winter liegen die Lufttemperaturen im Ge-

wächshaus geringfügig unter denen im Büro. Auffällig ist, dass die Extremwerte im Gewächshaus insgesamt niedriger ausfallen, was durch die Maximaltemperaturen in Tabelle 1 bestätigt wird. Der UTCI, der unter anderem durch die Strahlungstemperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflusst wird, erreicht im Sommer jedoch höhere Werte im Gewächshaus als im Büro. Die UTCI-Werte lassen sich, wie in Abb. 1 dargestellt, in Kategorien des Hitzestresses einordnen, wobei Werte ab 32 °C als starker Hitzestress klassifiziert werden.

Im Frühling, in dem die Räume durch geöffnete Fenster nach außen durchlüftet wurden, zeigt die UTCI eine geringere Belastung im Gewächshaus im Vergleich zum Büro. Im Gewächshaus werden Maximaltemperaturen von 31,9 °C gemessen, was in die Kategorie des moderaten Hitzestresses fällt. Im Gegensatz dazu erreichen das Büro und das Dach Werte von 33,5 °C bzw. 33,6 °C, womit die Schwelle zum starken Hitzestress überschritten wird (s. Abb 1).

Im Sommer treten vermehrt UTCI-Werte im Bereich des starken Hitzestresses in allen Räumen auf. Während dieser Zeit wurden die Fenster und Türen des Gewächshauses zeitweise geschlossen, wodurch eine Durchlüftung nach außen blockiert war (s. Abb. 4). Besonders hervorzuheben sind die Maximalwerte des UTCI's im Gewächshaus bis zu 48,6 °C erreichen (s. Abb. 5) und in die Kategorie des extremen Hitzestresses fallen, während die Maximalwerte der Ta bei 36°C liegen (s. Abb. 4).

Zu beachten ist, dass das Gewächshaus, wie in Abb. 6 ersichtlich, im Vergleich zu den Bereichen Dach und Büro durchgehend höhere Werte der spez. Luftfeuchtigkeit aufweist. Die größten Unterschiede in der Luftfeuchtigkeit sind im Sommer und Herbst zu beobachten. Diese erhöhte Feuchtigkeit beeinflusst die UTCI-Werte und trägt zur Ausprägung des extremen Hitzestresses im Gewächshaus bei. Auch wird während der Herbstmonate in jedem Raum starker Hitzestress mit Werten über 32 °C ermittelt. Allerdings liegen die maximalen Werte im Gewächshaus geringfügig unter denen im Büro und des Dachs (s. Abb. 5d). Bei einer Gegenüberstellung der Werte der mittleren Strahlungstemperatur und der spez. Luftfeuchtigkeit mit dem UTCI wird ersichtlich, dass die Luftfeuchtigkeit einen entscheidenden Einfluss auf die hohen Werte des UTCI im Gewächshaus ausübt.

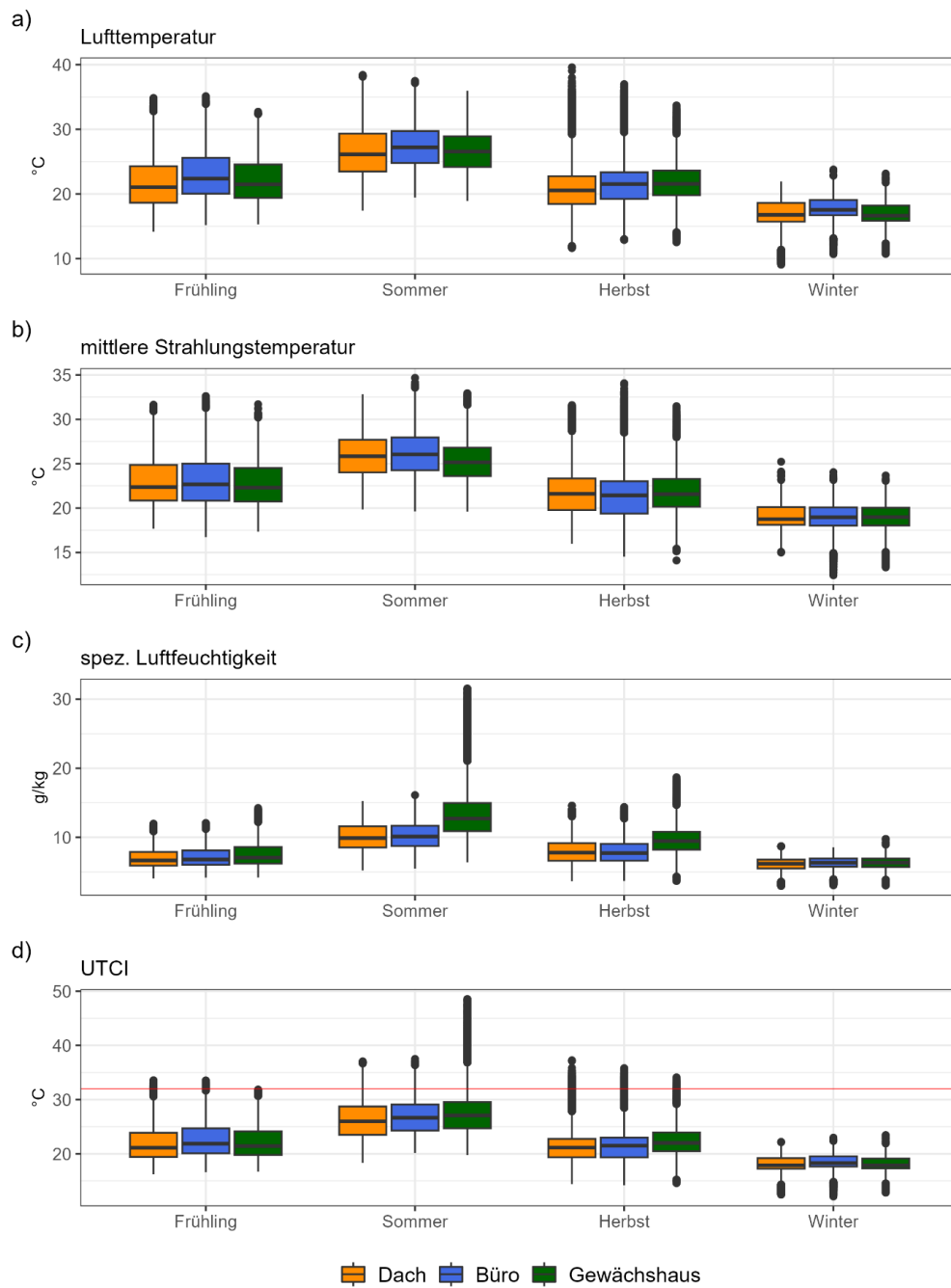


Abb. 5 Boxplot zur Analyse der Werte Verteilung nach Jahreszeiten. Die rote Linie bei d) kennzeichnet die Grenze zwischen moderatem - und starkem Hitzestress

| Variable:     | UTCI  |      |      | Temperatur |      |      | Spez. Luftfeuchtigkeit |      |      |
|---------------|-------|------|------|------------|------|------|------------------------|------|------|
| Einheit:      | in °C |      |      | in °C      |      |      | in g/kg                |      |      |
| Raum:         | D     | B    | GH   | D          | B    | GH   | D                      | B    | GH   |
| Min           | 12,5  | 12,1 | 12,8 | 9,1        | 10,7 | 10,8 | 3,0                    | 3,1  | 3,0  |
| Mean          | 22,3  | 22,8 | 23,2 | 22,0       | 23,0 | 22,7 | 7,8                    | 8,0  | 9,5  |
| Max           | 37,3  | 37,5 | 48,6 | 39,6       | 37,5 | 36,0 | 15,3                   | 16,1 | 31,6 |
| 95. Percentil | 30,4  | 30,4 | 31,1 | 31,4       | 31,3 | 30,3 | 12,1                   | 12,2 | 16,4 |

*Tabelle 1 Min, Mean, Max Werte und Werte innerhalb der 95. Percentile der Variablen UTCI, Temperatur, Spez. Luftfeuchtigkeit über ein Jahr 10/23 - 09/24 mit 10-minütlichen Daten. D = Dach, B = Büro, GH = Gewächshaus.*

### **Isoplethendiagramm**

Die Analyse der Isoplethendiagramme verdeutlicht die Unterschiede der bioklimatischen Variablen zwischen den Innenräumen (s. Abb. 6). Bei Betrachtung der temperaturbedingten Differenzen nach Tages- und Jahreszeit lassen sich spezifische Muster identifizieren. Im Frühling zeigt das Gewächshaus in den Nachmittags- und Abendstunden zwischen 15 und 20 Uhr sowie in den Morgenstunden von 7 bis 9 Uhr eine kühlere Temperatur mit Differenzen von bis zu -3°C. In der Nacht sind die Temperaturen um bis zu -2,5°C niedriger. Ein weiteres auffälliges Muster zeigt sich in den Mittagsstunden zwischen 10 und 12 Uhr, in denen die Temperatur, abgesehen von wenigen Ausnahmen, keine signifikanten Abweichungen oder nur geringfügig niedrigere Werte bis zu -1°C aufweist.

Im Sommer nimmt dieser kühlende Effekt des Gewächshauses leicht ab. In den Nachmittagsstunden von 17 bis 19 Uhr sind Temperaturdifferenzen von bis zu -3°C zwar noch erkennbar, jedoch auf kürzere Zeiträume beschränkt. Nachts bleibt das Gewächshaus weitgehend minimal kühler mit Differenzen knapp unter 0°C, während die Morgenstunden zwischen 7 und 9 Uhr gelegentlich um bis zu 1°C wärmer sind. Im Herbst verliert dieser Kühlungseffekt in den Nachmittagsstunden ab Oktober an Stärke und setzt im Winter ab Mitte Dezember erneut ein, mit Differenzen von etwa -1°C.



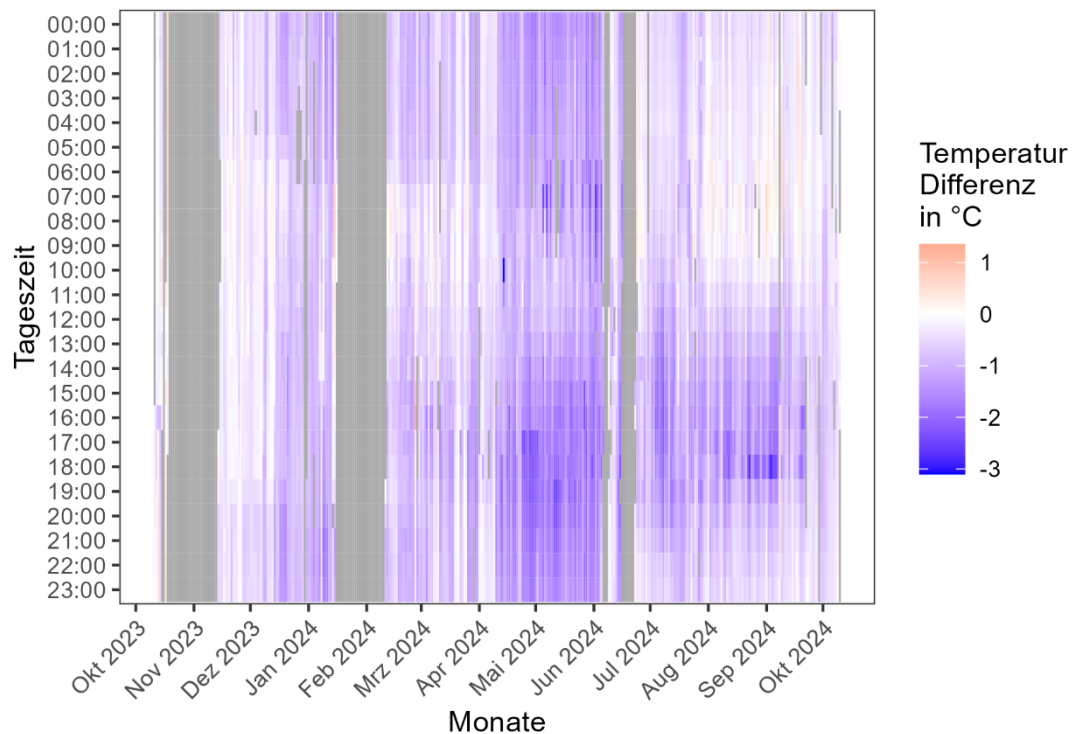


Abb. 6 Isoplethendiagramm – stündliche Differenz der Lufttemperatur in °C nach Tageszeit zwischen dem Gewächshaus und dem Büro über ein Jahr.

Wegen Maßnahmen zur Qualitätssicherung und technikbedingten Ausfällen sind die Zeiträume von Mitte Oktober bis Mitte November, von Mitte Januar bis Anfang Februar sowie eine Woche Ende Juni ohne biometeorologische Daten. Bei der Interpretation der Differenzen ist zudem die sensorspezifische Messungenauigkeit von  $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$  zu berücksichtigen, so dass Differenzwerte bis zu  $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$  auf mögliche Messunsicherheiten zurückzuführen sind.

### Exemplarische Zeitreihendiagramm zu verschiedenen Szenarien

Ein Vergleich der beiden Zeiträume verdeutlicht die Abhängigkeit der bioklimatischen Parameter von der Durchlüftung nach außen (s. Abb. 7, 9). In der ersten Periode, in der die Räume nach außen durchlüftet wurden, zeigt das Gewächshaus trotz einer dauerhaft geringfügig höheren spezifischen Luftfeuchtigkeit im Vergleich zum Büro überwiegend niedrigere UTCI-Werte (s. Abb. 7a, c). Die Lufttemperatur ist im Gewächshaus durchgehend etwas niedriger als im Büro (s. Abb. 7b). Zudem wird ein zeitlicher Versatz zwischen den Temperaturverläufen der Innenräume und des Dachs erkennbar: Bei geöffneter Belüftung beträgt dieser Versatz etwa 10 Minuten für die Maximaltemperaturen (Dach zu Büro) und bis zu 2 Stunden für die Minimaltemperaturen (Dach zu Büro) (s. Abb. 7b).

Im zweiten Zeitraum, in dem die Räume geschlossen blieben, ändert sich dieses Muster deutlich. Das Gewächshaus weist eine durchgängig signifikant höhere spezifische Luftfeuchtigkeit im Vergleich zu den anderen Räumen auf. Auffällige negative Ausschläge in der Luftfeuchtigkeit zwischen dem 26. und 28. Juni lassen sich auf eine kurzzeitige Öffnung der Türen zur Pflanzenbewässerung zurückführen (s. Abb. 8a). Die Lufttemperatur bleibt im Gewächshaus dennoch überwiegend etwas niedriger als im Büro (s. Abb. 8b). Der zeitliche Versatz zwischen den Temperaturverläufen der Räume und dem Dach ist in dieser Periode ausgeprägter, mit etwa 2 Stunden und 40 Minuten für die Maximaltemperaturen und 1 Stunde und 30 Minuten für die Minimaltemperaturen (Dach zu Büro) (s. Abb. 8b). Diese Verzögerungen bieten Einblicke in die Isolationswirkung der Gläser.

Betrachtet man den UTCI im geschlossenen Szenario, zeigt das Gewächshaus durchgängig höhere Werte im Vergleich zum Büro, was auf die hohe Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus zurückzuführen ist. Auch hier treten zwischen dem 26. und 28. Juni negative Spitzen auf, die mit den Schwankungen der spezifischen Luftfeuchtigkeit korrelieren und den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf den UTCI unterstreichen (s. Abb. 8c).

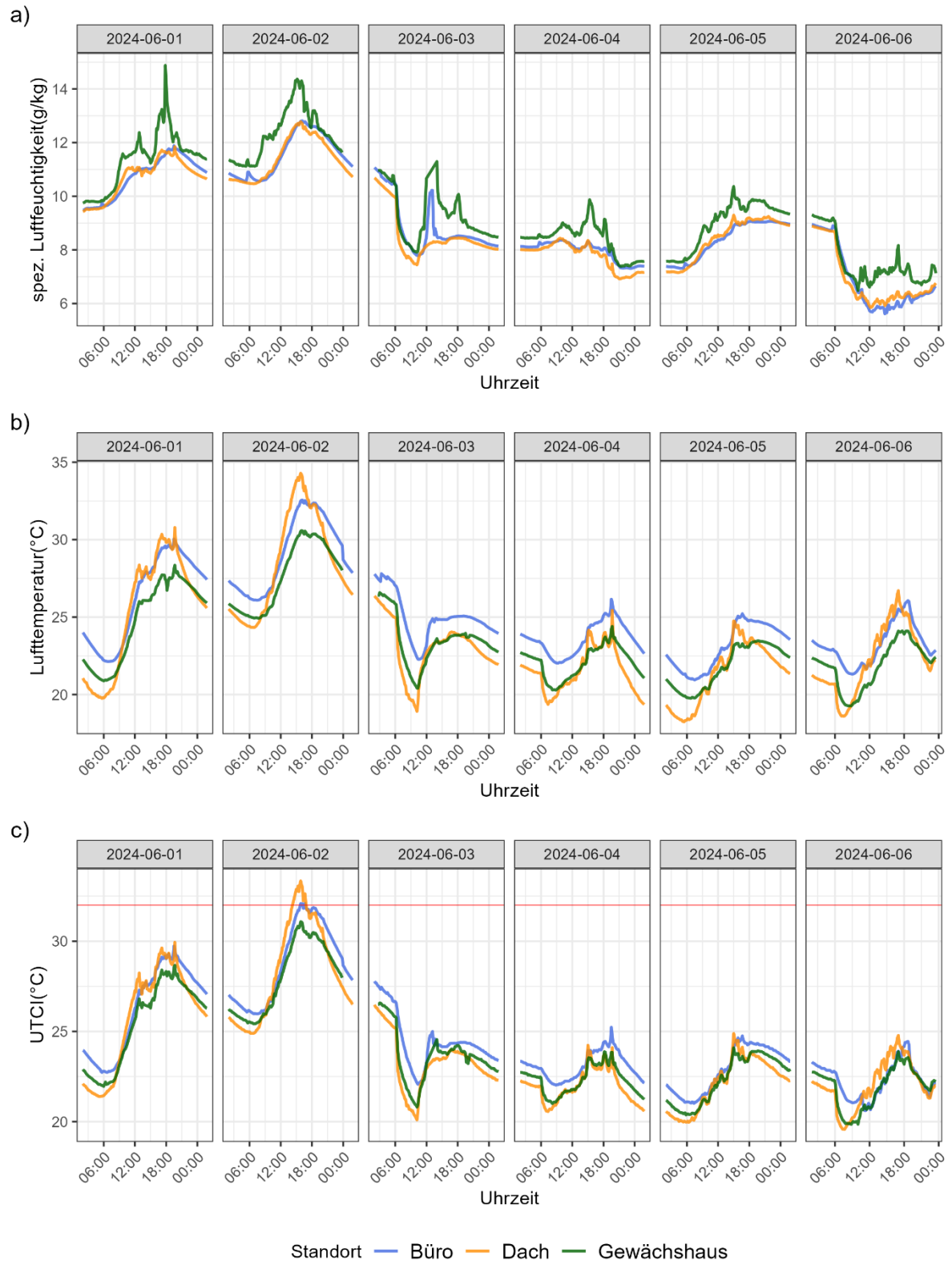


Abb. 7 Zeitreihenplot der BioMet Stationen in den drei Räumen. Dargestellt werden die Variablen a) spez. Luftfeuchtigkeit, b) Lufttemperatur und c) UTCI. Die Räume waren in dieser Periode nach außen hin **geöffnet**. Die rote Linie bei c) kennzeichnet die Grenze zwischen moderatem - und starkem Hitzestress.

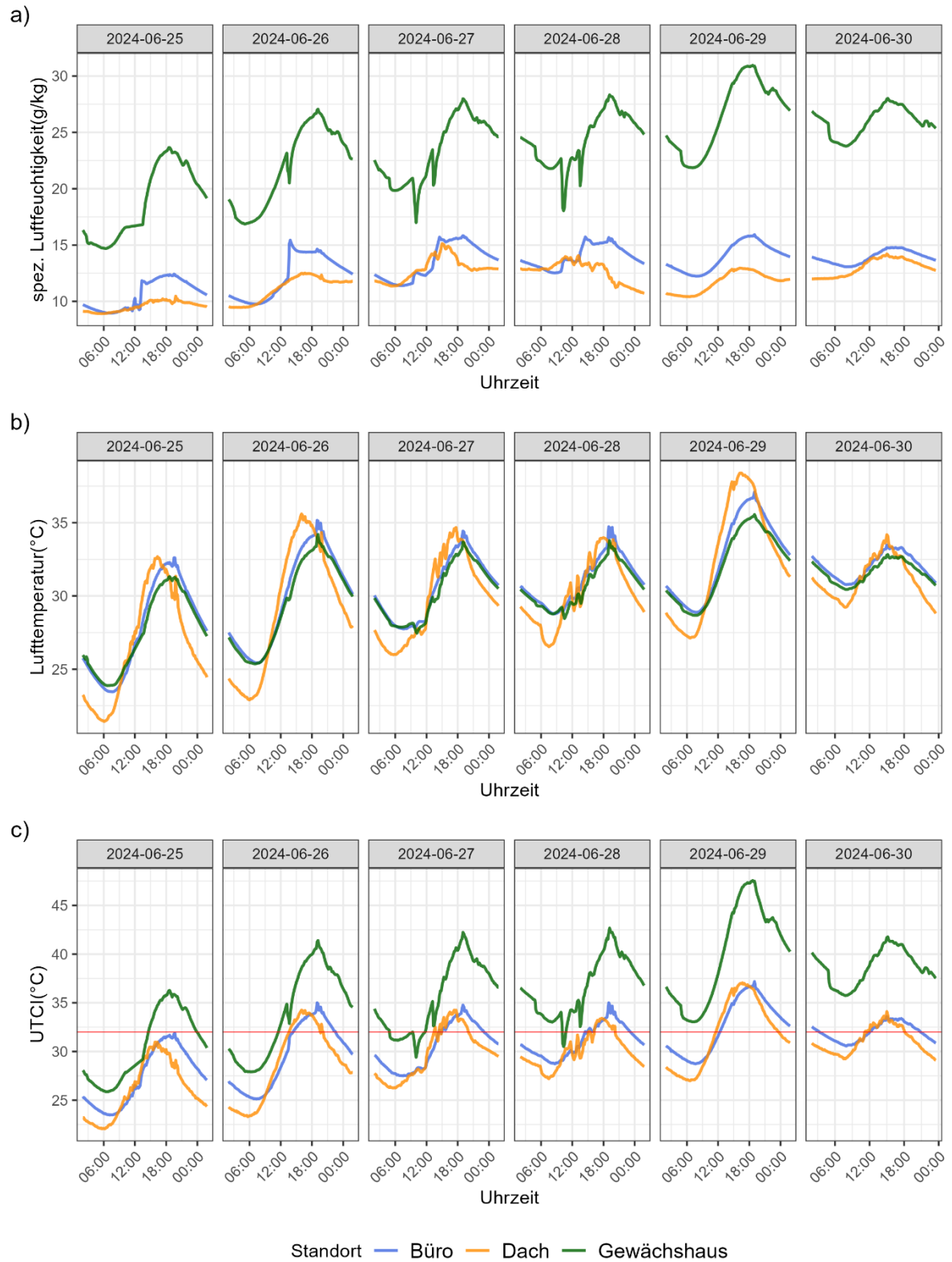


Abb. 8 Zeitreihenplot der BioMet Stationen in den drei Räumen. Dargestellt werden die Variablen a) spez. Luftfeuchtigkeit, b) Lufttemperatur und c) UTCI. Die Räume waren in dieser Periode nach außen hin **geschlossen**. Die rote Linie bei c) kennzeichnet die Grenze zwischen moderatem - und starkem Hitzestress.

## Auswertung – CO<sub>2</sub>

### Exemplarische Zeiträume während des Experiments:

Nach der Einbringung des Gases stieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Büro, wie in Abbildung 9 (blaue Linie) dargestellt, signifikant an. Mit der Aktivierung der Lüfter verbreitete sich das Gas auch im Gewächshaus (s. Abb. 9 - grüne Linie), was zu einem deutlichen Anstieg der Konzentration in diesem Raum führte. An den ersten beiden Experimenttagen, dem 25.06. und 26.06., konnte im Gewächshaus eine höhere CO<sub>2</sub>-Abbaurrate festgestellt werden. Am 27.06. hingegen nahm die Konzentration im Gewächshaus nur geringfügig schneller ab als im Büro.

Dieser Unterschied lässt sich auf die Beleuchtungsstärke (s. Abb. 9 - hellgrüne Linie) zurückführen: Während der ersten beiden Tage war die Lichtintensität höher und weniger stark schwankend. Ein Vergleich der mittleren Beleuchtungsstärke (s. Tabelle 2) über die Experimenttage hinweg unterstützt diese Beobachtung. Die beschleunigte CO<sub>2</sub>-Abbaurrate im Gewächshaus scheint daher vor allem unter konstanten, hellen Lichtbedingungen wirksam zu sein.

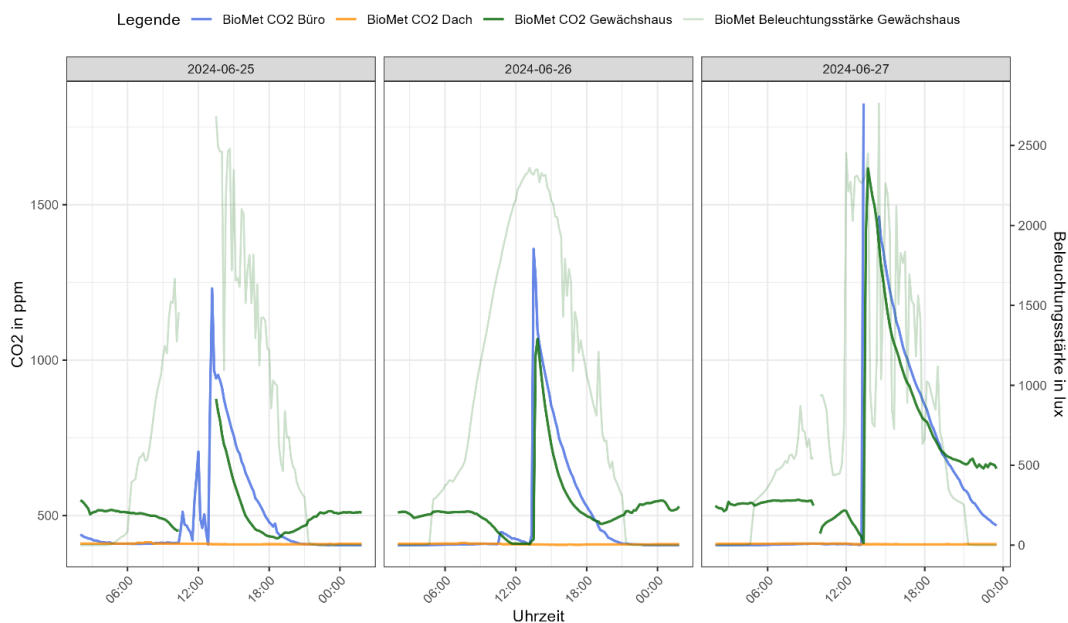


Abb. 9 Zeitreihendiagramm der **BioMet** Stationen – CO<sub>2</sub>-Konzentration der Räume Büro, Dach, Gewächshaus (Y-Achse, links) und die Beleuchtungsstärke im Gewächshaus (Y-Achse, rechts) in 10min Intervallen.

Ein Vergleich der BioMet-Daten mit den Aranet-Daten zeigt, dass beide Messsysteme denselben Trend der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen abbilden, wobei die Abbauraten in den Aranet-Daten

stärker ausgeprägt erscheinen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Messintervalle der Systeme nicht synchronisiert waren: Die Aranet-Stationen erfassen Messungen in 10-Minuten-Intervallen (s. Abb. 10), während die BioMet-Stationen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit einer höheren zeitlichen Auflösung von 1-Minuten-Intervallen aufzeichnen. Zur Vergleichbarkeit wurden die BioMet-Daten in der Datenprozessierung auf 10-Minuten-Werte aggregiert.

Diese Aggregation der BioMet-Daten führt zu einer geglätteten Darstellung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die punktuelle Ausreißer vermeidet, wie sie in den Aranet-Daten auftreten können, wenn eine Aranet-Messung zufällig in dem Moment erfolgt, in dem CO<sub>2</sub> im Experiment eingetragen wird. Dadurch kann die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Aranet-Daten kurzfristig unrealistisch hoch erscheinen, während die BioMet-Daten aufgrund der 10-Minuten-Aggregation eine realistischere Glättung der Konzentrationsverläufe darstellen.

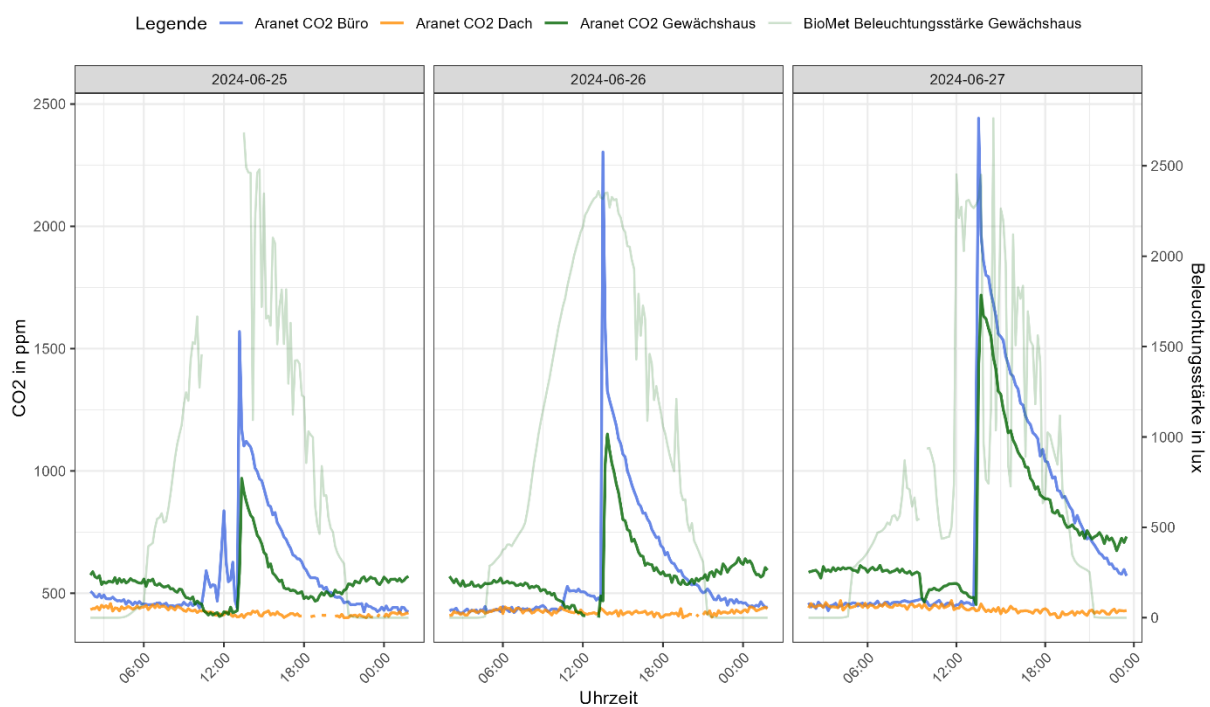


Abb. 10 Zeitreihendiagramm der **Aranet** Stationen – CO<sub>2</sub>-Konzentration der Räume Büro, Dach, Gewächshaus (Y-Achse, links) und die Beleuchtungsstärke im Gewächshaus (Y-Achse, rechts) in 10min Intervallen.

| Datum      | Mittlere Beleuchtungsstärke |
|------------|-----------------------------|
| 25.06.2024 | 1296                        |



|            |      |
|------------|------|
| 26.06.2024 | 1482 |
| 27.06.2024 | 1063 |

Tabelle 2 Mittlere Beleuchtungsstärke für den Zeitraum des CO<sub>2</sub>-Experiments

### Gemittelte Tagesverläufe ohne Störung:

Ohne zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Eintrag im Büro zeigt, wie in Abb. 12 visualisiert, die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Räume ein charakteristisches Muster. Während der Dunkelphase von abends bis in die frühen Morgenstunden, in denen keine Photosynthese stattfindet, betreiben die Pflanzen Photorespiration und veratmen Sauerstoff, wobei CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Im Zeitraum vom 01.07. bis 15.07. wurden dabei typische Schwankungen von etwa  $\pm 45$  ppm beobachtet (s. Abb. 11).

Mit Beginn der Photosynthese durch Lichteinstrahlung wird das nachts freigesetzte CO<sub>2</sub> durch die Pflanzen aufgenommen, wobei auch CO<sub>2</sub> durch Undichtigkeiten im Raum entweicht. Der durchschnittliche Tiefpunkt des CO<sub>2</sub>-Gehalts in diesem Zeitraum wird um 15 Uhr erreicht (s. Abb. 11). Sinkt die Beleuchtungsstärke gegen Abend (s. Abb. 9), erhöht sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration entsprechend. Die Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Werte in den Räumen Dach und Büro lassen sich auf Arbeitsaktivitäten in der Peter-Behrens-Halle zurückführen.

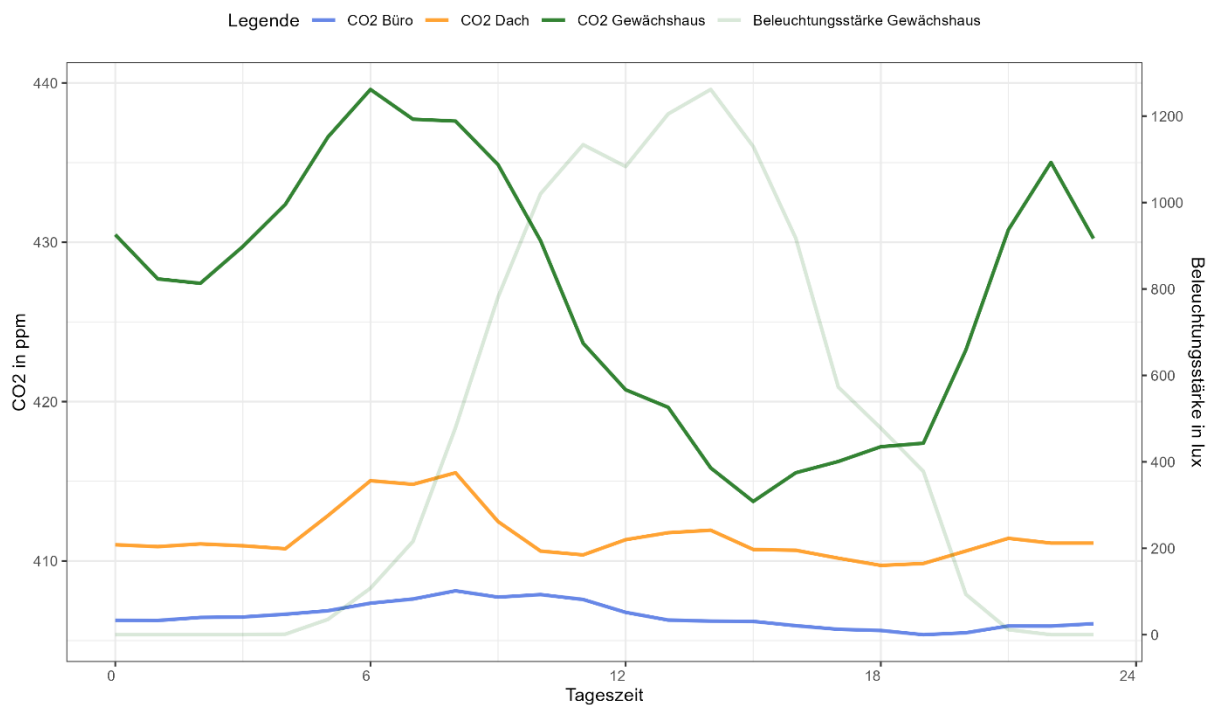


Abb. 11 Zeitreihendiagramm **BioMet** – Gemittelter Tagesverlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Räume Büro, Dach, Gewächshaus (Y-Achse, links) und die Beleuchtungsstärke im Gewächshaus (Y-Achse, rechts) über den Zeitraum vom 01.07.-15.07.2024. Beispielhafter Zeitraum mit Durchlüftung der Räume ohne Experimente oder externe Störungsfaktoren.

## Erkenntnisse

Unter Berücksichtigung bestimmter Voraussetzungen ist eine symbiotische Nutzung der beiden Räume realisierbar. Zum einen führt die erhöhte Luftfeuchtigkeit im Gewächshaus zu Situationen mit erhöhtem Hitzestress, zum anderen wird die Lufttemperatur durch Transpiration gekühlt. Ein Austausch der trockenen Luft könnte folglich zu einer Verbesserung der thermischen Behaglichkeit beitragen. Als potenzielle Lösungsansätze können hydrophobe gaspermeable Membranen in Erwägung gezogen werden. Ebenso kann eine symbiotische Nutzung zur Verbesserung der Luftqualität beitragen. Bei erhöhter Helligkeit sind höhere Abbauraten von CO<sub>2</sub> im Gewächshaus zu beobachten. Dabei ist die Photorespiration von Pflanzen bei Dunkelheit zu berücksichtigen, was in bestimmten Wintermonaten in bestimmten Breitengraden zu einer Verringerung der Luftqualität führen kann.

## Grenzen der Messungen

Bei der Interpretation der Messergebnisse sind verschiedene Einschränkungen zu berücksichtigen:

- **Fehleranfälligkeit der Low-Cost-Sensoren:** Die eingesetzten kostengünstigen Sensoren weisen eine gewisse Fehleranfälligkeit auf, die die Genauigkeit der Messdaten beeinträchtigen kann.
- **Staubbelastung:** Der Staub in der Umgebung kann die Sensoren beeinträchtigen und möglicherweise die Messgenauigkeit verringern.
- **Einfluss der Bewässerung:** Die regelmäßige Bewässerung der Pflanzen führt zu vorübergehenden Störungen in den Messwerten, insbesondere durch die Belüftung, die während der Bewässerung stattfindet.
- **Undichte Räume:** Die Versuchsräume sind nicht vollständig abgedichtet, was zu unkontrollierten Fluktuationen der Parameter durch Luftaustausch mit der Umgebung führen kann.
- **Lage des Mock-Ups in einer Halle:** Da das Schulungsgewächshaus-Mock-Up innerhalb der Peter-Behrens-Halle aufgestellt ist, können externe Einflüsse wie Temperatur-,

Luftfeuchtigkeits- und CO<sub>2</sub>-Schwankungen sowie Aktivitäten in der Halle die Messwerte beeinflussen.

# Literaturverzeichnis

Achim Bleicher (2005): Peter-Behrens-Halle-innen. Online verfügbar unter <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Peter-Behrens-Halle-innen-2005.JPG>, zuletzt aktualisiert am 20.11.2024, zuletzt geprüft am 20.11.2024.

Architekturbüro Creutzfeldt (2018): GMA-b13-Peter Behrens Halle-1200. Online verfügbar unter <https://creutzfeldt.eu/umbau-industriehalle/gma-b13-peter-behrens-halle-1200/>, zuletzt aktualisiert am 19.11.2024, zuletzt geprüft am 19.11.2024.

Åström, Daniel Oudin; Forsberg, Bertil; Rocklöv, Joacim (2011): Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: a review of recent studies. In: *Maturitas* 69 (2), S. 99–105. DOI: 10.1016/j.maturitas.2011.03.008.

Berko, Jeffrey; Ingram, Deborah D.; Saha, Shubhayu; Parker, Jennifer D. (2014): Deaths attributed to heat, cold, and other weather events in the United States, 2006-2010. In: *National health statistics reports* (76), S. 1–15.

Berlin Tourismus & Kongress GmbH (o.J.): AEG am Humboldthain. Online verfügbar unter <https://www.visitberlin.de/de/aeg-am-humboldthain>, zuletzt aktualisiert am 20.11.2024, zuletzt geprüft am 20.11.2024.

Bobb, Jennifer F.; Obermeyer, Ziad; Wang, Yun; Dominici, Francesca (2014): Cause-specific risk of hospital admission related to extreme heat in older adults. In: *JAMA* 312 (24), S. 2659–2667. DOI: 10.1001/jama.2014.15715.

Fiala, D.; Lomas, K. J.; Stohrer, M. (1999): A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. In: *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 87 (5), S. 1957–1972. DOI: 10.1152/jappl.1999.87.5.1957.

Fiala, D.; Lomas, K. J.; Stohrer, M. (2001): Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. In: *International journal of biometeorology* 45 (3), S. 143–159. DOI: 10.1007/s004840100099.

Fiala, Dusan; Havenith, George; Bröde, Peter; Kampmann, Bernhard; Jendritzky, Gerd (2012): UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. In: *International journal of biometeorology* 56 (3), S. 429–441. DOI: 10.1007/s00484-011-0424-7.

Gasparrini, Antonio; Guo, Yuming; Hashizume, Masahiro; Lavigne, Eric; Zanobetti, Antonella; Schwartz, Joel et al. (2015): Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. In: *Lancet (London, England)* 386 (9991), S. 369–375. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0.

Gosling, Simon N.; Lowe, Jason A.; McGregor, Glenn R.; Pelling, Mark; Malamud, Bruce D. (2009): Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. In: *Climatic Change* 92 (3-4), S. 299–341. DOI: 10.1007/s10584-008-9441-x.

Höppe, P. (1999): The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. In: *International journal of biometeorology* 43 (2), S. 71–75. DOI: 10.1007/s004840050118.

Jendritzky, Gerd (1990): Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen: fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell. Online verfügbar unter <https://scholar.google.com/citations?user=j9zfenmaaaaj&hl=de&oi=sra>.

Jendritzky, Gerd; Bröde, Peter; Fiala, Dusan; Havenith, George; Weihs, P.; Batchvarova, E.; Dedear, R. (2009): Der Thermische Klimaindex UTCI. In: *Klimastatusbericht*, S. 96–102.

Jendritzky, Gerd; Fiala, Dusan; Havenith, G.; Koppe, C.; Laschewski, Gudrun; Staiger, H.; Tinz, Birger (2007): Thermische umweltbedingungen [The thermal environment]. Online verfügbar unter [https://repository.lboro.ac.uk/articles/journal\\_contribution/Thermische\\_umweltbedingungen\\_The\\_thermal\\_environment\\_/9348476](https://repository.lboro.ac.uk/articles/journal_contribution/Thermische_umweltbedingungen_The_thermal_environment_/9348476).

Jendritzky, Gerd; Sönning, W.; Swantjes, HJ (1979): Ein objektives Bewertungsverfahren zur Beschreibung des thermischen Milieus in der Stadt-und Landschaftsplanung ("Klima-Michel-Modell"). Online verfügbar unter <https://scholar.google.com/citations?user=j9zfenmaaaaj&hl=de&oi=sra>.

Kovats, R. Sari; Hajat, Shakoob (2008): Heat stress and public health: a critical review. In: *Annual review of public health* 29, S. 41–55. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.

Peissl, D.; Schlaich, M. (2025): Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen, wandelbaren Gebäudeprototypen für die symbiotische Nutzung eines energieautonomen Schulungs-Gewächshauses in Berlin. Schlussbericht. TU Berlin, FG Entwerfen und Konstruieren – Massivbau.

Peissl, D. (2023): Fotografie, aufgenommen auf der "Langen Nacht der Wissenschaften".

Robine, Jean-Marie; Cheung, Siu Lan K.; Le Roy, Sophie; van Oyen, Herman; Griffiths, Clare; Michel, Jean-Pierre; Herrmann, François Richard (2008): Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. In: *Comptes rendus biologies* 331 (2), S. 171–178. DOI: 10.1016/j.crvi.2007.12.001.

Ryti, Niilo R. I.; Guo, Yuming; Jaakkola, Jouni J. K. (2016): Global Association of Cold Spells and Adverse Health Effects: A Systematic Review and Meta-Analysis. In: *Environmental health perspectives* 124 (1), S. 12–22. DOI: 10.1289/ehp.1408104.

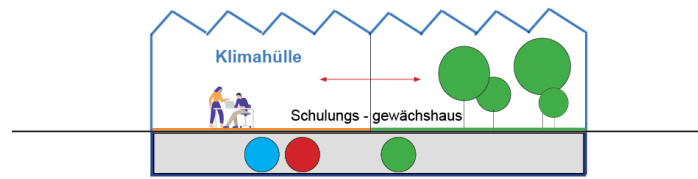
Scherer, Dieter; Endlicher, Wilfried (2014): Editorial: Urban climate and heat stress – Part 1. 144. Aufl.: Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin.

Seltenrich, Nate (2015): Between Extremes: Health Effects of Heat and Cold. In: *Environmental health perspectives* 123 (11), A275-80. DOI: 10.1289/ehp.123-A275.

Staiger, H.; Bucher, K.; Jendritzky, Gerd (1997): Gefühlte Temperatur. Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien in der Maßzahl Grad Celsius. In: *Annalen der Meteorologie* (33), S. 100–107.

TU Berlin (o.J.): Infrastruktur - TU Berlin. Online verfügbar unter <https://www.tu.berlin/bau/forschung/infrastruktur>, zuletzt aktualisiert am 19.11.2024, zuletzt geprüft am 19.11.2024.





## **A4** Anhang zum Themenbereich:

### **Eis-Energiespeichersystem**

Verfasser: Jonas Hilpert

Viessmann Deutschland GmbH



#### **Inhalt:**

- Einleitung, Zielsetzung und Projektziel
- Eis-Energiespeichersystem
  - Aufbau des Eis-Energiespeichersystems
  - Funktionsprinzip
  - Planung und Auslegung
- Variantenentwicklung
- Begründeter Schlussvorschlag mit Spezifikation
  - Technische Spezifikation von Variante

Viessmann Deutschland GmbH  
Viessmannstraße 1 • 35108 Allendorf (Eder)

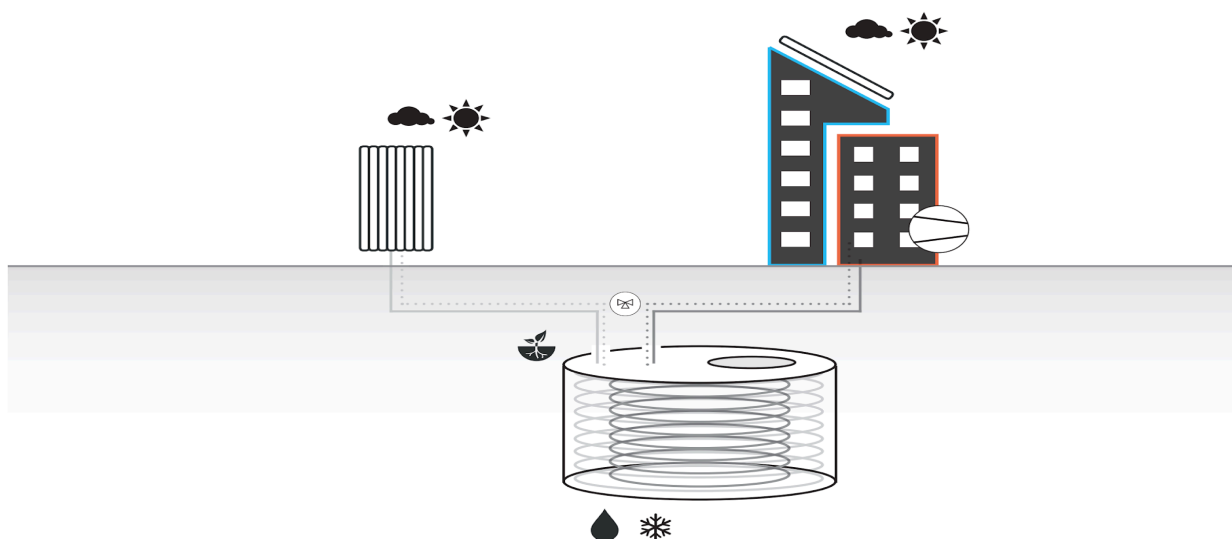
---

Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
An der Bornau 2  
49090 Osnabrück

Zeichen: HlpJ  
Telefon: +49 151 74657529  
E-Mail: [hlpj@viessmann.com](mailto:hlpj@viessmann.com)

26.06.2025

# Abschlussbericht Eis-Energiespeichersystem | Schulungsgewächshaus Berlin



|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>                                                     | <b>3</b>  |
| <b>2. Ausgangssituation und Projektziel</b>                              | <b>4</b>  |
| <b>3. Eis-Energiespeichersystem</b>                                      | <b>5</b>  |
| 1. Aufbau des Eis-Energiespeichersystems                                 | 5         |
| 2. Funktionsprinzip                                                      | 5         |
| 3. Betriebsmodi                                                          | 6         |
| 4. Planung und Auslegung                                                 | 6         |
| 5. Vorteile des Systems                                                  | 7         |
| <b>4. Variantenentwicklung</b>                                           | <b>8</b>  |
| Variante 1 – Erste Grobauslegung mit Außenaufstellung                    | 9         |
| Variante 2 – Maximale Speichergröße im Innenbereich                      | 9         |
| Variante 3 – Rückkühler für verbesserten Sommerbetrieb                   | 9         |
| Variante 4 – Optimierte Speichergröße mit Energiezäunen und Lastglättung | 10        |
| Variante 5 – Angepasste Lastwerte und elektrische Spitzenlastdeckung     | 10        |
| <b>5. Begründeter Schlussvorschlag mit Spezifikation</b>                 | <b>11</b> |
| Technische Spezifikation von Variante 5                                  | 11        |
| <b>6. Position im Lageplan</b>                                           | <b>12</b> |
| <b>7. Fazit und Ausblick</b>                                             | <b>12</b> |

# 1. Einleitung

Im Zuge der Dekarbonisierung von Gebäuden und zur Steigerung der Energieeffizienz wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts die Implementierung eines Eis-Energiespeichersystems für die kombinierte Heiz- und Kühlversorgung untersucht. Ziel war es, eine geeignete technische Lösung für ein konkretes Objekt unter Berücksichtigung der thermischen Lasten, räumlichen Rahmenbedingungen sowie regenerativer Komponenten zu entwickeln. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde die Implementierung eines innovativen Eis-Energiespeichersystems zur effizienten und nachhaltigen Energieversorgung von Gebäuden umfassend untersucht. Angesichts der dringenden Notwendigkeit, den Kohlenstoffausstoß von Gebäuden zu reduzieren und deren Energieeffizienz signifikant zu steigern, konzentrierte sich die Studie auf die Entwicklung einer maßgeschneiderten technischen Lösung.

Das Hauptziel bestand darin, ein konkretes Objekt – in diesem Fall ein Schulungsgewächshaus in Berlin – mit einem solchen System für die kombinierte Heiz- und Kühlversorgung auszustatten. Hierbei wurden alle relevanten Faktoren detailliert analysiert:

- **Thermische Lasten:** Eine präzise Erfassung und Analyse der Heiz- und Kühllasten des Gewächshauses war entscheidend, um die optimale Dimensionierung des Speichersystems zu gewährleisten und den Energiebedarf des Gebäudes über das Jahr hinweg zu decken.
- **Räumliche Rahmenbedingungen:** Die spezifischen Gegebenheiten des Standorts, einschließlich der verfügbaren Fläche für die Installation des Eisspeichers und der Anbindung an das bestehende Gebäudesystem, wurden detailliert bewertet.
- **Regenerative Komponenten:** Die Integration erneuerbarer Energien, wie beispielsweise Solarthermie oder Photovoltaik, wurde als integraler Bestandteil des Systems betrachtet, um den Anteil fossiler Brennstoffe weiter zu minimieren und die Nachhaltigkeit zu maximieren.

Das Forschungsprojekt verfolgte einen ganzheitlichen Ansatz, um nicht nur die technische Machbarkeit, sondern auch die ökologischen und ökonomischen Vorteile eines Eis-Energiespeichersystems in der Praxis zu demonstrieren. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt sollen als Referenz für zukünftige Dekarbonisierungsstrategien im Gebäudesektor dienen und den Weg für eine breitere Anwendung dieser zukunftsweisenden Technologie ebnen.

## 2. Ausgangssituation und Projektziel

Zu Projektbeginn stand die Herausforderung im Raum, ein System zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfs eines Gebäudes mit einem Jahreswärmebedarf von 26.466 kWh, einer Heizlast von bis zu 125 kW sowie einer Kühllast von 75,4 kW zu entwickeln. Dabei sollten erneuerbare Energien, insbesondere Regenerationssysteme wie Energiezäune oder Rückkühler, in Kombination mit einem Eisspeicher eingesetzt werden.

Der verfügbare Platz, insbesondere innerhalb des Gebäudes, sowie der Wunsch nach einem modular erweiterbaren Konzept machten eine flexible Systemplanung erforderlich. Zu Projektbeginn stand die komplexe Herausforderung im Raum, ein innovatives und nachhaltiges System zur Deckung des gesamten Wärme- und Kältebedarfs eines spezifischen Gebäudes zu konzipieren und zu realisieren. Dieses Gebäude wies einen beachtlichen Jahreswärmebedarf von 26.466 kWh auf, der durch eine Heizlast von bis zu 125 kW in Spitzenzeiten ergänzt wurde. Parallel dazu bestand ein signifikanter Kühlbedarf mit einer Kühllast von 75,4 kW.

Das zentrale Ziel war die Integration erneuerbarer Energien, wobei der Fokus auf fortschrittlichen Regenerationssystemen lag. Hierzu sollten insbesondere Energiezäune oder effiziente Rückkühler in Kombination mit einem Eisspeicher zum Einsatz kommen. Diese Kombination zielte darauf ab, eine ganzjährige, energieeffiziente und CO<sub>2</sub>-neutrale Versorgung des Gebäudes sicherzustellen.

Eine weitere kritische Randbedingung stellte der begrenzte Platz dar, insbesondere die beengten Verhältnisse innerhalb des Gebäudes, die eine besonders kompakte und raumsparende Systemauslegung erforderten. Gleichzeitig wurde der ausdrückliche Wunsch nach einem modular erweiterbaren Konzept geäußert. Dies implizierte, dass das System nicht nur den aktuellen Bedarf decken, sondern auch flexibel an zukünftige Anforderungen und potenzielle Erweiterungen angepasst werden konnte, ohne grundlegende Änderungen an der Infrastruktur vornehmen zu müssen. Diese Anforderungen machten eine äußerst flexible und vorausschauende Systemplanung unumgänglich, um eine optimale Balance zwischen Effizienz, Skalierbarkeit und räumlicher Integration zu gewährleisten.

### 3. Eis-Energiespeichersystem

Das Eis-Energiespeichersystem ist eine innovative Lösung zur effizienten Bereitstellung von Wärme und Kälte in Gebäuden mit mittleren bis hohen thermischen Anforderungen. Es kombiniert die thermischen Eigenschaften von Wasser mit der Leistung moderner Wärmepumpen und regenerativer Energiequellen wie Solar-Luft-Kollektoren. Das System eignet sich besonders für Mehrfamilienhäuser, Bürogebäude, Industrie- und Logistikbauten mit ganzjährigem Kühl- und Heizbedarf.

#### 1. Aufbau des Eis-Energiespeichersystems

Das System besteht im Wesentlichen aus drei Hauptkomponenten:

- **Eis-Energiespeicher (Betonbehälter):** Ein unterirdischer, stahlbewehrter, ungedämmter Betonbehälter, der mit Wasser gefüllt wird und als thermische Quelle dient.
- **Wärmepumpe (Sole/Wasser-Prinzip):** Entzieht dem Speicher thermische Energie zum Heizen oder zur Trinkwassererwärmung.
- **Solar-Luft-Kollektor (SLK):** Unterstützt die Regeneration des Speichers mit Umweltwärme aus Luft, Sonnenstrahlung und Regen.

Im Speicher sind zwei Wärmetauscher-Systeme integriert:

- **Entzugswärmetauscher** (innenliegend): Entzieht Wärme dem Wasser bzw. dem Eis für den Betrieb der Wärmepumpe.
- **Regenerationswärmetauscher** (außenliegend): Führt dem Speicher wieder Energie zu, z. B. aus SLK oder Umgebung.

#### 2. Funktionsprinzip

Das zentrale physikalische Prinzip beruht auf der **Kristallisationsenergie** beim Gefrieren von Wasser. Wird dem Wasser Energie entzogen, sinkt die Temperatur. Am Gefrierpunkt (0 °C) setzt der Phasenübergang ein – dabei wird eine zusätzliche latente Wärmemenge von ca. **93 Wh/kg** freigesetzt.

Dieses Phasenwechsel-Verhalten ermöglicht eine hohe Energiedichte des Speichers:

- **Sensible Wärme:** z. B. von 80 °C auf 0 °C = 93 Wh/kg

- **Latente Wärme beim Gefrieren:** nochmals 93 Wh/kg  
→ **Gesamtnutzungspotenzial: 186 Wh/kg Wasser**

Nach dem Entzug wird der Speicher wieder über den Solar-Luft-Kollektor oder ggf. die Rückführung von Kühlenergie regeneriert. Die Wärmepumpe kann auch zur aktiven Kühlung eingesetzt werden.

### 3. Betriebsmodi

Das System bietet eine Vielzahl an Betriebsarten, gesteuert durch das **Wärmequellenmanagement Vitocontrol 200-M ICE**:

| Betriebsweise             | Beschreibung                                                                   |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Direktbetrieb             | Wärmepumpe bezieht Wärme direkt vom Solar-Luft-Kollektor                       |
| Entzugsbetrieb            | Eis-Energiespeicher als Wärmequelle für die Wärmepumpe                         |
| Regenerationsbetrieb      | Solarwärme regeneriert den Speicher, Wärmepumpe inaktiv                        |
| Natural Cooling           | Passives Kühlen über Speicher, Wärmepumpe inaktiv                              |
| Free Cooling              | Passives Kühlen über SLK, nur bei niedrigen Außentemperaturen                  |
| Active Cooling/Precooling | Aktives Kühlen mit WP, Regeneration nachts, wenn Umgebung kühler als Kollektor |
| Dualbetrieb               | Gleichzeitiger Heiz- und Kühlbetrieb durch Systemkombination                   |

### 4. Planung und Auslegung

Wesentliche Planungsvorgaben:

- **Heizlast ab ca. 30 kW**
- **Wärmeträger:** Wasser-Glykol Gemisch 30 Vol.-% (Primärkreis)
- **Bauweise Speicher:** Zylinder oder Quader
- **Einbauhöhe Speicher:** 2–6 m, ideal bei konstanter Erdtemperatur im Erdreich
- **Aufbau Wärmetauscher:** Innen spiralförmig (Entzug), außenlagig (Regeneration)



- **Eisbildung:** Gleichmäßig, ohne strukturelle Belastung für den Behälter
- **Sicherheitsanforderungen:** Keine Erdbebenzonen, statisch geprüfter Baugrund

## 5. Vorteile des Systems

- **Hohe Energieeffizienz** durch Nutzung latenter Wärme
- **Reduktion von Spitzenlasten** durch thermischen Speicher
- **Kombinierte Nutzung für Heizen und Kühlen**
- **Wartungsarm** dank robuster Komponenten
- **Nachhaltig**, da überwiegend erneuerbare Quellen genutzt werden

## 4. Variantenentwicklung

Im Zuge der Systemplanung für das Eis-Energiespeichersystem wurden insgesamt fünf technische Varianten simulativ untersucht. Ziel war es, eine ökologisch sinnvolle, energetisch effiziente und wirtschaftlich tragbare Lösung zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfs des Gebäudes zu entwickeln. Die Varianten unterschieden sich hinsichtlich der Speichergröße, des Aufstellungsorts des Eisspeichers, der Art des Regenerationssystems, des Wärmepumpentyps, sowie in Bezug auf die Anpassung an aktuelle Heiz- und Kühllasten und die Auslegung der Spitzenlastabdeckung.

### Übersicht der Varianten:

| Variante | Eisspeicherort     | Volumen (m³) | Regeneration      | WP-Typ                   | Heizlast (kW) | Kühllast (kW) | Spitzenlast (SL) | Leistung SL (kW) |
|----------|--------------------|--------------|-------------------|--------------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|
| 1        | Außen              | 47,6         | Energiezäune (12) | Vitocal 300-G BW 301.A45 | 125           | 75,4          | Gas              | 100              |
| 2        | Gebäude integriert | 152,3        | Energiezäune (12) | Vitocal 300-G BW 301.A45 | 125           | 75,4          | Gas              | 80               |
| 3        | Gebäude integriert | 51           | Rückkühler (1)    | Vitocal 300-G BW 301.A29 | 125           | 56            | Gas              | 100              |
| 4        | Gebäude integriert | 94,9         | Energiezäune (12) | Vitocal 300-G BW 301.A45 | 125           | 56            | Gas              | 100              |
| 5        | Außen              | 93,3         | Energiezäune (12) | Vitocal 300-G BW 301.A45 | 59            | 42            | Heizstab         | 24               |

### **Variante 1 – Erste Grobauslegung mit Außenaufstellung**

Diese erste Variante diene der konzeptionellen Grundausrichtung. Der Eisspeicher ist als zylindrischer Betonbehälter mit einem Volumen von 47,6 m<sup>3</sup> vorgesehen und soll im Außenbereich platziert werden. Die Regeneration erfolgt über 12 Energiezäune, welche Umweltwärme zur Speicheraufladung nutzen. Als Wärmeerzeuger kommt die Vitocal 300-G BW 301.A45 Sole/Wasser-Wärmepumpe zum Einsatz. Die Heizlast beträgt 125 kW, die Kühllast 75,4 kW. Die Spitzenlast wird konventionell über einen Gas-Spitzenlastkessel mit 100 kW gedeckt.

**Bewertung:** Diese Variante diene zur ersten Orientierung ohne tiefere Präzisierung.

### **Variante 2 – Maximale Speichergroße im Innenbereich**

Die zweite Variante sieht eine deutlich größere Speicherdimensionierung mit einem Volumen von 152,3 m<sup>3</sup> vor, ebenfalls als Zylinderspeicher, diesmal jedoch vollständig ins Gebäude integriert. Auch hier werden 12 Energiezäune zur Regeneration eingesetzt, und die identische Wärmepumpe wie in Variante 1 gewählt. Heiz- und Kühllasten bleiben bei 125 kW bzw. 75,4 kW, jedoch wird die Spitzenlastleistung auf 80 kW Gas reduziert.

**Bewertung:** Technisch leistungsfähig, stellt diese Lösung jedoch eine Überdimensionierung des Eisspeichers dar. Die Platzverhältnisse im Gebäude sind bei einem Speicherdurchmesser von fast 10 Metern und einer Höhe von über 3 Metern stark eingeschränkt. Die Einbindung eines so großen Speichers bringt logistische und statische Herausforderungen mit sich, ohne im Gegenzug eine angemessene energetische Zusatznutzen zu bieten.

### **Variante 3 – Rückkühler für verbesserten Sommerbetrieb**

Die dritte Variante geht einen anderen Weg: Der Regenerationsmechanismus wird hier nicht über Energiezäune, sondern über einen Rückkühler realisiert. Damit wird besonders der aktive Kühlbetrieb im Sommer verbessert, was für Gebäude mit erhöhtem sommerlichen Kältebedarf relevant ist. Der Speicher hat ein moderates Volumen von 51 m<sup>3</sup> und ist im Gebäude untergebracht. Eingesetzt wird eine kleinere Wärmepumpe vom Typ Vitocal 300-G BW 301.A29. Heiz- und Kühllast betragen 125 kW und 56 kW, die Spitzenlast bleibt bei 100 kW Gas.

**Bewertung:** Der Einsatz eines Rückkühlers verbessert die Flexibilität des Systems im Sommerbetrieb. Allerdings hat diese Variante einen geringeren Gesamtwirkungsgrad, da Rückkühler im Vergleich zu passiven Regenerationssystemen wie Energiezäunen höhere Betriebskosten verursachen und durch ihre mechanischen Komponenten wartungsintensiver sind.

#### **Variante 4 – Optimierte Speichergröße mit Energiezäunen und Lastglättung**

In Variante 4 wird ein Kompromiss zwischen Größe und Effizienz gesucht. Der Eisspeicher ist mit 94,9 m<sup>3</sup> angemessen dimensioniert, bei weiterhin gebäudeinterner Integration. Die Regeneration erfolgt wieder über 12 Energiezäune, und die Wärmepumpe ist identisch zu den vorherigen Varianten. Die Heizlast liegt bei 125 kW, die Kühllast bei 56 kW, und die Spitzenlast wird erneut mit einem 100 kW Gasgerät gedeckt.

**Bewertung:** Diese Lösung bietet eine gute Balance zwischen technischer Leistungsfähigkeit und räumlicher Umsetzbarkeit. Die Speichergröße ist ausreichend, um eine wirtschaftlich sinnvolle Speicherwirkung zu erzielen, ohne den Platzbedarf zu überdehnen. Die Integration der Energiezäune ermöglicht eine passive, kostengünstige Regeneration. Zudem wurde in dieser Variante erstmals ein Konzept zur Lastglättung berücksichtigt, das perspektivisch zur Effizienzsteigerung beitragen kann.

#### **Variante 5 – Angepasste Lastwerte und elektrische Spitzenlastdeckung**

In der finalen und favorisierten Variante wurde der Speicher nochmals auf eine nutzungsadäquate Größe reduziert: 93,3 m<sup>3</sup>, Zylinderausführung, im Außenbereich. Die Regeneration erfolgt wie in den anderen erfolgreichen Varianten über 12 Energiezäune, jedoch mit einer reduzierten Regenerationsleistung von 42 kW. Die Wärmepumpe bleibt die Vitocal 300-G BW 301.A45, jedoch basiert diese Auslegung auf reduzierten realitätsnahen Lastwerten: Die Heizlast beträgt 59 kW, die Kühllast 42 kW. Für die Spitzenlastabdeckung wird ein elektrischer Heizstab mit 24 kW verwendet.

**Bewertung:** Diese Variante stellt die ausgereifteste **Lösung** dar. Durch die Aktualisierung der thermischen Lasten konnte die Systemgröße bedarfsgerecht optimiert werden. Der Heizstab als Spitzenlastergänzung ist technisch einfach, emissionsfrei und wirtschaftlich vorteilhaft. Die Positionierung des Speichers außerhalb des Gebäudes reduziert den Installationsaufwand und es können auf Standardbehälter zurückgegriffen werden.. Zudem reduziert die geringe Spitzenlastleistung von 24 kW signifikant die Investitionskosten.

## 5. Begründeter Schlussvorschlag mit Spezifikation

Basierend auf einer umfassenden Analyse der Simulationen und in Abgleich mit den technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wurde Variante 5 als favorisierte Ausführung für die Systemumsetzung ausgewählt.

Die wichtigsten Vorteile im Überblick:

- **Bedarfsgerechte Dimensionierung** auf Basis aktueller Heiz- und Kühllasten.
- **Kompakte Speichergröße** mit geringem Platzbedarf.
- **Gebäudeintegration** ermöglicht Schutz, kurze Leitungswege und einfache Wartung.
- **Regeneration mit Energiezäunen** stellt eine kosteneffiziente, passive Lösung dar.
- **Spitzenlast mit Heizstab** ersetzt fossile Energieträger, verbessert Klimabilanz und reduziert Komplexität.
- **Optimierte Investitionskosten** durch reduzierte Spitzenlastleistung von nur 24 kW.

### Technische Spezifikation von Variante 5

- **Eisspeicher:** Zylinder, Durchmesser 7 m, Höhe 3 m
- **Volumen:** 93,3 m<sup>3</sup>
- **Regeneration:** 12 Energiezäune, 42 kW Regenerationswärmetauscher
- **Wärmepumpe:** Vitocal 300-G BW 301.A45
- **Heizlast / Kühllast:** 59 kW / 42 kW
- **Spitzenlast:** Elektrischer Heizstab, 24 kW
- **Heiz-/Kühltemperaturen:** 35/28 °C – 16/19 °C

Diese Konfiguration bietet ein energetisch nachhaltiges und zukunftsfähiges Systemkonzept für die effiziente Versorgung des Gebäudes mit Heiz- und Kühlenergie.

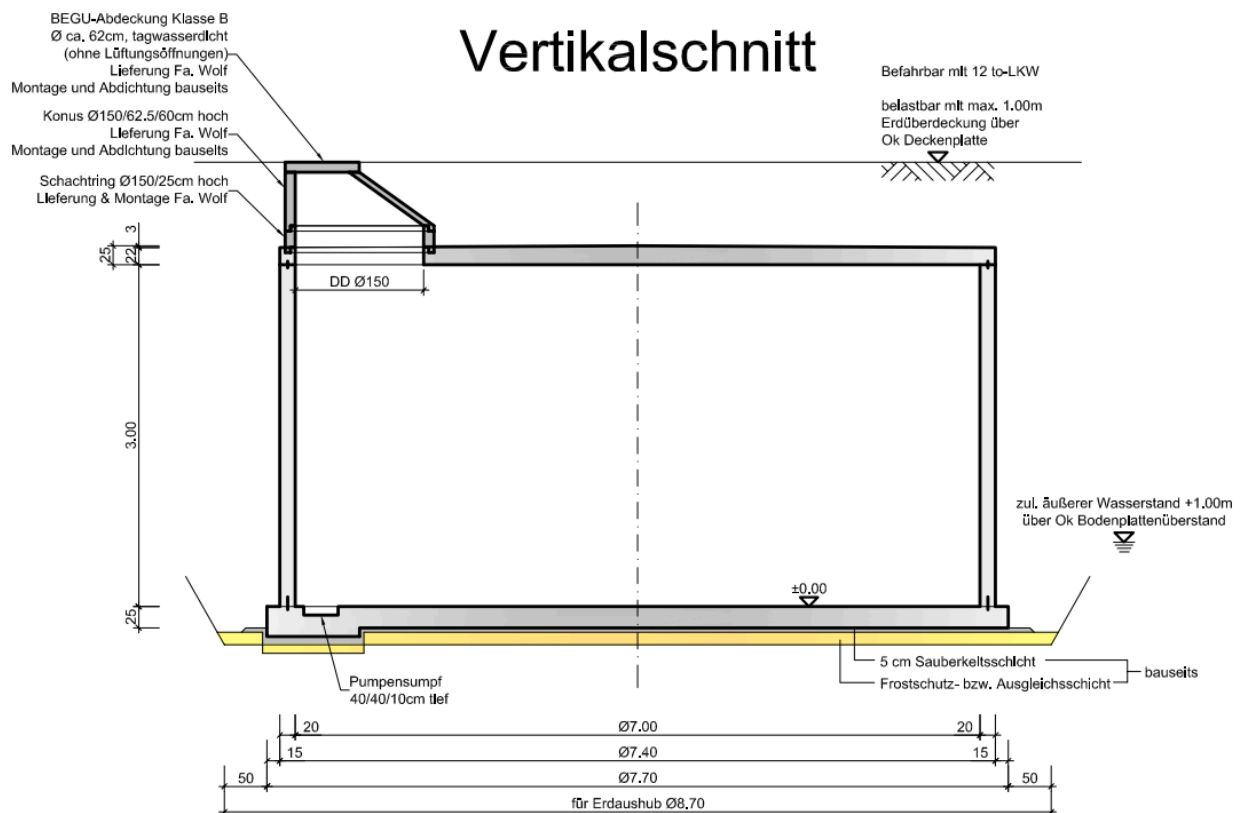
## 6. Zeichnung und Position

Der Stahlbeton-Rundbehälter des geplanten Eisspeichers soll im Außenbereich errichtet werden. Die endgültige Auslegung der Wandstärken kann erst nach Durchführung einer detaillierten statischen Berechnung erfolgen. Diese Berechnung ist in Abhängigkeit von den vor Ort ermittelten geotechnischen Bodenkennwerten vorzunehmen, da diese maßgeblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit und Standsicherheit des Behälters haben.

Die derzeitige zeichnerische Darstellung basiert auf den folgenden Standardannahmen für die Bodenkennwerte und Einwirkungen:

|                           |                                    |
|---------------------------|------------------------------------|
| Bettungsmodul min:        | 25 MN/m <sup>3</sup>               |
| Bodenpressung min:        | 200 kN/m <sup>2</sup>              |
| Äußerer Wasserstand max.: | 100 cm ab OK Bodenplattenüberstand |
| Erdüberdeckung:           | 100 cm                             |
| Überfahrbarkeit           | SLW 12                             |

Ausführung nach statischer Berechnung / Änderungen vorbehalten



Eine abschließende Bemessung und Anpassung der Behältergeometrie ist nach Vorlage der standortspezifischen Baugrunduntersuchung vorzunehmen. Änderungen an den Wandstärken und Gründungsdetails bleiben daher vorbehalten.

## 7. Fazit und Ausblick

Das vorliegende Projekt zur Entwicklung und Auslegung eines Eis-Energiespeichersystems für das Schulungsgewächshaus in Berlin zeigt eindrucksvoll das Potenzial innovativer Speichertechnologien zur nachhaltigen Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden. Im Zentrum stand die Herausforderung, eine wirtschaftlich tragfähige, ökologisch nachhaltige und zugleich technisch effiziente Lösung zu erarbeiten, die den spezifischen Rahmenbedingungen vor Ort gerecht wird.

Die durchgeführte Variantenuntersuchung hat dabei eine kontinuierliche Optimierung der Systemauslegung ermöglicht – von der Grobplanung bis hin zur final favorisierten Variante 5. Diese Variante überzeugt durch eine bedarfsorientierte Dimensionierung, die Integration kosteneffizienter Regenerationssysteme in Form von Energiezäunen sowie durch den vollständigen Verzicht auf fossile Spitzenlastkomponenten.

Mit einem Speichervolumen von 93,3 m<sup>3</sup> und einer Außenaufstellung konnte eine praktikable Lösung gefunden werden, die sowohl den energetischen Anforderungen als auch den baulichen Gegebenheiten gerecht wird. Die Einbindung regenerativer Quellen sowie die Fähigkeit zur gleichzeitigen Nutzung für Heizen und Kühlen machen das System zukunftsfähig und bieten ein hohes Maß an Flexibilität für den Gebäudebetrieb.

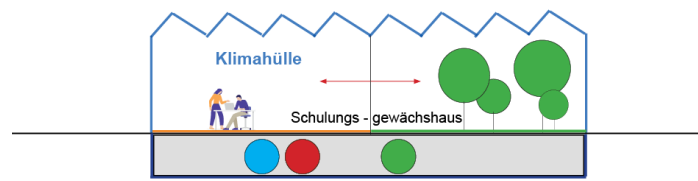
Der erfolgreiche Projektverlauf belegt die Anwendbarkeit von Eis-Energiespeichern als zentrales Element moderner, CO<sub>2</sub>-neutraler Energieversorgungskonzepte – nicht nur im Neubau, sondern auch im Rahmen von Sanierungsprojekten. Dabei bieten modulare Speicherlösungen wie die hier entwickelte Ausführung eine hohe Skalierbarkeit, wodurch auch komplexe Gebäudeanforderungen abgedeckt werden können.

### **Ausblick:**

Zukünftig sollten weitere Pilotprojekte mit unterschiedlichen Gebäudetypen und Lastprofilen realisiert werden, um die Technologie weiter zu etablieren und breiter in die Praxis zu überführen. Zudem besteht Potenzial in der Weiterentwicklung der Systemkomponenten, etwa durch den Einsatz intelligenter Regelstrategien, die eine noch effizientere Nutzung der Umweltwärme ermöglichen. Auch die Integration zusätzlicher regenerativer Quellen wie Photovoltaik oder saisonale Speicheranbindungen bietet spannende Perspektiven zur weiteren Optimierung der Gesamtenergiebilanz.

Das Projekt liefert damit nicht nur eine konkrete technische Lösung für das Schulungsgewächshaus in Berlin, sondern auch wertvolle Erkenntnisse und Impulse für den weiteren Ausbau klimaneutraler Energiesysteme im Gebäudebereich.





## A5 Anhang zum Themenbereich:

### Bau des Mock-Ups



Verfasser: Dipl.-Ing Dieter Linke, M.Sc. Guido Hanke

Modesta Betriebs GmbH & Co.KG

#### Inhalt:

- Übersicht der Bauteile
- Konstruktionszeichnungen und Fotos :
  - Wände
  - Dach
  - Wandelbare Fassadenverschattung
  - Prototypenbau

## **Prototyp eines bioklimatischen Schulungs-Gewächshauses**

Im Folgenden sind die wesentlichen Elemente Wände, Dach, Dachverschattung und Fassadenverschattung des kleinen Gewächshauses knapp beschrieben.

Einige Fotos und eine anhängende kleine Auswahl an Konstruktionszeichnungen erlauben einen näheren Einblick.

### **Wände**

Die Längsachse des Gewächshauses verläuft idealerweise in Nord-Süd-Richtung.

Eine wesentliche Randbedingung für die Konstruktion bestand darin, für guten Lichteinfall die Glasflächen in Wänden und Dach möglichst groß zu halten. Die herkömmliche Bauweise aus Stützen und Riegeln als Tragstruktur mit in die offenen Felder eingesetzten Standardfenstern bedingt einen unerwünscht hohen Anteil an Rahmenfläche.

Deshalb wurde das 3-Ebenen-Prinzip entwickelt und verwirklicht:

Die Strukturbauteile als erste Ebene bestehen aus Stahl-Rechteckrohren und haben gerade diejenigen Abmessungen, die statisch erforderlich sind. Darauf wird eine Lage thermisch trennenden Kunststoffes (Trespa) vernietet, auf ihnen wiederum werden die inneren Glasscheiben mittels eines Rahmens aus Stahlrohr gehalten. Eine zweite Trespa-Lage trennt die innere von der äußeren Glasscheibe thermisch und räumlich, welche mittels des verschraubten Außenrahmens aus Kantblechen fixiert wird.

Zwischen allen beschriebenen Schichten sind zusätzlich dünne Gummi-Dichtbänder eingelegt.

Die Rahmen wurden vor dem Lackieren zu Rechtecken verschweißt.

Dieses 3-Ebenen-Prinzip wurde für die Wände, die Zugangstüren, die Kippfenster und auch für die Verglasung der Dachträger und der Dachfenster beibehalten.

Der erhebliche konstruktive Aufwand wird durch eine in herkömmlicher Bauweise nicht erreichbare Filigranität belohnt.

Alle Scheiben bestehen aus Verbundglas von je  $2 \times 4 = 8$  mm Dicke, so dass mit der daraus hergestellten Doppelverglasung mit thermischer Trennung nicht nur eine gute Wärmedämmung, sondern auch signifikanter Schallschutz erzielt wird.

Die Gebäudestruktur aus 2 Längs- und 2 Querwänden wird durch die darauf aufgesetzten fünf Dachträger mit Überstand rundum abgeschlossen.

## **Dach**

Das Prinzip der drei Ebenen wird auch für die Dachkonstruktion angewendet, die in einer symmetrischen Shedgeometrie gehalten ist. Die Shedecken werden aus Fachwerkträgern gebildet, die paarweise entlang ihrer Firstlinien verbunden sind und mit einem kleinen Abstand für die gemeinsame Entwässerungsrinne aus Alucobond auf den oberen Wandabschlussrohren verschraubt werden.

Die einzelnen Fachwerkträger bestehen aus Rohren und Kantblechen, die zu etwa gleichseitigen Dreiecken verschweißt sind und an den Stirnenden (also entlang der östlichen und westlichen Längswände des Baukörpers) um eine halbe Kantenlänge überstehen.

Die Verglasung der Dachträger erfolgt auf die gleiche Weise wie die Verglasung der Wände. Einzelne Dreieckselemente sind als Klappen ausgebildet, die mit ihrer Längskante entlang des Firstes als Anschlaglinie nach außen geöffnet werden können.

Fünf solcher Trägerpaare, von Südwand bis Nordwand nebeneinander auf den Seitenwänden platziert, decken den Baukörper ein. Je ein zusätzlicher, nach außen geneigter Einzelträger setzt die Kontur des Sheds im Norden und Süden aufwärts fort, so dass jeweils noch ein Vordach entsteht. Der oben liegende Außenrand der Vordach- Träger wird mittels Zugglieder zum First des benachbarten Sheds stabilisiert.

Insgesamt bietet diese Sheddachkonstruktion in der Seitenansicht sieben Hoch- (Shed-Firstlinien) und sechs Tiefpunkte (Shed-Trauflinien).

## **Wandelbare Dachverschattung**

Die Dachverschattung ist im Freien über dem Gebäude angeordnet und ist wandelbar. Sie besteht aus insgesamt 60 dreieckigen Blechen mit jeweils 65 kleinen Öffnungen, über die zur Lichteinleitung je eine nach Norden geöffnete kleine Hutze gelötet wurde.

Die Bleche sind an 10 in Gebäudelängsrichtung verlaufenden Stäben, den Wellen, angeschweißt. Jede Welle trägt 6 Bleche. Die Wellen sind zu vier Paaren und entlang der Gebäudekanten als Einzelwellen auf jedem Trägergrat des Sheds mit darauf Stehlagern geführt und befestigt.

Diese Lagerung erlaubt es, die Bleche senkrecht in das Shedtal abzusenken (freier Lichteinfall durch das Dach) oder diese um 90 Grad in die Horizontale zu drehen um die Verschattung zu erzeugen. Die Blechanordnung lässt bei aktivierter Verschattung zwischen den Dreiecksblechen quadratische Flächen frei, die für feststehende, horizontal ausgerichtete Fotovoltaikpaneele nutzbar sind.

In der Achse des mittleren Shedfirsts ist jede Welle mit einem Hebelarm versehen, der es ermöglicht, die Wellen über eine gelenkig angeschlossene Schubstange synchron zu drehen. Jeweils fünf Wellen werden auf diese Weise gemeinsam von je einem elektrischen Linearmotor angetrieben.

## **Wandelbare Fassadenverschattung**

Die wandelbare Fassadenverschattung ist außen vor den beiden verglasten Längswänden angeordnet. Sie führt das gestalterische Element der Verwendung von dreieckigen Blechen weiter: Je ein Rahmen aus Stahlrohr in der Geometrie einer vertikal etwas in die Länge gezogenen Raute hängt mit seiner oberen Spitze am überstehenden Ende der fünf Sheddach-Trägerpaare.

Je vier dreieckige Bleche, deren Basis entlang der Rautenkanten verläuft, stellen über Laschen an ihren Spitzen zusätzliche statische Verbindungen zu den Fassadenstützen her.

Die zehn Rautenrahmen selbst werden von je vier weiteren dreieckigen Blechen als plane Flächen gefüllt, deren lange Seiten entlang der Rahmenstäbe angeschlagen sind und mit ihren freien Spitzen um ca. 105 Grad aus der Rahmenebene zur Fassade hin geklappt werden können.

Zur Fassade hin geklappt geben sie dem Lichteinfall zur Fassade den Weg frei und in die plane Ebene mit dem Rahmen gedreht, bieten sie Verschattung.

Das technische Konzept für den elektrischen Antrieb der Wandelbarkeit sieht vor, je Raute das äußere Ende eines Spindelantriebs mit großem Hub außen vor der Fassade an der Dachkante aufzuhängen und über vier Schubstäbe mit den Schwerpunkten der beweglichen vier Bleche gelenkig zu verbinden. Bei eingezogener Spindel wäre die Rautenfläche geschlossen und böte Schatten, mit dem Ausfahren der Spindel würden die Bleche zur Fassade hin umgeklappt und gäben dem Sonnenlichteinfall den Weg frei.

Ein Prototyp wurde verwirklicht und funktionierte im Prinzip. Die Halterung der Spindel, die geometrisch sehr flexibel aber statisch doch stabil sein muss, ist noch nicht final verwendbar. Auch die architektonischen Anforderungen, dass keine Bauteile den freien Blick behindern oder vor die Ebene der Rauten herausragen sollten, ist noch nicht erfüllt.



Bioklimatischer Prototyp im Rohbau ohne Wandverglasung.

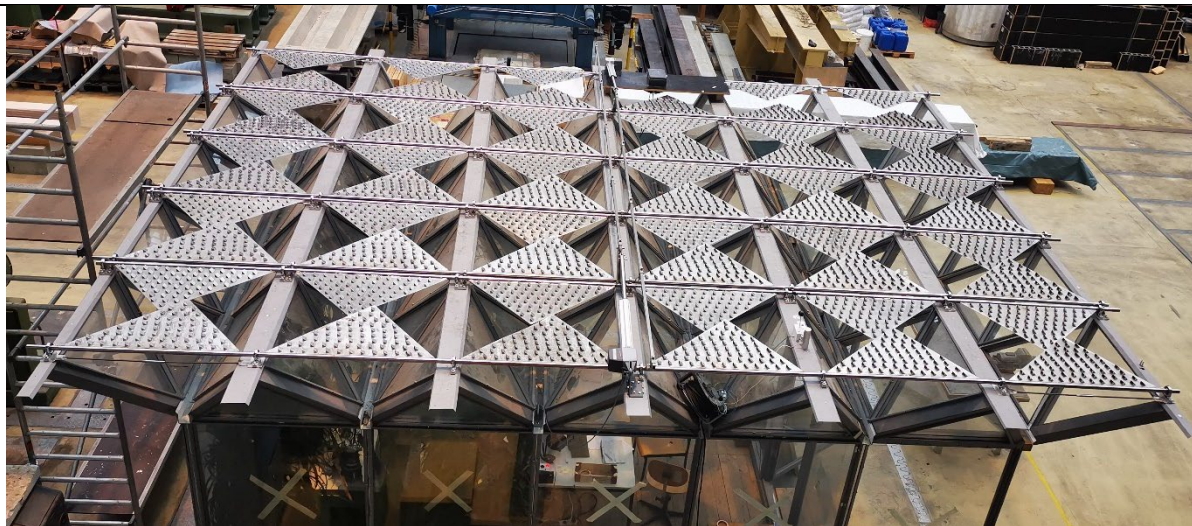


Fertig verglaster Prototyp mit Wänden und Dach; sieben Hoch- und sechs Tiefpunkte im Sheddach bieten Raum zum Parken der Verschattungsbleche.

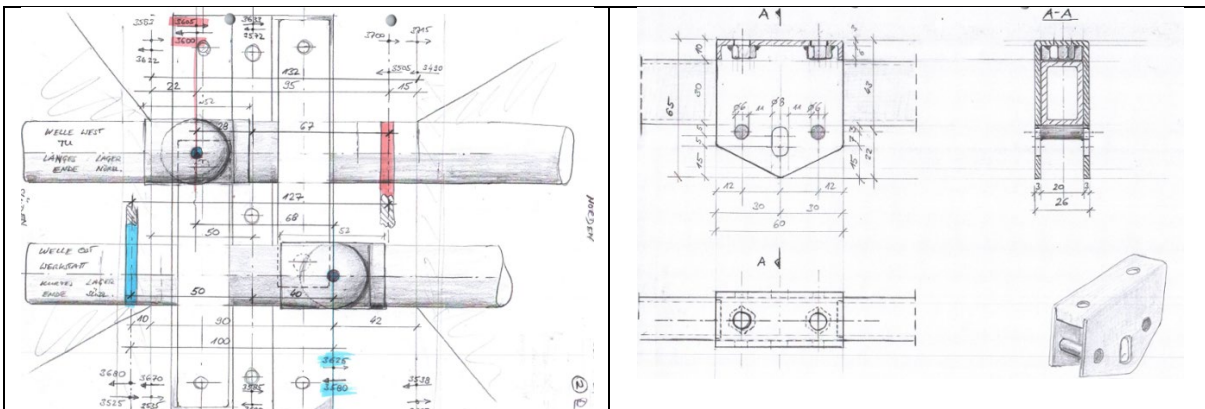




Dachverschattung: Voller Sonneneinfall, Schattenbleche in den Shed-Tälern „geparkt“.

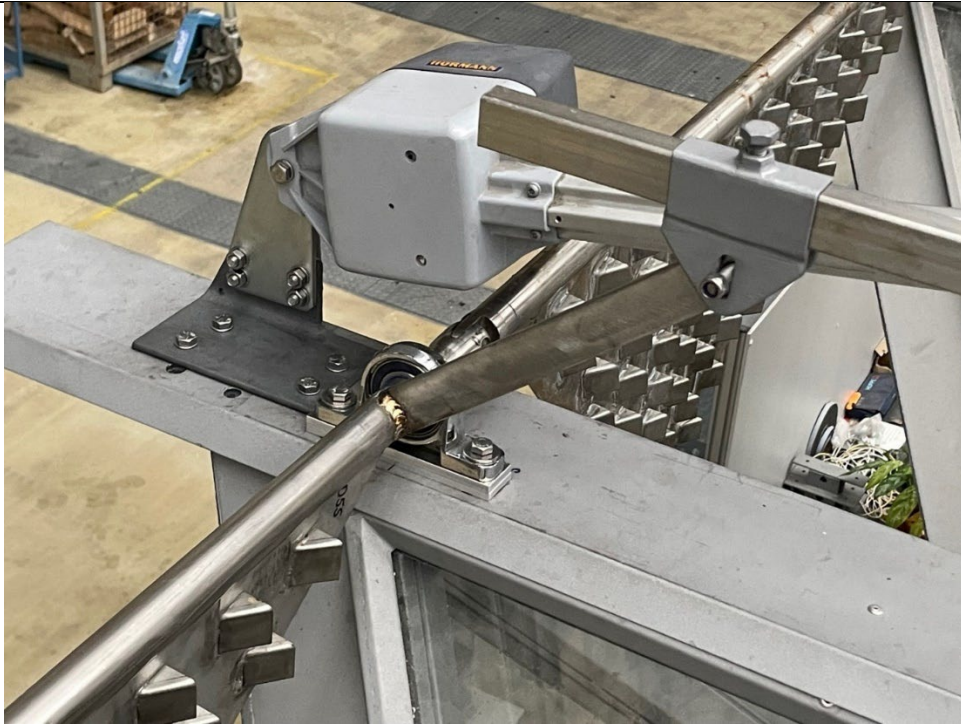


Dachverschattung: aktiviert; für die offenen Quadrate ist feststehende Photovoltaik vorgesehen.



Dachverschattung. Links: Situation Wellenstoß mit Lagerböcken und Antriebshebeln; rechts: Konzept Schlitten für die justierbare Verbindung zwischen Dreharm und Schubstange.



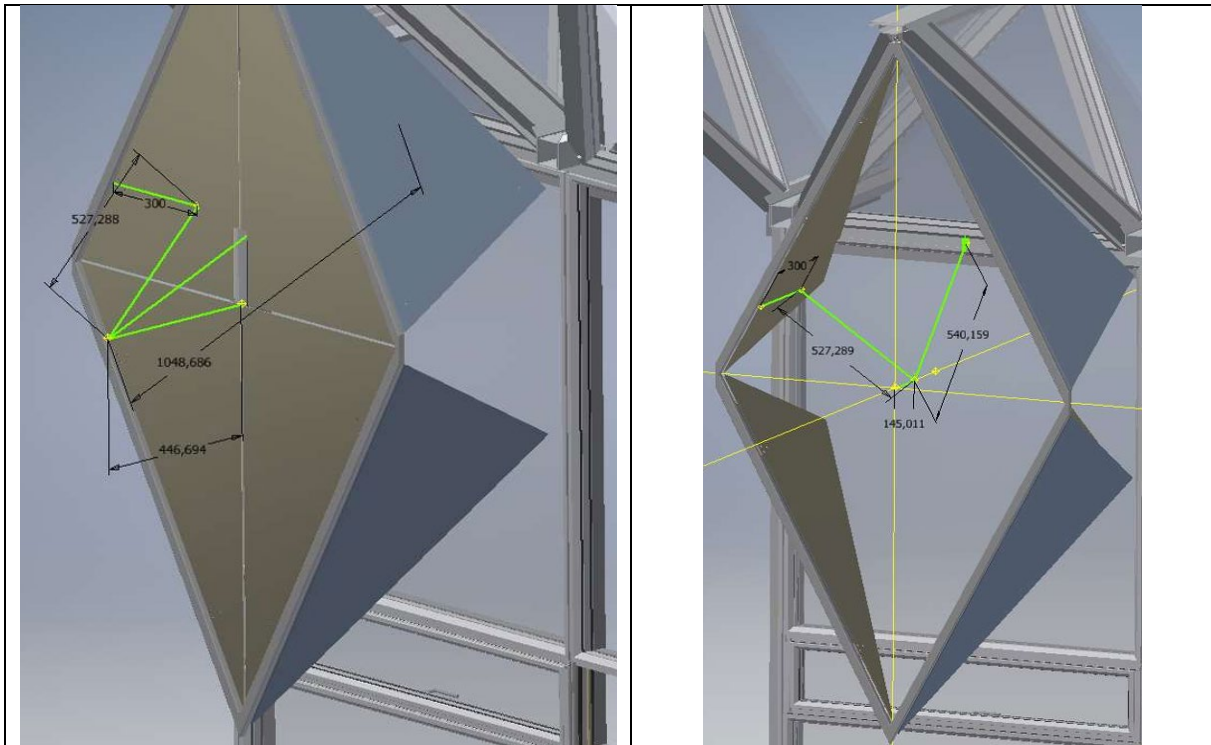


Dachverschattung: Antriebsmotor West und westlichste Welle mit Wellenstoß, Dreharm, Anschlusschlitten an der Schubstange des gegenüberliegenden Antriebsmotors Ost, Schattenbleche mit aufgelöteten Hutzen.

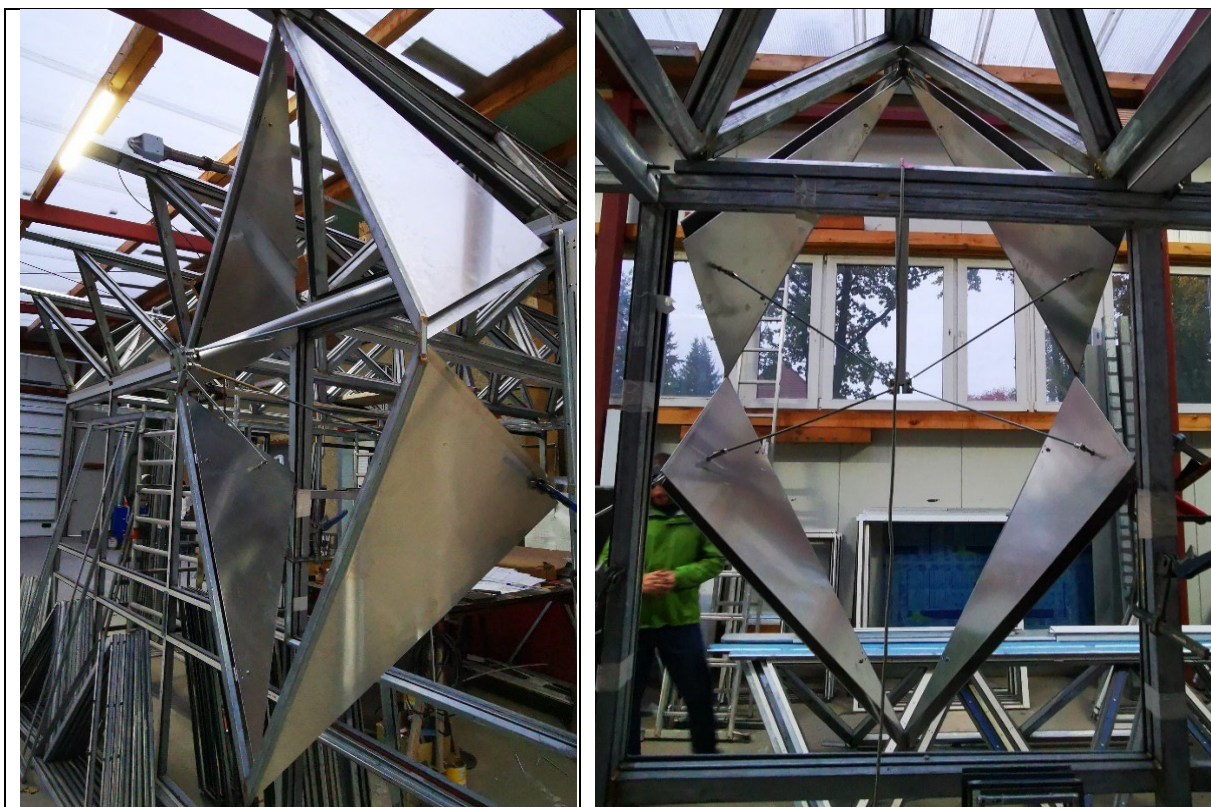


Dachverschattung: Verschweißen der Schattenbleche mit der Welle; vorab montierte Lagerböcke.



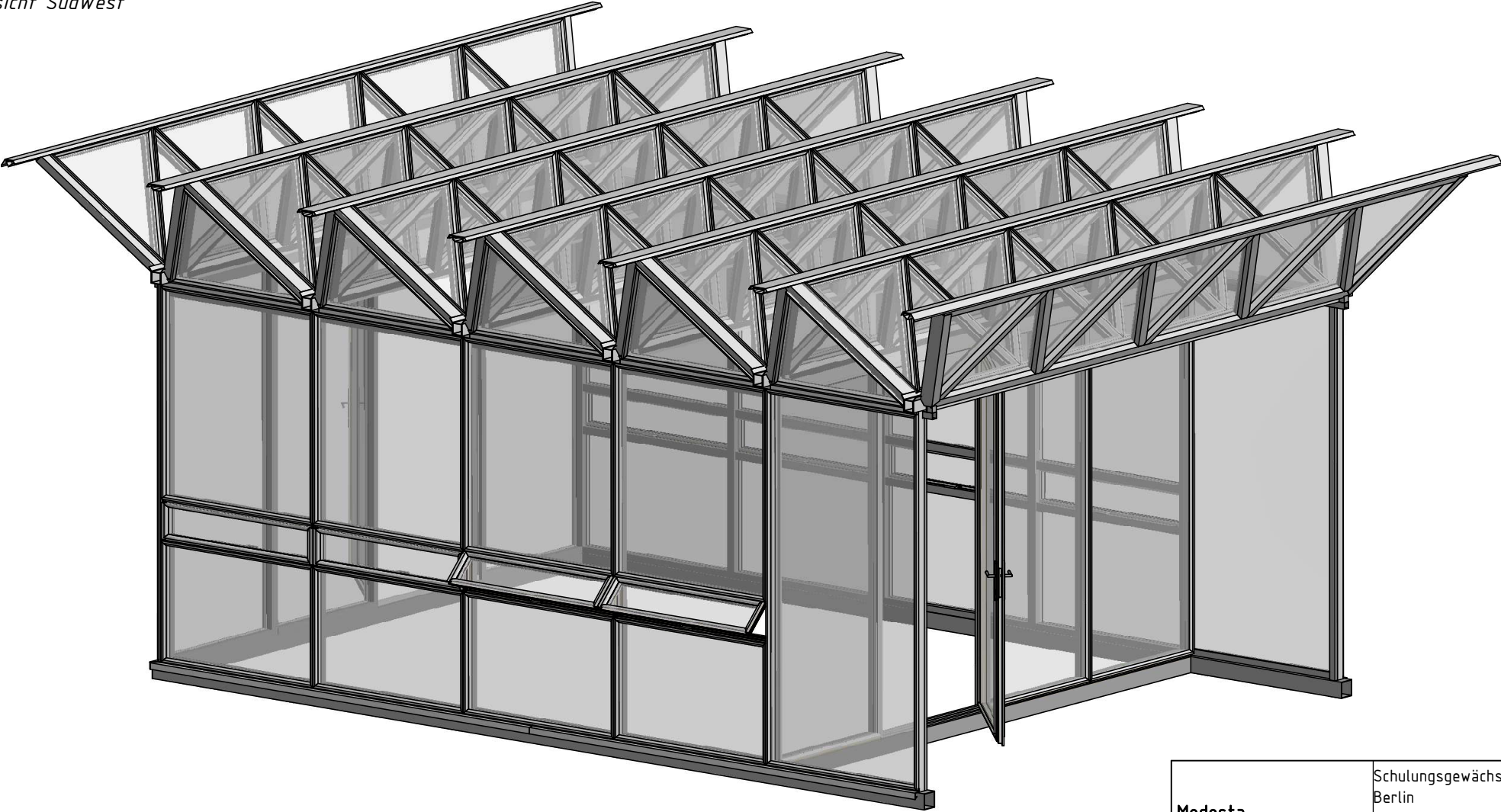


Fassadenverschattung: Konzept außen stehende Zentralspindel als Antrieb, Ansicht von außen.



Fassadenverschattung: Prototyp Zentralspindel, Ansicht geöffnet von außen und von innen.

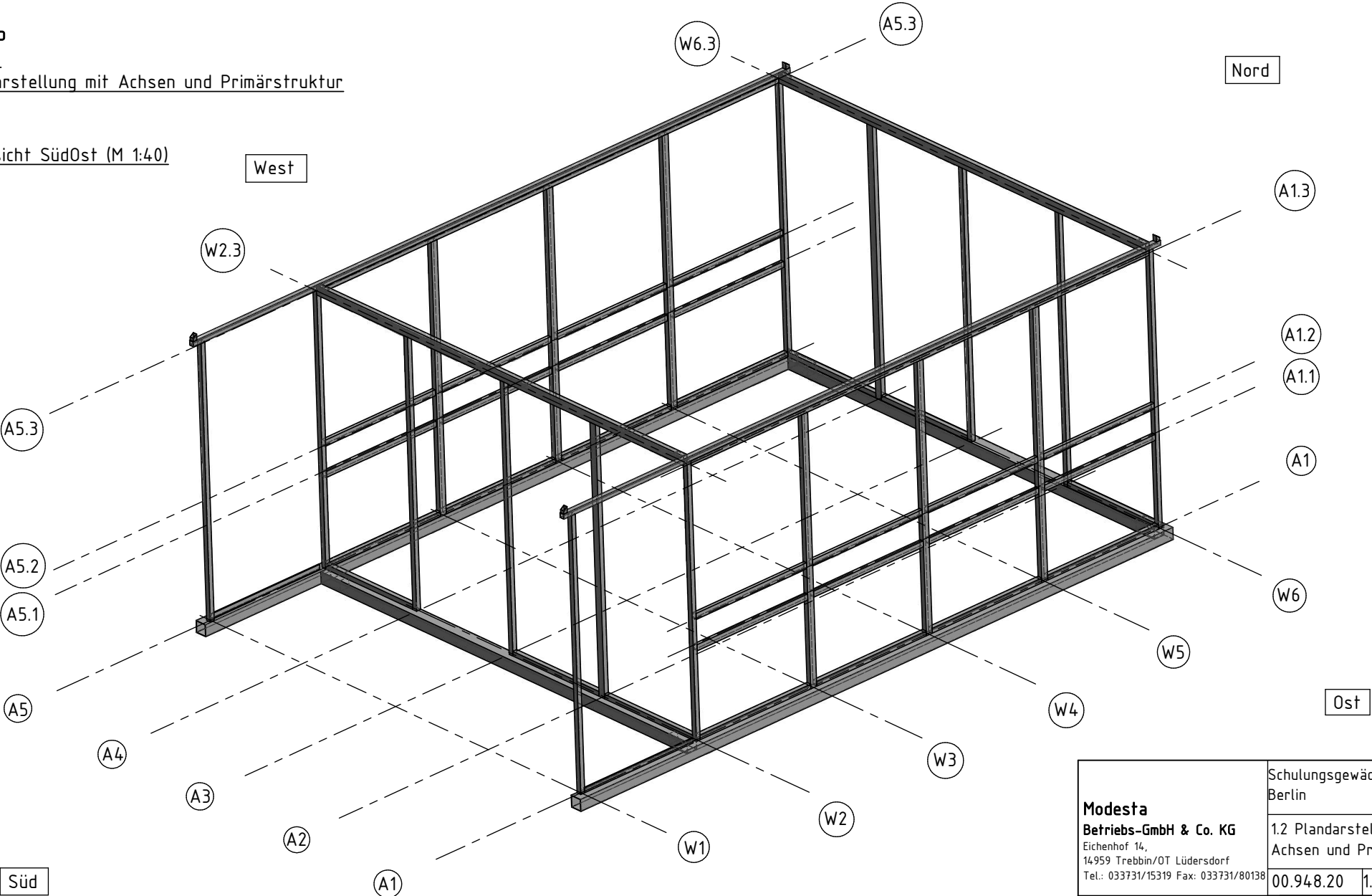
Mockup  
Ansicht SüdWest



|                                                                                                                                             |                                   |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin |         |
|                                                                                                                                             | Mockup, Ansicht<br>SüdWest        |         |
|                                                                                                                                             | 00.948.20                         | MU 1 SW |
|                                                                                                                                             |                                   | M 1:35  |
| Farbe: DB 701 1/2K<br>Kassetten: RAL 9001<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t                                               |                                   |         |

Mockup  
Wände  
Plandarstellung mit Achsen und Primärstruktur

Ansicht SüdOst (M 1:40)

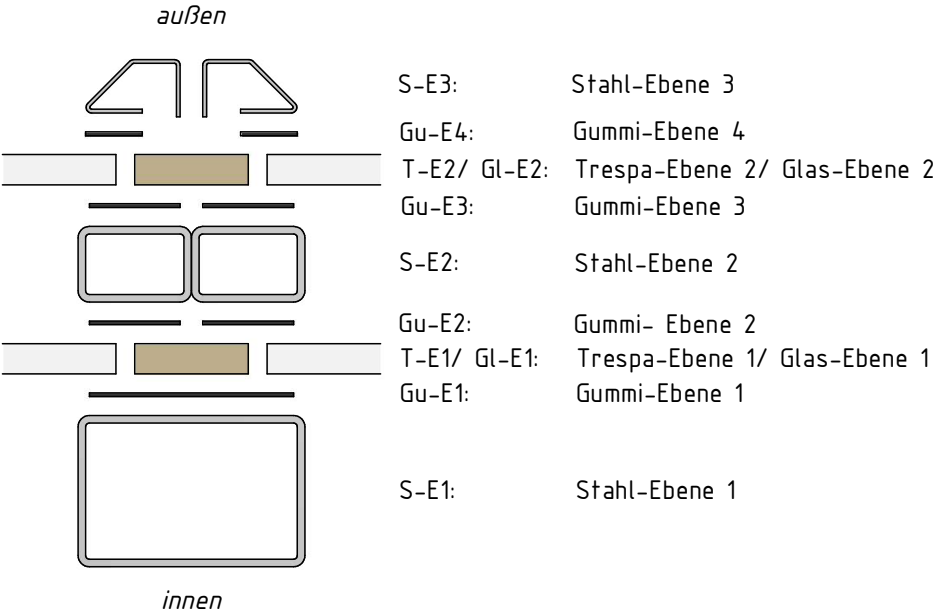


|                                                                                                                                             |                                                                                               |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin                                                             |          |
|                                                                                                                                             | 1.2 Plandarstellung mit<br>Achsen und Primärstruktur                                          |          |
|                                                                                                                                             | 00.948.20                                                                                     | 1.2 PD A |
|                                                                                                                                             |                                                                                               | M 1:40   |
|                                                                                                                                             | Farbe: DB 701 1/2K<br>Kassetten: RAL 9001<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t |          |

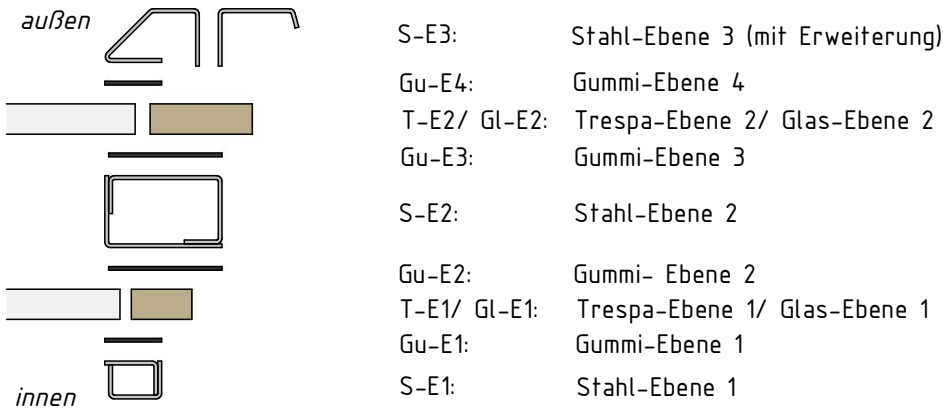


**WAND**  
**Baupläne zur Herstellung der Bauteile und Rahmen**  
Plandarstellung der Bauteile

Bauteile Pfostenprofil Regel Explosion (M 1:2)



Bauteile Pfosten-Fensterprofil Regel Explosion (M 1:2)



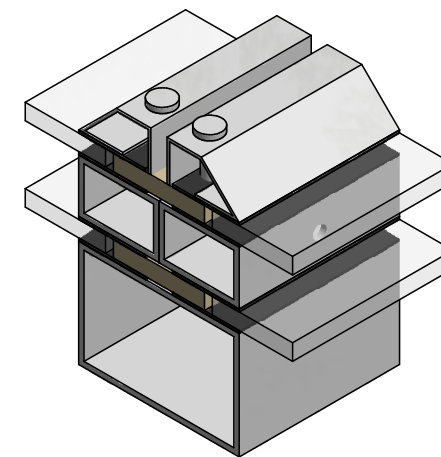
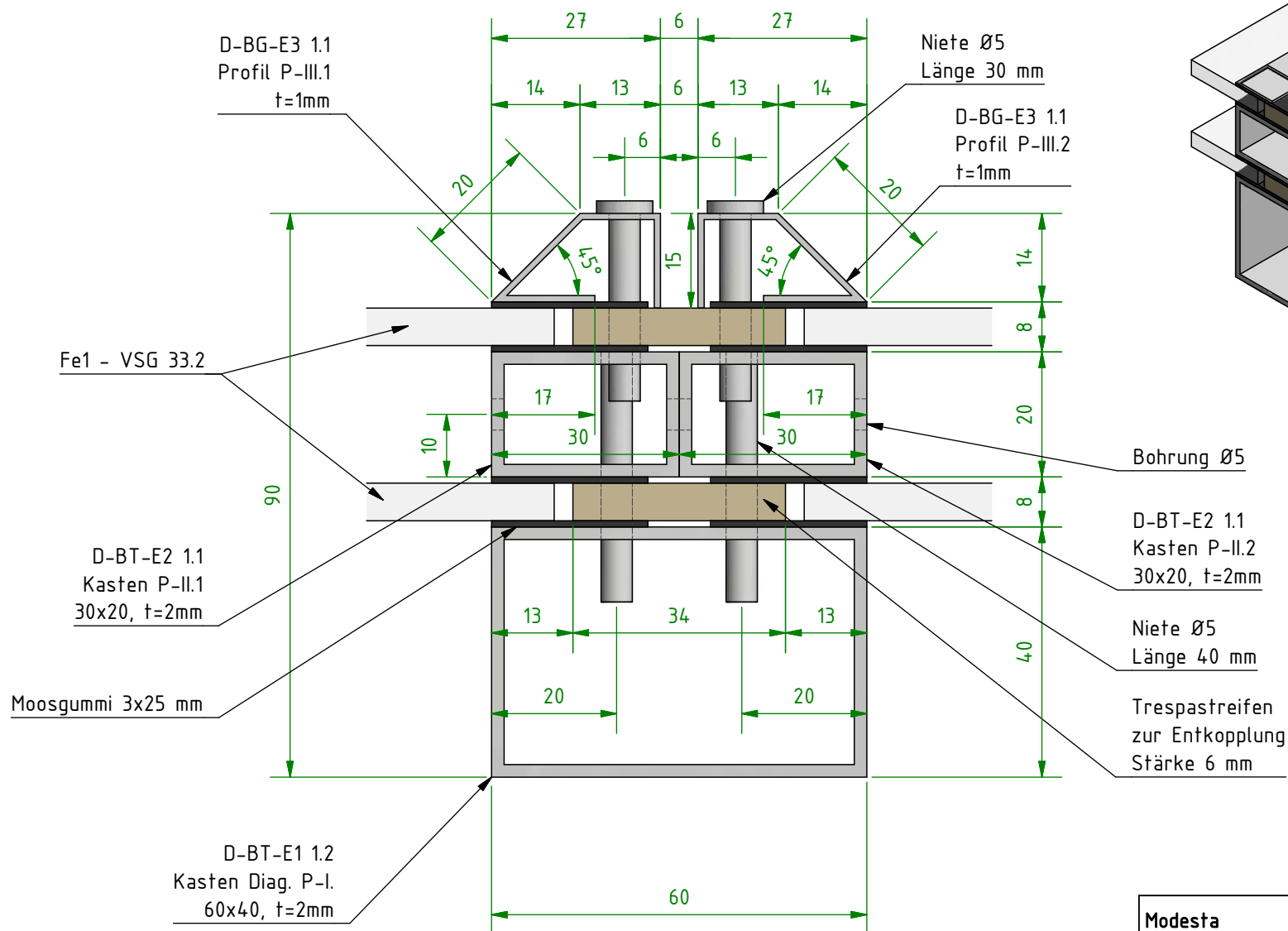
|                                                                                                                                             |                                                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus<br>TU Berlin                                                             |           |
|                                                                                                                                             | 2.0 Baupläne zur Herstellung d.<br>Fensterrahmen und Wände:<br>Darstellung der Bauteile       |           |
|                                                                                                                                             | 00.948.20                                                                                     | 2.0 PD BT |
|                                                                                                                                             |                                                                                               | M 1:2     |
|                                                                                                                                             | Farbe: DB 701 1/2K<br>Kassetten: RAL 9001<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t |           |

Ebene:

III.

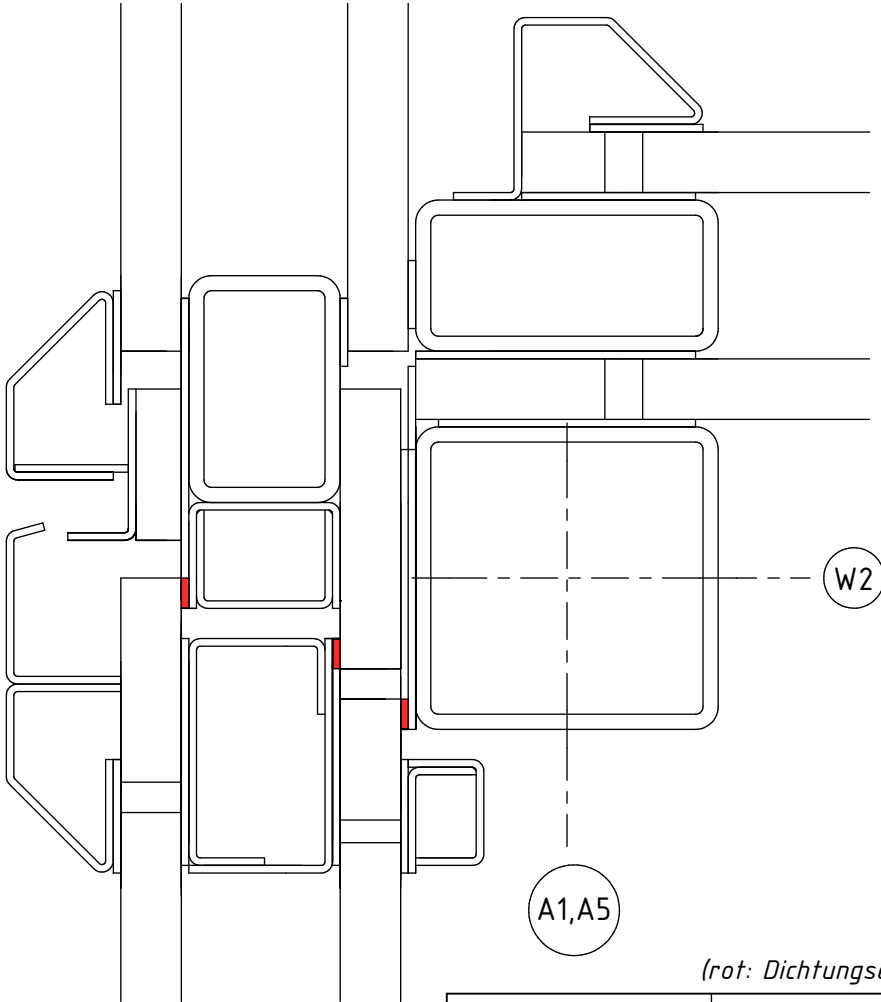
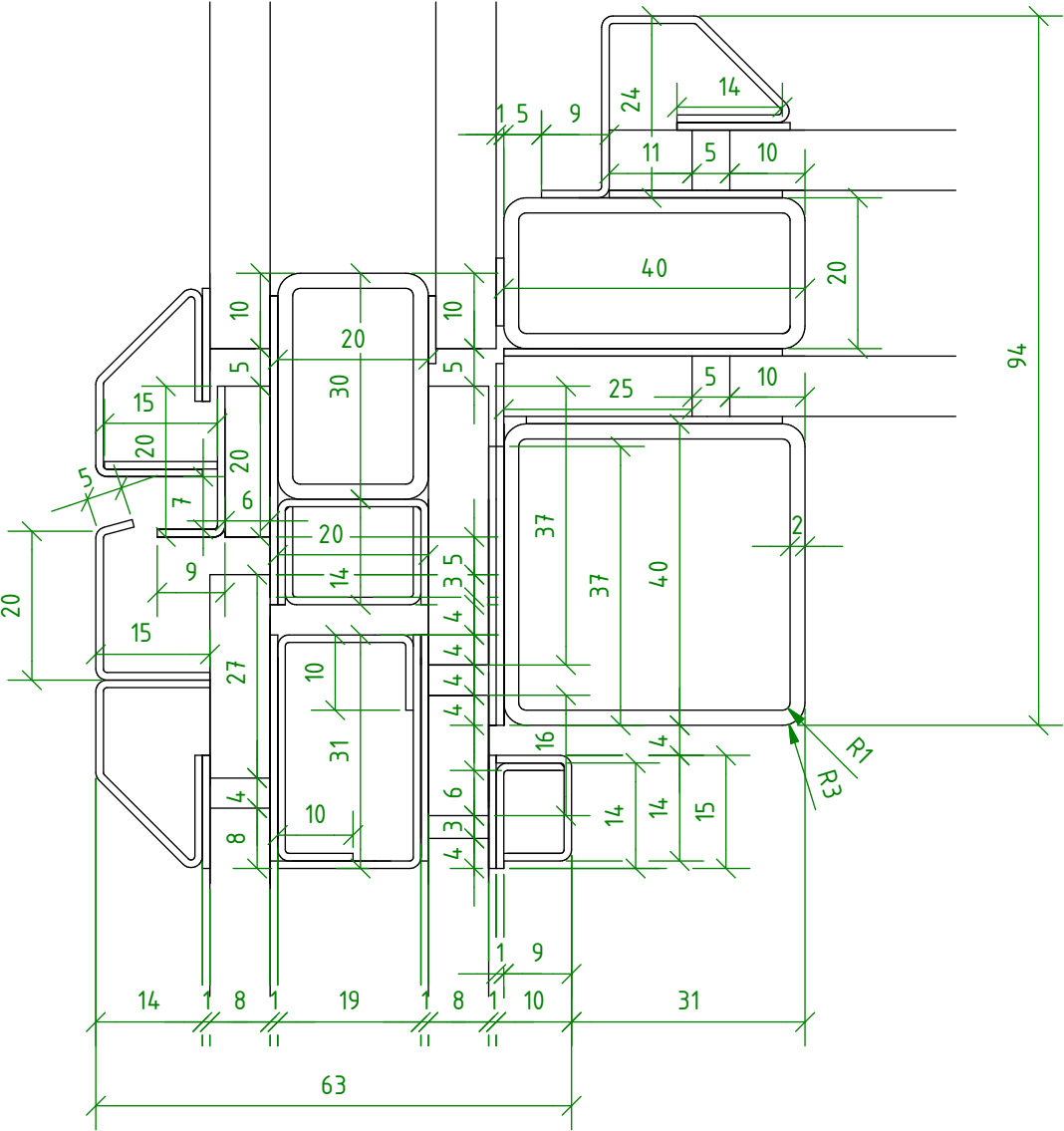
II.

I.



|                                                                                                                                             |                                |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU Berlin |        |
|                                                                                                                                             | Dach: Pfostenprofil Regel      |        |
|                                                                                                                                             | 00.948.20                      | D-P1.1 |
|                                                                                                                                             |                                | M 1:1  |
| Farbe: DB 701 K1/2<br>Kassetten: RAL 9010<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t                                               |                                |        |

Anmerkung:  
Die Profile des beweglichen Fensters wurden aufgrund der hier erforderlichen  
Planungsgenauigkeit mit realitätsnahen Radien gezeichnet.



(rot: Dichtungsebenen)

|                                                                                                                                             |                                   |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin |        |
|                                                                                                                                             | Pfosten-Fensterprofil<br>Ecke Süd |        |
|                                                                                                                                             | 00.948.20                         | W-P3.1 |
|                                                                                                                                             |                                   | M 1:1  |
| Farbe: DB 701 1/2K<br>Kassetten: RAL 9001<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t                                               |                                   |        |

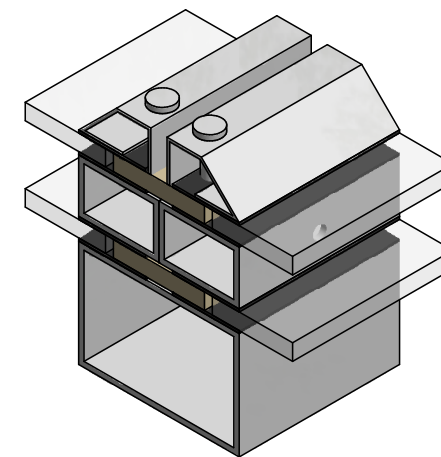
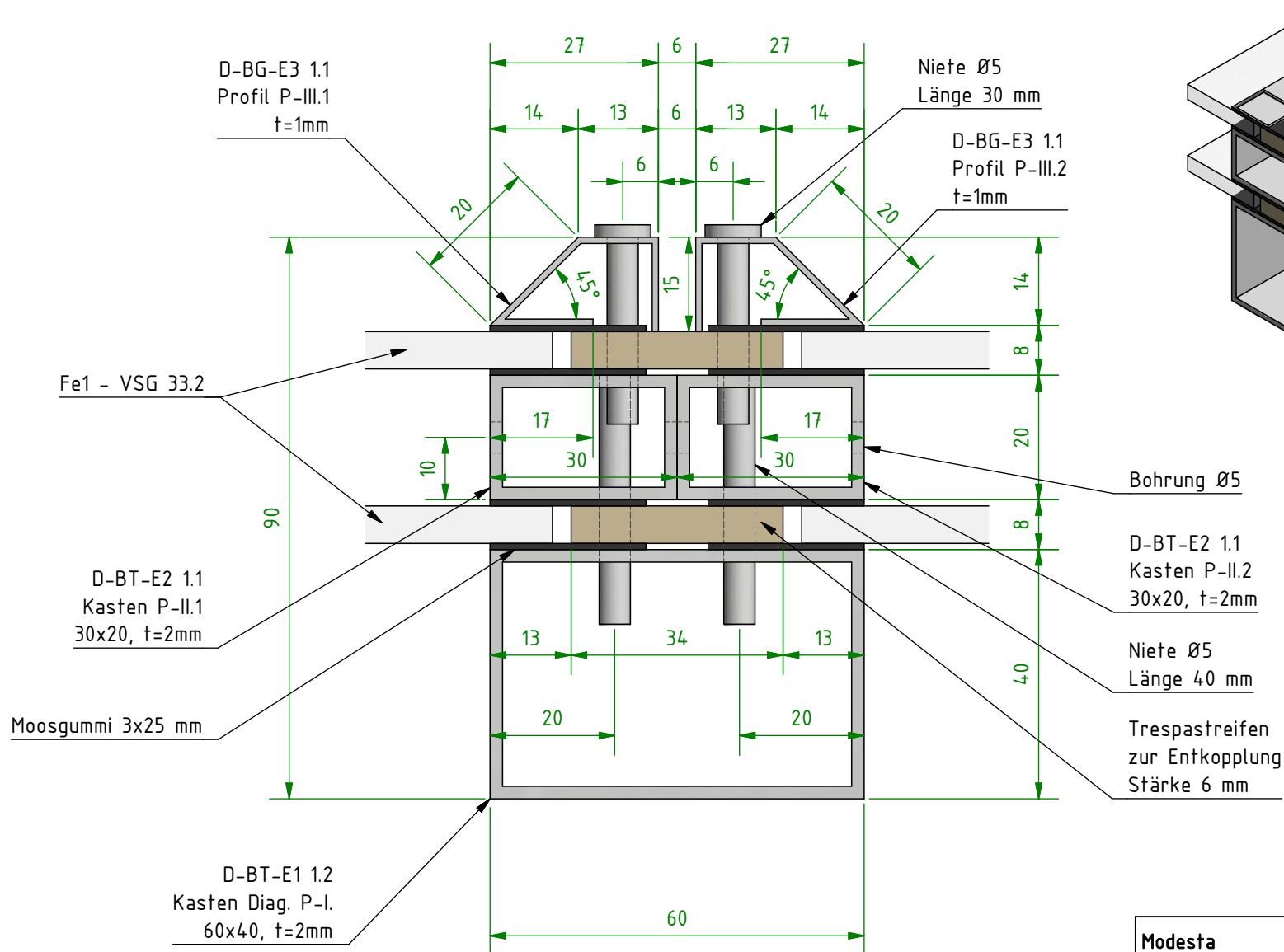


Ebene:

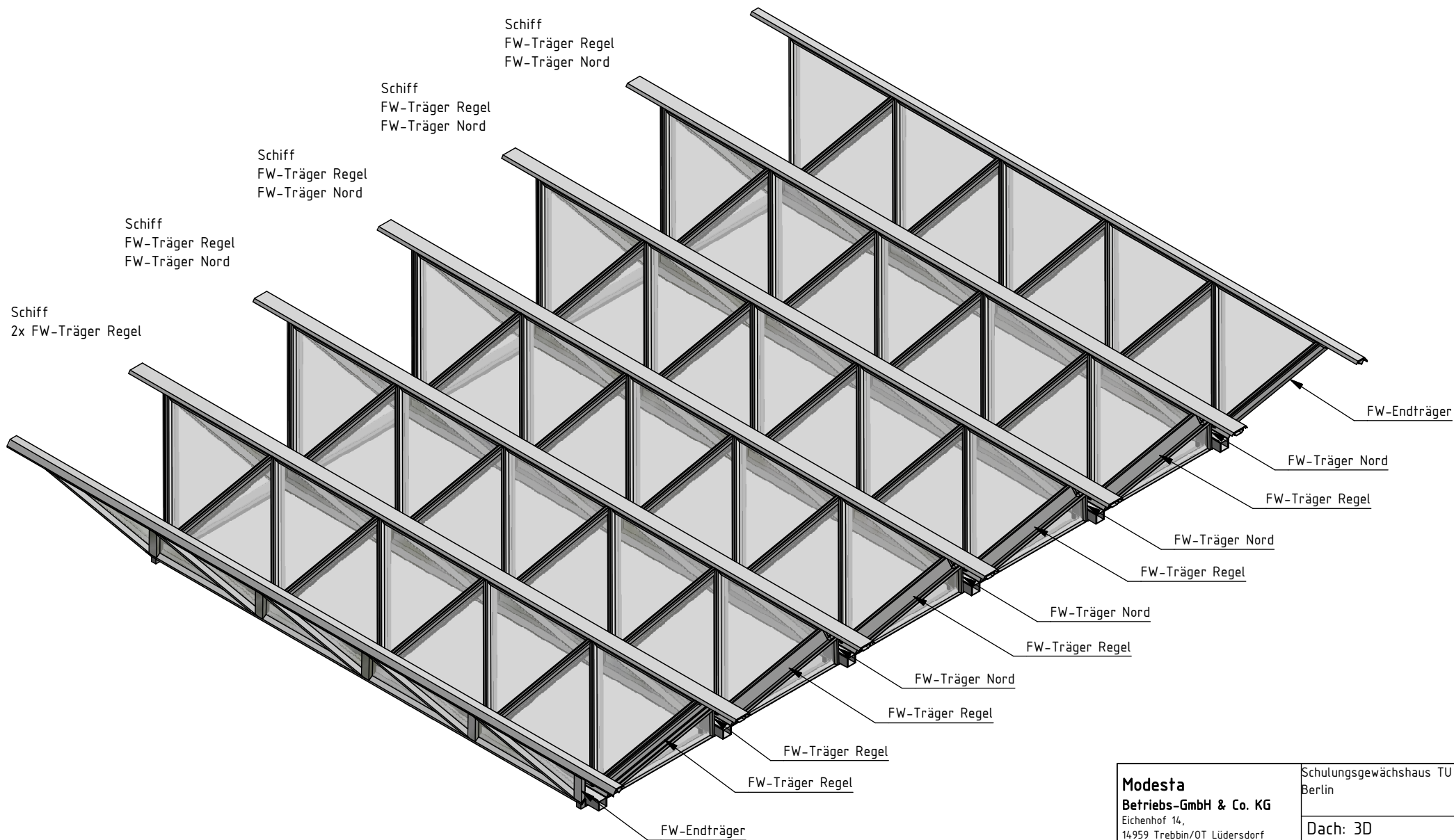
III.

II.

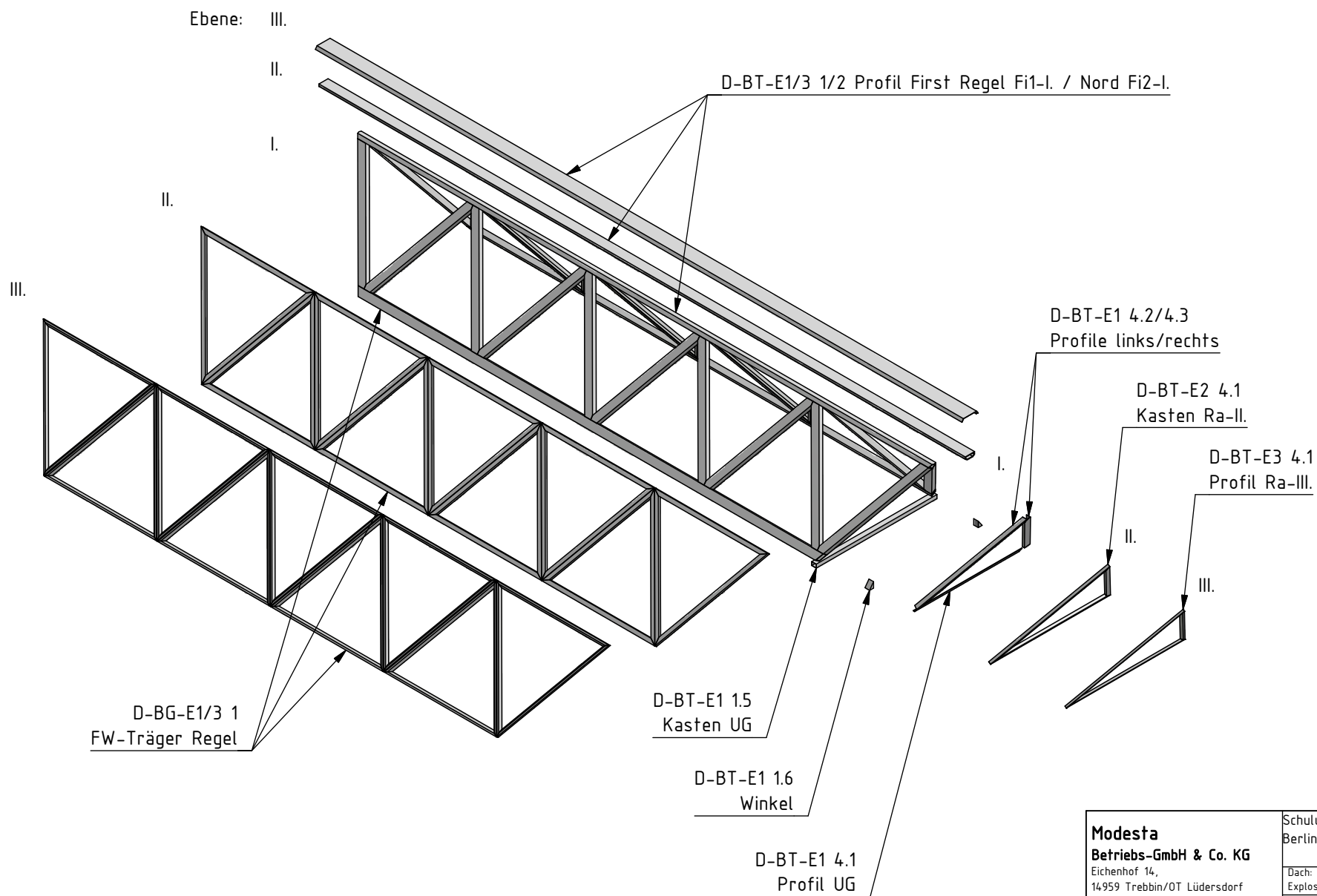
I.



|                                                                                                                                             |  |                                                                                               |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 |  | Schulungsgewächshaus TU Berlin                                                                |        |
|                                                                                                                                             |  | Dach: Pfostenprofil Regel                                                                     |        |
|                                                                                                                                             |  | 00.948.20                                                                                     | D-P1.1 |
|                                                                                                                                             |  |                                                                                               | M: 1:1 |
|                                                                                                                                             |  | Farbe: DB 701 K1/2<br>Kassetten: RAL 9010<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t |        |



|                                                                                                                                             |                                |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU Berlin |      |
|                                                                                                                                             | Dach: 3D                       |      |
|                                                                                                                                             | 00.948.20                      | D-BG |
|                                                                                                                                             |                                | M:   |
| Farbe: DB 701 1/2K<br>Kassetten: RAL 9010<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t                                               |                                |      |



**Modesta**  
**Betriebs-GmbH & Co. KG**  
 Eichenhof 14,  
 14959 Trebbin/OT Lüdersdorf  
 Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138

Schulungsgewächshaus TU  
 Berlin

Dach: Gesamtansicht  
 Explosionszeichnung

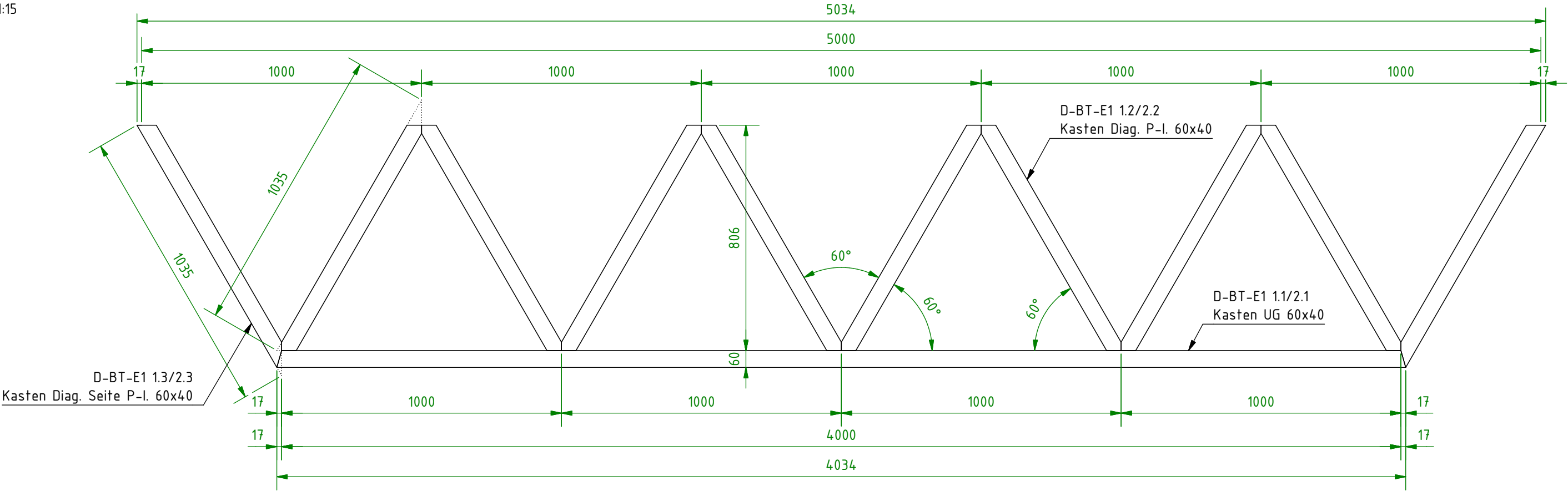
00.948.20

D-BG-E1/3

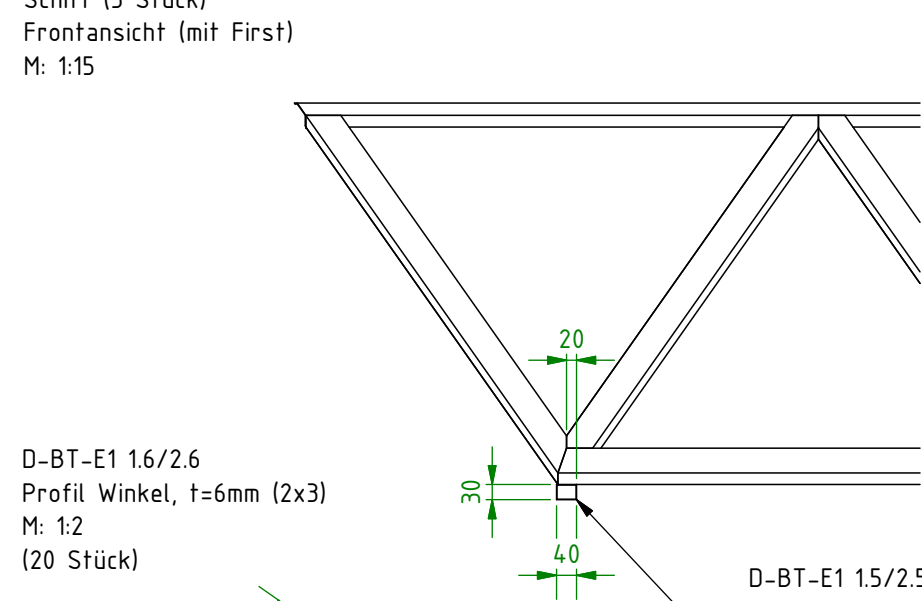
03.12.2020

M: 1:50

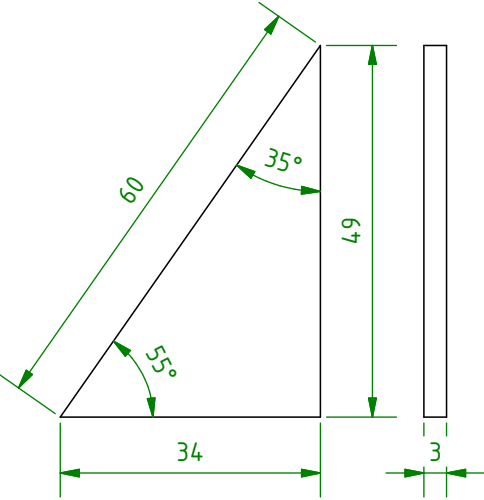
D-BG-E1 1/2  
FW-Träger Regel/Nord - Gesamtansicht (ohne First)  
(10 Stück)  
M: 1:15



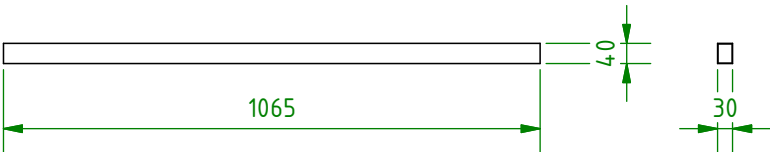
Schiff (5 Stück)  
Frontansicht (mit First)  
M: 1:15



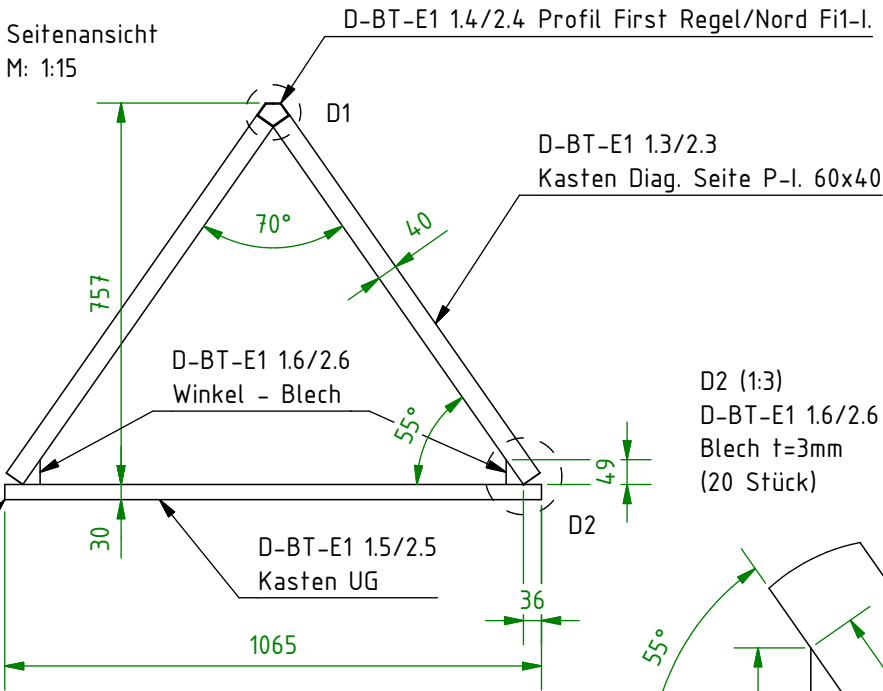
D-BT-E1 1.6/2.6  
Profil Winkel, t=6mm (2x3)  
M: 1:2  
(20 Stück)



D-BT-E1 1.5/2.5  
Kasten UG 40x30, t=2mm  
M: 1:15  
(10 Stück)

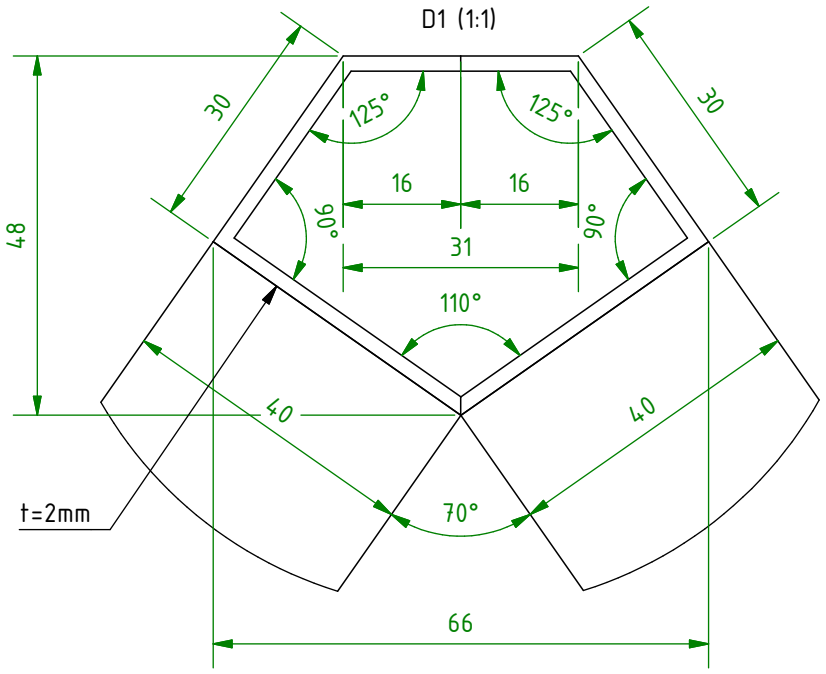
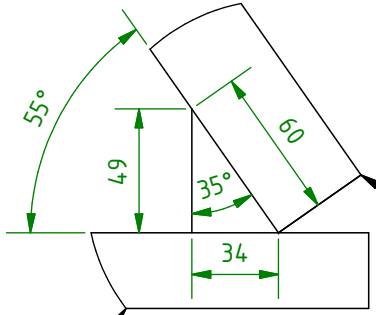


Seitenansicht  
M: 1:15



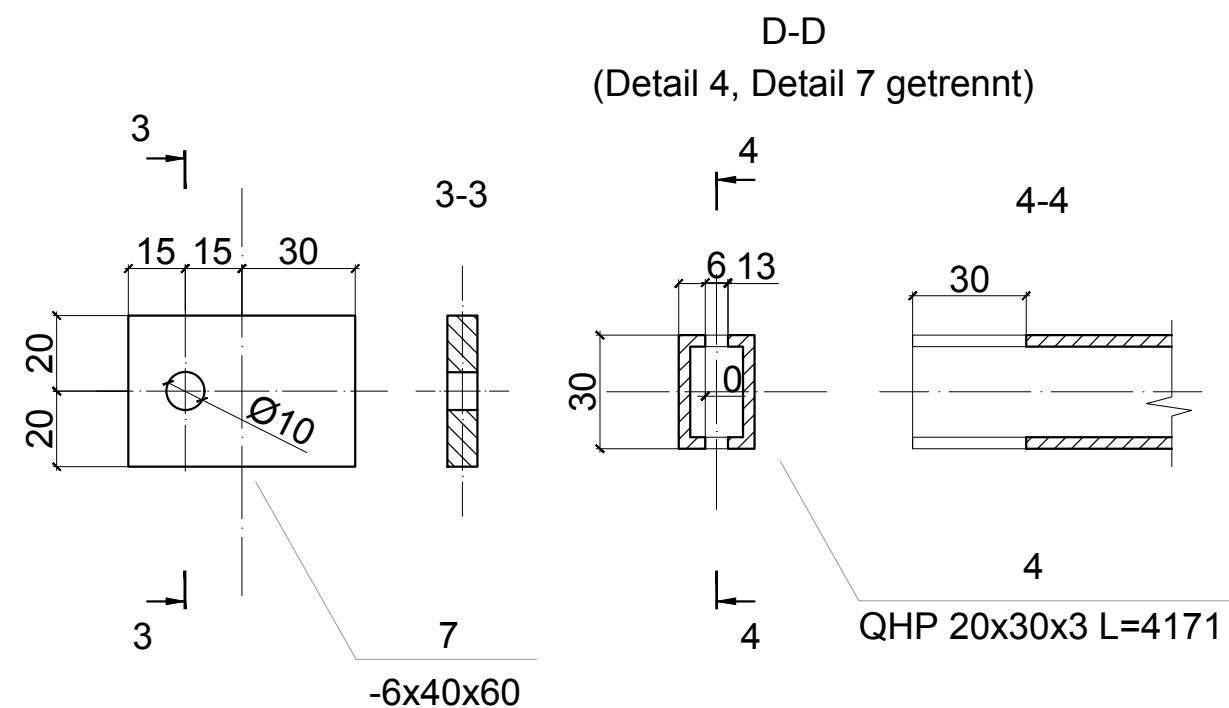
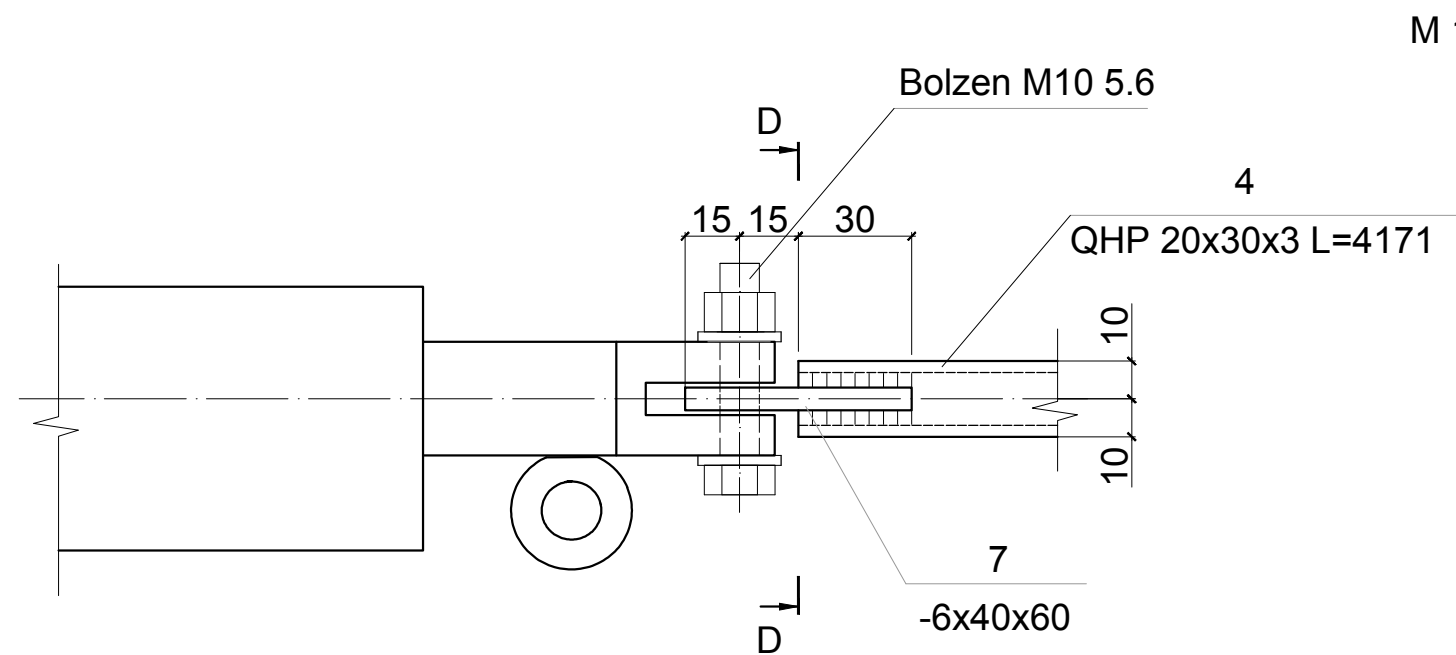
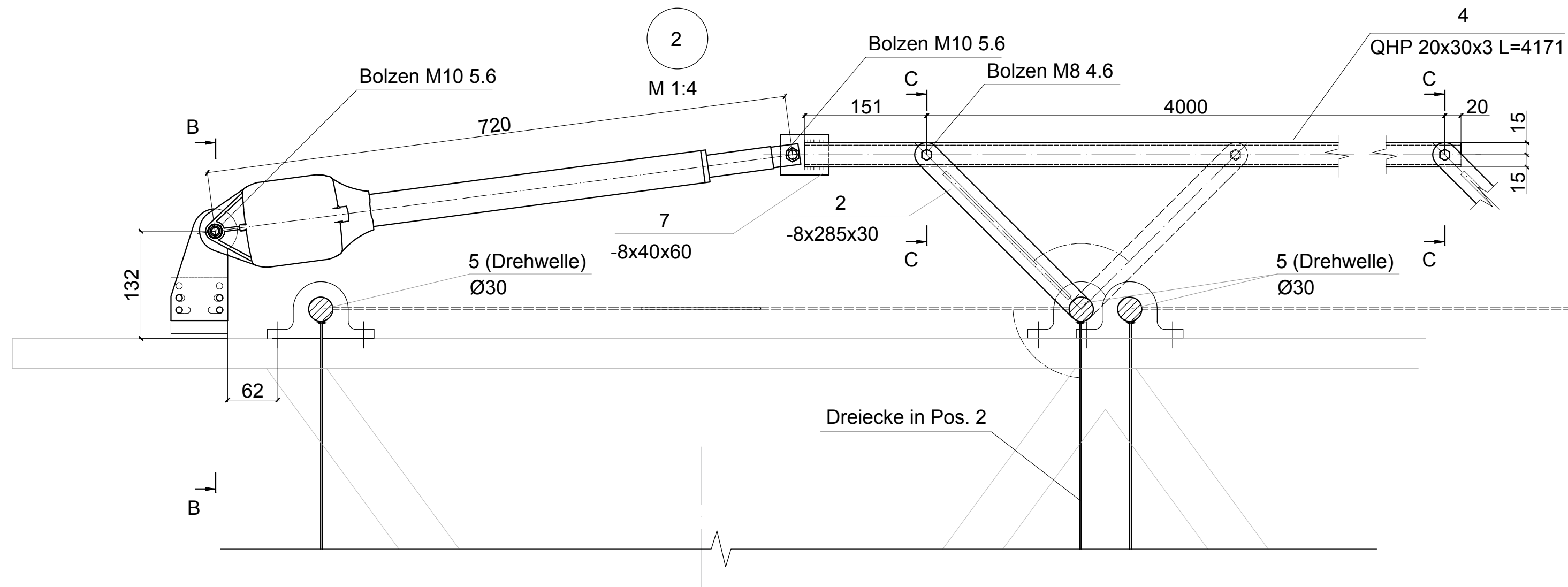
D2 (1:3)  
D-BT-E1 1.6/2.6 Winkel  
Blech t=3mm  
(20 Stück)

D-BT-E1 1.5/2.5  
Kasten UG 40x30



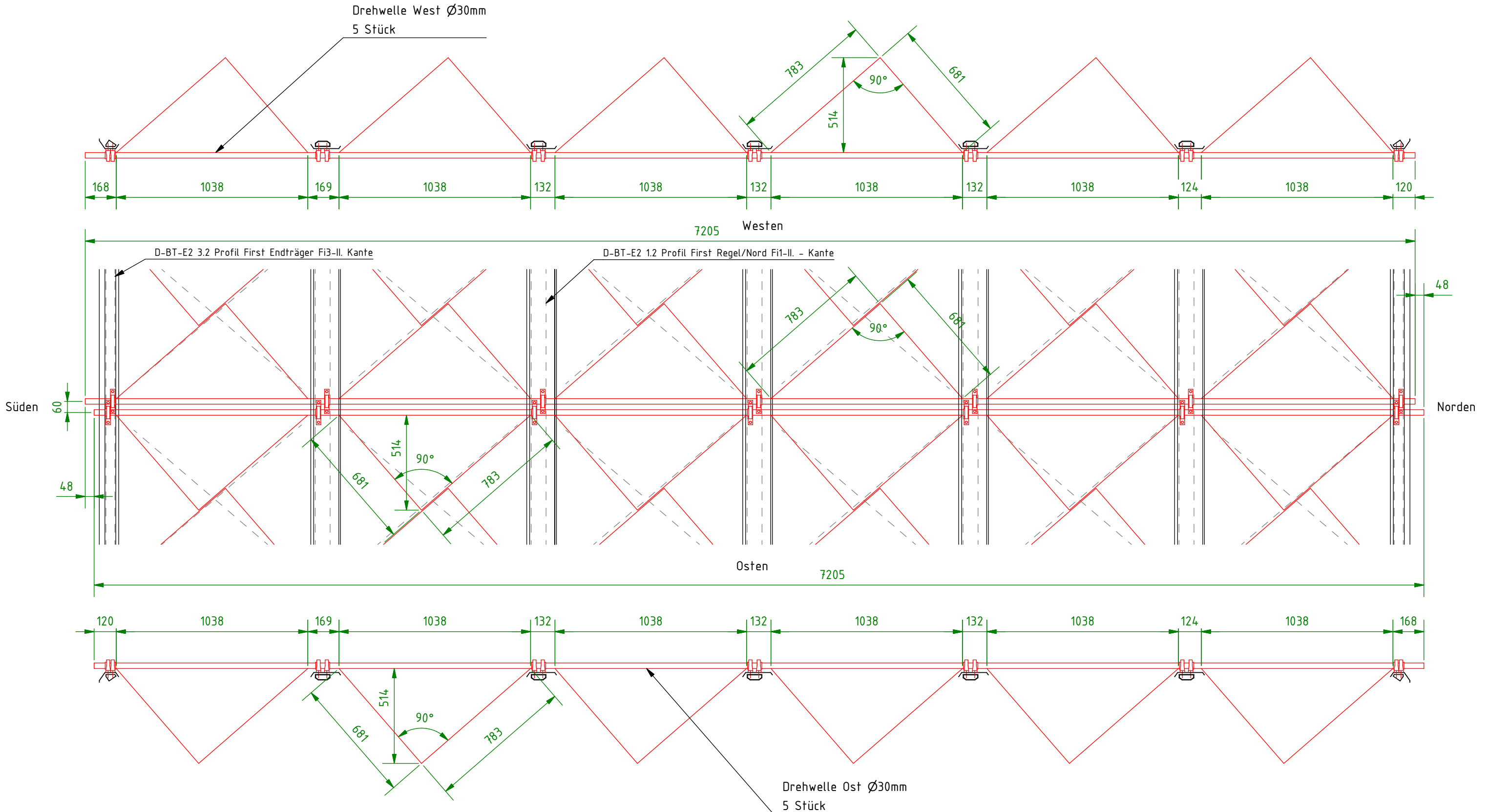
|                                                                                                                                             |                                                                                               |                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin                                                             |                   |
|                                                                                                                                             | FW-Träger Regel/Nord                                                                          |                   |
|                                                                                                                                             | 00.948.20                                                                                     | D-BG-E1 1/2       |
|                                                                                                                                             |                                                                                               | M: 1:1, 1:2, 1:15 |
|                                                                                                                                             | Farbe: DB 701 1/2K<br>Kassetten: RAL 9010<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t |                   |



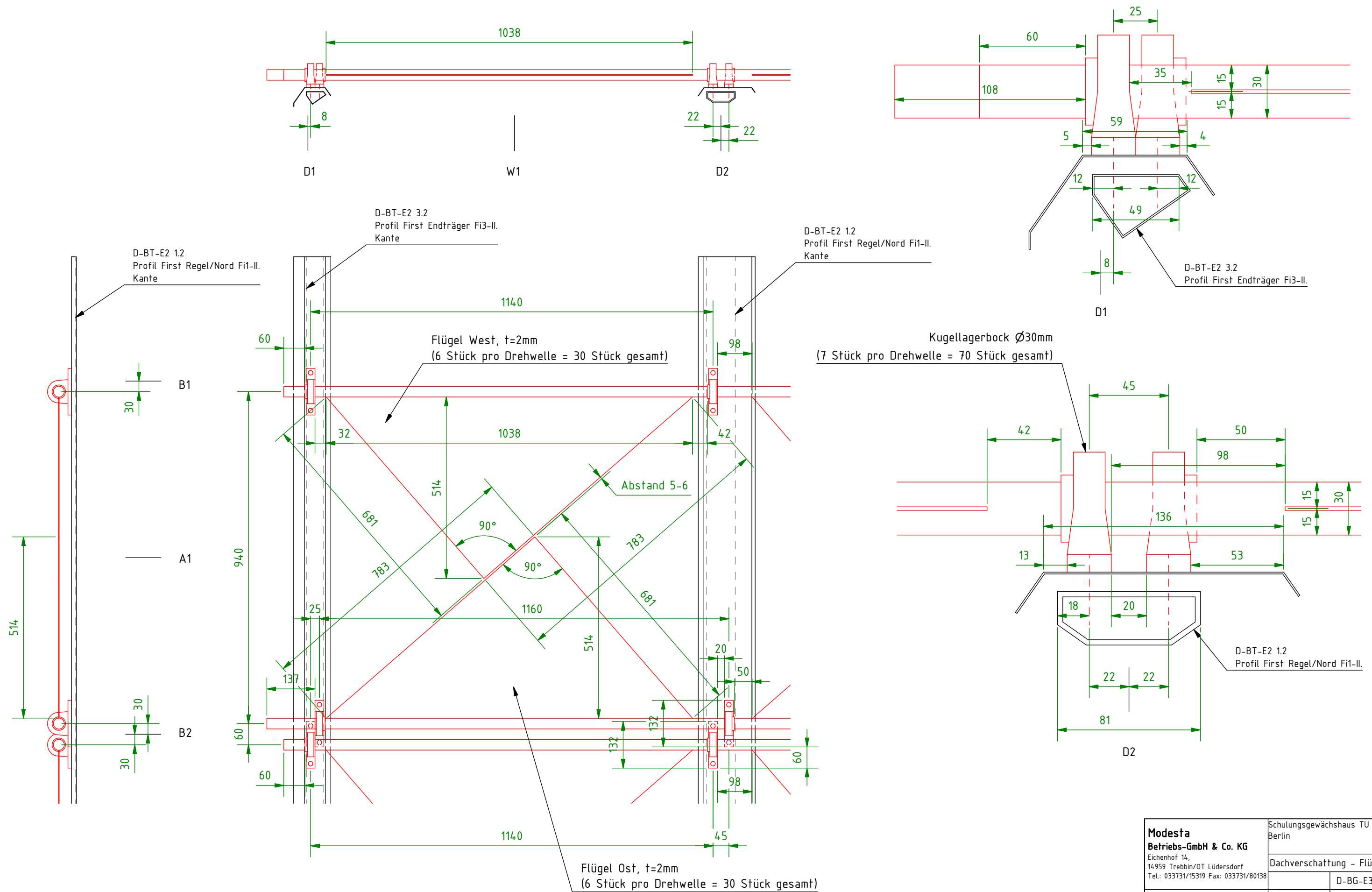


|             |            |          |           |
|-------------|------------|----------|-----------|
| bearbeitet: | P. Susanov | Maßstäbe | Blatt-Nr. |
| gezeichnet: | P. Susanov | 1:5      | 8         |
| geprüft:    | D. Peissl  | 1:2      |           |
| Datum:      | 26.IV.2021 |          |           |



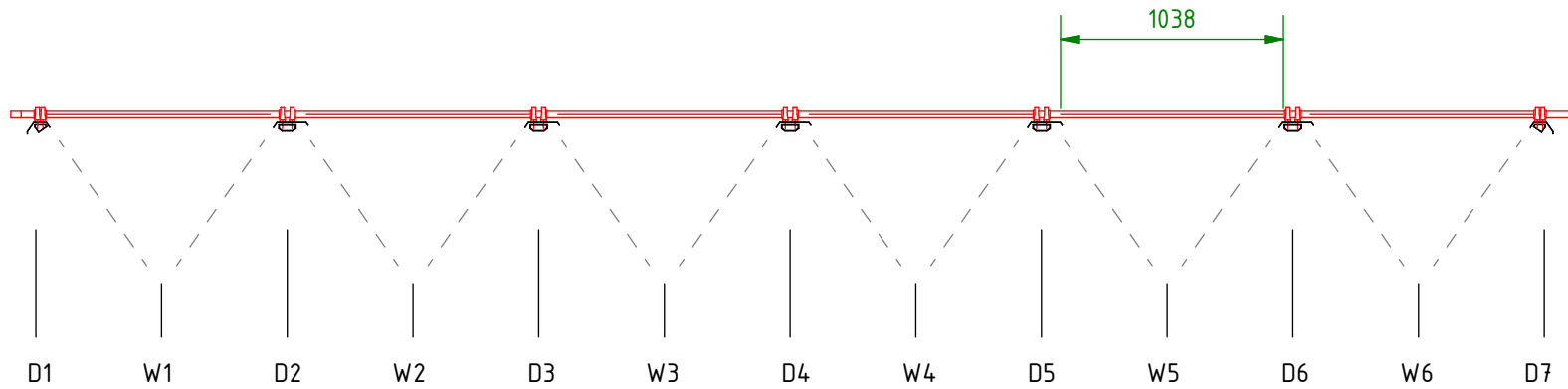


|                                                                                                                                  |                                   |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------|
| <b>Modesta</b><br>Betriebs-GmbH & Co. KG<br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin |         |
|                                                                                                                                  | Dachverschattung Drehwelle        |         |
|                                                                                                                                  | D-BG-E3                           |         |
|                                                                                                                                  | 00.94.8.20                        | M: 1:20 |

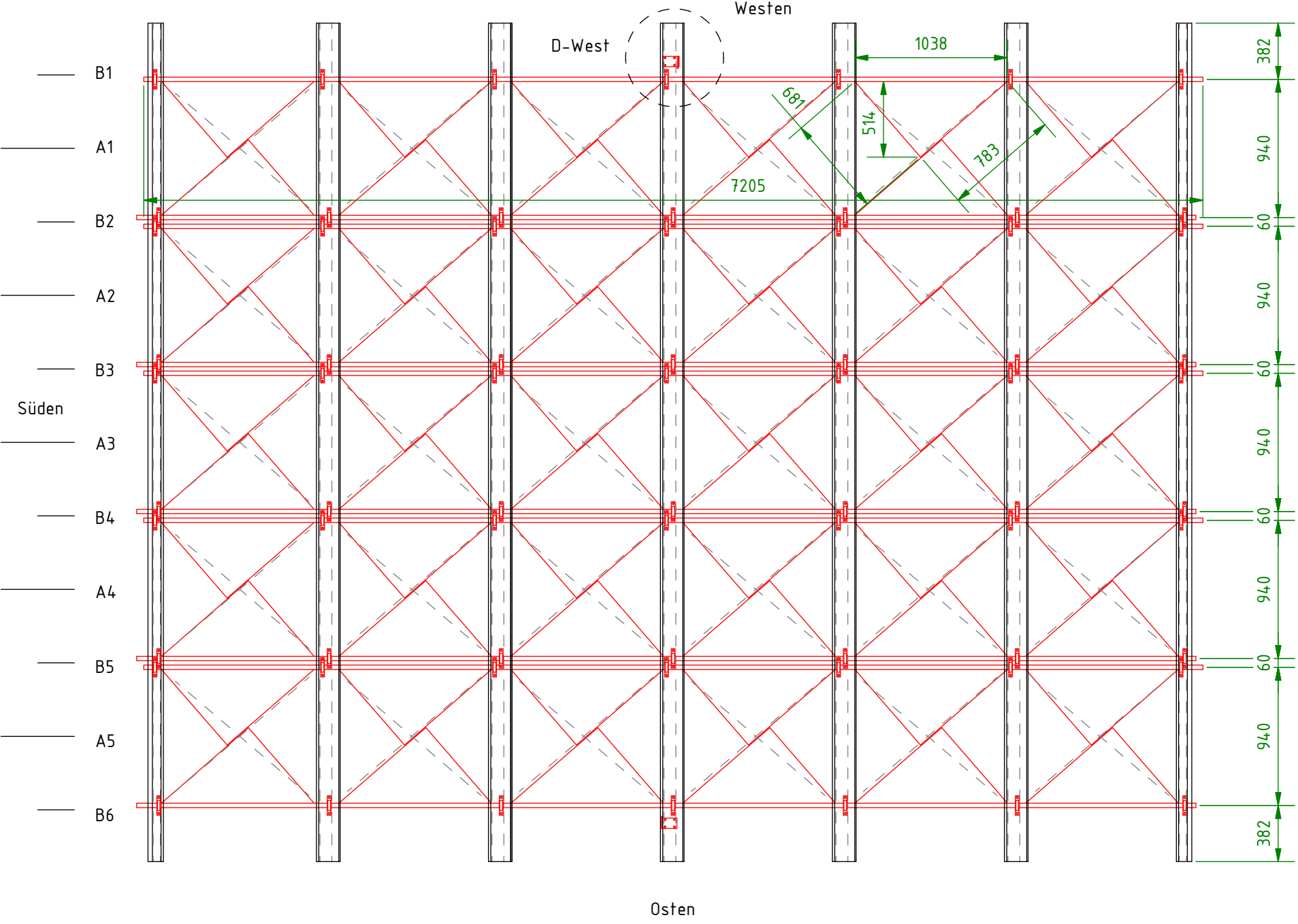
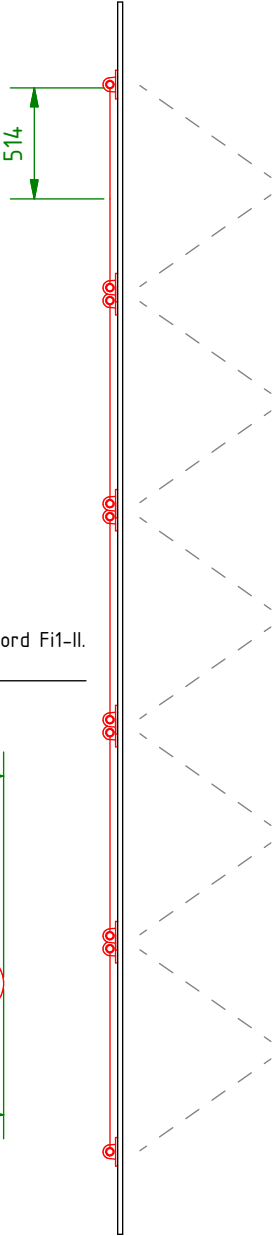
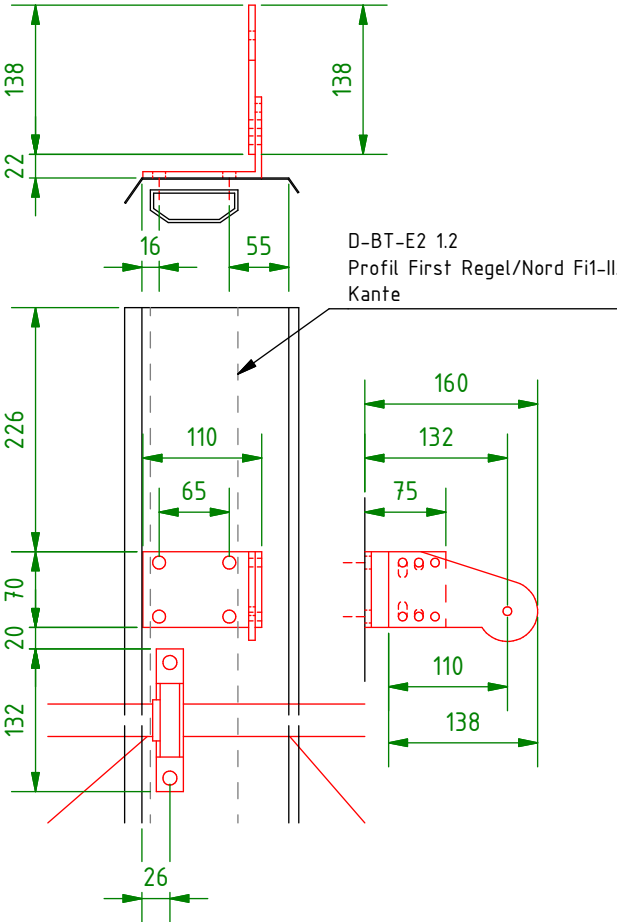


|                                                                                                                                  |                                   |              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------|
| <b>Modesta</b><br>Betriebs-GmbH & Co. KG<br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin |              |
|                                                                                                                                  | Dachverschattung - Flügel         |              |
|                                                                                                                                  | 00.948.20                         | M: 1:2, 1:10 |
| Farbe: DB 701 1/2K<br>Kassetten: RAL 9010<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t                                    |                                   |              |

Gesamtansicht  
M: 1:35



D-West  
M: 1:7

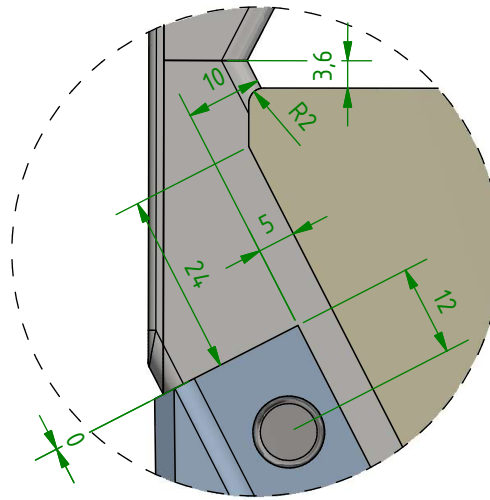


Norden

|                                                                                                                                  |  |                                                                                               |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b>Modesta</b><br>Betriebs-GmbH & Co. KG<br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 |  | Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin                                                             |         |
|                                                                                                                                  |  | Dachverschattung geöffnet                                                                     |         |
|                                                                                                                                  |  | 00.948.20                                                                                     | D-BG-E3 |
|                                                                                                                                  |  | M: 1:7, 1:35                                                                                  |         |
|                                                                                                                                  |  | Farbe: DB 701 1/2K<br>Kassetten: RAL 9010<br>Werkstoff: S235 JR verz.<br>Schweißnähte: s=0,7t |         |

Rautenkörper mit Dreiecken (FVE) hinten ( 1 : 10 )  
Zusammenbau

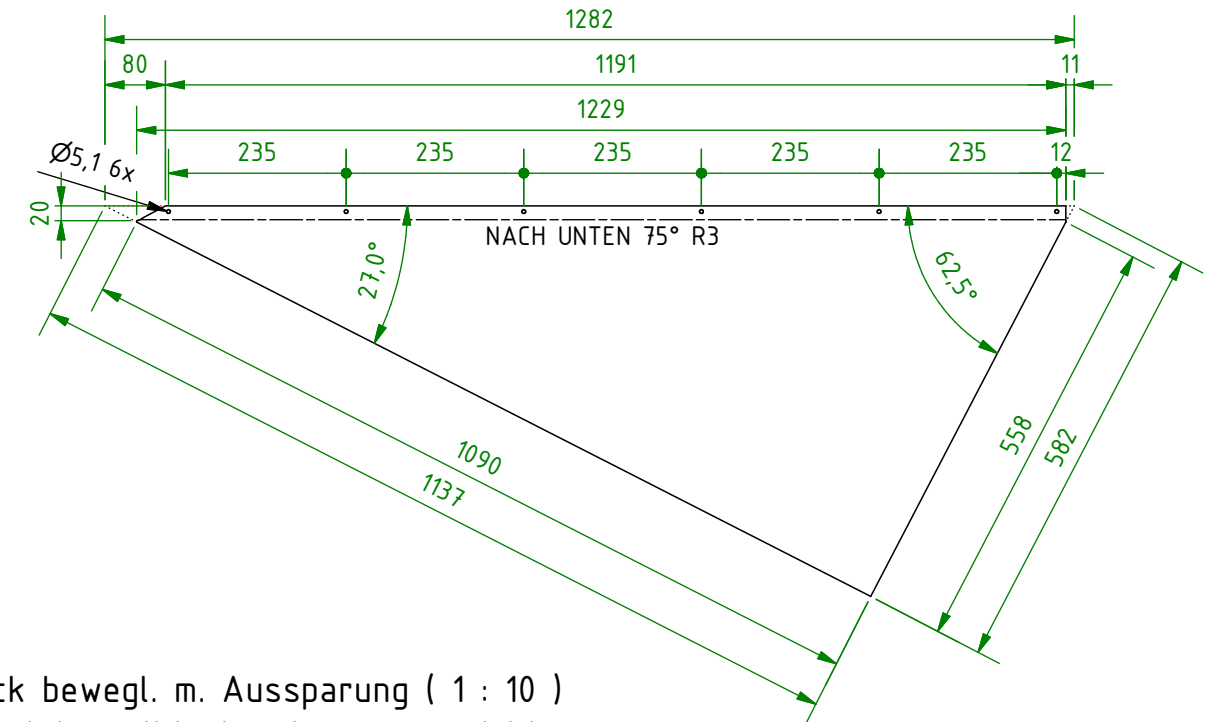
Detail ( 1 : 1 )  
*Ausrichten der Dreiecke*



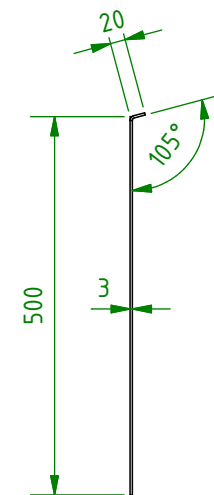
| TEILELISTE |                  |                                |                                |           |                    |                     |
|------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------|---------------------|
| OBJEKT     | ANZAHL<br>je FVE | BAUTEILBEZEICHNUNG             | BESCHREIBUNG                   | Material  | Oberfläche         | MASSE je<br>Bauteil |
| 1.1-1.5    | 1                | Rautenkörper                   | Plan FVE_Ex1_BT1               | Stahl     | lackiert: DB 701   | 7,053 kg            |
| 1.6        | 2                | Dreieck starr Typ_A            | gefaltetes Blech               | Aluminium | lackiert: RAL 9010 | 2,676 kg            |
| 1.7        | 2                | Dreieck starr Typ_B            | gefaltetes Blech               | Aluminium | lackiert: RAL 9010 | 2,676 kg            |
| 1.8        | 24               | DIN 7337 - A5 x 12             | Blindniet für bewegl. Dreiecke | Edelstahl | -                  | 0,002 kg            |
| 1.9        | 8                | Flügelscharnier                | "0-grad" Stellung              | Edelstahl | -                  | 0,092 kg            |
| 1.10       | 16               | DIN 7337 - A5 x 20             | Blindniet für Scharniere       | Edelstahl | -                  | 0,003 kg            |
| 1.11       | 2                | Dreieck beweglich m.Ausschnitt | Ebenes Blech                   | Aluminium | lackiert: RAL 9010 | 2,504 kg            |
| 1.12       | 2                | Dreieck beweglich o.Ausschnitt | Ebenes Blech                   | Aluminium | lackiert: RAL 9010 | 2,536 kg            |
| 1.13       | 16               | DIN 7337 - A5 x 10             | Blindniet für starre Dreiecke  | Edelstahl | -                  | 0,002 kg            |

```
Dreieck starr Typ_A ( 1 : 10 )
```

Abwicklung; Biegung bei Typ\_B erfolgt in entgegengesetzte Richtung - sonst gleich

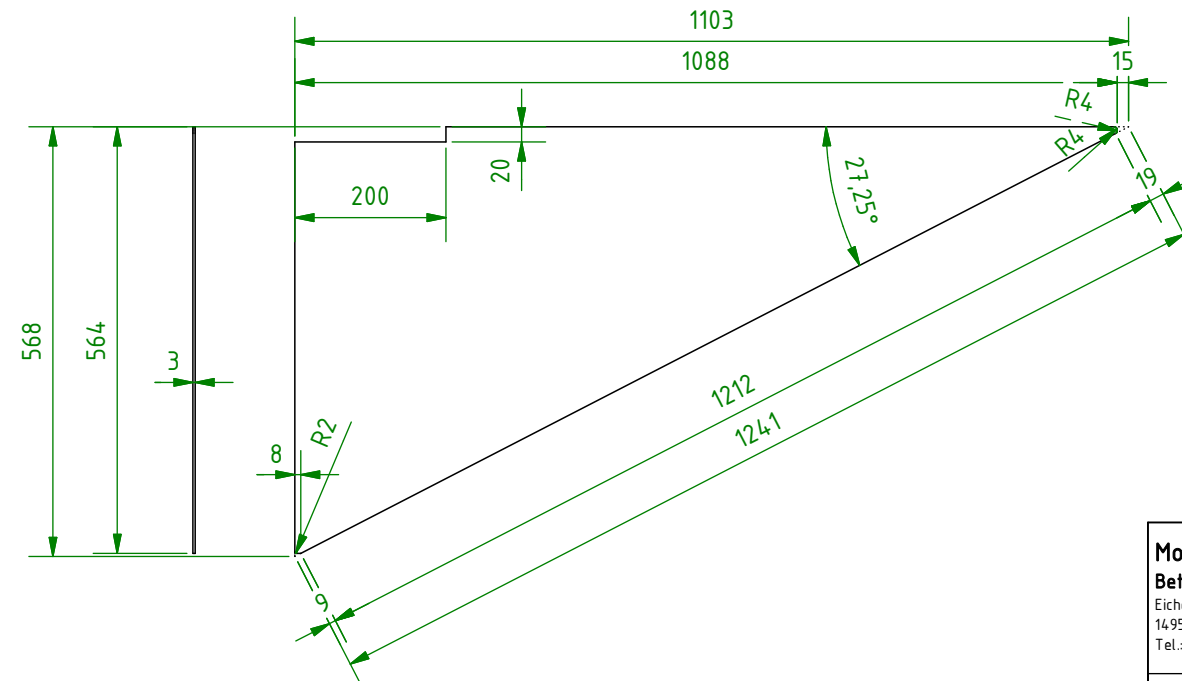


Dreieck starr Typ\_A ( 1 : 10 )  
Gefaltetes Modell\_Schnitt

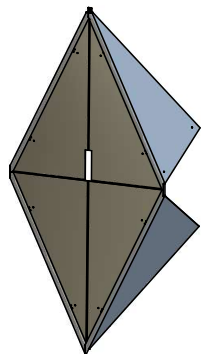


Dreieck bewegl. m. Aussparung ( 1 : 10 )

Dreieck beweglich ohne Aussparung gleich



3D-Modell FVE ( 1 : 50 )



**Modesta**  
**Betriebs-GmbH & Co. KG**  
Eichenhof 14,  
14959 Trebbin/OT Lüdersdorf  
Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138

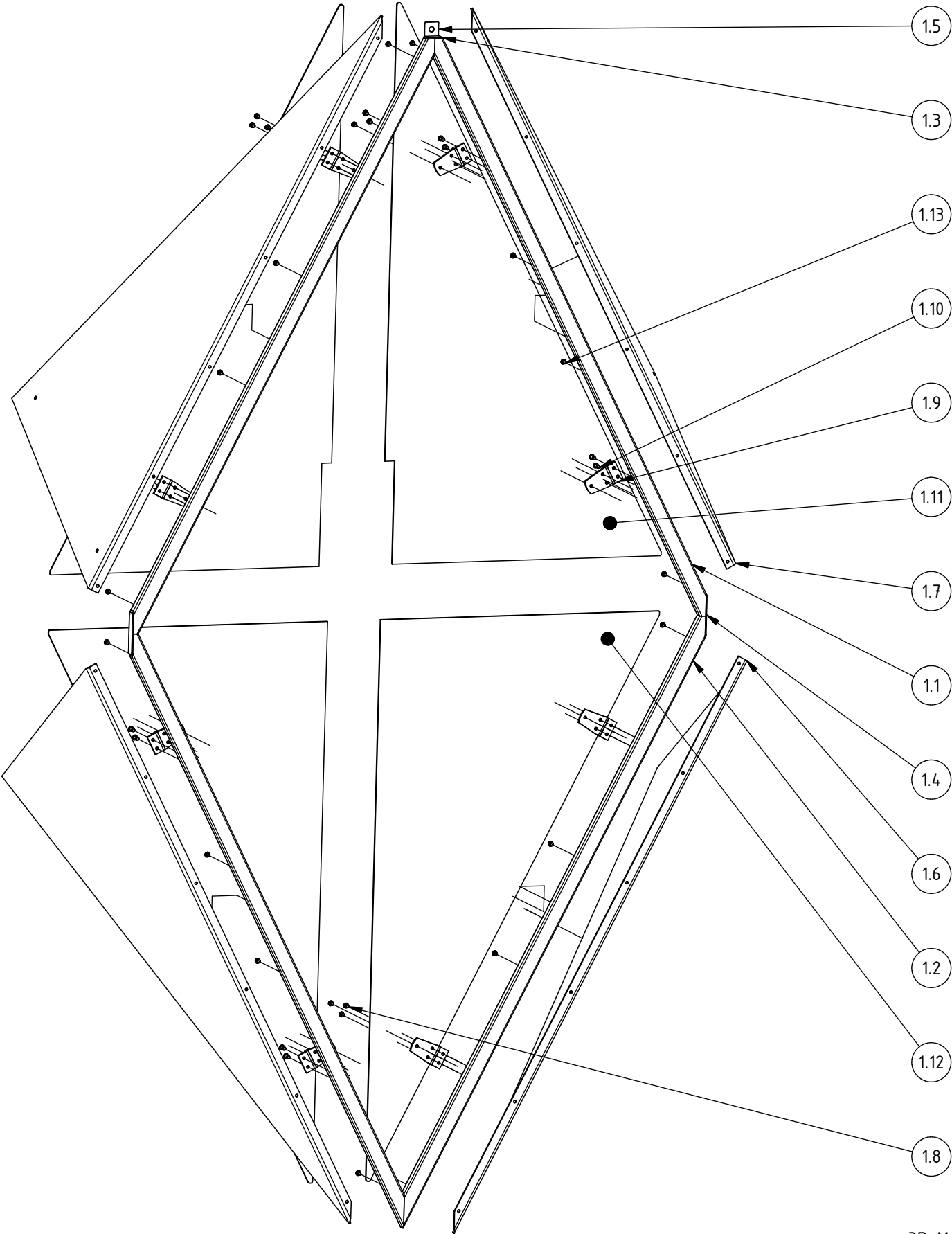
|                                   |
|-----------------------------------|
| Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin |
|-----------------------------------|

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
|  | FVE Rautenkörper mit<br>Dreiecken |
|--|-----------------------------------|

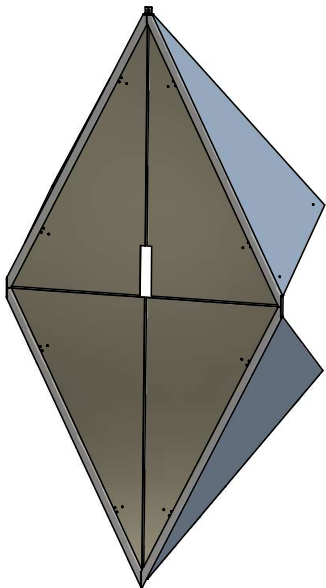
|           |             |
|-----------|-------------|
| 00.948.20 | FVE_Ex1_BT2 |
|-----------|-------------|

M: 1:50/10/1

Explosionsdarstellung FVE ( 1 : 10 )



3D-Modell FVE (isoliert) ( 1 : 30 )

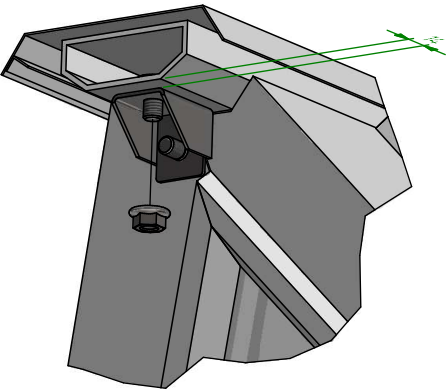


| TEILELISTE |                  |                                |                          |           |                    |
|------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------|--------------------|
| OBJEKT     | ANZAHL<br>je FVE | BAUTEILBEZEICHNUNG             | BESCHREIBUNG             | Material  | Oberfläche         |
| 1          | 1                | Fassadenverschlattungselement  | im geschlossenen Zustand |           |                    |
| 1.1        | 2                | Raute Bauteil oben             | Plan FVE_Ex1_BT1         | Stahl     | lackiert: DB 701   |
| 1.2        | 2                | Raute Bauteil unten            | Plan FVE_Ex1_BT1         | Stahl     | lackiert: DB 701   |
| 1.3        | 1                | Blech Raute oben               | Plan FVE_Ex1_BT1         | Stahl     | lackiert: DB 701   |
| 1.4        | 2                | Blech Raute seitlich           | Plan FVE_Ex1_BT1         | Stahl     | lackiert: DB 701   |
| 1.5        | 1                | Blech Raute Aufhängung         | Plan FVE_Ex1_BT1         | Stahl     | lackiert: DB 701   |
| 1.6        | 2                | Dreieck starr Typ_A            | Plan FVE_Ex1_BT2         | Aluminium | lackiert: RAL 9010 |
| 1.7        | 2                | Dreieck starr Typ_B            | Plan FVE_Ex1_BT2         | Aluminium | lackiert: RAL 9010 |
| 1.8        | 24               | DIN 7337 - A5 x 12             | Blindniet                | Edelstahl | -                  |
| 1.9        | 8                | Flügelscharnier                | "0-grad" Stellung        | Edelstahl | -                  |
| 1.10       | 16               | DIN 7337 - A5 x 20             | Blindniet                | Edelstahl | -                  |
| 1.11       | 2                | Dreieck beweglich m.Ausschnitt | Plan FVE_Ex1_BT3         | Aluminium | lackiert: RAL 9010 |
| 1.12       | 2                | Dreieck beweglich o.Ausschnitt | Plan FVE_Ex1_BT3         | Aluminium | lackiert: RAL 9010 |
| 1.13       | 16               | DIN 7337 - A5 x 10             | Blindniet                | Edelstahl | -                  |

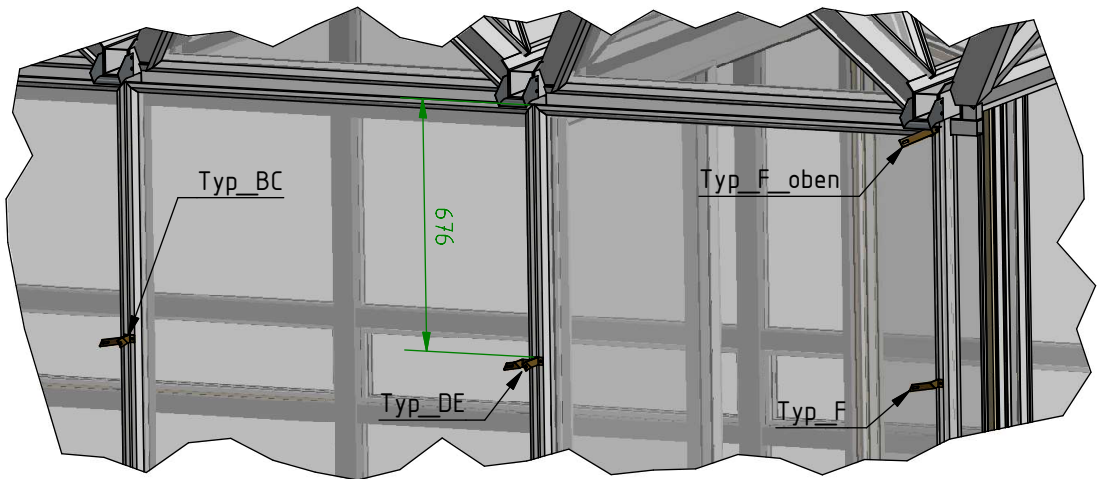
|                                                                                                                                                              |                                   |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br><small>Eichenhof 14,<br/>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br/>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138</small> | Schulungsgewächshaus<br>TU Berlin |           |
|                                                                                                                                                              | FVE_Explosion                     |           |
|                                                                                                                                                              | 00.948.20                         | FVE_Ex1   |
|                                                                                                                                                              |                                   | M 1:10/30 |



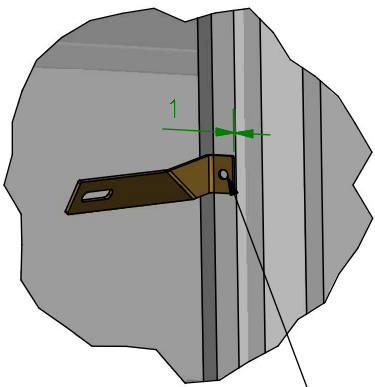
1 Vertikalanschluss ( 1 : 4 )



2. Horizontalanschlüsse (HA) (Ausschnitt Westseite) ( 1 : 20 )

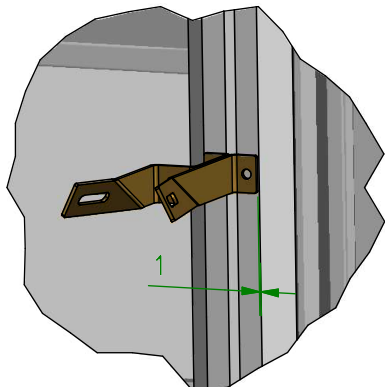


2.1 HA Detail Typ\_F ( 1 : 4 )  
West

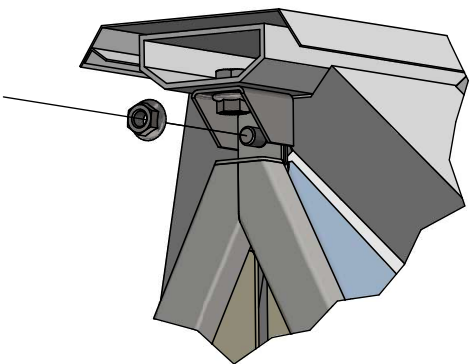


Befestigung mit FABA-BZ

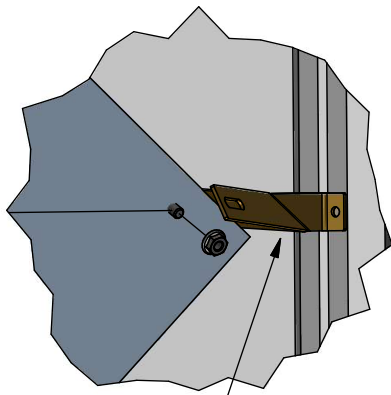
2.2 HA Detail Typ\_DE ( 1 : 4 )  
West



3.1 FVE Montage oben ( 1 : 4 )

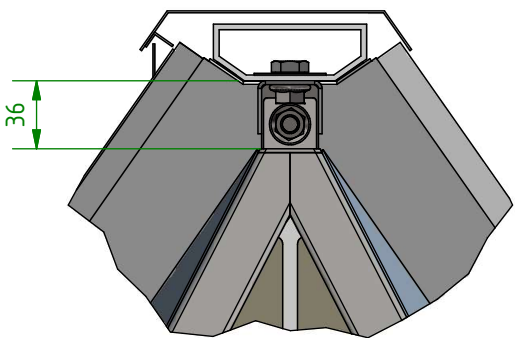


3.2 FVE Montage unten ( 1 : 4 )

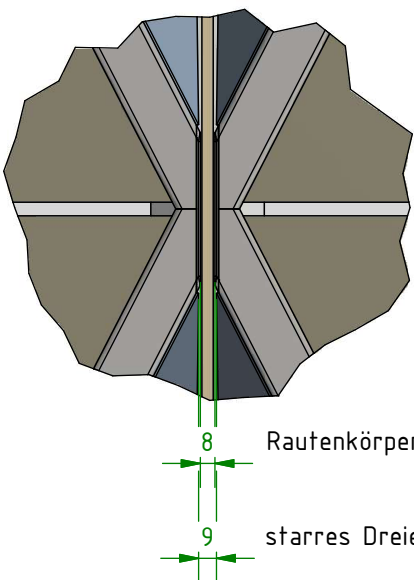


Bsp. HA Typ\_BC

4.1 FVE Abstand vertikal ( 1 : 4 )



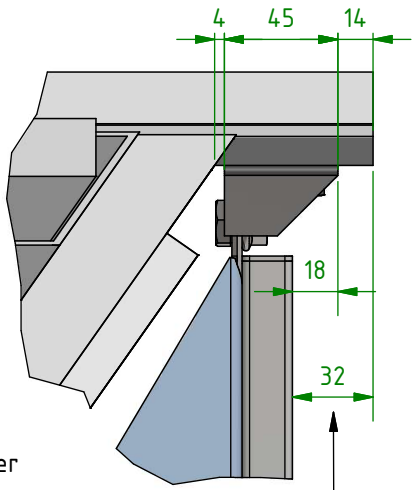
4.2 FVE Abstand horizontal ( 1 : 4 )  
längs



Rautenkörper <--> Rautenkörper

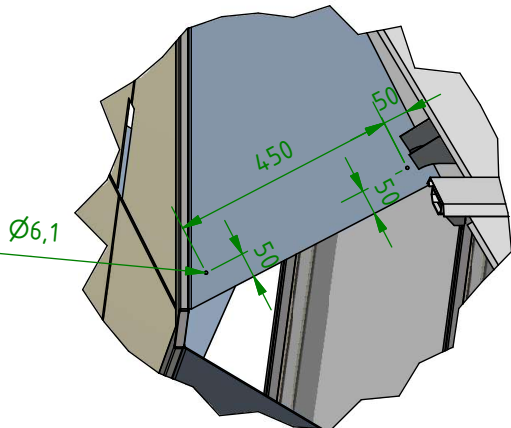
starres Dreieck <--> starres Dreieck

4.3 Abstand horizontal ( 1 : 3 )  
quer

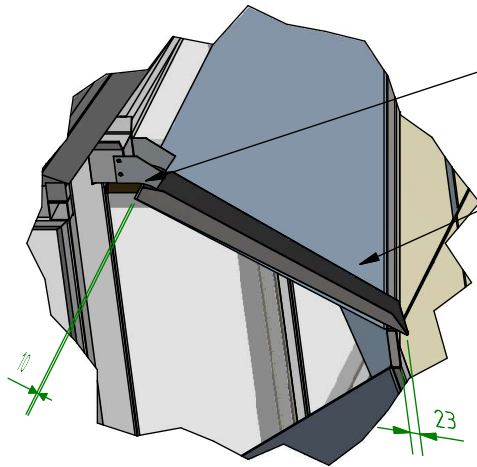


erforderliche Über-  
standsweite für  
Dachverschattungs-  
anschluss

5. Bohrungen in obere starre Flüge ( 1 : 15 )  
2 St. je starres Dreieck



6. Rinnenabstände ( 1 : 15 )



An den Enden wird ein zusätzlicher  
Horizontalanschluss im oberen Bereich benötigt.  
Hier abgebildet: Typ\_A\_oben\_West

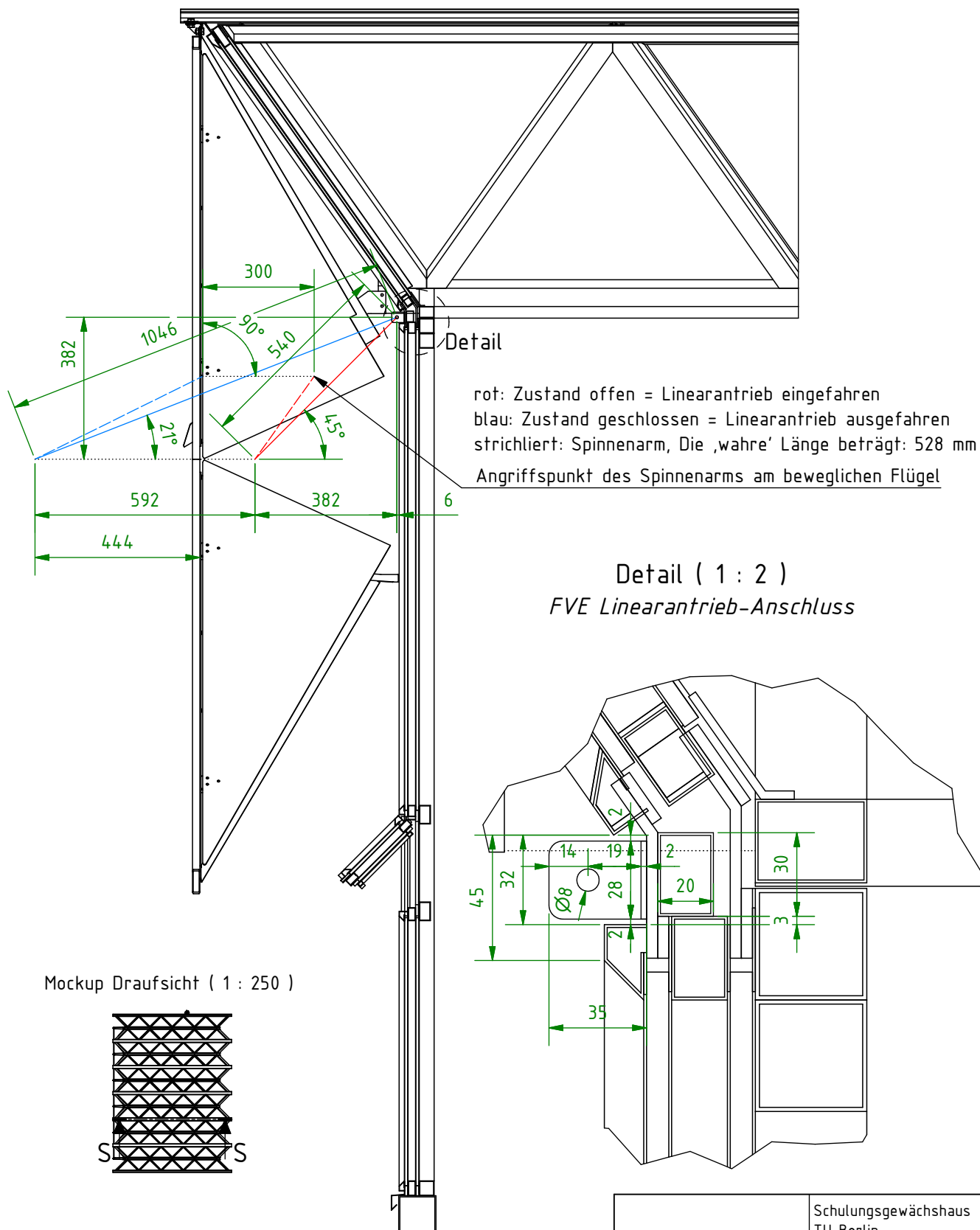
Gewindemuffen als Abstandhalter an Rinnen (2 je Seite)  
anschweißen. Als Orientierung dienen die Bohrungen an  
den oberen starren Dreiecken (Punkt 5.)

Anmerkung:  
Die Farbauswahl dient nur einer kontrastreichen Abbildung.  
In Realität erscheinen die Elemente in abweichenden Farben.

|                                                                                                                                  |                                   |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| <b>Modesta</b><br>Betriebs-GmbH & Co. KG<br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus TU<br>Berlin |             |
|                                                                                                                                  | FVE<br>Installationshinweise      |             |
|                                                                                                                                  | 00.948.20                         | FVE_IH      |
|                                                                                                                                  | M:                                | 1:20/15/4/3 |

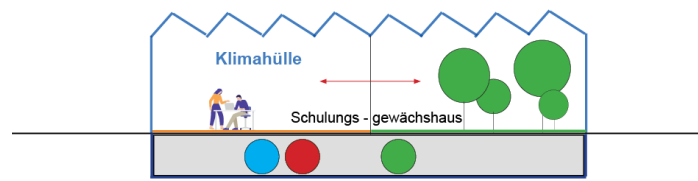


S-S ( 1 : 15 )  
mit Schnitttiefe bis Rinne (585mm)



Hinweis: Alle angegebenen Längen beziehen sich auf Achsmaße.

|                                                                                                                                             |                                     |              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| <b>Modesta</b><br><b>Betriebs-GmbH &amp; Co. KG</b><br>Eichenhof 14,<br>14959 Trebbin/OT Lüdersdorf<br>Tel.: 033731/15319 Fax: 033731/80138 | Schulungsgewächshaus<br>TU Berlin   |              |
|                                                                                                                                             | Firstschnitt m.<br>Antriebsmechanik |              |
|                                                                                                                                             | 00.948.20                           | FVE_FS AM    |
|                                                                                                                                             |                                     | M 1:250/15/2 |



## **A6** Anhang zum Themenbereich: **Botanisches Konzept**



Verfasser: Henriette Wilke, Thorsten Laute, Tom Donat

Botanischer Garten Berlin

### **Inhalt:**

- Pflanzenliste
- Grundsätzliche Überlegungen zur Wahl der Pflanzen
- Fotodokumentation Pflanzen im Mock-Up des Schulungsgewächshauses

## Anhang zum Forschungsprojekt:

„Prototyp eines bioklimatischen Schulungs-Gewächshauses“

– Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen, wandelbaren Gebäudeprototypen für die (sowohl räumlich, klimatisch als auch technisch) symbiotische Nutzung eines energieautonomen Schulungs-Gewächshauses in Berlin.

Für diesen Prototyp, ein kleines Gewächshaus wurden einige Pflanzen aus dem BGBM zur Verfügung gestellt, um das Klima bzw. das Verhalten der Pflanzen unter den vorhandenen Bedingungen in der Versuchshalle der TU Berlin zu testen.

Folgende Pflanzen werden zur Verfügung gestellt:

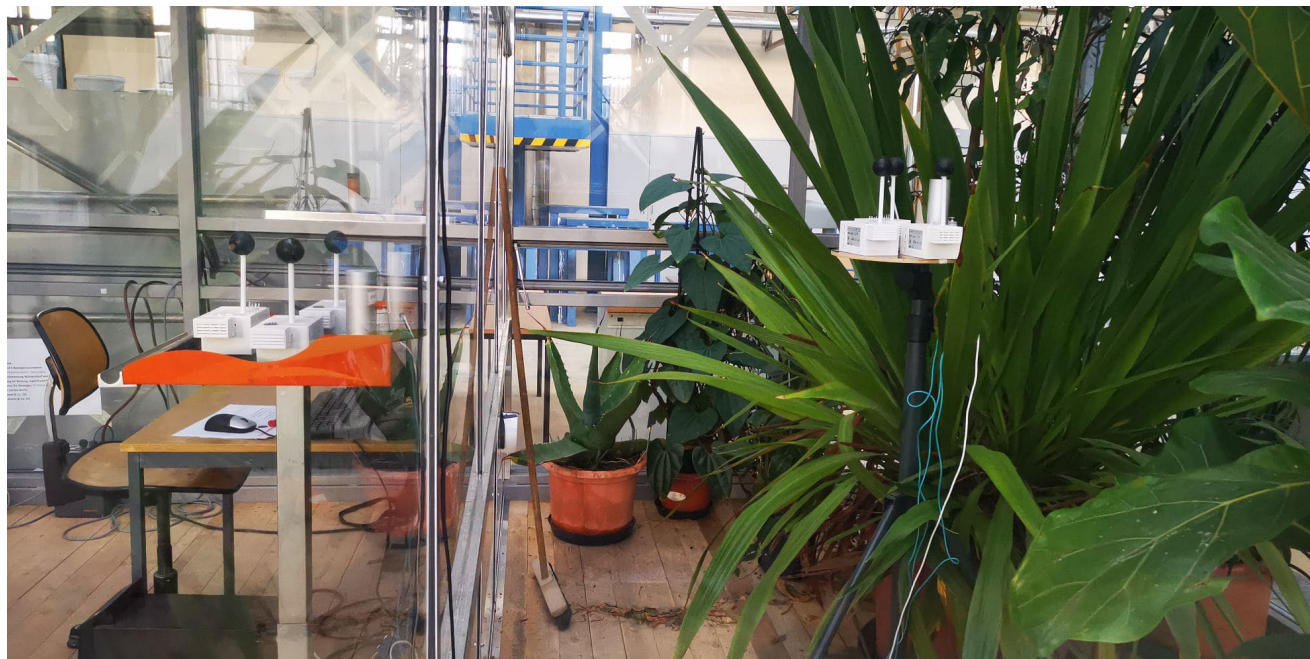
| Gattung/Art                  | Warmhaus/AkzNr. | Kalthaus/AkzNr.  | Anzahl | Standort BGBM                   | Größe          | Bemerkung                                    |
|------------------------------|-----------------|------------------|--------|---------------------------------|----------------|----------------------------------------------|
| Cordyline petiolaris         |                 | 012-03-06-70     | 1      | Haus 25                         | Ca. 2,50m      | Durchdringend gießen, hält dann ca. 2-3 Tage |
| Cordyline stricta            |                 | 108-09-74-84     | 1      | Haus 25                         | Ca.1,50m       | Blüht gerade, Durchdringend gießen           |
| Doryanthes palmeri           |                 | ?-01-90-70       | 1      | Vor Haus 25                     | Ca.1,m buschig | Durchdringend gießen                         |
| Eucalyptus camaldulensis     |                 | 010-01-06-70     | 1      | Haus 25                         | Ca.2-3 m       | Weniger Wasserbedarf                         |
| Agapanthus africanus         |                 | 110-95-74-84     | 1      | Draußen an H25, vor den Garagen |                | Durchdringend gießen                         |
| Citrus spec.                 |                 | 252-01-06-70     | 1      | Haus 24 Tisch                   |                | Durchdringend gießen                         |
| Agave salmiana var. salmiana |                 | 014-59-74-80     | 1      | Haus 24 Tisch                   |                | Wenig gießen                                 |
| Aloe buhrii                  |                 | 109-57-21-80     | 1      | Haus 24 Grundbeet               |                | wenig gießen                                 |
| Camelia spec.                |                 | Möglichst 1-2 m, | 1      | Haus 18 an Stehwand             |                | Durchdringend gießen                         |
| Ficus lyrata                 | 142-06-74-83    |                  | 1      | Provisorium                     | 1,50m          | Bitte nach Haus 13 a bringen                 |
| Spathiphyllum wallisii       | 031-47-74-83    |                  | 1      | Haus 9a, rechts                 |                | Mäßig gießen                                 |
| Dracaena aubryana            | 020-99-74-83    |                  | 1      | Haus 13b Gang                   | Ca. 1,80m      | Mäßig gießen                                 |
| Nepenthes tobaica            | 053-16-99-83    |                  | 1      | Haus 13b Gang                   |                | Mäßig gießen                                 |
| Aglaonema treubii            | 041-20-74-83    |                  | 1      | Haus 13b                        | Ca. 50cm       | Mäßig gießen                                 |
| Aristolochia schippii        | 142-01-17-80    |                  | 1      | Haus 14c                        | Ca. 50 cm      | Schlänger                                    |
| Dracaena aubryana            | ! 020-99-74-83  |                  | 1      | Haus 13b                        | Ca. 1,50m      |                                              |
| Passiflora edulis            | ! 117-16-74-83  |                  | 1      | Haus 14c                        | Ca. 60cm       | Schlänger                                    |
| Gesamt:                      |                 |                  | 17     |                                 |                |                                              |

-> Fazit: Alle Pflanzen, bis auf den Eucalyptus camaldulensis, haben die Bedingungen in der Versuchshalle über 2 Jahre hinweg gut überstanden und eignen sich somit hervorragend für die weitere Anwendung. Für die geplante Anwendung der Forschungsergebnisse im Außenraum empfiehlt sich jedoch eine weitere Testung der Pflanzen.

**Anhang zum Forschungsprojekt:**

„Prototyp eines bioklimatischen Schulungs-Gewächshauses“

– Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen, wandelbaren Gebäudeprototypen für die (sowohl räumlich, klimatisch als auch technisch) symbiotische Nutzung eines energieautonomen Schulungs-Gewächshauses in Berlin.

**Fotodokumentation:**

**Abb.** Messungen mittels BioMet-Messstationen der TU Berlin hinsichtlich Einfluss der Pflanzen auf Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub> (Foto, Dirk Peissl, TU Berlin)

**Palmen für kühle Bereiche**

|                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Phoenix canariensis - Kanarische Dattelpalme                                                     |
| Die von den kanarischen Inseln stammende Phoenix canariensis ist bis etwa -5 °C frostresistent.  |
| Trachycarpus martianus - Hanfpalme ist bis etwa -5 °C frostresistent.                            |
| Trachycarpus fortunei - Hanfpalme ist bis etwa -10 °C frostresistent.                            |
| Phoenix rupicola - Klippendattelpalme ist bis etwa -6 °C frostresistent.                         |
| Phoenix canariensis                                                                              |
| Phoenix dactylifera - Echte Dattelpalme ist bis etwa -9 °C frostresistent.                       |
| Washingtonia robusta - Petticoat Palme ist bis etwa -7 °C frostresistent.                        |
| Brahea edulis - Erytheapalme ist bis etwa -8 °C frostresistent.                                  |
| Dypsis decipiens - Madagaskar Königspalme ist bis etwa -8 °C frostresistent.                     |
| Phoenix dactylifera - Echte Dattelpalme ist bis etwa -9 °C frostresistent.                       |
| Chamaerops - Europäische Zwergpalme und blaue Zwergpalme ist bis etwa -13 °C frostresistent.     |
| Sabal blackburniana, Synonym: Sabal palmetto - Palmettopalme ist bis etwa -14 °C frostresistent. |
| Jubaea chilensis - Honigpalme ist bis etwa -15 °C frostresistent.                                |
| Trithrinax campestris - blaue Nadelpalme ist bis etwa -15 °C frostresistent.                     |
| Trachycarpus fortunei "wagnerianus" - Wagners Hanfpalme ist bis etwa -17 °C frostresistent.      |
| Sabal minor - Zwergpalmettopalme ist bis etwa -20 °C frostresistent.                             |
| Sabal minor var. 'Louisiana' - Louisiana Palmetto-Palme ist bis etwa -20 °C frostresistent.      |

**Lichtverhältnisse**

Es ist immer schwierig, zu beurteilen, wie viel Licht an einem bestimmten Standort wirklich vorhanden ist. Alle Pflanzen benötigen eine gewisse Lichtmenge, um überhaupt zu überleben. Hier wird unterschieden zwischen:

- sonnig
  - halbschattig
  - schattig
- 
- über 6 Stunden Sonne = vollsonnig
  - alles unter 3 Stunden = schattig
  - alles zwischen 3-6 Stunden = halbschattig

Zum Vergleich: An einem wolkenlosen Sommertag kann man am Mittag etwa eine Beleuchtungsstärke von 15.000 Lux messen. Durch den speziellen Aufbau in den Blättern von Schattenpflanzen ist eine maximale Rate an Fotosyntheseaktivität schon zwischen 1000 und 2000 Lux erreicht. Solche Pflanzen können auch bei höheren Lichtintensitäten nicht mehr Stoffwechselaktivitäten zeigen. Dies sind vor allem Pflanzen, die in ihrer natürlichen Umgebung nur wenig Licht erhalten (wie beispielsweise Sträucher oder Bodendecker auf Waldgründen).

**Abb.** Grundsätzliche Überlegungen zur Wahl der Pflanzen im Schulungsgewächshaus



## Anhang zum Forschungsprojekt:

### „Prototyp eines bioklimatischen Schulungs-Gewächshauses“

– Entwicklung, Planung und Bau eines neuartigen, wandelbaren Gebäudeprototypen für die (sowohl räumlich, klimatisch als auch technisch) symbiotische Nutzung eines energieautonomen Schulungs-Gewächshauses in Berlin.

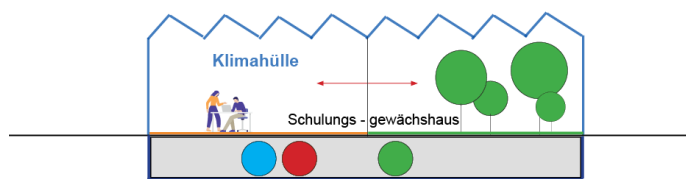
### Fotodokumentation:



**Abb.** Messungen mittels BioMet-Messstationen der TU Berlin hinsichtlich Einfluss der Pflanzen auf Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO<sub>2</sub> (Foto, Dirk Peissl, TU Berlin)



**Abb.** Beleuchtung mittels UV-Leuchten in den Wintermonaten



## A7 Anhang zum Themenbereich:

### Didaktisches Konzept

Verfasser: Isabell Simonsmeier

Senatsverwaltung

#### Inhalt:

- Zusammenfassung Bildungskonzept
- Ausblick



Senatsverwaltung für  
**Bildung, Jugend und Familie**



### **Zuarbeit der SenBJF zum Schlussbericht Schulungs-Gewächshaus**

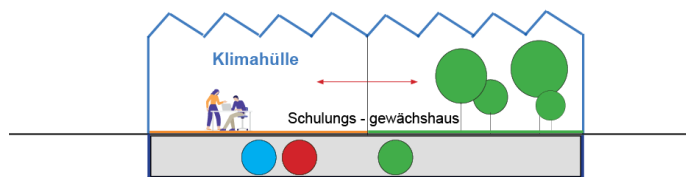
Aufgrund der Verlängerung der Projektlaufzeit skizziert der Abschlussbericht von Seiten der SenBJF die Anpassungen der Überlegungen im Bereich Bildung.

Die geplante Begleitung der Entwicklung und Umsetzung des Prototyps (u.a. über Social Media) kann von Seiten der Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie nicht mehr erfolgen, da mittlerweile weder die personellen noch die finanziellen Ressourcen vorliegen. Es kann, sofern dieses den Interessen des Bezirkes Charlottenburg-Wilmersdorf als Bauherr entspricht, eine vernetzende Funktion zu den Volkshochschulen und anderen anerkannten Trägern der Erwachsenenbildung in Berlin eingenommen werden. Ebenso sieht sich die Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie in der Rolle, auf Wunsch des Bezirkes weitere potentielle Zielgruppen zur Nutzung des Schulungs-Gewächshauses zu vermitteln: Schülerinnen und Schüler der Oberstufen und Berufsschülerinnen und –schüler.

Grundsätzlich kann das Schulungs-Gewächshaus in einer Doppelrolle genutzt werden: Als explizit zum Thema Nachhaltigkeit ausgewiesener Bildungsgegenstand (non-formales Lernen) und als Aufenthaltsort für Veranstaltungen ohne inhaltlichen Bezug zum Schulungs-Gewächshaus (informelles Lernen).

Das Schulungs-Gewächshaus kann, je nach Ausrichtung des Bauherrn, in der angestrebten Intensivierung der Zusammenarbeit der Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klima und Umwelt, der Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie und den Bezirken als Bildungseinrichtung eine tragende Rolle einnehmen.

Das Mock-Up wird, so die Planung, auf dem Gelände des Botanischen Gartens Berlin in Nähe der Botanikschule ebenfalls als Lernort genutzt werden können. Aufgrund einer langjährige Kooperation der Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Familie mit dem Botanischen Garten hat so die Botanikschule, eine durch Lehrkräfte geleitete Bildungseinrichtung, eine in die Schule hineinwirkende Rolle.



## A8 Anhang zum Themenbereich:

### Auszug Generalplanungsprojekt

HAAS | ARCHITEKTEN

Verfasser: Friedhelm Haas

Haas Architekten Berlin

#### Inhalt:

- Bestandssituation
- Vermesserpläne Bestand
- Planung des neuen Schulungsgewächshauses
- Konzept und technische Ausstattung
- PLANDARSTELLUNGEN:
  - Lageplan, Grundriss, Schnitte, Isometrien, Referenzen









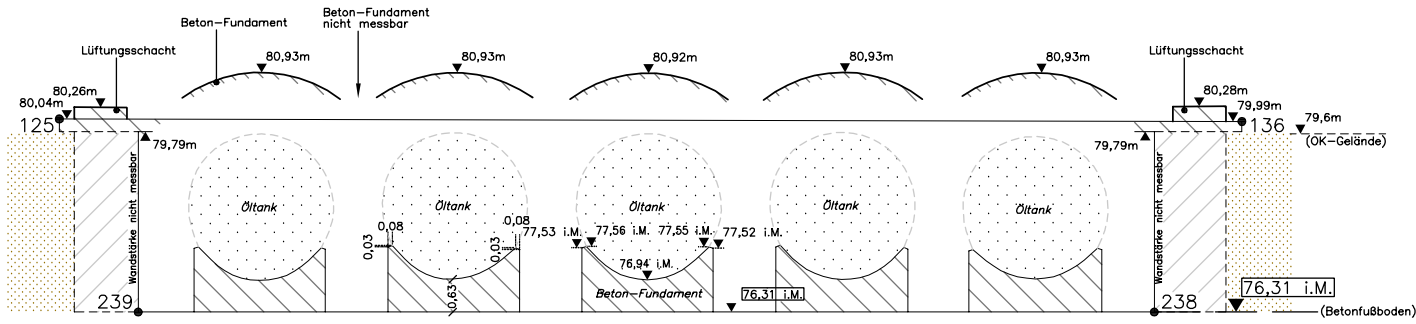
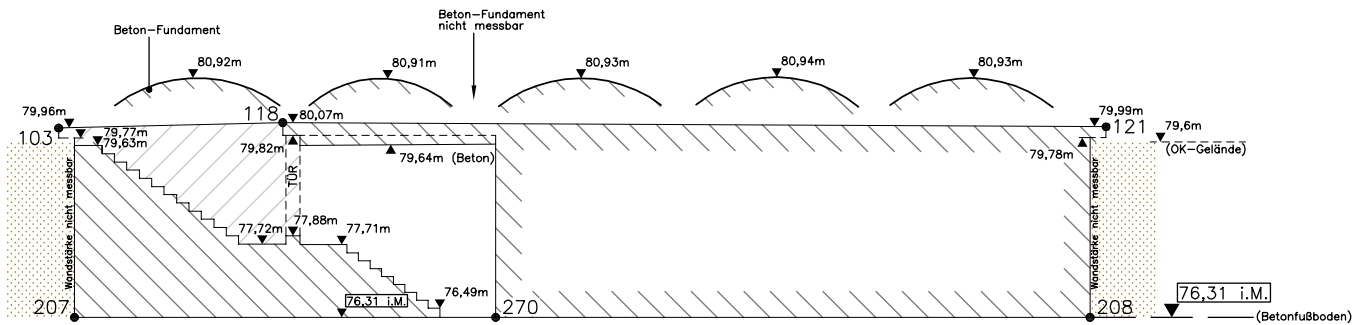
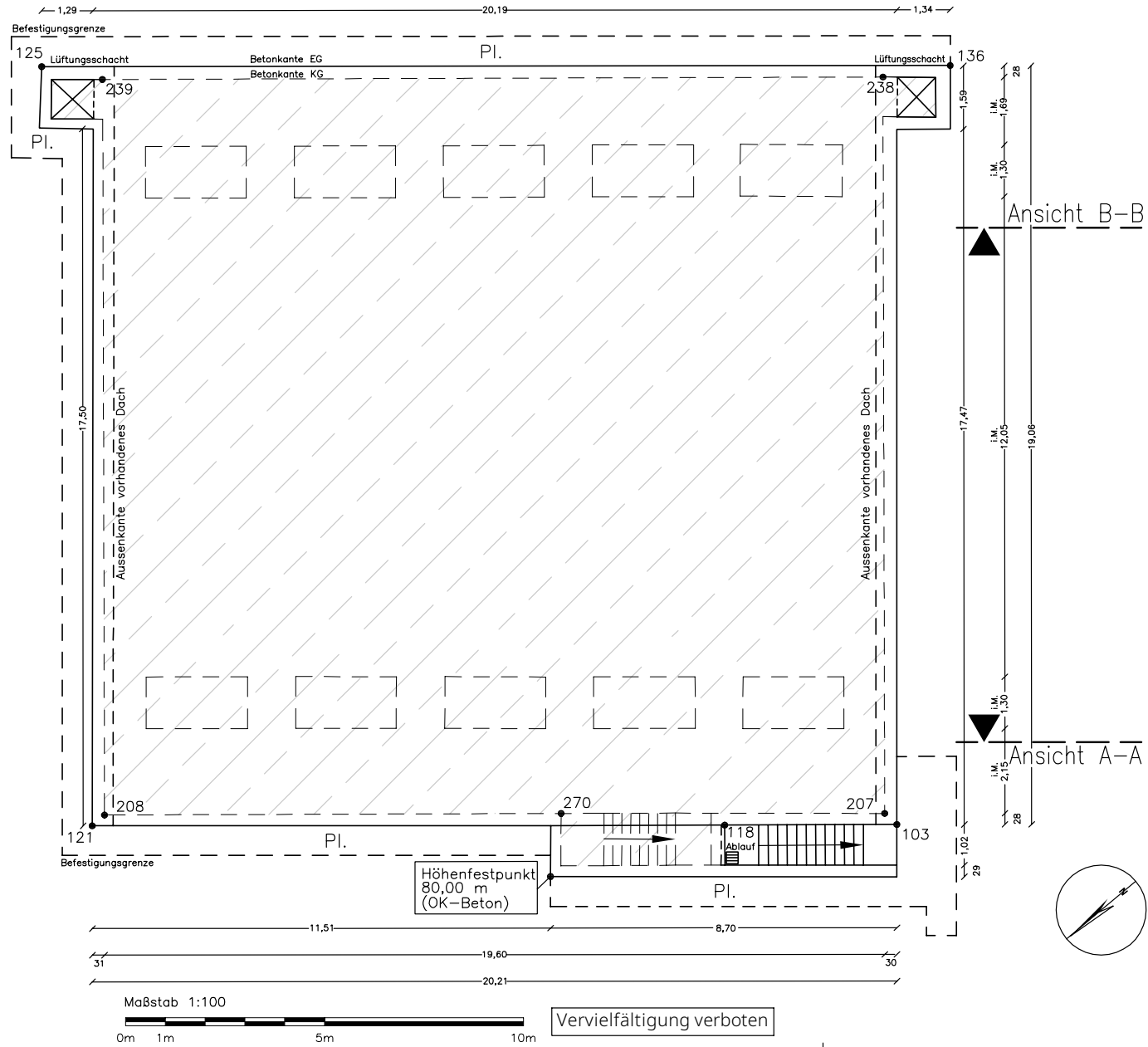
## Bestandssituation

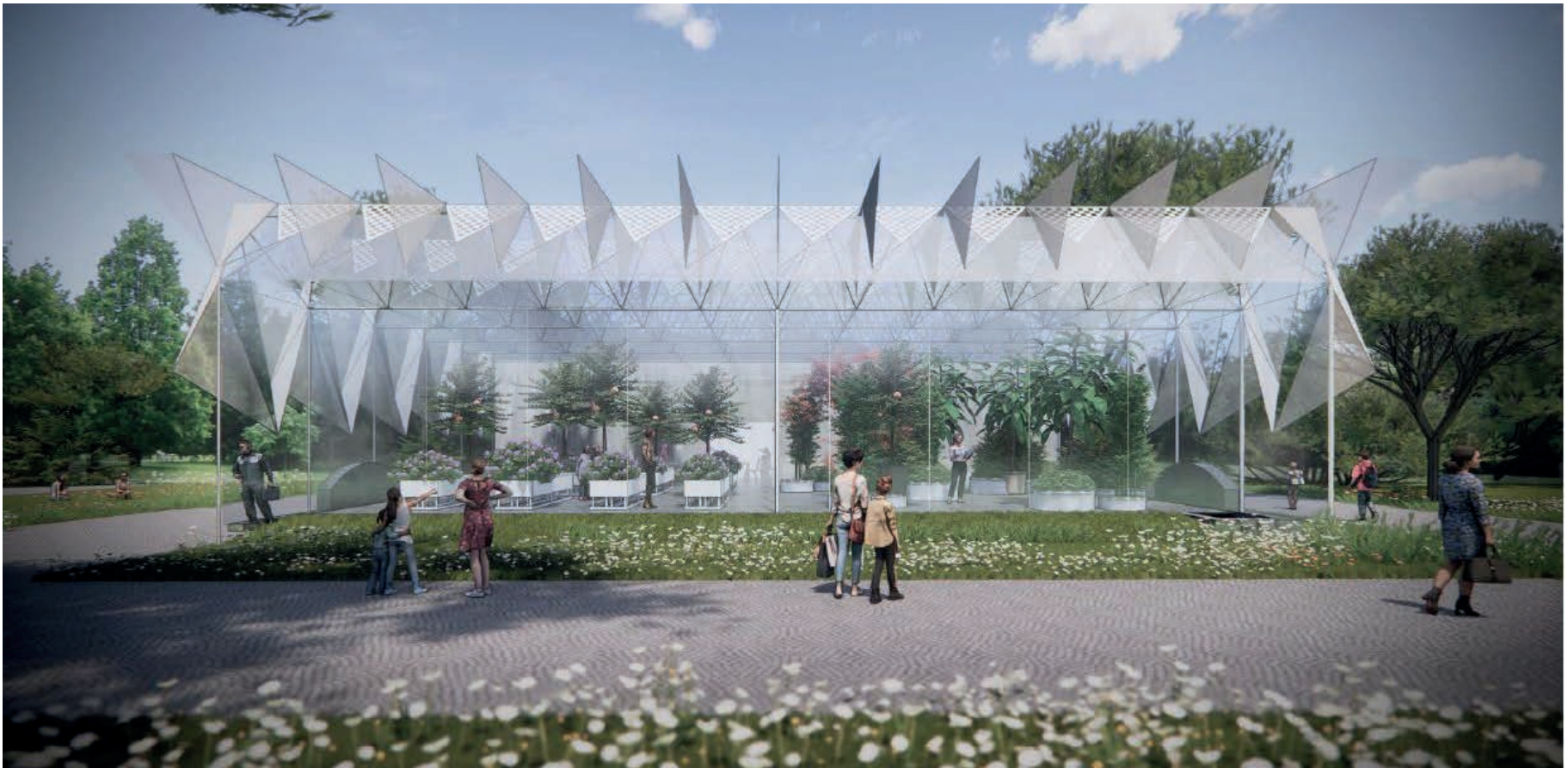
Eine Grundlage bei der Planung und Realisierung des Projekts „Prototyp eines bioklimatischen Schulungs-Gewächshauses“ ist die Einbindung des ehemaligen Öltanklagers auf dem Gelände der Bezirksgärtnerei in Charlottenburg-Wilmersdorf im Grunewald, das ehemals für die Energieversorgung der Gärtnerei benötigt wurde. Die Tanks stehen in einer im Gelände abgesenkten, flüssigkeitsdichten Betonwanne. Im direkten Umfeld der ehemaligen Öltankanlage schließen sich Rasen/Wiese und zum Teil Nutzflächen der Gärtnerei an.

Mit der Umstellung auf erneuerbare Energien und dem Verzicht auf fossiles Erdöl wurde der Betrieb und die Nutzung der Öltanks eingestellt. Der Lagerraum mit den Abmessungen von knapp 20 m x 20 m und einer Höhe von 6,5 m fasst ein Gesamtvolumen von ca. 2600 m<sup>3</sup> und einer Fläche von ca. 400 m<sup>2</sup>. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich noch zwei Tankbehälter in der Anlage, die restlichen drei wurden bis heute bereits entsorgt. Im Allgemeinen hat die Anlage keine neue Verwendung gefunden und müsste ohne neue Nutzung abgetragen werden.







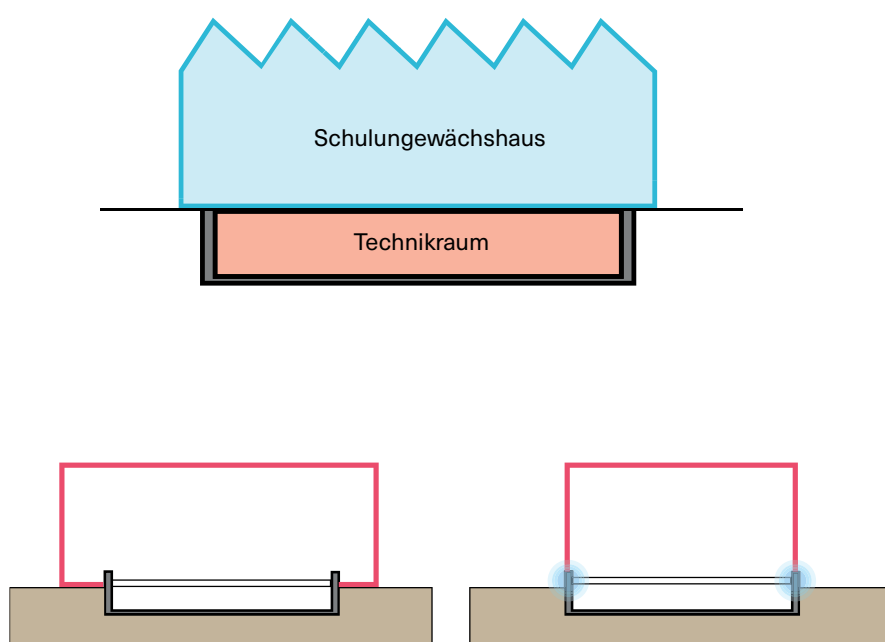


### „Prototyp eines bioklimatischen Schulungs-Gewächshauses“

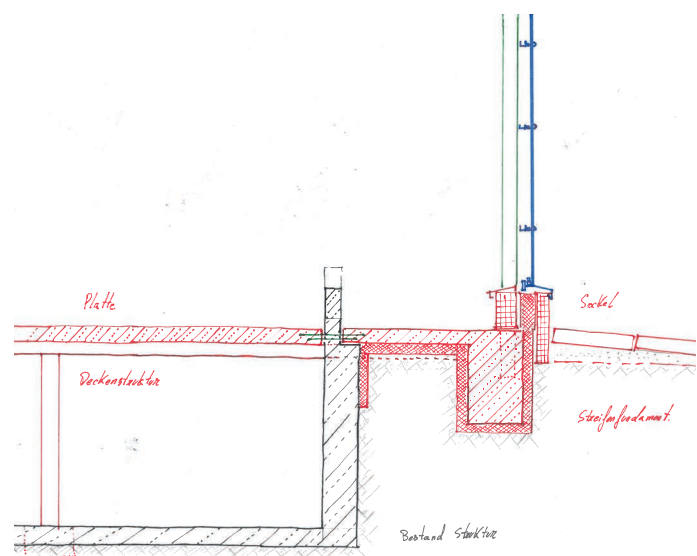
Die Planung des neuen Schulungsgewächshauses basiert auf einem komplexen energetischen Konzept, das ganzheitlich für gebäudeklimatische Erkenntnisse als Reallabor genutzt werden soll.

Das Schulungsgewächshaus ist über dem ehemaligen Öltanklager geplant und orientiert sich in seinen Abmessungen auch an diesem. Der Überstand der Gebäudehülle beruht auf der Entscheidung energieeffizienter Gebäudeplanung, vor allem auf der Vermeidung von Wärmebrücken in der Gebäudehülle, die durch eine direkte Verbindung der beiden Strukturen entstehen würden.

Ziel des Forschungsprojekts ist der modellhafte Bau eines neuartigen, energieautonomen Schulungsgewächshauses mit symbiotisch funktionierenden Nutzungsbereichen. Platz dafür bietet künftig ein eingeschossiger Bau bestehend aus einem Stahl-Skelett mit Verglasung. Die Dachkonstruktion wird aus Fachwerkträgern (Dreigurtbindern) gebildet. Eine Besonderheit bilden die Dach- und Fassadenpaneele, die sich mit ihrer Position an die äußeren Wettergegebenheiten anpassen können und so die Verschattung und Ventilation im Gebäude regulieren.

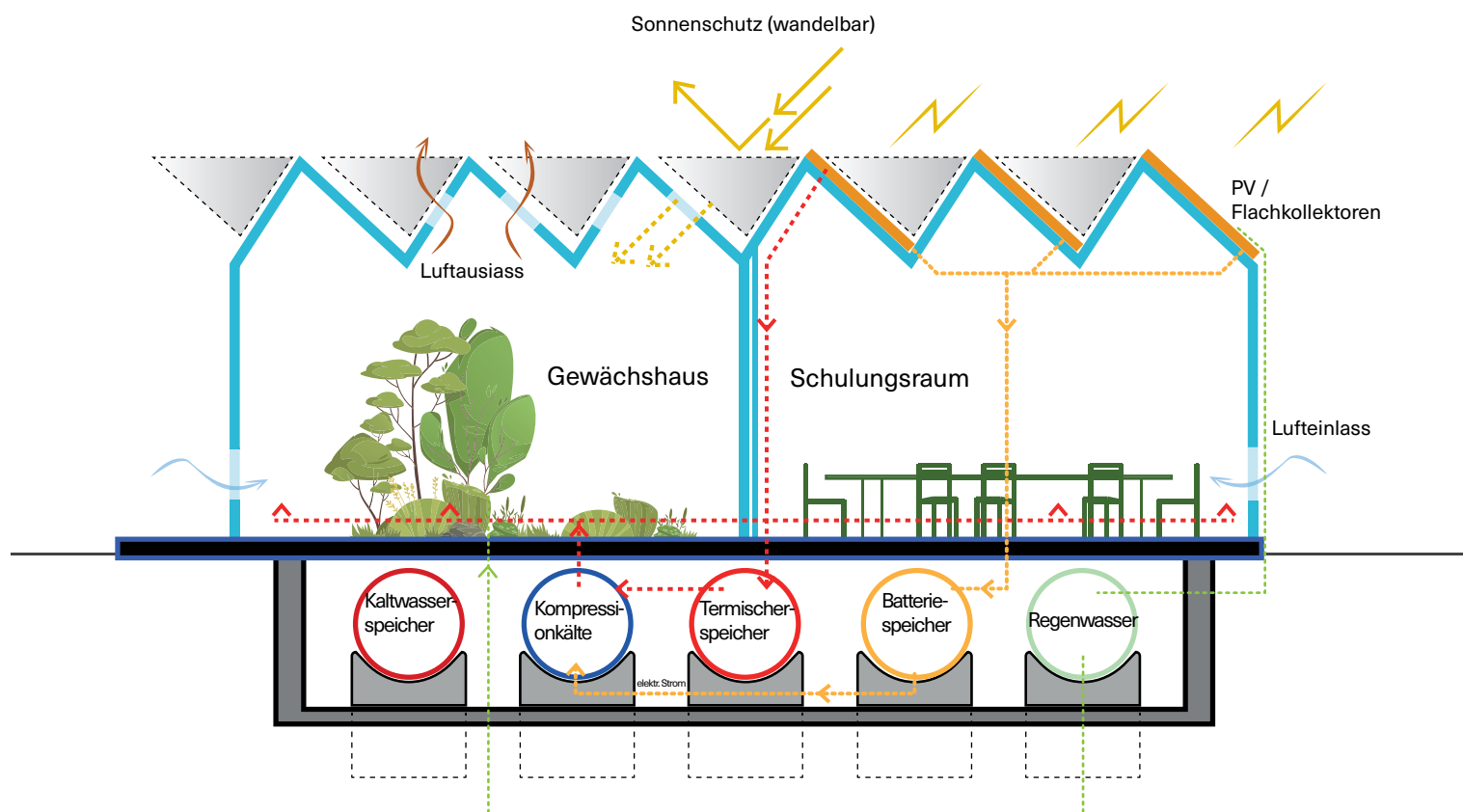


Anschluss Konzept zur Vermeidung von Wärmebrücken



Anschlussdetail Skizze





## Konzept und technische Ausstattung

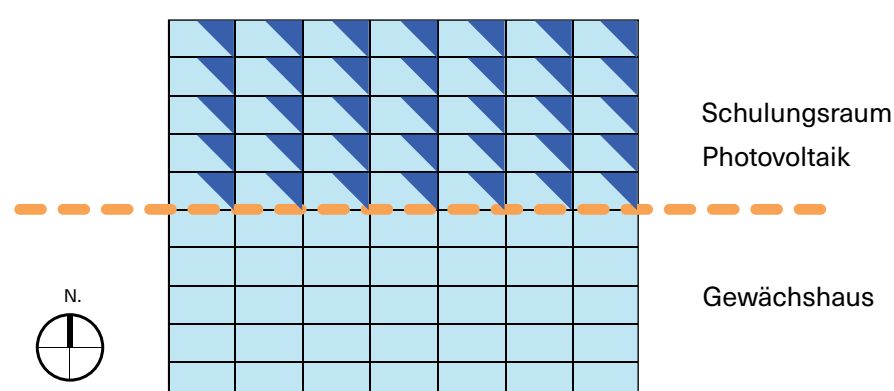
Dieses prototypische Vorbild soll sowohl für die energetische Ertüchtigung bestehender Gewächshäuser und Bürogebäude als auch den Neubau kommender, bioklimatischer und energieautarker Gebäude-Hybride dienen. Hierbei werden künftig systematisch und synergetisch Bereiche kombiniert, die sich die teils gegensätzlichen bioklimatischen Nutzungsanforderungen hinsichtlich Temperatur, Luftfeuchte, Licht und Sauerstoffgehalt von Menschen und Pflanze zunutze machen und dadurch gleichzeitig den Energiebedarf des Gebäudes signifikant senken.

Das Ziel des bioklimatischen Monitorings ist die Erfassung atmosphärischer Größen, die das vegetative und menschliche Wohlbefinden beeinflussen. Damit wird eine wesentliche Grundlage für die Bewertung der Nutzungsziele des bioklimatischen Gebäudes geschaffen. Hierbei soll ein möglichst langer Zeitraum (mindestens ein Jahr) während des Gebäu-

debetriebs erfasst werden, um die jahreszeitliche Variabilität der atmosphärischen Größen zu berücksichtigen. Die dafür notwendigen Messungen werden in den Schulungsräumen sowie in den Gewächshausbereichen stattfinden. Zudem wird im Außenraum auf dem Gelände der Bezirksgärtnerei eine Wetterstation aufgebaut.

Neben der Wetterstation sind noch weitere technische Ausstattungselemente integraler Bestandteil des Schulungsgewächshauses. Darunter fallen die zu Teilen eingefassten Solarkollektoren für die Stromversorgung des Komplexes mit den dazugehörigen technischen Anlagen zur Speicherung, thermische Speicher, ein Eisspeichersystem sowie der Einsatz einer Wärmepumpe in Verbindung mit einem Energiezaun, eine Zisterne für Regenwassernutzung und ein Kaltwasserspeicher.

Die für den Einsatz der geplanten Energiesysteme großzügig ausfallende Technikfläche ist elementarer Teil der Gebäudeplanung.

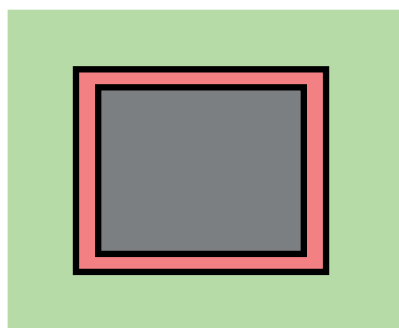
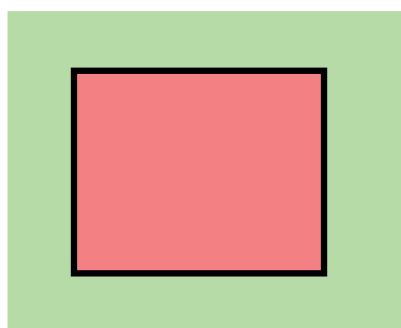


## Flächenbedarf der technischen Ausstattung

Das ehemalige Öltanklager nimmt hierbei die Funktion eines vollen Technikgeschosses ein. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Innovationspotenzial des Projekts an eben jenem Standort, der vorher Platz für fossile Energieträger geboten hat. Der ehemalige Öltanklagerraum wird zu einem Ort für das Monitoring und die Erforschung erneuerbarer Energien umfunktioniert. Dies bietet wertvolle Erkenntnisse für die Raumklimatechnik und den Einsatz umweltfreundlicher Technologien. Als Teil des Schulungsgewächshauses dient das Lager als Modellraum für zukünftige Bauprojekte und zeigt, wie bestehende Strukturen effizient und nachhaltig genutzt werden können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bietet die Vermeidung, weitere Fläche auf dem Areal zu versiegeln, und weiträumige Bau-

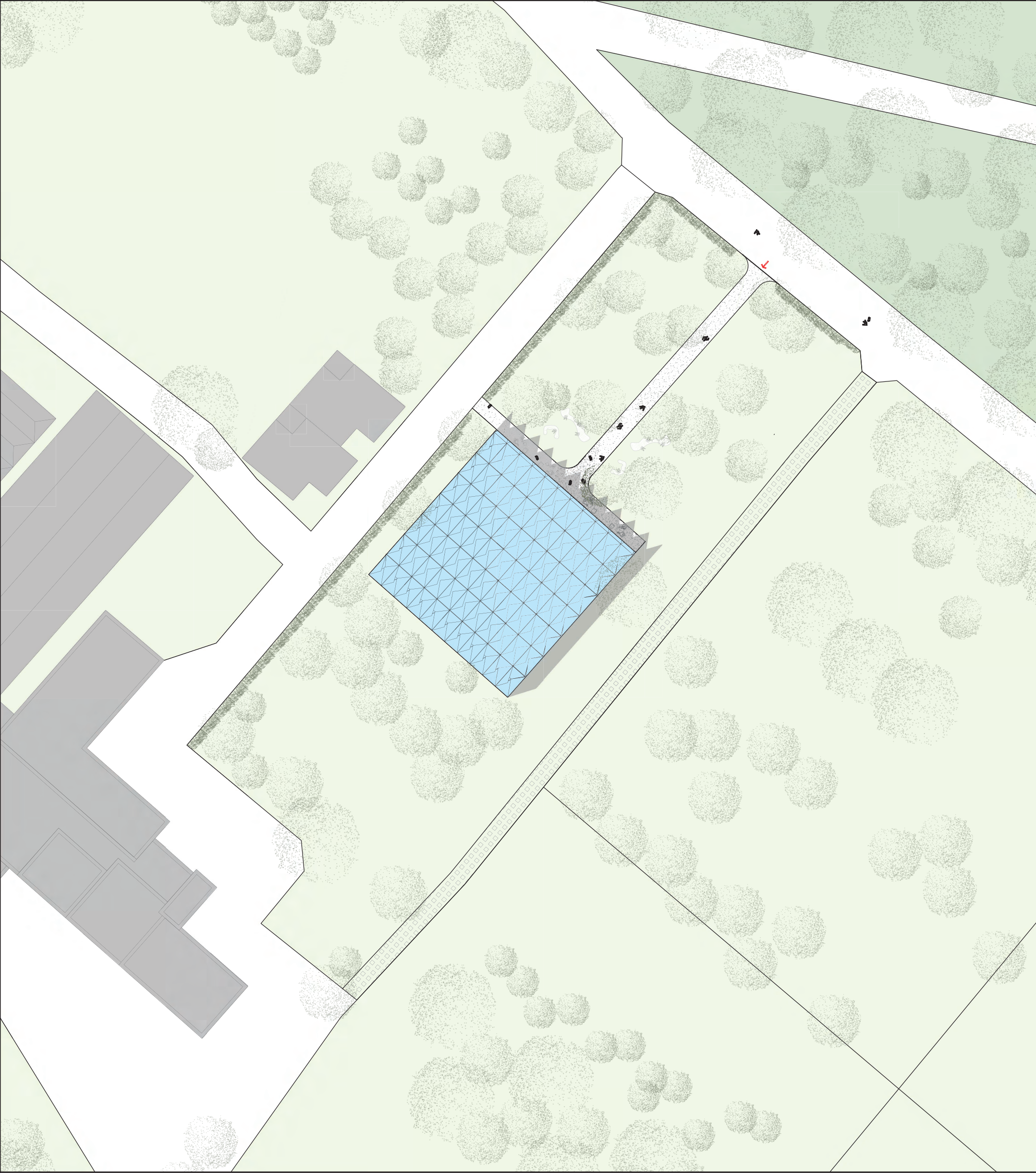
maßnahmen einzuschränken. Eine Verlagerung der technischen Anlagen auf das Dach wäre aufgrund der speziellen Dachstruktur nicht realisierbar und ohne eine unterkellerte Planung nur ebenerdig denkbar. Letzteres hätte maßgebliche Auswirkungen auf das Erscheinungsbild des freistehenden Baukörpers. Die Nutzung des Bestands erfüllt ebenso eine nützliche Funktion während des Betriebs im Zusammenhang mit Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten. Darüber hinaus können durch die großzügige Dimensionierung Anpassungen und Erweiterungen der technischen Gebäudeausstattung mit geringen Planungsaufwand umgesetzt werden und zukünftig ebenso neue/ zusätzliche technische Anlagen einfach integriert werden.



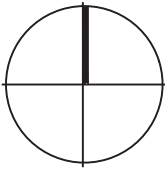
## ANHANG PLANDARSTELLUNGEN

### „Prototyp eines bioklimatischen Schulungs-Gewächshauses“



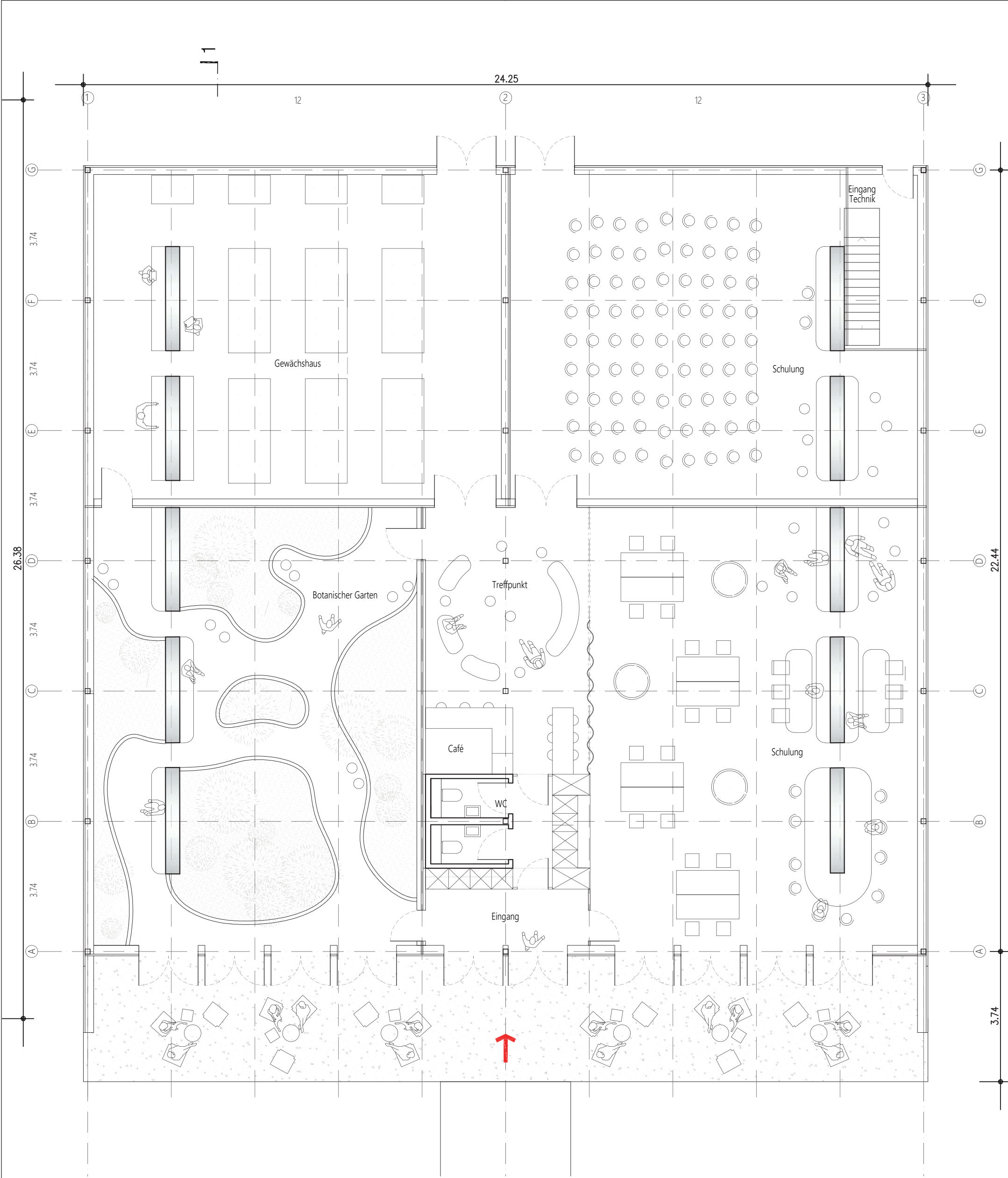


Lageplan 1:500



|                                                  |        |  |   |   |            |   |   |   |                                                                             |  |  |                |  |  |
|--------------------------------------------------|--------|--|---|---|------------|---|---|---|-----------------------------------------------------------------------------|--|--|----------------|--|--|
| <b>H A A S   Architekten BDA</b>                 |        |  | a | - | 29.01.2024 | - | - | - | <b>CHA<br/>SCHULUNGSGEWÄCHSHAUS</b><br>TU Berlin Königs Weg 6, 14193 Berlin |  |  |                |  |  |
| Pariser Straße 6 10719 Berlin Tel. 030.832298 20 |        |  |   |   |            |   |   |   | Plan-Nr.: CHA 00                                                            |  |  | Maßstab: 1:500 |  |  |
| Planbezeichnung:                                 | CHA 00 |  |   |   |            |   |   |   | gez.: 11.10.2023                                                            |  |  | Format: A3     |  |  |



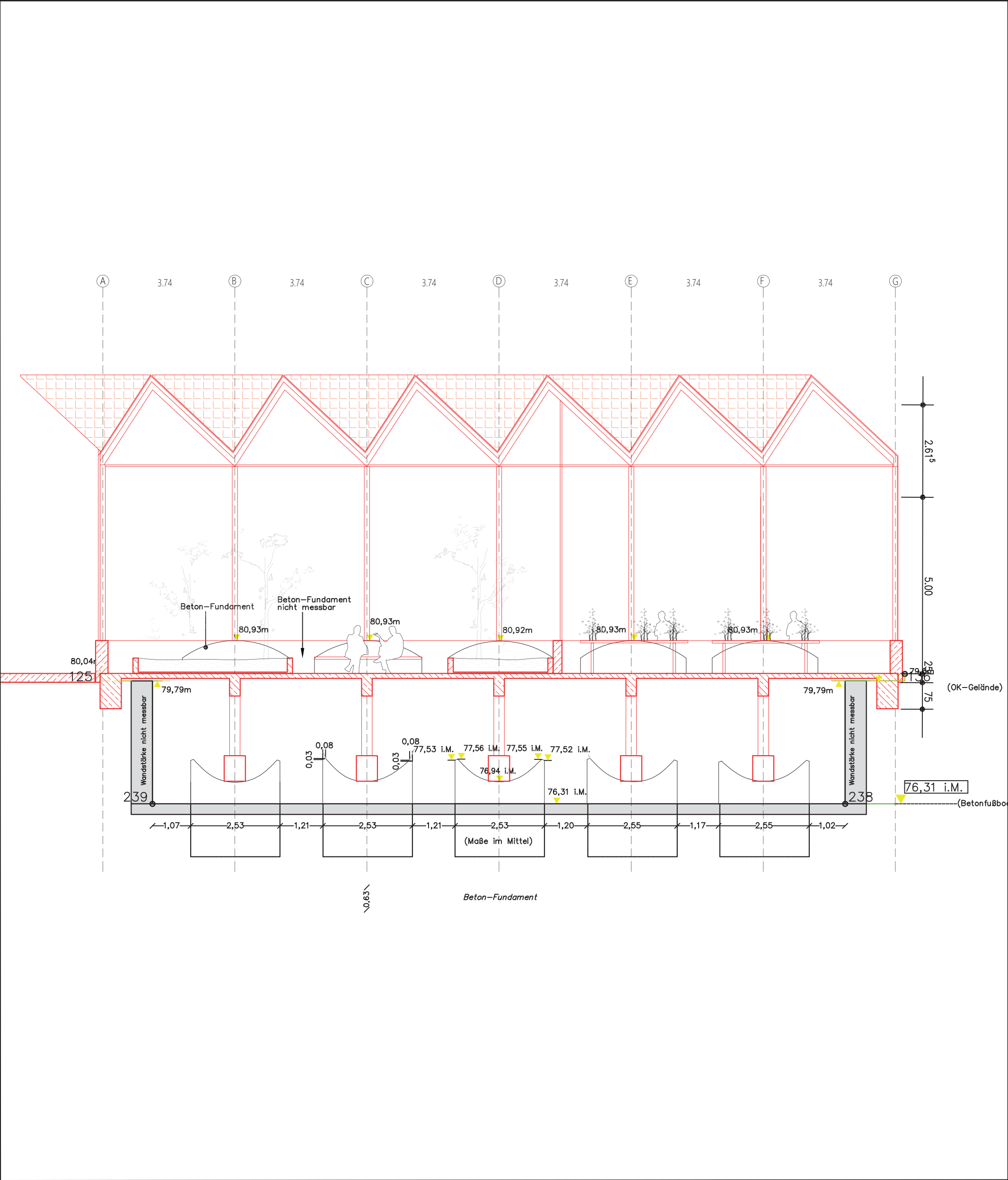


Grundriss 1:100



|                                                  |  |  |   |   |            |   |   |   |                                      |  |  |                                 |  |  |
|--------------------------------------------------|--|--|---|---|------------|---|---|---|--------------------------------------|--|--|---------------------------------|--|--|
| <b>H A A S   Architekten BDA</b>                 |  |  | a | - | 11.10.2023 | - | - | - | <b>CHA</b>                           |  |  |                                 |  |  |
| Pariser Straße 6 10719 Berlin Tel. 030.832298 20 |  |  |   |   |            |   |   |   | <b>SCHULUNGSGEWÄCHSHAUS</b>          |  |  |                                 |  |  |
|                                                  |  |  |   |   |            |   |   |   | TU Berlin Königs Weg 6, 14193 Berlin |  |  |                                 |  |  |
| Planbezeichnung:                                 |  |  |   |   |            |   |   |   | CHA 02                               |  |  | Plan-Nr.: CHA 02 Maßstab: 1:100 |  |  |
|                                                  |  |  |   |   |            |   |   |   |                                      |  |  | gez.: 11.10.2023 Format: A3     |  |  |

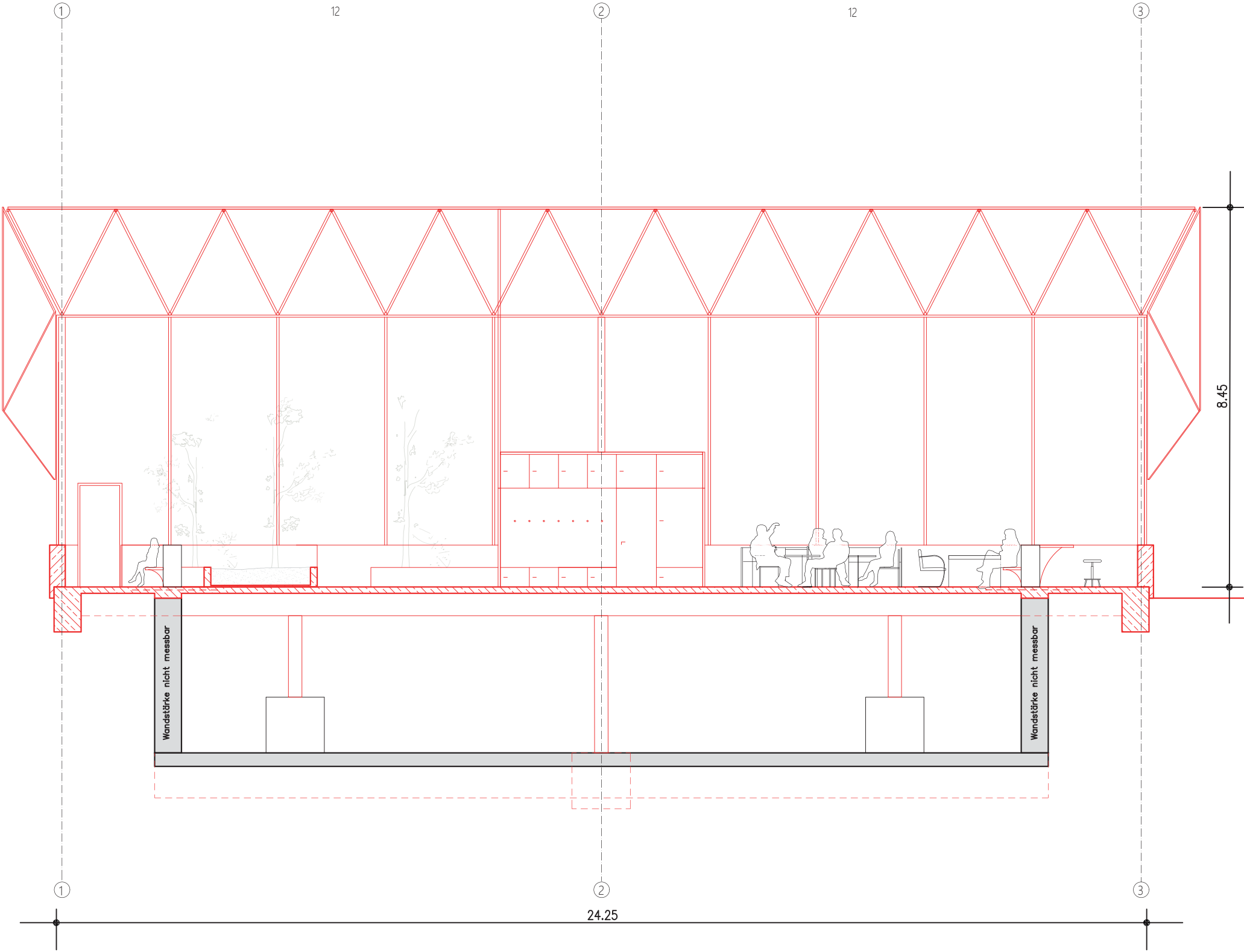




Schnitt 1:100

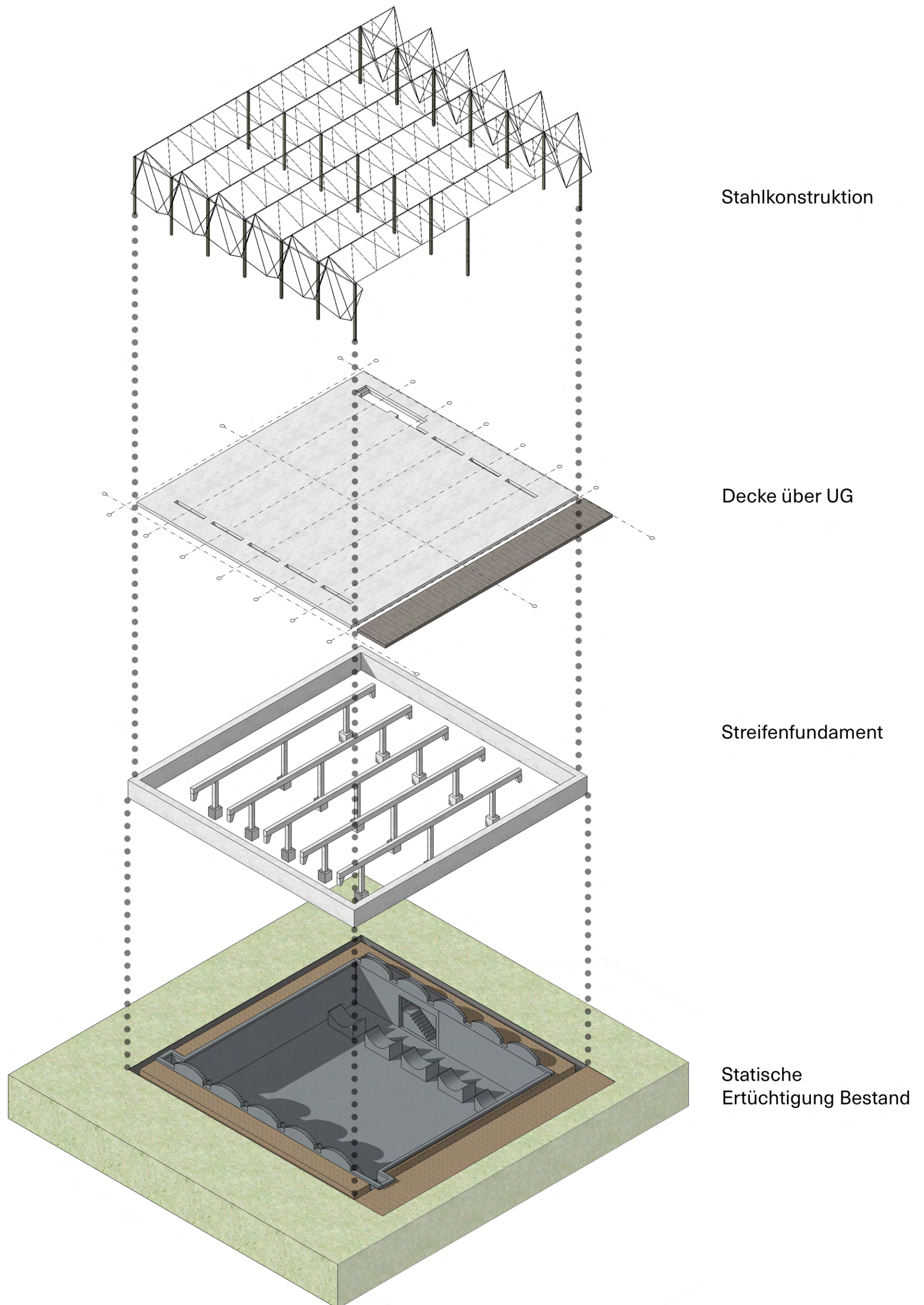


|                                                  |        |   |   |            |   |                                 |                                                                    |
|--------------------------------------------------|--------|---|---|------------|---|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| H A A S   Architekten BDA                        |        | a | - | 11.10.2023 | - | -                               | CHA<br>SCHULUNGSGEWÄCHSHAUS<br>TU Berlin Königsweg 6, 14193 Berlin |
| Pariser Straße 6 10719 Berlin Tel. 030.832298 20 |        |   |   |            |   |                                 |                                                                    |
| Planbezeichnung:                                 | CHA 02 |   |   |            |   |                                 |                                                                    |
|                                                  |        |   |   |            |   | Plan-Nr.: CHA 02 Maßstab: 1:100 |                                                                    |
|                                                  |        |   |   |            |   | gez.: 11.10.2023 Format: 1A3    |                                                                    |



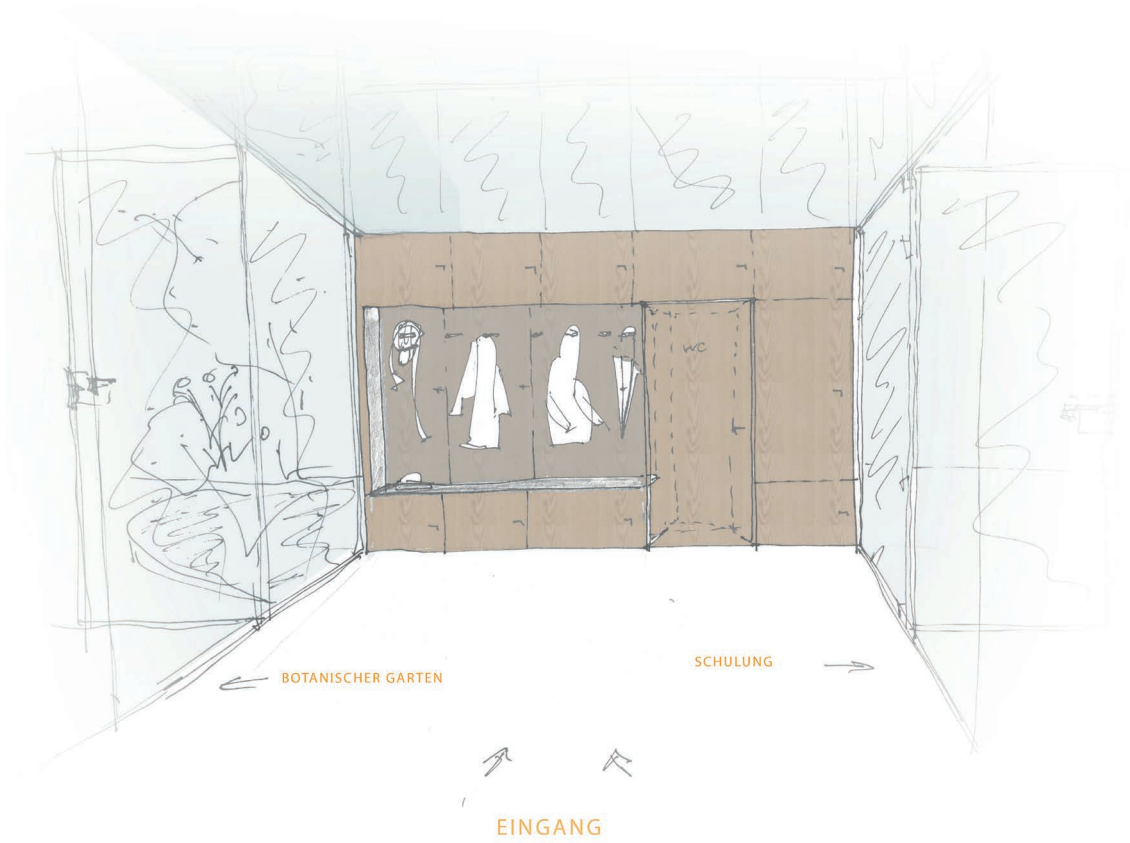
Schnitt 1:100



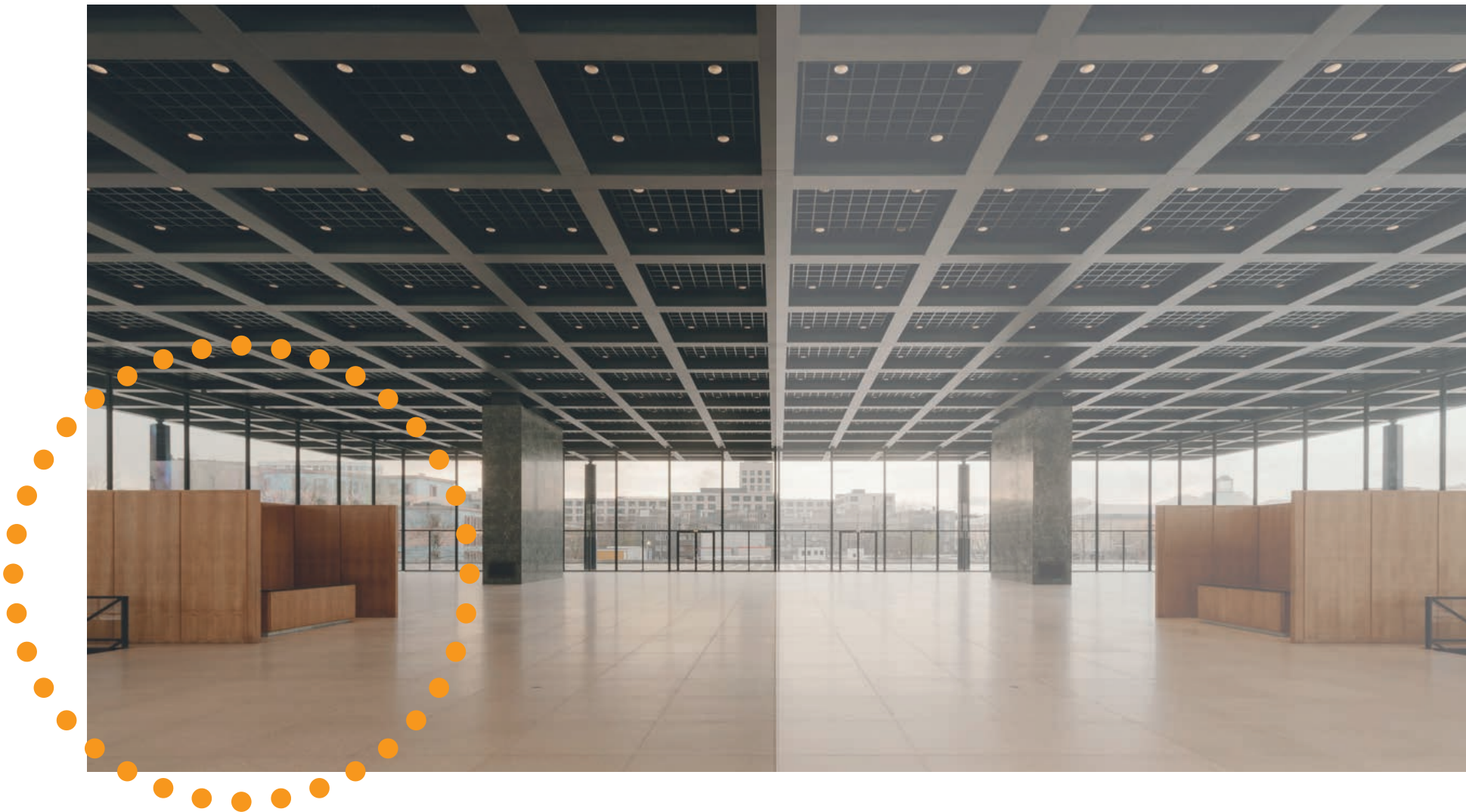




Zentrales Eingang



Mies van der Rohe  
Neue Nationalgalerie 1968

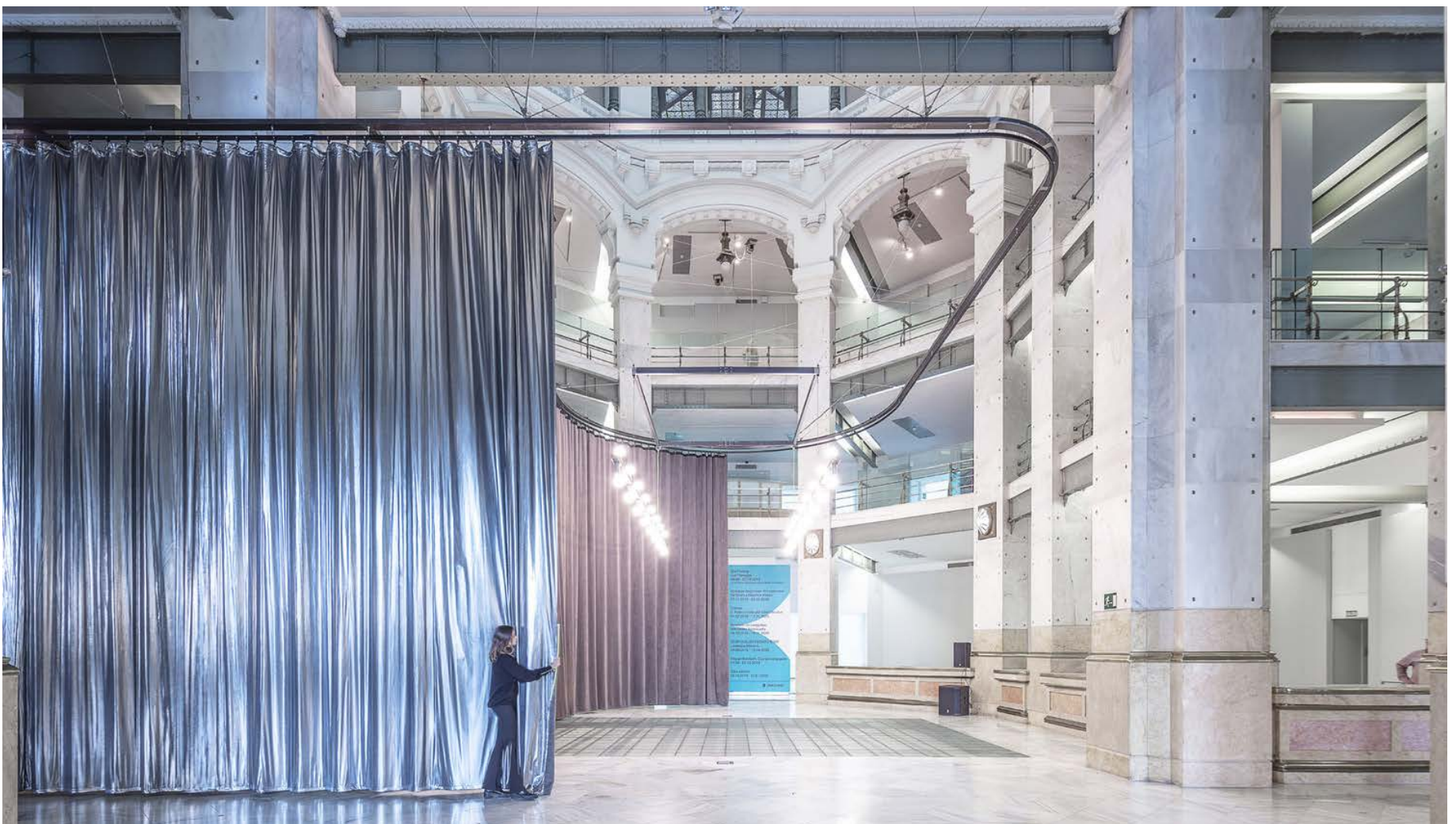




## Flexibler Raumtrenner, Energieschirm

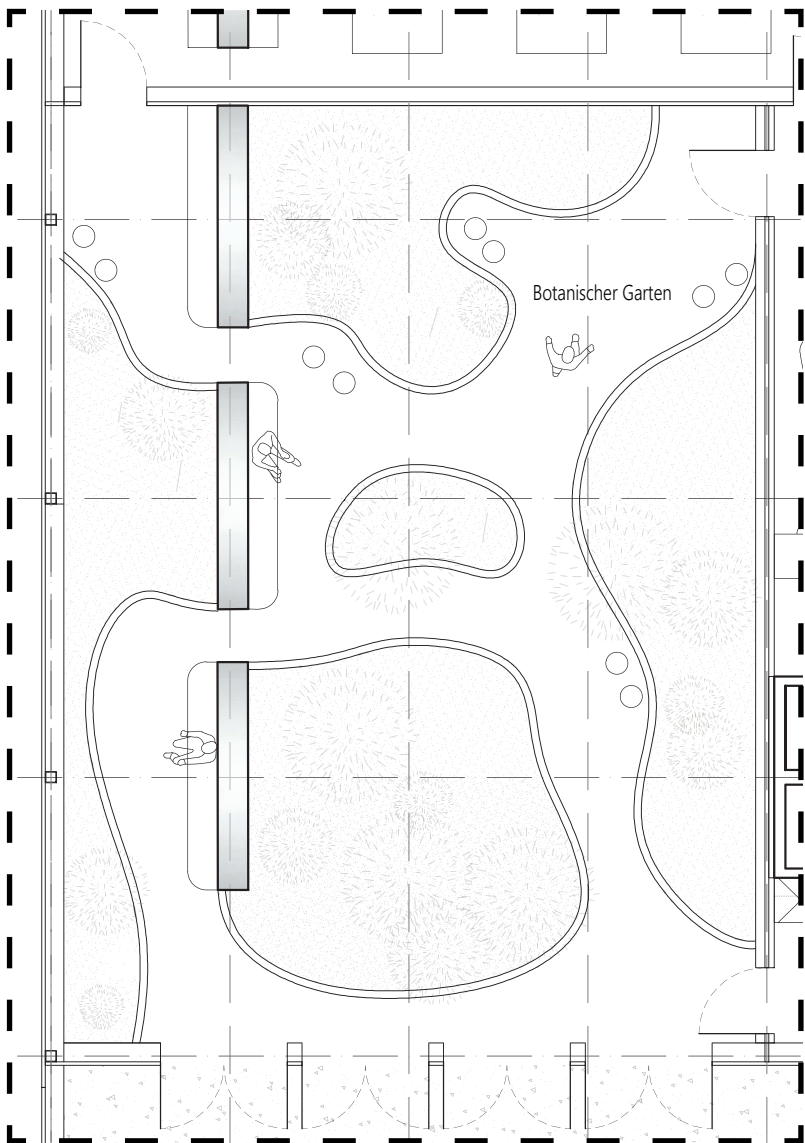


## Héctor Fernández Elorza Renovierung des Betriebshofs 2019





Botanischer Garten



Roberto Burle Marx  
Dachgarten des Ministeriums für  
Bildung und Gesundheit 1938

