



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Dr. Wolfgang Feist

**Wissenschaftliche Begleitung,
Qualitätssicherung und Messdatenauswertung
beim Projekt
"Fabrik als Passivhaus"
Endbericht**



Auftraggeber: Technische Universität Darmstadt

Februar 2003



**PASSIV
HAUS
INSTITUT**

Dr. Wolfgang Feist

**Wissenschaftliche Begleitung,
Qualitätssicherung und Messdatenauswertung
beim Projekt
"Fabrik als Passivhaus"
Endbericht**

Autoren:

Søren Peper
Wolfgang Feist
Jürgen Schnieders

Herausgeber:

PASSIVHAUS INSTITUT
Rheinstr. 44/46
D-64283 Darmstadt
Tel: 06151 / 82699-0
Fax: 06151 / 82699-11
E-Mail: Passivhaus@t-online.de
www.passiv.de

Darmstadt Februar 2003

**Dieser Bericht entstand im Auftrag der
Technischen Universität Darmstadt**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 0335006V/4 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Förderkonzept „**Solar optimiertes Bauen**“, 3. Teilkonzept: „**Solar optimierte Gebäude mit minimalem Energiebedarf**“ im Rahmen des 3. Programms Energieforschung und Energietechnologien.



Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ZUSAMMENFASSUNG	3
2	GEBÄUDEKURZVORSTELLUNG.....	8
3	REFERENZZUSTAND DES GEBÄUDES.....	13
3.1	BERECHNUNG NACH DEM VERFAHREN DER WSCHVO.....	14
3.2	REFERENZGEBÄUDE NACH EN832-JAHRESVERFAHREN	17
3.3	GEBAUTES PASSIVHAUS NACH EN832-JAHRESVERFAHREN	19
3.4	VERGLEICH: REFERENZHAUS UND PASSIVHAUS	21
4	SIMULATION DES THERMISCHEN GEBÄUDEVORHALTENS.....	23
5	TECHNISCH-WISSENSCHAFTLICHE QUALITÄTSSICHERUNG	25
5.1	LUFTDICHTHEITSPRÜFUNG	25
5.1.1	Thermographische Untersuchung bei der Lüftdichtheitsprüfung	35
5.1.2	Quantitative Lüftdichtheitsmessung	44
5.1.3	Dokumentation von Schwachstellen	51
6	MESSTECHNIK	52
6.1	MESSTECHNISCHES KONZEPT	52
6.2	SENSOREN UND IHRE ANORDNUNG	53
6.2.1	Wetterstation	57
6.2.2	Gaszähler.....	58
6.2.3	Elektrozähler	59
6.2.4	Wärmemengenzähler	60
6.2.5	Wasserzähler	64
6.2.6	Lufttemperaturmessung.....	64
6.2.6.1	Eigenerwärmung und Kalibrierung	65
6.2.6.2	Messpunkte.....	65
6.2.6.3	Intensivmessung (Temperatur/Feuchte).....	67
6.2.6.4	Lufttemperaturen Lüftungsgerät	67
6.2.7	Volumenstrommessung.....	69
6.2.7.1	Kontinuierliche Volumenstrommessung	74
6.2.8	Einzelsensoren.....	75
6.2.8.1	Strömungsmessung Kaltluftabfall.....	75
6.2.8.2	Kaltwassertemperatur	76
6.2.8.3	Wassertemperatur Sprinklerbehälter.....	77
7	MESSDATENAUSWERTUNG	78
7.1	LUFTTEMPERATUREN.....	78
7.1.1	Raumlufttemperaturen in den Gebäudezonen	86
7.1.1.1	Bürotrakt.....	87



7.1.1.2	Atrium	89
7.1.1.3	Produktion	90
7.1.1.4	Lager Nord (Wareneingang und Warenausgang).....	92
7.1.1.5	Hochregallager	93
7.1.1.6	Klimadatenvergleich	94
7.1.2	Behaglichkeitsuntersuchung	96
7.1.2.1	Luftfeuchtigkeit	96
7.1.2.2	Behaglichkeitsdiagramm.....	97
7.2	ENERGIEVERBRÄUCHE	101
7.2.1	Endenergie Gas	101
7.2.1.1	Endenergieaufwandszahl Brennwertkessel.....	102
7.2.2	Nutzwärme	103
7.2.2.1	Produktion	104
7.2.2.2	Heizung	105
7.2.2.3	Sprinklertank.....	117
7.2.3	Lüftungszentralgerät.....	118
7.2.3.1	Wärmebereitstellungsgrad.....	125
7.2.4	Stromverbrauch	127
7.2.5	Innere Wärmequellen	131
7.2.6	Primärenergie.....	133
7.3	ERDREICHWÄRMEÜBERTRAGER.....	136
7.3.1	Messdatenauswertung Erdreichwärmeübertrager.....	138
7.3.1.1	Temperaturverläufe	138
7.3.1.2	Energetische Untersuchung	144
7.3.1.3	Potentialuntersuchung.....	151
7.4	SOMMERLICHE ENTWÄRMUNG	152
7.4.1	Sommerperiode	156
7.5	STRÖMUNGSMESSUNG AN DER GLASFASSADE IM ATRIUM	160
7.6	TAGESLICHTNUTZUNG.....	164
8	LITERATUR.....	168



1 Einleitung und Zusammenfassung

Die Übertragung des Passivhaus-Konzeptes auf ein Fabrikgebäude, insbesondere eines für die chemische Industrie, ist ein sehr ehrgeiziges Projekt. Neben dem Zeit- und Kostendruck, welcher am Bau typisch, bei einem Industriebau aber nochmals verschärft ist, ergeben sich bei einem solchen Prototyp mit erhöhten energetischen Anforderungen viele innovative Aufgaben und Herausforderungen. Erstmals wurde dieser Weg vom Architekten Martin Zimmer und der Firma SurTec eingeschlagen. So ist in Zwingenberg an der Bergstraße im Jahr 2000 das erste Fabrikgebäude mit Passivhaus-Konzeption entstanden.

In dem dreispännigen kompakten Gebäude mit über 4.100 m² Energiebezugsfläche und 22.700 m³ Raumluftvolumen sind die Produktion, das Labor, ein dreispänniges Hochregallager mit 2000 Palettenplätzen sowie die Büros des Unternehmens aus dem Bereich der Oberflächenveredlung unter einem Dach vereint.

Bereits bei der Planung des Gebäudes wurde mit verschiedenen Firmen an Innovationen gearbeitet. Hier seien insbesondere die hochwärmegedämmten Rauchabzugsklappen auf dem Lagerdach, die erste hochwärmegedämmte Pfosten-Riegel-Stahlkonstruktion für das gesamte Atrium, das LKW-Tor mit Vakuumpaneelen und die Lüftungsanlage genannt: Mit der Lüftungsanlage wurde erstmals eine Lösung gesucht um sowohl den Anforderungen der chemischen Industrie als auch denen des Passivhausstandards zu genügen.

Trotz dieser zahlreichen Innovationen ist es dem Architekten gelungen, das Gebäude in kurzer Bauzeit bis Herbst 2000 fertig zu stellen, so dass eine rasche Inbetriebnahme möglich war. Dies war für das Unternehmen außerordentlich wichtig. Im Bereich der Logistik des Warenein- und -ausganges gab es in der Anfangsphase erhebliche Probleme, die wegen des Vorrangs der Produktion zu Ad-hoc-Lösungen (wie der Wareneinbringung durch ein geöffnetes großes Fenster) führten.

Das Passivhaus Institut führte die wissenschaftliche Begleitung sowie die Projektierung der Datenerfassungsanlage und der Datenauswertung für das Projekt durch. Mit der messtechnischen Begleitung des Neubaus wurde überprüft, ob die hochgesteckten Ziele des Projektes bei der Praxisumsetzung eingehalten werden konnten. Vorab wurde vom Passivhaus Institut eine dynamische Gebäudesimulation des Gebäudes vorgenommen [Schnieders 2001]. Darin wurden u. a. die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes berechnet und Komfortparameter untersucht.



In diesem Endbericht werden dargestellt:

- Der „Ausgangszustand“ des Gebäudes wird dokumentiert und es werden die Maßnahmen der Qualitätssicherung, insbesondere die Untersuchung der Luftdichtheit beschrieben.
- Das Konzept der messtechnischen Untersuchung inkl. der eingesetzten Sensoren wird vorgestellt. In der Hauptsache enthält der Bericht die Auswertungen bezüglich Temperatur- und Feuchteverlauf im Gebäude, zum Lüftungsgerät, der Energieverbräuche und des Erdreichwärmeübertragers, zum sommerlichen Verhalten des Gebäudes, bezüglich des Kaltluftabfalls an der Verglasung sowie zur Tageslichtmessung.

Die Messdatenerfassung erstreckte sich vom 1. Dezember 2000 bis zum 30. April 2002. Die Datenauswertung bezieht sich in der Hauptsache auf den Zeitraum vom 1. Mai 2001 bis zum 30. April 2002. Zum Teil werden auch Daten ab Dezember 2000 oder Januar 2001 einbezogen. Zum Heizwärmeverbrauch und den Bürottemperaturen wurden ergänzend auch noch Daten bis zum Januar 2003 berücksichtigt und bewertet.

Der Luftdichtheitsuntersuchung des kompakten Gebäudes (A/V -Verhältnis $0,27 \text{ m}^{-1}$) zeigt mit $n_{50} = 0,40 \text{ h}^{-1}$ ein sehr gutes Ergebnis, welches den Passivhaus-Grenzwert unterschreitet. Die meisten Einzelleckagen wurden im Atrium gemessen, können aber nicht zu Komforteinschränkung z. B. durch Zegerscheinungen führen.

Alle flächenspezifischen Angaben werden auf die Energiebezugsfläche bezogen. Diese beträgt $4112,5 \text{ m}^2$ und wird nach [DIN 277] als Netto-Grundfläche bestimmt. Damit ist sie **wesentlich kleiner** als die üblicherweise aus dem Bauvolumen ermittelte Fläche (nach WSVO '95 oder EnEV). Diese wäre hier mit 9082 m^2 mehr als doppelt so groß! Zum Vergleich der spezifischen **Energieverbrauchswerte** mit anderen Objekten ist dies entscheidend: Diese wären beim Bezug auf die mehr als doppelte so große Fläche auch weniger als **halb so groß!**

Das gesamte Gebäude wird als erstes Fabrikgebäude über eine reine Zuluftnacherwärmung und damit ohne Heizkörper beheizt. Die einzige Ausnahme bildet der Vorwärmraum für Produkte mit dauerhaft $35 \text{ }^\circ\text{C}$, der über Heizkörper versorgt wird.

Der gemessene Heizwärmeverbrauch des gesamten Objektes lag inkl. der auf Grund von Regelungsfehlern vorhandenen Sommerheizung bei $29,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (Zeitraum Mai 2001 bis April 2002). Zieht man die Sommerheizung im Zeitraum Mai bis September mit immerhin $4,5 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ab, ergibt sich der Wert für die Heizperiode (Oktober bis April) von **$25,1 \text{ kWh}/\text{m}^2$** . Während der Monitoring-Phase des Projektes stellte sich im Februar 2001 heraus, dass das Kernelement des Lüftungszentralgerätes, der Wärmeübertrager, durch chemisch / mechanische Einwirkung zerstört



wurde. Dadurch war der Wärmebereitstellungsgrad deutlich verschlechtert. Der Austausch wurde am 1. Februar 2002 durchgeführt. Danach wurde eine deutliche Verbesserung festgestellt, die eine weitere Reduktion des Verbrauchs zur Folge hatte. Der gemessene Verbrauchswert lag in der Heizperiode nach dem Austausch bei **20,3 kWh/m²**.

Gegenüber einem rechnerisch dargestellten Referenzgebäude (gleicher Baukörper, nach den zum Bau gültigen Anforderungen der WSVO `95) wurde eine **Heizwärmeeinsparung von rund 85 %** erreicht.

Damit werden die SolarBau-Anforderungen für den Heizwärmeverbrauch von $\leq 40 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ nicht nur eingehalten, sondern um 50 % unterschritten. Die Anforderung des Passivhausstandards mit $\leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ wird dagegen nicht ganz erreicht. Die Ergebnisse der Simulation mit den hier zum Vergleich relevanten Werten zwischen 13,9 und 16,1 kWh/(m²a) liegen ebenfalls niedriger als die Messwerte. Als Ursachen für den gemessenen Mehrverbrauch sind die folgenden Punkte zu nennen:

- Eine nicht optimal eingestellte Steuerung der Nachheizregister führt zu unnötigen Heizvorgängen.
- Das Ladetore, die Laderamentür und ein großflächiges Fenster sind auch in der kalten Jahreszeit produktionsbedingt lange Zeit geöffnet.
- Das LKW-Ladetor und die Seitentür zur Laderampe (beide vakuumgedämmt) wurde beschädigt und das Gebäude konnte zunächst nur provisorisch geschlossen werden. Das LKW-Tor wurde jetzt als Rolltor mit PU-Dämmpaneelen ausgeführt.
- Die Raumlufttemperaturen im Winter lagen im Schnitt höher als die angestrebten Sollwerte.
- Die Lüftungsanlage wurde lange Zeit (bis Ende Februar 2002) mit hoher Disbalance betrieben.
- Die Wärmeübertrager der Lüftungsanlage waren defekt und wurden erst am 1. Februar 2002 ausgetauscht.
- Die Lüftungsanlage fährt dauerhaft mit voller Leistung. Das bedeutet, dass der Luftwechsel auch in Betriebspausen (Nacht, Wochenende und Feiertage) sehr hoch liegt. Durch die nicht besonders energieeffizienten Wärmeübertrager steigt damit der Wärmebedarf für die Lufterwärmung deutlich an.
- Die Lüftungsanlage wurde bis in die Heizzeit hinein (6. November 2001) im Bypass-Betrieb gefahren (Dadurch wurde die Wärmerückgewinnung umgangen).

Mit 20,3 kWh/m² ist der Heizenergieverbrauch für die Gebäudeheizung dennoch im Vergleich zu konventionellen Gebäuden - insbesondere im Gewerbebaubereich ausgesprochen niedrig. Obwohl der Passivhausstandard mit dem Projekt nicht vollständig erreicht werden konnte, sind die Ergebnisse bzgl. der Energieeinsparung trotzdem zufriedenstellend.



Die Raumlufttemperaturen in den Wintermonaten waren im Mittel höher als die angesetzten Sollwerte (Lager 16, Produktion/Labor 18 und Büros 20 °C). Allerdings gab es im Dezember 2001 und Januar 2002 eine deutliche Senke bei den Raumlufttemperaturen. Es wurde, bedingt durch die fehlenden Wärmeeinträge der Produktion, eine nicht optimale Regelung der Nachheizregister und den für ein Passivhaus niedrigen Wärmerückgewinnungsgrad der Lüftungsanlage bei untypisch hohen Luftvolumenströmen eine Tiefsttemperatur nach der Betriebspause von knapp 12 °C gemessen. Dies lag insbesondere an der für diese Bedingungen nicht ausreichenden Heizleistung, da die defekten Wärmeübertrager nicht den entsprechenden Beitrag liefern konnten. Nach dem Austausch der Wärmeübertrager hat sich dies deutlich gebessert: In den Büros herrschen vertretbare Temperaturen von im Mittel über 20 °C.

Im Sommer lagen die Temperaturen im Bürobereich längere Zeit über den als angenehm zu bewertenden Bereich, im Tagesmittel wurden aber 29,4 °C nie überschritten. Hier könnte die Situation mit einer außenliegenden Verschattung der Fenster auf der Ostfassade deutlich verbessert werden. In der Produktion gab es durch die hohe produktionsbedingte Wärmeabgabe die höchsten Temperaturen im Gebäude. Die Untersuchung der relativen Feuchte in einem beispielhaften Büroraum ergab sogar im Kernwinter einen respektablen Mittelwert von 42,2 % rel. Feuchte. Zu keiner Zeit wurden 34 % rel. Feuchte (Tagesmittelwerte) unterschritten.

Die Stromverbräuche des gesamten Gebäudes mit den Verbräuchen für die Produktion, das Hochregallager, die Büros und alle anderen Klein-Anwendungen sowie die Beleuchtung - allerdings ohne die Lüftungsanlage - liegt bei 77 kWh/(m² a). Die produktionsbedingt hohen Stromverbräuche führen automatisch auch zu sehr hohen inneren Wärmequellen. Diese wurden für das Gebäude bei der vorhandenen Nutzung mit 7 W/m² berechnet. Diese hohen inneren Wärmequellen führen ebenfalls zu einer Reduktion der erforderlichen Heizenergie, was bei der Planung bereits berücksichtigt worden war.

Das Lüftungszentralgerät versorgt das Haus mit der im Erdkanal vorkonditionierten Frischluft. Sie ist in dieser Größenordnung notwendig, um die hohen Lüftungsanforderungen der chemischen Produktion zu erfüllen. Zur besseren Energieausnutzung ist ein Betrieb mit Wärmerückgewinnung realisiert. Um die Anlage zu optimieren erfolgte ein Balanceabgleich der Volumenströme. Die oben erwähnten defekten Wärmeübertrager wurden am 1. Februar 2002 ausgetauscht, wonach sich der effektive Wärmebereitstellungsgrad deutlich verbessert hat. Der Stromverbrauch konnte durch den Balanceabgleich am 28. Februar 2002 verringert werden. Er liegt allerdings für eine effiziente Lüftung immer noch deutlich zu hoch. Die Anlage benötigt ca. 43 kWh/(m²a). Hier ist vor allem eine hydraulisch verlustärmere Auslegung der Anlage erforderlich.



Die Beurteilung des Primärenergieeinsatzes für das Gebäude zeigt, dass der Stromeinsatz für den Produktionsbetrieb und für die Lüftungsanlage daran den bedeutendsten Anteil haben. Der Erdgasverbrauch für die Erzeugung der Wärme für den Produktionsbetrieb, Warmwasser und die Heizung tritt dagegen primärenergetisch in den Hintergrund. Für die Heizwärme allein werden $35,4 \text{ kWh}_{\text{Primär}}/(\text{m}^2\text{a})$ verbraucht.

Das Gebäude verfügt über einen Erdreichwärmeübertrager aus fünf Betonrohren je 60 m Länge zur Vorkonditionierung der Frischluft. Dieser hat als Heizbeitrag maximal 318 kWh/d und als Kühlbeitrag maximal 228 kWh/d dem Gebäude zugeführt. In der Sommerperiode wurden $5,4 \text{ kWh}/\text{m}^2$ Kühlenergie und in der Heizperiode $10,3 \text{ kWh}/\text{m}^2$ Heizenergie zugeführt. Allerdings liefert der Kanal im Sommer auch Heizwärme und im Winter auch Kühlenergie, was nicht unbedingt gewünscht ist. Der Kanal ist für den Volumenstrom von im Durchschnitt etwa $12.000 \text{ m}^3/\text{h}$ relativ kurz. Die Frischluft kommt bei sehr niedrigen Temperaturen nicht frostfrei zum Wärmeübertrager, wodurch allerdings kein Problem für den ungestörten Betrieb gegeben ist.

An der dreigeschossigen hohen Verglasung der Ost-Fassade in der Cafeteria wurden Messungen zum möglichen Kaltluftabfall durchgeführt. Als zentrales Ergebnis stellte sich heraus, dass die Luftgeschwindigkeiten und -temperaturen vor der Fassade bei der hier vorhandenen hohen thermischen Qualität trotz der großen Höhe im komfortablen Bereich bleiben.

Die Untersuchung der Tageslichtausnutzung im Bürobereich ergab mit Tageslichtquotienten zwischen 1,4 bis 3,7 % insgesamt ein gutes Ergebnis.

Insgesamt zeigt das Projekt SurTec, dass sich Passivhaustechnik erfolgreich auch bei Gewerbebauten einsetzen lässt. Komponenten für eine hocheffiziente Energienutzung in spezifischen Anwendungsfällen müssen jedoch jeweils neu entwickelt und getestet werden. Aus den nun vorliegenden Erfahrungen lassen sich Empfehlungen für Folgeprojekte ableiten, welche die Betriebsergebnisse weiter verbessern und die Energiebilanz nochmals zu geringeren Werten verschieben können. In der 2. Generation ist der Passivhausstandard unter Verwendung dieser Erfahrung zuverlässig erreichbar.



2 Gebäudekurzvorstellung

In diesem Abschnitt werden Ansichten und Pläne des hier untersuchten Gebäudes der Firma SurTec in Zwingenberg an der Bergstraße (Hessen) vorgestellt.



Abb. 1: Links: Südfassade mit den Bereichen Lager, Produktion/Labor, Atrium und Büro (von links nach rechts). Rechts: Nordfassade von Büro- und Atriumbereich. Im Vordergrund sind die beiden Fortluftrohre zu sehen.



Abb. 2: Links: Ostfassade des Gebäudes mit den Bürobereichen. Vor der Fassade sind Rankhilfen für Kletterpflanzen gespannt. Diese sollen, wenn sie ausgewachsen sind, den Sonnenschutz darstellen. Der vollverglaste Teil stellt den Cafeteria-Bereich dar. Von diesem gelangt man auf die Außenterrasse am Teich.



Abb. 3: Links: Nordfassade des Gebäudes mit dem abgesenkten Ladebereich mit der Laderampe und dem LKW-Tor. Rechts: Geschlossenes LKW-Tor aus Vakuum-Paneelen im Lagertrakt des Gebäudes. Später wurde das Tor gegen ein Rolltor aus PU-Dämmpaneelen ausgewechselt.

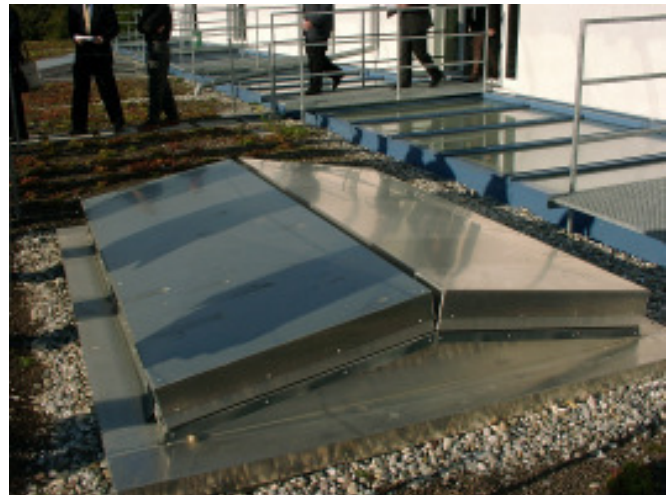


Abb. 4: Links: Atrium Innenansicht von Nord nach Süd vor der intensiven Bepflanzung. Die linke Seite umfasst die Eingänge zu den Büros, die rechte die Wand vom Produktions/Labor-Bereich. Rechts: Hochwärmegedämmte Rauchabzugsklappen auf dem Lagerdach.



Abb. 5: Links: Blick in die Produktion im 1. OG mit den Rührbehältern. Diese reichen bis in das drunter liegende Geschoss. Rechts: Elektrische Wärmeschränke im Bereich der Produktion im 1. OG.

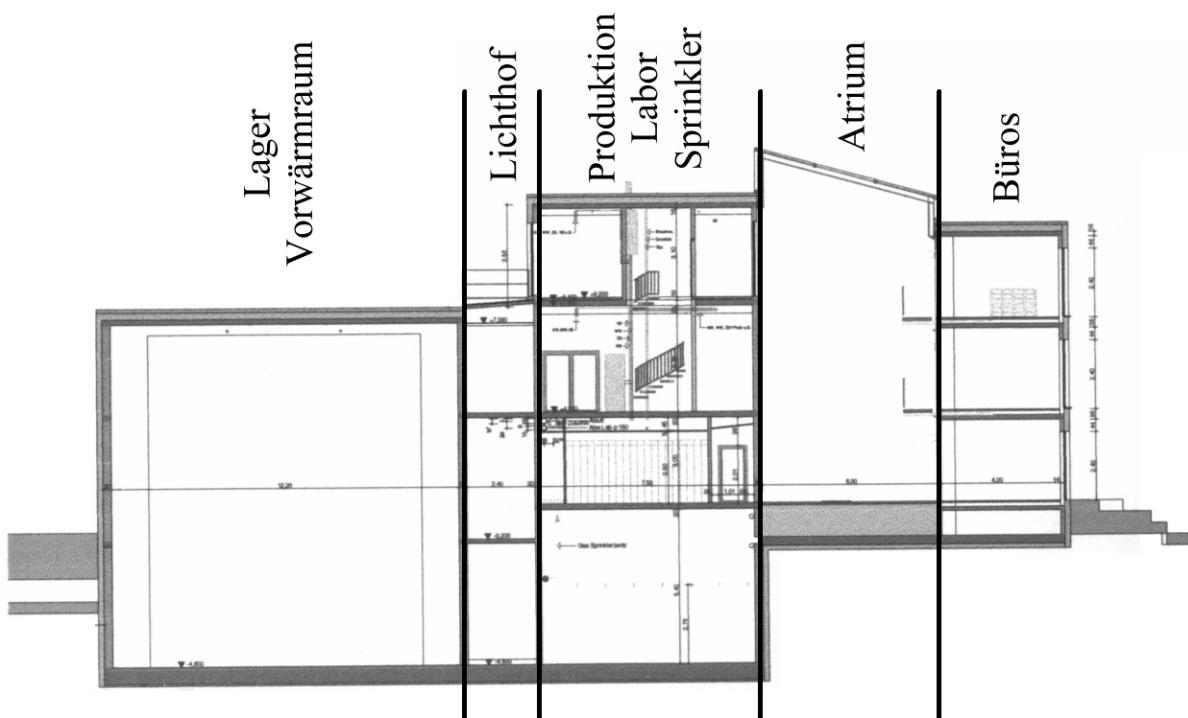


Abb. 6: Schnitt durch das Gebäude (West-Ost Richtung) mit Blick von Süd. Die unterschiedlichen Gebäudezonen sind gekennzeichnet (aus [Schnieders 2001]).

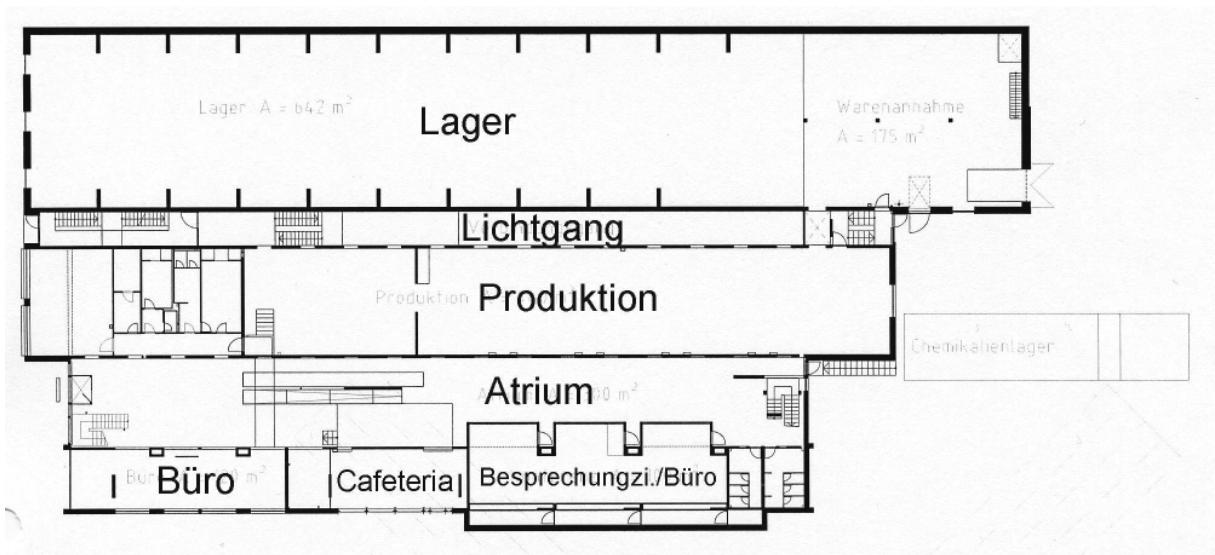


Abb. 7: Grundriss EG mit den Bereichen Lager, Lichtgang, Produktion/Labor, Atrium und Büro/Cafeteria/Besprechungszimmer.

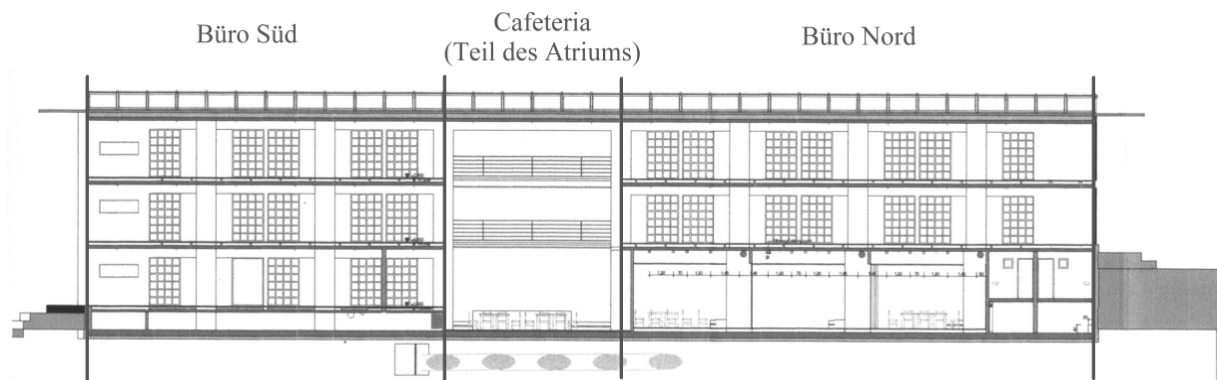


Abb. 8: Schnitt durch den Bürobereich (in Nord-Süd Richtung). Unter der Bodenplatte sind die schräg geschnittenen Rohre des Erreichwärmeübertragers zu erkennen.

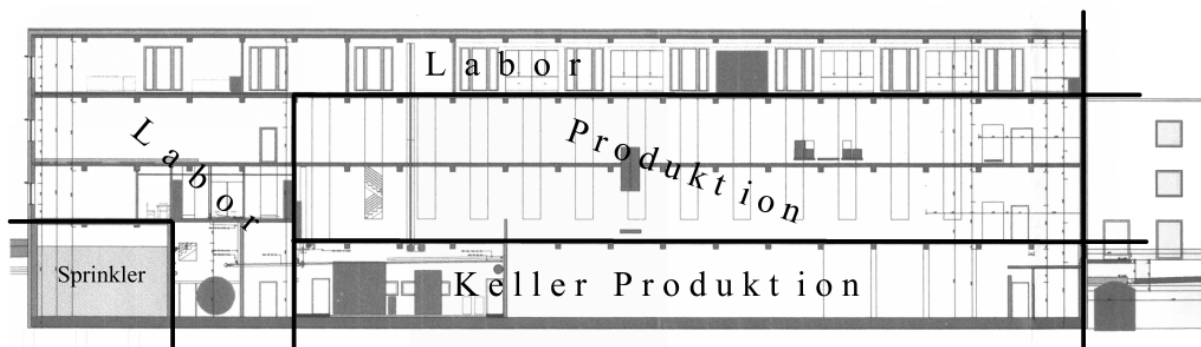


Abb. 9: Schnitt durch den Produktions-/Labor-Bereich des Gebäudes (Nord-Süd Richtung). Die unterschiedlichen Gebäudezonen sind gekennzeichnet (aus [Schnieiders 2001]). Im südlichen Teil des Bereiches „Keller Produktion“ befindet sich der Technikkeller.

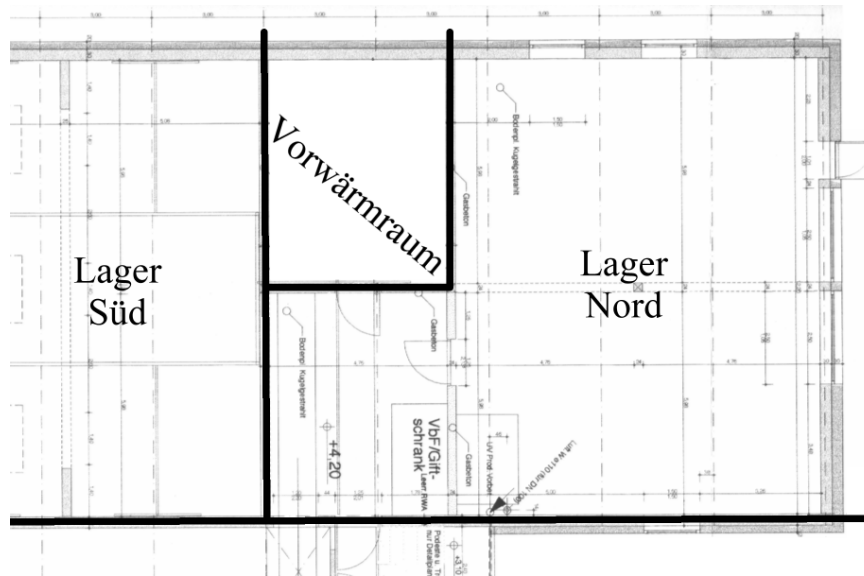


Abb. 10: Grundriss 1. OG des nördlichen Teils des Lagertraktes. Die unterschiedlichen Gebäudezonen sind gekennzeichnet (aus [Schnieders 2001]). Im „Lager Süd“ befindet sich das Hochregallager, der Vorwärmraum mit dauerhaft 35 °C befindet sich als gesonderte Zone im Lager Nord.

3 Referenzzustand des Gebäudes

Die wissenschaftliche Beratung und Begleitung beim Projekt in Zwingenberg setzte schon sehr früh ein. Der Architekt Martin Zimmer hat daher von Anfang an die Zielsetzung einer sehr weitgehenden energetischen Optimierung bei seiner Planung im Auge behalten. Eine vollständige „ursprüngliche Planung“, ohne die für das Passivhaus notwendigen Maßnahmen, gab es daher gar nicht.

Das gesamte Industrieobjekt wäre konventionell vermutlich eher in mehreren getrennten Baukörpern geplant worden. Schon das Konzept, Produktion, Lager, Labor und Verwaltung über großzügige verglaste Zwischenbereiche miteinander zu verbinden und dadurch ein einzelnes, sehr kompaktes Gebäude zu schaffen, reduziert die erforderliche Heizwärme.

Um zu einer Bewertung der energetischen Qualität des errichteten Baukörpers zu kommen, muss aber in jedem Fall ein Referenzzustand zur Verfügung stehen. Da eine vollständige Alternativplanung nicht vorliegt und die nachträgliche Erstellung einer solchen für einen derart großen Industriekomplex ein unvertretbarer Aufwand wäre, der gleichwohl zu keinen zusätzlichen Erkenntnissen führt, gehen wir für die Bestimmung des Referenzfalles von dem Baukörper aus, wie er geplant und gebaut wurde. Verändert werden nur die energierelevanten Eigenschaften der Gebäudehülle und der Haustechnik.

Der Referenzzustand wird wie folgt definiert:

Die Gebäudehülle ist in ihrer architektonischen Gestaltung identisch zum gebauten Objekt. Die Bauteilqualitäten von Außenwänden, Verglasungen, Dächern, Bodenplatten und Kellerdecken, die Teile der thermischen Hülle sind, werden so verändert, dass das entstehende Referenzmodell gerade die Anforderungen der zum Zeitpunkt des Baus gültigen Wärmeschutzverordnung erfüllt hätte (WschVO 1995).

Der energetische Referenzzustand wurde mit Hilfe der Arbeitsmappe des Passivhaus Projektierungs Paketes [PHPP 2000] bestimmt. Entscheidende Bestimmungsstücke sind dabei das umbaute Volumen V und die gesamte Hüllfläche A (vgl. Tabelle 1).

Mit $A/V = 0.27 \text{ m}^{-1}$ handelt es sich beim SURTEC-Fabrikgebäude um einen sehr kompakten Baukörper. Die Wärmeschutzverordnung '95 fordert für dieses A/V -Verhältnis einen rechnerischen Jahresheizwärmebedarf nach dem Rechenverfahren der Verordnung von $18.5 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$ bezogen auf das Bruttovolumen. Im Prinzip könnten wir diesen Anforderungswert direkt für die Bestimmung des Referenzfalles verwenden; diesen Weg haben wir allerdings nicht eingeschlagen: Aus gutem Grund, wie sich noch zeigen wird.



	WSVO '95	Verfahren PHPP	Dynbil- Simulation	Einheit
	(berechnet aus Bruttovolumen)	Beheizte Nettonutzfläche ohne Treppen		
Flächen				
Energiebezugsfläche	9 081.6	4 112.5	4 112.5	m ²
Gesamte Hüllfläche	7 744.9			m ²
Volumina				
Nettoluftvolumen	22 704	22 730	22 730	m ³
Umbautes Volumen	28 380	28 380	28 380	m ³
A/V-Verhältnis	0.27			m ⁻¹

Tabelle 1: Kenngrößen für die Gebäudegeometrie

3.1 Berechnung nach dem Verfahren der WschVO

In Tabelle 2 ist der Berechnungsgang für das Referenzgebäude nach dem Verfahren der Wärmeschutzverordnung '95 dokumentiert. Für die Berechnungen wurden die Annahmen zu den Randbedingungen in Übereinstimmung mit den Vorgaben der WschVO gewählt. Das bedeutet z.B.

- Annahme eines 0.8 fachen Luftwechsels (Tagesdurchschnitt)
- Annahme von inneren Wärmequellen in Höhe von 10 W/m²
- Verwendung von Bauteiltemperaturdifferenzkorrekturfaktoren von 0.5 für den Boden und von 0.8 für die Dächer.

Bezüglich der Lüftung wurde im Referenzfall davon ausgegangen, dass keine Wärmerückgewinnung verwendet wird ($\eta_{WRG} = 0$).

Für die Fenster und Verglasungen wurde davon ausgegangen, dass Standard-Zweischeibenwärmeschutzverglasungen (U_g -Wert 1,4 W/(m²K)) in einem Kunststoff- oder thermisch getrennten Metallrahmen ($U_f=1.8$ W/(m²K)) verwendet werden. Zwar wäre es im hier vorliegenden Fall möglich und zulässig, auf unbeschichtete Zweischeibenisolierverglasungen zurückzugreifen, diese wären aber kaum kostengünstiger zu erhalten und ein solches Vorgehen wäre zum Zeitpunkt des Baus des Fabrikgebäudes völlig unüblich gewesen. Aus den getroffenen Annahmen ergibt sich U_w für die Fenster und Verglasungen im Mittel zu 1.6 W/(m²K).

Für Türen und sonstige offenbare opake Hüllflächen wurden ein U-Wert von 2.0 W/(m²K) eingesetzt.



Die Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken Hüllflächen Außenwand, Dach und Bodenplatte würden sich an dieser Stelle nun so festlegen lassen, dass die Anforderung der WschVO ´95 gerade erfüllt wäre. So ergibt sich ein noch zulässiger U-Wert von Dach und Außenwand von je $0.92 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Derart schlecht gedämmte Bauteile sind jedoch bei heutigen Neubauten völlig unüblich. Wir gehen davon aus, dass auch bei diesem Baukörper eine übliche Bauweise gewählt worden wäre, auch wenn dadurch defacto eine Übererfüllung der Wärmeschutzverordnung resultiert:

- U-Wert Außenwand $U_{AW} = 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- U-Wert Dach $U_{DA} = 0.33 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
- Für die Bodenplatte gehen wir von $U_G=0.56 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ aus.

Mit diesen Werten ergibt sich nach dem Berechnungsgang der zur Zeit des Bauens gültigen WschVO ´95 ein Jahresheizwärmebedarf von $394\,911 \text{ kWh/a}$ oder $13.9 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$ bezogen auf das umbaute Volumen. Die Anforderung der Verordnung ($18.5 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$) wird also durch den hier beschriebenen Referenzbau deutlich übererfüllt (-25%). Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Anforderungen der jetzt nicht mehr gültigen Verordnung bei sehr kompakten Gebäuden nicht der fortgeschrittenen Baupraxis gerecht wird: Allein durch ganz „normales“ Bauen mit mittelmäßigen Produkten würden die Anforderungen nicht nur erreicht, sondern stark übererfüllt.

Ökonomisch vertretbare Anforderungen zur Energieeinsparung liegen jedoch eher bei U-Werten von $0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für die Außenwand und $0.17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ im Dach sowie Fenstern mit U_w -Werten im Bereich von $1.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Mit diesen Werten wäre eine Einsparung gegenüber dem Referenzwert von mehr als 25% möglich, ohne dass sich bedeutende bauliche Mehrkosten ergeben würden. Auch die jetzt gültige Energieeinsparverordnung erweist sich vor dem Hintergrund dieser Möglichkeiten als im Anforderungsniveau unzureichend.

Durch das Ergebnis für den Referenzbau wird nun auch deutlich, warum nicht einfach mit dem Anforderungswert von $18.5 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{a})$ weitergerechnet werden konnte: Jeder einigermaßen nach den Regeln der heutigen Baupraxis errichtete Neubau dieser Kompaktheit hat einen deutlich niedrigeren Jahresheizwärmebedarf als nach der Verordnung gefordert.

Allerdings kann auch das so bestimmte Ergebnis noch nicht als Referenzwert für das Passivhaus-Fabrikgebäude verwendet werden: Der in WschVO´95 festgelegte Rechengang und die dabei gewählten Randbedingungen stimmen nämlich mit den realen Verhältnissen beim konkreten Bauprojekt nicht ausreichend überein. Daher muss mit den auf diesem Weg bestimmten baulichen Parametern nun noch eine Energiebilanz mit den aus anderer Quelle bekannten Randbedingungen und mit dem nach DIN EN 832 normierten Rechenverfahren durchgeführt werden.



Berechnungsblatt für das Verfahren nach der Wärmeschutzverordnung 1995
JAHRESHEIZWÄRMEBEDARF WSV0

Objekt: GebäudeTyp/Nutzung:
 Standort: Umbautes Volumen: m³ vgl: Wohnfl.: m²
 WSV0-Nutzfläche: m²
 A/V-Verhältnis: m⁻¹

Besteile	Fläche m²	U-Wert W/(m²K)	Reduktionsfaktor W/SVC	G _f kWh/a	WWh/a
1. Fassade La. geg. AL	479.2	0.50	1.0	84	20128
2. Fassade La. geg. ER	581.0	0.50	0.5	84	12200
3. Fassade Dr. geg. AL	483.6	0.50	1.0	84	20311
4. Fassade Dr. geg. ER	82.4	0.50	0.5	84	1730
5. Fassade Bü. geg. AL	76.7	0.50	1.0	84	3220
6. Fassade Bü. geg. ER	142.5	0.50	0.5	84	2993
7. Rauchabzugsklappen	74.9	2.00	1.0	84	12580
8. Dach Lager	918.5	0.33	0.8	84	20368
9. Dach Produktion	631.8	0.33	0.8	84	14011
10. Dach Büro	714.5	0.33	0.8	84	15844
11. Grund Lager	843.6	0.56	0.5	84	19841
12. Grund Produktion	646.3	0.56	0.5	84	15201
13. Grund Büro	573.7	0.56	0.5	84	13492
14. Grund Verap rung	275.4	0.56	0.5	84	6478
15. Türen	17.5	2.00	1.0	84	2948
16. Fenster	#####	1.59	1.0	84	161089
SUMME	7744.9 m²				

Jahres-Transmissionswärmeverluste Q_T Summe

Luftvolumen VL Faktor unbautes Vol m³
 = m³
 1h

energetisch wirksamer Luftwechsel n_L 1h
 Faktor Anlage Faktor 65% / Jahres
 = 1h

☐ Lüftung mit reiner Abluft V_L m³ WRG-Faktor C_{ext} WWh/a
Lüftungswärmeverluste Q_L = WWh/a

Summe Wärmeverluste Q_V (+) * Gleichzeitigkeitsfaktor = WWh/a

Ausrichtung der Fläche	g-Wert (senr. Einstr.)	Fläche m²	Globalstr. Heizzeit WWh/(m²a)	WWh/a
1. Ost	0.48 * 62%	616.52	275	48354
2. Sud	0.48 * 62%	163.40	400	18640
3. West	0.48 * 62%	134.33	275	10535
4. Nord	0.48 * 62%	117.63	180	5368
5. Horizontal	0.48 * 62%	171.49	275	13450

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S Summe

spezif. interne Quellen WWh/m² V m³
Interne Wärmequellen Q_I = WWh/a

Wärmegewinne Q_G Freie Wärme Q_F: Q_S + Q_I =

Heizwärmebedarf Q_H Q_V - Q_G = WWh/a

Anforderung Bauwerksart WWh/(m²a) Anforderung erfüllt? **Q^{**}_H** WWh/(m²a)
Q^{*}_H WWh/(m²a)

Tabelle 2: Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs des Referenzfalls SurTec-Gebäude nach dem Verfahren der WschVO '95

3.2 Referenzgebäude nach EN832-Jahresverfahren

In Tabelle 3 ist der Rechengang nach dem Jahresverfahren der EN 832 mit den Randbedingungen für das konkrete Fabrikgebäude dokumentiert. Gegenüber dem Rechengang nach WschVO`95 (letzter Abschnitt) ändern sich dabei folgende Größen:

- Die Reduktionsfaktoren für die Bauteile im Dach sind ebenfalls 1.0.
- Die Luftmengen der Gebäudelüftung (in diesem Fall muss von einer Abluftanlage ausgegangen werden) betragen im Durchschnitt von Tag- und Nachtwerten ca. 14000 m³/h, was einem Durchschnittsluftwechsel von 0,62 h⁻¹ entspricht. Dieser Wert ist identisch mit dem Projektierungswert für das realisierte Passivhaus-Fabrikgebäude.
- Statt der pauschalen Reduktionsfaktoren für die Solareinstrahlung gemäß WschVO (0.46) wird von den tatsächlichen Faktoren für Glasanteil, Verschattung, Verschmutzung und winkelabhängigem nichtsenkrechtem Energiedurchlaß ausgegangen. Das erhöht in diesem Fall das solare Energieangebot, da vergleichsweise großformatige Verglasungen eingesetzt worden sind.
- Die inneren Wärmegewinne werden von 10 auf 4.8 W/m² reduziert, wobei sich allerdings auch noch die Bezugsfläche von der aus dem Bruttovolumen gemäß der Verordnung bestimmten auf die eigentliche Gebäudenutzfläche reduziert. Dies erhöht den rechnerischen Wärmebedarf wieder. Die Annahme stimmt so mit der Simulation (vgl. Kapitel 3) überein.
- Der Ausnutzungsgrad für die freie Wärme wird gemäß der Formel in EN 832 zu $(1 - (Q_F / Q_V)^a) / (1 - (Q_F / Q_V)^{a+1})$ mit a = 5 bestimmt (Q_F freie Wärme; Q_V Wärmeverluste).

Mit der Neuberechnung unter diesen Bedingungen ergibt sich ein Jahresheizwärmebedarf gemäß EN 832 von 543 438 kWh/a, der um 38% höher ist, als der nach dem Verfahren gemäß Wärmeschutzverordnung berechnete Wert. Bezogen auf die beheizte Nettonutzfläche ergibt sich so ein spezifischer Jahresheizwärmebedarf von **132.1 kWh/(m²a)** für das Referenzgebäude.

Aus diesem (sehr hohen) Wert wird deutlich, wie gering die Anforderungen der bestehenden Wärmeschutzverordnung tatsächlich sind. Die sehr viel kleiner erscheinenden Werte bei Bezug auf das Bruttovolumen geben eine irreführende Botschaft. Die in der Praxis erhobenen Werte liegen nämlich in der Regel in Bezug auf Nettonutzflächen vor. Hier zeigen Untersuchungen an alten Gebäuden, dass dort Werte um 200 kWh/(m²a) üblich sind. Die bei einem Neubau nach WschVO`95 erzielten Einsparungen liegen dann im Vergleich zum Altbau bei ca. 33%. Würde gemäß unseren weiter oben aufgeführten Vorschlägen einigermaßen zeitgemäß gebaut, so ergäben sich Werte von nur noch 103 kWh/(m²a) und die Einsparung bei



einem solchen gegenüber dem Referenzfall verbesserten Gebäude läge bei etwa 50 %.

Passivhaus-Projektierung ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima: <input type="text" value="Deutschland"/>		Gebäudetyp/Nutzung: <input type="text" value="Verw., Labor, Produktion, ..."/>	
Objekt: <input type="text" value="SurTec Neubau"/>		Energiebezugsfläche A_{EG} : <input type="text" value="4112.5"/> m ²	Standard-Personenbelegung: <input type="text" value="50"/> Pers pro m ² Energiebezugsfläche
Standort: <input type="text" value="Zwingerberg"/>			

Bauteil	Fläche PHPP m ²	U-Wert W/(m ² K)	Reduktionsfaktor ξ	G_i kWh	WHL
1 Fassade La. geg. AL	479.2	0.50	1.0	84	20128
2 Fassade La. geg. ER	581.0	0.50	0.5	84	12200
3 Fassade Pr. geg. AL	483.6	0.50	1.0	84	20311
4 Fassade Pr. geg. ER	82.4	0.50	0.5	84	1730
5 Fassade Bu. geg. AL	76.7	0.50	1.0	84	3220
6 Fassade Bu. geg. ER	142.5	0.50	0.5	84	2993
7 Rauchabzugsklappen	74.9	2.00	1.0	84	12580
8 Dach Lager	918.5	0.33	1.0	84	25460
9 Dach Produktion	631.8	0.33	1.0	84	17513
10 Dach Büro	714.5	0.33	1.0	84	19805
11 Grund Lager	843.6	0.56	0.5	84	19841
12 Grund Produktion	646.3	0.56	0.5	84	15201
13 Grund Büro	573.7	0.56	0.5	84	13492
14 Grund Versprung	275.4	0.56	0.5	84	6478
15 Türen	17.5	2.00	1.0	84	2948
16 Fenster	1203.4	1.59	1.0	84	161089

Transmissionswärmeverluste Q_T	Summe	<input type="text" value="354990"/>	<input type="text" value="86.3"/>
--	-------	-------------------------------------	-----------------------------------

Luftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V_L m ³	<input type="text" value="4112.5"/>	leichte Raumhöhe n m	<input type="text" value="5.53"/>	=	<input type="text" value="22730"/>	
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmtauschers η_{wpl}	<input type="text" value="0.623"/>	Wärmebereitstellungsgrad des Einreichwärmtauschers η_{we}	<input type="text" value="0.040"/>				
energetisch wirksamer Luftwechsel n_L	$0.623 \cdot (1 - 0.00) + 0.040$					=	<input type="text" value="0.663"/>
Luftungswärmeverluste Q_L	V_L m ³	n_L 1/h	C_{Luft} Wh/(m ³ K)	G_i kWh	WHL	<input type="text" value="417760"/>	
	<input type="text" value="22730"/>	<input type="text" value="0.663"/>	<input type="text" value="0.33"/>	<input type="text" value="84"/>		<input type="text" value="101.6"/>	

Summe Wärmeverluste Q_V	$(Q_T + Q_L) \cdot$	<input type="text" value="354990"/>	$+ 417760$	\cdot	<input type="text" value="1.0"/>	=	<input type="text" value="772750"/>	<input type="text" value="187.9"/>
---	---------------------	-------------------------------------	------------	---------	----------------------------------	---	-------------------------------------	------------------------------------

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S	Summe	<input type="text" value="123090"/>	<input type="text" value="29.9"/>
---	-------	-------------------------------------	-----------------------------------

Interne Wärmequellen Q_I	inud	Länge Heizzeit die	spezif. Leistung q_i W/m ²	A_{EG} m ²	WHL	<input type="text" value="106596"/>	<input type="text" value="25.9"/>
	<input type="text" value="0.024"/>	<input type="text" value="225"/>	<input type="text" value="4.8"/>	<input type="text" value="4112.5"/>		<input type="text" value="106596"/>	<input type="text" value="25.9"/>
Freie Wärme Q_F	$Q_S + Q_I$				=	<input type="text" value="229686"/>	<input type="text" value="55.9"/>
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q_F / Q_V				=	<input type="text" value="0.297"/>	
Nutzungsgrad Wärmegewinne η_0	$[1 - (Q_T / Q_V)^{\beta}] / [1 - (Q_F / Q_V)^{\beta}]$				=	<input type="text" value="0.998"/>	
Wärmegewinne Q_G	$\eta_0 \cdot Q_F$				=	<input type="text" value="229312"/>	<input type="text" value="55.8"/>
Heizwärmebedarf Q_{H1}	$Q_V - Q_G$				=	<input type="text" value="543438"/>	<input type="text" value="132.1"/>

Anforderung Bauwerksart (anwesend)	<input checked="" type="checkbox"/>	Grenzwert Zielwert	<input type="text" value="15"/>	Anforderung erfüllt?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="text" value="19.1"/>
------------------------------------	-------------------------------------	--------------------	---------------------------------	----------------------	-------------------------------------	-----------------------------------

Tabelle 3: Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs des Referenzfalls SurTec-Gebäude nach dem Verfahren gemäß DIN EN 832

3.3 Gebautes Passivhaus nach EN832-Jahresverfahren

Für das gebaute Passivhaus-Fabrikgebäude wurde eine dynamische Gebäudesimulation durchgeführt, weil nur so letztendlich eine zuverlässige Vorausbestimmung des Jahresheizwärmebedarfs bei einem derart stark gegliederten Gebäude und bei hochwärmegeprägten Bauteilen vorgenommen werden kann [Schnieders 2001].

Um den Anschluß an die hier dokumentierte Berechnung des Referenzfalles nach EN 832 an diese Simulation herzustellen, wird im Folgenden auch noch die Berechnung des Passivhausfalls nach dem Jahresbilanzverfahren der EN 832 dokumentiert. Dabei ist zu bedenken, dass

- es sich bei EN 832 um ein stationäres Verfahren handelt, in welchem längere Speichereffekte bei großen thermischen Massen (wie z.B. dem Erdreich im Atrium) nur näherungsweise wiedergegeben werden können und
- beim EN 832-Modell ein Einzonenmodell mit einer einheitlichen Solltemperatur in allen Gebäudeteilen vorliegt.

Tabelle 4 dokumentiert den Berechnungsgang im Jahresverfahren der EN 832 für das Passivhaus-Fabrikgebäude. Alle Eigenschaften der Gebäudehülle wurden identisch denen der Simulation gewählt. Das ganze Objekt wird jedoch bei der EN 832-Berechnung überall und zu allen Zeitpunkten einheitlich auf 20 °C beheizt. Damit ergibt sich ein Jahresheizwärmebedarf des Passivhaus-Fabrikgebäudes zu 107 314 kWh/a oder **29.1 kWh/(m²a)** (unter Bezug auf die beheizte Nutzfläche), somit eine rechnerische Heizwärmeeinsparung gegenüber dem Referenzfall von etwa 80%.

Die instationäre DYNBIL-Berechnung hatte unter den Bedingungen zeitlich und räumlich variabler Sollwerte **13.9 kWh/(m²a)** ergeben. Eine Variante, in der auch in DYNBIL mit zeitlich und räumlich konstanten Solltemperaturen von 20 °C gerechnet wird, ergab dort **29.3 kWh/(m²a)**. Dieser Wert stimmt gut mit der EN 832-Berechnung überein. Zugleich zeigt die Abweichung zum instationär berechneten Wert, dass eine dynamische Gebäudesimulation in dem hier vorliegenden Fall unerlässlich ist.



Passivhaus-Projektierung ENERGIEKENNWERT HEIZWÄRME

Klima: Deutschland		Gebäudetyp/Nutzung: Verw., Labor., Produktion, Lager	
Objekt: SurTec Neubau		Energiebezugsfläche A _{ges} : 4112.5 m²	Standard-Personenbelegung: 50 Pers
Standort: Zwingenberg		pro m² Energiebezugsfläche	

Bauteile	Fläche PHPP m²	U-Wert W/m²K	Reduktionsfaktor ξ	Q _t kWh	W/m²	Energiebezugsfläche
1 Fassade La. geg. AL	479.2	0.19	1.0	84	=	7559
2 Fassade La. geg. ER	581.0	0.19	0.5	84	=	4582
3 Fassade Pr. geg. AL	483.6	0.19	1.0	84	=	7697
4 Fassade Pr. geg. ER	82.4	0.19	0.5	84	=	656
5 Fassade Bu. geg. AL	76.7	0.19	1.0	84	=	1220
6 Fassade Bu. geg. ER	142.5	0.19	0.5	84	=	1134
7 Rauchabzugsklappen	74.9	0.67	1.0	84	=	4184
8 Dach Lager	918.5	0.13	1.0	84	=	9790
9 Dach Produktion	631.8	0.15	1.0	84	=	7867
10 Dach Büro	714.5	0.15	1.0	84	=	8896
11 Grund Lager	843.6	0.56	0.5	84	=	19804
12 Grund Produktion	646.3	0.20	0.5	84	=	5511
13 Grund Büro	573.7	0.56	0.5	84	=	13467
14 Grund Versprung	275.4	0.56	0.5	84	=	6466
15 Türen	17.5	0.16	1.0	84	=	239
16 Fenster	1203.4	0.77	1.0	84	=	77409

Transmissionswärmeverluste Q_T	Summe	176481	W/m²(m²)	42.9
---	-------	--------	----------	------

Lüftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V _L m³	A _{ges} m²	lichte Raumhöhe h m	n	m³
Wärmeerstellungsgrad des Plattenwärmtauschers η _{WKO}	72%	4112.5	5.53	=	22730
Wärmeerstellungsgrad des Einreichwärmtauschers η _{WKO}	15%				
energetisch wirksamer Luftwechsel n _L	0.623				0.188

Lüftungswärmeverluste Q_L	V _L m³	n _L 1/h	c _{Luft} kWh/(m³K)	Q _L kWh	W/m²
	22730	0.188	0.33	84	=
				118631	28.8

Summe Wärmeverluste Q_V	(Q _T + Q _L)	176481 + 118631	Reduktionsfaktor Nacht-/Wochenend-absenkung	1.0	W/m²
					295112
					71.8

Wärmeangebot Solarstrahlung Q_S	Ausrichtung der Fläche	Reduktionsfaktor wgl. Blatt Fenster	g-Wert (senkr. Eintr.)	Fläche m²	Globalstr. Heizzeit W/m²(m²)	W/m²
	1 Ost	0.54	38%	616.52	293	=
	2 Süd	0.55	38%	163.40	370	=
	3 West	0.63	38%	134.33	225	=
	4 Nord	0.58	38%	117.63	140	=
	5 Horizontal	0.63	38%	171.49	358	=
						74648
						18.2

Interne Wärmequellen Q_I	h _{ind} kWh/d	Länge Heizzeit d _h da	spezif. Leistung q _W W/m²	A _{ges} m²	W/m²	W/m²(m²)
	0.024	225	4.8	4112.5	=	107314
						26.1

Freie Wärme Q _F	Q _S + Q _I	181963	W/m²	44.2
Verhältnis Freie Wärme zu Verlusten	Q _F / Q _V	0.617		
Nutzungsgrad Wärmegewinne η _G	(1 - (Q _T / Q _V) ²) / (1 - (Q _T / Q _V) ²)	0.964		
Wärmegewinne Q_G	η _G * Q _F	175384	W/m²	42.6
Heizwärmebedarf Q_H	Q _V - Q _G	119729	W/m²	29.1

Anforderung Bauwerkstyp (Ankreuzen)	⊗ Grenzwert	Zielwert	W/m²(m²)	Anforderung erfüllt?	W/m²(m²)
			15	nein	4.2

Tabelle 4: EN 832-Berechnung für das Passivhaus-Fabrikgebäude der Firma SurTec in Zwingenberg. Alle Hüllflächenbauteile wurden wie bei der DYNBIL-Simulation gewählt, allerdings wurde von einer einheitlich und dauerhaft bei 20°C liegenden Solltemperatur ausgegangen.

3.4 Vergleich: Referenzhaus und Passivhaus

Abb. 11 zeigt die spezifischen Heizwärmebedarfswerte des Referenzgebäudes und des tatsächlich gebauten Passivhauses im Vergleich (jeweils unter Annahme konstanter Raumtemperaturen von 20°C). Die Einsparung durch den Passivhausstandard beträgt über 80%.

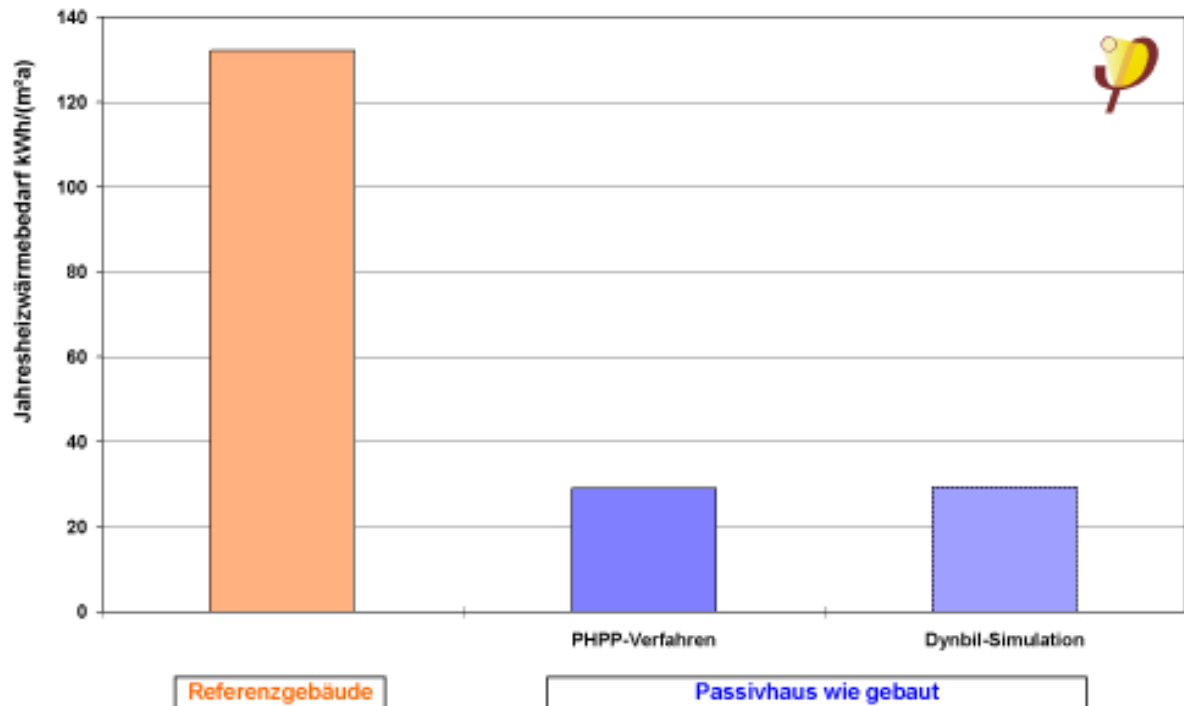


Abb. 11: Vergleich des Jahresheizwärmebedarfs des SurTec-Gebäudes in Zwingenberg im Referenzfall (links, Bau nach gegenwärtig üblicher Bauweise unter Einhaltung der Wärmeschutzverordnung '95) und als Passivhaus (rechts, Gebäude wie tatsächlich realisiert).

Abb. 12 zeigt den Jahresverlauf der monatlichen Heizwärmebedarfswerte für das Referenzgebäude, Abb. 13 die Monatswerte für das tatsächlich realisierte Passivhaus. Die Ergebnisse beider Berechnungsverfahren sind im Vergleich zueinander dokumentiert. Solange unterschiedliche Temperatursollwerte in verschiedenen Zonen und zu verschiedenen Zeiten keine Rolle spielen, kann nach diesem Vergleich selbst im Passivhausfall noch mit einer hinreichenden Genauigkeit mit dem EN 832-Monatsverfahren gerechnet werden. Allerdings sind im vorliegenden Fall instationäre Verhältnisse zwischen den unterschiedlichen Zonen von nicht vernachlässigbarer Bedeutung, so dass eine Simulation eine realitätsnähere Beurteilung erlaubt (vgl. folgendes Kapitel).

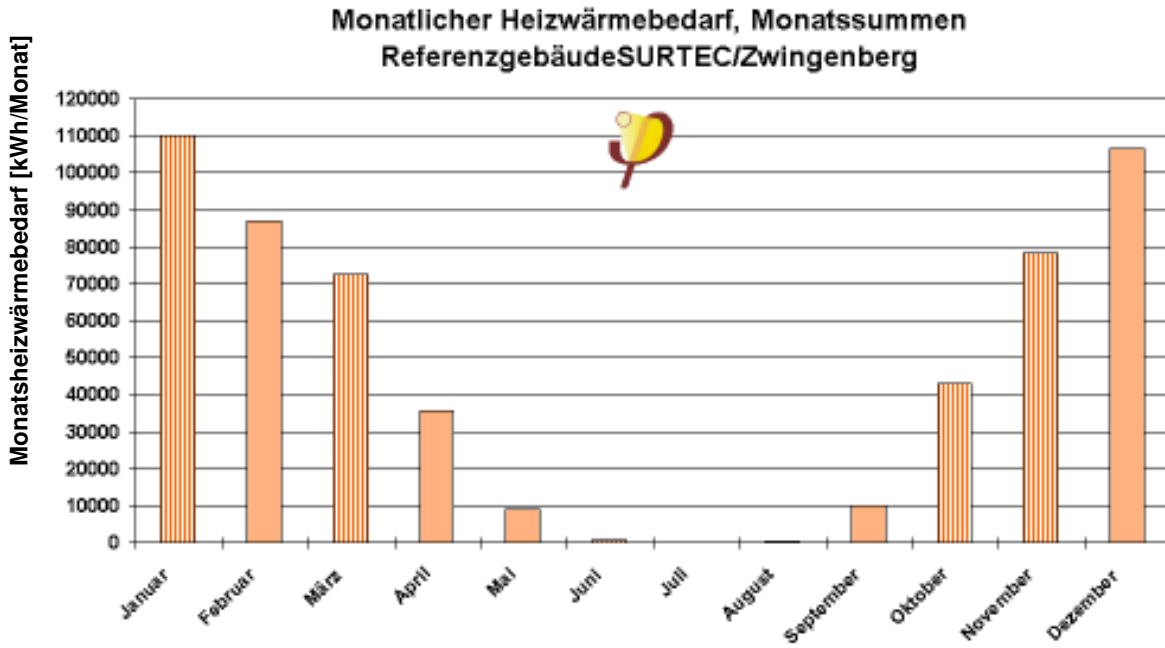


Abb. 12: Monatlicher Heizwärmebedarf des Referenzgebäudes nach EN 832.

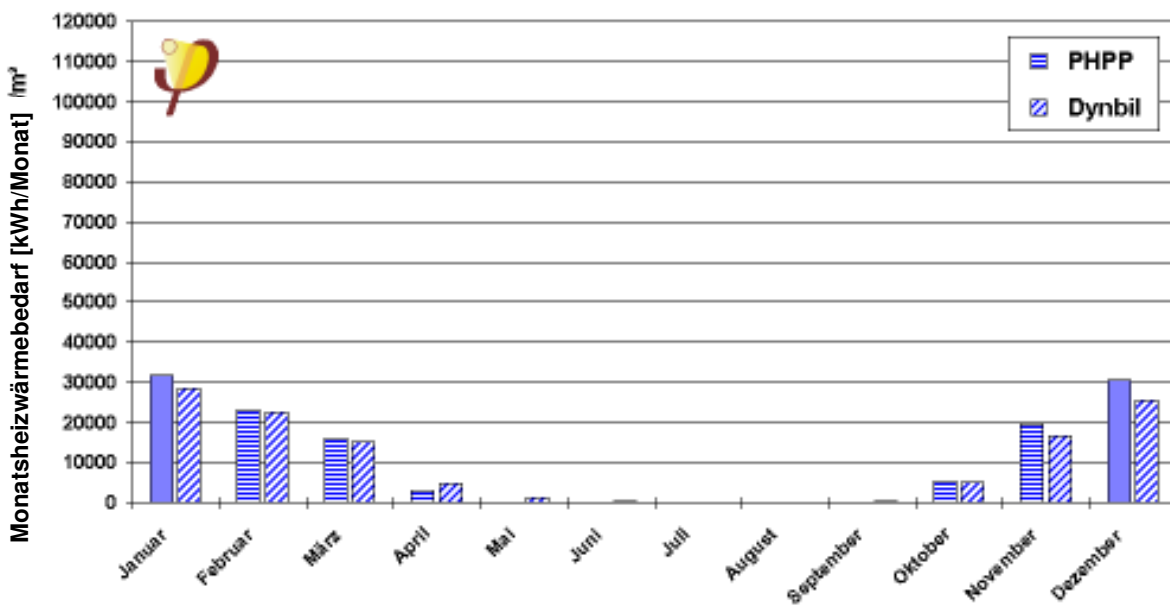


Abb. 13: Monatlicher Heizwärmebedarf des gebauten Passivhauses, berechnet nach EN 832 und berechnet mit der DYNBIL-Simulation im Vergleich.

4 Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens

Die dynamische Gebäudesimulation für das Passivhaus-Produktionsgebäude der Firma SurTec in Zwingenberg wurde mit dem Simulationsprogramm DYNBIL vom Passivhaus Institut (Autor: Jürgen Schneiders) als gesonderter Bericht im Januar 2001 vorgelegt. Die wichtigsten Ergebnisse werden hier wiedergegeben [Schneiders 2001].

Das Gebäude unterscheidet sich durch seine Größe, Kompaktheit und die Art der Nutzung so deutlich von Passivhaus-Wohngebäuden, dass mit einem deutlich anderen thermischen Verhalten gerechnet werden musste. Es zeigt sich in der Tat, dass allein die geringeren geforderten Lufttemperaturen in weiten Bereichen des Gebäudes gegenüber einer Solltemperatur von durchweg 20 °C zu einem um fast 50% reduzierten Heizwärmebedarf führen können.

Der Jahresheizwärmebedarf des Gesamtgebäudes unter Berücksichtigung der aktiv genutzten Abwärme aus der Produktion beträgt **13,9 kWh/(m²a)**, die tagesmittlere maximale **Heizlast 11,6 W/m²**. In den Büros liegt der Heizwärmebedarf allerdings bei ca. 50 kWh/(m²a), und die Heizlast beträgt 28 W/m². Eine Beheizung über die Zuluft ist aufgrund der hohen Luftwechselraten dennoch möglich, lediglich im Vorwärmraum sind Heizkörper erforderlich. Im Produktionsbereich, im Labor und im Lager liegen die Jahresheizwärmebedarfswerte zwischen 8,7 und 16,5 kWh/(m²a).

Die Heizperiode erstreckt sich von November bis März. Lediglich im Vorwärmraum, in dem stets 35 °C herrschen sollen, muss ganzjährig geheizt werden.

Solare Gewinne sind für den Heizwärmebedarf bei diesem Projekt nicht entscheidend; sinkende Temperaturen führen auch bei zunehmender Solarstrahlung zu höherer Heizlast. Stark wirken sich dagegen die internen Wärmegewinne während der Nutzungszeiten aus: An den Wochenenden muss, wenn die Raumtemperatur gehalten werden soll, wesentlich stärker geheizt werden als an Wochentagen. Durch eine Nacht- und Wochenendabsenkung lässt sich der Heizwärmebedarf der Büros um ein Drittel senken, die stundenmittlere Heizlast in der Anheizphase wächst dann allerdings auf das Dreifache an. In den übrigen Zonen sind die Effekte von ähnlicher Art, aber weniger stark.

Das Atrium kühlt auch im Winter nicht unter 15 °C ab. Durch die starke thermische Kopplung an die umliegenden Bauteilmassen wird diese Zone indirekt beheizt. Die starke Kopplung der Zonen untereinander wird auch in anderen Fällen deutlich: Ist beispielsweise in der Produktion während der Arbeitszeit dauernd ein Fenster geöffnet, so macht sich das in allen Zonen im Heizwärmebedarf bemerkbar. Auch bei der Untersuchung der Nachtabsenkung zeigt sich, dass die Zonen mit höheren Soll-



temperaturen (die Büros) rascher und stärker auskühlen als die übrigen, weil sich die Wärme vorwiegend innerhalb des Gebäudes umverteilt.

Die Latentwärmeverluste durch die Bepflanzung von Atrium und Lichthof können im Extremfall so groß werden, dass die internen Gewinne des Gesamtgebäudes etwa Null sind. Der Heizwärmebedarf würde sich in diesem Fall etwa verdoppeln, andererseits würde sich die Zahl der Stunden im Jahr über 25 °C halbieren. Unter raumklimatischen Gesichtspunkten empfehlenswert erscheinen Pflanzen, die vor allem bei Sonneneinstrahlung und bei hohen Lufttemperaturen große Mengen Wasser verdunsten.

Im Referenzfall ist das Sommerklima noch als akzeptabel zu bezeichnen. In den Büros, der Produktion und dem Atrium werden allerdings Höchsttemperaturen bis zu 30 °C erreicht. Durch Kombination verschiedener Maßnahmen (starke Nachtauskühlung, Sommer-Bypass am Wärmetauscher, die ohnehin vorgesehene Verschattung der Ostfenster durch Bepflanzung und starke Wasserverdunstung im Atrium und Lichthof) lassen sich die sommerlichen Verhältnisse nach den Ergebnissen der Simulation positiv beeinflussen: Die Maximaltemperaturen bleiben dann stets unter 28 °C, die operativen Temperaturen liegen insbesondere in den Zeiten der größten Hitze aufgrund der noch relativ kühlen Bauteilmassen um etwa 1,5 K niedriger. Auch die Dauer der Überhitzungen wird in diesem Fall erheblich reduziert.

5 Technisch-wissenschaftliche Qualitätssicherung

Der Erfolg des Passivhaus-Projektes hängt entscheidend von der Qualität der Ausführung der baulichen Hülle und der Haustechnik ab. Daher hat das PHI das Planungsteam zur Qualität der wärmebrückenfreien Ausführung und der Lüftungstechnik bereits in der Planungsphase beraten. Zur Qualitätssicherung gehört insbesondere auch eine Luftdichtheitsprüfung des Gesamtgebäudes.

5.1 Luftdichtheitsprüfung

Zur Überprüfung der Luftdichtheit des Gebäudes wurde am 14. März 2000 zwischen 9:00 und 23:00 Uhr gemeinsam mit dem Ingenieurbüro Sabeder aus Heidenrod eine Drucktestmessung durchgeführt. An den Vortagen wurden nach Vorgaben des PHI von den ausführenden Firmen Abdichtungsarbeiten durchgeführt. Hier sind Bereiche abgedichtet worden, die zu diesem Zeitpunkt im Bauablauf noch nicht planungsgemäß verschlossen waren. Dabei sind insbesondere die folgenden Arbeiten zu nennen:

1. Abkleben der Pfosten-Riegel-Elemente gegen Beton (Bodenplatte oder Geschossdecken)
2. Abkleben der provisorischen Abdichtung mit Holzplatten in den Brandschutzklappen (Ariumverglasung Richtung Westen).
3. Im Konferenzraum (EG Bürotrakt) werden die Pfosten-Riegel-Oberlichter an das Mauerwerk mit Putzendschienen und Silikon angeschlossen.
4. Ausschäumen der Kabeldurchführungen in der Südwand (Behelfslösung, da Polyurethanschaum keine dauerhaft ausreichende Luftdichtheit gewährleistet).
5. An der Nordfassade im Kellerraum wurden die Öffnungen verschlossen und Kabeldurchführungen ausgeschäumt (Bemerkung siehe oben unter Punkt 4).
6. Wasser- und Abwasseranschlüsse werden mit Wasser aufgefüllt oder mit Endkappen verschlossen.

Bis auf einige im Folgenden beschriebenen Bereiche war zum Drucktesttermin die Gebäudehülle damit geschlossen. Durch das Passivhaus Institut mussten an den Vortagen und am Tag der Messung folgende Bereiche ergänzend provisorisch abgedichtet werden:

1. Die großflächige Brettverschalung der LKW-Laderampe im Norden des Gebäudes ist mit Folie abgedichtet worden. Das dort vorgesehene zweiflügelige Tor mit Vakuumdämmung war zu dieser Zeit noch nicht montiert.



Abb. 14: Provisorisch luftdichte Abklebung des LKW-Ladetors an der Nordfassade des Lagertraktes

2. Die Öffnungen der Lüftungsanlage (Einlass und Auslass der Erdreichluftkanäle für Außen- und Fortluft) im Technikeller sind mit Brettern vernagelt und mit Folie verklebt worden.

Am Tag der Messung:

3. Die Durchführung für die Regenwasseranlage im Nordosten des Gebäudes ist mit einer Luftblase verschlossen worden.
4. Die Hauptabwasserleitung im Süden (Keller) wurde verschlossen.
5. Alle Fenster und Türen des gesamten Gebäudekomplexes wurden verschlossen (dazu mussten im EG Bürobereich z.T. Baustromkabel entfernt oder umgelegt werden).

Die Gebäudetrakte Lager, Produktion und Atrium/Büro ließen sich für die Messung nicht praktikabel luftdicht voneinander trennen, als Hinderung ist hier insbesondere die Durchführungen der Palettenförderanlage zwischen Lager- und Produktionsbereich zu nennen. Aus diesem Grund wurde der gesamte Gebäudekomplex mit 22730 m³ Luftvolumen zusammenhängend gemessen. Nach der beschriebenen Gebäudepräparation wurden für die Leckagesuche in die Tür des Lichtganges (Südfassade) und in die Tür zur späteren Pausen-Terrasse (Ostfassade) jeweils eine Luftförderanlage (Blower Door) eingesetzt.



Abb. 15: Links: Vorbereitungen zum Einbau der ersten Blower Door in die Tür im Lichtgang (Südfassade). Rechts: Installierte zweite Blower Door in der Tür zum späteren Freigelände/Pausenbereich vor der Cafeteria (Ostfassade) während der Messung

Leckagen

Für die Leckageortung wurde mit den beiden Luftförderanlagen im Gebäude ein Unterdruck von 50 Pa erzeugt. Dabei ist die eine Blower Door auf einen konstanten Volumenstrom eingestellt und die andere per Steuerung so nachgeregelt worden, dass dauerhaft 50 Pa Unterdruck gewährleistet war. Bei diesen konstanten Unterdruckbedingungen wurde das gesamte Gebäude auf Leckagen abgesucht. Zur genaueren quantitativen Bestimmung sind dabei an prägnanten Leckagen die Luftgeschwindigkeiten mit Strömungsmessgeräten (Thermoanemometer) festgestellt worden.

Die wichtigsten aufgefundenen Leckagen werden nachfolgend im Überblick beschrieben:

- Alle Stoßstellen der **Glasleisten** der PURAL-Fenster (Länge ca. 2 cm, Spalt von 0,5 bis 1 mm je Stoßstelle) waren undicht. Zur Verbesserung sind Nacharbeiten an den Dichtungen am Glasrand aller Fenster der Fa. Pural notwendig.



Abb. 16: Undichtheiten an den Glasleisten der Pural-Fenster. Links: Südfassade Büro EG ca. 1 m/s. Rechts: Bürofenster Südfassade 1 OG 1 bis 2 m/s.



Abb. 17: Links: Undichtheiten an der Glasleiste des Pural-Fensters im EG Nordfassade/Produktionstrakt. Rechts: Anschluss des Fensters im 2. OG Südfassade (Bürotrakt) auf der Beschlagseite (2 bis 3 m/s). Die gleiche Schwachstelle wurde an den Fenstern auf der Nordseite festgestellt.

- Diverse **Stoßstellen** (3D) der **Pfosten-Riegel-Konstruktion** der Fa. Atmos zeigten systematische Undichtheiten.



Abb. 18: Links: Leckage an einer typischen Stoßstelle der Pfosten-Riegel-Konstruktion, hier Südfassade Bürotrakt EG. Rechts: Undichtheit bei einer Anschlussscheibe an die Pfosten-Riegel-Konstruktion

- Zur **Verbindung** der Pfosten-Riegel-Konstruktion mit der Betonbodenplatte ist ein EPDM-Lappen eingesetzt worden, der mit der Bodenplatte verklebt wurde. Im EG ist die Verklebung nicht überall durchgehend erfolgt. An diesen Fehlstellen konnten Undichtheiten festgestellt werden.



Abb. 19: Anschluss Pfosten-Riegel-Konstruktion an die Beton Bodenplatte mittels EPDM-Lappen und Spezialklebeband an der Ostfassade im Bereich der Cafeteria. Hier wurden aufgrund nicht verklebter Bereiche vereinzelt Undichtheiten festgestellt.



- Größere Leckagen wurden an den Fenstern im 2. OG (Büro) im Süd- und im Nordteil festgestellt. Jeweils die oberste Fuge der Fenster war versehentlich nicht elastisch verfugt worden und damit bedeutend undicht. In anderen Bereichen war die Verbindung wie geplant hergestellt und stellte sich als ausreichend luftdicht dar.



Abb. 20: Die fehlende luftdichte Verbindung zwischen Pfosten-Riegel-Konstruktion und der Decke im 2. OG Südfassade (Bürotrakt) zeigt auf der ganzen Länge des Bauteils bedeutende Leckageströme (1 bis 2 m/s). Das rechte Bild zeigt einen Detail des linken Bildes.

- An verschiedenen **Türen** und **Fenstertüren** wurden Undichtheiten festgestellt. Im Labor (Westseite 2. OG) wurde an mehreren Fenstertüren (Ausgänge zum Lagerhallendach) Leckagen gefunden. Diese lassen sich durch besseres Einstellen der Fenstertüren verringern. Belegt wird dies durch einige ausreichend luftdicht eingestellte Fenstertüren im Labor. Die Gebäudeeingangstüren auf der Süd- und der Nordseite zeigen Undichtheiten an den sowie unter den Türschwellen. Hier sind Nacharbeiten erforderlich.



Abb. 21: Undichtheiten an zwei Fenstertüren (Beispiele) im Labor (Westfront). Links: Leckage am unteren Bereich (4,2 m/s). Rechts: Leckage an der Beschlagseite der Tür (5,3 m/s).



Abb. 22: Links: Türschwelle der Haupteingangstür (Südfassade) mit hoher Leckage an der Türschwelle (3,5 m/s). Rechts: Luftströmung unter der Tür mit Vakuumdämmung vom Lager EG zum LKW-Hof (2,2 m/s). Die Abdichtung mit einer sog. „Kältefeind“-Bürstendichtung ist offensichtlich nicht ausreichend.



Abb. 23: Kleinere Undichtheit an der Treppenhaustür in der Nordfassade zwischen Produktion- und Lagertrakt zum LKW-Hof. Hier konnte unter der Edelstahl-Türschwelle auf der ganzen Breite ein Luftstrom gemessen werden (um 0,3 m/s). Zwischen Tür und Schwelle war der Anschluss aber ausreichend dicht.

- Bei den **Festverglasungen** (Oberlichter) in den drei Seminarräumen im nördlichen EG des Bürotraktes mussten Undichtheiten sowohl zwischen den Oberlichtelementen als auch am Anschluss zum Gebäude festgestellt werden. Auf weiten Strecken stellte sich die gewählte Abdichtung zum Baukörper mittels Putzmaschine und elastischer Fugenmasse jedoch als ausreichend dicht heraus.



Abb. 24: Links und rechts: Die Anschlüsse der Festverglasung (Oberlichter) in den Seminarräumen an den Baukörper zeigen stellenweise Leckagen (Strömungsgeschwindigkeiten über 5 m/s)

- Der **Anschluss der Atrium-Nordfassade** (Pfosten-Riegel-Konstruktion) an die westliche und östliche Wand ist auf der gesamten Höhe (EG bis 2. OG) nicht ausreichend luftdicht. Zwischen dem Doppel-T-Träger zur westlichen Betonwand wurden Strömungsgeschwindigkeiten um die 2 m/s gemessen. Hier könnte Abhilfe mittels einer eingepressten Folientasche geschaffen werden.



Abb. 25: Die Verbindung der Atrium-Nordfassade (Pfosten-Riegel-Konstruktion) an die westliche (linkes Bild) und die östliche (rechtes Bild) Betonwand ist auf der gesamten Höhe nicht ausreichend luftdicht.

- Im nördlichen Treppenhaus zwischen Produktions- und Lagertrakt wurde die verwendete Folie hinter der Holzverkleidung (zwischen Tür und Betonwand) im unteren Bereich nicht mit der Betonplatte verbunden. Dies hat hier extreme Zuglufterscheinungen mit Geschwindigkeiten von über 7 m/s erzeugt. Die Ursache konnte erst nach der Demontage der Holzverkleidung festgestellt werden. In den anderen Geschossen des Treppenhauses waren diese Bereiche erfolgreich abgedichtet.



Abb. 26: Leckage durch zum Boden nicht verklebte Folie hinter der Holzverkleidung im nördlichen Treppenhaus. Erst nach Demontage der Verkleidung (rechts) ist die Ursache zu erkennen.

Nach der Aufnahme der Leckagen wurde ein erneuter Rundgang durch das Gebäude mit den anwesenden Handwerkern, dem Architekten Hr. Zimmer sowie Vertretern des Bauherren (Technischer Leiter Hr. Ender und Geschäftsführerin Frau Preikschat) durchgeführt. Neben der allgemeinen Erläuterung des Drucktests wurden die einzelnen Leckagen aufgezeigt und mögliche Abhilfemaßnahmen besprochen. Die entsprechenden Nacharbeiten wurden vom Architekten den jeweiligen Handwerkern aufgetragen.



Abb. 27: Erläuterungen zum Drucktest und zu den gefundenen Leckagen durch Dr. Wolfgang Feist vom Passivhaus Institut.

Wie sich bei den Testmessungen mit zwei Blower Door Anlagen herausstellte, war das Gebäude trotz der gefundenen Leckagen so luftdicht, dass das erforderliche Luftvolumen auch mit nur einer Blower Door gefördert werden konnte. Aus diesem Grund wurde nach der Leckagesuche bei Unterdruckbedingung die Blower Door in



der Südfassade (Lichtgang) wieder demontiert und die Tür geschlossen. Dies ist auch für die Stabilität bei der quantitativen Messung vorteilhaft, da durch die Windeinflüsse unterschiedliche Druckverhältnisse auf der Süd- und der Ostfassade herrschten.

5.1.1 Thermographische Untersuchung bei der Lüftdichtheitsprüfung

Um bei dem großen zu untersuchenden Baukörper auch Aussagen über die Luftdichtheit an nicht leicht erreichbaren Bereichen der Gebäudehülle machen zu können, wurde eine Unterdruckmessung mit einer thermographischen Untersuchung kombiniert. Dafür wurde, wieder bei 50 Pa Unterdruck im Gebäude, mit der Infrarot-Kamera ein weiterer Rundgang durch das gesamte Gebäude unternommen. Die Thermographien wurden von Dipl.-Ing. Uwe Bernhardt von der Fachhochschule Wiesbaden / Fachbereich Maschinenbau aufgeommen.

Um bei Unterdruckbedingungen einströmende Außenluft (Kaltluft) mittels einer Infrarot-Kamera indirekt erkennbar machen zu können, ist es notwendig, dass eine möglichst große Temperaturdifferenz zwischen der Innenraum- und der Außentemperatur besteht. Aus diesem Grund wurde schon an den Tagen vor der Untersuchung nach Vorgabe des PHI das Gebäude mit einer Bauheizung beheizt. Das gebäudeeigene Heizsystem war noch nicht vorhanden. Im Atrium ist eine Gasgebläse-Bauheizung installiert worden, welche von einer Propangasflaschenbatterie versorgt wurde. So konnte die Temperatur im Gebäude zum Zeitpunkt der Untersuchung auf etwa 16 bis 19 °C aufgeheizt werden. Die Außentemperatur zur Zeit der Untersuchung betrug etwa 8 °C.

Mit der Kamera wurden alle Gebäudeaußenflächen von der Innenseite untersucht und insgesamt 158 Infrarotbilder bei Unterdruckbedingungen festgehalten. Insgesamt ist dabei festgestellt worden, dass

- im Gebäudetrakt für das **Hochregallager** keine Auffälligkeiten vorhanden waren. Die in der Lagerhallendecke eingebauten hochwärmegeämmten Brandschutzklappen wurden extra für das Projekt entwickelt. Es zeigte sich, dass diese tatsächlich perfekt luftdicht sind,
- die **Horizontal-Verglasungen** im Atrium (Pfosten-Riegel-Konstruktion) alle sehr gut dicht sind,
- die **Verglasung der Atrium Westseite** (vertikal) ebenfalls bis auf wenige dokumentierte Bilder (siehe unten) luftdicht ist,
- die **Ostseite der Atriumverglasung** an vielen Bereichen Undichtheiten aufgewiesen hat (nähere Untersuchung unten bei den entsprechenden Thermographiebildern),



- die **Anschlüsse** der südlichen und nördlichen vertikalen Verglasungsflächen des Atriums an die angrenzenden Betonwände fast durchgehend nicht ausreichend luftdicht ausgeführt wurden (IR-Bilder siehe unten),
- sich am **Glasdach des Lichtganges** (Pfosten-Riegel-Konstruktion) ebenfalls zahlreiche Leckagen befinden.

Die wichtigsten Leckagen, die mit Thermographieuntersuchung auffindig gemacht wurden, werden hier dokumentiert. Dabei wird nach Möglichkeit immer ein optisches Bild und das Thermographiebild dargestellt, um die Bereiche besser zuordnen zu können.

- **Atriumverglasung**

Der Anschluss der südlichen Atriumverglasung an die westliche und östliche Betonwand zeigt fast durchgehend Leckagen. Die Pfosten-Riegel-Konstruktion mit der Verglasung selber zeigte sich aber als ausreichend luftdicht. An den Anschlüssen stellen sich aufgrund der Leckagen Wandoberflächentemperaturen von minimal 15 bis 16 °C ein. Die Fenster- und Wandflächen hatten ohne Störung Temperaturen von 17,5 bis 19 °C.

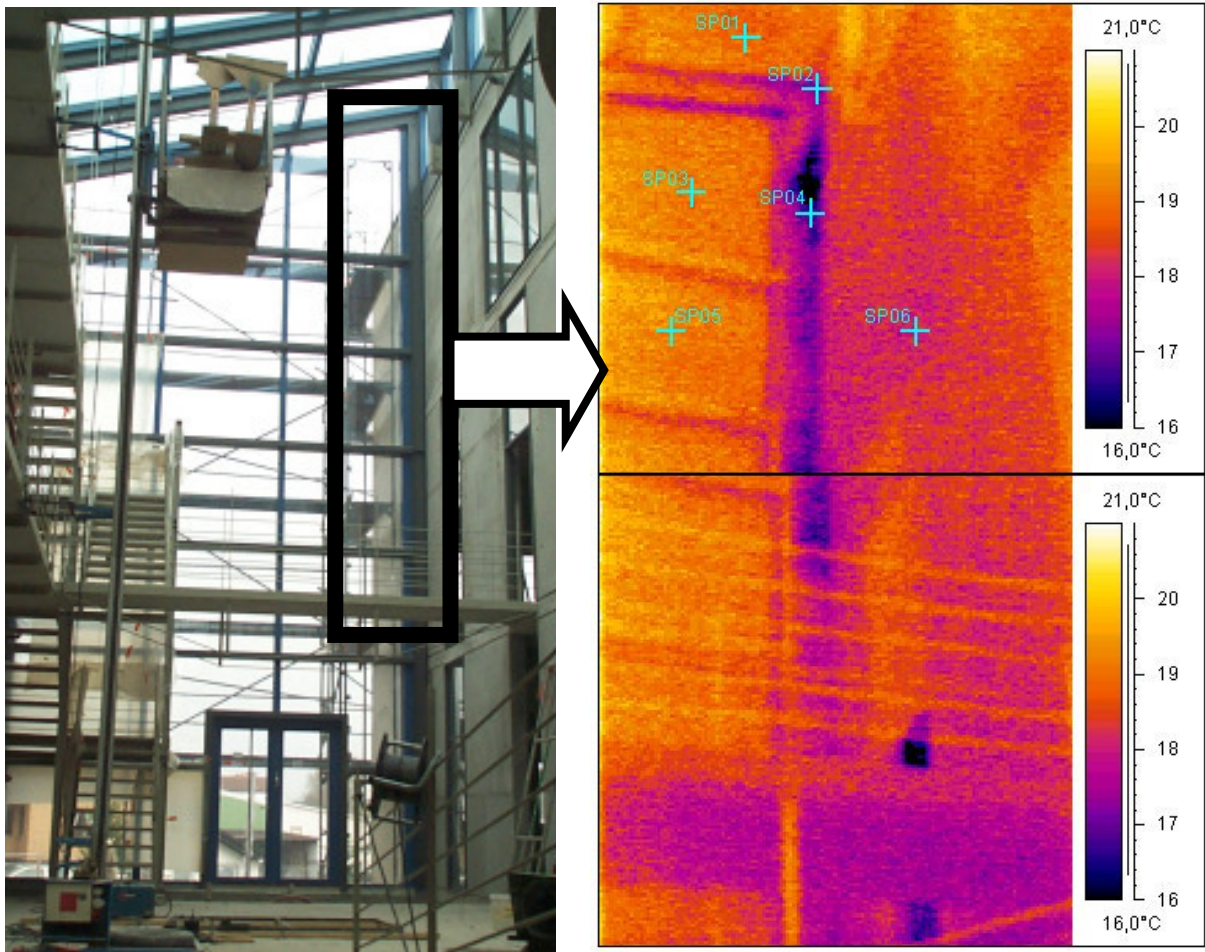


Abb. 28: Anschluss der Atriumverglasung (Südfassade) an die westliche Betonwand. Die Thermographie zeigt Undichtheiten am Anschluss. Über Punkt SP04 im Thermographiebild wird die minimale Oberflächentemperatur von 16 °C erreicht. Auch darunter zeigt der gesamte Anschlussstreifen deutlich die Schwachstellen durch geringe Oberflächentemperaturen.

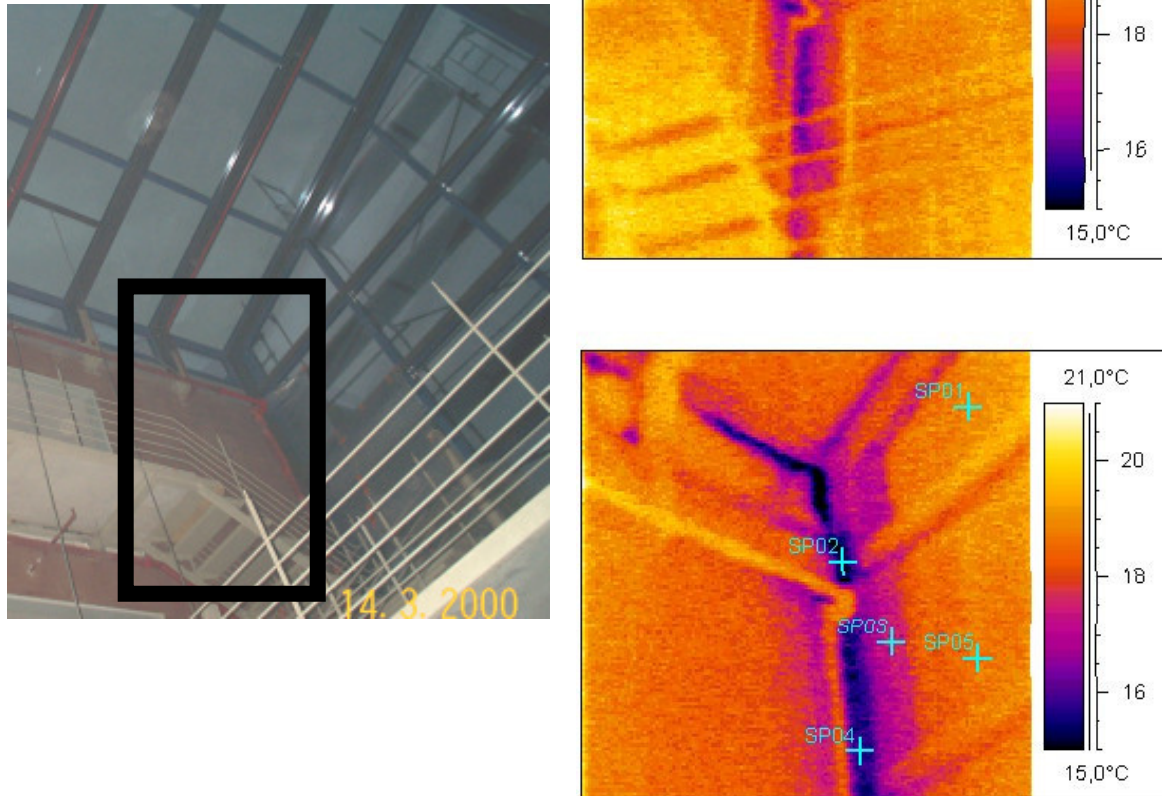


Abb. 29: Anschluss der Atriumverglasung (Südfassade) an die östliche Betonwand des Bürotraktes und an den Ostteil der Verglasung. Die Thermographie zeigt mit dem dunklen Streifen Undichtheiten am Anschluss besonders im oberen Bereich. Das untere Thermographiebild zeigt ein Detail des oberen Bildes. Bei Punkt SP02 wird eine minimale Oberflächentemperatur von 15 °C erreicht.

Auch an der Nordfassade zeigt die vertikale Atriumverglasung Anschlusschwachstellen zu den beiden angrenzenden Betonwänden. Diese wurden bereits bei der Leckageaufnahme ohne IR-Untersuchung festgestellt. Es werden insbesondere wieder im oberen Bereich bedeutende Leckagen auf den Thermographieaufnahmen sichtbar. Die minimale Oberflächentemperatur von ca. 14 °C zeigt eine schon als kritisch zu bewertende Schwachstelle an.

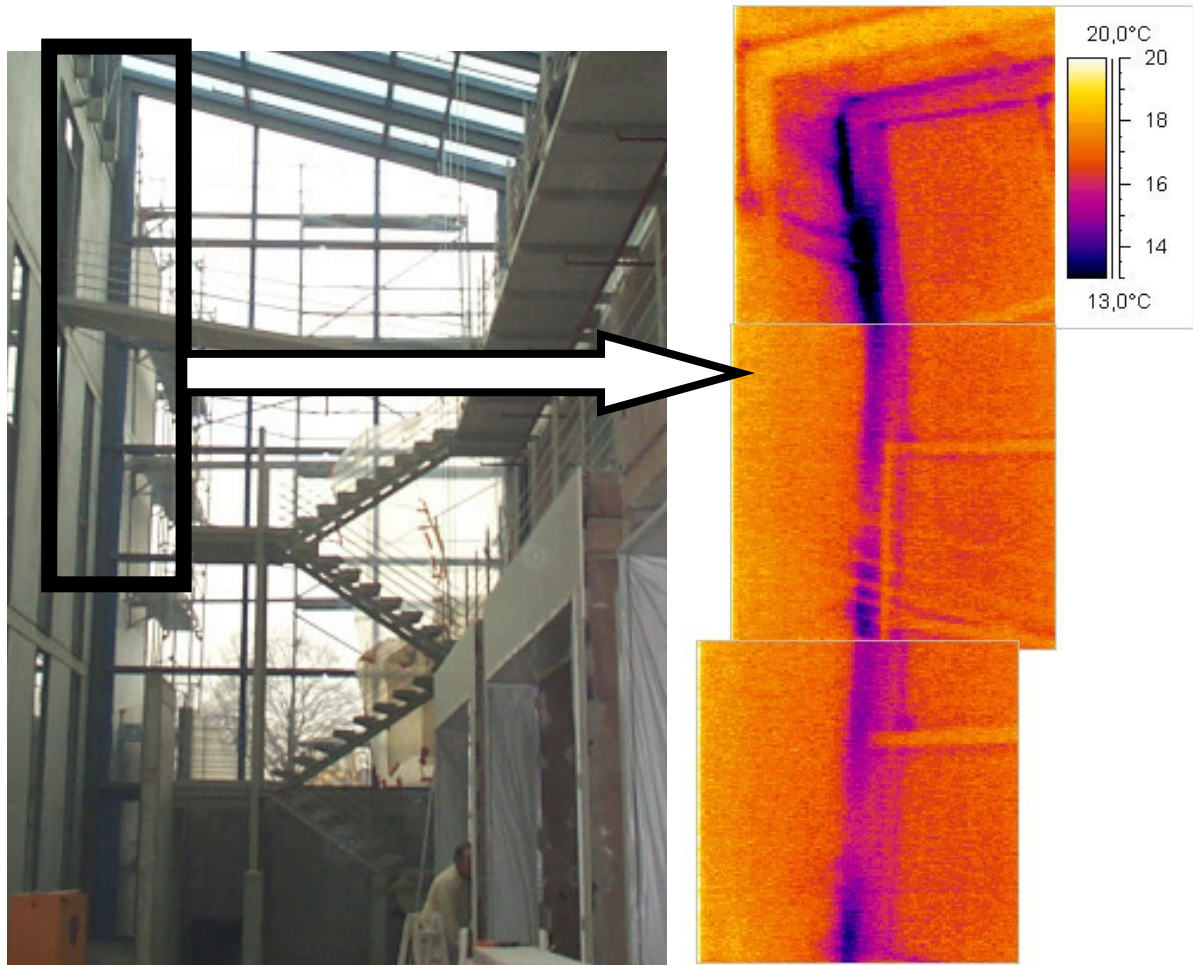


Abb. 30: Die Nordfassade der Atriumverglasung zeigt Leckagen bei den Anschlüssen an die beiden begrenzenden Betonwände. Hier ist der westliche Anschluss an die Wand zum Produktion-Labortrakt dargestellt. Das IR-Bilder zeigt die kälteren Pfostenkonstruktionen mit eindeutigen Leckagen. Ganz besonders im oberen Bereich zeigt sich ein großer Bereich mit Temperaturen bis minimal 13 °C.

Die Glasfront der Atrium Westseite ist auf der gesamten Atriumlänge etwa 1,5 m hoch. Einige der Glasfelder in der Pfosten-Riegel-Konstruktion sind als Rauchabzugsklappen ausgeführt, welche für die Messung provisorisch mit Holzplatten verschlossen und abgeklebt waren. Diese einfachen Holzplatten sind im Thermographiebild als deutlich kältere Flächen zu erkennen. Insgesamt stellte sich die Konstruktion als relativ gut luftdicht dar, sowohl die Eindichtung der Verglasungen als auch die Anschlüsse der Konstruktion an die untere Betonwand und die horizontale Verglasung. Nur an einigen Scheibenecken lassen sich auf den IR-Bildern punktuelle Undichtheiten erkennen.

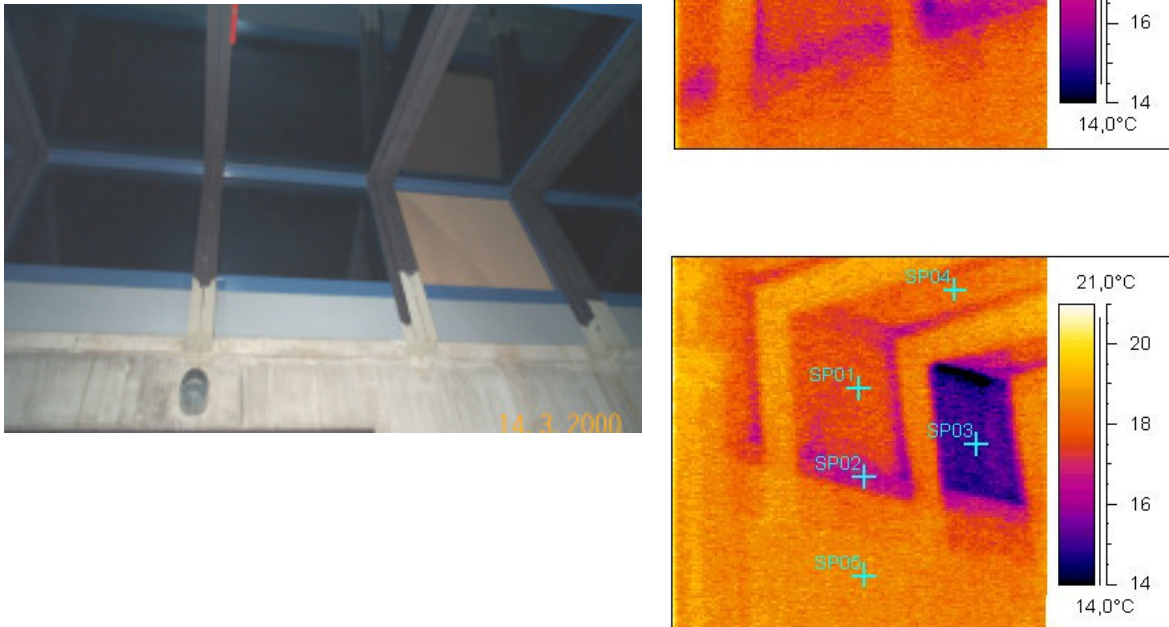


Abb. 31: Der Verglasungsstreifen auf der Westseite des Artriums ist bis auf wenige punktuelle Bereiche in den Verglasungsecken gut luftdicht ausgeführt. An diesen kleineren Schwachstellen sind Temperaturen um 15 °C gemessen worden. Die Verglasungen in den späteren Rauchabzugsklappen fehlen noch und sind vorübergehend mit Holzplatten verschlossen (davon ist unten rechts eine im Bild sowie rechts im optischen Bild).

Die Atriumfassade in Ostrichtung besteht aus einer ca. 0,8 m Hohen Pfosten-Riegel-Konstruktion, die sich oberhalb der Durchgänge zu den Büroräumen befindet. Hier wurden auf der gesamten Länge des Atriums an fast jedem Fensterfeld deutliche Leckagen gefunden. Im Thermographiebild zeigt sich dies wieder als dunkle Flächen mit niedriger Oberflächentemperatur. Diese entsprechen minimalen Oberflächentemperaturen von ca. 13,0 °C (z.B. die Fläche um Punkt SPO3) bei ungestörten Oberflächentemperaturen um 17 °C. Die Verglasungsflächen sind nicht ausreichend luftdicht in die Konstruktion eingefügt. Hier sind Nacharbeiten angeraten.

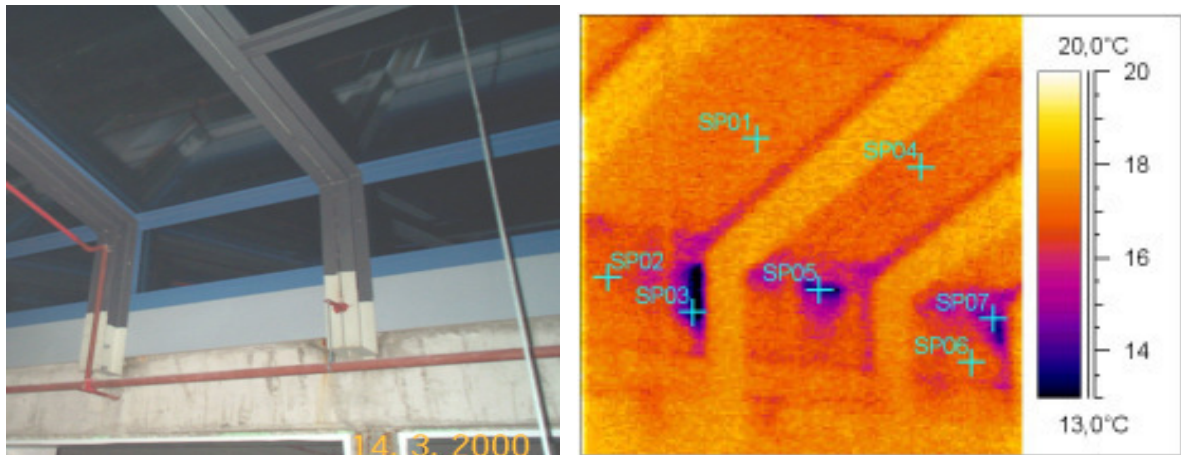


Abb. 32: Ostfassade der Atriumverglasung. Das IR-Bild zeigt deutlich drei größerflächig ausgekühlte Bereiche mit Minimaltemperaturen von 13 °C aufgrund von Undichtheiten. Die Verglasungsflächen sind hier nicht ausreichend luftdicht in die Konstruktion eingefügt.

- **Glasdach Lichtgang**

Die Abdeckung des Lichtganges zwischen dem Produktions- und dem Lagertrakt ist ebenfalls als Pfosten-Riegel-Konstruktion ausgeführt (mit geringem Gefälle). In diesem Gebäudeteil herrschten zur Zeit der IR-Aufnahmen etwas niedrigere Lufttemperaturen von ca. 16,5 °C. Insgesamt zeigt die gesamte Fläche deutliche Folgen von systematischen Leckagen. Es sind großflächig Oberflächentemperaturen zwischen 13 und 14 °C gemessen worden. Die waagerechten Pfosten zeichnen sich auf dem IR-Bild ab. Es ist zu erkennen, dass neben den kühleren Pfosten auch Teile der Glasflächen durch einströmende Kaltluft abgekühlt sind. Am Anschluss dieser Dachverglasung zur südlichen Verglasungsfassade des Lichtganges ist rechts (Punkt SP04) die größte Leckage zu erkennen.

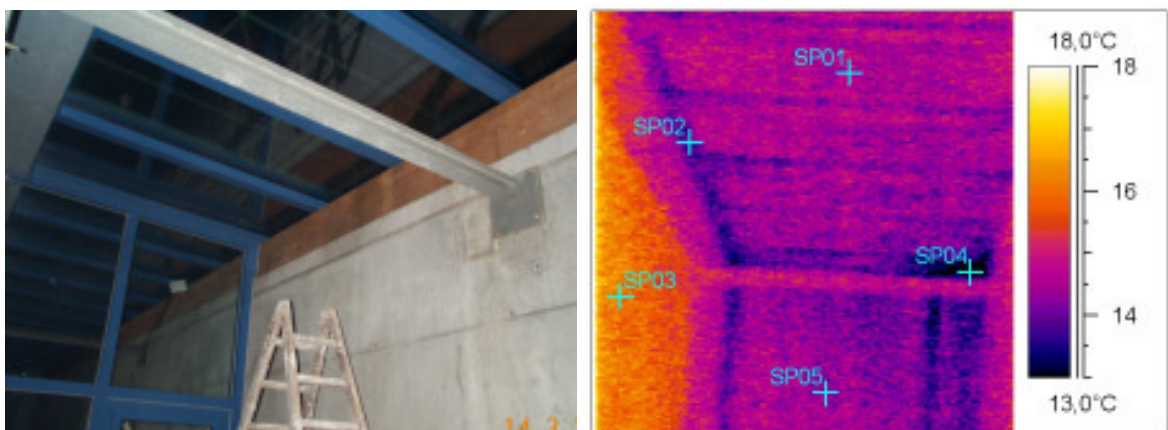


Abb. 33: Verglasungsflächen des Lichtganges (Dach und Südfassade). Es sind großflächige Leckagen und Anschlussleckagen zu erkennen. Die bedeutendste Leckage ist an der Verbindung zwischen der Glasfläche und der Südfassadenfläche um den Punkt SP04 zu erkennen.



Rechts im IR-Bild ist auch zu erkennen, dass das Bauteil neben dem Riegel deutlich kühler erscheint als die anschließende Wand. Möglicherweise handelt es sich hier nicht nur um eine Wärmebrücke sondern auch um Undichtheiten des Anschlusses zwischen den Bauteilen. Auch hier wurden Nachbesserungsarbeiten empfohlen.

- **Südfassade Büro 2. OG**

Im Bürotrakt im 2. OG fehlte, wie schon bei der Leckageaufnahme ohne IR-Aufnahmen dokumentiert, die luftdichte Verbindung zwischen Pfosten-Riegel-Konstruktion und der Decke. Bei der Untersuchung des gleichen Bereichs mit der Infrarotkamera wurde erkennbar, dass auch der seitliche Anschluss zur Betonwand betroffen ist. Die Oberflächentemperaturen zwischen 13 und 14 °C gegenüber der ungestörten Wandoberflächentemperatur von 18 bis 19 °C machen dies deutlich. Auch die oben schon beschriebenen Leckagen an den Glasleisten der einzelnen Verglasungen werden auf der Thermographieaufnahme sichtbar.

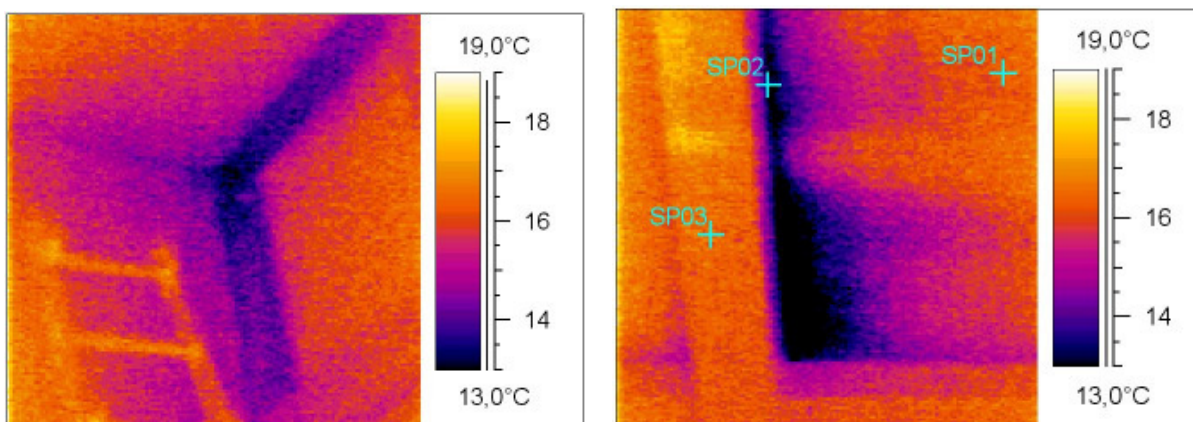


Abb. 34: Die Südfassade des Büros im 2. OG zeigt deutliche Undichtheiten sowohl am Anschluss zu Decke (Fugenmasse fehlt) und Ostwand (linkes IR-Bild) als auch an den einzelnen Verglasungsflächen (rechtes IR-Bild). Bei den Verglasungsflächen sind die Dichtungen nicht ausreichend, wie schon bei Abb. 16 und Abb. 17 gezeigt wurde.

- **Labor Ostfassade Fenstertüren**

Die bei der Leckagesuche ohne IR-Kamera gefundenen Leckagen an den div. Fenstertüren im Laborgeschoss über der Produktion wurden durch den Einsatz mit der IR-Kamera bestätigt. Bei den Fenstertüren sind Leckagen an allen Rahmenteilen gefunden worden. Hier beispielhaft dargestellt sind zwei Fenstertüren mit Undichtheiten an der Seite der Scharniere bzw. im oberen und im unteren Bereich. Diese Mängel lassen sich alle einfach von einer Fachkraft durch das Nachstellen der Beschläge beheben.

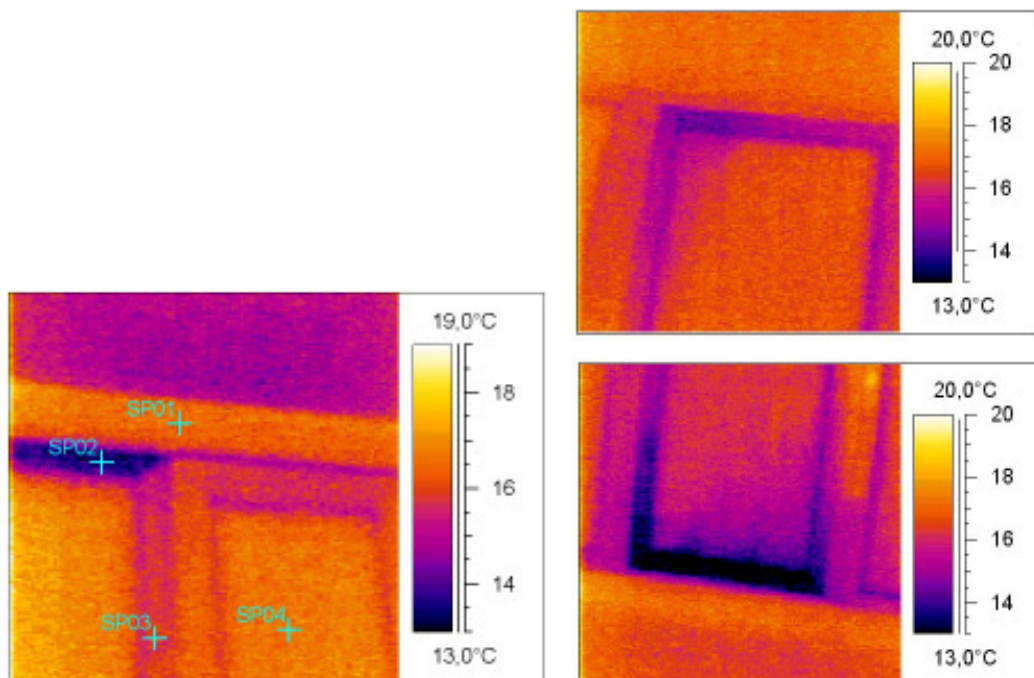


Abb. 35: Leckagen der Fenstertüren im Laborbereich. Es wurden bei fast allen Fenstertüren an verschiedenen Rahmenteilen Undichtheiten gefunden. Beispielhaft sind hier zwei typische Situationen dargestellt. Die Raumlufttemperatur lag bei 17,5 °C und die minimalen gemessenen Oberflächentemperaturen um die Leckagen bei ca. 13 °C.



• Nordfenster Produktion 1. OG

Das großformatige Fenster in der Nordfassade im 1. OG der Produktion schließt nicht luftdicht. Die Leckagen lagen hier insbesondere im oberen Bereich sowie auf der Seite der Verriegelung. Mit Nachstellarbeiten ist hier die Dichtheit zu verbessern. Bei den außergewöhnlichen Abmaßen des Fensters und dem damit verbundenen hohen Gewicht sind dem allerdings Grenzen gesetzt. Das Fenster ist nach Planung des Architekten nur in Ausnahmefällen zum Öffnen vorgesehen.

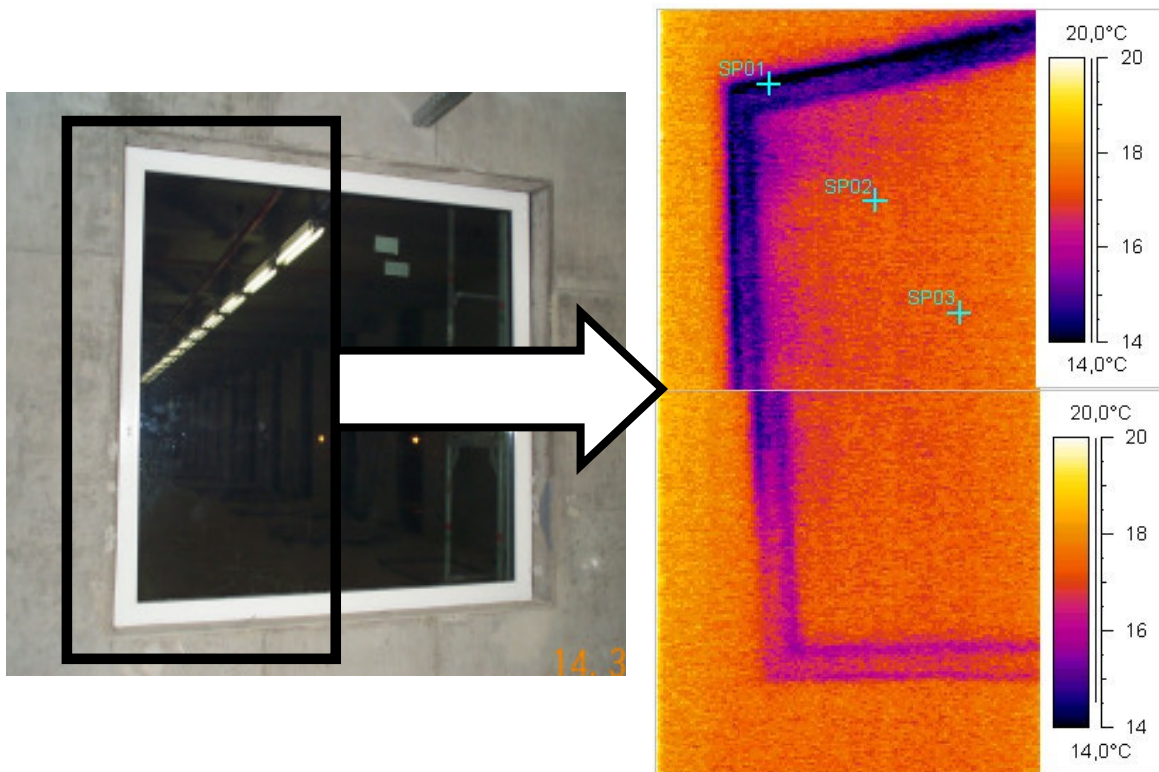


Abb. 36: Fenster im 1. OG Produktionsbereich auf der Nordseite. Das übergroße Fenster zeigt auf der Verschlussseite und oben deutliche Leckagen.

Insgesamt bleibt nach der Leckagenaufnahme festzustellen, dass es sich um kleine oder wenige ausnahmsweise größere, aber gut nachzuarbeitende Schwachstellen handelt. Diese Tatsache bestätigt das im Grundsatz durchdachte gute Luftdichtheitskonzept insbesondere in Anbetracht der Größe und der Komplexität dieses Gebäudes.

5.1.2 Quantitative Luftdichtheitsmessung

Die quantitative Messung wurde nach Abschluss aller Leckageortungen durchgeführt. Erst nachdem alle Handwerker und Besucher das Gebäude verlassen hatten, war die Durchführung störungsfrei möglich. Es wurde, wie oben bereits erwähnt, mit nur einer Blower Door (Minneapolis Blower Door Modell 3), welche in der Tür der Ostfassade eingebaut war, gemessen. Aufgrund der Größe des Gebäudes und der

relativ kleinen Verbindungen insbesondere zwischen dem Lagertrakt und dem restlichen Gebäude traten durch dynamische Druckschwankungen Probleme mit der automatischen Regelung der Blower Door auf. Aus diesem Grund wurde die Messung per Handeinstellung durchgeführt. Auf die Qualität der Messung hat diese Tatsache keinen Einfluss.

Bei Unterdruck- und danach bei Überdruckbedingungen wurden jeweils bei unterschiedlichen Drücken die notwendigen Volumenströme, welche mittels des Ventilators der Blower Door aus dem Gebäude heraus, bzw. in das Gebäude hinein gefördert werden mussten, gemessen. Dieser Volumenstrom entspricht der Summe aller Leckagevolumenströme, die bei der entsprechenden Druckdifferenz durch Leckagen ein- oder ausströmen. Der eigentliche Kennwert „ n_{50} “ ist der Mittelwert aus Unter- und Überdruckmessung zu einer Druckdifferenz von 50 Pa.

Bei der Messung wurden die Druckdifferenzen des Gebäudes gegenüber der Umgebung und die Druckdifferenz am Ventilator (zur Bestimmung des Volumenstroms) mit Hilfe des elektronischen Aufnahmesystems ATP (Druckmessdosen) und einem angeschlossenen Laptop aufgezeichnet. Dabei ergaben sich die beiden folgenden Diagramme für die Unter- und die Überdruckmessung.

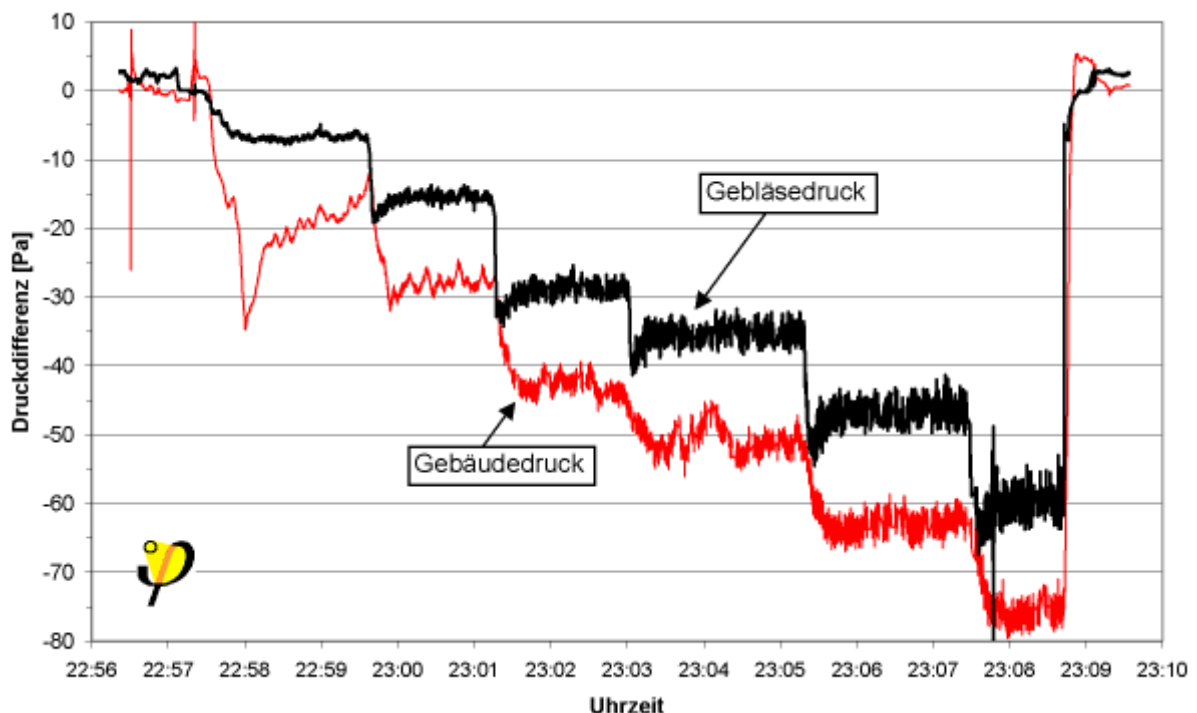


Abb. 37: Aufgezeichnete Messkurven der Druckdifferenzen bei der Unterdruckmessung im Gebäude SurTec.

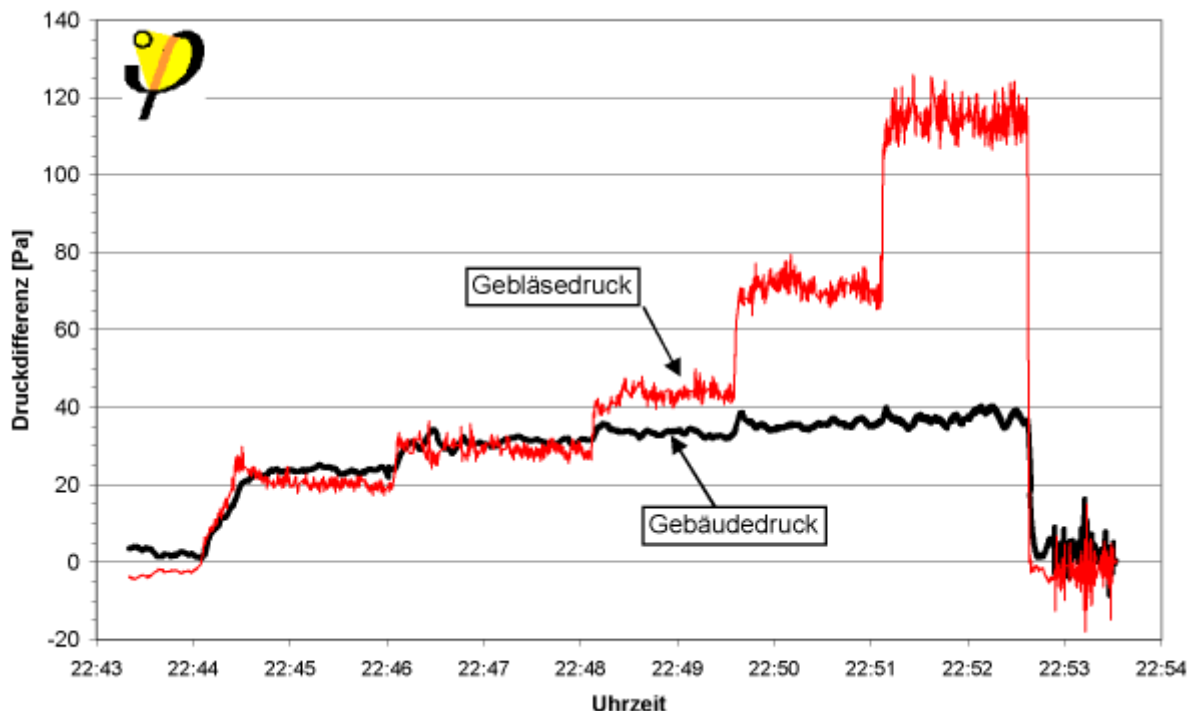


Abb. 38: Aufgezeichnete Messkurven der Druckdifferenzen bei der Überdruckmessung im Gebäude SurTec.

Bei der Überdruckmessung war ab etwa 30 Pa Gebäuedruckdifferenz ein weit überproportional größerer Volumenstrom notwendig, um höhere Gebäuedruckdifferenzen zu erreichen. Allerdings ließen sich höhere Gebäuedruckdifferenzen als ca. 40 Pa mit einer Blower Door nicht erreichen. Die Ursache für diese erhöhte Gebäudeundichtheit bei höherem Überdruck liegt eindeutig bei der Einbauweise der Verglasungen: Die Rückstellkraft der Dichtungen, auf denen die Verglasungen aufliegen, ist nicht ausreichend groß, um der Kraft durch den Überdruck im Gebäude standzuhalten. Die Fenster wurden an den umlaufenden Glasrandkanten undicht, deutlich war an jeder Scheibe ein Luftstrom nachzuweisen. Dieser Mangel wäre nur durch den Austausch aller Dichtungsprofile zu beheben. Für das Gebäude und dessen Nutzung (Energieverbrauch, Behaglichkeit) hat diese druckabhängige Leckage allerdings keine große Bedeutung. Es müsste zum Erreichen dieser Druckdifferenz windbedingt durch Turbulenzen auf der Außenseite ein Unterdruck von etwa den 30 Pa entstehen, dies kommt selten und wenn überhaupt nur sehr kurzzeitig vor. Länger anhaltende Überdrücke im Gebäude von dieser Höhe sind ebenso unwahrscheinlich. Aus diesem Grund ist es nicht notwendig, mit großem Aufwand alle Dichtungen austauschen zu lassen. Allerdings sollte der Hersteller das Dichtheitskonzept seiner Fenster überprüfen und verbessern.

Aus den Messwerten ergeben sich die Messkurven für den Über- und Unterdruck, wie in Abb. 39 dargestellt. Der Kennwert der Luftdichtheit n_{50} bezieht sich rechnerisch auf das Druckdifferenzmittel von 50 Pa. Für die Auswertung sind alle Überdruckmesswerte berücksichtigt worden, um das Gebäudeverhalten bei höheren

Drücken mit zu berücksichtigen. Für die Darstellung in Abb. 39 bedeutet dies, dass aus allen Messpunkten der Überdruckmessung EINE Ausgleichskurve gebildet wird und nicht, wie hier zur Verdeutlichung dargestellt, das Abknicken berücksichtigt wird. Das entsprechende Diagramm mit einer Geraden für die Überdruckwerte zeigt Abb. 41.

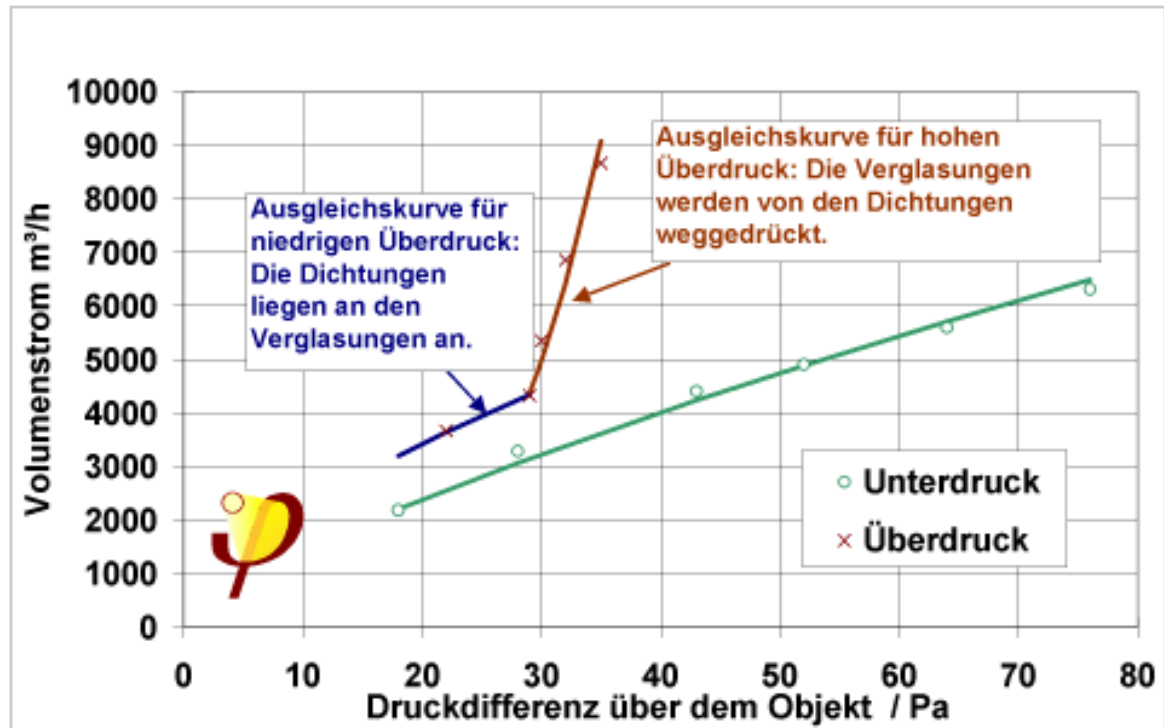


Abb. 39: Auswertung der Drucktestmessung mit den Messpunkten und zwei Ausgleichskurven. Die Ausgleichskurve für die Überdruckmessung zeigt deutlich den Knick ab 29 Pa, der durch die unzureichende Rückstellkraft der Fensterdichtungen bedingt ist.



Blower-Door Messprotokoll

Berechnungsgrundlage ISO 9972

Minneapolis Blower Door Modell 3

Objekt : Passivhausfabrik SurTec	Auftraggeber : TU Darmstadt/Inst. für Statik
Adresse : Zwingenberg an der Bergstraße	Tel :
	Ansprechpartner :
	Tel :

Messdaten : Messung ausgeführt von : Sabeda, Feist, Peper, am 14.3.00

Belüftetes Volumen	22730 m ³	Bemerkungen : keine
Beheizte Fläche	4019 m ²	
Gebäudehüllfläche	m ²	
Innentemperatur	13.0 °C	
Außentemperatur	8.0 °C	

Unterdruck

Überdruck

Reduzierblende	Gebäude- druck [Pa]	Gebläse- druck [Pa]	Volumen- strom [m ³ /h]	Abwei- chung [%]
0 ABCDE				
Gebläse geschlossen	0.0	Hilfe ein /aus		
0	18.0	7.0	2143	-4.24
0	28.0	16.0	3225	4.80
0	43.0	29.0	4328	3.20
0	52.0	36.0	4817	0.13
0	64.0	47.0	5496	-1.65
0	76.0	60.0	6202	-1.96
0				
0				
Gebläse geschlossen	0.0			

Reduzierblende	Gebäude- druck [Pa]	Gebläse- druck [Pa]	Volumen- strom [m ³ /h]	Abwei- chung [%]
0 ABCDE				
Gebläse geschlossen	2.0	Hilfe ein /aus		
0	24.0	20.0	3602	10.90
0	31.0	28.0	4254	-20.10
0	32.0	43.0	5260	-7.02
0	34.0	71.0	6741	6.17
0	37.0	114.0	8520	14.31
0				
0				
0				
Gebläse geschlossen	2.0			

Korrelationskoef. (mind. 0,998) r = 0.99625
 Gebäudekoeffizient [m³/h*Pa], norm C₀ = 273.0
 Gebäudeexponent n = 0.722

Korrelationskoef. (mind. 0,998) r = 0.90366
 Gebäudekoeffizient [m³/h*Pa], norm C₀ = 12.6
 Gebäudeexponent n = 1.789

Ergebnis, Kenngrößen :	n ₅₀	Regression Abweichg.	V ₅₀	NBV ₅₀	q ₅₀	ELA _{4Pa}
	h ⁻¹	%	m ³ /h	m ³ /m ² h	m ³ /m ² h	cm ²
Unterdruck	0.20	+/- 3.77	4593	1.1		799
Überdruck	0.61	+/- 100.76	13798	3.4		162
Mittelwert aus Unter- & Überdruck	0.40		9195	2.3		481
Grenzwert	0.6					

Das Gebäude entspricht den Anforderungen der Vorschrift **DIN V 4108 - 7**

Auftragnehmer : Passivhaus Institut Darmstadt	Bearbeiter/in : Søren. Peper
	Tel : 06151-826990

Abb. 40: Protokollblatt zur Auswertung der Drucktestmessung des SurTec Gebäudes. Als Ergebnis ergibt sich n₅₀-Wert von 0,40 h⁻¹.



Das Drucktestprotokoll in Abb. 40 zeigt das Endergebnis der Untersuchung mit dem sehr guten **n_{50} -Wert von $0,40 \text{ h}^{-1}$** . Würden bei der Auswertung die oberen Messpunkte durch die Fensterundichtheit ab 30 Pa nicht berücksichtigt werden, ergäbe sich sogar ein Wert von $0,25 \text{ h}^{-1}$. Wie das Ergebnis zeigt, sind die gefundenen und oben beschriebenen Leckagen in der Summe für das Gebäude vertretbar gering. Da sich allerdings viele der Leckagen im Atrium befanden, ist es notwendig, die empfohlenen Nacharbeiten durchzuführen. Sonst können dort stellenweise konzentriert Kaltlufteinfall oder erhöhter Wärmeverlust auftreten, was sich spürbar auf den Komfort auswirken könnte.

Das Ergebnis ist als „sehr gut“ zu bewerten. Der Grenzwert für Passivhäuser von $0,60 \text{ h}^{-1}$ wurde bei diesem ersten Fabrikgebäude in Passivhausqualität deutlich unterschritten. Gegenüber dem heute üblichen Baustandard stellt dieses Ergebnis einen großen Erfolg dar. Der Architekt Martin Zimmer hat damit gezeigt, dass sich ein gutes Luftdichtheitskonzept schon in der frühen Planungsphase gerade für so große Objekte auszahlt. Nur durch die Kombination von sorgfältiger Konzeption und Planung, guter Bauausführung und Qualitätssicherung mittels Drucktestmessung kann ein so hervorragendes Ergebnis erreicht werden.

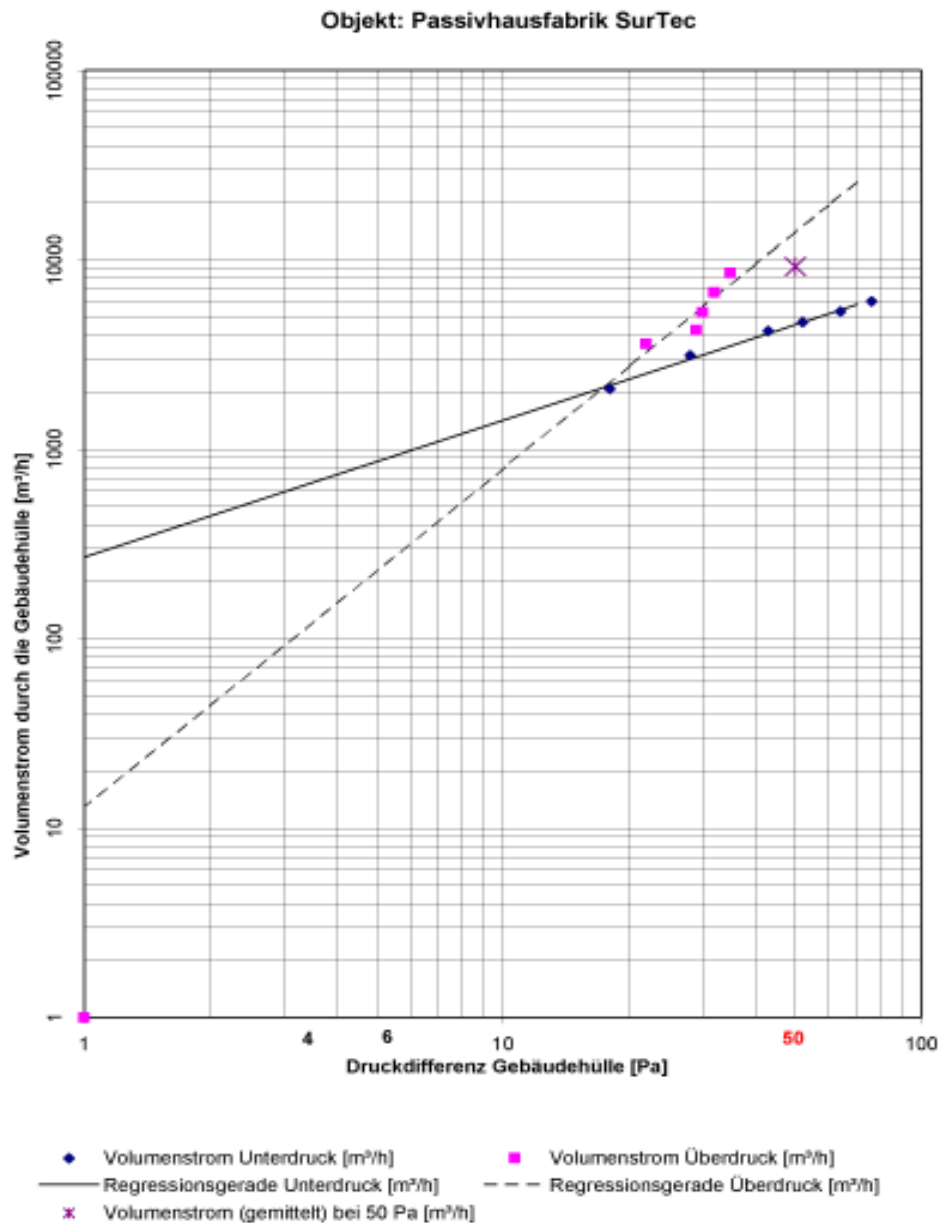


Abb. 41: Auswertung der Drucktestmessung mit den Messpunkten und den Regressionsgeraden. Im Gegensatz zum Diagramm in Abb. 39 ist hier eine doppelt logarithmische Darstellung gewählt, um Regressionsgeraden darstellen zu können. Für die Überdruckmessung wird nur eine Gerade bestimmt und nicht das Abknicken ab 29 Pa berücksichtigt, welches durch die unzureichende Rückstellkraft der Fensterdichtungen bedingt ist.

Etwa einen Monat nach der Drucktestmessung am 14. April 2000 wurde in Abstimmung mit der TU Darmstadt eine Pressemitteilung über das sehr gute Drucktestergebnis vom PHI herausgegeben.



5.1.3 Dokumentation von Schwachstellen

Neben der Beratung für das Planungsteam und dem durchgeführten Drucktest mit thermographischer Untersuchung wurden bei Ortsterminen vorgefundene Mängel am Gebäude und der Haustechnik an die Beteiligten weitergegeben. Hier ist insbesondere die bei dem Termin zur Kalibriermessung der Volumenstrommessung (26.11.2000) entstandene Mängelliste zu nennen. Diese Mängel wurden der Firma SurTec mit der Bitte um Abhilfe schriftlich mitgeteilt. Es handelt sich um die folgenden Punkte:

1. Der Luftwäscher des Lüftungsgerätes ist wasserseitig extrem undicht, solange das Gerät nicht mit hoher Luftleistung (Volumenstrom) arbeitet. Dabei läuft sehr viel Wasser in den Keller hinter das Gerät.
2. Das Lüftungsgerät selber verfügt über nennenswerte Luftleckagen.
3. Im Sammelbauwerk der fünf Zuluft-Betonröhren des Erdreichwärmetauschers (ERWT) auf der Seite des Kellers hat sich eine größere Menge von feinem Sand angesammelt, der umgehend entfernt werden sollte. Nur so kann die Zuluftqualität gesichert werden und geklärt werden, ob der Sand noch aus der Bauphase stammt oder ob er im Betrieb eingeschwemmt wird.
4. Die Filter des ERWT (Ansaugseite) müssen ausgewechselt werden, da sie stark verschmutzt sind (im Herbst 2002 erfolgt). Hilfreich ist das Führen einer „Filterkontroll- und -tauschliste“, um die Kontrolle der Filterqualität sicher zu stellen.
5. Hinter den Filtern des ERWT steht eine Wasserpfütze, die wohl durch drückendes Wasser verursacht ist. Kondensat ist hier nicht zu erwarten. In den beiden benachbarten Räumen ist kein Wasser vorhanden. Hier muss abgedichtet werden, um einer Verkeimung der Luft vorzubeugen.

Auch bei den Ortsterminen während der messtechnischen Begleitung vorgefundene Mängel wurden der Betreiberfirma SurTec und/oder den beteiligten Firmen mitgeteilt.



6 Messtechnik

Im Folgenden werden das messtechnische Konzept für das projektbegleitende Messprogramm, der messtechnische Aufbau sowie eine Beschreibung der verwendeten Sensoren und Methoden zur energetischen Untersuchung des Fabrikgebäudes dargestellt.

6.1 Messtechnisches Konzept

Ziel der messtechnischen Untersuchung ist die Überprüfung des ersten Fabrikgebäudes in Passivhausqualität in Bezug auf das thermischen Gebäudeverhalten. Es wird überprüft, inwieweit das Konzept "Fabrik als Passivhaus" in der Praxisumsetzung tragfähig ist. Dazu ist es notwendig Energiebilanzen für die gesamte Gebäudehülle zu erstellen und Verlaufsdiagramme für die Komfortparameter darzustellen.

Für die Erstellung von Energiebilanzen sind mindestens, die folgenden Parameter aufzuzeichnen:

- Gasverbrauch
- Wärmeverbräuche im Gebäude
- Kaltwasserverbrauch und Kaltwassertemperatur
- Stromverbräuche
- Parameter der Lüftungsanlage (Temperaturen, Volumenströme)
- Klimadaten
- Raumluf temperatures

Für die Komfortparameter müssen zusätzlich noch die

- Strahlungstemperatur und die
- Raumluffteuchte

gemessen und aufgezeichnet werden.

Zur Umsetzung einer präzisen und dennoch kostengünstigen Erfassung der notwendigen Messdaten in diesem relativ großen Gebäude wurde ein Bussystem zur Vernetzung der Sensoren mit einem Zentralrechner (PC) gewählt. Für das Ziel der Untersuchung ist es ausreichend, ein Aufzeichnungsintervall von 15 Minuten zu realisieren. Dabei werden je nach Messgröße 15-minütige Momentan- oder Mittelwerte auf dem PC aufgezeichnet.

Zur Konkretisierung des Konzeptes ist zunächst in Abstimmung mit dem Haus-technikplaner, dem Architekten und der Firma SurTec festgelegt worden, an welchen Stellen welche technischen Einbauten im Gebäude erfolgen. Davon ausgehend wurden dann die Standorte für die Messstellen geplant. Anschließend konnten die Sensoren ausgelegt, ausgewählt und ihre Einbindung in das zu installierende Bus-system geplant werden. Nach Absprachen mit Handwerkern und Herstellern (z.B. des Lüftungsgerätes) sowie vorbereitenden Versuchen (z.B. zum Eigenerwärmungs-fehler der Temperatursensoren) wurden die notwendigen Bauteile bestellt und zum Einbau vorbereitet. Zusätzlich waren einige Unteraufträge an den Installationsbetrieb der Wärmeversorgungsanlage zum Einbau von Wärmemengenzählern (WMZ) und Gaszählern und an den Elektrofachbetrieb zum Verlegen der notwendigen Bus- und Versorgungskabel erforderlich.

6.2 Sensoren und ihre Anordnung

Insgesamt sind für die Untersuchung 53 Messaufnehmer dauerhaft installiert worden. Mit diesen wurden kontinuierlich 93 Messkanäle aufgezeichnet. Einen Überblick über die Messaufnehmer und ihre Lage im Gebäude gibt Tabelle 5.

	Parameter	Messort
Wetterstation		
1	Außentemperatur	Wetterstation Dach Labor
2	Außenfeuchte	Wetterstation Dach Labor
3	Solarstrahlung (diffus)	Wetterstation Dach Labor
4	Globalstrahlung (direkt)	Wetterstation Dach Labor
5	Windgeschwindigkeit	Wetterstation Dach Labor
Messstellen im Gebäude		
6	Erdgasvolumen (gesamt)	Lager
7	Erdgasvolumen (Brennwertkessel)	Wendeltreppe Labor
8	Elektrische Energie Produktion	Schaltschrank Produktion EG
9	Elektrische Energie Lager	Schaltschrank Lager Nord Keller
10	Elektrische Energie Büro	Schaltschrank Produktion EG
11	Elektrische Energie Labor	Schaltschrank Produktion EG
12	Elektrische Energie Lüftungsgerät	Schaltschrank Lüftung Keller
13	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 1 (Mischer)
14	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 2 (Pufferspeicher)
15	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 3 (Trinkwasser Produktion)
16	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 4 (Vorwärmraum)



17	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 5 (Heizregister)
18	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 6 (Mischer/Sprinkler)
19	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 7 (Abwasserverdampfung)
20	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 8 (Sprinkler)
21	Wärmemenge, VL- & RL-Temp., Durchfluß	WMZ 9 (Trinkwasser Labor)
22	Temperatur Kaltwasser	Keller Lichtgang Süd
23	Temperatur Zuluft (WT)	Technikkeller
24	Temperatur Frischluft (WT) nach Erdkanal	Technikkeller
25	Temperatur Abluft (WT)	Technikkeller
26	Temperatur Fortluft (WT)	Technikkeller
27	Wasserzähler (Haupt)	Sprinklerraum Keller
28	Wasserzähler (Unterzähler)	Kriechkeller Nord
29	Differenzdruck Frischluft	Erdreichwärmetauscher
30	Differenzdruck Fortluft	Erdreichkanal Fortluft
31	Raumlufttemperatur	Atrium Nord EG
32	Raumlufttemperatur	Atrium 1. OG
33	Raumlufttemperatur	Atrium 2. OG
34	Raumlufttemperatur	Büro Nord EG
35	Raumlufttemperatur	Büro Nord 1. OG
36	Raumlufttemperatur	Büro Nord 2. OG
37	Raumlufttemperatur	Cafeteria (Atrium EG Ost)
38	Raumlufttemperatur	Büro Süd EG (Intensivmessung)
39	Raumlufttemperatur	Büro Süd 1. OG
40	Raumlufttemperatur	Büro Süd 2. OG
41	Raumlufttemperatur	Produktion EG
42	Raumlufttemperatur	Produktion 1 OG Meisterbüro
43	Raumlufttemperatur	Labor
44	Raumlufttemperatur	Lager Mitte 30 cm Höhe
45	Raumlufttemperatur	Lager Mitte 6m Höhe
46	Raumlufttemperatur	Lager Mitte 12m Höhe
47	Raumlufttemperatur	Lager Nord EG (Warenausgang)
48	Raumlufttemperatur	Lager Nord 1. OG (Wareneing.)
49	Raumlufttemperatur	Lager Nord 2. OG (Produktionsvo.)
50	Raumlufttemperatur	Fenster Atriumfassade

51	Strahlungstemperatur (Globekugel)	Büro Süd (Intensivmessung)
52	rel. Raumluftheuchte	Büro Süd (Intensivmessung)
53	Strömungsmessung	Fenster Atriumfassade

Tabelle 5: Messaufnehmer bzw. aktive Messkanäle der Datenerfassung beim Projekt Passivhausfabrik SurTec

Die Anordnung aller Sensoren im Gebäude sowie die M-Bus-Leitungen und Verzweigungsdosen sind schematisch in Abb. 43 dargestellt. Alle Sensoren sind an das M-Bus Netz angeschlossen und werden darüber zentral ausgelesen. Neben der Busleitung ist auch noch eine Spannungsversorgung zu den Sensoren verlegt. Diese wird in der Hauptsache von den Raumlufttemperatursensoren benötigt. Für andere Sensoren wurden z.T. auch Spannungsversorgungen vor Ort installiert. Das M-Bus Zentralgerät (Bus-Master, Fa. Relay) und der zur Abspeicherung und Abfrage erforderliche PC befinden sich in einem Kellerraum im Nordteil des Gebäudes. Über Modem und öffentliches Telefonnetz kann der PC fernabgefragt und bedient werden. Zur Datenkontrolle wurden mindestens wöchentlich per Fernzugriff auf dem Rechner Stichproben und Kontrollen durchgeführt. Die Daten wurden etwa monatlich vollständig heruntergeladen und weiterbearbeitet. Zur doppelten Sicherheit erfolgen Sicherungskopien der Daten auch noch auf einem MO-Laufwerk des PC vor Ort.



Abb. 42: Messtechnikraum im Keller in dem sich auch das M-Bus Zentralgerät befindet. Im Bild sind der PC mit Modemverbindung, die USV (Unterbrechungsfreie Spannungsversorgung) und das Hauptnetzteil zur Spannungsversorgung der Temperatursensoren (Gehäuse an der Wand, geöffnet).

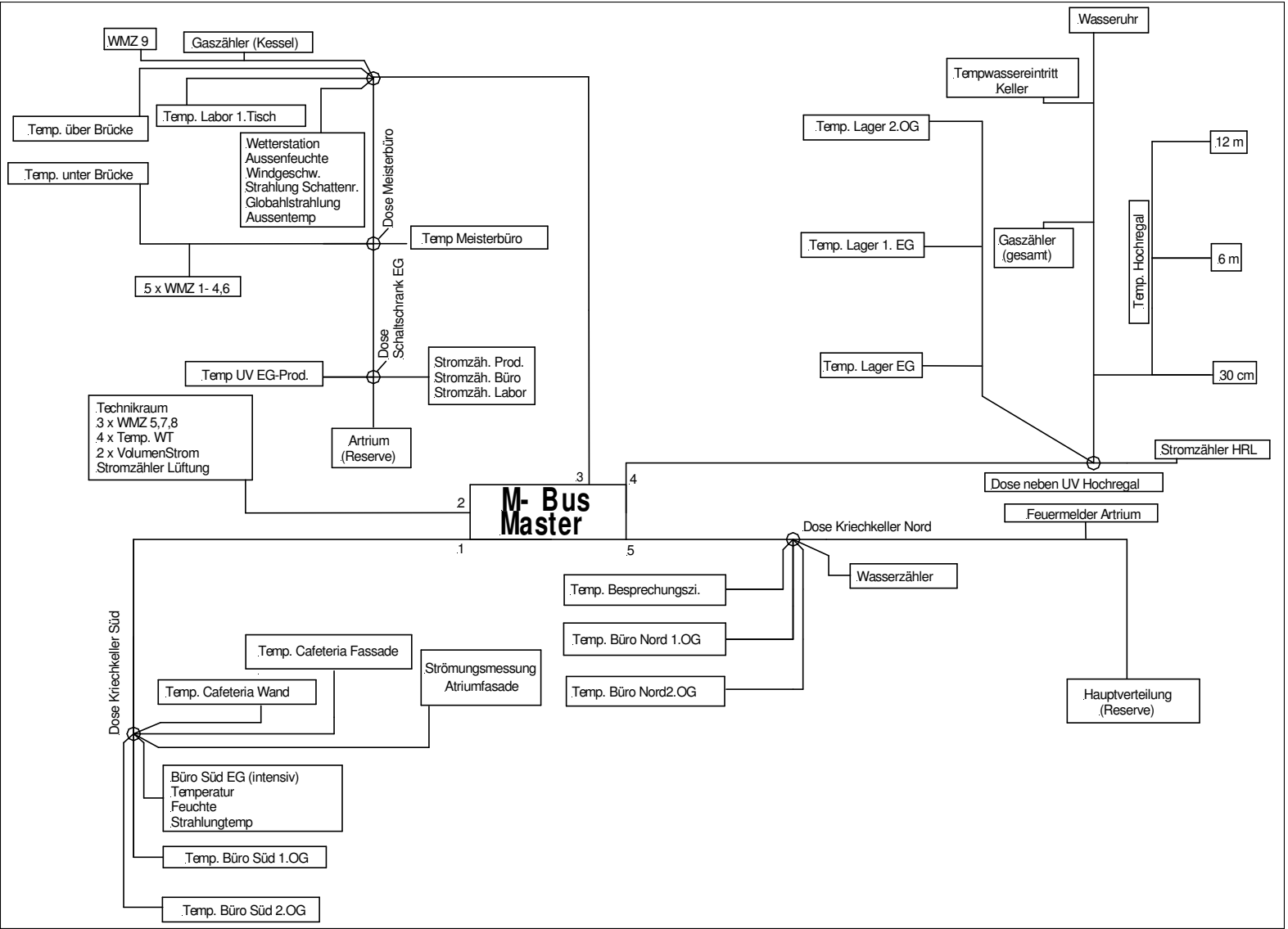


Abb. 43: Messtechnik Schaltplan mit M-Bus Leitungen und Sensoranordnung



6.2.1 Wetterstation

Zur Erfassung der lokalen meteorologischen Daten wurde eine Wetterstation auf zwei Geräteträgern auf dem Labordach errichtet. Sie besteht aus zwei Solarimetern (Fa. Kipp & Zonen, Pyranometer Typ CM 11, mit und ohne Schattenring Typ CM 121B) zur Messung der horizontalen Globalstrahlung und der horizontalen Diffusstrahlung, einem strahlungs- und wettergeschützten Außentemperatur- und Feuchte-sensor (Fa. Kipp & Zonen, Typ Hyro-Thermo-Transmitter-compact) sowie einem Windgeschwindigkeitsmessgerät (Fa. Kipp & Zonen, Typ Windgeber-compact). Die zugehörigen Messverstärker, Blitzschutzeinrichtungen und die Spannungsversorgung sind in einem Schaltkasten im Gebäude angeordnet. Im Schaltkasten sind auch die entsprechenden M-Bus-Umsetzter installiert und mit dem Bus-Netz verbunden.

Der Schattenring des Strahlungsmessgerätes muss infolge der jahreszeitlichen Sonnenstandsveränderung alle ein bis drei Wochen nachgestellt werden.

Die technischen Daten der Sensoren der Wetterstation sind in Tabelle 6 verzeichnet.

Wetterstation			
Nr.:	Messgröße	Spezifikation	Messgenauigkeit
1.	Außenlufttemperatur	PT 100, Fa. Thies	$\pm 0,2$ K
2.	Außenluftfeuchte	FE 09/1, Fa. Thies	± 2 % r.F.
3.	Windstärke	opto-elektronisch (Schlitzs.)	$\pm 0,5$ m/s
4.	Globalstrahlung horizontal	Pyranometer CM 11	$\pm 0,5$ % v. Messwert
5.	Diffusstrahlung horizontal	Pyranometer CM 11 mit Schattenring	$\pm 0,5$ % v. Messwert

Tabelle 6: Technische Angaben zu den Messfühlern für die Erfassung der meteorologische Daten.



Abb. 44: Links: Wetterstation an zwei Geräteträgern auf dem Dach der Produktion mit Sensoren zur Messung der lokalen meteorologischen Daten. Rechts im Hintergrund ist die Atriumverglasung sichtbar. Rechts: Schaltkasten der Wetterstation im Gebäude mit Verstärkern und Analog/Digital Umsetzter mit M-Bus Ausgang.

6.2.2 Gaszähler

Zur Volumenmessung des Gasverbrauchs sind im Gebäude zwei Balgen-Gaszähler der Serie BK-G6 des Herstellers Elster eingesetzt worden. Der Hauptzähler für Abrechnungszwecke befindet sich an der Südwand im Lagerbereich, der Unterzähler befindet sich im Treppenhaus der Wendeltreppe zum Laborbereich (2. OG). Dieser ist direkt vor dem Heizkessel montiert. Zwischen dem Haupt- und dem Unterzähler ist ein Abzweig der Gasleitung zum Laborbereich für Kleinverbrauch (Bunsenbrenner etc.). Beide Gaszähler sind mit Impulsgebern ausgestattet und über einen Impulszähler mit M-Bus-Umsetzter mit der messtechnischen Anlage verbunden.

Die Messfehlergrenzen der Gaszähler betragen bei Q_{\min} 3,0 % und bei Q_{\max} 1,5 %.



Abb. 45: Gaszähler im Wendeltreppenhaus im 2. OG (Labor Ebene) für den Gasverbrauch des Heizkessels. Unter dem mechanischen Zählwerk ist der Impulsgeber montiert, welcher mit einem Kabel mit dem Impulszähler und M-Bus-Umsetzter verbunden ist (schwarzes Kästchen rechts oben im Bild).

6.2.3 Elektrozähler

Für die Messung der Stromverbräuche wurden Wirkenergiezähler vom Typ EIZ-EDWA 7390 der Firma Berg Energiekontrolle eingesetzt, welche direkt M-Bus fähig sind. Diese sind mit unterschiedlichen Wandlern (drei Phasen) in vier Schaltschränke eingebaut worden. Die Programmierung der Zähler für die M-Bus Parametrierung erfolgt über die Software EIZ-EDWS73 des Herstellers.

Gemessen wird der Gesamtstromverbrauch im Gebäude durch die fünf Einzelmessungen:

1. Produktion
2. Büro / Atrium
3. Labor
4. Hochregallager
5. Lüftungsanlage

Die Messung „Produktion“ summiert auch Verbräuche der Zähler Büro/Atrium und Labor mit auf. Daher müssen zur Bestimmung der reinen Produktionsverbräuche die Werte der beiden Unterzähler abgezogen werden. Die Stromverbrauchsmessung des Lüftungsgerätes konnte erst zeitlich verzögert realisiert werden.

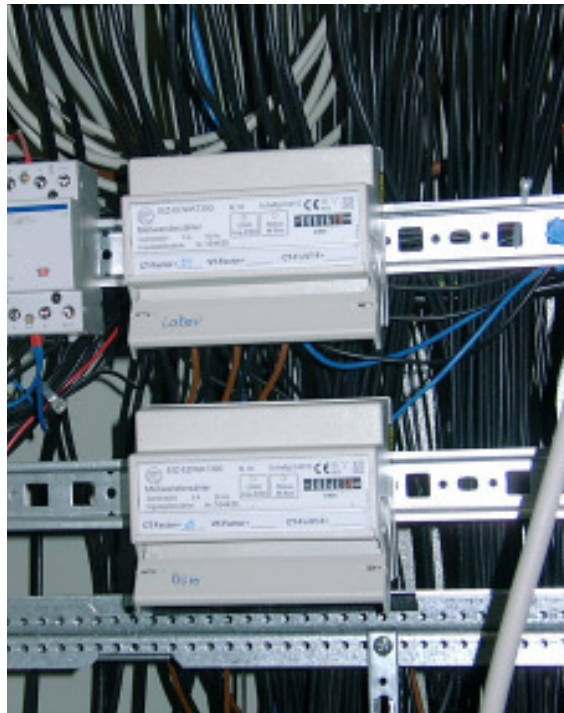


Abb. 46: Zwei Messwandlerzähler mit M-Bus Ausgang zur Strommessung im unverkleideten Schaltschrank in der Produktion EG.

6.2.4 Wärmemengenzähler

Für die Messung der Wärmemengen sind ABB/ICM Wärmemengenzähler mit Mikroprozessorrechenwerk F2, US 471 Ultraschall-Volumenmessteil und Pt 100 Temperaturmessung eingesetzt worden. Die Geräte verfügen über eine M-Bus-Schnittstelle, diese ermöglicht neben der Wärmemenge u.a. auch Datenauslesungen von Volumina und Temperaturen sowie Temperaturdifferenzen eines jeden Zählers. Bei der Auswahl der Geräte wurde immer die möglichst kleinste Baugröße eingesetzt (Q_n 0,6 bis 3,5), um möglichst kleine Anlaufvolumenströme und damit kleine Messfehler zu erzielen.

Zur Messung aller relevanten Wärmemengen wurden insgesamt neun Wärmemengenzähler (WMZ) eingesetzt.



WMZ	Messung
1	Beheizung Rührbehälter (Mischer) Produktion
2	Pufferspeicher
3	Trinkwarmwasser Produktion
4	Vorwärmraum (Temperierung Produkte)
5	Heizregister Luffterheizung
6	Kühlung Mischer über Heizungsrücklauf
7	Heizregister Luffterheizung von Abwasserverdampfung
8	Sprinkler (Sprinklererwärmung durch Mischerkühlung)
9	Trinkwarmwasser Labor, Duschen, etc. (Speicher im Technikum)

Tabelle 7: Übersicht über die eingesetzten Wärmemengenzähler

Die Anordnung der Wärmemengenzähler in der hydraulischen Anlage des Gebäudes ist dem Strangschemata in Abb. 48 zu entnehmen. Die gesamte Wärmemenge die vom Brennwärtekessel geliefert wird, kann aus der Summe der Wärmemengenzähler 1, 2 und 9 ermittelt werden. Allerdings sind in dieser Summe auch die Leitungsverluste zwischen Kessel und den Zählern enthalten. Produktionsbedingte Wärmemengen werden von den Wärmezählern 1, 3, 4, 6, 8 und 9 erfasst. Die Wärmemengen zur aktiven Beheizung des Gebäudes über die Zuluft werden mit den Wärmemengenzähler 5 und 7 gemessen. Die Wärmemenge der Abwasserverdampfungsanlage ist allerdings nur sehr gering. Der Stromverbrauch der Anlage wird bei der Stromverbrauchsmessung „Produktion“ mit gemessen. Dieser Stromverbrauch wird letztendlich als Wärme an das Gebäude abgegeben und wird den inneren Wärmequellen zugerechnet. Die Bilanzierung der Wärmemenge des WMZ 7 würde damit eine Doppelbilanzierung der Wärmemenge darstellen. Daher wurde der WMZ 7 nicht bei der Ermittlung der Heizenergie bilanziert.

Durch zwei Ventile im Rücklauf nach den Heizregistern kann mittels des kühlen Rücklaufs die zeitweise gewünschte Kühlung der Rührbehälter in der Produktion erfolgen. Der Wärmemengenzähler 6 dient zur Messung dieser Kühlenergie. Im gesamten Messzeitraum wurden die Ventile nicht betätigt, es erfolgte also keine Kühlung über den Rücklauf und der WMZ 6 zeigt dauerhaft die Wärmemenge Null an. Zur Kühlung der Mischer kann Energie an den Sprinklerwasserbehälter abgegeben werden. Diese Energiemenge wird mittels WMZ 8 gemessen.

Zur Vorerwärmung bzw. Temperierung der Chemikalien und Substanzen wurde im Lagertrakt des Gebäudes ein separater Vorwärmraum mit Heizkörpern vorgesehen. In diesen werden die Substanzen in Fässern per Hubwagen ein- und ausgefahren. Die Wärmemenge, die über die Heizkörper an den Raum abgegeben wird, misst WMZ 4.

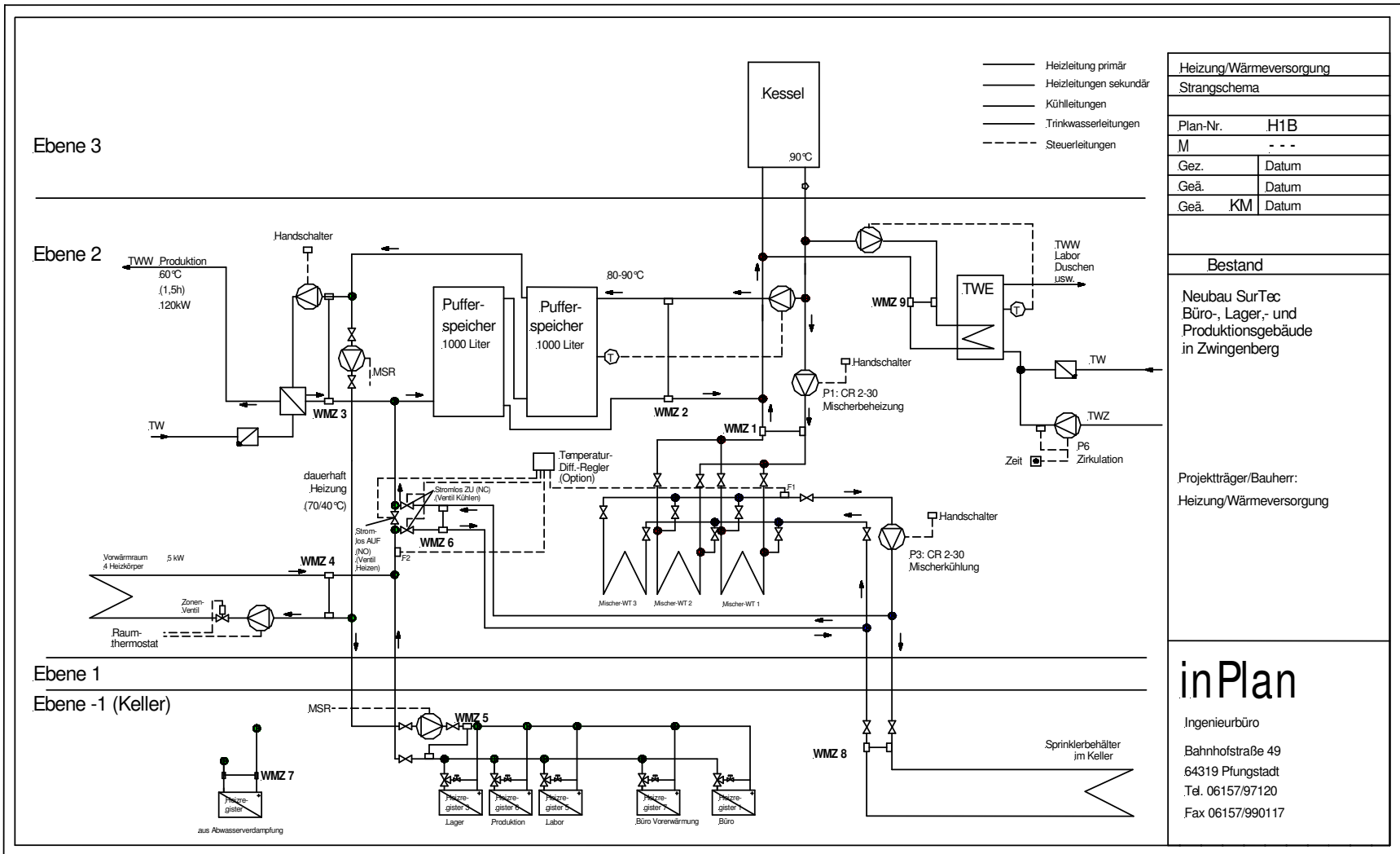
Drei der Rührbehälter (Mischer) in der Produktion werden zeitweise über Wärmetauscher beheizt. Diese Wärmemengen werden mit WMZ 1 bestimmt. Die



Mischer werden z.T. mit warmem Wasser befüllt, die Messung der Energiemenge des warmen Wassers erfolgt über WMZ 3 („Trinkwasser Produktion“).



Abb. 47: Zwei Wärmemengenzähler (Pfeile) im 1.OG der Produktion im Bereich der Pufferspeicher und des Wärmetauschers der Trinkwarmwasserbereitung für die Produktion.



Heizung/Wärmeversorgung	
Strangschema	
Plan-Nr.	H1B
M	- - -
Gez.	Datum
Geä.	Datum
Geä. KM	Datum

Bestand	
Neubau SurTec Büro-, Lager-, und Produktionsgebäude in Zwingenberg	
Projektträger/Bauherr: Heizung/Wärmeversorgung	

inPlan	
Ingenieurbüro	
Bahnhofstraße 49	
64319 Pfungstadt	
Tel. 06157/97120	
Fax 06157/990117	

Abb. 48: Hydraulikplan des Gebäudes SurTec mit den neun eingebauten Wärmemengenzählern (Zeichnung auf der Basis der Haustechnikpläne von Firma inPlan)



6.2.5 Wasserzähler

Um das im Gebäude verwendete Trinkwasser messen zu können, mussten zwei Wasserzähler mit Impulsgebern ausgestattet werden. Der Hauptwasserzähler befindet sich im sog. „Hydrantenraum“ (Raum neben dem 200 m³ Löschwasserbehälter). Der zweite Wasserzähler ist im Kriechkeller Nord hinter den Besprechungszimmern montiert. Beide wurden über M-Bus Zähler mit dem Netz verbunden.



Abb. 49: Hauptwasserzähler mit Impulszählerausgang im sog. Hydrantenraum im Keller. Im rechten Bild sieht man den installierten Impulszähler und M-Bus-Umsetzer (schwarzer Kasten oben).

6.2.6 Lufttemperaturmessung

Die Messung der Raumlufttemperaturen erfolgt über Pt 100 Sensoren (temperaturabhängige Platin-Widerstände) in der Qualitätsstufe 1/10 DIN. Das Widerstandssignal wird in ein Frequenzsignal umgesetzt (Sonderanfertigung, Fa. Dietrich Industrie Elektronik). Die Impulse werden über S₀-Schnittstelle an einen Zähler weitergegeben und dort aufsummiert (Typ PadPuls M1, Fa Relay). Der Zähler ist auf den M-Bus aufgelegt und wird über diesen alle 15 Minuten abgefragt. Aus der Anzahl der Impulse und dem genauen Zeitraum zwischen den Abfragen wird die mittlere Frequenz und daraus der Mittelwert der Temperatur berechnet. Die Umrechnung erfolgt erst bei der Konvertierung der Messdaten.

Für jede Temperaturmessung sind zwei Kleingehäuse verwendet worden: In dem Gehäuse mit Luftschlitzen befindet sich der Impulsgeber mit dem Pt 100 Sensor. In dem anderen geschlossenen Gehäuse befindet sich der Zähler mit der M-Bus

Umsetzung. Auf diesem Weg ist der Einfluss des Eigenerwärmungsfehlers der Elektronik des Zählers minimiert. Das Kleingehäuse mit der eigentlichen Temperaturmessung wurde mit etwa 6 mm Abstand vor der Wand montiert, der Schlitz wurde mit Schaumstoff ausgefüllt. Auf diesem Wege konnte der Einfluss der Wandtemperatur verringert werden.

Drei besonders exponierte Temperaturmessstellen wurden leicht modifiziert mit einem Strahlungsschutz ausgestattet. Dazu wurde der Pt 100 Sensor aus dem Gehäuse geführt und in einem aluminiumbeschichteten Strahlungsschutzröhrchen (vertikal montiert) fixiert. Bei direkter Sonnenbestrahlung ist der Sensor so abgeschirmt und das Röhrchen gut belüftet.

6.2.6.1 Eigenerwärmung und Kalibrierung

Zur Feststellung des verbleibenden Eigenerwärmungsfehlers und zur Kalibrierung der Lufttemperaturmessung wurden vor dem Einbau der Sensoren einige Kontrollmessungen im PHI durchgeführt.

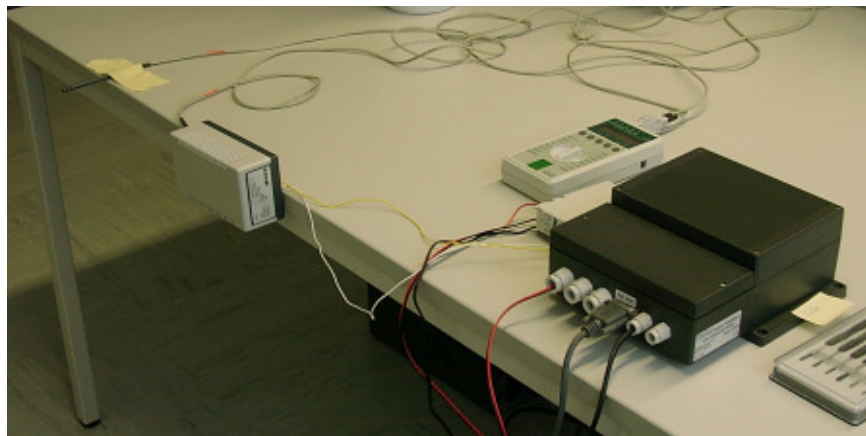


Abb. 50: Messaufbau im PHI zur Bestimmung der Eigenerwärmung der Temperaturmessung. Vorn im Bild das schwarze M-Bus Zentralgerät und an der Tischkante das Kleingehäuse mit der Pt 100 Messung. Zur Gegenmessung ist ein auf 0,1 K kalibrierter Sensor verwendet worden.

Der Eigenerwärmungsfehler durch die Elektronik im Gehäuse wurde zu +0,3 K festgestellt. Dieser Wert wurde später bei den Messdaten berücksichtigt. Bei den Sensoren mit Strahlungsschutz wurde keine Eigenerwärmung berücksichtigt, da sich die Sensoren außerhalb der Kleingehäuse befinden.

6.2.6.2 Messpunkte

Es wurden 20 Raumlufttemperaturmesspunkte realisiert, um die unterschiedlichen Temperaturbereiche und Zonen des Gebäudes möglichst gut abbilden zu können. Die räumlichen Positionen können Tabelle 5 auf Seite 55 entnommen werden. In Büroräumen oder anderen Räumen, in denen Personen mit sitzender Tätigkeit arbeiten, wurden die Sensoren nach Möglichkeit 1,1 m über dem Fußboden



positioniert (nach [DIN EN 27726]). In anderen Bereichen wurde die Position nach der Raumgeometrie gewählt. Hier ist z.B. die Hochregallagerhalle zu nennen, in der drei Sensoren über die Höhe des Raumes verteilt montiert wurden (0,3 m, 6 m und 12 m), um eine eventuelle Temperaturschichtung messen zu können.

Einige beispielhafte Temperaturmesspunkte sind in Abb. 51 abgebildet:



Abb. 51: Auswahl einiger Lufttemperaturmessungen im Gebäude. Oben zwei Messstellen im Atrium (Ausgang Nord EG unter dem Feuermelder und über der Abluftansaugöffnung im 2. OG) und unten links eine Messstelle an einer Büro-Innenwand sowie unten rechts die Messstelle am Pfosten eines Labortisches im 2. OG.

6.2.6.3 Intensivmessung (Temperatur/Feuchte)

In einem der Büroräume im EG (Ostfassade) wurde eine sog. Intensivmessung installiert. Diese beinhaltet eine strahlungsgeschützte Raumlufttemperaturmessung, eine Strahlungstemperaturmessung mit einer „Globekugel“ sowie einen Sensor für die Erfassung der relativen Luftfeuchte (Typ Feuchtesensor, Fa. KRIWAN). Die Sensoren werden für Behaglichkeitsmessungen verwendet. Die operative Temperatur ist der Mittelwert aus Strahlungstemperatur und Raumlufttemperatur. Dies ist die für das Temperaturempfinden des Menschen entscheidende Größe.



Abb. 52: Intensivmessung in einem Büro im EG. An dem Stativ sind ein Sensor für die relative Luftfeuchte, ein Lufttemperatur- und ein Strahlungstemperatursensor („Globekugel“) montiert (im Bild von links nach rechts am Stativ sichtbar).

6.2.6.4 Lufttemperaturen Lüftungsgerät

Die Temperaturen der vier Luftvolumenströme des Lüftungszentralgerätes mit Wärmerückgewinnung werden mittels vier Temperatur-Messumformern vom Typ TS-9105 der Fa. Johnson Controls gemessen. Dabei handelt es sich um Stabsensoren mit Pt 100 Messfühler und aktiven Messumformern (Fühlergenauigkeit $\pm 0,2$ K).

Gemessen werden die folgenden Temperaturen:



Lufttemperatur	Messort
Frischlufte nach dem Erdkanal	Nach Eintritt des Lüftungskanals in den Technikeller
Zuluft	Im Kanal direkt am Lüftungsgerät
Abluft	Im Gerät vor den Wärmeübertragern
Fortluft	Im Kanal direkt am Lüftungsgerät

Tabelle 8: Temperaturmessung der Luftvolumenströme am Lüftungszentralgerät und deren Messorte.

Die Lage der Sensoren am Lüftungsgerät kann der folgenden Prinzipskizze entnommen werden:

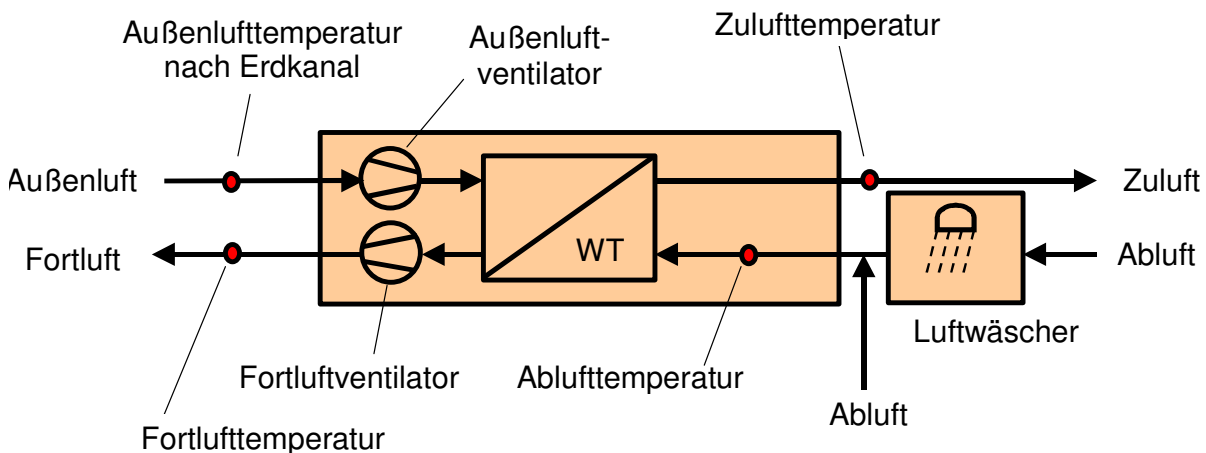


Abb. 53: Prinzipskizze der Anordnung der Temperaturmesspunkte im und am Lüftungszentralgerät.

Durch die relativ langen Stabsensoren (Länge: 300 bzw. 500 mm) können die Temperaturen direkt im Luftstrom ohne störenden Einfluss der Wandtemperaturen vom Kanal oder Lüftungsgerät gemessen werden. Die Elektronik für die Spannungsversorgung und die Umsetzung der Mess-Signale auf den M-Bus sind in einem gesonderten Gehäuse hinter dem Lüftungsgerät an der Kellerwand installiert.

Durch Schaumentwicklung im Luftwäscher vor dem Lüftungsgerät ist während der Messzeit Schaum in das Lüftungsgerät eingetreten und hat den Sensor der Ablufttemperaturmessung beschädigt. Dieser musste daher ausgewechselt werden.

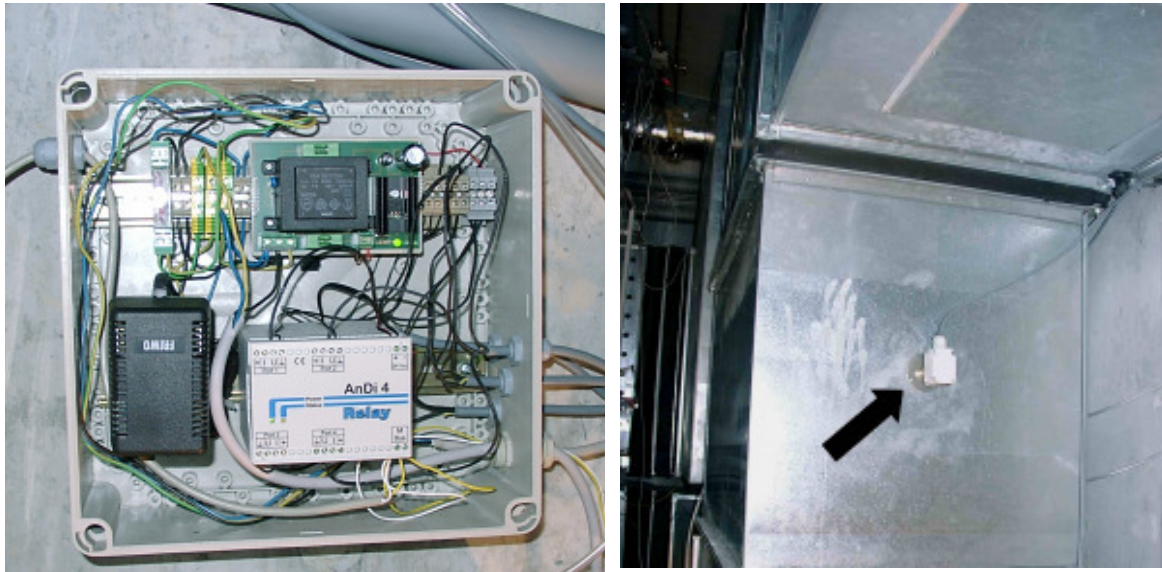


Abb. 54: **Links:** Gehäuse im Technikkeller hinter dem Lüftungsgerät zur Messung der vier Lufttemperaturen im Wärmerückgewinnungsgerät. Oben im Kasten befindet sich das Netzteil für die Temperatursensoren, darunter der Analog/Digitalumwandler mit M-Bus-Ausgang. **Rechts:** Stab-Temperatursensor am Frischluftkanal (ungedämmter Kanal)

6.2.7 Volumenstrommessung

Für die Bestimmung der Energiebilanz sind die Frisch- und Fortluftvolumenströme, welche über die Gebäudehülle ein- bzw. austreten, eine entscheidene Größe. Normalerweise werden die Volumenströme aus Differenzdruckmessungen mittels Staukreuzen oder Messblenden, welche in die entsprechenden Lüftungskanäle montiert werden, ermittelt. Durch die sehr platzsparende Anordnung der Lüftungskomponenten im Technikkeller des SurTec-Gebäudes stehen keine ausreichend langen und damit strömungstechnisch beruhigten Lüftungskanalstrecken für einen derartigen Messaufbau zur Verfügung. Aus diesem Grund musste eine andere Lösung gefunden werden.

Realisiert wurde eine Differenzdruckmessung im Erdreichwärmetauscher bzw. im Fortluft-Erdrohr. Der Erdreichwärmetauscher (ERWT) bietet mit fünf parallelen Betonrohren von etwa 60 m Länge und einem Durchmesser von 600 mm je Rohr eine gute Messstrecke mit ausreichendem Druckverlust für eine Messung. Das Fortlufterdrohr wurde nur benötigt, um vom Technikkeller die Fortluft zu den beiden Ausblasöffnungen neben dem Gebäude zu leiten. Es handelt sich um ein Betonrohr mit 1000 mm Durchmesser und ca. 33 m Länge. Auch bei diesem Rohr liegt eine ausreichende Messstrecke für eine Druckdifferenzmessung vor.

Für eine kontinuierliche Messung wäre der Einsatz von insgesamt 6 Differenzdruckaufnehmern (5 Stück Frischluft, 1 Stück Fortluft) zu aufwendig gewesen. Aus



diesem Grund wurde nach dem Einbau der Druckaufnehmer in den sechs Betonröhren eine gleichzeitige Kalibrierungsmessung für die Druckverluste durchgeführt. Mit den so aufgenommenen Daten ist es dann möglich, bei der kontinuierlichen Messung nur die Druckdifferenzen eines der Frischluftrohre und des Fortluftrohres aufzuzeichnen. So werden dauerhaft nur zwei Druckmessdosen benötigt.

Die Montage der Druckaufnehmer und die Durchführung der Kalibrierungsmessung wurde am Sonntag, den 26. November 2000 durchgeführt. Es war notwendig, einen Tag auszuwählen, an dem im Gebäude nicht produziert wurde, da die Lüftungsanlage längere Zeit komplett abgeschaltet werden musste. Der Erdreichwärmetauscher ist nach der Demontage einiger Außenluftfilterelemente (nördlich vom Gebäude an der LKW-Auffahrt) zugänglich. Hinter den Filtern befindet sich der Verteilerschacht für die fünf Betonröhren des ERWT. Nach der Hälfte der Strecke (ca. 30 m) knicken die Rohre um 45° Richtung Gebäude ab, sie sind auf ganzer Länge mit leichtem Gefälle in Richtung des Gebäudes verlegt. Von dem Verteilerschacht aus wurden das erste Rohr mit einem speziellem Rollbrett rückwärts durchfahren und dabei nach etwa 5 m der erste Druckaufnehmer im Rohr befestigt. Von dort musste ein Druckmessschlauch bis zum Technikkeller verlegt werden. Gleichzeitig wurde die Rohrlänge und die Länge der genutzten Druckmessstrecke mit einem Rollenmaßband gemessen. Etwa 4 m vor dem Ende des Rohres wurde der zweite Druckaufnehmer montiert und ebenfalls ein Messschlauch angebracht. Am Ende des ERWT befindet sich ein Sammelschacht, von dem aus der Frischluftkanal (Stahlblech) in den Technikkeller zum Lüftungsgerät geführt ist. Die verlegten Schläuche wurden durch PG-Verschraubungen im Stahlblech des Außenluftkanals im Technikkeller herausgeführt, um sie an die Druckmessgeräte anzuschließen. In den anderen Rohren wurde ebenso verfahren. Durch eine Revisionsöffnung am Frischluftkanal konnte Material auch von der Kellerseite in den ERWT hereingebracht werden.



Abb. 55: Montage der Druckaufnehmer im Erdreichwärmetauscher (ERWT). Links: Zugang zum Verteilerschacht am Ansaugbauwerk des ERWT durch die Demontage von zwei Außenluftfiltern. Rechts: Vorbereitungen im Sammelschacht des ERWT auf der Seite des Technikellers. Mit einem speziellen Rollbrett werden die Röhren einzeln durchfahren, die Rohrlänge gemessen, die Druckaufnehmer montiert und die Schläuche verlegt.



Abb. 56: Links: Montage eines Druckaufnehmers in einer der fünf Betonröhren des ERWT (Durchmesser 600 mm). Rechts: Fertig montierter Druckaufnehmer mit dem noch nicht abgewickelten Schlauch.

Im Fortluftrohr mit etwas größerem Durchmesser (1000 mm) wurden mit dem gleichen Verfahren zwei Druckmessaufnehmer montiert, die Rohrlänge vermessen und Schläuche in den Technikeller verlegt. Insgesamt wurden aus dem ERWT 10



und aus dem Fortluftkanal zwei Druckmessschläuche herausgeführt. Für die Kalibrierung wurde dort eine Differenzdruckmessung mit insgesamt sechs Differenzdruckmesskanälen realisiert. Die beiden eingesetzten APT-Geräte („Automatic Performance Testing“ Mehrkanal Druckmessdosens) mit vier bzw. zwei Druckmesskanälen wurden über zwei zeitlich synchronisierte PCs gesteuert. Für die Messung wurden über die Steuerung der Lüftungsanlage des Gebäudes alle Lüftungsklappen des Systems aufgeföhren, damit möglichst große Volumenströme erreicht werden konnten. Bei der Messung wurden mittels der Frequenzumformer (Fa. Danfoss) die Leistung der Lüftungsventilatoren-Motoren eingestellt. Mit einer Sampling Rate von 1 Sekunde sind dann bei 10 unterschiedlichen Leistungsstufen der Motoren die Druckdifferenzen in den sechs Rohren gemessen und auf den PCs aufgezeichnet worden.



Abb. 57: Links: Messaufbau zur gleichzeitigen Kalibrierungsmessung der insgesamt sechs Druckdifferenzen hinter dem Lüftungsgerät im Technikkeller. Eingesetzt wurden zwei Laptops und zwei Mehrfachdruckmessdosens. Hinten in der Mitte befindet sich der Frischluftkanal (helle Fläche). Rechts: DDC-Steuerschrank der Lüftungsanlage. Oben über dem Schaltschrank befinden sich die beiden Frequenzumformer zur Ansteuerung der Ventilatormotoren (Pfeil).

Zur Berechnung der Luftvolumenströme aus den gemessenen Druckdifferenzen muss die Rauigkeit der Rohroberfläche bekannt sein. Da kein Probestück von den eingesetzten Betonrohre vorlag, von dem im Labor die Rauigkeit hätte bestimmt

werden können, wurden Abdrücke mit einem Knetmaterial abgenommen. Diese wurden geschnitten und die Schnittflächen photographisch vergrößert. Auf den Vergrößerungen konnten die Werte der technischen Rauigkeit direkt abgemessen werden. Aus der Messung ergab sich maßstäblich umgerechnet ein Wert von 1,1 mm.

An Hand der Messwerte von allen 5 Rohren konnten dann die Parameter für die Volumstrom/Druckabhängigkeit bestimmt werden, mit der sich der Gesamtvolumenstrom aus der Druckmessung nur eines ERWT-Rohres berechnen lässt. Für die Fortluft wurde auf gleichem Weg ebenfalls eine Formel zur Volumenstromberechnung ermittelt. Da die Volumenströme temperaturabhängig sind, fließen die entsprechenden Lufttemperaturen als Parameter in die Funktion ein.

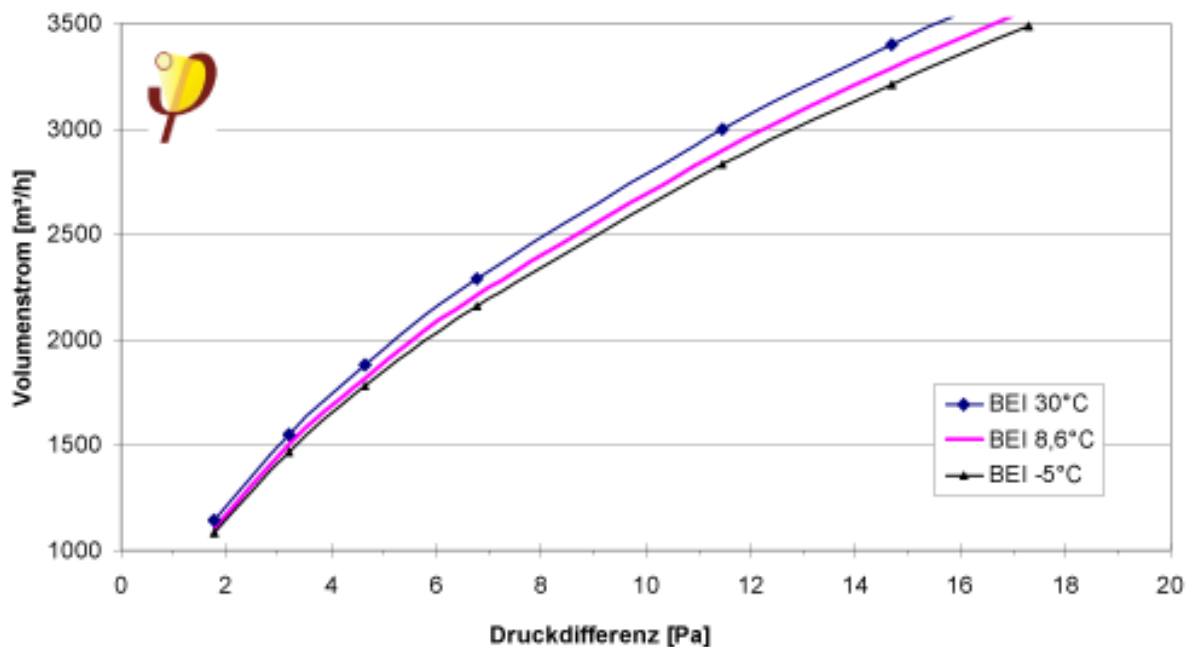


Abb. 58: Temperaturabhängigkeit der Volumenstromberechnung aus der Druckdifferenzmessung in ERWT Rohr Nr. 1.

Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des Volumenstroms ergaben sich die beiden folgenden Algorithmen zur Auswertung der Druckdifferenzmessdaten:



Algorithmus Aussenluftvolumenstrom

$$\dot{V}_{\text{Aussenluft}} = 3798,32 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \left(\frac{\Delta p_{R1}}{[\text{Pa}]} \right)^{0,52} \times \left(0,0016 \times \frac{\vartheta}{[^\circ\text{C}]} + 0,9856 \right)$$

$\dot{V}_{\text{Aussenluft}}$	Gesamtvolumenstrom Aussenluft
Δp_{R1}	Druckdifferenz in ERWT-Rohr 1
ϑ	Temperaturmittelwert aus Frischlufttemperatur nach ERWT und Aussenlufttemperatur (Wettermast)

Algorithmus Fortluftvolumenstrom

$$\dot{V}_{\text{Fortluft}} = 4955,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \left(\frac{\Delta p}{[\text{Pa}]} \right)^{0,5159} \times \left(0,0016 \times \frac{\vartheta}{[^\circ\text{C}]} + 0,9769 \right)$$

$\dot{V}_{\text{Fortluft}}$	Volumenstrom Fortluft
Δp	Druckdifferenz im Fortluftrohr
ϑ	Fortlufttemperatur

6.2.7.1 Kontinuierliche Volumenstrommessung

Für die kontinuierliche Volumenstrommessung werden, wie oben beschrieben, die Druckdifferenzen eines der fünf Erdkanalrohre für den Frischluftvolumenstrom und die Druckdifferenzen im Fortluftrohr gemessen und aufgezeichnet. Für die kontinuierliche Druckmessung weder die in die Rohre eingebrachten Schläuche verwendet. Im Technikeller hinter dem Lüftungsgerät sind in einem Gehäuse zwei Differenzdruck-Umsetzter vom Model SET-CD267-25P-U-F der Firma SETRA installiert. Die Druckmessung erfolgt mit der Genauigkeit von $\pm 0,06$ Pa. In dem Gehäuse erfolgt auch die Umsetzung über einen Analog/Digital-Wandler auf das M-Bus Signal.

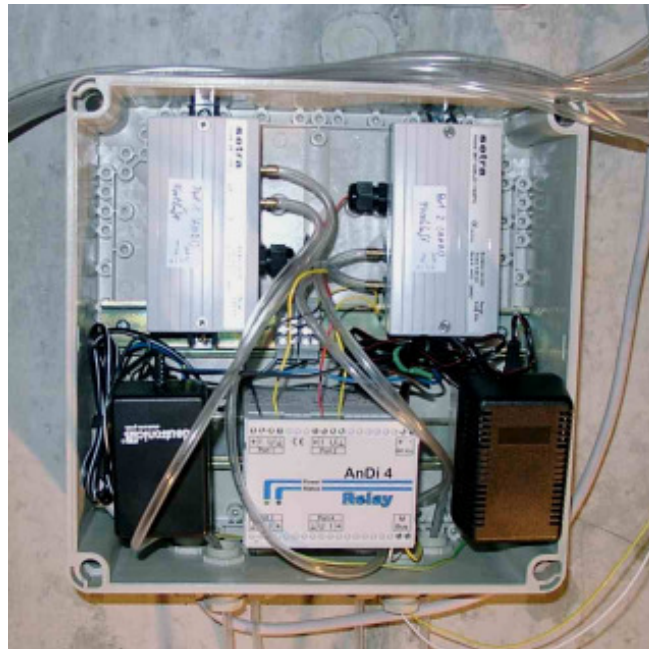


Abb. 59: Druckdifferenzmessung im Technikkeller zur Bestimmung der Frisch- und der Fortluftvolumenströme (Geöffnetes Gehäuse). Oben im Gehäuse sind die beiden Drucksensoren, unten in der Mitte ist der Analog/Digital-Umsetzer mit M-Bus Ausgang angeordnet.

6.2.8 Einzelsensoren

Neben den bisher beschriebenen Sensoren gibt es noch einige Einzelsensoren, welche in diesem Abschnitt aufgeführt werden.

6.2.8.1 Strömungsmessung Kaltluftabfall

Die Cafeteria des Gebäudes befindet sich zwischen den beiden Bürotrakten an der Ostfassade. Die Verglasungsfläche der Pfosten-Riegel Konstruktion nimmt hier die ganze Gebäudehöhe ein. Die Cafeteria wird als Pausenaufenthaltszone genutzt, es sind also überwiegend sitzende Personen in den Pausenzeiten anzutreffen. Eine derartig hohe Glasfassade birgt das Risiko von Kaltluftströmungen, welche sich negativ für die Behaglichkeit bemerkbar machen könnten: Die Luft kühlt sich an der inneren Oberfläche ab und sinkt nach unten. Um die Auswirkung des Kaltluftabfalls an der Verglasung messen zu können, wurde ein Strömungssensor über dem zweiten Riegel von unten montiert. Dabei handelt es sich um einen Luftgeschwindigkeitssensor (Omnisensor Typ 8475) der Fa. TSI, welcher nach dem Thermoanemometer-Prinzip arbeitet und mit einem richtungsunabhängigen Kugelsensor ausgestattet ist. Es wurde der kleinstmögliche Messbereich von 0,05 bis 0,5 m/s eingestellt.



Abb. 60: Ost-Verglasung der Cafeteria mit der Position des Luftströmungsgeschwindigkeits-Sensors (Kreis). Der Sensor wurde ca. 8 cm über dem Riegel montiert (dünne „Stange“). Am Pfosten ist zusätzlich eine Strahlungsgeschützte Lufttemperaturmessstelle montiert.

6.2.8.2 Kaltwassertemperatur

Zur Bestimmung der Energiebilanz des Gebäudes ist die Kaltwassertemperatur von Interesse. Diese wurde am Eintritt der Hauptwasserleitung in das Gebäude gemessen. Dazu wurde ein Anlegefühler Typ TS-9105 der Fa. Johnson Controls mit Wärmeleitpaste auf der Leitung befestigt und vollständig mit alukaschierter Wärmedämmung gedämmt. Der Sensor ist mit einem Pt 100 ausgestattet, von dem - in der gleichen Weise wie bei den Raumlufttemperaturen mittels Impulswandler - die Temperatur aufgezeichnet wird. Die Genauigkeit des Sensors beträgt $\pm 0,2$ K.



Abb. 61: Kaltwassertemperaturmessung am Eintritt der Hauptkaltwasserleitung (schwarzes Rohr) in das Gebäude. Im Bild zum einen der ungedämmte Zustand mit temporärer Fixierung von Elektronik und Sensor sowie der endgültige Zustand mit gedämmten Sensor (Anlegefühler).

6.2.8.3 Wassertemperatur Sprinklerbehälter

Der ca. 200 m³ Sprinklerbehälter befindet sich innerhalb der thermischen Hülle im Südteil des Gebäudes im Keller. Er wird auch genutzt um einige Rührbehälter der Produktion zeitweise zu kühlen. Dazu ist ein Rohrbündel als Wärmetauscher im Sprinklerbehälter versenkt. Vom hydraulischen System kann die Wärme nach Bedarf aus den Rührbehältern zum Wärmetauscher transportiert werden. Um den Einfluss der Wärmemenge auf die Sprinklerwassertemperatur einschätzen zu können, wurde zeitweise (21.12.2001 bis 2.5.2002) ein Datenlogger mit externem Temperatursensor im Sprinklerbehälter eingesetzt. Dabei kam ein Sensor vom Typ „HOBO H8 Pro-Serie“ der Fa. Onset zum Einsatz (Genauigkeit $\pm 0,2$ K bei 23 °C).



7 Messdatenauswertung

Die kontinuierliche Messung im Gebäude liefert ab 1. Dezember 2000 von fast allen 53 Messsensoren belastbare Daten in einer Zeitauflösung von 15 Minuten. Einige wenige Kanäle konnten erst zeitversetzt aktiviert werden. Die Auswertung bezieht sich in der Hauptsache auf den Jahreszeitraum vom 1. Mai 2001 bis zum 30. April 2002. Damit wird ein vollständiges Messjahr dokumentiert, welches in ausreichendem zeitlichem Abstand zum Bezug des Hauses liegt. Um mit den Messdaten nicht vor allem die untypische Anlauf- und Einstellungsphase der Gebäudetechnik zu dokumentieren, ist dies von Vorteil. Wenn ein längerer Zeitraum aussagekräftiger war, werden die Daten vereinzelt bereits ab Dezember 2000 bzw. Januar 2001 ausgewertet und dargestellt.

7.1 Lufttemperaturen

Um einen Überblick über den gesamten Temperaturverlauf zu haben, werden vorab alle gemessenen 20 Raumlufftemperaturen im gesamten Messzeitraum (01.12.2000 bis zum 30.04.2002) dargestellt. Bei den Messdaten handelt es sich um arithmetische Tagesmittelwerte einer jeden Messstelle. Aus den Temperaturmessdaten wurde, nach dem Raumvolumen der jeweiligen Temperaturzone gewichtet, die mittlere Gebäudetemperatur ermittelt und im Diagramm eingetragen. Zusätzlich ist die Außenlufttemperatur in diesem Zeitraum dargestellt.

In Abb. 62 ist unter anderem zu erkennen, dass vier der 20 Raumlufftemperatursensoren erst verzögert (Anfang Februar 2001) in Betrieb genommen werden konnten. Es handelt sich um die Temperaturmessstellen Produktion EG, Büro Süd EG, Büro Süd 1. OG und Büro Nord 2. OG. Die Datenaufzeichnung konnte ohne größere Datenausfälle sehr stabil im gesamten Messzeitraum betrieben werden.

In der Abbildung ist der jahreszeitliche Verlauf der Innen- und der Außentemperatur abzulesen. Die Raumlufftemperaturen zeigen eine große Streuung und ergeben ein breites Temperaturfeld wodurch die Inhomogenität der Gebäudenutzung deutlich wird.

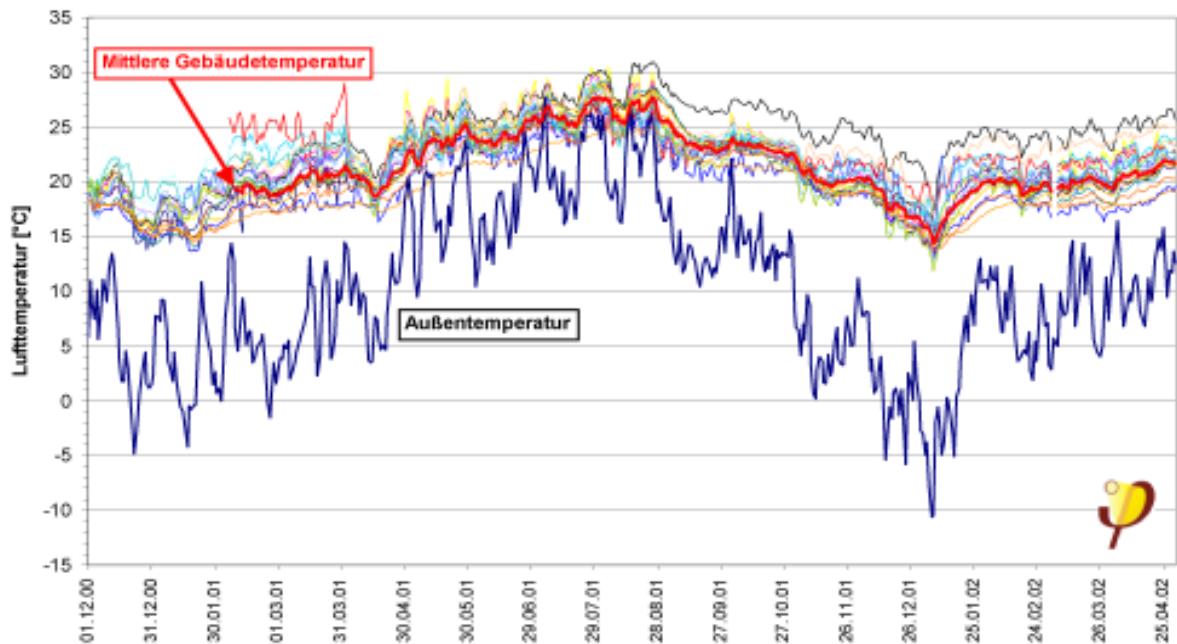


Abb. 62: Alle 20 gemessenen Lufttemperaturen im Gebäude und die Außenlufttemperatur im gesamten Messzeitraum 1.12.2000 bis zum 30.4.2002 (Tagesmittelwerte). Vier Raumlufttemperaturen konnten erst verzögert aktiviert werden. Zusätzlich ist die mittlere Gebäudetemperatur (Raumvolumengewichtet) ab dem Zeitpunkt eingetragen, an dem alle Temperaturen aufgezeichnet wurden.

Für den Auswertzeitraum 01.05.2001 bis zum 30.04.2002 sind in Abb. 63 zur besseren Übersichtlichkeit die Temperaturverläufe der beiden Zonen mit den überwiegend minimalen und den überwiegend maximalen Temperaturen dargestellt. Sehr niedrige Raumlufttemperaturen wurden im Bereich des Warenausgangs (Nordbereich Lagertrakt) gemessen, einem Bereich mit sehr großer Außenluftan-kopplung durch das häufig offenstehende LKW-Ladetor und eine große Tür zur Laderampe. Nur wenige Temperaturen (z.B. Hochregallager 6 m über dem Boden und im Labor/2. OG) liegen zeitweise noch niedriger als die am Warenausgang.

Fast durchgehend die höchsten Temperaturen wurden im Bereich der Produktion im 1. OG gemessen, da dort durch den Produktionsbetrieb (Wärmeschränke, Rühr-behälter, etc.) sehr hohe innere Lasten vorhanden sind.



Abb. 63: Temperaturverläufe der extremen Temperaturzonen des Gebäudes im Auswertzeitraum vom 01.05.2001 bis zum 30.04.2002.

Auffällig am Verlauf der Temperaturen sind die Minimalwerte im Gebäude um den 06.01.2002. Der kälteste Wert im Gebäude wurde an diesem Sonntag mit 11,8 °C (niedrigster Stundenwert an diesem Tag betrug 11,3 °C) im Labor im 2. OG gemessen. Es handelt sich um einen Tag am Wochenende an dem nicht produziert wurde. Aber auch die Temperaturen der Tage vor- und hinterher sind - auch für ein Betriebsgebäude - als deutlich zu niedrig einzustufen. Zur Feststellung der Ursache für diese Tiefsttemperatur sind in Abb. 64 die entscheidenden Temperaturgänge und Energieverbräuche um diesen Zeitpunkt herum dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Lüftungsanlage während der gesamten Zeit mit nahezu konstanter Leistung betrieben wurde. Die Tiefsttemperatur ist am Wochenende nach der Weihnachts- und Neujahrespause gemessen worden.

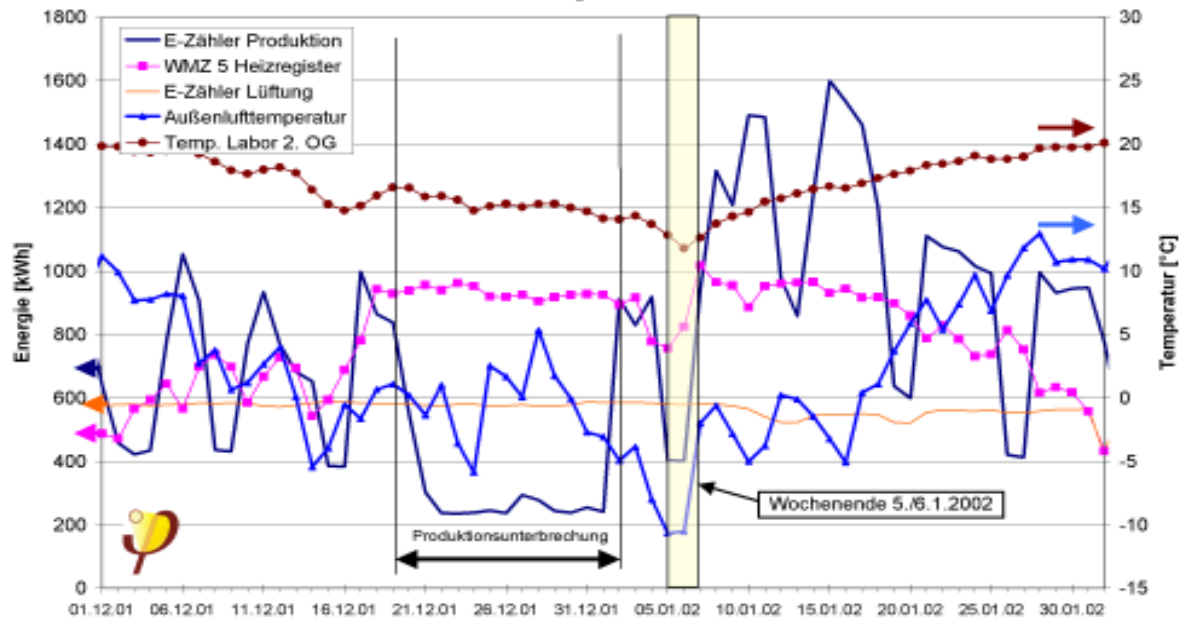


Abb. 64: Ausgewählte Temperaturen und Energieverbräuche im Dezember 2001 und Januar 2002 zur Untersuchung der Gebäudetiefsttemperaturen am 6. Januar 2002.

Der Stromverbrauch in der Produktion sinkt am Wochenende deutlich ab, damit gehen die inneren Wärmequellen deutlich zurück. In der Betriebspause über die Feiertage wird der Rückgang der inneren Lasten in der Produktion durch den Anstieg der Heizenergie weitgehend kompensiert. Nicht so nach der Betriebspause und am besagten Wochenende: Hier wird die Heizleistung trotz fehlender innerer Lasten und trotz deutlich sinkender Außentemperatur auf unter -10 °C noch reduziert. Vermutlich handelt es sich dabei um eine Fehlbedienung oder ein Regelungsproblem. Nach dem Wochenende steigt die Temperatur aufgrund der Stromverbräuche in der Produktion und der wieder aktivierten Heizleistung stetig an, bis Ende Januar wieder 20 °C erreicht sind. Beim Labor handelt es sich um eine besonders exponierte Zone des Gebäudekomplexes, da diese mit dem Dach und der westlichen Außenfassade im Bezug zu anderen Zonen sehr große Ausflächen besitzt. Zusätzlich gibt es hier nur sehr geringe innere Wärmequellen (niedrige Stromverbräuche und geringe Personenbelegung). Nicht völlig ausgeschlossen werden kann zusätzlich, dass in diesem Gebäudebereich ein Fenster längere Zeit geöffnet war und vergessen wurde. Für den Laborbereich wurde wegen der Klagen der Nutzer bereits im Jahre 2001 eine Nachrüstung mit einem zusätzlichen Nachheizregister geplant, aber bisher nicht realisiert.

An Abb. 62 ist bereits abzulesen, dass auch die anderen Gebäudetemperaturen deutlicher mit der Außentemperatur korrelieren als erwartet. Die aus dem Passivhaus-Wohnbau üblichen sehr hohen Zeitkonstanten sind hier nicht erkennbar. Eine zentrale Ursache dafür muss in zeitweise in bedeutendem Umfang geöffneten Fenstern oder Türen gesucht werden (weitere Ausführungen weiter unten). Eine weitere Ursache ist in dem - im Vergleich zu den Anforderungen im Passivhaus-



Standard im Wohnbau - etwas geringeren Dämmstandard zu suchen. Da in dem Fabrikgebäude mit hohen inneren Wärmequellen gerechnet wurde, sind bereits bei der Planung geringere Dämmstärken realisiert worden als sonst beim Passivhaus-Standard üblich. Die U-Werte der Außenwände liegen in diesem Objekt um $0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, die der Dächer um die $0,13 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und die der eingebauten Fenster betragen $0,94 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ (Angaben nach [Schnieders 2001]). Die U-Werte der Pfosten-Riegel-Konstruktion liegen bei knapp $0,78 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$, ohne Berücksichtigung eventueller Einbauwärmeverbrücken.

Die Untersuchung der Korrelation zwischen den Raumlufttemperaturen und der Außenlufttemperatur zeigt deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Zonen des Gebäudes. Zur Bewertung werden einige beispielhafte Korrelationen grafisch dargestellt, indem die Innen- über der Außentemperatur aufgetragen werden. In Abb. 65 sind die Korrelationen der Temperaturmesswerte (Tagesmittel) der Gebäudebereiche Produktion/Labor und Atrium dargestellt. Die Steigung der Ausgleichsgeraden liegen zwischen $0,24$ und $0,37 \text{ K}/\text{K}$. Das bedeutet, dass im Mittel bei einer Temperaturveränderung der Außenluft um 1 K sich die Innenraumlufttemperatur um $0,24$ bis $0,37 \text{ K}$ verändert. Die Werte der Zonen aus Abb. 65 im Einzelnen:

Bereich	Steigung
Produktion EG	0.30
Produktion 1.OG	0.24
Labor (2.OG)	0.36
Atrium EG	0.31
Atrium 1. OG	0.35
Atrium 2.OG	0.37

Tabelle 9: Steigung der Ausgleichsgeraden zur Korrelation zwischen Raumlufttemperatur und Außenlufttemperatur im Gebäudetrakt Produktion/Labor und im Atrium.

Die Steigungswerte im Labor (2. OG) und beim Atrium 2. OG stellen die höchsten Werte im Gebäude dar. Vom Trend her finden sich die größeren Abhängigkeiten im oberen exponierterem Bereich. Insbesondere im großflächig verglasten Atriumsbereich war dies zu erwarten: Der Wärmedurchgangskoeffizient von der Verglasung ist etwa um einen Faktor 4 größer als der einer Außenwand des Gebäudes.

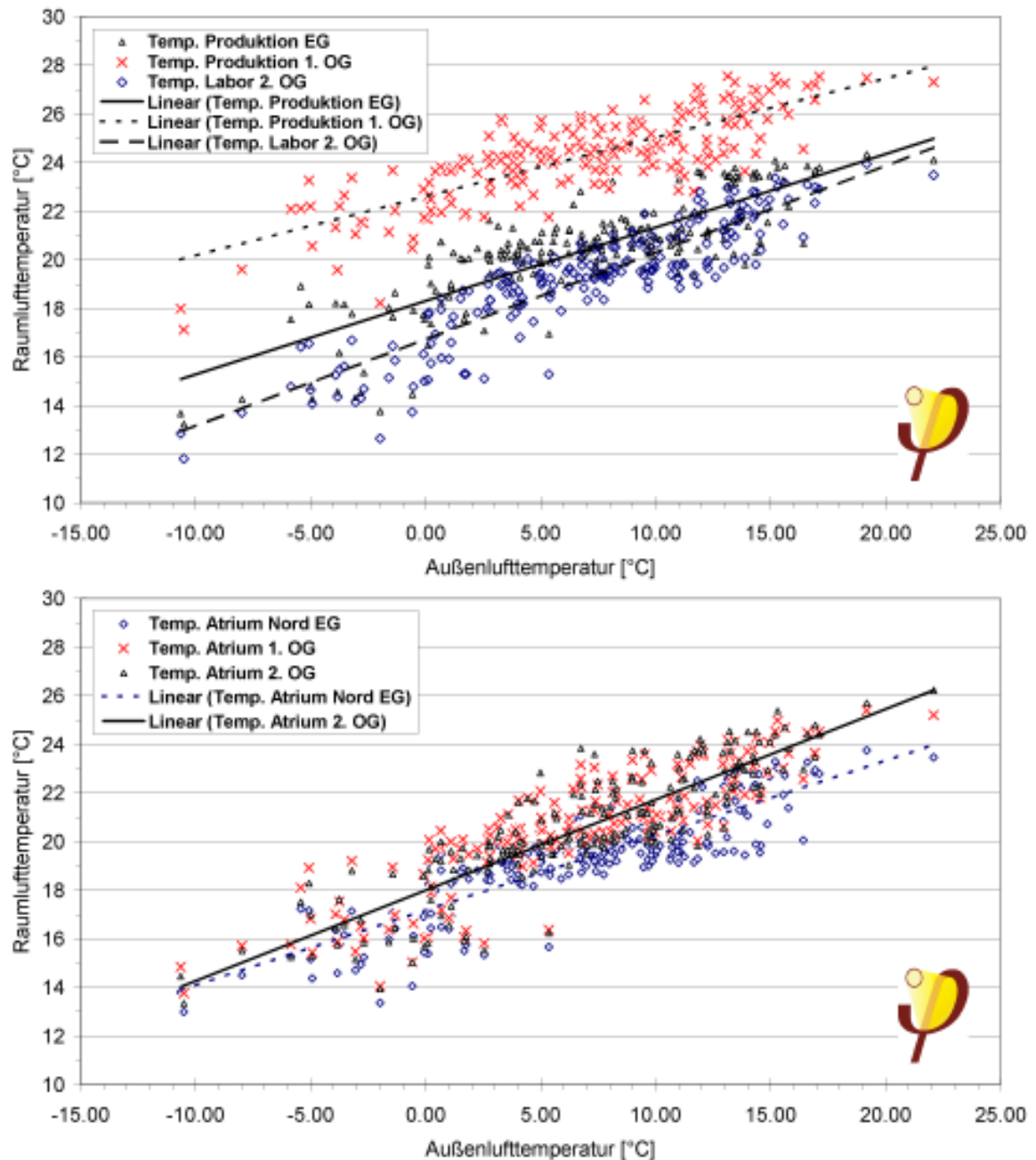


Abb. 65: Korrelation zwischen Außenlufttemperatur und Raumlufttemperatur im Produktions/Labor-Trakt und im Atrium in unterschiedlichen Höhen. Dargestellt sind Tagesmittelwerte in der Winterperiode 1.10.01 bis zum 30.4.2002. Zusätzlich sind Ausgleichsgeraden in den Zonen dargestellt (Ausnahme: Atrium 1. OG, aus Gründen der Lesbarkeit).

Die kleinsten Abhängigkeiten zwischen Außen- und Raumlufttemperaturen sind im Bereich Lager und in den Büros gemessen worden. In Abb. 66 werden die Korrelationen grafisch dargestellt.

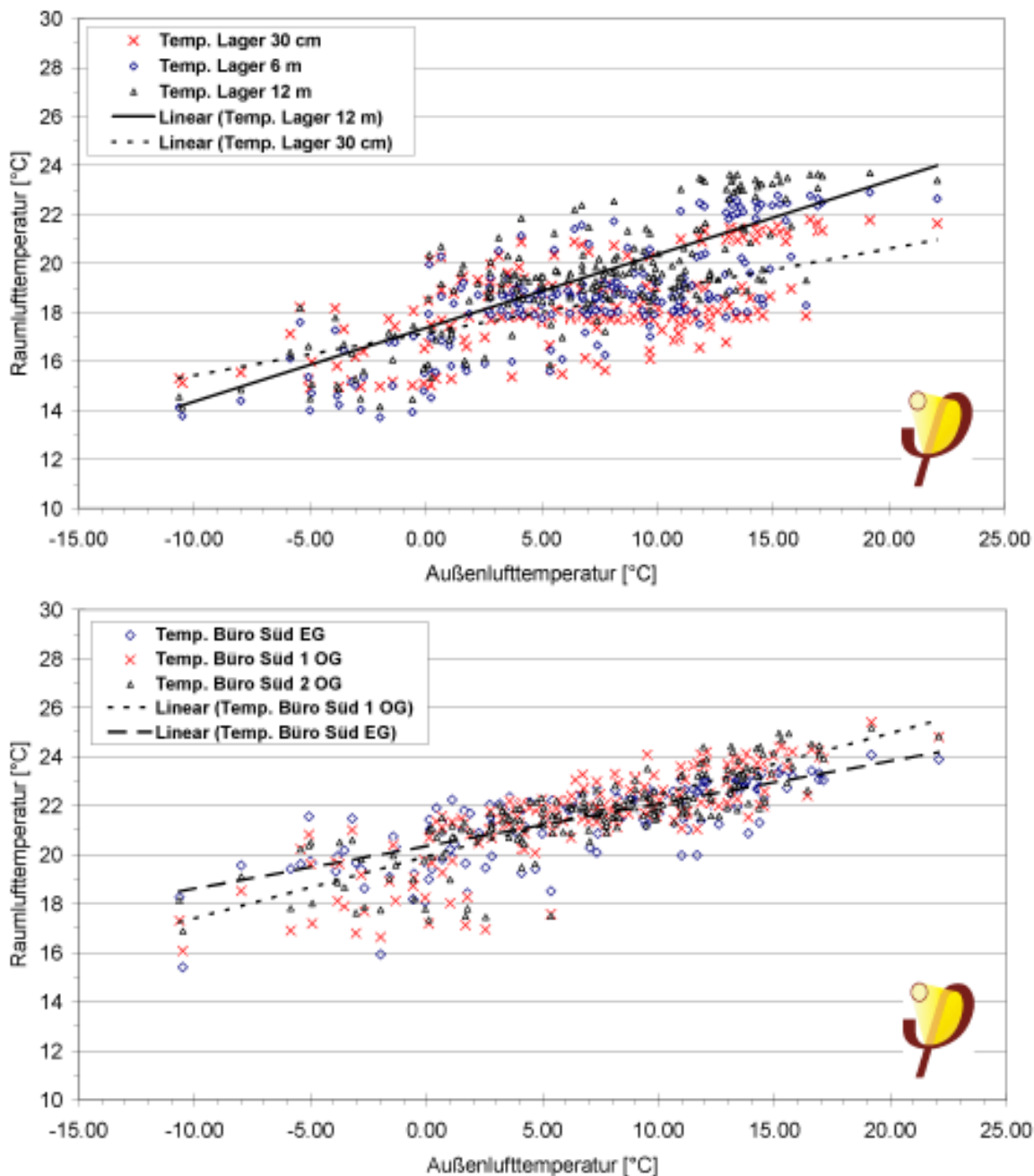


Abb. 66: Korrelation zwischen Außenlufttemperatur und Raumlufttemperatur im südlichen Büro-Trakt und im Lager in unterschiedlichen Höhen. Dargestellt sind Tagesmittelwerte in der Winterperiode 1.10.01 bis zum 30.4.2002. Zusätzlich sind Ausgleichsgeraden in den Zonen dargestellt (Ausnahme: Lager 6 m und Büro Süd 2. OG, aus Gründen der Lesbarkeit).

Die Steigung der Ausgleichsgeraden liegen zwischen 0,17 und 0,30 (siehe Tabelle 10). Die geringsten Korrelationen in diesem Gebäude werden in Bereichen mit geringem Fassadenflächenanteil gemessen.



Bereich	Steigung
Lager 30 cm	0.17
Lager 6 m	0.27
Lager 12 m	0.30
Büro Süd EG	0.17
Büro Süd 1. OG	0.25
Büro Süd 2. OG	0.23

Tabelle 10: Steigung der Ausgleichsgeraden zur Korrelation zwischen Raumlufttemperatur und Außenlufttemperatur im Gebäudetrakt Lager und Büro Süd.

Aus Passivhaus-Wohnbauten sind Steigungen der Korrelationsgeraden von deutlich unter 0,1 bekannt. Bei diesen Häusern spielt die Veränderung der Außenlufttemperatur so gut wie keine Rolle mehr, die Ausgleichsgeraden verlaufen nahezu horizontal [Schnieders 2001a]. Die verfügbaren Heizleistungen reichten in diesen Projekten offenbar immer aus, um die von den Nutzern gewünschte Innentemperaturen im Winter sicherzustellen. Im Projekt SurTec ist eine deutliche Korrelation erkennbar. Dies kann zum einen auf eine zu geringe Heizleistung hindeuten (bzw. eine fehlende Regelungsoptimierung der Nachheizregister oder eine nicht optimale Luftverteilung) als auch auf nicht verschlossene Öffnungen in der Gebäudehülle. Aus Beobachtungen sind hier produktionsbedingt insbesondere im Bereich Wareneingang das LKW-Tor und die Tür zur Laderampe sowie im Bereich Produktion EG das großformatige Nordfenster (2,3 m x 2,3 m) aufgefallen. Aus der Simulation [Schnieders 2001] ist bereits bekannt, dass der Einfluss des geöffneten Fensters im Produktionsbereich erheblich ist. Bei den dort gewählten Randbedingungen erhöht sich der Heizwärmebedarf des gesamten Gebäudes um 12 bis 16 %. Nähere Untersuchungen dazu werden weiter unten dargestellt.

Die wohl entscheidendste Ursache für die hohe Korrelation der Gebäudetemperatur mit der Außenluft und die niedrigen Innentemperaturen im Dezember 2001 und Januar 2002 liegt in den für ein Passivhaus untypisch hohen Luftwechselraten (Zonenweise unterschiedlich) und dem gleichzeitig relativ schlechten Wärmebereitstellungsgrad (zwei Kreuzstrom-Wärmeübertrager in Reihe) der Lüftungsanlage (siehe dazu Abschnitt 7.2.3). Diese technischen Randbedingungen führen zu einem für den Passivhaus-Standard untypisch hohen Einfluss der Außentemperatur. Die Untersuchung der Heizleistung in Abschnitt 7.2.2.2 zeigt außerdem, dass diese in der Winterperiode 2001/2002 nicht ausreichend war. Dies lag an den defekten Wärmeübertragern, da durch den deutlich schlechteren Wärmebereitstellungsgrad höhere Heizleistungen notwendig gewesen wären um diesen Mangel auszugleichen. Im zusätzlich untersuchten Zeitraum Oktober 2002 bis Januar 2003 war der Mangel durch den Austausch der Wärmeübertrager behoben. Die mittlere Raumlufttemperatur der Büros zeigt nun eine deutliche Verbesserung an.



7.1.1 Raumlufthtemperaturen in den Gebäudezonen

Die Temperaturen in den unterschiedlichen Gebäudezonen streuen stark. In den folgenden Abschnitten werden die Temperaturverläufe in den Zonen im einzelnen als arithmetische Tagesmittelwerte dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit sind dabei immer die Temperaturen mit räumlichem Zusammenhang in einer Abbildung zusammengefasst und mit der Außenlufttemperatur verglichen. Die Temperaturen der vier Hauptbereiche des Gebäudes werden in der Reihenfolge Büros, Atrium, Produktion/Labor und Lager wiedergegeben.

Vor der Darstellung der einzelnen Temperaturverläufe wird in Abb. 67 dargestellt, wie weit die gemessenen mittleren Raumtemperaturen des Kernwinters (Oktober 2001 bis März 2002) von den in der Projektierung [Schwertfeger 2000] und der Simulation verwendeten Solltemperaturen abweichen. Dabei wird keine Temperatur für das Atrium dargestellt, da es als nicht beheizte Zone keine eigentliche Sollwertanforderung für diese Zone gibt. Das Atrium wird durch die überströmende Luft aus den Büros indirekt beheizt.

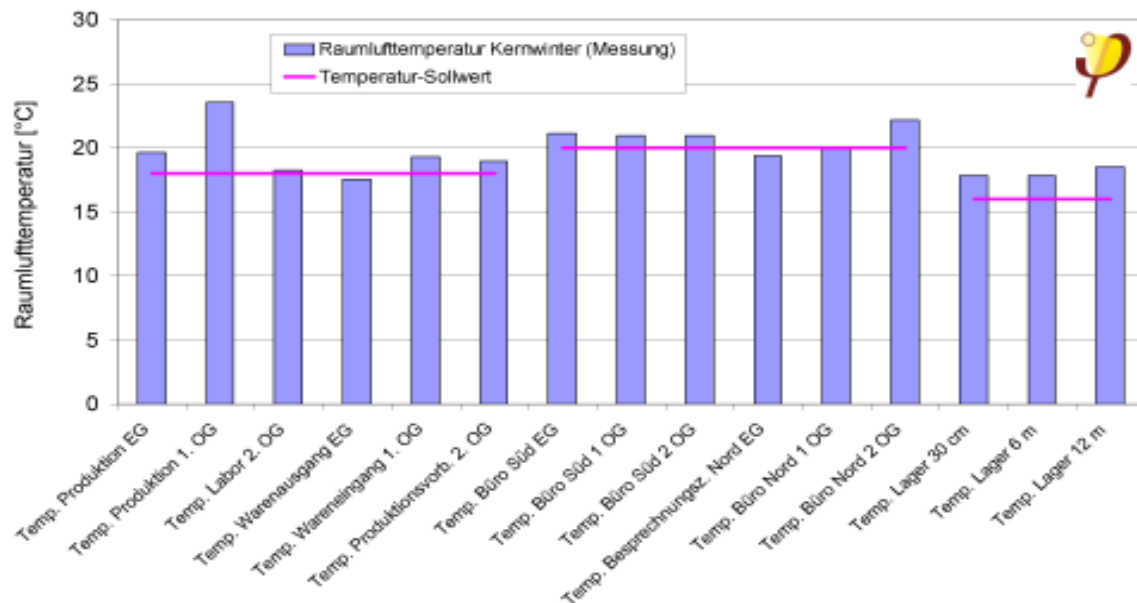


Abb. 67: Vergleich der mittleren gemessenen Raumlufthtemperaturen im Kernwinter (November 2001 bis März 2002) mit den in der Gebäudesimulation verwendeten Solltemperaturen.

Es zeigt sich, dass - bis auf zwei Zonen - alle Temperaturen im Kernwinter höher lagen als die in der Simulation als Sollwert angesetzten Temperaturen. Die größte Differenz besteht in der Produktion, und wird durch die hohen internen Wärmegegewinne des Produktionsbetriebs begründet. Die leichten Unterschreitungen des Sollwertes im Warenausgang sind durch die langen Öffnungszeiten der beiden Anliefer-tore begründet, die im Besprechungszimmer (Nord EG) durch die geringen inneren Wärmequellen, da der Raum nur sequenziell frequentiert wird. Ohne den Produk-

tionsbereich und ohne die Warenanlieferung ergibt sich eine Übertemperatur über dem jeweiligen Sollwert von im Mittel 1,1 K. Dies, obwohl im Dezember 2001 und Januar 2002 zum Teil sehr niedrige Temperaturen gemessen wurden.

7.1.1.1 Bürotrakt

Die Messung der Bürottemperaturen erfolgt in den Bereichen „Nord“ und „Süd“ mit jeweils einem Sensor pro Ebene. Die Temperaturverläufe der beiden Bürobereiche Nord und Süd sind ähnlich. Die Jahrestemperaturmittelwerte der sechs Bereiche liegen zwischen 21,6 und 24,2 °C und damit relativ hoch. Die minimalen, maximalen und mittleren Werte sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

[°C]	Süd			Nord		
	EG	1. OG	2. OG	EG (Besprechungs- zimmer).	1. OG	2. OG
Minimum	15.4	16.1	16.9	15.7	17.0	14.2
Maximum	27.6	28.9	29.4	26.1	29.1	28.4
Mittelwert Jahr	22.7	23.3	23.2	21.6	24.2	22.3
Mittelwert Kernwinter	21,1	21,0	20,9	19,4	19,9	22,2

Tabelle 11: Minimale, maximale und mittlere Raumlufttemperaturen (Jahres- und Kernwintermittel Nov. 01 bis März 02) im Bürotrakt Nord und Süd im Messjahr Mai 2001 bis April 2002.

Auffällig sind hier insbesondere wieder die minimalen Temperaturen. Sie wurden alle in der oben bereits untersuchten Zeit um den 6.1.2002 gemessen. Die 20 °C werden, je nach Zone, etwa vom 14. Dezember 2001 bis zum 9. Januar 2002 unterschritten. Außerhalb der „Nutzungszeiten“ fehlen in den Büros die inneren Wärmelasten durch die Personen, Beleuchtung und Geräte. Im Kernwinter liegen die mittleren Temperaturen der fünf Büros zwischen 19,9 und 22,2 °C (November 2001 bis März 2002). Vereinzelt wurden in der kühlen Zeit auch kleine Heizlüfter eingesetzt, um an den Arbeitsplätzen etwas höhere Temperaturen zu erreichen. In dieser Zone konnte offensichtlich nicht die notwendige Heizleistung eingebracht werden. Die Temperaturmessungen Oktober 2002 bis Januar 2003 zeigen nach dem Austausch der defekten Wärmeübertrager deutlich bessere Verläufe in den Büros an (vgl. Abb. 86).

Im Besprechungszimmer kann bei Bedarf ein größerer Luftwechsel und eine höhere Temperatur angefordert werden. Die Minimaltemperaturen sagen daher nichts über die Behaglichkeit während der Nutzungszeit des Raumes aus.

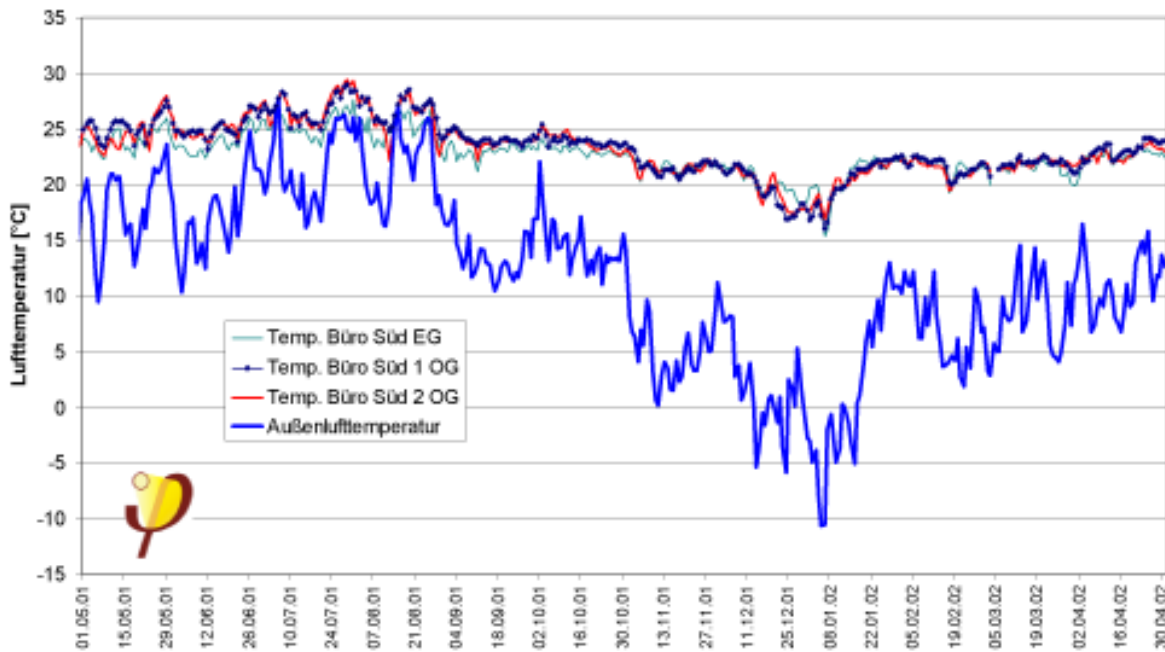


Abb. 68: Tagesmittelwerte der Raumlufttemperaturen im Bürotrakt Süd im Vergleich zu den Außenlufttemperaturen im Jahreszeitraum 1.5.2001 bis zum 30.4.2002.

Die relativ hohen Tagesmitteltemperaturen in den Büros in der warmen Sommerzeit sind eine logische Folge der nicht verschatteten Fensterflächen der Ostfassade. Hier ist eine Verschattung mittels Begrünung mit wildem Wein vorgesehen (Rankhilfen 1,3 m vor der Fassade bis kurz unterhalb der Dachkante), welche allerdings aufgrund der Wachstumsgeschwindigkeit der Pflanzen erst nach einigen Jahre wirksam werden wird.

Auch in der warmen Sommerzeit sind die Südbüros nicht wärmer als die im Nordteil. Alle Lufttemperatur-Sensoren im Bürotrakt befinden sich in Räumen, welche keine Süd- sondern nur Ostfenster aufweisen. Insbesondere im Nordteil zeigt sich wie erwartet deutlich, dass die Temperaturen im 2. OG höher liegen als in den unteren Geschossen. Der Solarenergieeintrag ist in der oberen Etage durch die exponiertere Lage höher (geringere Verschattung durch Bäume und die Bergkante des Odenwaldes). Die Besprechungszimmer (EG Nord) verfügen nur über Oberlichter in der Ostfassade und über keine vertikale Verglasungsflächen (Erdanschüttung). Dadurch ist der Solarenergieeintrag hier besonders gering, was sich in den im Vergleich niedrigeren Temperaturen widerspiegelt.

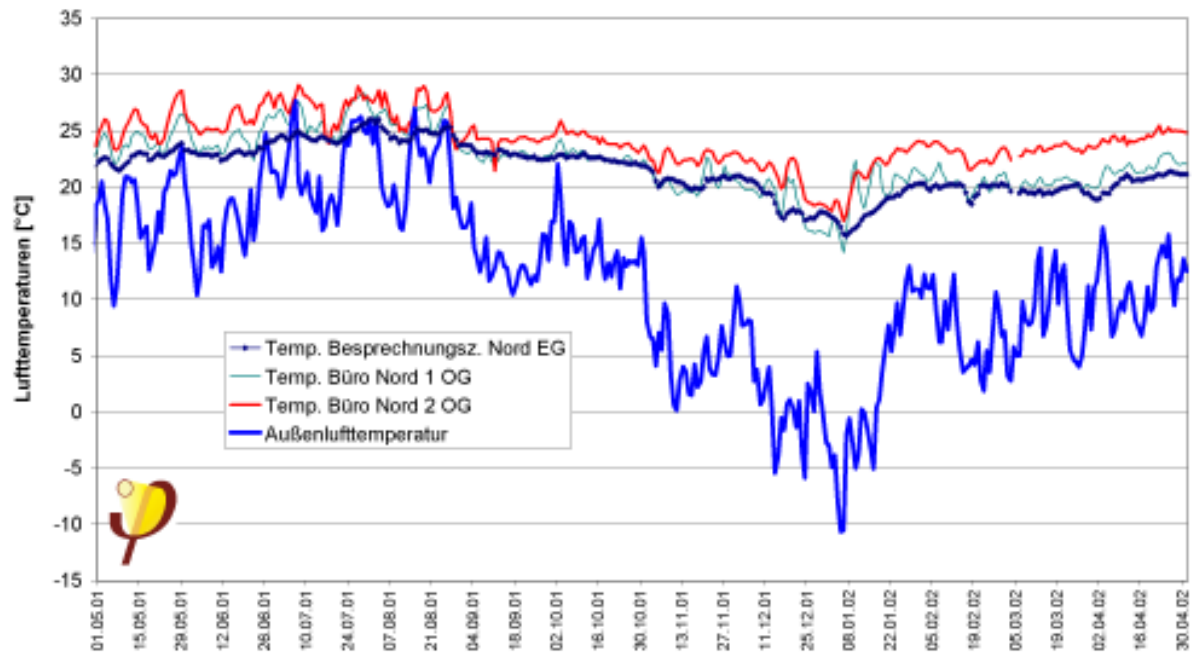


Abb. 69: Tagesmittelwerte der Raumlufthtemperaturen im Bürotrakt Nord im Vergleich zu den Außenlufttemperaturen im Jahreszeitraum 1.5.2001 bis zum 30.4.2002.

7.1.1.2 Atrium

In Abb. 70 zeigen die Lufttemperaturen im Atrium die erwartete Temperaturschichtung. Der Bereich verfügt über große Verglasungsanteile, die Nord- und Südfassade sowie das Dach sind hier vollständig verglast. Der Unterschied zwischen den beiden oberen Messpunkten ist allerdings nicht so prägnant, da der Höhenabstand der Sensoren nur ca. 3 m beträgt, der zwischen dem EG und dem mittleren jedoch mehr als 7 m. Hinzu kommt, dass der Sensor im EG ganz im Norden des Atriums unmittelbar neben einer Außentür (Fluchtweg) in einem unbenutzten stark verschatteten Bereich positioniert wurde.

Die mittleren Temperaturen über das ganze Jahr liegen zwischen 21,3 und 23,0 °C, die im Kernwinter (November 2001 bis März 2002) zwischen 18,5 und 19,7 °C. Für das nur indirekt beheizte Atrium, das nicht als Aufenthaltszone geplant wurde, können diese mittleren Temperaturen als akzeptabel eingestuft werden. Die niedrigste Temperatur betrug 13,0 °C und lag damit noch um 1,2 K niedriger als in der Simulation vorausgerechnet. Die Ursache liegt in den niedrigen Temperaturen der umgebenden Gebäudeteile.

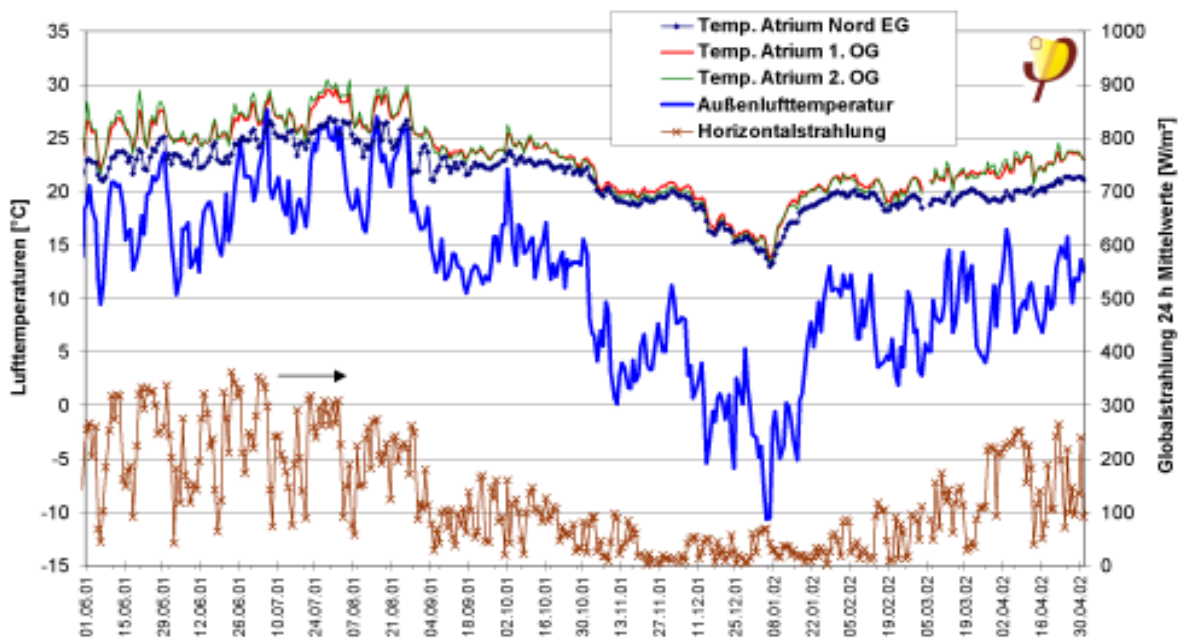


Abb. 70: Tagesmittelwerte der Raumlufttemperaturen im Atrium im Vergleich zu den Außenlufttemperaturen und der solaren Horizontalstrahlung im Jahreszeitraum 1.5.2001 bis zum 30.4.2002.

Die maximalen Tagesmittel liegen zwischen 26,9 und 30,5 °C, für die großen Glasflächen nicht besonders hoch. Durch den geringen Ostfassadenanteil und die Verschattungsvorrichtung der Südfassade und des gesamten Dachbereiches können hier größere Überhitzungen verhindert werden. In der Simulation ergab sich eine maximale Temperatur von 32,2 °C, welche damit im Betrieb noch unterschritten wurde.

Gut wiederzufinden sind in den Sommermonaten die Peaks der Außenlufttemperaturen bei der Lufttemperatur im Atrium. Die Peaks der Außenlufttemperaturen haben Ihre Ursache fast immer im erhöhtem Solarstrahlungsangebot. Trotz der Verschattungseinrichtung schlagen diese Temperaturspitzen abgeschwächt auf das Atrium durch. Angemerkt werden muss allerdings, dass die Verschattungsanlage des Atriums lange Zeit nicht in Betrieb war. Sie wurde erst im Anfang Juli 2001 repariert. Die Temperaturschichtung ist verstärkt bei größerem Solarstrahlungsangebot zu erkennen.

7.1.1.3 Produktion

Im mittleren Gebäudetrakt (Produktion/Labor) zeigt sich der starke Einfluss des Produktionsbetriebs auf die Raumlufttemperatur: Wie bereits erwähnt, liegt die Raumlufttemperatur im 1. OG der Produktion deutlich über den anderen. Die Messstelle im 1. OG befindet sich in einer Art „Meisterbüro“ mit kleinem Labor, welches zu Beginn offen mit dem Produktionsbereich verbunden war und dann durch



eine Glasscheibe getrennt wurde. Die Verbindungstür steht allerdings fast immer offen, sodass die beiden Zonen thermisch gut gekoppelt sind. In dieser Etage befinden sich mit den Mischern und den beiden Wärmeschränken deutlich größere Stromverbraucher als in der Produktionsetage darunter. Die Aufheizung der Mischer, sowie die zeitweise darin ablaufenden exothermen Reaktionen stellen weitere bedeutende interne Wärmequellen in diesem Bereich dar. Diese Tatsachen führen zu dem relativ hohen Temporniveau der Raumluft im 1. OG. Der Einfluss der Solarstrahlung in diesem mittleren „inneren“ Gebäudetrakt fast ohne Außenwände ist für die Lufttemperaturunterschiede in den verschiedenen Gebäudehöhen nicht bedeutend.

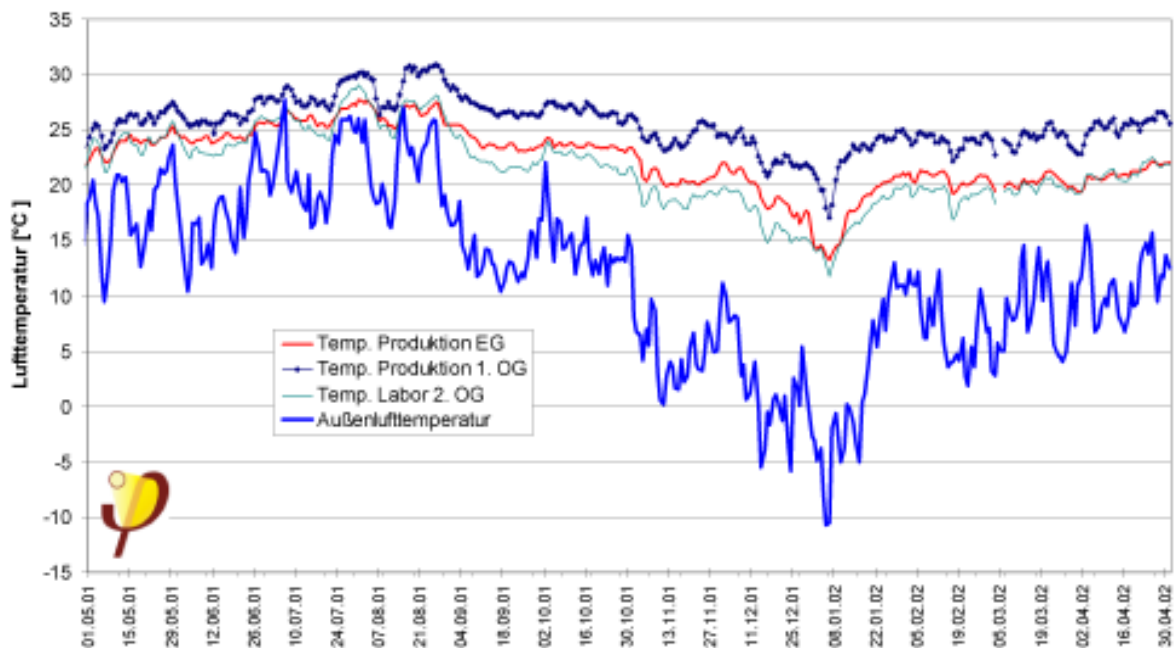


Abb. 71: Tagesmittelwerte der Raumlufttemperaturen im Produktions-/Labor-Trakt im Vergleich zu den Außenlufttemperaturen im Jahreszeitraum 1.5.2001 bis zum 30.4.2002.

Der exponierte Bereich „Labor“ im 2. OG verfügt über großflächige Außenfassaden- und Dachanteile. Wie in Abschnitt 7.1 bereits beschrieben, wurde hier auch die niedrigste Temperatur gemessen. Die Korrelation zwischen Außen- und Innentemperatur ist relativ groß. Im Jahresmittel liegt die Temperatur dort bei 21,5 °C, der Simulations-Sollwert von 18 °C wurde auch im Kernwinter (November bis März) im Mittel mit den gemessenen 18,2 °C nicht unterschritten. Die Minimaltemperatur von 11,8 °C ist allerdings indiskutabel zu niedrig. Hier müssen Nachbesserungen in der Wärmeverteilung, der Regelung oder sogar durch ein zusätzliches Heizregister geschaffen werden. Es ist auch zu erwarten, dass sich durch den Austausch der beiden Wärmeübertrager im Lüftungsgerät eine Verbesserung einstellen wird.



7.1.1.4 Lager Nord (Wareneingang und Warenausgang)

Der westliche Gebäudeteil „Lager“ teilt sich in den größeren Südteil ohne Zwischendecke, der das Hochregallager beinhaltet, und den kleineren nördlichen Teil, der in vier Ebenen unterteilt ist. Hier befinden sich im EG, über dem Chemikalienproben-Keller die Warenanlieferung mit dem LKW-Tor und der großformatigen Tür zur Laderampe. Darüber befindet sich der sog. „Warenausgang“. Ganz oben ist der Vorwärmraum und ein noch wenig benutzter Nordraum auf der sog. „Produktionsvorbereitungs“-Ebene untergebracht. Nur in diesem nördlichen Bereich des Lager-Traktes ist eine Zuluftversorgung realisiert, welche auch die Beheizung ermöglicht. Die Verbindung zum Hochregallager ist größtenteils offen gehalten. Der Bereich des Hochregallagers wird nur von der Zuluft aus dem Nord-Bereich durchströmt.

Die niedrigsten Temperaturen des nördlichen Bereichs wurden im EG gemessen. Der Einfluss der großformatigen Öffnungen wurde bereits diskutiert, die minimale Temperatur von 13,5 °C schon genannt. Die Jahresmittelwerte liegen in den drei Ebenen zwischen 20,3 und 22,4 °C. Maximal wurden tagesmittlere Temperaturen zwischen 26,3 (EG) und 29,18 °C (2. OG) gemessen.

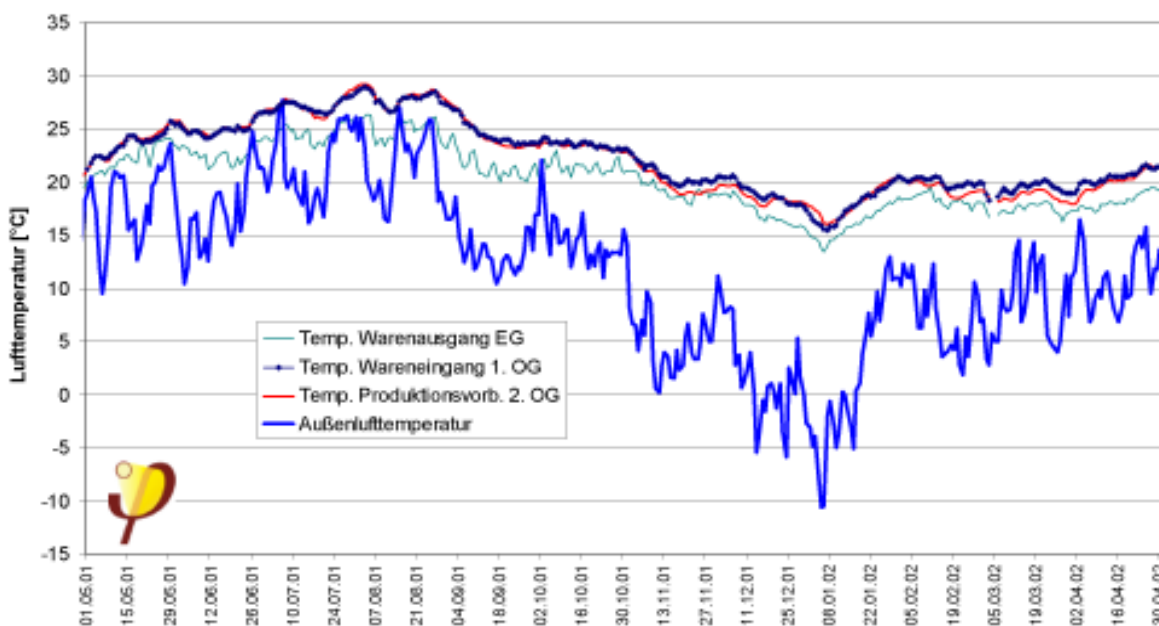


Abb. 72: Tagesmittelwerte der Raumlufttemperaturen im Bereich Lager Nord (Wareneingang und Warenausgang) im Vergleich zu den Außenlufttemperaturen im Jahreszeitraum 1.5.2001 bis zum 30.4.2002.

Auffällig ist, dass die Temperaturverläufe im ersten und zweiten Geschoss lange Zeit nahezu identisch sind. Durch die geringen Fensterflächen und die Nordlage sind hier



keine Besonderheiten erwartet worden. Ein konstanter Wärmeeintrag wird durch den Wärmeverlust des Vorwärtraumes erbracht.

7.1.1.5 Hochregallager

Im nur indirekt beheizten Hochregallager, in dem sich im Normalfall keine Personen aufhalten, ist in den Sommermonaten eine deutliche Temperaturschichtung gemessen worden. Die Messstellen befinden sich in der Lagermitte, an der Ostwand des Lagers, in Höhen von 30 cm, 6 m und knapp 12 m senkrecht übereinander. Der Luftwechsel ist hier minimal projiziert (800 m³/h) und der Bereich verfügt nur an der Südfassade über drei im Verhältnis zum Raumvolumen (ca. 8900 m³) kleine Fenster. Damit sind zum einen die Temperaturschwankungen gering, zum anderen kann sich relativ ungestört die beobachtete Temperaturschichtung einstellen. Bei niedrigen Außenlufttemperaturen verringert sich die Schichtung in der Halle.

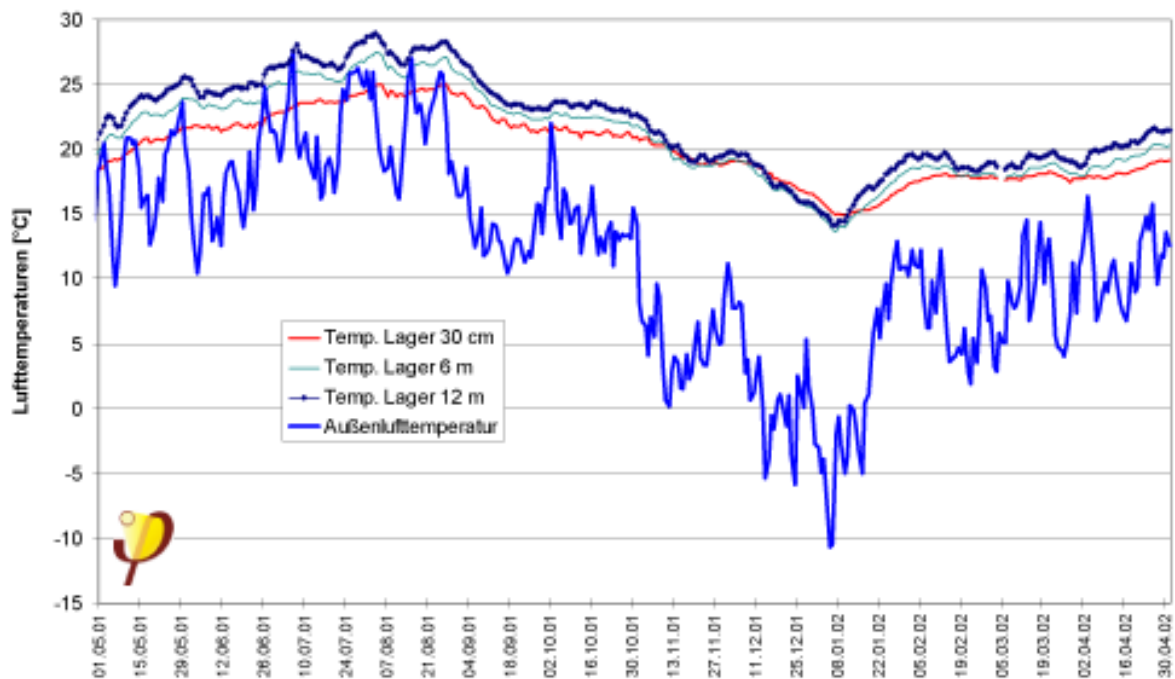


Abb. 73: Tagesmittelwerte der Raumlufttemperaturen im Bereich des Hochregallagers im Vergleich zu den Außenlufttemperaturen im Jahreszeitraum 1.5.2001 bis zum 30.4.2002.

Als extreme und mittlere Werte wurden gemessen:



[°C]	30 cm	6 m	12 m
Minimum	14.9	13.7	14.1
Maximum	25.1	27.5	28.9
Mittelwert Jahr	20.2	21.1	22.0
Mittelwert Kernwinter	17,8	17,8	18,5

Tabelle 12: Minimale, maximale und mittlere Raumlufthtemperaturen (Jahres- und Kernwintermittel Nov. 01 bis März 02) im Bereich des Hochregallagers im Messjahr Mai 2001 bis April 2002.

Im Kernwinter (November bis März) lagen die mittleren Temperaturen im Hochregallager je nach Höhe zwischen 17,8 und 18,5 °C. Die geringsten Außentemperaturkorrelationen des Gebäudes wurden im Bereich Lager (30 cm Sensor) festgestellt (vgl. Abschnitt 7.1). An der Temperaturverlaufskurve ist dies nachzuvollziehen.

7.1.1.6 Klimadatenvergleich

Zur Beurteilung des Klimas während des Messzeitraumes werden in diesem Abschnitt die monatlichen Heizgradtagessummen (GTZ = Gradtagzahlen) ermittelt. Die Simulation des Gebäudes [Schnieders 2001] wurde mit den Referenzdaten durchgeführt. Sie stellen das typische Klima am Standort Frankfurt (Rheinebene) dar. Aus den Außenlufttemperaturen der Referenzdaten und der Messdaten werden nach Vorgaben des SolarBau Projektes die Heizgradtage mit den Grenzen

Heizgrenztemperatur: 12 °C

Innentemperatur: 19 °C

berechnet. Diese Temperaturgrenzen stellen für Passivwohnhäuser keine realistischen Grenzwerte dar. Trotzdem können sie für einen Vergleich zwischen den Mess- und den Referenzdaten verwendet werden. Aus den berechneten Daten werden jeweils Monatssummen gebildet.

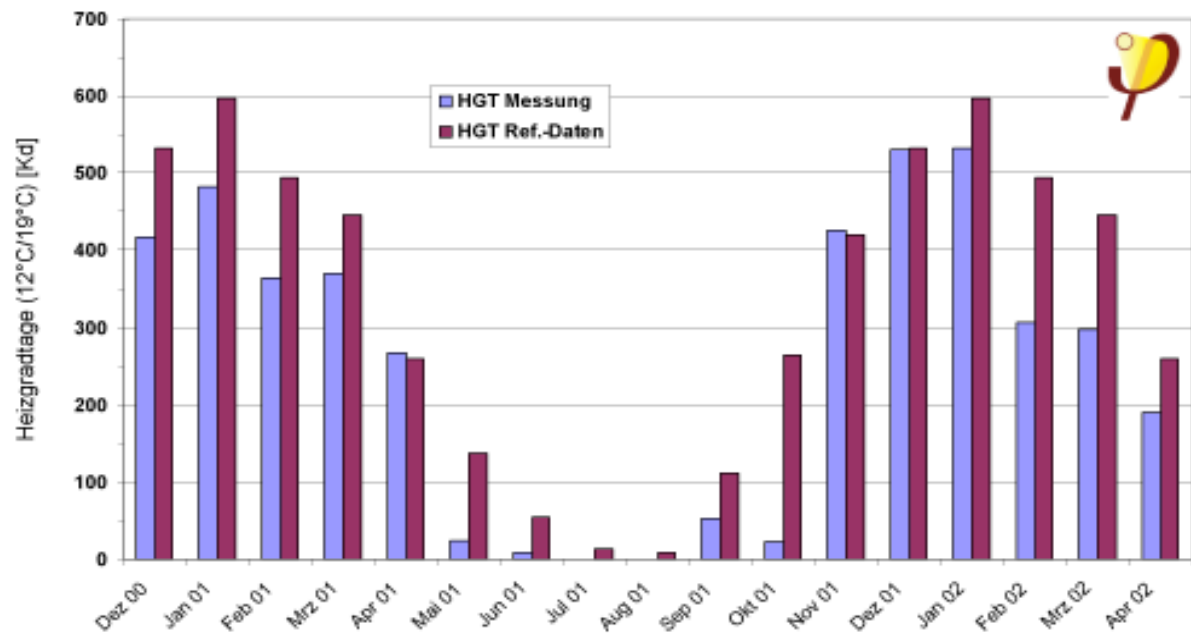


Abb. 74: Klimadatenvergleich an Hand der Monatssummen der Heizgradtage (Berechnet aus den gemessenen Außentemperaturen) im Vergleich zu den Heizgradtagen aus Referenzdaten für den Standort Frankfurt. Die Referenzdaten wurden auch für die Simulation des Gebäudes verwendet [Schnieders 2001]. Die Heizgradtage wurden nach der Temperaturvorgabe von SolarBau bzw. [EnEV] berechnet (Heizgrenztemperatur: 12 °C, Norminnentemperatur 19 °C).

Bis auf zwei Ausnahmen (April und November 2001) liegen die Heizgradtagessummen der Messung immer deutlich niedriger als die der Referenzdaten. Da die Daten aus den Außentemperaturen berechnet werden, zeigt sich, dass es sich um einen im Vergleich milden Messzeitraum gehandelt hat.

Für Abb. 75 sind zusätzlich die Jahressummen aus den GTZ-Daten gebildet worden. Hier werden die Referenzdaten mit der Summe der Messdaten im Zeitraum 2001 und im Jahreszeitraum Mai 2001 bis April 2002 verglichen.

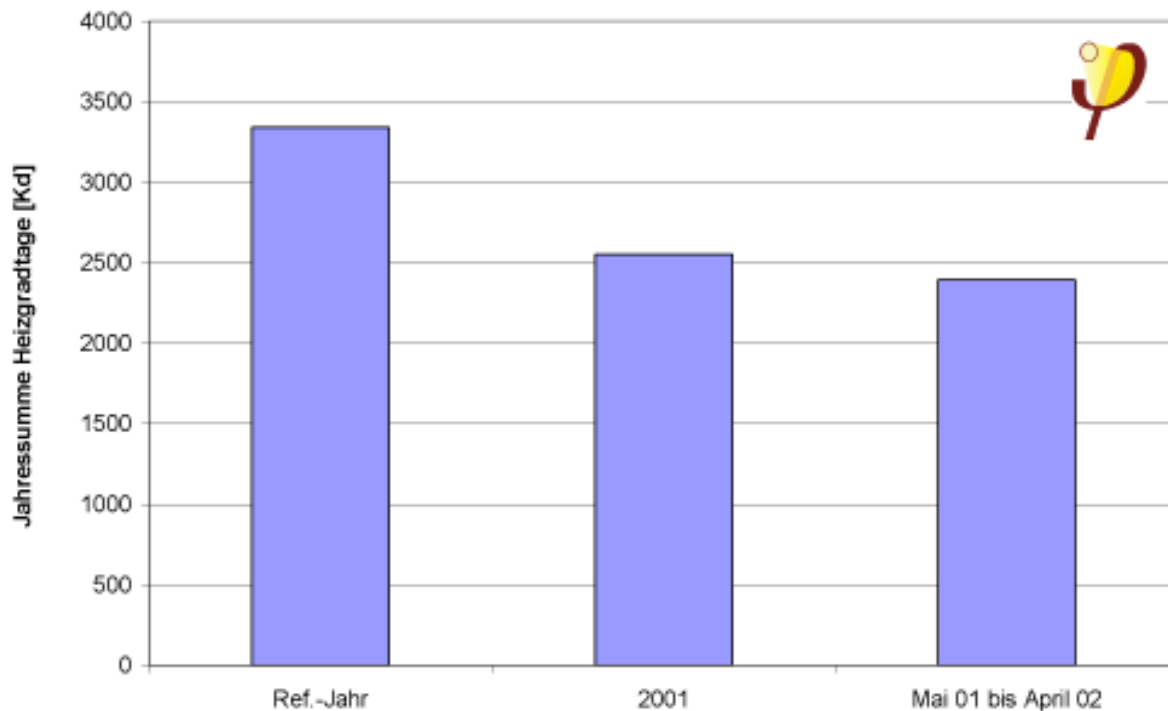


Abb. 75: Vergleich der Jahressummen der gemessenen Heizgradtage (12 °C/19 °C) von 2001 und vom Jahreszeitraum Mai 2001 bis April 2002 mit den Referenzdaten.

7.1.2 Behaglichkeitsuntersuchung

Zu den Behaglichkeitsparametern für Personen in Gebäuden zählen neben der Raumlufttemperatur insbesondere auch die relative Luftfeuchtigkeit und die Strahlungstemperatur. Diese Parameter werden an einem beispielhaften Büroraum untersucht (Büro Süd EG).

7.1.2.1 Luftfeuchtigkeit

Für die relative Feuchte werden hier im Zusammenhang mit der Büroluft- und der Außenlufttemperatur Tagesmittelwerte dargestellt. Insbesondere die kalte Jahreszeit ist dabei von Interesse, da es aufgrund der dauerhaften Frischluftversorgung durch die Lüftungsanlage zu niedrigen relativen Luftfeuchten kommen könnte. Im Winter ist die kühle Außenluft mit nur wenig Feuchtigkeit beladen. Bei der Erwärmung dieser Luft stellen sich dann niedrigere relative Feuchten ein.

Der Büroraum ist während der Nutzungszeit mit nur einer Person belegt und hat an der Südseite eine Glaswand zum Nebenraum, was zur Feuchtepufferung eher ungünstig ist. Im Raum sind keine Zimmerpflanzen als Feuchtequelle vorhanden. Mit diesen Bedingungen verfügt der Raum eher über problematische Bedingungen bzgl. der Luftfeuchten.

Im Jahresmittel ergibt sich ein Mittelwert von 47,3 % rel. Feuchte. Im Kernwinter (hier November 2001 bis Februar 2002) liegt die relative Feuchte im Mittel bei 41,7 %. Es werden keine Werte unter 34 % rel. Feuchte gemessen. Für einen Büroraum im zweiten Jahr nach Bezug bewegen sich die Werte in einer sehr guten und hygienisch und physiologisch unbedenklichen Bandbreite. Selbst zeitweise Unterschreitungen der 30 % wären noch akzeptabel. Die Spitzenwerte von 64,3 % sind ebenfalls als völlig unbedenklich einzustufen. Bezüglich der Luftfeuchte werden damit sehr gute Bedingungen trotz hoher projektierter Luftwechselraten und ohne Luftbefeuchtung angetroffen.

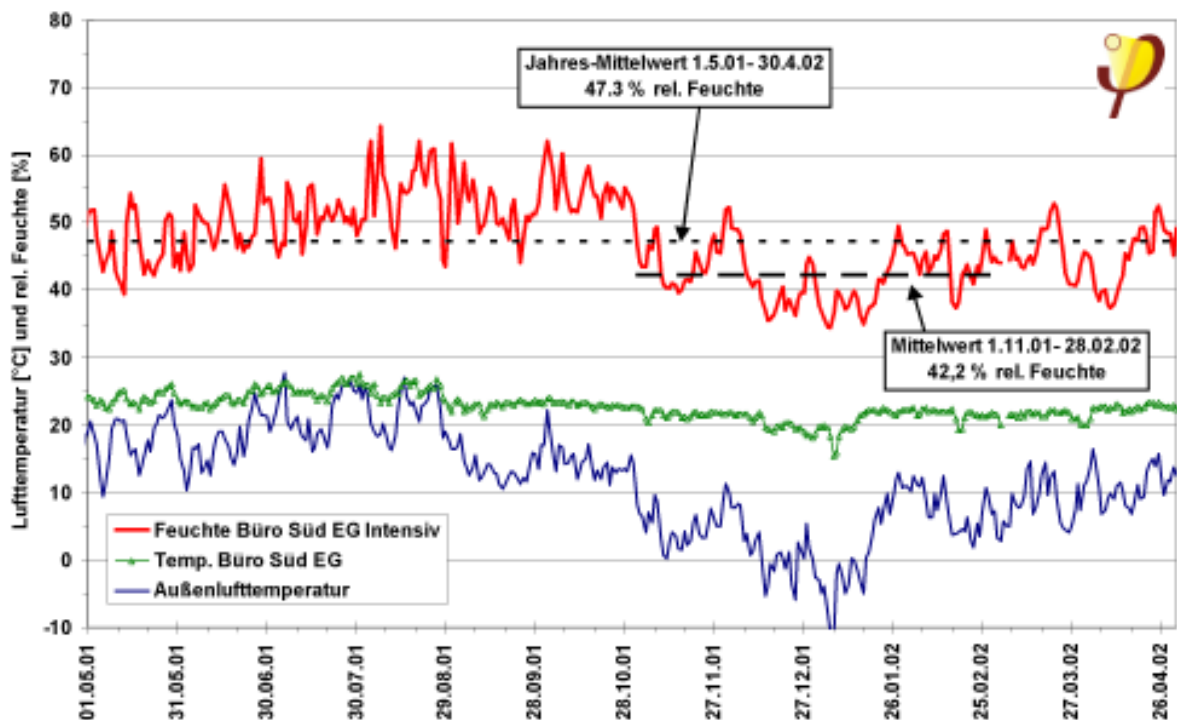


Abb. 76: Relative Raumluftheuchte im Büro Süd EG während eines Jahres im Vergleich zur Raumlufte und zur Außenlufttemperatur. Zusätzlich ist der Jahresmittelwert und der Mittelwert für den Kernwinter dargestellt.

7.1.2.2 Behaglichkeitsdiagramm

Für die Behaglichkeitsuntersuchung wird die in dem Büroraum gemessene operative Temperatur verwendet. Diese ist die für das Temperaturempfinden des Menschen entscheidende Größe. Diese Temperatur- und Feuchtemesswerte werden im Behaglichkeitsdiagramm eingetragen [RWE 1998].

Zur Bewertung sind die Sommer- und die Wintermesswerte im Diagramm unterschiedlich dargestellt.

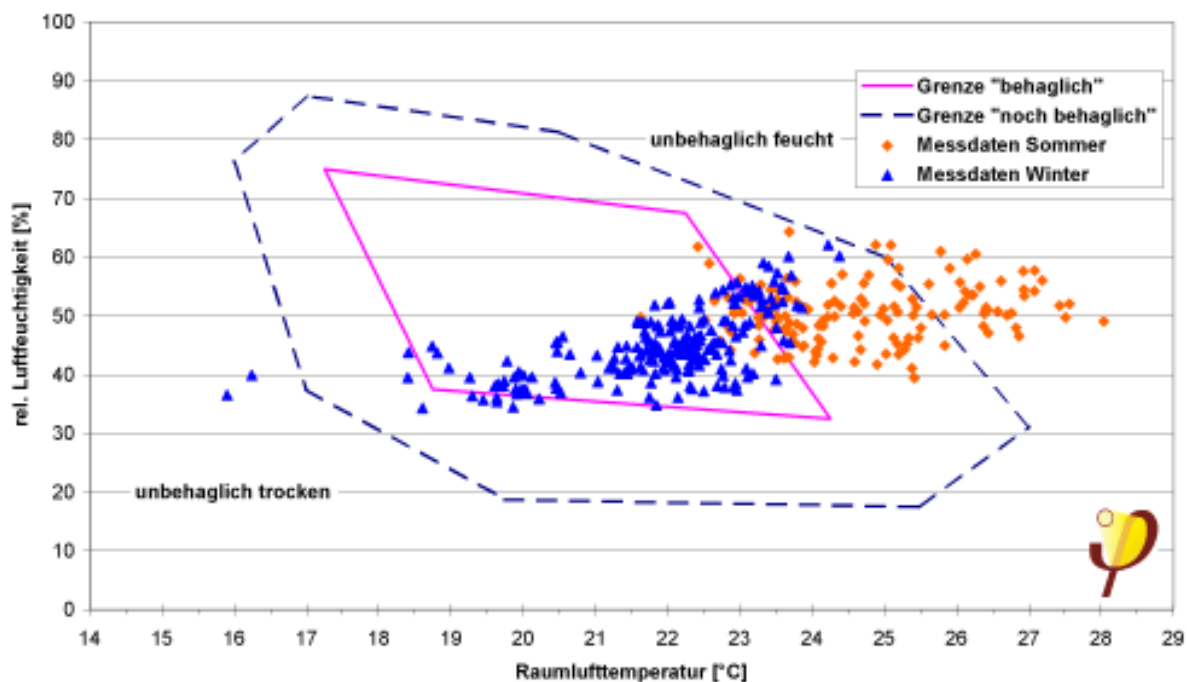


Abb. 77: Behaglichkeitsbereich des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte. In das Behaglichkeitsdiagramm sind die Messdaten (Tagesmittelwerte) vom 1.5.01 bis zum 30.4.2002 aus dem Büro Süd EG eingetragen. Unterschieden wird dabei der Sommer- (1.5. bis 30.9.01) und der Winterzeitraum (1.10.01 bis 30.4.02).

Im Winter (Oktober bis April) liegen fast alle tagesmittleren Messdaten innerhalb des Behaglichkeitsfeldes bzw. wenige im Bereich „noch behaglich“. Nur zwei der Tageswerte fallen mit den niedrigen Temperaturen aus dem „Rahmen“. Dabei handelt es sich wieder um die bereits diskutierten Tage 6. und 7. Januar 2002. Dabei wurde zumindest am Sonntag dem 6.1.02 in dem Büro vermutlich nicht gearbeitet. Die Sommer-Messpunkte liegen zum größten Teil im Bereich „noch behaglich“, eine ganze Reihe von Tagen liegt allerdings aufgrund von zu hohen Temperaturen außerhalb dieser Grenze. Durch eine temporäre Verschattung der Verglasungsflächen an der Ostfassade ließe sich die sommerliche Situation deutlich verbessern. In der gegebenen Situation müssen die Nutzer auf die noch wachsende Bepflanzung warten.

Im folgenden werden die Stundendaten in der sog. „Betriebszeit“ an Werktagen von 8:00 bis 17:00 Uhr ausgewertet. Es zeigt sich in Abb. 78 ein ähnliches Bild wie zuvor bei der Darstellung der Tagesmittelwerte. Nur 10 Stundenwerte im Winterzeitraum sind aufgrund von zu niedrigen Temperaturen außerhalb der Grenze „noch behaglich“. Einige wenige liegen auch im Winter bei zu hohen Temperaturen. Der Großteil ist aber innerhalb der Grenze oder im Kernbereich „beaglich“.

Für den Sommer ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Tageswerten: Eine große Anzahl der Messpunkte liegt durch die fehlende Verschattung im zu warmen Bereich. Was die Feuchtigkeiten betrifft, zeigt sich auch hier das sehr gute Ergebnis.

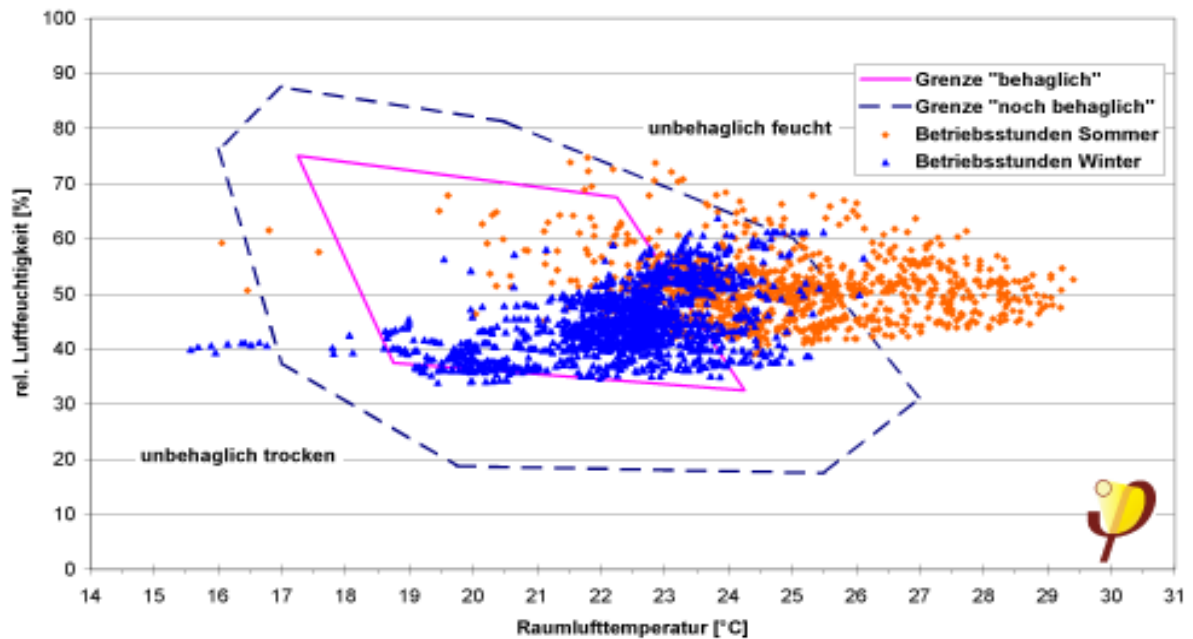


Abb. 78: Behaglichkeitsbereich des Menschen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte. In das Behaglichkeitsdiagramm sind die Messdaten der Betriebszeit von Wochentags 8:00 bis 17:00 Uhr (Stundendaten) vom 1.5.01 bis zum 30.4.2002 aus dem Büro Süd EG eingetragen. Unterschieden wird dabei der Sommer- (1.5. bis 30.9.01) und der Winterzeitraum (1.10.01 bis 30.4.02).

Auffällig ist, dass im Sommer auch drei sehr niedrige Temperaturstundendaten vorkommen ($< 17\text{ °C}$). Der Ursache wird in Abb. 79 nachgegangen: Im Büro wurde häufiger in den Morgenstunden über das Fenster gelüftet. Besonders deutlich ist dies am 25. Juni zu beobachten. Es wird eine Tiefsttemperatur von $16,0\text{ °C}$ gemessen. Durch den Lüftungsvorgang wurde erreicht, dass die Raumlufttemperatur auf die Außentemperatur abkühlte. Durch solche Lüftungsvorgänge sind auch die wenigen tiefen Sommertemperaturen in der Betriebszeit entstanden, sie sind somit nutzungsbedingt.

Besonders ab dem 23. Juni kann eine morgendliche Erwärmung durch die Solarstrahlung beobachtet werden. Etwa gegen 10:00 bis 11:00 Uhr werden die maximalen Temperaturen erreicht. Ab dieser Zeit trifft die Sonne die Ostverglasung in einem steilen Winkel und führt nicht mehr zu relevanten Wärmeeinträgen. Der Temperaturgang unterstreicht deutlich die Sinnhaftigkeit einer Verschattungsvorrichtung.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Bürotrakt komfortable sommerliche Temperaturen erreicht würden, wenn den Empfehlungen entsprechend eine Verschattung der Ostverglasung vorgenommen würde.

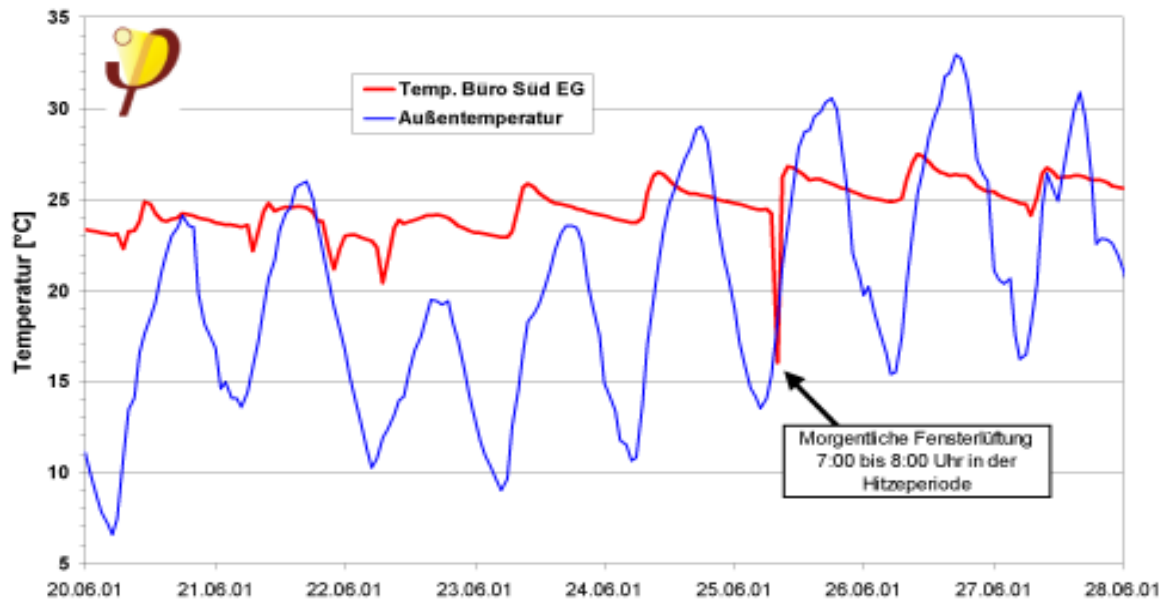


Abb. 79: Stundenmittelwerte der Raumlufthtemperaturen im Büro EG Süd im Vergleich zur Außenlufttemperatur in der Zeit vom 20. Juni bis 28. Juni 2001.

7.2 Energieverbräuche

Der Endenergieverbrauch beim Projekt SurTec setzt sich aus einem Gas- und einem Stromverbrauch zusammen. Es muss bei einem Industriegebäude zwischen Energieströmen für die Beheizung und solchen für Produktionsprozesse differenziert werden.

7.2.1 Endenergie Gas

Das bezogene Gas wird im Brennwertkessel in Wärme umgewandelt, welche für die direkte Beheizung des Gebäudes, die Warmwasserbereitung sowie für die Produktionsprozesse (Aufheizen der Mischbehälter, Warmwassererzeugung für den Produktionsbedarf, Beheizung des Vorwärtraumes) benötigt wird.

Der zentrale Gaszähler misst Volumenströme des unmittelbar aus der erdverlegten Gasleitung entnommenen Erdgases. Für Erdgas mit annähernd der Erdoberflächentemperatur wurde ein Heizwert von 10,11 kWh/m³ angesetzt. Die monatlichen Gasmengen stellen die bezogene Endenergie bereit und werden pro Quadratmeter auf die Energiebezugsfläche (4112,5 m²) umgerechnet.

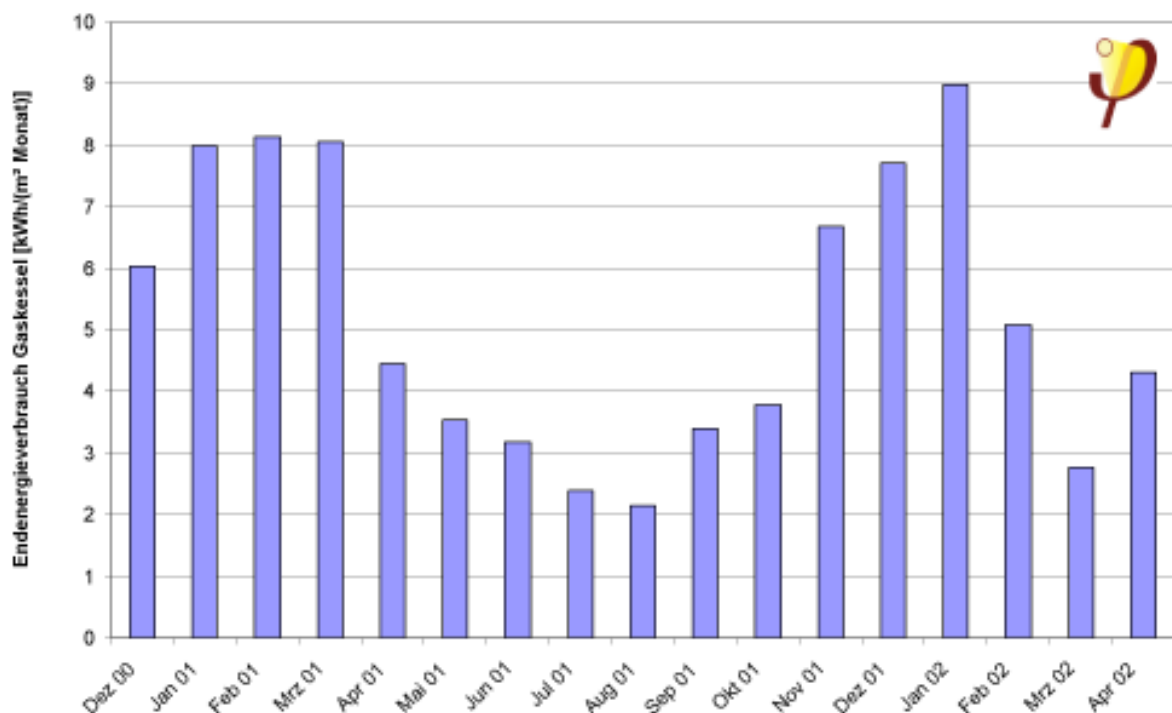


Abb. 80: Monatliche Endenergieverbrauchswerte nach gemessenem Gasverbrauch am Hauptgaszähler (mit Temperaturkorrektur) für die Wärmeerzeugung des Brennwertkessels (Raum-, Warmwasser- und Produktionswärme). Dargestellt ist der gesamte Zeitraum der Datenerhebung Dezember 2000 bis April 2002.



Bei den aus dem Gasverbrauch berechneten Endenergieverbräuchen sind sowohl die jahreszeitlichen Schwankungen für die Heizenergie, als auch die Schwankungen für die Produktionsenergieaufwendungen erkennbar. Für die Produktions-, Warmwasser- und Heizwärme zusammen wurden im Jahr 2001 **61,5 kWh/m²** verbraucht. Im Jahreszeitraum 1.5.01 bis zum 30.4.02 waren es mit **54,0 kWh/m²** etwas weniger. Zur genauen Bestimmung der reinen Heizenergieverbräuche wird weiter unten der Wärmemengenzähler der Heizregister ausgewertet.

7.2.1.1 Endenergieaufwandszahl Brennwertkessel

Die Summe der drei Wärmemengen der WMZ 1, 3 und 9 ergibt die vom Kessel bereitgestellte Wärmemenge. Der Bezug zur eingesetzten Energie (Gas) ergibt den Nutzungsgrad, der Kehrwert die Aufwandszahl. Diese Kenngrößen geben Auskunft über die Effizienz der Energieumwandlung. Im Auswertungszeitraum ergibt sich eine Jahresaufwandszahl von 1,10. Der Wert ist als sehr gut anzusehen, insbesondere da die Wärmeverluste der hydraulischen Leitungen vom Kessel bis zu den drei WMZ nicht getrennt bilanziert werden konnten. Durch die für die Produktionsprozesse benötigten hohen Vorlauftemperaturen von 90 °C und die geringe Spreizung liegen die Rücklauftemperaturen zeitweise entsprechend hoch. Der Kessel kann durch diese hohen Rücklauftemperaturen - wie erwartet - nicht oder nur selten im Brennwertbereich arbeiten. Bei reinem Brennwertbetrieb wären Aufwandszahlen um und unter 1 möglich.

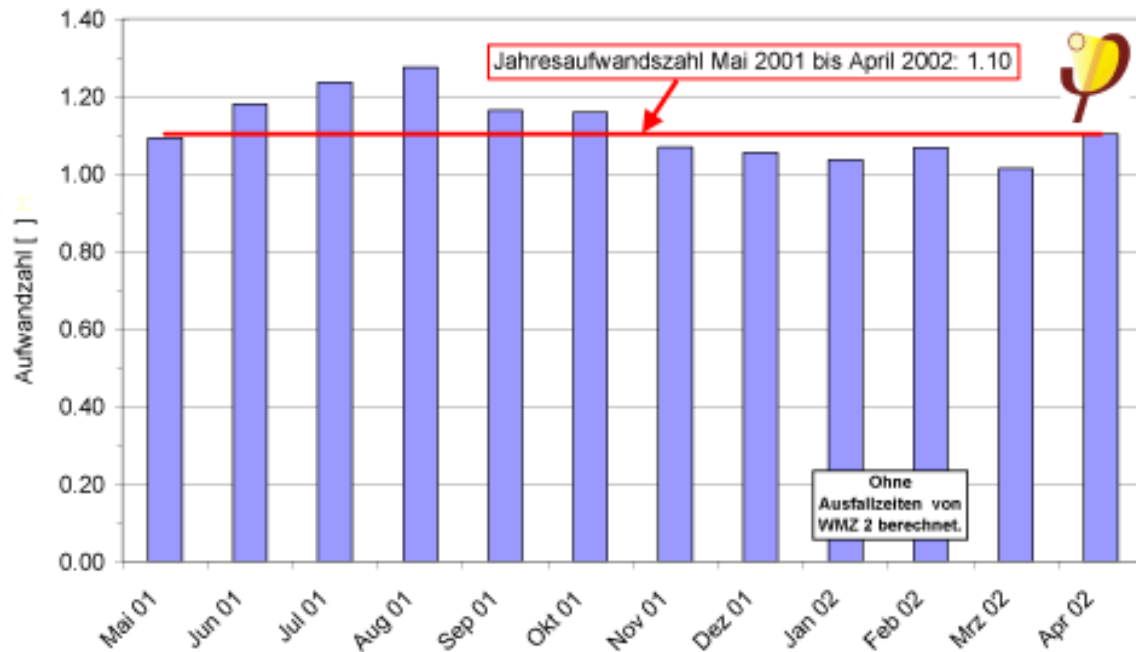


Abb. 81: Monatliche Endenergieaufwandzahl (Erdgas) des Brennwertkessels¹ im Jahreszeitraum Mai 2001 bis April 2002.

Die Aufwandzahl sinkt in Monaten mit höherem Gasverbrauch, da sich die Auskühlungsverluste des Kessels mit den geringeren Stillstandszeiten verkleinern und weniger „ungünstige“ Anfahrvorgänge (Taktbetrieb) notwendig sind. Daher liegt in der Zeit, in der zur angeforderten Produktionswärme auch noch Heizwärme produziert wird, die Aufwandzahl noch niedriger. In der Zeit von Oktober 2001 bis April 2002 beträgt sie 1,07.

7.2.2 Nutzwärme

Die vom Brennwertkessel im 2. OG erzeugte Wärme wird über das hydraulische Leitungssystem zu den unterschiedlichen Abnehmern transportiert. Die Energiemengen der Bereiche werden einzeln mit den verschiedenen WMZ gemessen (siehe dazu Abschnitt 6.2.4). Diese Messwerte enthalten u. a. auch nutzbare und nicht nutzbare Leitungsverluste, Regelungsverluste und Verluste der Wärmeübergabe - neben der eigentlich geforderten Nutzwärme. In Ermangelung eines anderen Begriffs werden die gemessenen Wärmezählerverbräuche im folgenden dennoch verkürzt als „Nutzwärme“ bezeichnet. Die gemessenen monatlichen Nutzwärmemengen für den Raumwärme- und für den Produktionsbereich gibt dann Abb. 82 wieder.

¹ Am 14.01.2002 ist durch den Produktionsbetrieb der WMZ 2 beschädigt worden (Temperatursensor abgebrochen). Dieser wurde am 22.02.2002 mit einem neuen Temperatursensor ausgestattet und wieder in Betrieb genommen. Die Energiemengen im Januar und Februar 2002 konnten daher nur in der ungestörten Betriebszeit bilanziert werden.

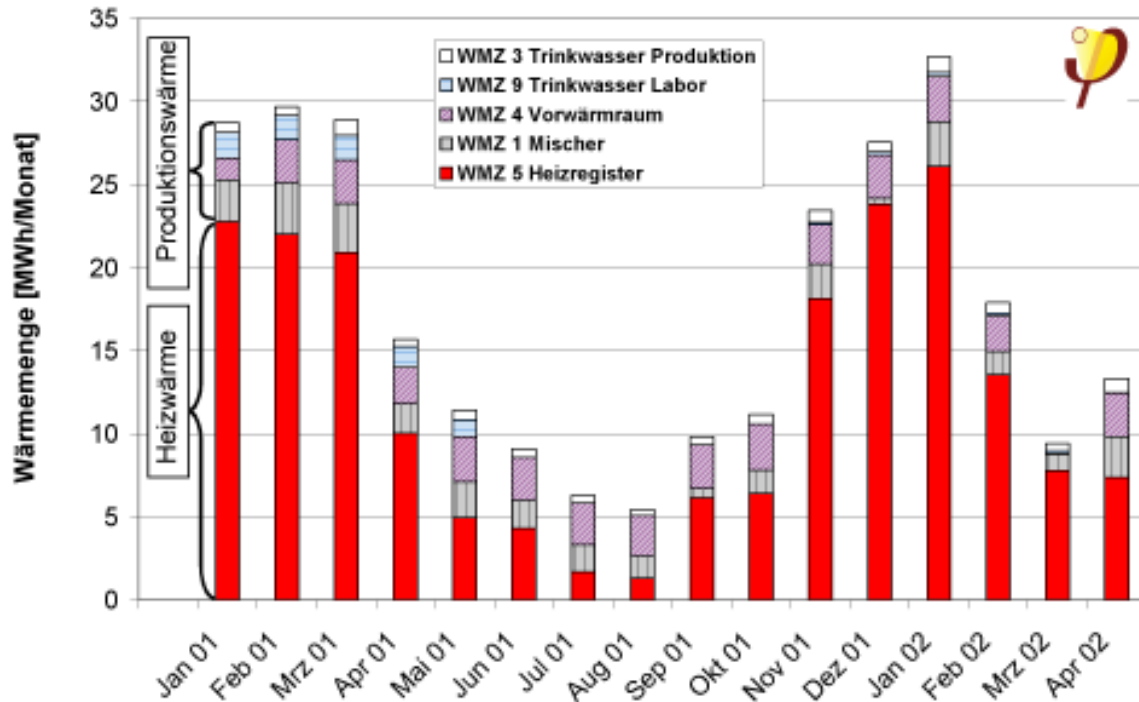


Abb. 82: Gemessene monatliche Wärmemengen für Produktions- und Heizwärme beim Projekt SurTec in der Zeit vom Januar 2001 bis zum April 2002.

Die Wärmemengenzähler gingen erst am 5. bzw. 6.12.2000 in Betrieb. Daher werden die monatlichen Daten erst ab Januar 2001 dargestellt.

Die jahreszeitliche Schwankung des Heizwärmebedarfs bestimmt das wärmeseitige Verbrauchsprofil des Gebäudes. Der Nutzwärmeverbrauch für die Produktion dagegen ist relativ konstant. Im Jahresmittel ist der Verbrauch an Raumwärme in diesem Objekt um den Faktor 2,2 höher als der Bezug an Produktionswärme (Mai 2001 bis April 2002). Im Winter liegt die Raumwärme um den Faktor 3,2 höher. Im Sommer (Mai bis September 2001) kehrt sich das Verhältnis um: Die Produktion verbraucht im Mittel um den Faktor 1,3 mehr als für die Raumwärme benötigt wird. Die Jahressummen (Mai 2001 bis April 2002) betragen:

Produktion: 56,05 MWh

Heizwärme: 121,56 MWh

7.2.2.1 Produktion

Der Nutzwärmeverbrauch im Bereich Produktion setzt sich aus den Messungen der Verbräuche des WMZ für die Erwärmung der Substanzen in den Mischern/Rührbehältern, für die Warmwasserbereitung des Produktionswassers und des Wassers „Labor“ (Warmwasserspeicher im sog. „Technikum“) sowie für den Vorwärmaum zusammen.

Die Nutzwärme für den Vorwärmraum kommt zwar letztendlich zum größten Teil der Raumwärme zugute, ist aber nur für den Produktionsprozess erforderlich. Daher muss sie diesem auch zugerechnet werden.

Der WMZ 9 „Trinkwasser Labor“ misst den Verbrauch an Warmwasser nicht nur für Anwendungen im Labor und das sog. „Technikum“ sondern auch alle anderen Warmwasserverbräuche wie z.B. für die Duschen der MitarbeiterInnen und für die Waschbecken. Diese Bereiche wurden nicht getrennt gemessen. Die Duschen werden nur von sehr wenigen MitarbeiterInnen genutzt. Aus diesem Grund wird der WMZ 9 vollständig dem Bereich Produktion zugerechnet.

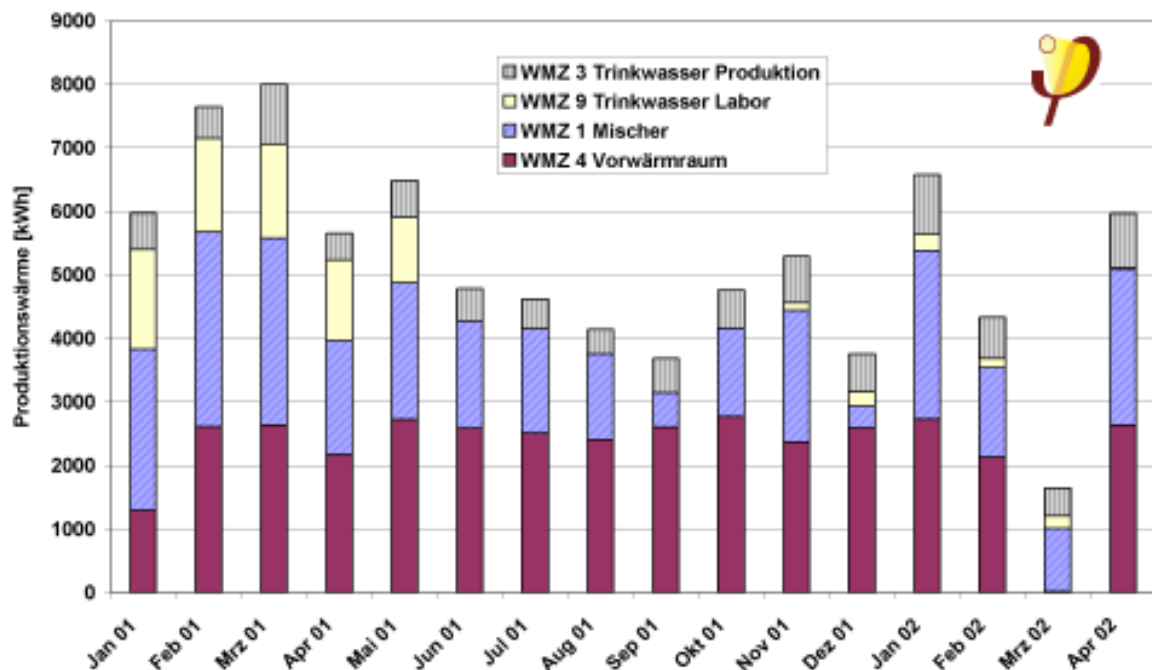


Abb. 83: Monatliche gemessene Wärmeverbräuche für den Produktionsbetrieb (Jan 2001 bis April 2002).

Die monatliche Nutzwärme für die Produktion liegt in der dargestellten Zeit zwischen 1646 und knapp 8000 kWh/Monat, im Mittel bei 5207 kWh/Monat. Bis auf die Ausnahme im März 2002 stellt der Wärmeverbrauch des Vorwärmraumes den größten Teilverbraucher dar. Im März wurde so gut wie keine Wärme für den Vorwärmraum benötigt (12 kWh). Im gesamten Zeitraum liegt der Anteil der Wärme für den Vorwärmraum an der gesamten Produktionswärme bei 44 %. Es folgt der Bereich für die Erwärmung der Mischer/Rührbehälter mit 35 %. Den restlichen Verbrauch teilen sich die Bereiche der Warmwassererzeugung (WW Produktion 12 %, WW Labor 9 %).

7.2.2.2 Heizung

Die Beheizung des Gebäudes mit den Nachheizregistern wird mit WMZ 5 gemessen. Zusätzlich gibt es noch das Nachheizregister, welches die Wärme aus der Abwasser-



verdampfung dem Zuluftrohr für den Lagerbereich zuführt. Wie bereits im Abschnitt 6.2.4 beschrieben und begründet, erfolgt die Bilanzierung der geringen Heizenergiemenge ($0,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) im Bereich Stromverbräuche. Dort wird nicht die Heizwärme separat erfasst, sondern der gesamte Stromverbrauch der Anlage ist in dem Stromverbrauch Produktion enthalten und wird im Energiefluss vollständig den inneren Wärmequellen zugerechnet.

Heizleistung

Das Gebäude der Firma SurTec ist ohne statische Heizflächen realisiert worden. Die aktive Beheizung erfolgt ausschließlich über die Nacherhitzung der Zuluft. Die einzige Ausnahme macht hier der Vorwärmraum im Lagerbereich Nord 1. OG, dort sind in einem ca. 28 m^2 großen Raum Heizkörper montiert, um die geforderten Raumlufttemperaturen von 35 °C sicherzustellen.

Die Grenze der Zuluftnacherhitzung liegt bei den hygienisch notwendigen Luftwechselraten etwa bei einer Leistung von $10 \text{ W}/\text{m}^2$, da bei höheren Leistungen die Luft auf über 55 °C erwärmt werden müsste und dann im Heizregister der Staub in der Luft verschwelen kann (Geruchsbelästigung).

Bei SurTec war in den Büros aufgrund der hohen möglichen Belegungsdichte und der speziellen Nutzung ein größerer Luftwechsel notwendig, wodurch dort rechnerisch auch höhere Heizleistungen projiziert sind. Im Lagerbereich dagegen wurde ein extrem niedriger Luftwechsel vorgesehen. Die Simulation [Schnieders 2001] hat für das Gesamtgebäude mit der dort berücksichtigten Produktionsabwärme eine maximale tagesmittlere Heizlast von rund $12 \text{ W}/\text{m}^2$ ergeben. In den einzelnen Zonen schwanken die Simulationswerte zwischen $7,2$ bis $28,4 \text{ W}/\text{m}^2$.

Die Auswertung der gemessenen tagesmittleren Heizleistung der Nachheizregister ergibt in der Heizperiode 2001/2002 einen Spitzenwert von **$10,3 \text{ W}/\text{m}^2$** . Dieser wurde am 07. Januar 2002 gemessen, an den zwei Tagen zuvor lagen mit $-10,6$ und $-10,5 \text{ °C}$ die niedrigsten tagesmittleren Außenlufttemperaturen vor. Damit sind keine nennenswert höheren tagesmittleren Heizleistungen aufgetreten als nach dem Passivhauskriterium zulässig.

Der gesamte Mittelwert der Heizleistung liegt im Zeitraum Oktober 2001 bis April 2002 bei $4,9 \text{ W}/\text{m}^2$. In der eigentlichen Kernheizzeit (November bis März) der Heizperiode 2001/2002 beträgt der Durchschnittswert $6,0 \text{ W}/\text{m}^2$.

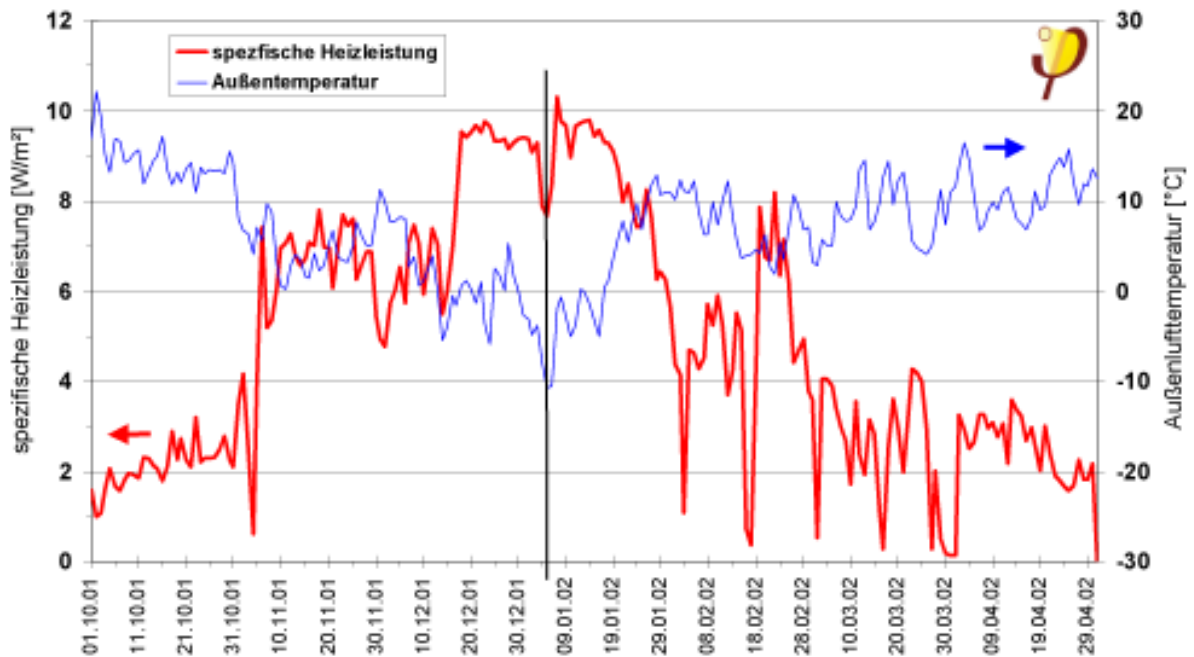


Abb. 84: Spezifische tagesmittlere Heizleistungen des Gesamtgebäudes SurTec nach den Messdaten des Wärmemengenzählers der Heizregister (WMZ 5) in der Zeit von Oktober 2001 bis April 2002. Zur Bewertung ist zusätzlich die tagesmittlere Außentemperatur aufgetragen (abzulesen auf der rechten y-Achse). Der senkrechte Strich markiert zum Zeitraum der niedrigsten Temperaturen die Absenkung in der Heizleistung.

Besonders auffällig ist die Absenkung der Heizleistung im Zeitraum der niedrigsten Außentemperaturen. Wie bereits bei den Temperaturuntersuchungen geschildert, muss es sich hier um einen Fehler in der Regelung handeln, der dann auch zu den tiefsten gemessenen Raumtemperaturen geführt hat.

Deutliche Sprünge in der Heizleistung sind bei Außenlufttemperaturen um ca. +5 °C und bei ca. -5 °C in Abb. 84 zu beobachten. Die peakförmigen Senken der Heizleistung am 4.11.01, 2.12.02, 3.2.02, 17.2.02, 3.3.02 und 17.3.02 sind alle an Sonntagen gemessen worden. Es wurde vermutlich unregelmäßig an Wochenenden die Heizleistung über die Steuerung gedrosselt. Eine Korrelation mit der Solarstrahlungsstärke kann diesbezüglich nicht festgestellt werden.

Selbst wenn man die Energiebezugsfläche um die nicht direkt oder nur gering beheizten Zonen „Keller“, „Hochregallager“ und „Atrium“ rechnerisch reduziert, liegt der Maximalwert der tagesmittleren Heizleistung bei 15 W/m².

Vergleicht man gleiche Zeiträume des Vorjahres mit dem bereits untersuchten Zeitraum, ergibt sich ein etwas höhere Wert der durchschnittlichen Heizleistung:



7. Dezember 2000 bis 31. März 2001: 7,2 W/m²

7. Dezember 2001 bis 31. März 2002: 6,0 W/m²

Die Klimabedingungen waren in diesem Zeitraum nahezu gleich (Summe der HGT). Dies spricht für eine besser eingestellte Technik im zweiten Winter und insbesondere für den Einfluss des am 1. Februar 2002 erneuerten Wärmeübertrager im Lüftungsgerät (vgl. dazu Ausführungen ab Seite 113).

Die deutlichen Auswirkungen durch den Austausch der beiden Wärmeübertrager am 1. Februar 2002 sind in Abb. 85 abzulesen: Im hier zusätzlich untersuchten Zeitraum (Oktober 2002 bis Januar 2003) beträgt die **maximale** Heizleistung **7,4 W/m²**. Damit liegt sie **deutlich niedriger** als in der zuvor untersuchten Heizperiode. Die Heizleistung befindet sich insgesamt auf deutlich niedrigerem Niveau als im Vorjahr. Dagegen lag die tiefste tagesmittlere Außentemperatur mit -7,9 °C nur wenig höher als in der Heizperiode zuvor. Bei der Darstellung in Abb. 85 ist die gleiche Skalierung verwendet worden wie bei Abb. 84.

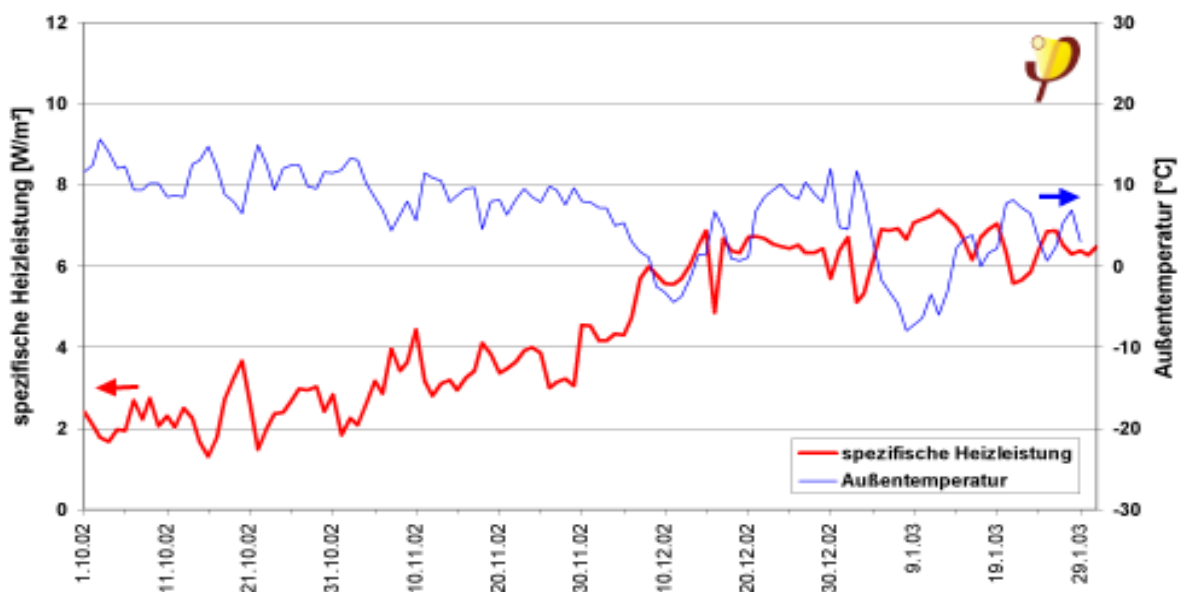


Abb. 85: Spezifische tagesmittlere Heizleistungen des Gesamtgebäudes SurTec nach den Messdaten des Wärmemengenzählers der Heizregister (WMZ 5) in der Zeit von Oktober 2002 bis Januar 2003. Zur Bewertung ist zusätzlich die tagesmittlere Außentemperatur aufgetragen (abzulesen auf der rechten y-Achse).

Der Vergleich zu den Vorjahresdaten in Abb. 84 zeigt an, dass in der Heizperiode 2001/2002 mit den defekten Wärmeübertragern die Leistungsgrenze der Anlage mit Werten um 9,5 bis 10,3 W/m² erreicht war. Es handelte sich in diesem Fall nicht um die maximal benötigte Heizleistung sondern um die maximal mögliche. Damit erklären sich die niedrigen Gebäudetemperaturen um den 6./7. Januar 2003. Im hier zusätzlich untersuchten Zeitraum bis Januar 2003 sind dagegen die Leistungsreserven klar erkennbar.

Bei diesem Vergleich zwischen den beiden Zeiträumen ist die Raumlufttemperatur im Gebäude, hier insbesondere in den Büros, von Interesse. Dafür wurden die Daten auch im zusätzlich untersuchten Zeitraum Oktober 2002 bis Januar 2003 ausgewertet.

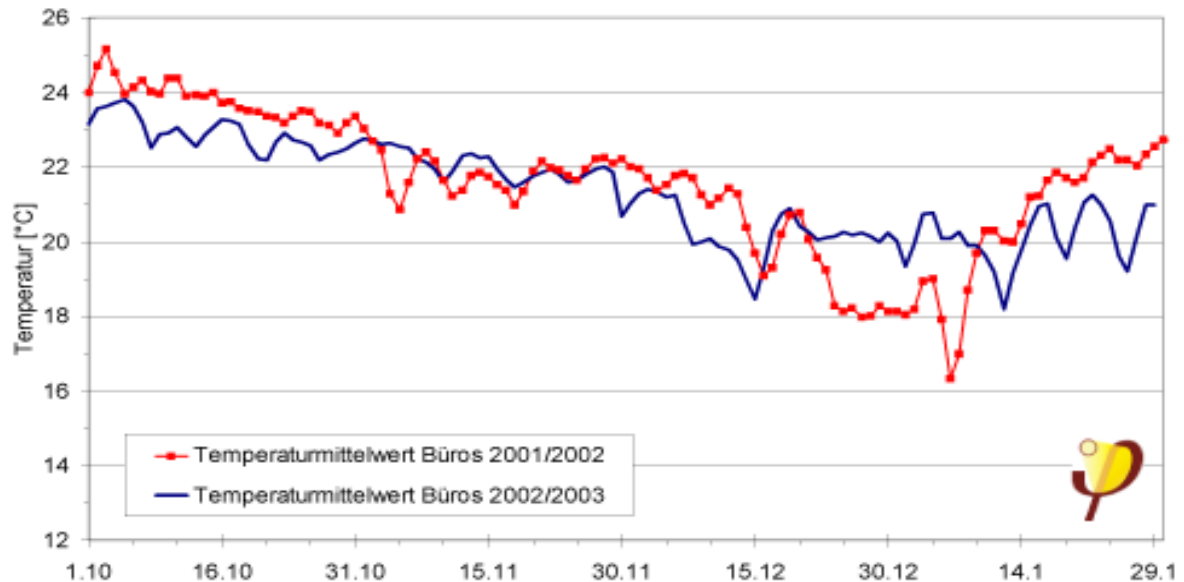


Abb. 86: Vergleich der mittleren Bürottemperaturen von Oktober bis Januar für die Jahre 2001/2002 und 2002/2003 (Tagesmittelwerte).

Der Vergleich zu den Daten des Vorjahres zeigt die deutliche Verbesserung der Temperaturen in den Büroräumen. Die mittleren Temperaturen pendelten nach der Abkühlung der sommerlichen Temperaturen - bis auf zwei Ausreißerzeitpunkte - um die 20 °C. Es zeigt sich damit, dass mit weniger Heizleistung komfortablere Temperaturen im hier untersuchten Winterzeitraum erreicht werden konnten. Die Ursache dafür liegt in der nun hergestellten Funktionstüchtigkeit der Wärmerückgewinnung.

Heizkurve

Die Darstellung der gemessenen tagesmittleren flächenbezogenen Heizleistung über der Außenlufttemperatur in der Heizperiode 2001/2002 zeigt Abb. 87. In das Diagramm ist zusätzlich die theoretische Heizgerade eingetragen, die die Heizleistung beschreibt, die dem Gebäude bei Vernachlässigung solarer Gewinne zugeführt werden müsste. Der Kennwerte für die Gebäudehülle (Leitwert $H_{T+V} = 3593 \text{ W/K}$) wurde dem Datensatz des PHPP entnommen. Dabei wird der baulich/technische Zustand des Gebäudes bis zum Zeitpunkt des Austauschs der Wärmeübertrager (1.2.2003) verwendet. Außerdem gehen zur Bestimmung der Heizgerade die gemessene mittlere Innentemperatur des Gesamtgebäudes, die gemessenen Heizleistungen, die gemessenen Außentemperaturen sowie die Höhe der inneren Wärmequellen ein.

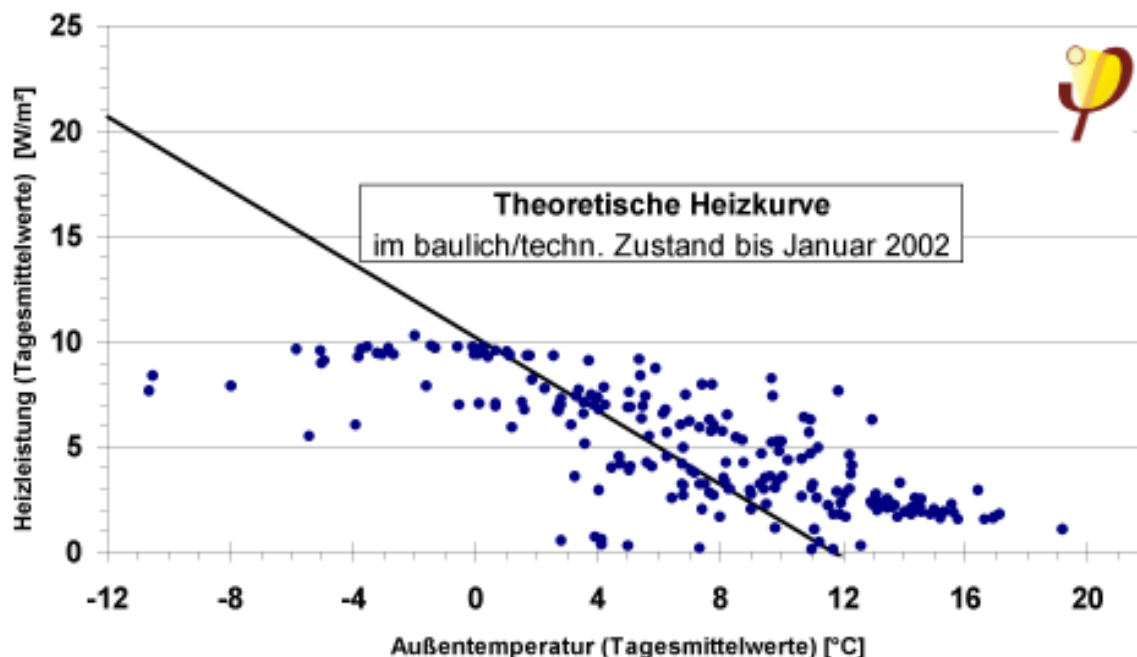


Abb. 87: Tagesmittlere Heizleistung über der Außentemperatur sowie Heizkurve des Gebäudes SurTec in der Heizperiode 2001/2002. Der Heizkurve liegen u. a. die ermittelten $7,0 \text{ W/m}^2$ inneren Wärmequellen zugrunde.

Befindet sich die gemessene tagesmittlere Heizleistung über der theoretischen Heizkurve, so ist eine für dieses Gebäude bei der entsprechenden Außentemperatur erhöhte Leistung benötigt worden. Dies kann seine Ursache z. B. in Aufheizeffekten haben, für die höhere Heizleistungen angefordert werden. Nach den zeitweisen Absenkungen der Heizleistung an einigen Sonntagen des Untersuchungszeitraumes sind solche zusätzlichen Heizleistungen benötigt worden. Die Heizleistung in Abb. 84 zeigt auch noch weitere sprunghafte Anstiege, die ihre Ursachen nicht in der Veränderung der Außentemperatur haben, sondern vermutlich in ungewollten Einflüssen der Regelung begründet liegen. Auch in diesen Anstiegsbereichen wird zusätzlich Heizleistung angefordert, wodurch Messpunkte über der Kurve entstehen.

Ein weiterer großer Einfluss liegt in ungeplant aufstehenden Gebäudeöffnungen, wie sie bei dem Objekt z. B. beim Anlieferungstor und beim Fenster in der Produktion beobachtet wurden. Diese Effekte haben einen großen Einfluss auf die Heizleistung und sind in der Heizkurve natürlich nicht berücksichtigt. Genauso wenig wie mögliche Abweichungen der Gebäudehülle (z.B. zusätzliche Wärmebrücken), welche nicht projektiert waren.

Die Messpunkte unterhalb der Kurve zeigen den Einfluss der passiven solaren Einstrahlung an: Ein Teil der Wärmeverluste wird durch solare Wärmegegewinne gedeckt. Da in Mitteleuropa besonders kalte Tage mit meist wolkenlosem Himmel korrespondieren sind die solaren Gewinne hier besonders hoch. Dies zeigen auch die Messpunkte bei den niedrigsten Außentemperaturen: Es wurden niedrigere Heizleistungen gemessen. Die höchsten Leistungen kommen eher bei Temperaturen

um den Gefrierpunkt vor, die häufig mit trübem Wetter - geringe Solarstrahlung - einhergehen.

Die gemessene tagesmittlere Heizleistung von maximal $10,3 \text{ W/m}^2$ liegt in der gleichen Größenordnung wie die bei der Planung der Haustechnik angesetzten Werte von $42,3 \text{ kW}$ bzw. $10,3 \text{ W/m}^2$ [Schwertfeger 2000]. Bei den Messwerten in Abb. 87 erscheinen die 10 W/m^2 als tagesmittlere Obergrenze, wie bereits weiter oben diskutiert wurde. Auffällig ist auch, dass die Heizleistung bei höheren Temperaturen ($>13 \text{ }^\circ\text{C}$) nicht Null wird, sondern sich bei Werten zwischen 1 und 3 W/m^2 einpendelt.

Sommerliche Heizlast

Bei der Auswertung der sommerlichen Heizleistungen fällt auf, dass die Heizregister auch an warmen Tagen und sogar in den Hitzeperioden betrieben wurden. Die Hitzeperioden im Sommer 2001 weisen Außentemperaturen von zeitweise über $35 \text{ }^\circ\text{C}$ auf. Die Heizleistung für das Gesamtgebäude liegt in solchen Zeiten im Mittel noch bei $0,6 \text{ kW}$. Die Beheizung ist nicht sinnvoll und führt zu ungewollten sommerlichen Temperaturerhöhungen.

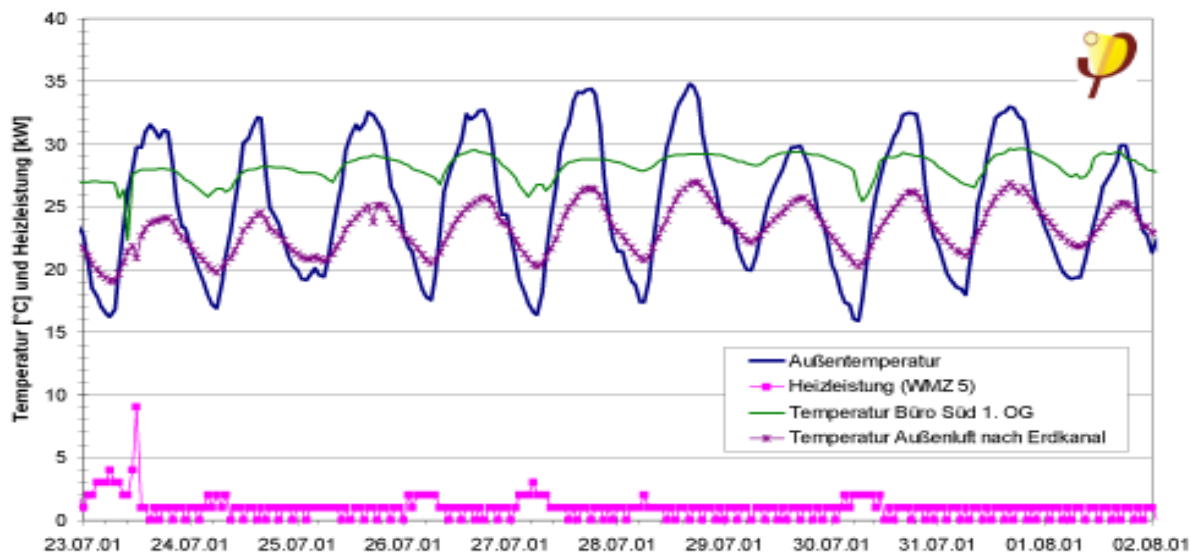


Abb. 88: Heizleistung im Hochsommer im Vergleich zur Außen- und einer Büroraumtemperatur (alles Stundendaten). Zusätzlich ist noch die Temperatur der angesaugten Außenluft nach dem Erdkanal aufgetragen.

Bei näherer Untersuchung zeigt sich, dass bei Frischlufttemperaturen nach dem Erdkanal unter ca. $20,5 \text{ }^\circ\text{C}$ die Heizleistung - trotz hoher Raumlufttemperaturen - deutlich ansteigt. Es ergeben sich in diesen Perioden Werte der Heizleistung bis weit über 10 kW . Auf diesen Mangel der Regelung wurde frühzeitig vom PHI hingewiesen. Der Regelungsfehler wurde vom Betreiber der Anlage bisher noch nicht abgestellt.



Zum einen ergeben sich durch diese Tatsachen unnötige sommerliche Wärmeverbräuche, zum anderen verstärkt sie unnötig die Übertemperaturhäufigkeit im Gebäude. Es ist dringend anzuraten, das Programm der DDC Anlage diesbezüglich zu modifizieren.

Heizwärmeverbrauch

Die Auswertung der Wärmeverbräuche zur Gebäudebeheizung zeigt monatliche Werte zwischen 1.300 und 26.100 kWh. Die Umrechnung auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes ergibt den Ganzjahreswert im Auswertzeitraum Mai 2001 bis April 2002 von **29,6 kWh/(m²a)**. Im Jahr 2001 wurde mit 34,6 kWh/(m²a) ein etwas höherer Heizwärmeverbrauch gemessen.

Auffällig ist, dass auch in den Sommermonaten noch nennenswerte Wärmeverbräuche angefordert wurden. Die Simulation [Schnieders 2001] und die Erfahrungen aus dem Passivhaus-Wohnungsbau haben hier keine Verbräuche erwarten lassen. Die Simulation zeigte für das Gebäude eine Heizperiode nur von November bis März. Wie weiter oben dargestellt wurde, ist die Regelung so eingestellt, dass die Nachheizregister bereits heizen, wenn die Frischlufttemperatur nach dem Erdkanal unter 20,5 °C absinkt. Dies macht im Sommer keinen Sinn, wenn kein Heizbedarf besteht bzw. durch die abgekühlte Nachtluft das Gebäude gekühlt werden könnte. Das Programm der DDC wurde im Messzeitraum diesbezüglich nicht geändert. Durch diese Regelung werden sommerliche Heizwärmeverbräuche verursacht. In den Sommermonaten Mai bis September 2001 wurden 18.405 kWh, umgerechnet **4,5 kWh/m²** verbraucht.

Durch diesen Umstand ist die Betrachtung des gesamten Jahreszeitraumes nicht aussagekräftig. Daher werden hier die Auswertungen auf die Heizperioden eingeschränkt. Für den Oktober 2001 bis April 2002 ergibt sich ein **Heizwärmeverbrauch von 25,1 kWh/m²**. Damit liegt der Verbrauchswert in der Größenordnung der 25,6 kWh/(m²a), welche im Zwischenbericht [Peper 2001] aus dem gemessenen Gasverbrauch abgeschätzt wurden. Für den Zeitraum (Januar bis April und Oktober bis Dezember) ergibt sich ein deutlich höherer Verbrauchswert von 30,2 kWh/m².

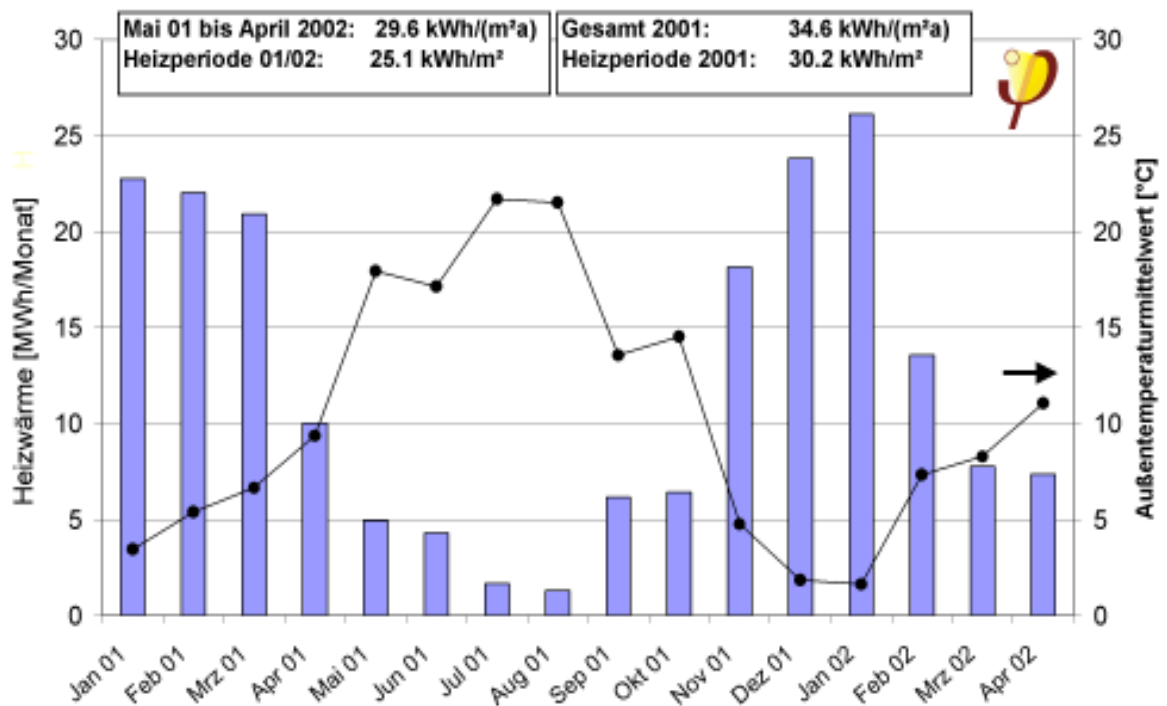


Abb. 89: Monatliche Heizwärmeverbräuche des Gebäudes SurTec vom Januar 2001 bis zum April 2002. Zusätzlich sind auch die monatsmittleren Außentemperaturen aufgetragen. Ab Februar 2002 ist ein deutlich geringer Verbrauch zu erkennen, der in der Hauptsache in den ausgewechselten Wärmeübertrager begründet liegt.

Der Vergleich mit den mittleren Außentemperaturen in Abb. 89 zeigt im Juli und August 2001 Wärmeverbräuche bei Monats-Mitteltemperaturen von deutlich über 20 °C.

Die Mitteltemperatur im Januar 2002 liegt etwa 1,8 K niedriger als im Vorjahreszeitraum. Februar, März und April 2002 waren 1,6 bis 2,0 K wärmer als die entsprechenden Vorjahresmonate. Der Heizwärmeverbrauch verhält sich dazu genau umgekehrt, allerdings mit wesentlich stärkerer Tendenz als die Temperaturen: Der Mehrverbrauch im Januar 2002 lag bei 3.360 kWh, die Minderverbräuche von Februar bis April bei etwa 8.500, 13.100 und 2.650 kWh. Der Hauptgrund für diese deutlich geringeren Verbräuche ist - neben den etwas höheren Temperaturmittelwerten - im **Austausch der beschädigten Wärmeübertrager** am 1. Februar 2002 zu suchen. Der Wärmebereitstellungsgrad wurde dabei deutlich erhöht, wodurch eine höhere Wärmerückgewinnung erreicht und damit **direkt der Heizwärmeverbrauch gesenkt** wird (Siehe dazu die Ausführungen in Abschnitt 7.2.3). Andere Faktoren wie die solare Einstrahlung oder die inneren Wärmequellen (insbesondere Produktionsabwärme) sind in den Zeiträumen etwa von vergleichbarer Größenordnung.

Um die Auswirkungen durch den Austausch der Wärmeübertrager auf den Heizwärmeverbrauch zu beurteilen, wurde auch noch der zusätzliche Zeitraum Oktober



2002 bis Januar 2003 untersucht. Ergänzt mit den Monaten Februar bis April 2002 ergibt sich eine vollständige Heizperiode mit ausgetauschten Wärmeübertragern. Diese wird hier verglichen mit der Heizperiode mit den defekten Wärmeübertragern (Februar bis April und Oktober bis Dezember 2001 sowie Januar 2002).

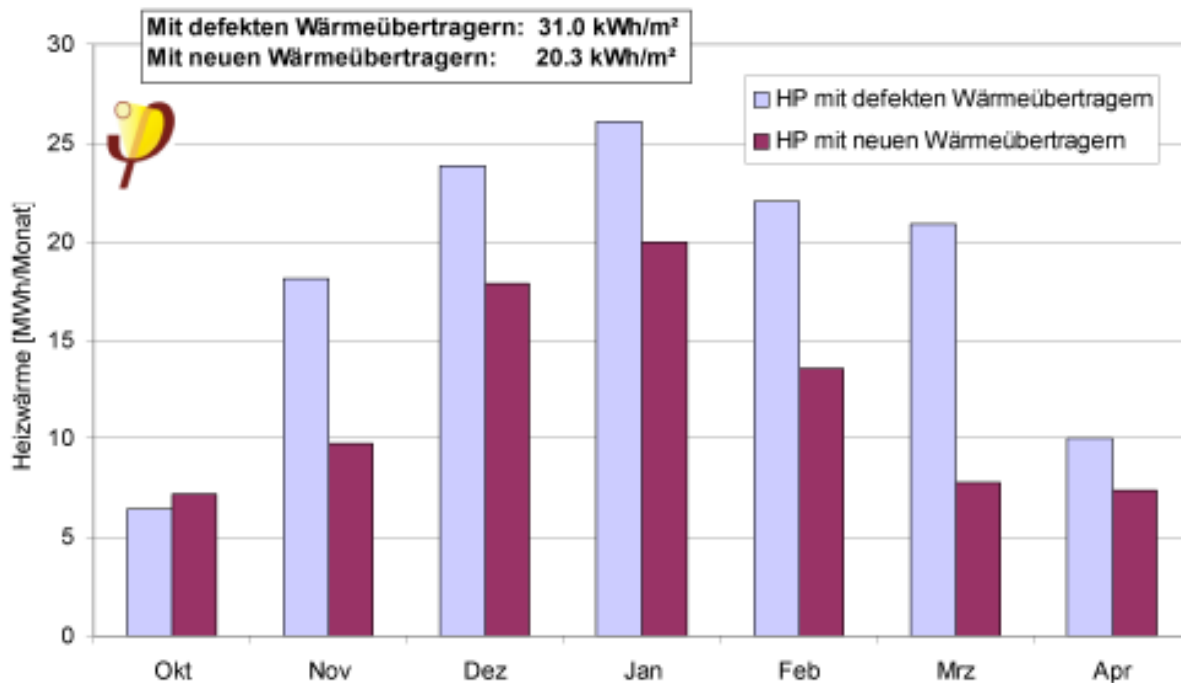


Abb. 90: Vergleich der gemessenen Heizwärmeverbräuche im Zeitraum mit defektem und mit ausgetauschtem Wärmeübertrager einer Heizperiode (jeweils Oktober bis April). Der Heizwärmeverbrauch hat sich um 35 % verringert.

Der Heizwärmeverbrauch in der Heizperiode mit defekten Wärmeübertragern lag bei 31,0 kWh/m². Nach dem Austausch der Wärmeübertrager lag der Verbrauch um **35 % niedriger bei 20,3 kWh/m²**. Diese Tatsache macht die Notwendigkeit und den großen Einfluss einer funktionierenden Wärmerückgewinnung deutlich. Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage steht jetzt einem wesentlich höheren Wärmeertrag gegenüber.

Vergleich zu den Ergebnissen der Gebäude-Simulation

Die Simulation des Gebäudes [Schnieders 2001] hatte für den **Referenzfall 17,9 kWh/(m²a)**, bei Berücksichtigung der Produktionsabwärme **13,9 kWh/(m²a)** Heizwärmebedarf ausgewiesen. Für die unterschiedlichen Randbedingungen, die untersucht wurden, ergab sich eine Bandbreite von Werten. Tabelle 13 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse, genauere Informationen über die Randbedingungen der unterschiedlichen Berechnungen können dem Bericht [Schnieders 2001] direkt entnommen werden.

	Standard [kWh/(m ² a)]	Berücksichtigung Produktionsabwärme [kWh/(m ² a)]
Referenzfall	17,9	13,9
Alle Zonen 20 °C	29,1	25,1
mit Nachtabsenkung	13,7	10,6
Fenster Produktion offen	20,1	16,1

Tabelle 13: Ergebnisübersicht der Simulationsrechnung zum Gebäude mit unterschiedlichen Randbedingungen (nach [Schnieders 2001]).

Den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messwerten und dem Wert für die komplette Heizperiode mit den neuen Wärmeübertragern zeigt die folgende Grafik:

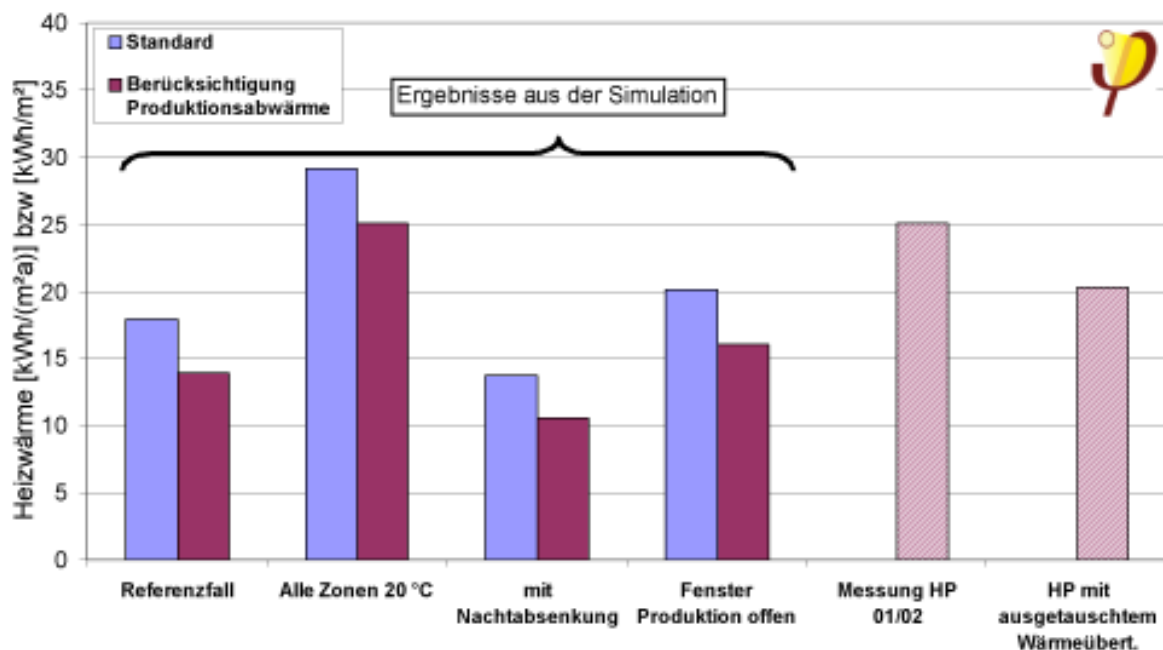


Abb. 91: Vergleich der Simulationswerte aus [Schnieders 2001] mit den Messwerten der Heizperiode 2001/2002 (Oktober 01 bis April 02) und der Heizperiode mit den erneuerten Wärmeübertragern. Bei den Simulationsergebnissen wird zwischen der Standardberechnung und der Berechnung mit Berücksichtigung der Produktionsabwärme unterschieden.

Der Messwert der Heizperiode mit den erneuerten Wärmeübertragern liegt mit 20,3 kWh/m² noch höher als der mit der Simulation berechnete Heizwärmebedarf für Bedingungen mit zeitlich und räumlich variablen Temperatur-Sollwerten von 13,9 kWh/(m²a). Es bleibt ein Mehrverbrauch von 6,4 kWh/m². Die Variante der Simulationsrechnung, bei der das Fenster in der Produktion lange Zeit aufsteht, zeigt den großen Einfluss dieser Störung auf den Heizwärmebedarfswert. In der Realität des Produktionsbetriebes wurden solche und ähnliche Zustände häufiger vorgefunden. Die Abweichung des Messwertes gegenüber der Simulation hat noch weitere Ursachen. Hier seien die wichtigsten genannt:



- Die winterlichen durchschnittlichen Raumluffttemperaturen fast aller Zonen lagen über den in der Simulation angenommenen Sollwerten (vgl. Abb. 67 in Abschnitt 7.1.1). Simulationsrechnungen für Passivhaus-Wohnbauten ergeben pro Kelvin Innentemperaturerhöhung einen Mehrverbrauch an Heizenergie von 15 %. Der Mittelwert der höheren Temperaturen liegt bei SurTec bei 1,1 K.
- Die Mängel an der Heizungssteuerung führten zu ungewollten Heizenergieverbräuchen. Die Heizregister heizen unnötigerweise auch im Hochsommer dauerhaft mit ca. 0,6 kW Leistung. Bei Frischlufttemperaturen nach dem Erdkanal unter ca. 20,5 °C steigt die Heizleistung - trotz hoher Raumluffttemperaturen - auf Werte bis weit über 10 kW an (vgl. Ausführungen zur Heizleistung ab Seite 106).
- Das LKW-Ladetor steht, wie auch das großformatige Fenster (2,3 x 2,3 m) in der Produktion (EG), tagsüber auch an kalten Tagen produktionsbedingt lange Zeit offen. Dadurch kommt es dort zu erhöhten Energieverlusten. Die Simulation [Schnieders 2001] weist eine Erhöhung des Heizenergiebedarfs des Gesamtgebäudes von 12 % aus, wenn das betreffende Fenster während der gesamten Arbeitszeit geöffnet wäre. Hier soll an Stelle des Fensters ein hochwärmegedämmtes Rolltor eingebaut werden, um auf diesem Weg schneller und besser Waren in das Gebäude transportieren zu können.
- Durch grobe Beschädigungen des LKW-Ladetores (Vakuumdämmung) durch Anlieferfahrzeuge war dieses schon mehrfach defekt, ebenso wie die mit Vakuumpaneelen gedämmte Seitentür zur Laderampe. Das Gebäude konnte dann nur provisorisch verschlossen werden. Inzwischen wurde das Tor gegen ein Rolltor aus PU-Paneelen ausgetauscht. Dadurch ergaben und ergeben sich erhöhte Wärmeverlustströme.
- Durch die Disbalance der Lüftungsanlage (Außenluftüberschuß) wird ein Teilluftvolumenstrom der Abluft nicht durch die Wärmeübertrager geführt. Für diesen Teil erfolgt keine Wärmeübertragung an den Außenluft-/Zuluftstrom. Dies führte ebenfalls zu höheren Heizwärmeverbräuchen. Die Verbesserung der Balanceeinstellung erfolgte erst am 28.2.2002. Danach betrug die Disbalance noch immer fast 10 %.

Mit 20,3 kWh/m² ist der Nutzenergieverbrauch für die Gebäudeheizung allerdings im Vergleich zu konventionellen Gebäuden ausgesprochen niedrig, nämlich um rund **85 % gegenüber dem Referenzfall verringert**. Die eingangs dokumentierte PHPP Berechnung liefert mit einem Heizwärmebedarf bei konstant 20 °C von 29 kWh/(m²a) (entsprechend ca. 36 kWh/(m²a) Endenergie) sogar einen höheren Wert.

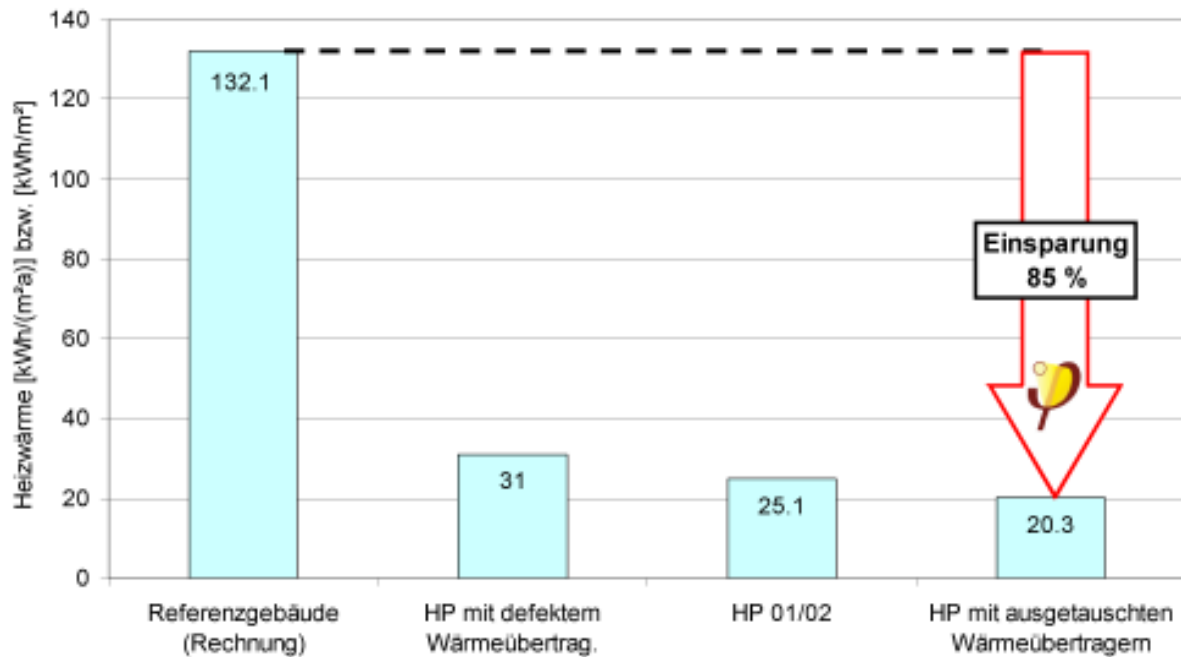


Abb. 92: Vergleich zwischen dem berechneten Heizwärmebedarfswert (Referenz) mit den gemessenen Verbräuchen der Heizperioden ohne und mit den neuen Wärmeübertragern. In der Heizperiode (HP) 2001/2002 sind die Monate Februar bis April 2002 mit bereits ausgewechselten Wärmeübertragern enthalten.

7.2.2.3 Sprinklertank

Der Sprinklertank befindet sich innerhalb der thermischen Hülle im südlichen Teil des Gebäudes im Keller des Produktionstraktes. Es handelt sich um ein Volumen von ca. 200 m³, welches mit Löschwasser für die Sprinkleranlage gefüllt ist. Zur Kühlung von drei der Rührbehälter in der Produktion kann bei Bedarf Wärme aus den Behältern an das Löschwasser abgegeben werden. Dazu ist ein Rohrbündel-Wärmeübertrager im Wasser montiert. Wird der Kühlvorgang von Hand aktiviert, wird die entsprechende Wärmemenge mittels WMZ 8 gemessen.

Durch die in den Tank eingelagerte Energie steigt die Temperatur des Löschwassers an. Die Wärme wird im Laufe der Zeit über die Wände und Decken wieder an das Gebäude abgegeben. Um eine Vorstellung von den Größenordnungen diese Vorganges zu haben, wurde in den Tank etwa 4,5 Monate ein zusätzlicher Temperatur-Datenlogger eingesetzt. Dieser hat die Löschwasser-Temperatur aufgezeichnet.

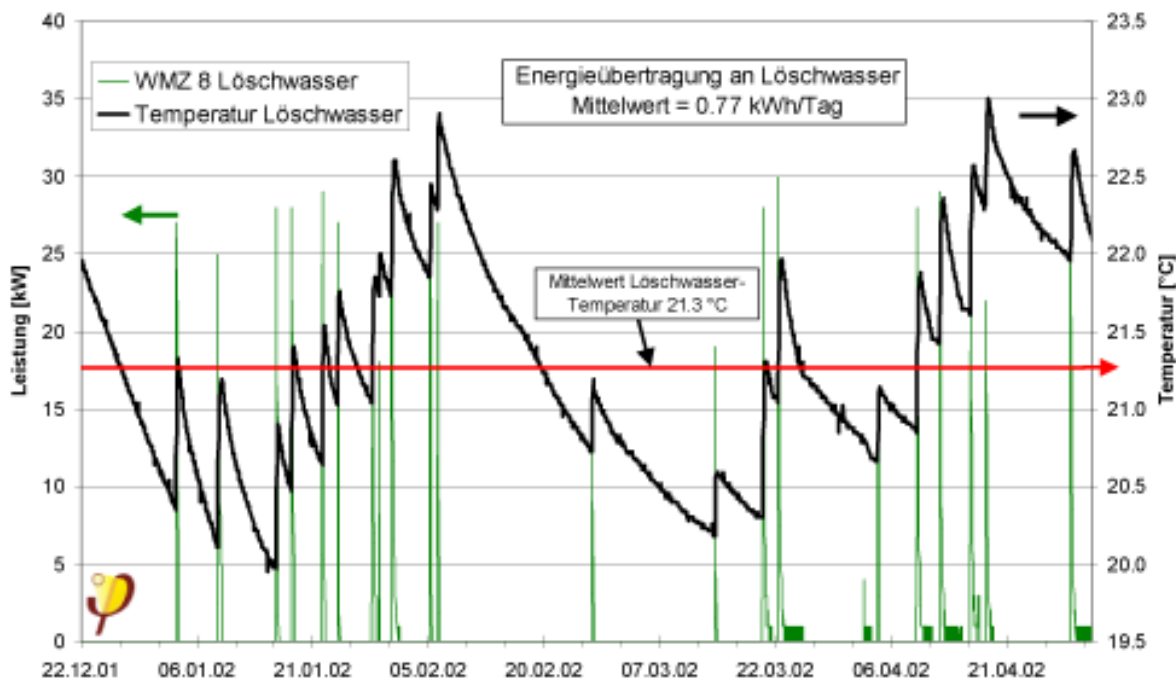


Abb. 93: Abgegebene Wärmemenge an das Löschwasser im Löschwassertank und dessen Wassertemperatur in der Zeit vom 22. Dezember 2001 bis zum 30. April 2002 (Stundenwerte).

Es wird unregelmäßig Energie an das Wasser abgegeben. Die Spitzen liegen dabei bei 30 kW, im Mittel werden 0,77 kWh/Tag an das Wasser übertragen. Im untersuchten Zeitraum schwankt die Löschwassertemperatur zwischen knapp 20,0 °C und 23,0 °C. Im Mittel liegt sie mit 21,3 °C etwas höher als die mittlere Gebäudetemperatur. Die Energiemessung und die Temperaturerhöhung korrespondieren exakt miteinander. Nach den einzelnen schlagartigen Aufheizvorgängen kühlt sich das Wasser langsam wieder ab (typische exponentielle Abkühlkurven).

7.2.3 Lüftungszentralgerät

Beim Lüftungszentralgerät handelt es sich um eine Sonderanfertigung des Herstellers Fa. Frivent aus Österreich. Das Gerät arbeitet mit zwei VentilatorMotoren die auf der Außen- und Fortluftseite positioniert sind und sich im Luftstrom befinden. Die Ventilatoren fördern die gesamten Luftmengen die im Gebäude benötigt werden: Luftvolumenströme im Erdkanal, im Lüftungsgerät, im Rohrnetz des Gebäudes sowie im Fortluftkanal. Zur Wärmerückgewinnung werden zwei in Reihe geschaltete Kreuzstrom-Wärmeübertrager (Luft/Luft) eingesetzt. Dem Gerät ist für einen Teilvolumenstrom der Abluft ein Luftwäscher zur Reinigung von aggressiven Schadgasen vorgeschaltet. Die Anlage ist im Technikeller untergebracht und hat ohne Anschlusskanäle Abmessungen von etwa 11,2 m Länge, 2,4 m Höhe und 1,7 m Breite.

In chemischen Produktionsstätten und chemischen Labors muss nach DIN 1946 Teil 7 ein Mindestabluftstrom von $25 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ sichergestellt werden. Dies ist nur mit Lüftungsanlagen erreichbar. Aus diesem Grund ist das Gebäude - zumindest in Teilbereichen - ohnehin auf eine Lüftungsanlage angewiesen. Diese ist also nicht allein zur Realisierung des Passivhaus-Standards notwendig gewesen. Die Wärmerückgewinnung ist zusätzlich für das Passivhaus-Konzept zwingend erforderlich. Die hohen geforderten Luftwechselraten mussten vom Betreiber und vom Planer in Einklang mit den energetischen Notwendigkeiten bzw. Obergrenzen gebracht werden. Gegenüber den bei konventionellen Absauganlagen geforderten hohen Luftwechselraten konnte mit Hilfe der innovativen Quellabsaugungen eine hocheffiziente Lösung gefunden werden.

Wegen der z. T. aggressiven chemischen Substanzen in der Abluft der Produktion, gab es - trotz vorgeschaltetem Luftwäscher- erhöhte Anforderungen an die chemische Beständigkeit der Wärmeübertrager. Obwohl diese Anforderungen bekannt waren, wurden die Komponenten der Übertrager fälschlich aus Aluminiumblech gefertigt und waren nach kurzer Zeit beschädigt. Es lag Lochbildung in den Platten vor, so dass Leckagen zwischen dem Frisch- und dem Fortluftvolumenstrom entstanden. Dies hatte unter anderem negative Auswirkungen auf den effektiven Wärmebereitstellungsgrad. Nach längeren Klärungsvorgängen wurden am 1. Februar 2002 die beiden neuen Wärmeübertrager aus Kunststoff eingebaut.



Abb. 94: Lüftungsanlage im Technikkeller vor der Fertigstellung noch ohne angeschlossene Luftkanäle (links) und am 1.2.2002 beim Einbau der beiden neuen Wärmeübertrager (rechts).

In der Zeit vom 31.7. bis zum 6.11.2001 wurden die Wärmeübertrager mittels des Bypasskanals im Gerät umgangen. Dieser Zeitraum ist für einen Bypassbetrieb als nicht optimal anzusehen, da bereits vor Ende Juli eine Wärmerückgewinnung nicht erwünscht ist (Überhitzung) sie aber schon (lange) vor Anfang November wieder hätte aktiviert werden sollen (Heizenergieeinsparung durch Rückgewinnung). Da hier



die energetische Bilanz der Lüftungsanlage untersucht wird, ist der Zeitraum ab dem 6.11.2001 von Interesse, also bei Betrieb der Wärmerückgewinnung. Die in diesem Zeitraum gemessenen Temperaturen am Lüftungszentralgerät sowie die Außenlufttemperatur sind in Abb. 95 dargestellt:

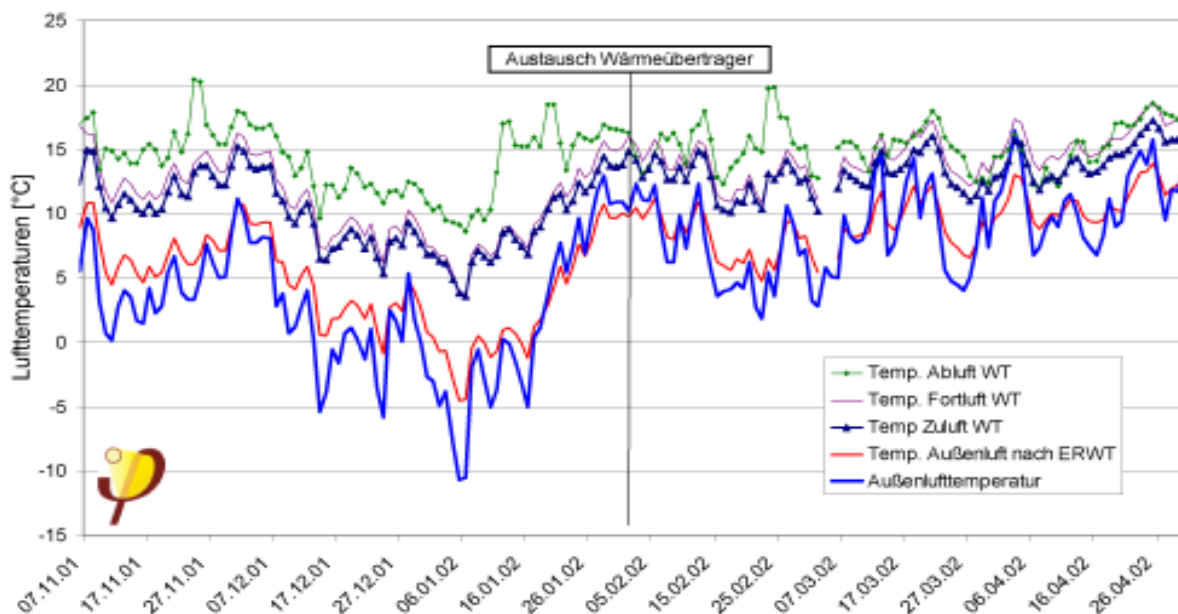


Abb. 95: Die vier relevanten Lufttemperaturen am Lüftungszentralgerät und die Außenlufttemperatur (Tagesmittelwerte). Dargestellt ist die Zeit ab der Deaktivierung des Sommer-Bypasses am 7.11.2001 bis zum Ende der Messperiode 30.4.2002. Am 1.2.02 sind die beiden Wärmeübertrager ausgetauscht worden.

Die Temperatur der Abluft wird direkt im Lüftungsgerät, in Strömungsrichtung vor dem ersten Wärmeübertrager, gemessen, also als Mischtemperatur der beiden Abluftströme (einer mit und einer ohne Einfluss des Luftwäschers). Die Anordnung der Sensoren ist in Abb. 53 zu erkennen. Auffällig an den Temperaturverläufen ist, dass sie deutlich von den üblichen Verläufen bei Wärmeübertragern abweichen. Normalerweise liegen die Ab- und die Zulufttemperaturen bzw. die Fort- und die Außenlufttemperaturen eng beieinander. Die hier beobachteten Abweichungen haben ihre Ursache in der Wärmeabgabe der beiden Ventilatormotoren mit je 11,9 kW Leistung (vgl. Ausführungen auf Seite 141). Darüber hinaus kühlt sich der Abluft-Volumenstrom durch die Temperaturänderung des Teilvolumenstromes, der durch den Luftwäscher geführt wird, ab (Verdampfungsenthalpie). Auffällig ist auch in der Zeit vor dem Austausch der Wärmeübertrager, dass die Zulufttemperatur nach den (defekten) Wärmetauschern bis auf minimal 3,6 °C absinkt. Hier wird der gewaltige Einfluss der Wärmeübertrager auf die Wärmeversorgung deutlich. Die Nachheizregister sind nicht für den dann noch notwendigen Temperaturhub ausgelegt.

Aus den gemessenen Druckdifferenzen im Erdreichwärmeübertrager und im Fortluftkanal werden die Luftvolumenströme berechnet. Es zeigt sich, dass die

Anlage mit deutlichem Außenluftüberschuss betrieben wurde. Dies war dem Betreiber nicht bekannt und war unbeabsichtigt. Die Disbalance betrug bis über 50 %. Für Passivhäuser wird eine Balance-Einstellung im Bereich von maximal $\pm 10\%$ angestrebt, da die In- und Exfiltrationsluftströme energetisch gesehen sehr ungünstig sind: Sie durchströmen nicht den Wärmeübertrager, womit der Effekt der Wärmerückgewinnung verloren geht. Die Exfiltrationsluftströme von warmer, feuchter Raumluft können evtl. auch zu Bauschäden führen, wenn Feuchtigkeit auf dem Weg nach außen in der Konstruktion ausfallen kann.

Am 28. Februar 2002 wurde in Zusammenarbeit zwischen Hr. Jammer/SurTec, dem Haustechnikplaner Hr. Stärz/Büro inPlan und Hr. Peper/Passivhaus Institut ein Balanceabgleich der Lüftungsanlage vorgenommen. Durch die Reduzierung des Frischluftvolumenstromes konnte die Disbalance von im Mittel ca. 33 % auf 9,9 % reduziert werden.

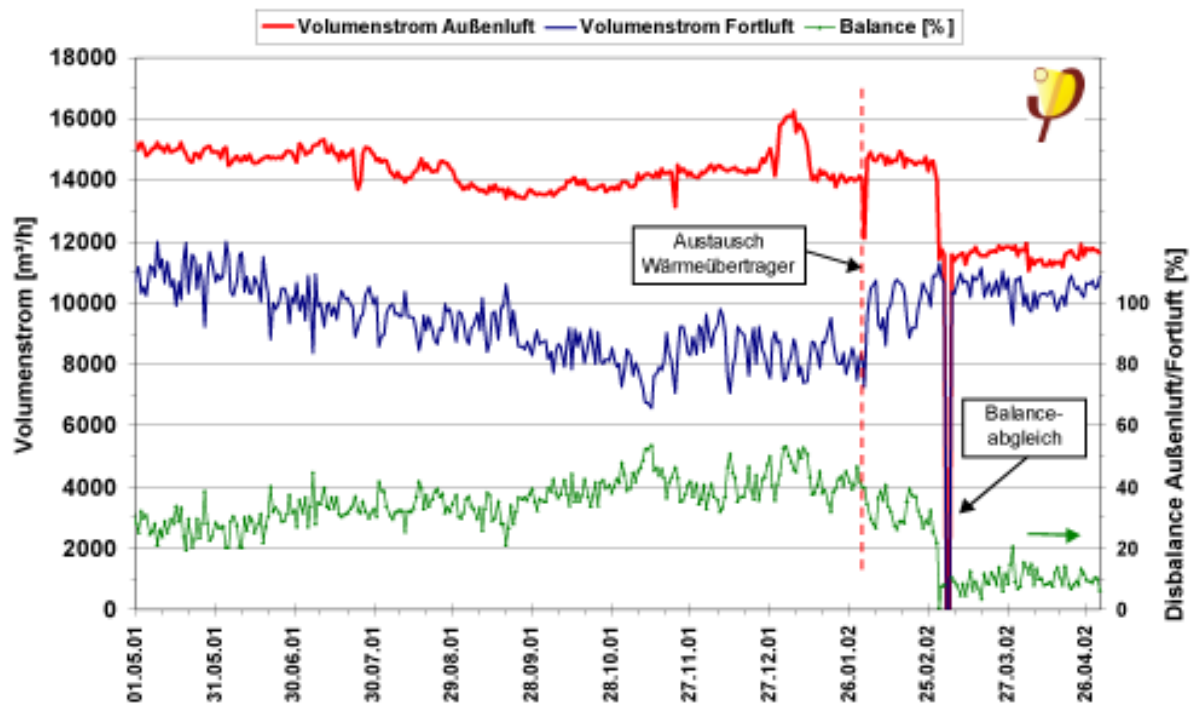


Abb. 96: Luftvolumenströme der Außen- und Fortluft sowie der daraus errechneten Disbalance der Anlage. Dargestellt ist der Zeitraum Mai 2001 bis April 2002.

Die Lüftungsanlage wird fast dauerhaft mit voller Leistung betrieben. Die ursprünglich geplante Fahrweise mit unterschiedlichen Betriebsstufen für unterschiedliche Tages- und Wochenzeiträume erfolgt nicht. Während der Betriebszeit ist der Firma SurTec der Volumenstrom der Abluft in einigen Bereichen des Gebäudes zu gering. So reicht der Firma die Abluftmenge im Labor- und Produktionsbereich aus unterschiedlichen Gründen nicht aus. Hier liegen die Ursachen hauptsächlich in der Abweichung gegenüber den für die Planung gemachten Angaben (Aussage vom Planungsbüro inPlan/Hr. Stärz). Insbesondere die Planung des Abluftstranges ging von einer



anderen Stellung einiger großformatiger Abluftöffnungen in der Produktion aus, wodurch in der Nutzung deutlich höhere Druckverluste im Abluftstrang entstehen. Diese reduzieren den möglichen Ab- und damit auch den Fortluft-Volumenstrom. Die Nachrüstung eines Zusatzlüftungsgerätes für den Laborbereich wurde angedacht, aber noch nicht realisiert.

Aus dem Außenluftvolumenstrom und der Temperaturdifferenz zwischen der Außenlufttemperatur nach dem Erdkanal und der Zulufttemperatur wird hier die durch das Lüftungszentralgerät bereitgestellte fühlbare Wärme berechnet. Der Jahresverlauf ist Abb. 97 zu entnehmen. Insgesamt wurden im Jahreszeitraum eine Wärmemenge von 145,7 MWh übertragen.

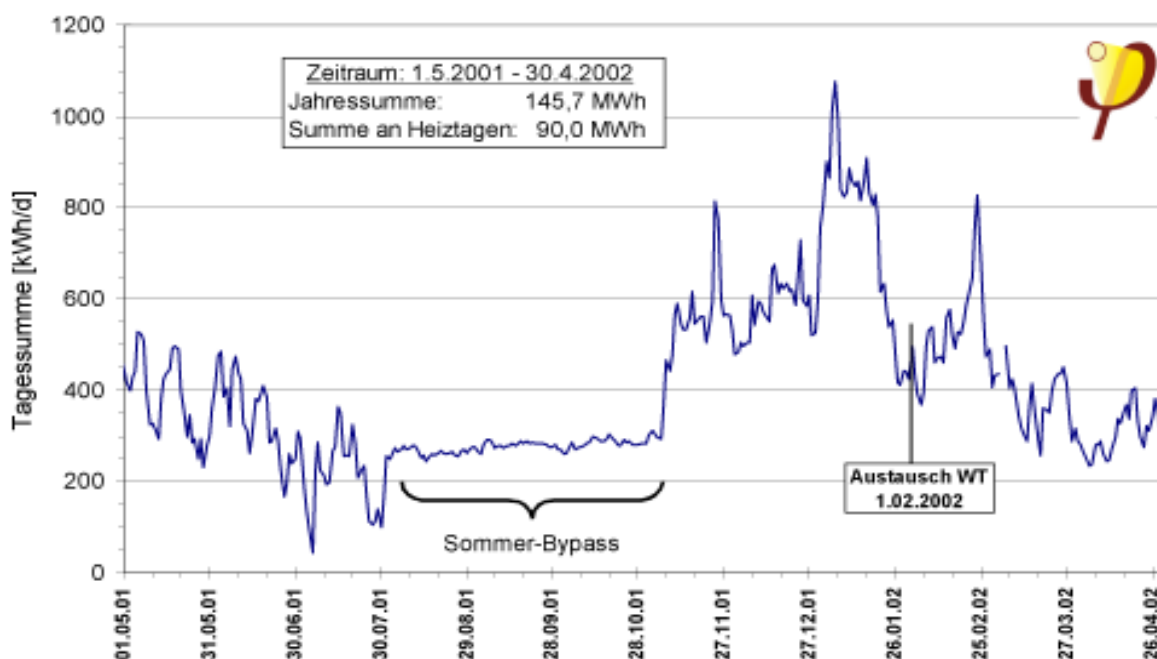


Abb. 97: Übertragene Wärmemengen durch die Wärmerückgewinnung des Lüftungsgerätes ohne die Berücksichtigung des Erdreichwärmeübertragers (Mai 2001 bis April 2002).

Im Zeitraum der Bypassaktivierung wurde der Außenluftstrom ebenfalls noch erwärmt. Die Abwärme des Außenluft-Ventilators ist hier vermutlich für einen erheblichen Anteil der Erwärmung verantwortlich. Dem Gebäude wird auch in Zeiten Wärme durch die Rückgewinnung zugeführt, in denen dies nach der Raumtemperatur nicht nötig oder wünschenswert ist. Daher werden hier „Heiztage“ untersucht, an welchen die Außenlufttemperatur unter 12 °C lag (nach Abb. 87 ergaben sich unterhalb 12 °C nennenswerte Heizleistungen). Bilanziert man nur die an diesen Tagen übertragenen Wärmemengen, ergibt sich eine Jahreswärmemenge von 90,0 MWh/Jahr.

In Vergleich zum jährlichen Heizwärmeverbrauch (mit defekten Wärmeübertragern!) und mit Sommerheizung von ca. 121,7 MWh/Jahr (entsprechend 29,6 kWh/(m²a))

handelt es sich um eine vergleichbare Größenordnung an Energie, welche dem Gebäude zur Raumlüfterwärmung zur Verfügung gestellt wurde.

Dem Wärmeertrag durch die Wärmerückgewinnung (inkl. der Ventilatorenabwärme) muss der elektrische Aufwand für die Luftförderung gegenüber gestellt werden. Da mit den Ventilatoren auch der Luftvolumenstrom im Erdkanal gefördert wird, muss für die Gegenüberstellung die im Erdkanal „erwirtschaftete“ Energiemenge mit berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird die Berechnung der Wärmemenge jetzt aus der Differenz der Zuluft- und der Außenlufttemperatur (ohne Erdkanal) erstellt.

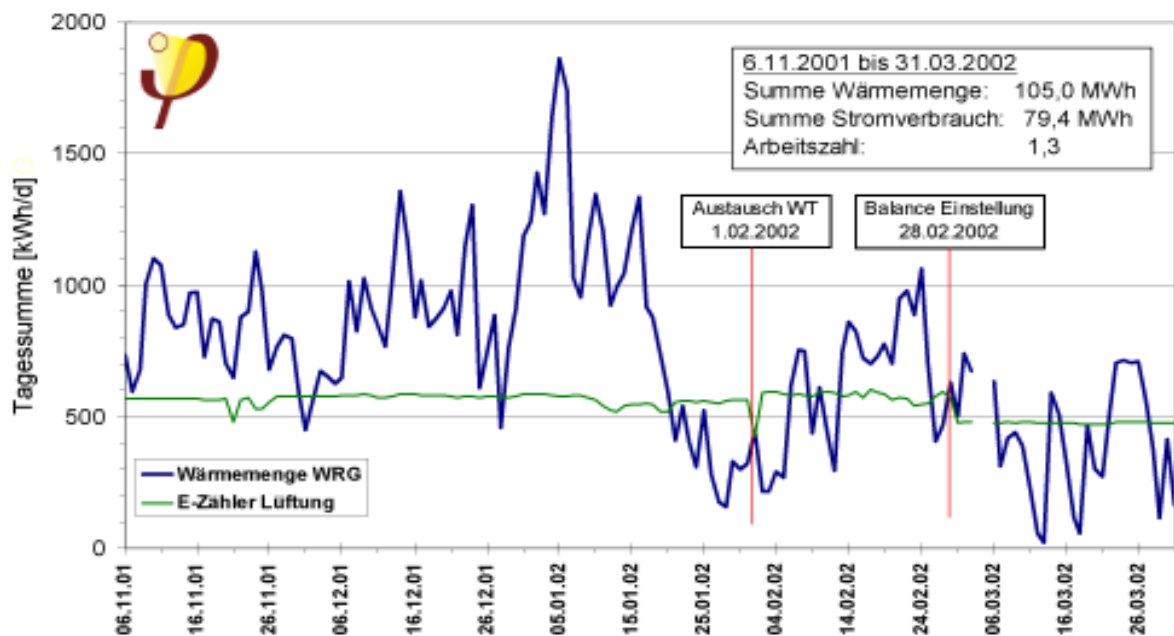


Abb. 98: Übertragene Wärmemengen durch den Erdreichwärmeübertrager und die Wärmeübertrager des Lüftungsgerätes. Zusätzlich ist noch der elektrische Verbrauch der Lüftungsanlage aufgetragen. Dargestellt ist die Zeit ab der Bypassdeaktivierung am 6. November 2001 bis zum Ende des regulären Auswertzeitraumes April 2002.

In der Zeit nach der Bypassdeaktivierung (6.11.2001) bis Ende März 2002 wurden vom Erdreichwärmeübertrager und der Lüftungsanlage 105,0 MWh dem Gebäude zugeführt. In der gleichen Zeit benötigte die Lüftungsanlage (inkl. Regelung) 79,4 MWh elektrische Energie. Aus dem Quotient der beiden Energiemengen ergibt sich eine Arbeitszahl von 1,3. Wird berücksichtigt, dass für die Stromerzeugung ein hoher Primärenergieaufwand notwendig ist, zeigt die niedrige Arbeitszahl den unverhältnismäßig hohen Stromeinsatz an. Angestrebt sind Arbeitszahlen über 3. In realisierten Passivhaus-Wohnungsbauprojekten werden Arbeitszahlen von 16,5 (!) erreicht [Peper 2002]. Aus den Messdaten der zusätzlich untersuchten Heizperiode 2002/2003 mit den ausgewechselten Wärmeübertragern würde sich bereits eine bessere Arbeitszahl ergeben.

Für energieeffiziente Lüftungsanlagen in Passivhäusern gibt es einen Richtwert von 0,3 bis 0,45 Wh/m³. Nur unter Einhaltung einer solch strengen Anforderung für die



Ventilatorstromaufnahme ergeben Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung energetisch und wirtschaftlich Sinn.

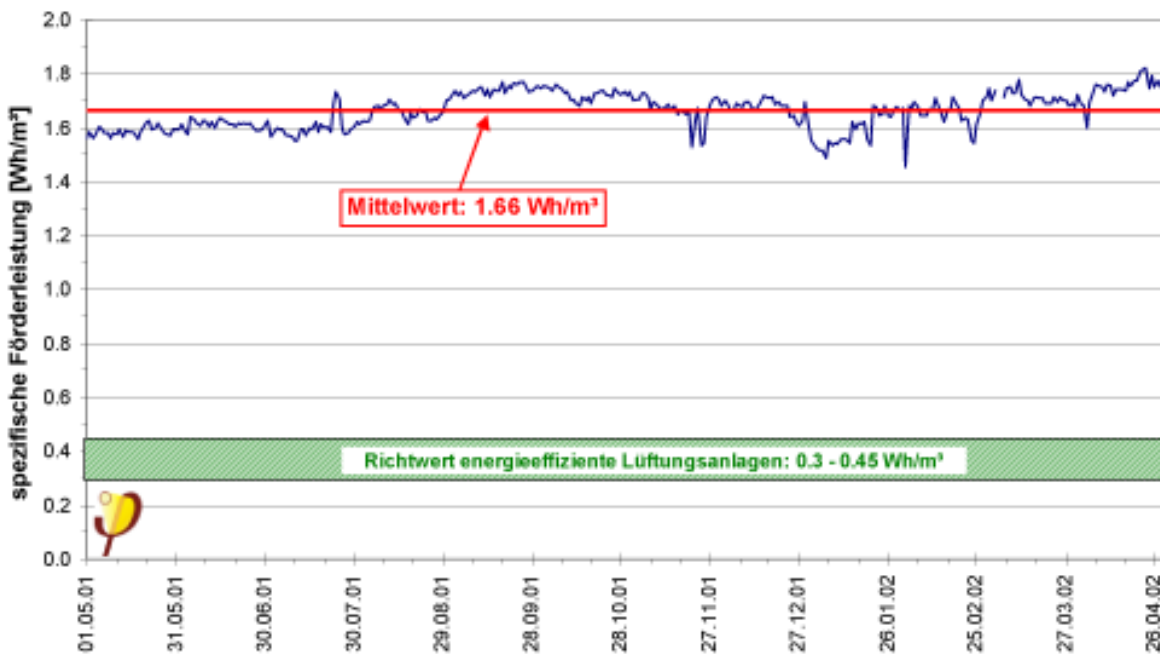


Abb. 99: Spezifische Förderleistung der Lüftungsanlage inkl. Regelung im Vergleich zum Richtwert für energieeffiziente Lüftungsanlagen. Dargestellt sind die gemessenen Tagesmittelwerte über ein Jahr (Mai 2001 bis April 2002).

Für den Jahreszeitraum Mai 2001 bis April 2002 ergibt sich für das Objekt SurTec ein Mittelwert der spezifischen Förderleistung der Lüftungsanlage von $1,66 \text{ Wh/m}^3$. Im Vergleich zum Richtwert liegt der Messwert ganz erheblich zu hoch. Ursache für diese hohen Stromverbräuche sind das lange Lüftungsrohrnetz und die hohen Volumenströme, für welche die Querschnitte der Rohrleitungen zu gering sind. Dabei ist anzumerken, dass der Lüftungsplaner spät zum Planungsteam gestoßen ist. Die Lüftungstechnische Zonierung der Bereiche des Gebäudes und die möglichen Rohrquerschnitte waren durch das bereits festgelegte Platzangebot für diese technischen Einbauten begrenzt. Das gleiche gilt auch für das Zentralgerät im Technikeller (Aussagen des Planers Büro inPlan/Stärz). Diese Tatsache unterstreicht die Notwendigkeit einer frühzeitigen integralen Planung.

Entscheidend ist in diesem Zusammenhang allerdings auch die oben erwähnte Tatsache, dass eine Lüftungsanlage für ein Objekt in der chemischen Industrie ohnehin erforderlich ist. Mit einer einfachen Abluftanlage, wie sie dann normalerweise zum Einsatz gekommen wäre, könnte gar keine Energie zurückgewonnen werden. Auch in diesen Fällen liegen regelmäßig (platzsparend) geringe Kanalquerschnitte vor. Die Bilanz in solchen herkömmlichen Objekten sieht daher noch wesentlich ungünstiger aus.



7.2.3.1 Wärmebereitstellungsgrad

Zur Bilanzierung der Lüftungsanlage ist es notwendig, die elektrische Leistung der Ventilatoren und der Steuerung mit zu berücksichtigen. Die elektrischen Verbräuche werden bei der Berechnung der inneren Wärmequellen (IWQ) bewusst nicht berücksichtigt, weil diese beim effektiven Wärmebereitstellungsgrad eingerechnet werden. Die Berechnung des effektiven Wärmebereitstellungsgrades η_{WRG} der Gesamtanlage bei idealer Massenstrombilanz erfolgt nach der untenstehenden Formel:

$$\eta_{WRG} = \frac{(\vartheta_{Abluft} - \vartheta_{Fortluft}) + \left(\frac{P_{el}}{\dot{m} \cdot c_{p_Luft}} \right)}{\vartheta_{Abluft} - \vartheta_{Außenluft}}$$

mit

- ϑ : jeweilige Lufttemperatur (siehe Index)
- P_{el} : elektrische Leistung (Ventilatoren und Regelung)
- \dot{m} : Luftmassenstrom
- c_{p_Luft} : Wärmekapazität der Luft

Die oben genannte Formel für η_{WRG} gilt nur unter Balancebedingungen, also gleich großen Volumenströmen auf der Frisch- und Fortluftseite. Daher muss die Reduktion des effektiven Wärmebereitstellungsgrades durch den Außenluftüberschuss berücksichtigt werden.

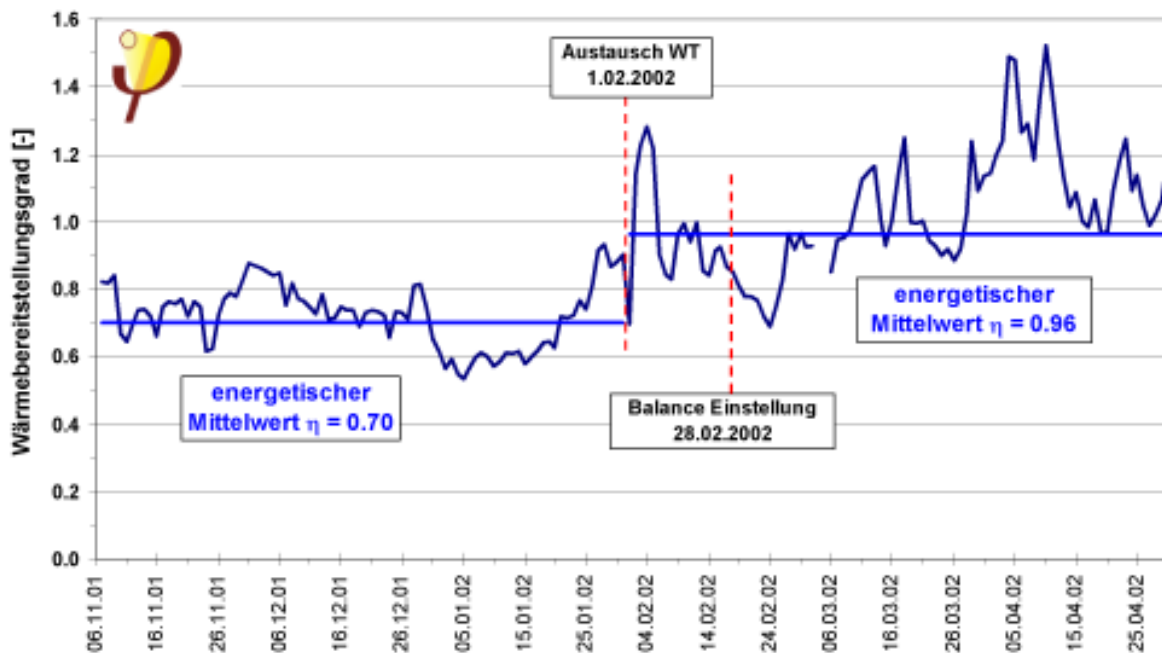


Abb. 100: Effektiver Wärmebereitstellungsgrad der Lüftungsanlage unter Berücksichtigung der Disbalance der Volumenströme und der elektrischen Leistung der Anlage (Motoren und Regelung). Dargestellt ist die Zeit ab 7.11.2001 (Deaktivierung des Bypasses) bis zum Ende der Messperiode am 30.4.2002.

Es ergeben sich tagesmittlere **Wärmebereitstellungsgrade**¹ zwischen 0,5 und 1,5. Im Winterzeitraum vor dem Austausch der Wärmeübertrager beträgt der energetische Mittelwert des Wärmebereitstellungsgrades 0,70, in der Zeit danach 0,96. Der **Austausch hat sich deutlich bemerkbar gemacht**. Die Differenz von im Mittel 26 Prozentpunkten des Wärmebereitstellungsgrades musste - soweit dies möglich war - zuvor durch die Heizregister aufgebracht werden. Die Auswirkungen auf den Heizwärmeverbrauch und das Betriebsverhalten des Gebäudes sind bedeutend.

Die sehr hohen Werte ergeben sich hier nicht durch besonders hohe Wärmeübertragungseigenschaften, sondern durch die Berücksichtigung der hohen Stromverbräuche der Anlage.

Aus messtechnischen Gründen wird der Anteil der Verdampfungsenthalpie des ggf. an den Wärmeübertragern anfallenden Kondensats hier nicht bestimmt. Es ist allerdings anzunehmen, dass der energetische Beitrag verschwindend gering ist und die Gesamtbilanz nicht nennenswert beeinflusst.

Laut Angaben des Herstellers der Lüftungsanlage liegt die „trockene“ **Rückwärmzahl** der Reihenschaltung der beiden Kunststoff-Wärmeübertrager bei 68,5 %. Die Rückwärmzahl der Aluminium-Vorgänger lag laut Angaben des Herstellers bei 63,8 %.



7.2.4 Stromverbrauch

Die Stromverbräuche in dem kombinierten Produktions-, Lager- und Verwaltungsgebäude sind nicht vergleichbar mit denen in einem Wohngebäude. Die Verbräuche wurden getrennt nach Anwendungsbereichen gemessen, welche überwiegend auch die räumlichen Bereiche widerspiegeln:

- Büro/Atrium
- Labor
- Produktion (Rührbehälter, Wärmeschränke, Abwasserverdampfung, usw.)
- Hochregallager
- Lüftungsanlage (inkl. Luftwäscher, Steuerung)

Nicht mit bilanziert werden geringe Stromverbräuche für Anwendungen außerhalb der Gebäudehülle (Außenbeleuchtung, Not-Pumpen), da für die energetische Betrachtung nur Innenanwendungen von Interesse sind. Über den Zeitraum von Januar 2001 bis April 2002 ergeben sich folgende mittleren Monatsverbräuche der drei ersten oben genannten Bereiche:

Büro/Atrium	2,9 MWh/Monat
Labor	2,4 MWh/Monat
Produktion:	16,8 MWh/Monat

¹ Nicht zu verwechseln mit dem „**Wärmerückgewinnungsgrad**“ oder der „**Rückwärmzahl**“, welche die Disbalance und die elektrische Leistung **nicht** berücksichtigt.

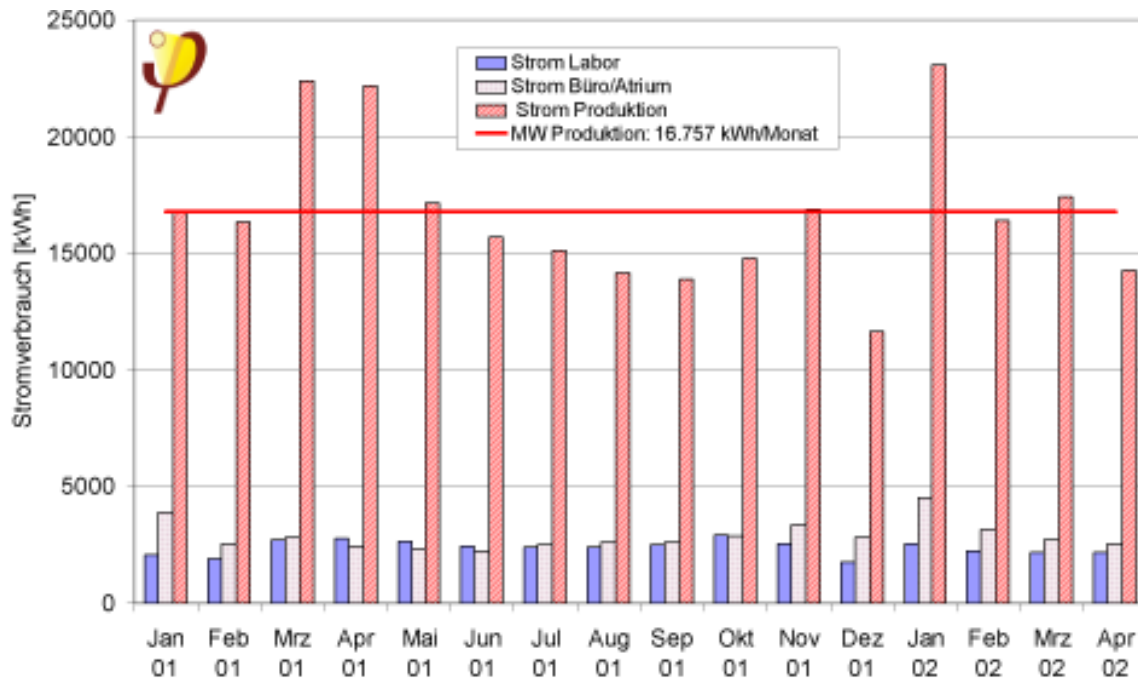


Abb. 101: Monatliche Stromverbräuche vom Bereich Labor, Büro/Atrium und Produktion im Gebäude SurTec von Januar 2001 bis April 2002. Nicht dargestellt sind hier die Verbräuche vom Hochregallager und von der Lüftungsanlage.

Die Bereiche Hochregallager und Lüftungsanlage wurden erst später separat gemessen. Zum einen hatte der Schaltschrankbauer des Projektes den Bereich Lüftungsanlage vorher nicht in die Messung aufgenommen, zum anderen war die Sicherung einer Phase des Zählers für das Hochregallager eine Zeitlang defekt (bis 24.10.01). Ab dem 20. November 2001 liegen alle Daten vor. Die Verläufe der Tageswerte aller Stromverbräuche sind in Abb. 102 abgebildet. Die dominanten Verbräuche kamen von der Produktion und von der Lüftungsanlage.

Der Verlauf der Verbrauchswerte der Lüftungsanlage zeigt, dass diese fast dauerhaft mit konstanter Leistung betrieben wird. Die Balanceeinstellung der Anlage am 28.2.2002 hat durch die Verringerung des Außenluftvolumenstromes zu einem deutlich geringeren Stromverbrauch geführt. Hier ist zu beachten, dass die elektrische Leistung proportional zur dritten Potenz des Volumenstroms ist. Das bedeutet, dass sich eine Veränderung im Volumenstrom sehr stark auf die elektrische Leistung und damit den Energieverbrauch auswirkt.

Die Verbräuche für die Produktion sind stark abhängig vom jeweiligen Produktionsbetrieb und vom Wochentag (Arbeitstag oder Betriebspause) und schwanken stark. Die einzelnen Abnehmer stellen jeweils hohe Verbraucher dar, z. B. die beiden elektrischen Wärmeschränke (Nennleistung je 12,4 kW), die sieben Rührbehälter, die Prozesswasser-Eindampfungsanlage (Anschlussleistung 12 kW) oder der Druckluftkompressor. Die Wochenenden und die Weihnachts-/Neujahrspause machen sich in den Verbräuchen deutlich als Senken bemerkbar.

Auffällig sind auch die hohen Stillstand- oder Standby-Verbräuche z. B. in der Winterpause. So verbraucht die Technik für das Hochregallager dauerhaft 79 kWh/Tag, obwohl keine Waren bewegt werden. Ohne diese Betriebspause werden sonst im Durchschnitt 143 kWh/Tag im Lager verbraucht, also etwa nur das 1,8-fache des Leerlaufverbrauchs. An diesem Beispiel kann abgelesen werden, dass die hocheffiziente Technik in diese Bereiche der Industrie noch wenig Eingang gefunden hat.

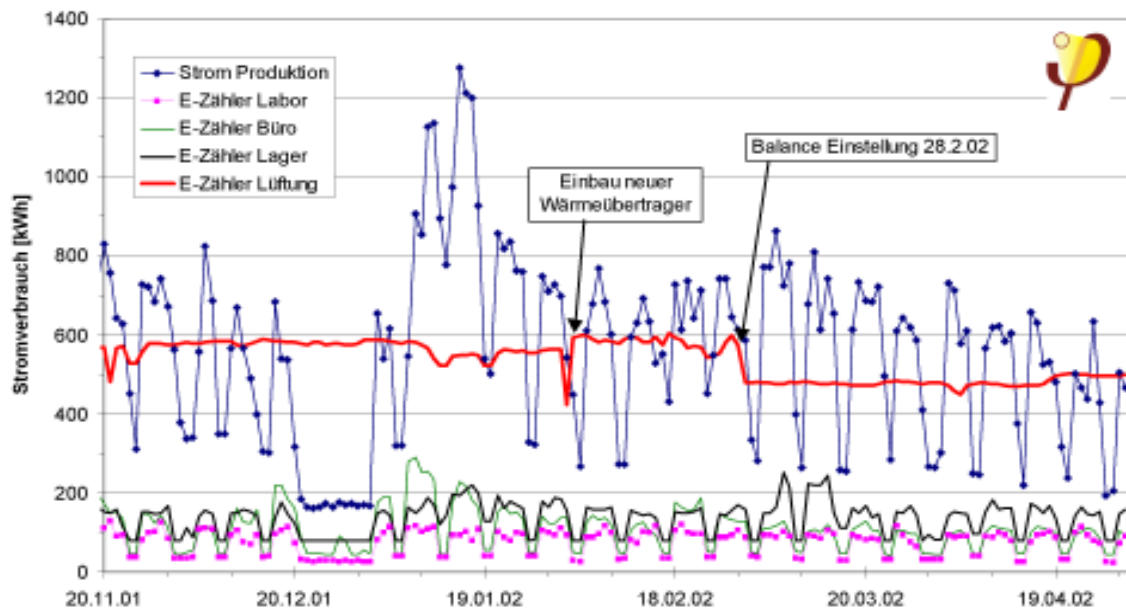


Abb. 102: Aufteilung der Stromverbräuche in der Zeit vom 20. November 2001 bis 30. April 2002.

Die monatlichen Verbräuche aller fünf Bereiche sind für die Zeit Dezember 2001 bis April 2002 in Abb. 103 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Stromverbrauch der Produktion mit durchschnittlichen 16,5 MWh/Monat nur geringfügig über dem Verbrauch der Lüftungsanlage von 16,2 MWh/Monat liegt. Im Lager werden monatlich im Durchschnitt 4,1 MWh/Monat verbraucht.

Im Dezember liegt der Stromverbrauch der Produktion deutlich niedriger, da sich dort die Weihnachts-/Jahreswechsel-Pause auswirkt. Ohne die Lüftungsanlage zu berücksichtigen liegen die Stromverbräuche des gesamten Gebäudes bei etwa 77 kWh/(m² a). Zur Einschätzung der Größenordnung - ein Vergleich macht hier keinen Sinn - sei hier erwähnt, dass der deutsche Haushaltsstromverbrauch bei etwa 32 kWh/(m²a) liegt.

Die Lüftungsanlage mit Regelung und vorgeschaltetem Luftwäscher bezieht im Durchschnitt - seit der Balanceeinstellung am 28.2.2002 - eine Leistung von 20,02 kW. Damit kann ein Jahresverbrauch von etwa 175.300 kWh/a oder 43 kWh/(m²a) erwartet werden. Wie bereits diskutiert, ist dies ein für energieeffiziente



Lüftungen untolerierbar hoher Wert. Hier soll noch kurz dargestellt werden, auf welchem Weg sich hier bessere Kennwerte erreichen lassen:

Wenn die Lüftungsanlage von vornherein auf einen Dauerbetrieb mit den hier gemessenen Luftvolumenströmen projiziert worden wäre, hätte man die Querschnitte der Kanäle deutlich größer auslegen müssen: Bei jeweils um 50 % größerem Durchmesser der Leitungen (entsprechend 2,25fach größerem Querschnitt) ergeben sich bei gleichem Volumenstrom bei der vorliegenden turbulenten Strömung Strömungswiderstände, die proportional zu v^2 , also um einen Faktor 5 geringer sind. Der Förderenergieaufwand nimmt entsprechend ab und liegt dann noch bei $0,33 \text{ Wh/m}^3$, also im empfohlenen Bereich für energieeffiziente Lüftungsanlagen. Bei Verwendung der selben Ventilatoren entstünde dadurch auch eine Luftmengenreserve für besondere Belastungsfälle. Diese Betrachtung zeigt, dass bei rechtzeitiger integraler Planung selbst in dem hier vorliegenden Fall eine energieeffiziente Lösung erreichbar wäre. Eine nachträgliche Verbesserung der Anlage auf diesem Weg ist allerdings mit vertretbarem Aufwand nicht möglich.

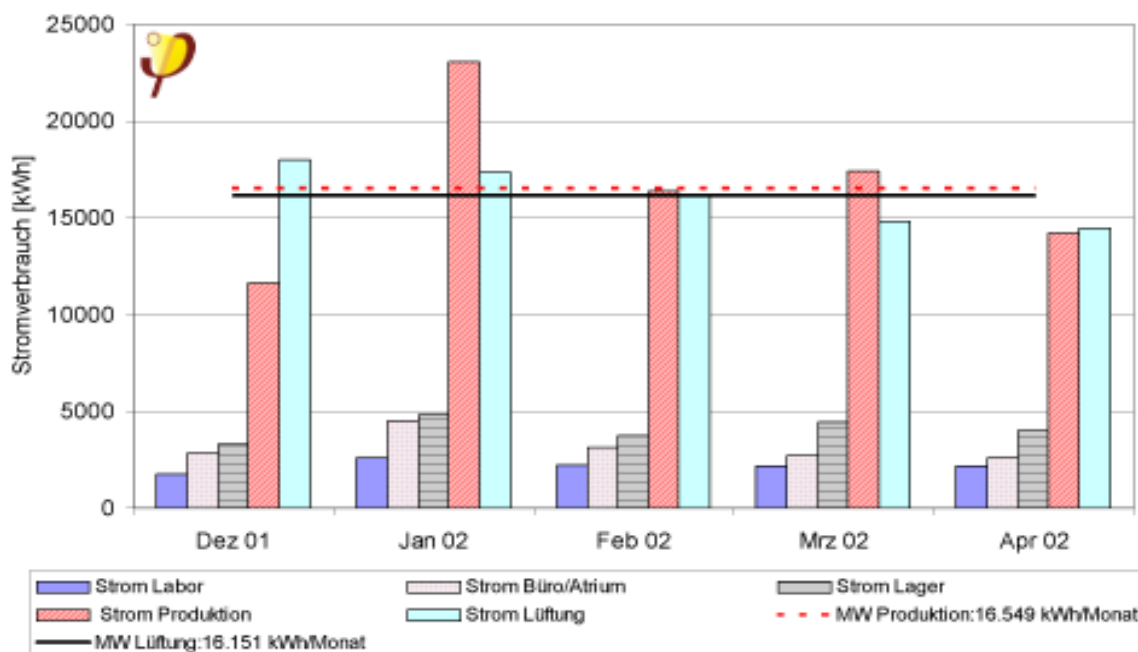


Abb. 103: Monatliche Stromverbräuche aller Bereiche im Gebäude SurTec von Dezember 2001 bis April 2002.



7.2.5 Innere Wärmequellen

Zu den inneren Wärmequellen (IWQ) in einem Gebäude tragen insbesondere die Stromverbräuche und die Personen bei. Diese Quellen führen dem Gebäude Wärmeenergie zu, welche einen Teil Raumwärmeverluste ausgleicht. Beim Fabrikgebäude SurTec wurde - bedingt durch den Produktionsbetrieb - mit erhöhten Werten gerechnet. Wie eine große Zahl ausgewerteter Passivhäuser gezeigt hat, liegt der Wert mit $2,1 \text{ W/m}^2$ für den herkömmlichen Passivhaus-Wohnungsbau in realistischer Höhe. Bei der Projektierung für das SurTec Gebäude [Schwertfeger 2000] wurde eine spezifische Leistung der IWQ von durchschnittlich $8,2 \text{ W/m}^2$ ermittelt.

An Hand der Messdaten und näheren Informationen von der Betreiberfirma werden die IWQ hier noch einmal im Nachhinein ermittelt. Dabei sind Material- und Energieströme von Interesse, welche die Bilanzgrenze „Gebäudehülle“ überschreiten. Zusätzlich müssen in einem solchen Unternehmen auch die chemischen Reaktionen im Gebäude berücksichtigt werden (exo- und endotherme Reaktionen in der Produktion).

Die Größen wurden einzeln aus den Messdaten ermittelt oder nach den Angaben der Firma berechnet. Dabei wurden für die Messdaten Mittelwerte berechnet und andere Angaben wurden zu Dauerleistungen auf alle Wochentage umgerechnet, auch wenn sie z.T. nur an Werktagen auftreten.

		[W/m ²]
positiv:	Stromverbrauch: Lager, Produktion (inkl. Vorwärmschränke, Abwasserverdampfung), Büro (inkl. Atrium, Serverraum, Küche)	8,76
	Produktionswärme: Vorwärmraum, Erwärmung Rührbehälter, Warmwasser Produktion (WMZ 1, 3 und 4)	1,50
	Leitungs- und Verteilverluste (zwischen den WMZ)	0,64
	Endotherme Reaktionen Rührbehälter	nicht relevant
	Exotherme Reaktionen Rührbehälter	1.87
	Wärmeabgabe Personen (40 Personen, nach Anwesenheit in der Arbeitszeit)	0.77
negativ:	Passive Erwärmung des Kaltwassers (nur Produktion) auf Raumtemperatur	-2.6
	Anlieferung von Substanzen 7 bis 10 t/Werhtag	-1.3
	Verdunstung Pflanzenbewässerung (100 Liter/Tag)	-2.6
	Bilanz	7,0

Tabelle 14: Aufstellung der relevanten Einzelgrößen zur Bilanzierung der inneren Wärmequellen des Gebäudes SurTec.



Der Stromverbrauch der Lüftungsanlage zählt nicht zu den inneren Wärmequellen. Er wird beim Wärmebereitstellungsgrad des Lüftungsgerätes bilanziert (siehe Abschnitt 7.2.3).

Das Ergebnis von $7,0 \text{ W/m}^2$ liegt niedriger als die im Vorfeld bei der Projektierung angesetzten $8,2 \text{ W/m}^2$. Gegenüber dem beim Wohnungsbau üblichen Wert liegt allerdings eine Verdreifachung vor.

Die Bestimmung der inneren Wärmequellen bezieht sich beim Stromverbrauch auf den Zeitraum 23. Oktober 2001 bis Ende April 2002. In der Zeit davor war der Stromzähler „Lager“ zeitweise defekt, sodass eine stromseitige Bilanzierung nicht möglich war.

Derartig hohe IWQ führen automatisch zu einer Reduktion des Heizwärmeverbrauchs.

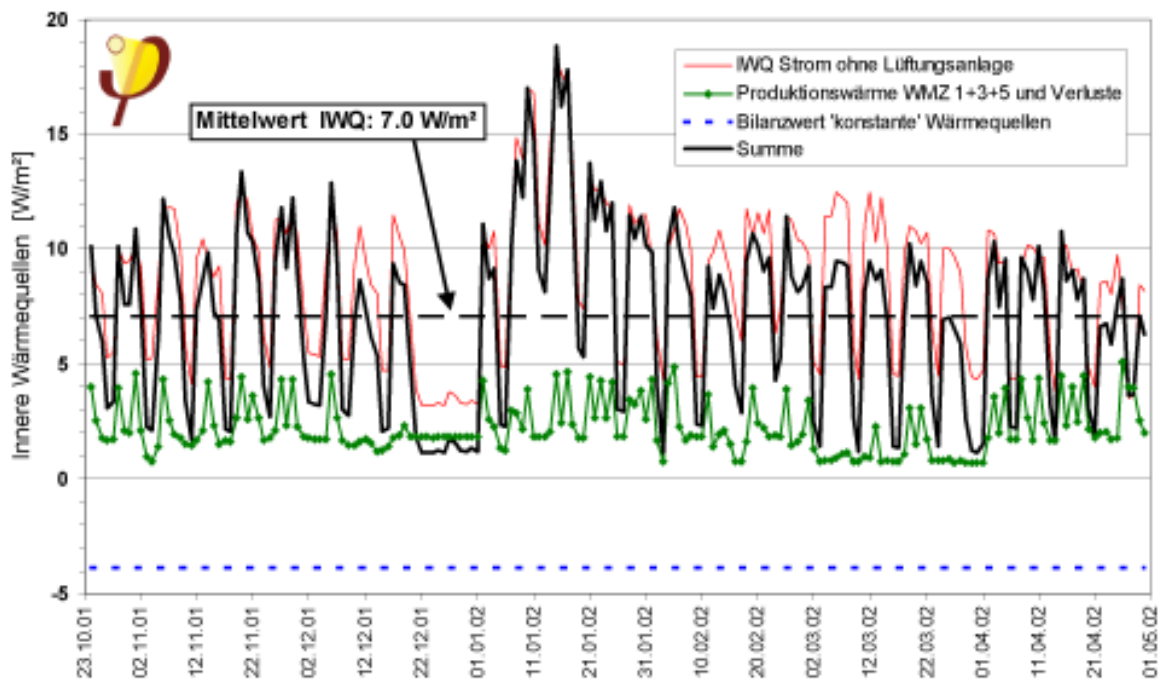


Abb. 104: Innere Wärmequellen in der Zeit vom 24. Oktober 2001 bis zum 30. April 2002 (Tageswerte). Die als zeitkonstant angesehenen Wärmequellen wurden bilanziert und ergaben einen negativen Wert (dominant: Kaltwassererwärmung und Verdunstung Pflanzenbewässerung) .

7.2.6 Primärenergie

Zur Bewertung der Energieverbräuche werden die unterschiedlichen Energieträger bilanziert und nach ihrer „Herstellungsenergie“ (Primärenergie) bewertet.

Im Gebäude der Firma SurTec werden als Energieträger nur Erdgas und Strom verwendet. Erdgas wird zur Erzeugung von Prozesswärme inkl. der Warmwasserbereitung (hauptsächlich auch für Produktionsprozesse) und Raumwärme verwendet. Strom wird benötigt für die Anwendungen: Produktionsbetrieb, Lüftungsanlage, Büro inkl. Atriumbeleuchtung und Küche, Laborbetrieb und Lagertechnik. Der Stromverbrauch gibt direkt die eingesetzte Endenergie an.

Für die Darstellung in Abb. 105 wurden die in den oberen Abschnitten aus den Messwerten berechneten Endenergiemengen verwendet. Dabei wurden die Daten des Messjahres Mai 2001 bis April 2002 verwendet. In Ausnahmefällen, wenn die Daten nicht vollständig für diesen Zeitraum vorlagen (Stromverbrauch Lager und Lüftungsanlage, siehe dazu Abschnitt „Stromverbrauch“), wurden die Daten auf den Gesamtzeitraum hochgerechnet. Der größte Endenergieverbrauch wird für Wärmeerzeugung eingesetzt (Erdgasverbrauch), gefolgt vom Stromeinsatz der Bereiche Produktion und Lüftung.

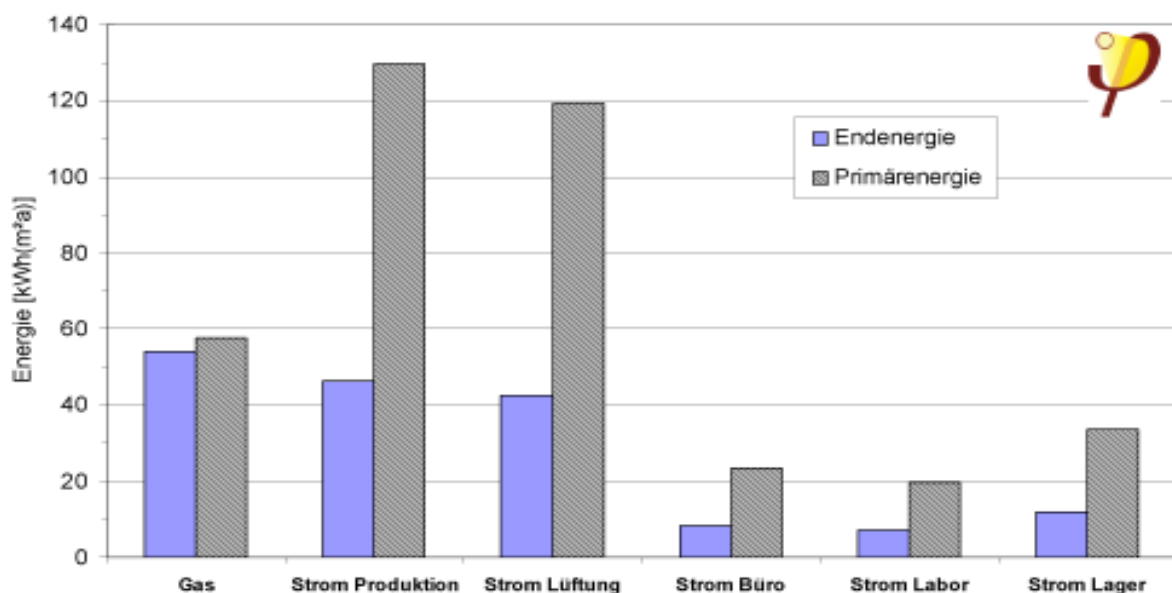


Abb. 105: Spezifische End- und Primärenergieverbräuche der unterschiedlichen Bereiche des SurTec Gebäudes in der Zeit von Mai 2001 bis April 2002. Der Gasverbrauch wird zur Wärmeerzeugung für Raum- und Prozesswärme (inkl. Warmwasserbereitung) verwendet.

Die ebenfalls dargestellten Primärenergieverbräuche der jeweiligen Anwendungsbereiche wurden mit den Faktoren nach den SolarBau Vorgaben (Faktor für Strom $2,8 \text{ kWh}_{\text{Prim}}/\text{kWh}_{\text{End}}$) und GEMIS 4.0 (Faktor für Gas $1,07 \text{ kWh}_{\text{Prim}}/\text{kWh}_{\text{End}}$) bewertet [Gemis]. Diese Bewertung spiegelt den primärenergetischen Unterschied der



Energieträger wieder. Die dominanten Verbräuche des Unternehmens liegen somit deutlich beim Stromverbrauch für die Aufwendungen „Produktion“ und „Lüftung“. Der primärenergetische Bedarf für die Produktions- und Heizwärme tritt somit in den Hintergrund. Die Werte im Einzelnen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

[kWh/(m ² a)]	Gas	Strom Produktion	Strom Lüftung	Strom Büro	Strom Labor	Strom Lager
Endenergie	54.0	46.3	42.6	8.4	7.0	12.0
Primärenergie	57.8	129,7	119,3	23,4	19,7	33,5

Tabelle 15: Daten zu Abb. 105.

Der Gasverbrauch wird in Abb. 106 den beiden Anwendungsbereichen Heiz- und Produktionswärme (inkl. Warmwasser) zugeordnet. Dazu werden vereinfacht die Anteile der beiden Bereiche an der gesamten erzeugten Wärmemenge (WMZ 1 + 2 + 9) berechnet. Als dritte Größe ist die Differenz zwischen der erzeugten Wärmemenge und den Wärmemengenzählern der beiden Anwendungsbereiche zu berücksichtigen. Diese Differenz stellt die Leitungs- und Verteilverluste dar, die sich durch das Hydrauliknetz und die Pufferspeicher ergeben. Die Verluste können nicht eindeutig den beiden einzelnen Bereichen zugeordnet werden und werden daher separat aufgeführt. Mit den so berechneten jahresmittleren Anteilen (Heizung 61,4 %, Produktion + WW-Erzeugung 27,9 % und Verluste 10,7 %) wird der Gasverbrauch aufgeteilt und ebenfalls primärenergetisch bewertet.

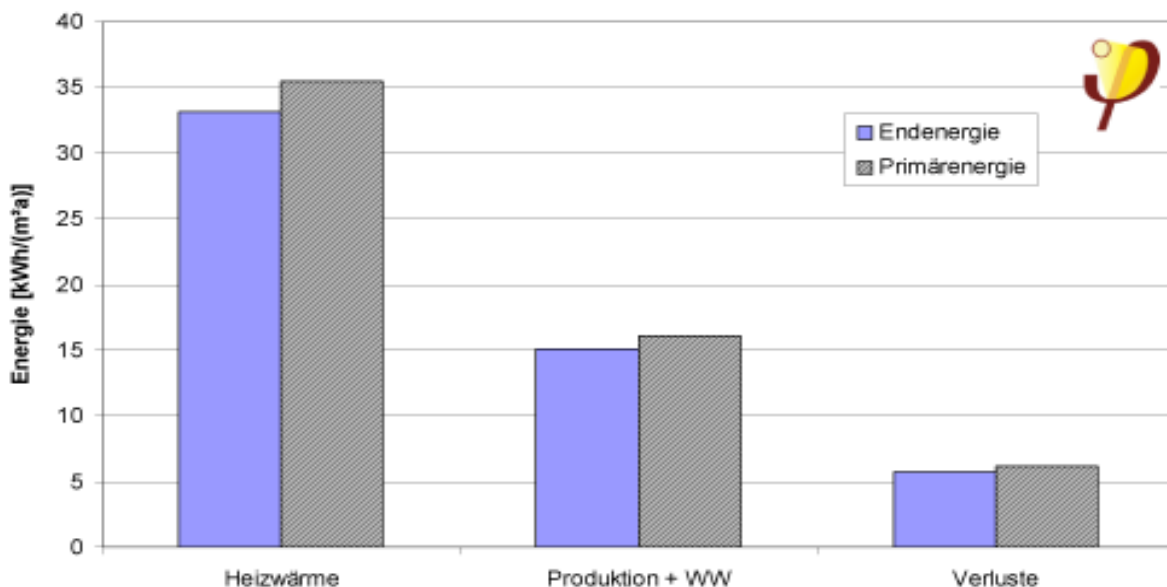


Abb. 106: Aus dem gesamten Gasverbrauch (Mai 2001 bis April 2002) anteilig berechnete Verbräuche für die Bereiche Heizwärme, Produktion (inkl. Warmwasserbereitung) und Verluste, dargestellt als spezifische End- und Primärenergiekennwerte.

Es ergeben sich die folgenden spezifischen Werte:

[kWh/(m ² a)]	Heizwärme	Produktion + Warmwasser	Verluste
Endenergie	33.1	15.1	5.8
Primärenergie	35.4	16.1	6.2

Tabelle 16: Daten zu Abb. 106

Die SolarBau-Anforderungen für den Heizwärmeverbrauch von ≤ 40 kWh/(m²a) werden trotz Sommerheizung, defektem Wärmeübertrager und fehlender Feinregelung der Gebäudetechnik eingehalten. Sogar der Endenergieverbrauch für die Heizung beträgt nur 33,1 kWh_{End}/(m²a). Die Grenze von ≤ 40 kWh/(m²a) wird sogar unterschritten, wenn die Verluste noch anteilig dem Endenergieverbrauch zugeordnet werden. Grund dafür sind neben der eingesetzten Technik und der guten Gebäudehülle auch die produktionsbedingten hohen inneren Wärmequellen.

Die hohen Luftwechselraten und die damit verbundenen hohen elektrischen Leistungen der Anlage sind nur aufgrund des Produktionsbetriebs erforderlich. Zum Erreichen des Passivhausstandards wäre eine deutlich kleinere Anlage zum Einsatz gekommen. Daher ist eine klare Zuordnung der Endenergieverbräuche der Lüftungsanlage zum Gebäude- oder zum Produktionsbetrieb für dieses kombinierte Büro-, Lager- und Produktionsgebäude nicht möglich.

Die Daten der Heizperiode mit dem Betrieb der ausgewechselten Wärmeübertrager wurden hier NICHT berücksichtigt. In dieser liegen die Erdgasverbräuche für die Heizwärme noch deutlich niedriger (siehe Abschnitt 7.2.2.2).

Es ist auch nicht möglich, die weiteren SolarBau-Anforderungen bezüglich des Energieverbrauches detailliert zu überprüfen. Wenn die Endenergiebeträge „Heizwärme“ und „Strom Lüftung“ addiert werden - die anderen sind eindeutig dem Produktionsbetrieb zugehörig - ergibt sich als Summe 75,7 kWh_{End}/(m²a). In der Betrachtung fehlt die elektrische Hilfsenergie für Pumpen und Heizkessel (wurde bei „Strom Produktion“ bilanziert). Der Energieverbrauch für die Beleuchtung im Bürobereich (ohne die Atriumbeleuchtung) wurde in einer Sondermessung in drei Büros vom 21. Februar 2002 bis zum 16. Mai 2002 separat gemessen. Ausgehend vom Mittelwert der Lampenstromverbräuche während dieser Zeit und der Anzahl aller Lampen in den belegten Büros ergibt sich ein hochgerechneter Jahresverbrauch von etwa 1160 kWh/a. Dies entspricht nur 3 % des gesamten Jahresstromverbrauchs für den Büro-/Atriumbereich, bzw. 2,0 kWh/(m²a) auf die Bürofläche bezogen und 0,3 kWh/(m²a) auf die Gebäudefläche bezogen. Bei der Überprüfung der Einhaltung der SolarBau-Grenzwerte fallen diese Beleuchtungs-Stromverbräuche nicht ins Gewicht. Im Bürobereich stehen die Verbräuche für die Datenverarbeitungsanwendungen (PC, Drucker, Server, etc.) deutlich im Vordergrund

Die Grenze für den Gesamt-Endenergieverbrauch (inkl. Heizwärme) beträgt für die SolarBau-Projekte ≤ 70 kWh/(m²a). Es ist also eine Frage der Zuordnung bzw.



Aufteilung des Stromverbrauchs der Lüftungsanlage, ob dieses Kriterium als eingehalten gelten kann. Das gleiche gilt für den Primärenergiebedarf (Grenzwert $\leq 100 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$).

[kWh/(m ² a)]	Endenergie	Primärenergie
Heizwärme	33.1	35.4
Strom Lüftung	42.6	119.3
Summe	75.7	154.7
SolarBau Grenze	≤ 70	≤ 100

Tabelle 17: End- und Primärenergieverbräuche im Bezug zu den SolarBau-Anforderungen. Es wurde hier die gesamte Energie für die Lüftungsanlage angerechnet, obwohl nur ein kleiner Teil für den Gebäudebetrieb ohne chemische Produktion notwendig wäre.

7.3 Erdreichwärmeübertrager

Das Gebäude verfügt über einen Erdreichwärmeübertrager (auch als Erdreichwärmetauscher „ERWT“ oder Erd-Luft-Register bezeichnet) der als Ansaugkanal und gleichzeitig zur thermischen Vorkonditionierung der Frischluft eingesetzt wird. Er wird das ganze Jahr über kontinuierlich betrieben, eine Umgehungsmöglichkeit („Bypass“) für die Frischluftzuführung ist nicht realisiert worden. Die Luftansaugung mit frontständigem Filtern befindet sich im Norden außerhalb des Gebäudes im östlichen Bereich neben der Ladezone. Von dem Ansaugbauwerk führen 5 Betonrohre mit je 600 mm Durchmesser und 0,55 m lichtem Rohrabstand durch das Erdreich zur Einführung in das Gebäude im Technikkeller. Vor der Einführung in das Gebäude befindet sich ein Sammelschacht, an dem die fünf Rohre enden. Diese sind im Mittel 59,3 m lang und mit 1,1 m Gefälle zum Sammelschacht hin verlegt (1,9 %). Nach halber Rohrstrecke sind die Rohre im Winkel von 45° angeordnet worden. Ein knappes Drittel der Rohrstrecke befindet sich unter der Bodenplatte des Gebäudes (Atrium/Büro- Bereich). Ein längerer Erdkanal konnte bei den Grundstücksgrenzen nicht realisiert werden. Das zentrale Lüftungsgerät mit Wärmetauscher im Technikkeller saugt die Luft mittels des Frischluftventilators durch die Erdkanäle an.



Abb. 107: Erdreichwärmeübertrager im Bau. Erste Rohrabschnitte am Ansaugbauwerk (Foto M. Zimmer)

Die wichtigsten technischen Daten des Erdkanals lauten:

Anzahl Kanäle	5
Material	Beton
Gesamtlänge	296,6 m
Einzelrohrlänge	3 m
Nennweite	600 mm
Mittlere Tiefe (unter Geländeoberkante)	3,5 m
Lichter Rohrabstand	0,55 m
Oberfläche	559 m ²
Maximaler Volumenstrom	17000 m ³ /h
Nennvolumenstrom Planung	16000 m ³ /h
Spez. Tauscherfläche Nennvolumenstrom	0,035 m ² /(m ³ h ⁻¹)
Luftgeschwindigkeit bei Nennvolumenstrom	3,1 m/s

Durch den Balanceabgleich der Lüftungsanlage am 28. Februar 2002 ergeben sich zwei Bereiche der gemessenen Betriebsdaten für die Zeit vor und nach der Einstellung:

Betriebsdaten vor Balanceeinstellung:

Mittlerer Frischluft-Volumenstrom	14760 m ³ /h
Spez. Tauscherfläche Betrieb	0,038 m ² /(m ³ h ⁻¹)
Mittlere Luftgeschwindigkeit	2,9 m/s

Betriebsdaten nach Balanceeinstellung:

Mittlerer Frischluft-Volumenstrom	11570 m ³ /h
Spez. Tauscherfläche Betrieb	0,048 m ² /(m ³ h ⁻¹)
Mittlere Luftgeschwindigkeit	2,3 m/s



7.3.1 Messdatenauswertung Erdreichwärmeübertrager

Für die energetische Beurteilung des Erdreichwärmeübertragers wird als ERWT-Eintrittstemperatur ϑ_{ein} die Außenlufttemperaturmessung am Wettermast verwendet. Die Abweichungen zur realen ERWT-Eintrittstemperatur werden aufgrund der geringen Entfernung als vernachlässigbar eingeschätzt. Als ERWT-Austrittstemperatur ϑ_{aus} wird die Temperaturmessung „Frischlufte vor dem Lüftungsgerät“ verwendet. Diese wird direkt nach Eintritt des Frischluftrohres in den Technikkeller im Luftstrom gemessen. Zur Bestimmung der theoretisch maximalen Leistung des ERWT wird die ungestörte Erdreichtemperatur ϑ_{erd} benötigt. Da diese mit vertretbarem Aufwand nicht messtechnisch erfasst werden konnte, wurde dazu eine Simulation der Erdreichtemperatur durchgeführt, welcher die gemessenen Außenlufttemperaturen zugrunde gelegt sind (Tiefe = 3,5 m, schwere Erde feucht, Wärmeleitfähigkeit $\lambda = 1,3 \text{ W/(mK)}$). Außerdem wurden die gemessenen Volumenströme (Druckdifferenzmessung, siehe Abschnitt 6.2.7) verwendet.

Für die Auswertung des ERWT werden z.T. die Beispielauswertungen [Reise/Pfafferott 2001] mit der Ergänzung der [AG EWT 2002] verwendet.

7.3.1.1 Temperaturverläufe

Den zeitlichen Verlauf der drei Temperaturen als Stunden- bzw. Tagesmittelwerte zeigen die beiden folgenden Grafiken:

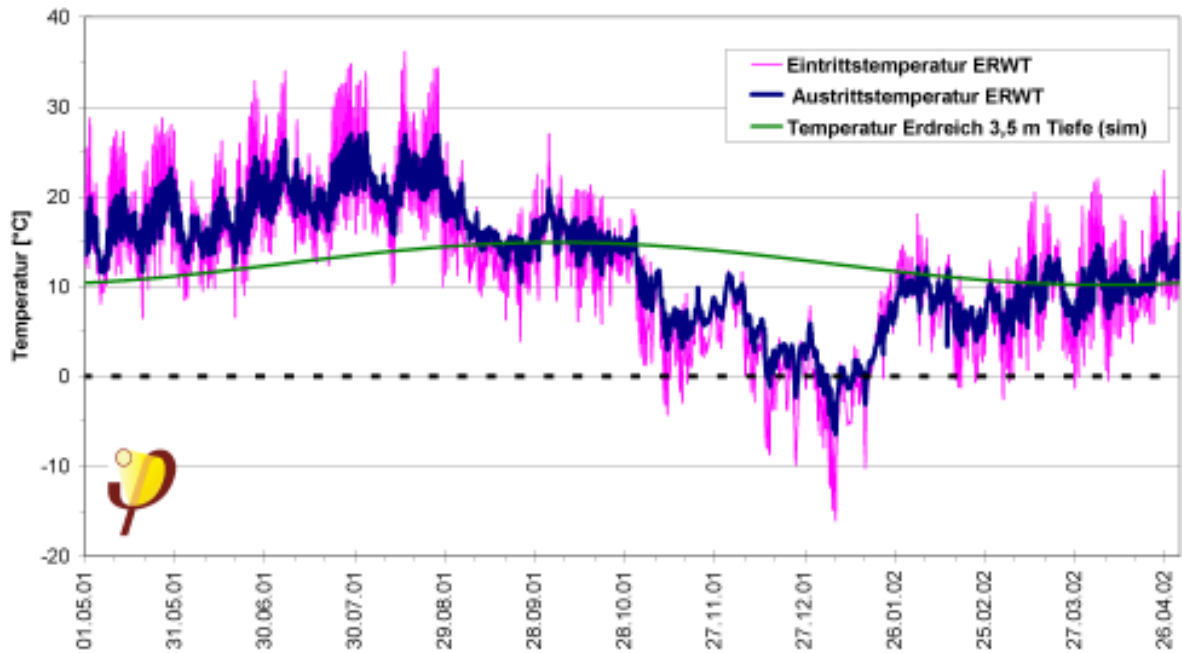


Abb. 108: Stundenmittelwerte der Ein- und Austrittstemperaturen des ERWT sowie der ungestörten simulierten Erdreichtemperatur in 3,5 m Tiefe im Zeitraum 1.5.01 bis 30.4.02.

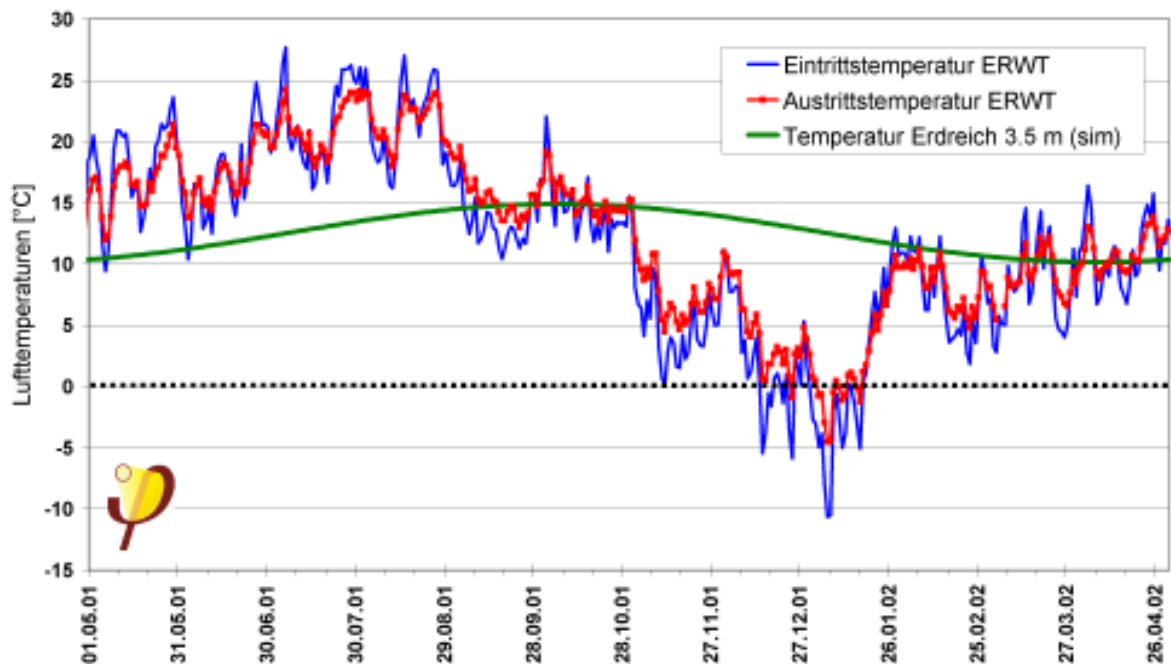


Abb. 109: Tagesmittelwerte der Ein- und Austrittstemperaturen des ERWT sowie der ungestörten simulierten Erdreichtemperatur in 3,5 m Tiefe im Zeitraum 1.5.01 bis 30.4.02.

Die Tagesmittelwerte in Abb. 109 lassen den Verlauf der saisonalen Heiz- und Kühleffekte des ERWT besser erkennen. Die stündlichen Daten sind in Abb. 108 dargestellt, sie lassen in diesem Maßstab allerdings vor allem die starke tageszeitliche Schwankung erkennen. Die Unterschiede zwischen der Sommer- und der



Winterzeit sind erkennbar: Im Sommer liegen - wie erwartet - die Eintrittstemperaturen meist über den Austrittstemperaturen, der Erdkanal kühlt überwiegend. Im Winter ist es umgekehrt, der Kanal erwärmt die Luft meistens. Allerdings ist auch zu erkennen, dass die Austrittstemperaturen nicht immer über 0 °C liegen. Bei niedrigen Außenlufttemperaturen gibt es längere Zeiträume mit negativen Temperaturen der Frischluft beim Eintritt in den Technikraum. Durch den relativ klein dimensionierten Erdkanal kann die Frostfreiheit der Luft vor dem Wärmetauscher nicht gewährleistet werden. Wie oben beschrieben, konnte ein längeren Kanal auf dem Grundstück jedoch nicht realisiert werden. Ein Problem (Einfrieren) für das Lüftungsgerät bestand allerdings nicht, da zum einen die Abwärme des Frischluftventilators für einen Temperaturhub sorgt und zum anderen der zweiteilige Wärmeübertrager keine besonders effiziente Wärmerückgewinnung realisiert.

Zur Beurteilung des ERWT sind die Temperaturdifferenzen zwischen der Aus- und der Eintrittstemperatur entscheidend. Ist die Differenz positiv, erwärmt der Erdkanal die Frischluft, ist sie negativ, kühlt er die Luft. Die Darstellung der Jahreswerte zeigen Abb. 110 und Abb. 111.

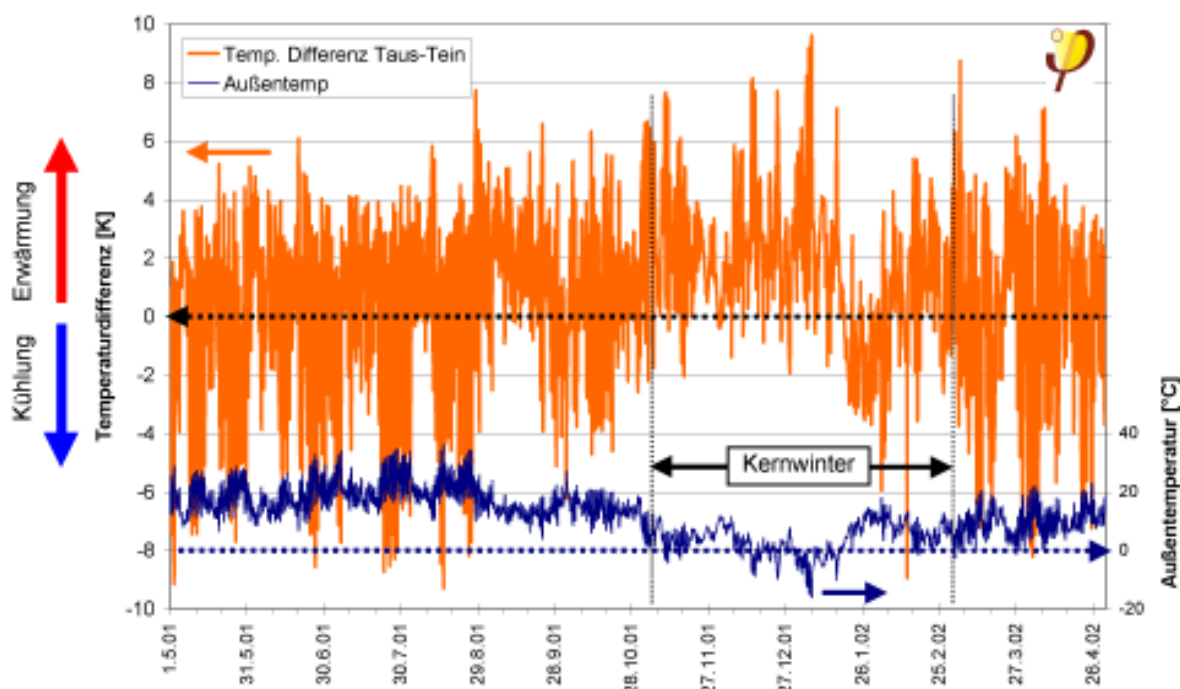


Abb. 110: Temperaturdifferenz zwischen der Aus- und der Eintrittstemperatur des ERWT im Messjahr vom 1.5.01 bis zum 30.4.02 als STUNDENMITTELWERTE. Positive Differenzen stellen Zeiten der Lufterwärmung im ERWT, negative Differenzen der Luftkühlung dar. Dargestellt sind außerdem die Außenlufttemperaturwerte. Der Kernwinter (1.11.01 bis zum 28.2.02) ist gesondert gekennzeichnet.

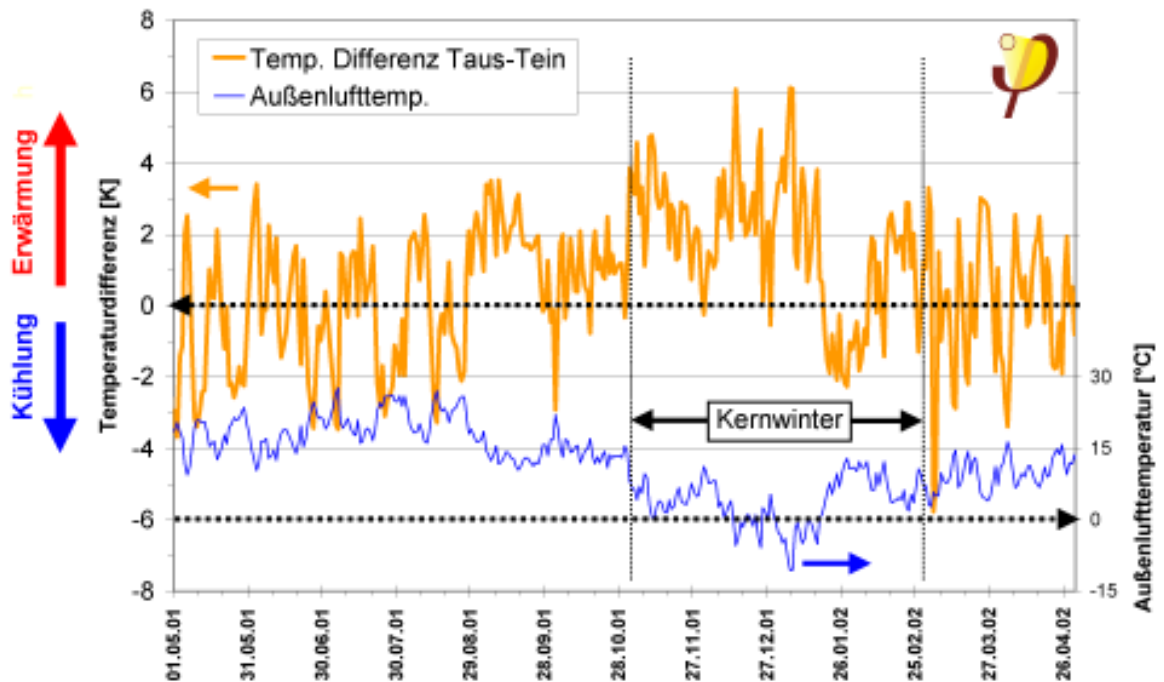


Abb. 111: Temperaturdifferenz zwischen der Aus- und der Eintrittstemperatur des ERWT im Messjahr vom 1.5.01 bis zum 30.4.02 als TAGESMITTELWERTE sowie die Außenlufttemperatur. Im Vergleich zur vorhergehenden Abbildung zeigen die Tagesmittelwerte klarer den saisonalen Temperaturdifferenzverlauf.

Der Verlauf der Temperaturdifferenzen bestätigt die Tendenz, dass im Winter die Erwärmung der Luft überwiegt und im Sommer die Kühlung. Insbesondere in der Übergangszeit im Frühjahr ist die Verteilung auf den Kühl- und Heizbereich allerdings relativ gleich groß. Der maximale negative Temperaturhub aller ERWT-Kühlstunden mit $-9,3\text{ K}$ ist am 15.8.01 bei einer ebenfalls maximalen Außentemperatur von $36,2^\circ\text{C}$ festgestellt worden. Der maximale positive Temperaturhub aller ERWT-Heizstunden wurde mit $9,6\text{ K}$ am 6.1.02 bei einer Außentemperatur von -15°C gemessen. Im Mittel liegt der Temperaturhub aller Heizstunden bei $2,4\text{ K}$ und aller Kühlstunden bei $-2,5\text{ K}$.

Der Bypass der beiden Wärmeübertrager im Lüftungsgerät war in der Zeit vom 31.7. bis zum 6.11.2001 aktiviert. An diesen Tagen wurde die Frischluft nach dem Erdkanal nicht durch die Wärmerückgewinnung geführt. In dieser Zeit lag der mittlere negative Temperaturhub der ERWT-Kühlstunden bei $2,3\text{ K}$. Allerdings wurde und wird dieser Kühlbeitrag durch die Abwärme des Ventilators im Mittel wieder zunichte gemacht. Die Abschätzung des Temperaturhubs der Frischluft durch den Stromverbrauch des Frischluftventilators beträgt beachtliche $2,9\text{ K}$ (Leistung Frischluftventilator $11,9\text{ kW}$, Volumenstrom $11570\text{ m}^3/\text{h}$). Davon wird ein Teil direkt am Motor in Wärme umgesetzt (Wirkungsgrad Motor) und der restliche Teil, welcher durch den Ventilator in kinetische Energie umgewandelt wird, wird über Reibungsverluste letztlich auch als Wärme an die Frischluft bzw. das Gebäude abgegeben. Es ist damit offensichtlich, dass der Einsatz von effizienteren Ventilatoren und einem druckverlustarmen Kanalnetz mit deutlich geringerer Stromaufnahme auch bezüglich der



sommerlichen Behaglichkeit notwendig wäre. Ohne die Kühlleistung des ERWT würde allerdings die Ventilatorabwärme dem Gebäude unkompensiert zugeführt werden.

Der Temperaturhub des Erdkanals kann auch gut in der direkten Darstellung der Aus- über der Eintrittstemperatur dargestellt werden. Die Gerade gleicher Temperaturen („Winkelhalbierende“) teilt die Darstellung in einen Heiz- und einen Kühlbereich.

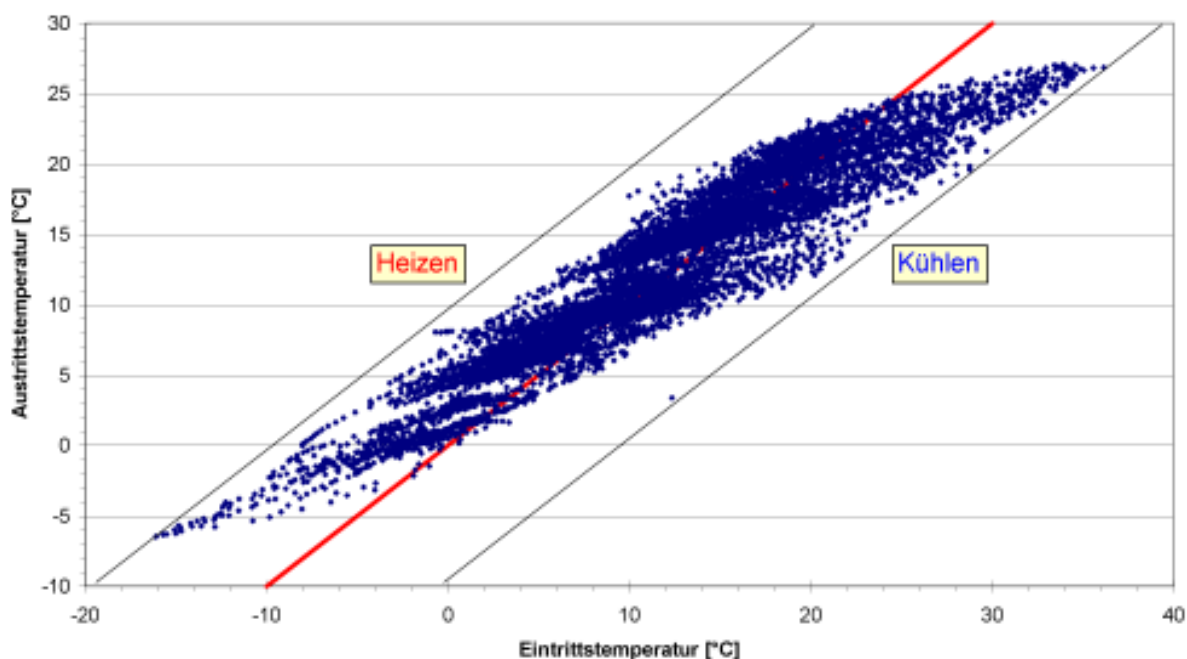


Abb. 112: Stundenmittelwerte der Austritts- über der Eintrittstemperatur des ERWT in der Zeit vom 1.5.01 bis zum 30.4.02. Die Winkelhalbierende teilt die Daten in einen Heiz- und einen Kühlbereich. Die beiden Grenzgeraden markieren den maximalen positiven und negativen Temperaturhub.

Zum Teil ist eine zusammenhängende (linienhafte) Struktur der Messpunkte erkennbar. Diese entsteht durch die Temperaturdämpfung der im jeweiligen Tagesverlauf veränderten Eintrittstemperatur, da sich die Erdreichtemperatur im Tagesverlauf kaum merklich verändert. Je steiler eine solche „Tagesgerade“ verläuft (je stärker der Erdkanal auf die Eintrittstemperatur reagiert), desto stärker arbeitet der ERWT an der „Leistungsgrenze“. Ein theoretisch unendlich langer Kanal würde die Lufttemperatur der Erdreichtemperatur angleichen, was hier als maximal mögliche Leistung eines Erdkanals angesehen wird. Eine Auslegung unter rein energetischen Gesichtspunkten würde auf nahezu horizontale Linien führen. Ein so ausgelegter Erdkanal würde bei schwankenden Eintrittstemperaturen nahezu gleiche Austrittstemperatur erreichen. An der Grafik können als Schnittpunkt mit den beiden Grenzgeraden auch die Extremwerte der maxi- und minimalen Temperaturhübe abgelesen werden (siehe oben). Im Kühlbereich ist zu erkennen, dass zu der maximalen Eintrittstemperatur (36,2 °C) etwa auch die maximalen Austrittstemperatur gehört.

Alle Stundenwerte in Abb. 112, welche unter der 0 °C-Austrittshorizontalen liegen, zeigen die Stunden an, in denen der ERWT die Frostfreiheit der Frischluft nicht gewährleisten konnte.

Bei der Darstellung der Temperaturdifferenzen über der Eintrittstemperatur in Abb. 113 können die Extremwerte der Temperaturhöhe (+9,6 und -9,6) leicht abgelesen werden. Der Mittelwert der positiven Temperaturhöhe beträgt 2,4 K, der der negativen -2,5 K.

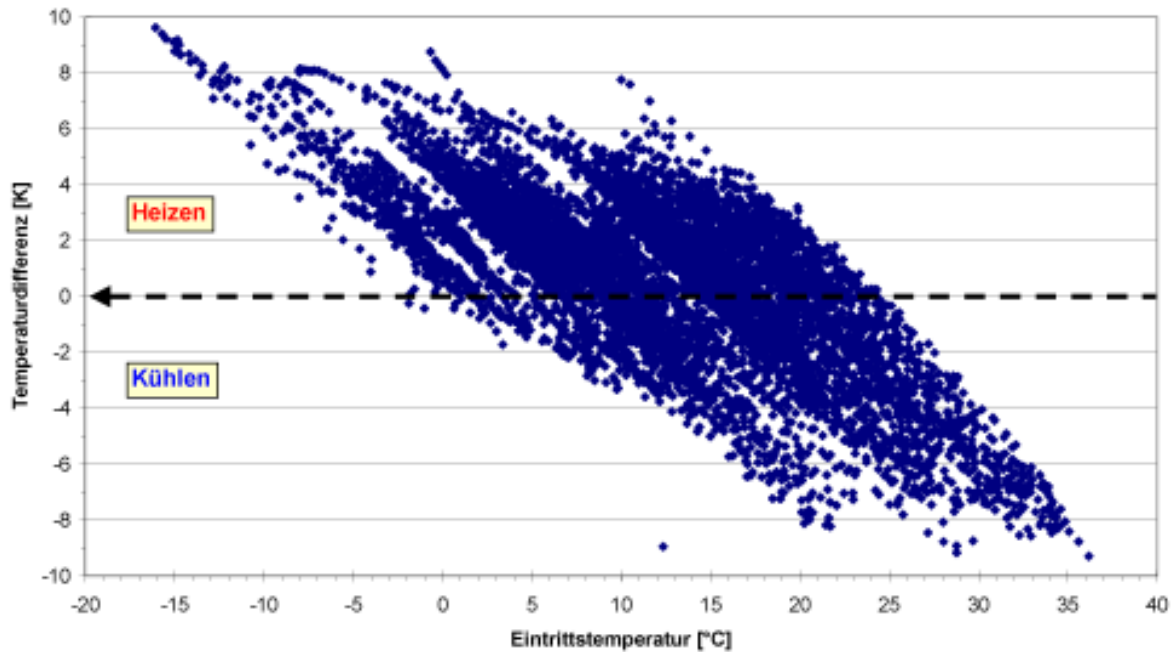


Abb. 113: Stundenmittelwerte der Temperaturhöhe in Abhängigkeit der Eintrittstemperatur des ERWT in der Zeit vom 1.5.01 bis zum 30.4.02.

Bei der Untersuchung der Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt in Bezug auf den Volumenstrom in den Rohren kann festgestellt werden, ob der Kanal bei großen Volumenströmen ggf. überlastet ist. Eine Überlastung würde bedeuten, dass bei höheren Volumenströmen die erzielte Temperaturdifferenz erkennbar abnimmt. In Abb. 114 ist diesbezüglich keine Tendenz festzustellen. Deutlich wird, dass es zwei Volumenstrom-Hauptbereiche gibt, in denen der Kanal dauerhaft betrieben wurde: Der Frischluft-Volumenstrom wurde am 28.2.02 bei der Balanceeinstellung der Lüftungsanlage von 14670 auf 11570 m³/h reduziert (beides Mittelwerte). Die dargestellten Stundenmittelwerte sind im Zeitraum 1.5.01 bis zum 30.4.02 dargestellt.

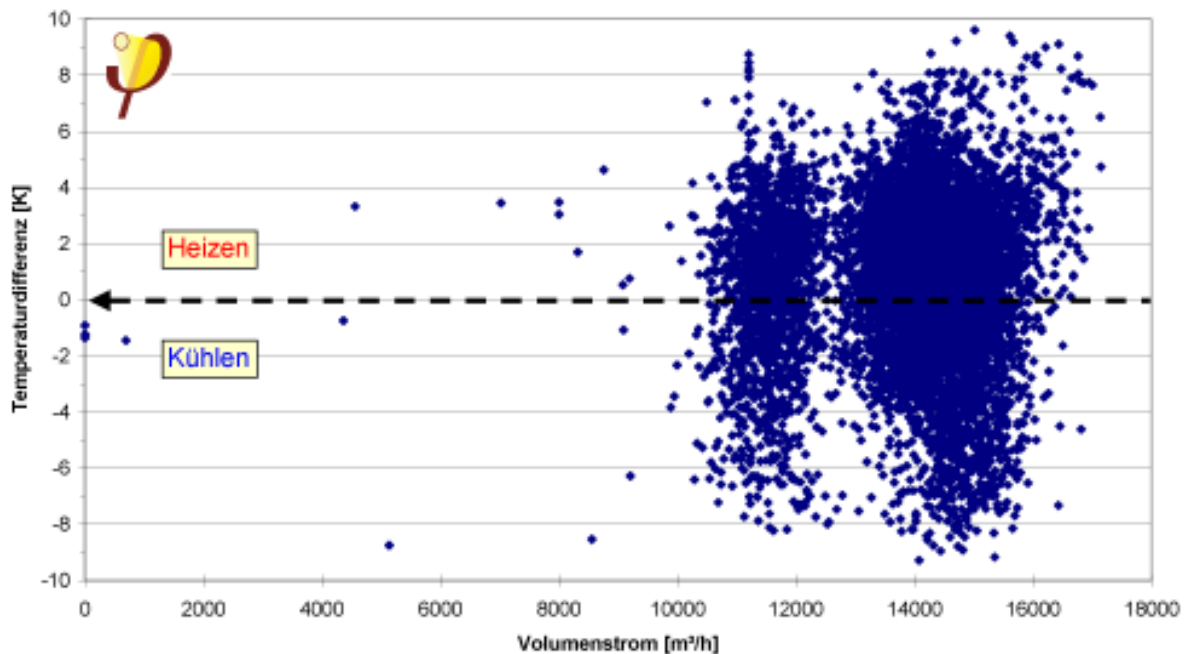


Abb. 114: Stundenmittelwerte der Temperaturdifferenzen des ERWT in Bezug auf den Volumenstrom im Kanal (1.5.01 bis 30.4.02). Der Frischluft-Volumenstrom wurde am 28.2.02 bei der Balanceeinstellung der Lüftungsanlage von 14670 auf 11570 m³/h reduziert (beides Mittelwerte).

Deutlich wird bei Abb. 114 auch, dass es keine Zeiten gibt, in der sich das Erdreich um den Kanal regenerieren kann. Dazu wären Betriebsphasen mit deutlich geringeren Volumenströmen erforderlich. Diese sind auch aus anderen Gründen, wie z.B. der Verringerung des Stromverbrauchs und dem Verhindern der nächtlichen sommerlichen Erwärmung des Gebäudes sinnvoll (s.u.). Eine Änderung der Betriebsführung der Lüftungsanlage über die GLT ist dem Betreiber dringend anzuraten. Dies zeigt auch die folgende energetische Auswertung des Erdkanals.

7.3.1.2 Energetische Untersuchung

Zur weiteren Bewertung des ERWT und zu dessen energetischem Beitrag für das Gebäude sind die erzielten Heiz- und Kühlbeiträge von Interesse. Aus den Messdaten der Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur und dem Volumenstrom kann die Heiz- bzw. Kühlleistung bestimmt werden. Diese Berechnung wurde mit den Stundenmittelwerten durchgeführt. In Abb. 115 ist der Verlauf der Erträge des Erdkanals für einen typischen Sommerzeitraum dargestellt. An warmen Tagen sind überwiegend Kühleinträge gemessen worden. An den dargestellten Tagen mit Temperaturen über 30 °C lagen die täglichen Kühlbeiträge zwischen 310 und 420 kWh/d. Wie an der Abbildung zu erkennen ist, kommt es in der sehr warmen Zeit des Jahres in den Nachtstunden allerdings regelmäßig zu Heizeinträgen. An den dargestellten warmen Tagen (26.7. bis 2.8.01) betragen diese im Durchschnitt täglich etwa 100 kWh/d. Diese Heizbeiträge sind im Hochsommer für das Gebäude unerwünscht und im Vergleich zu den gewünschten Kühlbeiträgen

beachtlich hoch. Hier wäre eine Reduzierung des nächtlichen Volumenstroms über die Anlagensteuerung der Lüftungsanlage (DDC) auf ein für das Gebäude notwendiges Minimum wünschenswert. Optimal für den „Sommerfall“ wäre eine Umgehung des ERWT über eine weitere Ansaugmöglichkeit der Frischluft („Bypass“), wie er in dem Objekt leider nicht realisiert werden konnte.

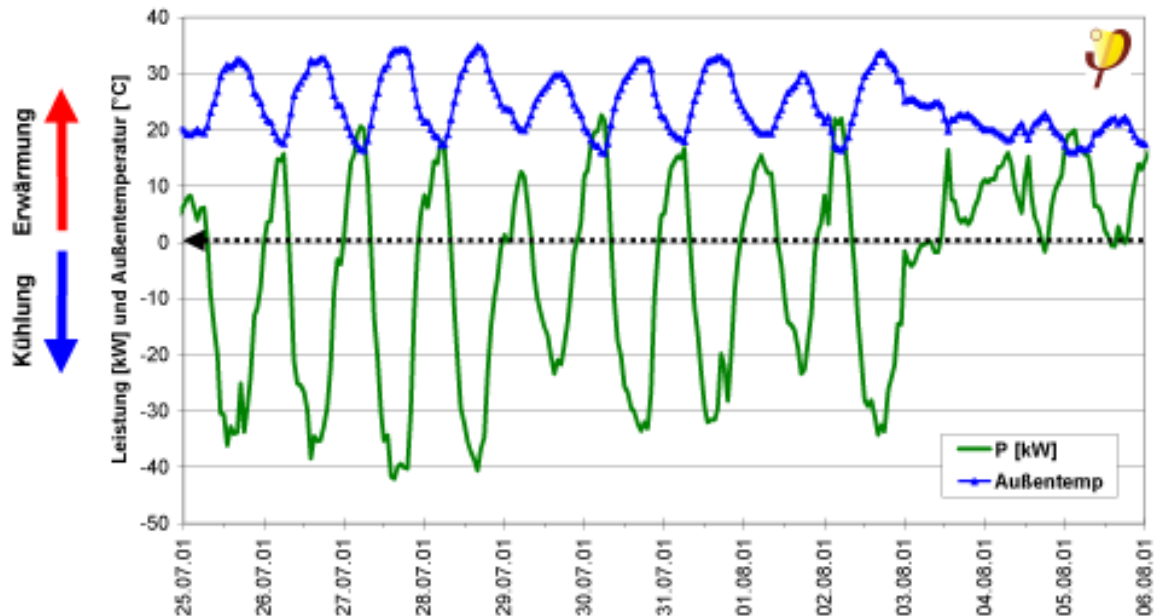


Abb. 115: Energetische Erträge des Erdreichwärmetauschers an typischen Sommertagen und Außenlufttemperatur. Der Tagesverlauf mit wechselnden Kühl- und Heizbeiträgen ist zu erkennen.

Wird nicht nur der Erdkanal betrachtet, sondern auch das Zusammenwirken mit dem Gebäude, muss auch die Leistung des Frischluftventilators (11,9 kW) berücksichtigt werden. Die gestrichelte „Null-Line“ als Grenze des Heiz- oder Kühlbetriebs in Abb. 115 würde dann nach unten auf -11,9 kW verschoben werden müssen. Damit sinken die effektiven Kühlleistungen deutlich ab.

Im kühlen Winter ergibt die energetische Auswertung - wie erwartet - überwiegend Heizerträge des Erdkanals. In Abb. 116 ist beispielhaft die Zeit um den Jahreswechsel mit den Erträgen und der Außenlufttemperatur dargestellt. Bei den verhältnismäßig kühlen Außenbedingungen kommt es hier bereits zu nennenswerten Kühlbeiträgen des Erdkanals. Bei einer Optimierung der Betriebsführung - also der oben erwähnten Anpassung des Volumenstroms - muss sichergestellt werden, dass bei einer Reduzierung im Winter noch ausreichend Energie aus den Nachheizregistern im Gebäude verteilt werden kann.

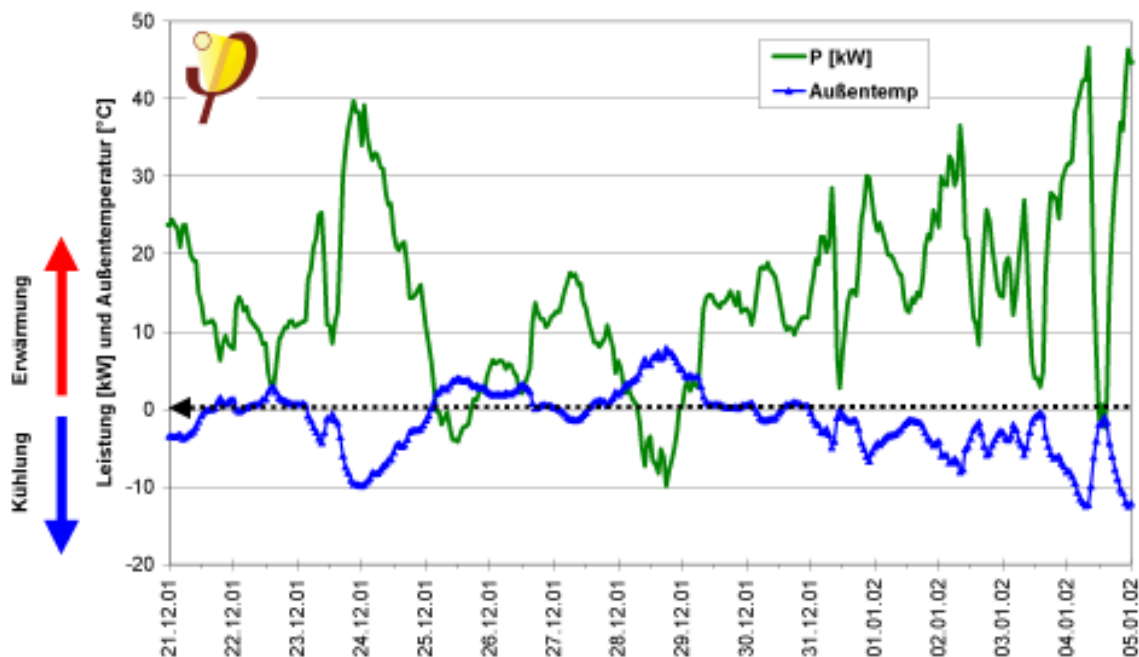


Abb. 116: Energetische Erträge des Erdreichwärmetauschers an typischen Wintertagen zusammen mit der Außenlufttemperatur. Auch im Winter kommt es bereits bei Temperaturen unter +8°C zu nennenswerten Kühlbeiträgen.

Im dargestellten Winterzeitraum beginnt der Kanal nennenswerte Kühlbeiträge zu liefern:

- am 25.12.01 ab Außenlufttemperaturen von +2,0 °C und
- am 28.12.01 ab Außenlufttemperaturen von +4,7°C

Die Grenztemperaturen für den Beginn der Kühlbeiträge liegen im Sommer bei Außenlufttemperaturen um ca. 22 °C und damit deutlich höher als im Winter (siehe Abb. 115). Die Ursache für diese unterschiedlichen Grenztemperaturen sind dynamische Effekte des Kanals: Das Erdreich um den Kanal wird durch die Luft im Jahreswechsel abgekühlt oder aufgeheizt und beeinflusst dadurch die Temperatur des nachströmenden Volumenstromes. Da der Erdkanal dauerhaft mit hohem Volumenstrom betrieben wird, kann sich das umgebende Erdreich nicht regenerieren. Damit wirkt sich die Lufttemperatur der vorhergehenden Zeitperiode stark auf das Heiz- oder Kühlverhalten des Kanals aus und die Temperatur des ungestörten Erdreichs kommt weniger zum Tragen. Dadurch ergeben sich auch die großen Unterschiede in den Grenztemperaturen.

Wenn die gesamten auf Stundenbasis errechneten Energieerträge des EWT nach den Heiz- und Kühlbeiträgen aufsummiert werden, ergeben sich für den Zeitraum 1.5.01 bis 30.4.02 die folgenden Summen:

Heizenergieeintrag	65.763 kWh
Kühlenergieeintrag	34.813 kWh



Bezogen auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes ergibt sich dann für den Jahreszeitraum:

Heizenergieeintrag	16,0 kWh/(m ² a)
Kühlenergieeintrag	8,5 kWh/(m ² a)

In Abb. 117 sind die monatlichen Energieerträge getrennt nach Heiz- und Kühlbereich aufgetragen und die monatliche Bilanz dargestellt. Dabei ist die Tendenz der überwiegenden Kühlung im Sommer und der überwiegenden Beheizung im Winter erkennbar. In der Bilanz heben sich im Juni 2001 und April 2002 die Kühl- und Heizeffekte gerade auf. Auffällig ist, dass es in allen Sommermonaten nennenswerte Heizbeiträge gibt, die zumindest zum großen Teil unerwünscht bzw. nicht nutzbar sind, da sie zur Aufheizung des Gebäudes auch in Hitzeperioden führen. Wie weiter oben bereits beschrieben, würde die Reduzierung des nächtlichen Volumenstroms hier Abhilfe schaffen.

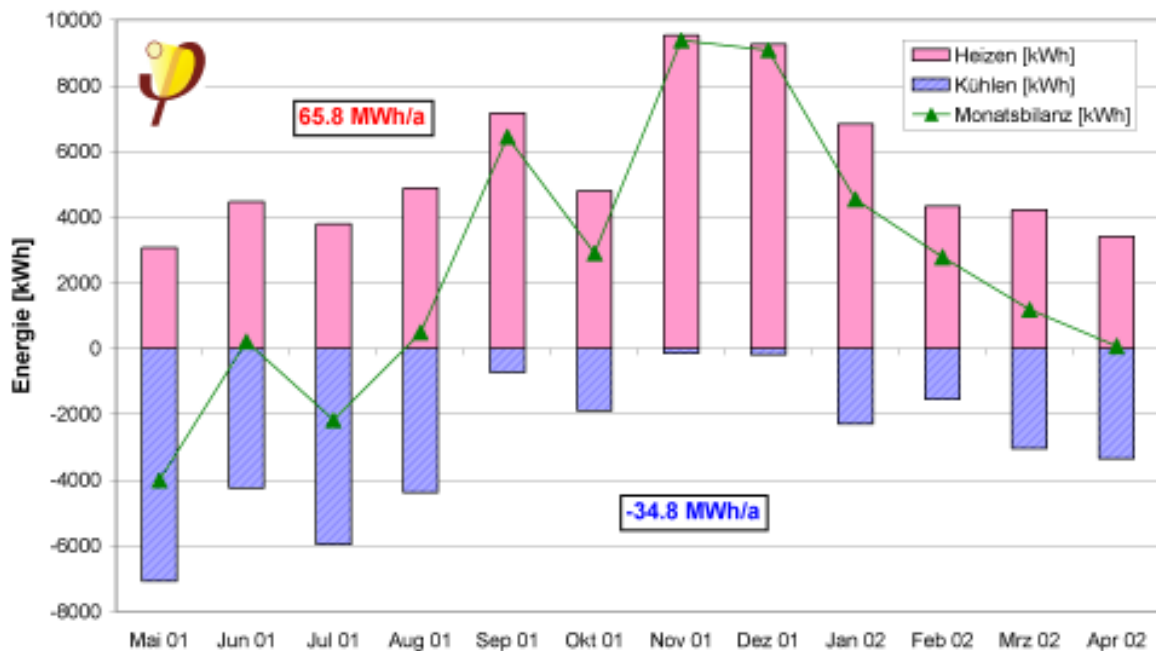


Abb. 117: Monatserträge und -bilanzen des Erdreichwärmeübertragers von Mai 2001 bis April 2002. Aus den Stundendaten wurden getrennt die Heiz- und Kühlbeiträge aufsummiert und dargestellt, für die „Monatsbilanz“ sind die Daten monatsweise addiert.

Die oben dargestellten gesamten jährlichen Heiz- und Kühlbeiträge werden hier nach den Zeiträumen „Sommer“ (Mai bis September) und „Winter“ aufgeteilt und getrennt als Summen der Heiz- und Kühlbeiträge genannt:



Sommer	Wärmelast [kWh/m ²]	Kühlbeitrag [kWh/m ²]	Bilanz [kWh/m ²]
Mai bis Sep.	5,7	-5,4	0,2
Winter	Heizbeitrag [kWh/m ²]	Wärmesenke [kWh/m ²]	Bilanz [kWh/m ²]
Okt. bis April	10,3	-3,0	7,3

Tabelle 18: Summe der Heiz- und Kühlbeiträge des Erdkanals nach den Zeiträumen Sommer und Winter unterteilt und als spezifische Werte dargestellt (Bezogen auf die Energiebezugsfläche). Dabei wird nicht unterschieden, ob es sich bei den Energiebeiträgen um nutzbare oder nicht nutzbare Anteile handelt.

Stellt man die Daten der Energieerträge aus Abb. 117 als mittlere Tageswerte dar, ergibt sich Abb. 118. Das Maximum der tagesmittleren Heizbeiträge liegt im November 2001 bei 318 kWh/d. Der höchste mittlere Kühlbeitrag wurde im Mai 2001 mit 228 kWh pro Tag erreicht. Dagegen war der durchschnittlich kühlfte Monat im Untersuchungszeitraum der Januar 2002 (1,6 °C) und der wärmste Monat der Juli 2001 (21,7 °C). Es werden damit also nicht die höchsten Kühlerträge im durchschnittlich wärmsten Monat, und auch nicht die höchsten Heizbeiträge im kühlfsten Monat erzielt.

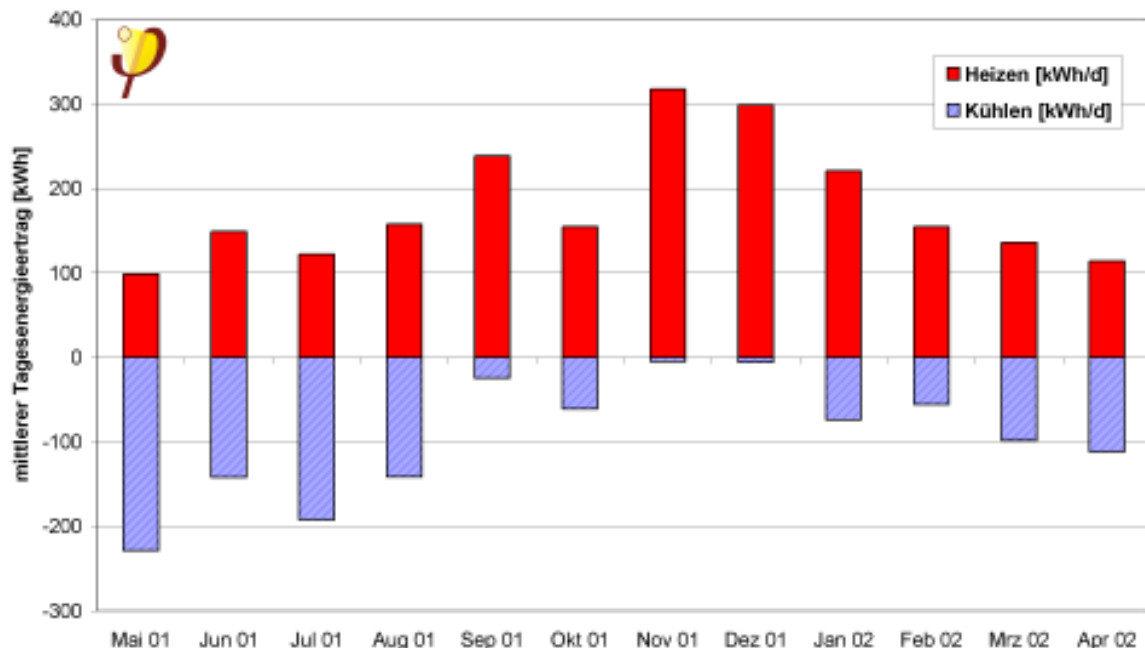


Abb. 118: Mittlerer tägliche Heiz- und Kühlerträge des ERWT in den zwölf Monaten des Auswertzeitraumes.

Um die Vergleichbarkeit der Erträge des ERWT mit anderen Erdkanälen zu ermöglichen, ist der spezifische Ertrag pro Quadratmeter Rohroberfläche von Interesse. Bei der Rohroberfläche aller 5 Rohre von 559 m² ergeben sich als spezifische Erträge im Jahresdurchschnitt:

Spez. Heizenergieertrag	117,7 kWh/m ²
Spez. Kühlenergieertrag	62,3 kWh/m ²

Die Daten werden hier im Jahresverlauf auch als tagesmittlere Erträge pro Rohroberfläche dargestellt. Sie liegen bei maximal 0,57 kWh/(m² d) im November 2001 als Heizbeitrag und bei 0,41 kWh/(m² d) im Mai 2001 als Kühlertrag.

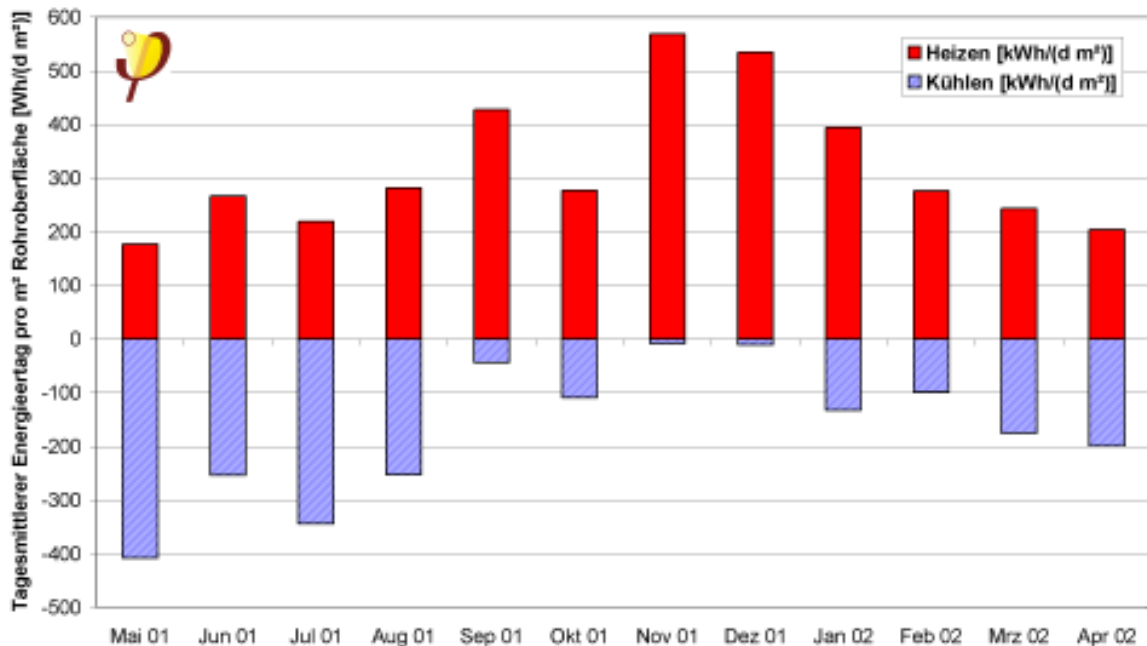


Abb. 119: Tagesmittlere Heiz- und Kühlbeiträge des ERWT pro Quadratmeter Rohroberfläche in den zwölf Monaten des Auswertzeitraumes.

Werden die jährlichen Heiz- und Kühlbeiträge nach der Eintrittstemperatur klassifiziert, lassen sich die Temperaturen mit den maximalen Erträgen ablesen. In Abb. 120 zeigen sich die maximalen Heizbeiträge in den Eintrittstemperaturintervallen von 3 bis 4 °C und von 12 bis 13 °C, die maximalen Kühlbeiträge in den Intervallen 20 bis 21 °C und 25 bis 26 °C. In diesen Intervallen ist das Produkt aus der Häufigkeit des Auftretens der Eintrittstemperatur und dem Ertrag am größten. Bei der Darstellung ergeben sich Überlappungen von nennenswerten Heiz- und Kühlerträgen im Temperaturbereich von 6 bis 22 °C. In diesem Bereich gibt es bei der jeweils gleichen Eintrittstemperatur sowohl Zeiten mit Heiz- als auch welche mit Kühlbeiträgen. Diese Tatsache ist nicht verwunderlich, da je nach der Erdreichtemperatur in der Umgebung des Kanals und des Volumenstroms ganz unterschiedliche Temperaturdifferenzen und damit Erträge erzielt werden.

Vom Gebäude aus beurteilt kann es durchaus sinnvoll und notwendig sein, dass der ERWT bei gleicher Eintrittstemperatur zeitweise Kühl- und zeitweise Heizleistungen erzeugt: Im Frühjahr kann es bei einer Außentemperatur von z.B. 12 °C notwendig sein, dass das Haus mit Heizbeiträgen vom Kanal geheizt wird. Im Hochsommer können bei 12 °C aber durchaus auch Kühlbeiträge vom Gebäude benötigt werden,



um z.B. der Aufheizung über den Tag entgegenzuwirken. Für eine solche Betriebsführung ist allerdings eine Regelung des Volumenstroms notwendig.

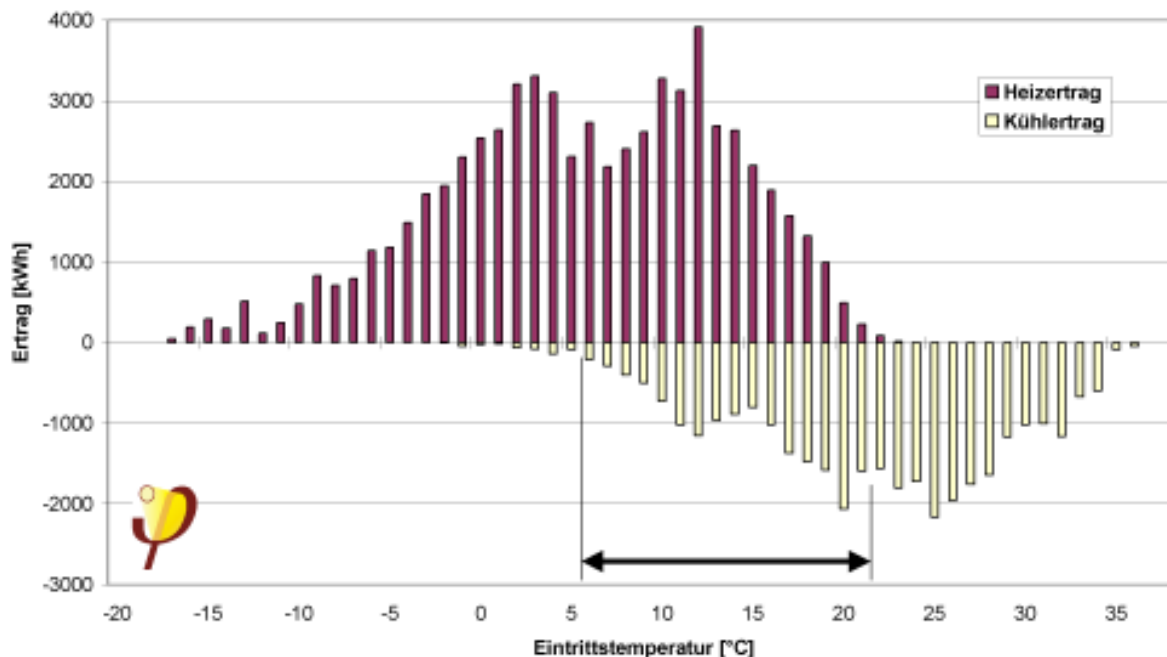


Abb. 120: Häufigkeitsverteilung der Heiz- und Kühlerträge nach der Eintrittstemperatur klassifiziert. Jeder Ertragsbalken entspricht dem Anteil des Jahresertrages, welcher einem 1 K breiten Temperaturintervall der Eintrittstemperatur zuzuordnen ist. Der Überlappungsbereich von 6 bis 22 °C ist besonders gekennzeichnet.

Für die Bewertung des Erdwärmeübertragers ist es von Interesse, mit welchem elektrischem Aufwand die Heiz- und Kühlerträge erzeugt wurden. Da die Ventilatoren hauptsächlich für den Lufttransport durch die Wärmetauscher und durch das Rohrnetz des Gebäudes betrieben werden, ist eine differenzierte Messung nicht möglich. Aus diesem Grund wird die bereinigte Arbeitszahl „COP*“ eingeführt. Für diese wird die mechanische Arbeit des Ventilators aus dem Produkt von Druckverlust im Erdkanal, dem Volumenstrom und der Zeit berechnet. Die bereinigte Arbeitszahl ist definiert als:

$$COP_{heiz}^* = \frac{Q_{heiz}}{\sum_{v_{aus} > v_{ein}} \Delta p \dot{V} \Delta t}$$

$$COP_{kühl}^* = \frac{Q_{kühl}}{\sum_{v_{aus} < v_{ein}} \Delta p \dot{V} \Delta t}$$

Da der Druckverlust im Kanal ständig zur Bestimmung des Volumenstromes gemessen wurde, kann das Produkt der mechanischen Arbeit problemlos berechnet

werden. Die Berechnung erfolgte auf Stundenbasis (Stundenmittelwerte) und wurde getrennt für Heiz- und Kühlerträge durchgeführt. Dabei ergibt sich für das Messjahr:

$$\text{COP}^*_{\text{heiz}} = 234,0 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kWh}_{\text{mech}}$$

$$\text{COP}^*_{\text{kühl}} = 255,6 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kWh}_{\text{mech}}$$

Bezüglich dieser Aufwandsbetrachtung ist der mechanische Energieeinsatz für den Betrieb des Erdkanals gerechtfertigt. Dies ändert nichts an der Tatsache, dass die Luftförderung beim Projekt SurTec insgesamt wegen zu hoher Druckverluste ineffizient ist.

7.3.1.3 Potentialuntersuchung

Das theoretische Ertragsmaximum eines Erdkanals ergibt sich, wenn die Austrittstemperatur der ungestörten Erdreichtemperatur entspricht. Dies ist nur theoretisch bei einem unendlich langen Kanal möglich. Zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit des Erdkanals mit den gemessenen Volumenströmen wird dieses theoretische Maximum an Kühl- und Heizleistung aus den Stundenmittelwerten berechnet. Der Quotient aus den real erbrachten Erträgen und den theoretisch maximalen Erträgen ergibt den Nutzungsgrad η . Dabei werden - wie oben erwähnt - die berechneten Temperaturen für das ungestörte Erdreich verwendet.

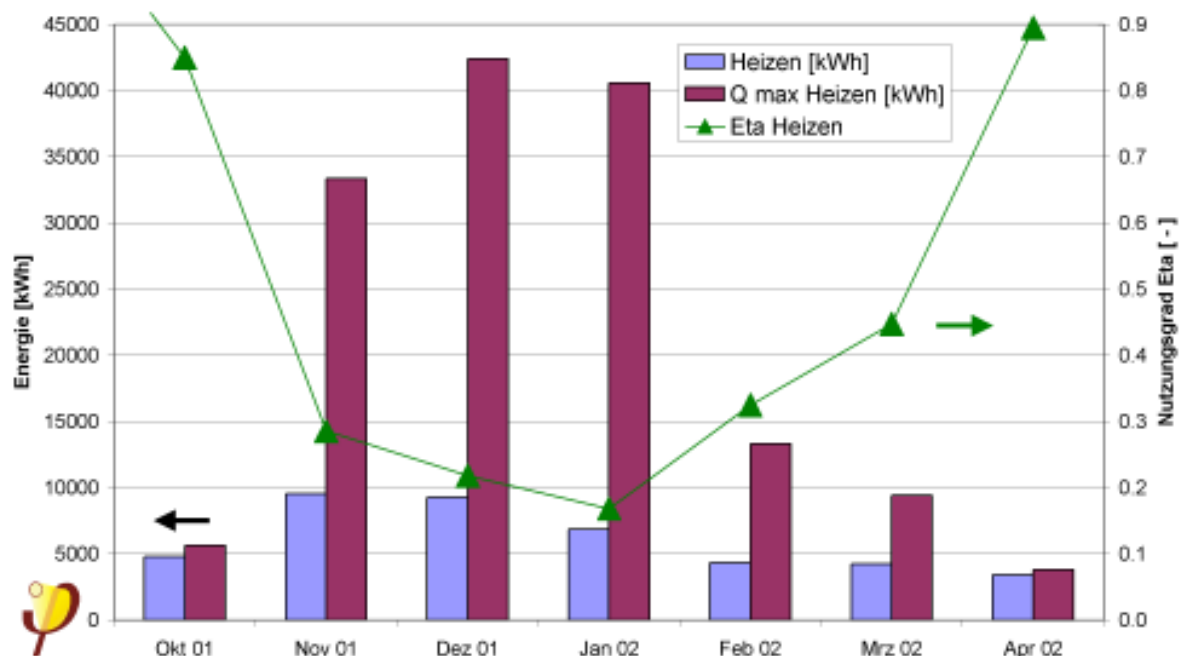


Abb. 121: Gemessene monatliche Heizerträge in den Wintermonaten des Auswertzeitraumes im Verhältnis zu den maximal theoretisch möglichen Heizerträgen. Aus dem Quotient beider Größen ist monatlich der Nutzungsgrad η bestimmt worden.

Hier werden die jeweils relevanten zeitlichen Bereiche dargestellt: Heizbeiträge für die Wintermonate Oktober 2001 bis April 2002 und die Kühlbeiträge in den Sommer-



monaten Mai bis September 2001. Für den Winterzeitraum in Abb. 121 ergibt sich der Nutzungsgrad des Heizeintrags der sieben Monate zu insgesamt $\eta_{\text{Heiz}} = 0,29$. Für das gesamte Jahr ergibt sich mit 0,42 zwar ein deutlich höhere η -Wert, dieser ist allerdings nicht relevant, da die Verbesserung aus den zum Großteil ungewollten sommerlichen Heizbeiträgen stammt.

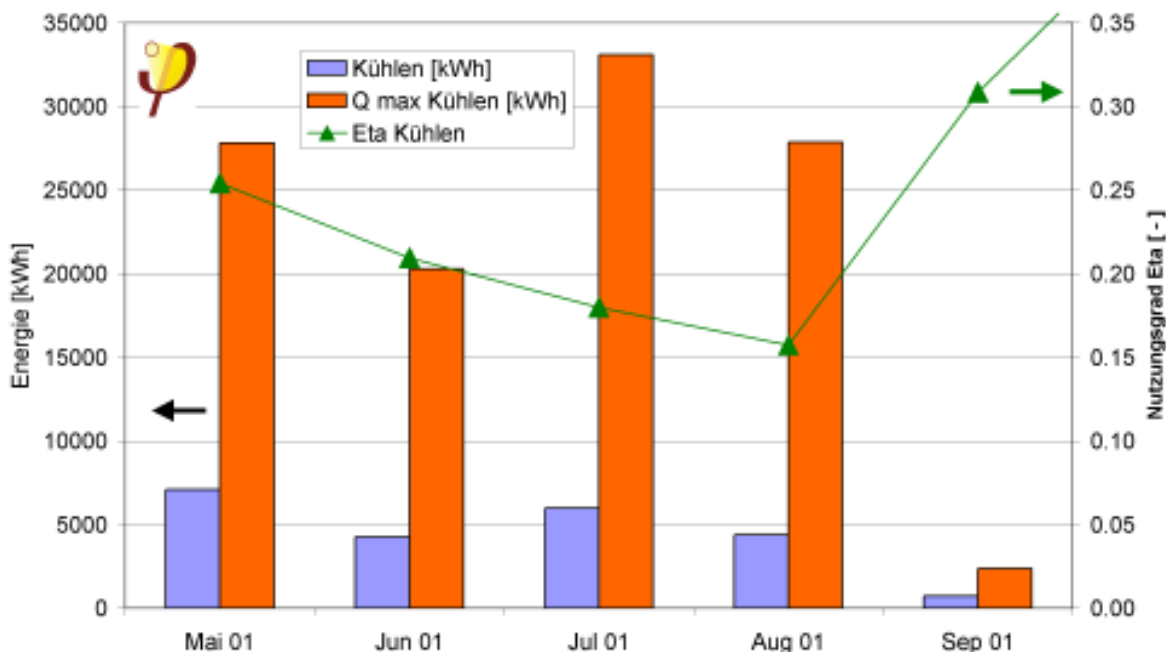


Abb. 122: Gemessene monatliche Kühlerträge in den Sommermonaten des Auswertzeitraumes im Verhältnis zu den maximal theoretisch möglichen Kühlerträgen. Aus dem Quotient beider Größen ist monatlich der Nutzungsgrad η bestimmt worden.

Der Nutzungsgrad für die sommerliche Kühlung (Mai bis September 2001) beträgt $\eta_{\text{Kühl}} = 0,20$. Der Gesamtjahreswert liegt bei 0,28 und enthält dann auch wieder die z. T. ungewollten Kühlbeiträge im Winter.

7.4 Sommerliche Entwärmung

Eine wichtige Komponente des sommerlichen Wärmeschutzes beim Projekt SurTec ist für das Atrium die außenliegende Verschattung der Decken- und Südverglasung. Die Ostfassade der Büroräume soll durch eine Rankbepflanzung verschattet werden. Bis diese in einigen Jahren einen nennenswerten Verschattungsbeitrag leisten kann, sind bisher keine anderen Verschattungsvorrichtungen vorhanden.

Für das Abführen von sommerlichen Wärmelasten werden die Rauchabzugsklappen im Atrium über eine Handsteuerung geöffnet. Dies ist allerdings nur möglich, wenn kein Niederschlag fällt. In den Büros wird im Sommer bei Bedarf zusätzlich über die Fenster gelüftet. In der warmen Jahreszeit kann die Wärmeübertragereinheit im

Lüftungsgerät mit einem Bypass umgangen werden. Für die Zuluft der Bereiche „Produktion“ und „Konferenzraum“ gibt es zusätzlich die Möglichkeit, dass kühle Außenluft (nach dem Erdkanal) direkt zugeführt wird. Beide Zonen verfügen über zumindest zeitweise große inneren Wärmelasten. Diese Beimischung wird über die DDC gesteuert um die Zonen kühl halten zu können, auch wenn der Bypass nicht aktiviert ist. Eine besondere Nachtlüftung des Gebäudes ist nicht vorgesehen.



Abb. 123: Geöffnete Rauchabzugsklappen an der westlichen Atriumverglasung (Blick vom Dach über dem Laborbereich).

Anhand der Büroräume sollen die sommerlichen Temperaturen hier näher untersucht werden. Für die Betrachtung der sommerlichen Überhitzung handelt es sich, wegen der derzeit noch fehlenden Verschattung, um die problematischste Zone im Gebäude. Für die Bearbeitung wurde zum Teil das SolarBau Arbeitspapier [Pfafferott 2002] verwendet.

Um einen Überblick über die Temperaturen zu geben, wird zunächst die Raumlufttemperatur über der Außenlufttemperatur in dem intensiv vermessenen Büroraum im EG Süd für die Betriebszeit eines gesamten Jahres dargestellt.

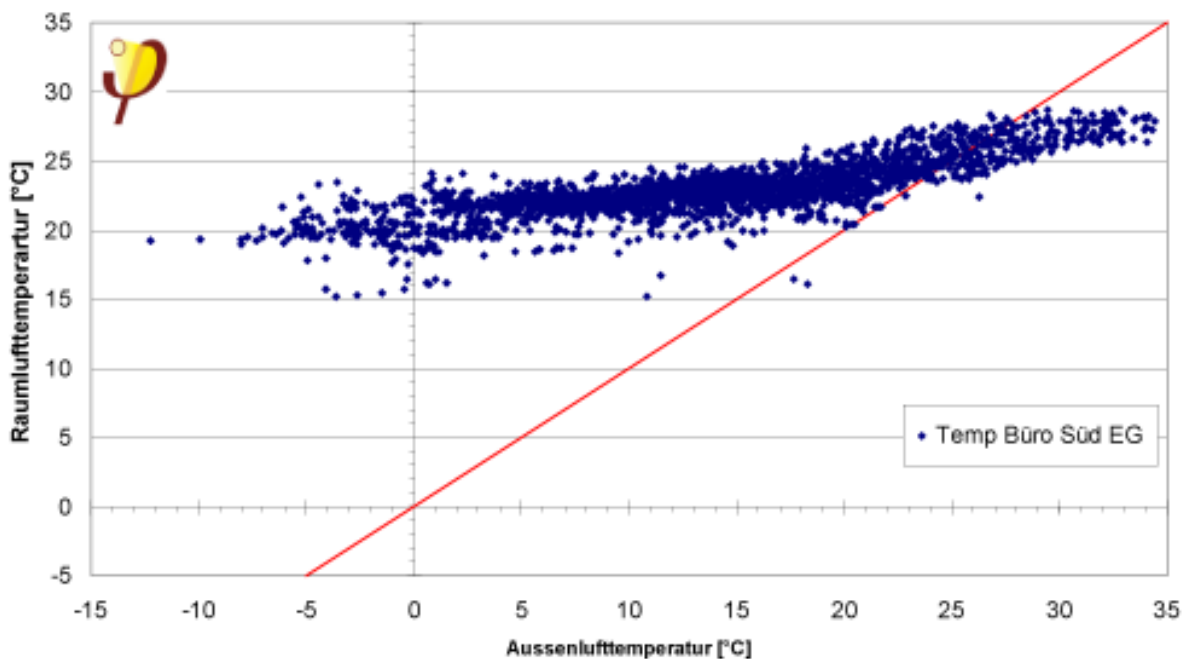


Abb. 124: Korrelation der Raumluf- und der Außentemperaturen im Messjahr Mai 2001 bis April 2002 während der Betriebszeit (Werktage 8:00 bis 18:00 Uhr). Die Winkelhalbierende (Raumlufttemperatur = Außenlufttemperatur) dient der besseren Orientierung.

Die Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur wurde bereits in Abschnitt 7.1.1.1 diskutiert.

Zur Bewertung der Temperaturen in den Büroräumen werden die Messdaten als geordnete Jahresdauerlinie für alle Betriebsstunden (Werktage 8:00 bis 18:00 Uhr) dargestellt. Die geordneten Raumluf-temperaturen in Abb. 125 zeigen ähnliche Ausprägungen. Die Temperaturen des nur zeitweise genutzten Besprechungszimmers liegen wie erwartet am niedrigsten (geringe Nutzung, minimale Ostverglasung).

Wird nur ein Ausschnitt der Jahresdauerlinie vergrößert betrachtet (hier Temperaturen ab 24 °C) werden die Unterschiede zwischen den Büroräumen deutlicher (Abb. 127). Es können direkt die Überschreitungen bei unterschiedlichen Grenztemperaturen (> 24,0 °C bis > 28,0 °C) abgelesen werden.

Eine Auswertung der Betriebsstunden in denen die jeweiligen Grenztemperaturen überschritten wurden im Verhältnis zu allen Betriebsstunden des Jahres ist in Abb. 127 dargestellt.

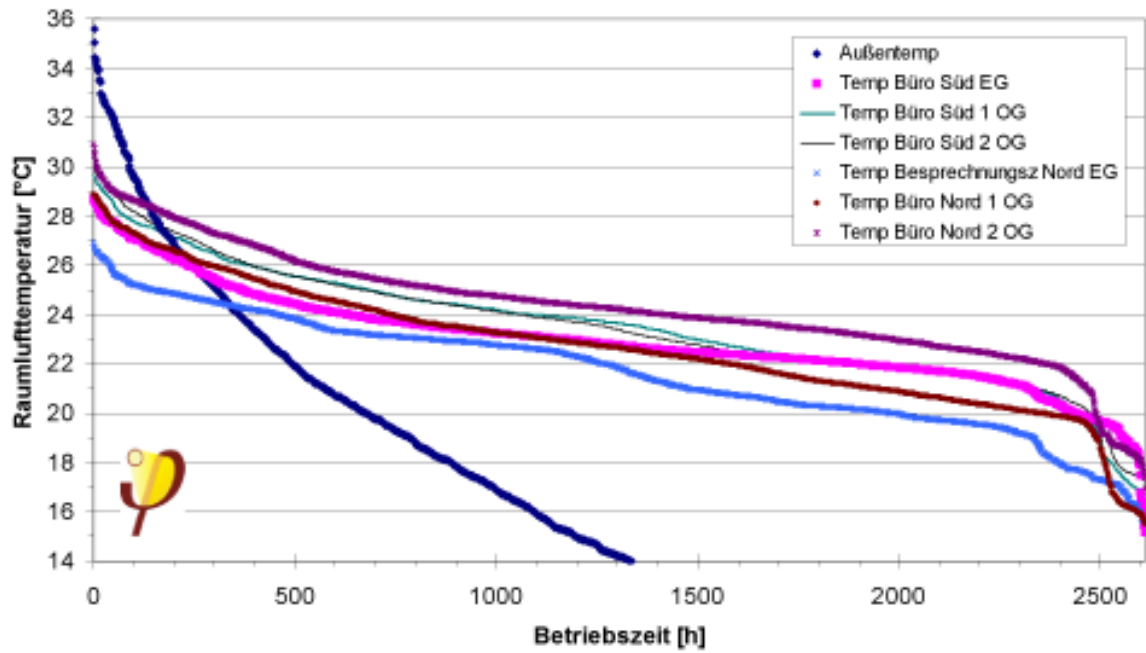


Abb. 125: Sortierte Jahresdauerlinien der Temperaturen in den Büroräumen und der Außentemperatur während der Betriebszeit im Messjahr (Mai 2001 bis April 2002).

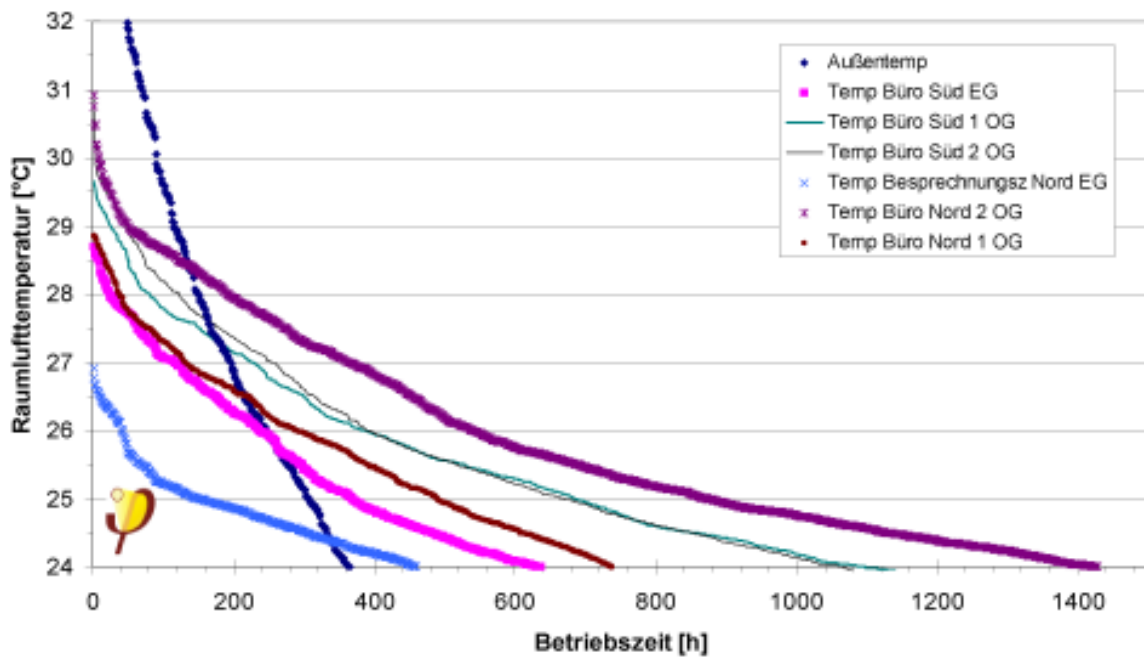


Abb. 126: Ausschnitt aus den sortierten Jahresdauerlinien in Abb. 125.

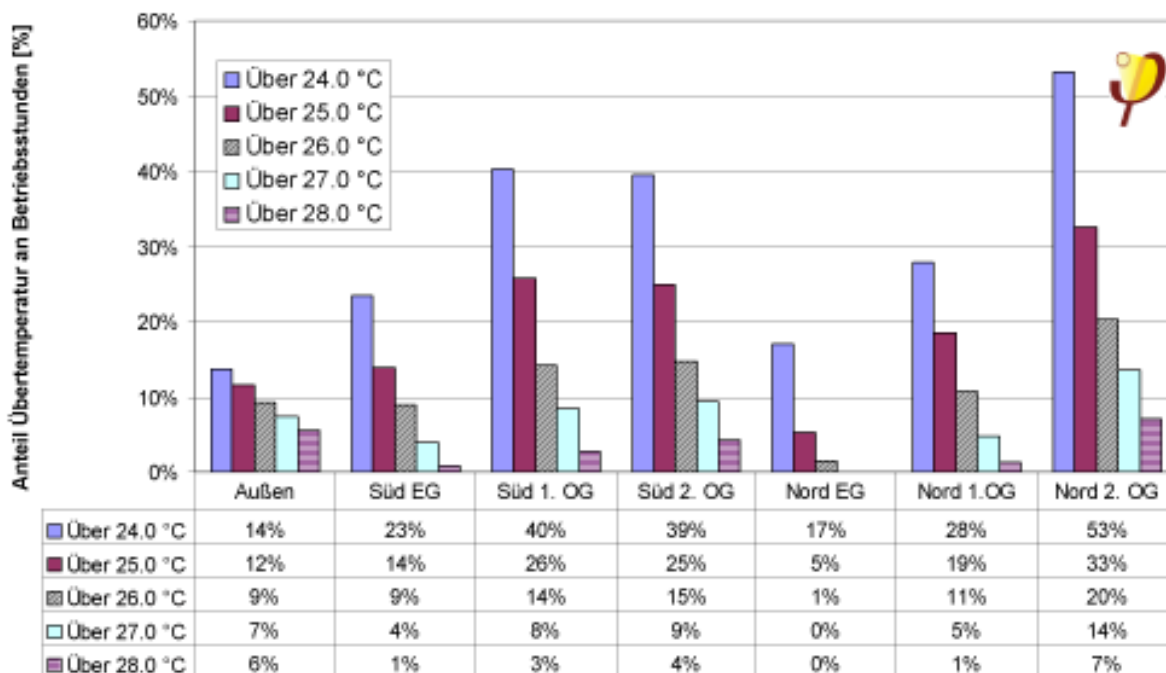


Abb. 127: Anteil der Betriebsstunden, in denen in den einzelnen Büroräumen die Temperaturen über den jeweiligen Grenztemperaturen lagen. Basis sind die 2610 Betriebsstunden des Jahreszeitraumes Mai 2001 bis April 2002.

Der Trend, dass in den oberen Geschossen die Überhitzung größer ist als in den unteren, wird in der Darstellung deutlich. Durch die fehlende Ostverschattung sind die anteiligen Überhitzungen relativ häufig. Die Angaben dürfen allerdings nicht mit den üblicherweise angegebenen Überhitzungsanteilen verwechselt oder verglichen werden, die als Basis die gesamte Jahresstundenzahl verwenden. Dabei ergeben sich automatisch deutlich geringere Überhitzungsstundenzahlen. Beachtet werden muss außerdem, dass die unerwünschte Sommerbeheizung des Gebäudes zur sommerlichen Überhitzung beiträgt (vgl. Abschnitt 7.2.2.2).

7.4.1 Sommerperiode

Die weiteren Untersuchungen beschränken sich auf die Sommerperiode. Diese wird hier definiert als die Monate Juni bis August. Für jede Betriebsstunde in der Sommerperiode wird der Temperaturmittelwert vom Büro Süd EG im Vergleich zur Außentemperatur gebildet. Dadurch zeigt sich der typische Verlauf der Temperaturen über den Betriebsstunden.

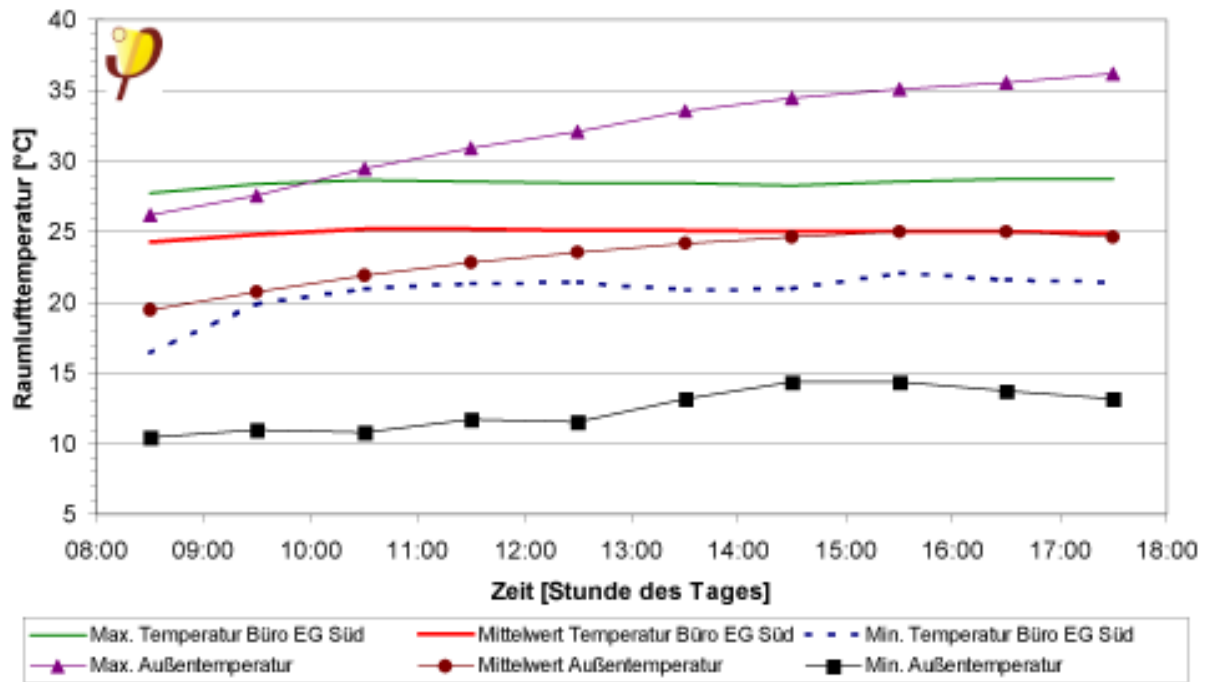


Abb. 128: Raumlufttemperaturen im Büro Süd EG und Außentemperatur in der Betriebszeit (8:00 bis 18:00 Uhr) in der Sommerperiode (1.6. bis 31.8.2001). Angegeben sind die maximalen, mittleren und die minimalen Temperatur einer jeden Betriebsstunde der Sommerperiode.

	Minimum		Mittelwert	Maximum	
Außentemperatur	10,5 °C	8:30	23,2 °C	36,2 °C	17:30
Temperatur Büro EG Süd	16,5 °C	8:30	24,9 °C	28,7 °C	16:30

Tabelle 19: Extremdaten und Mittelwerte der Auswertung aus Abb. 128.

Der Mittelwert der Büroraumtemperatur während der Betriebsstunden liegt mit 24,9 °C um 1,7 K über der mittleren Außenlufttemperatur. Die minimalen und maximalen Temperaturen des Durchschnittstages liegen etwa zeitgleich am Anfang und am Ende der Betriebszeit. Eine deutliche zeitliche Verzögerung der Raum gegenüber der Außentemperatur kann nicht festgestellt werden. Die Bürottemperatur zeigt den Einfluss des Energieeintrags durch die Sonne auf der Ostfassade: Nachdem die Sonne gegen Mittag nicht mehr auf die Fassade scheint, steigt die Temperatur zunächst nicht mehr an, bzw. sinkt sogar geringfügig ab. Dieser Zusammenhang hat sich bereits in Abschnitt 7.1.2.2 in Abb. 79 ausgeprägt gezeigt.

Neben den mittleren Temperaturen während der Sommerzeit sind auch die Temperaturgänge während einer Hitzeperiode von Interesse. In der Woche 11.8. bis 18.8. 2001 wurde die höchste Außentemperatur mit 36,2 °C gemessenen. Den Verlauf der Temperaturen zeigt Abb. 129. Die Hitzeperiode geht einher mit hohen solaren Einstrahlungen, die Außentemperatur schaukelt sich Tag für Tag auf bis sie am Donnerstag der Woche wieder deutlich sinkt. Die Büroraumtemperatur erreicht maximal 28,2 °C. Vom 11.8. bis zum 15.8.2001 steigen die Außenluft-



temperaturspitzen um 13,7 K, die der Innenraumluft um 2,6 K. Das entspricht einem Anstieg der Außenlufttemperatur von 3,4 K/Tag im Vergleich dazu beträgt der Raumlufttemperaturanstieg nur 0,6 K/Tag. Der Dämpfungsfaktor beträgt damit etwa 5,3.

Gut zu erkennen sind die morgendlichen Lüftungseinflüsse durch die Nutzerin des Raumes. Der Einfluss auf die Raumlufttemperatur ist in der Grafik mit den senkrechten Pfeilen angedeutet. Durch diese morgendliche Lüftung wird einem stärkeren Aufschaukeln der Raumlufttemperatur trotz fehlender Verschattung relativ erfolgreich entgegengewirkt: Die Innentemperatur liegt am wärmsten Tag maximal 8 K unter der Außentemperaturspitze. Durch Ausnutzung der nächtlichen Außen-temperaturabkühlung könnte hier ein noch wesentlich höherer Effekt erreicht werden.

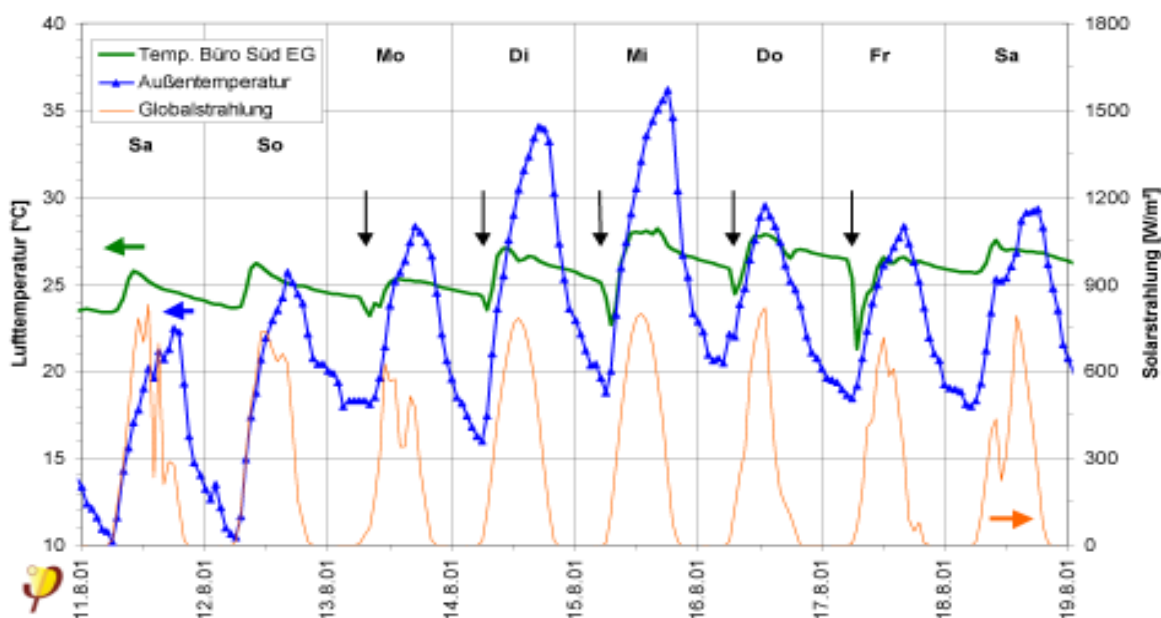


Abb. 129: Raumluft- und Außentemperatur sowie Solarstrahlung in der Woche mit der höchsten gemessenen Außentemperatur (Stundenmittelwerte). Die senkrechten Pfeile zeigen die Fensterlüftungen in dem Büroraum an.

In der wärmsten Woche (22. bis 29.7.2001) des Messzeitraumes zeigt sich ein ähnliches Bild der Raumlufttemperaturverläufe wie in der Woche mit der höchsten Außenlufttemperatur: Die Temperatur der Außenluft schaukelt sich durch die hohen Solarstrahlungsleistungen bis auf fast 35 °C auf, obwohl sie nachts auf Temperaturen von deutlich unter 20 °C abkühlt. Die Innenraumtemperatur liegt mit maximal 28,7 °C am Mittwoch der Woche (11:00 Uhr) noch etwas höher als in der Woche mit der höchsten Außentemperatur. Morgendliche zusätzliche Fensterlüftungen sind - bis auf den Montag - nicht zu beobachten. Allerdings gibt es deutliche Abkühlungen der Raumlufttemperatur in der Nacht vom Mittwoch auf den Donnerstag und vom Donnerstag zum Freitag. Hier wird vermutlich in der ganzen Nacht über die Fenster gelüftet. Dadurch sinkt die Temperatur bis auf minimale Werte von 23,0 °C ab (6:00

Uhr). Da vermutlich morgens das Fenster nicht gleich wieder geschlossen wird, steigt die Innen- mit der Außentemperatur gleichmäßig bis um jeweils ca. 11:00 Uhr an.

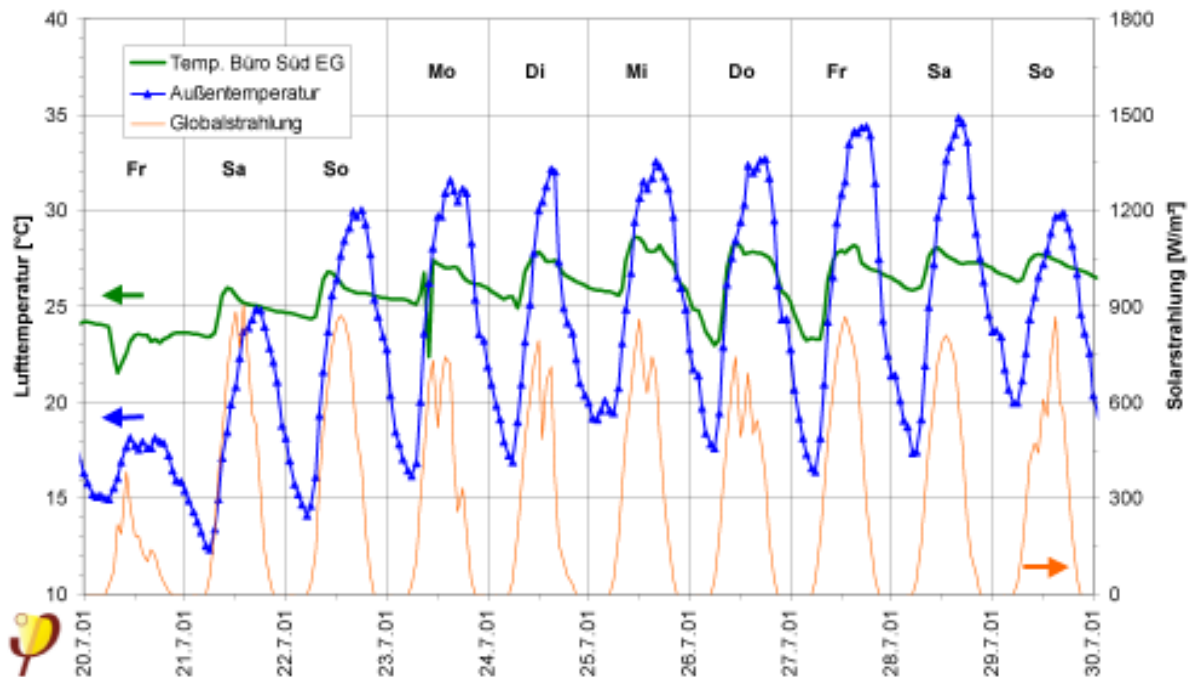


Abb. 130: Raumluft- und Außentemperatur sowie Solarstrahlung in der Hitzeperiode (Woche mit den wärmsten Außentemperaturen). Dargestellt sind Stundenmittelwerte.

Um den typischen Tagesverlauf der Temperaturen im Vergleich zwischen den Büros darzustellen, werden die Temperaturen von zwei Büroräumen und die Außentemperatur in einer vierwöchigen Hochsommerphase (29.7. bis 26.8.2001) als Mittelwerte der jeweiligen Stunden abgebildet. Durch diese Darstellung werden einzelnen Effekten (Spitzenwerte) abgeschwächt und es kann dargestellt werden, wie die durchschnittlichen Temperaturschwankungen im Hochsommer ausgeprägt sind. Zusätzlich ist noch die operative Temperatur im EG Büro dargestellt.

Der Verlauf in Abb. 131 zeigt wieder, dass die Temperaturen im Büro im 2. OG gegenüber dem EG auf deutlich höherem Niveau liegen. In den Morgenstunden gibt es im EG Büro eine deutliche Absenkung der Temperatur durch die beschriebene zusätzliche Fensterlüftung. Im 2. OG zeigt sich diese Absenkung nicht. In der Zeit zwischen 8:00 und 18:00 Uhr schwankt die Temperatur im EG zwischen 23,8 und 26,0 °C (2,2 K) und im 2. OG zwischen 26,2 und 27,5 °C (1,3 K). Die Ursachen der höheren Temperaturen im OG sind die geringere Verschattung und die fehlenden nächtlichen oder morgendlichen Zusatzlüftungen. Außerdem ist die Luft im direkt angrenzenden Atrium temperaturgeschichtet (Auftrieb).

Die operative Temperatur im EG Büro liegt in der dargestellten Sommerzeit dauerhaft über der Lufttemperatur des Raumes. Dies ist auf die warmen Umfassungsflächen zurückzuführen.

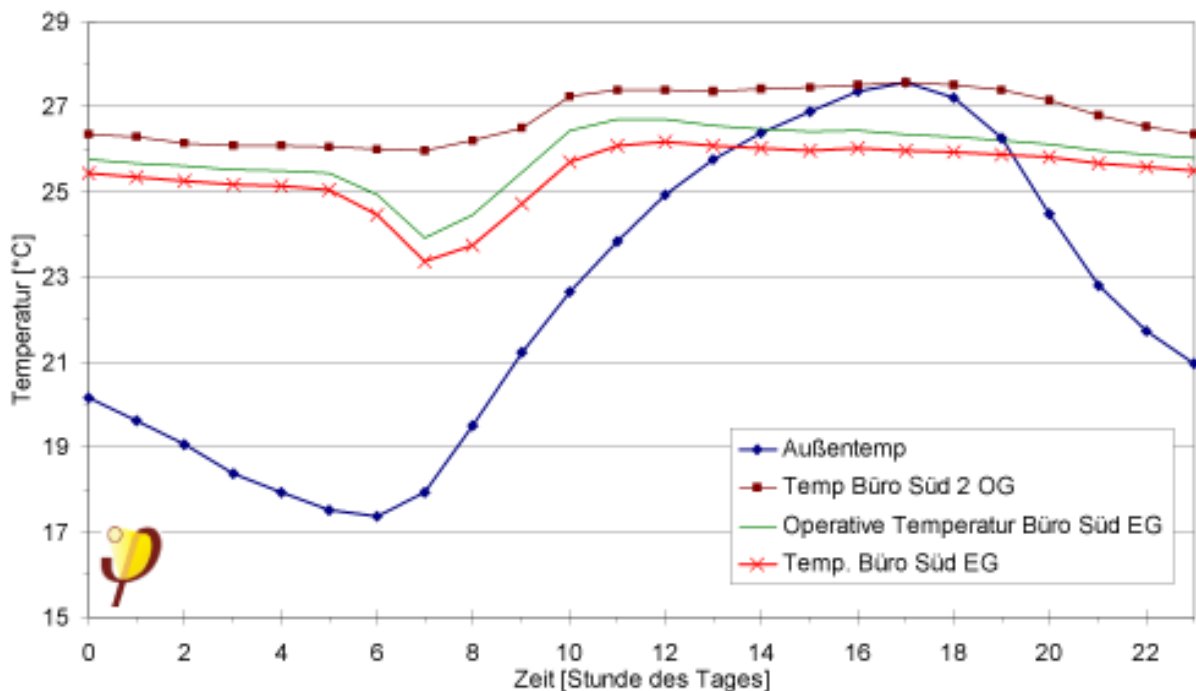


Abb. 131: Stündliche Mittelwerte der Raumlufttemperaturen der Büros Süd EG und 2. OG und der operativen Temperatur Büro Süd EG sowie der Außentemperatur über vier Hochsommer-Wochen (29.7. bis 26.8.2001).

7.5 Strömungsmessung an der Glasfassade im Atrium

An der nach Osten orientierten, dreigeschossigen Glasfassade der Cafeteria wurden die Luftgeschwindigkeiten in der Nähe der Oberfläche gemessen. Damit sollte überprüft werden, ob in diesem Bereich die Gefahr von störendem Kaltluftabfall und damit von Komfortdefiziten besteht. Der Sensor ist in 20 mm Höhe über dem zweiten Riegel von unten montiert. Er befindet sich in ca. 3 m Höhe über dem Fußboden, der Abstand von der Verglasung beträgt 78 mm (vgl. Abb. 60 in Abschnitt 6.2.8.1).

Mit dem verwendeten Sensor können Geschwindigkeiten ab 0,05 m/s detektiert werden. Die Messung niedrigerer Geschwindigkeiten wäre nur mit hohem apparativem Aufwand möglich, sie ist unter dem Aspekt der Komfortbewertung aber nicht mehr von Interesse: [DIN 1946] und [ISO 7730] fordern je nach Turbulenzgrad der Luft maximale Luftgeschwindigkeiten von ca. 0,15 m/s. Bei Luftgeschwindigkeiten unter 0,12 m/s ist diesen Normen zufolge in jedem Fall ausreichender Komfort gegeben.

Für den gesamten Messzeitraum liegen Luftgeschwindigkeitsmessungen als 15-Minuten-Momentanwerte vor, ferner Messungen der Lufttemperatur in unmittelbarer Nähe des Strömungssensors sowie Werte der Lufttemperatur in der Cafeteria, welche in der Südwestecke der Cafeteria in mehreren Metern Entfernung von der Fassade gemessen wurden. Einen typischen Zeitverlauf zeigt Abb. 132.

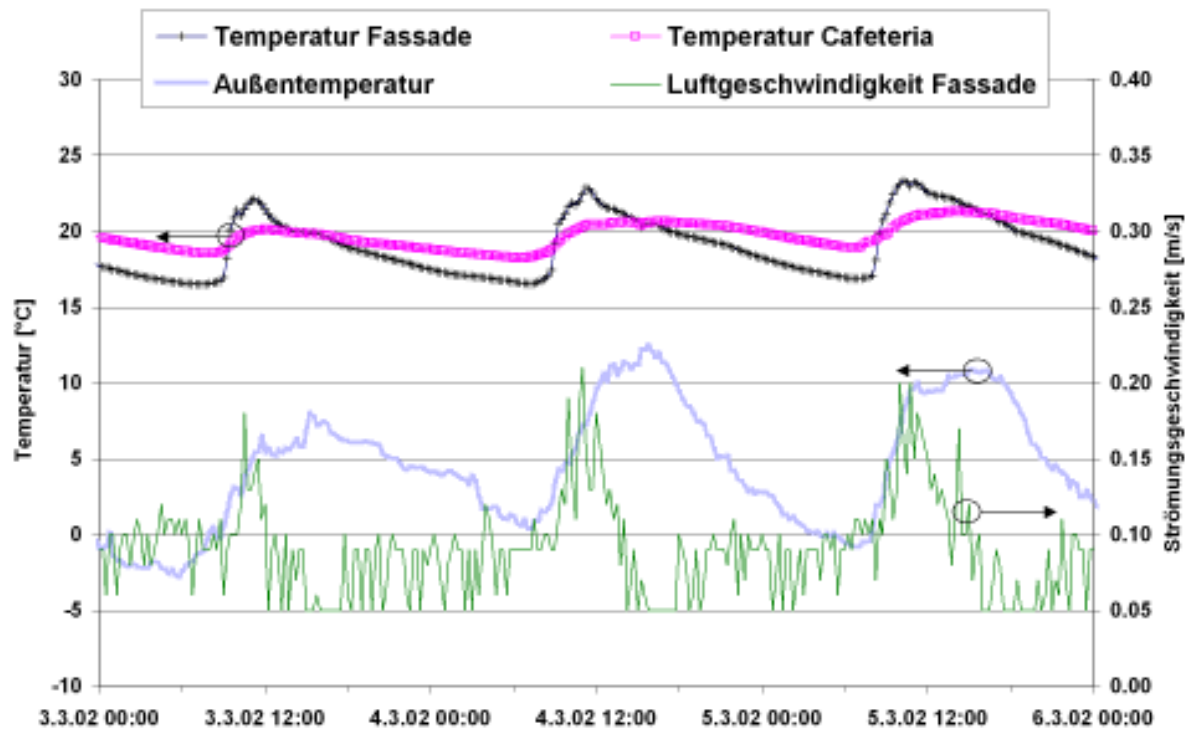


Abb. 132: Lufttemperaturen in der Cafeteria und Strömungsgeschwindigkeit am Messpunkt während einiger Tage.

Es fällt auf, dass die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten nicht etwa während der Nacht bei den niedrigsten Außentemperaturen auftreten, sondern im Laufe des Vormittags, wenn die Sonne auf der Ostfassade steht. In den letzteren Zeiträumen erwärmen sich die raumseitigen Verglasungsoberflächen und die Elemente der Pfosten-Riegel-Konstruktion durch absorbierte Solarstrahlung. Dadurch steigt Warmluft an der Fassade auf. Die zugehörigen Luftgeschwindigkeiten sind offensichtlich wesentlich größer als diejenigen, die durch Kaltluftabfall in der Nacht bedingt sind. Wenn die Raumlufttemperatur und die Lufttemperatur vor der Fassade etwa gleich groß sind, sinken die Luftgeschwindigkeiten unter die Nachweisgrenze des Sensors.

Als entscheidender Parameter für die Strömungsgeschwindigkeit erwies sich erwartungsgemäß die Differenz zwischen der Temperatur an der Fassade und der Raumlufttemperatur (Abb. 133). Wenn sich die Innenoberflächen der Fassade erwärmt haben, treten Luftgeschwindigkeiten bis zu 0,4 m/s auf. Die an der untersten Scheibe aufsteigende Luft strömt dabei vermutlich um den darüber liegenden Riegel herum und führt auch auf der Oberseite zu relativ hohen Geschwindigkeiten.

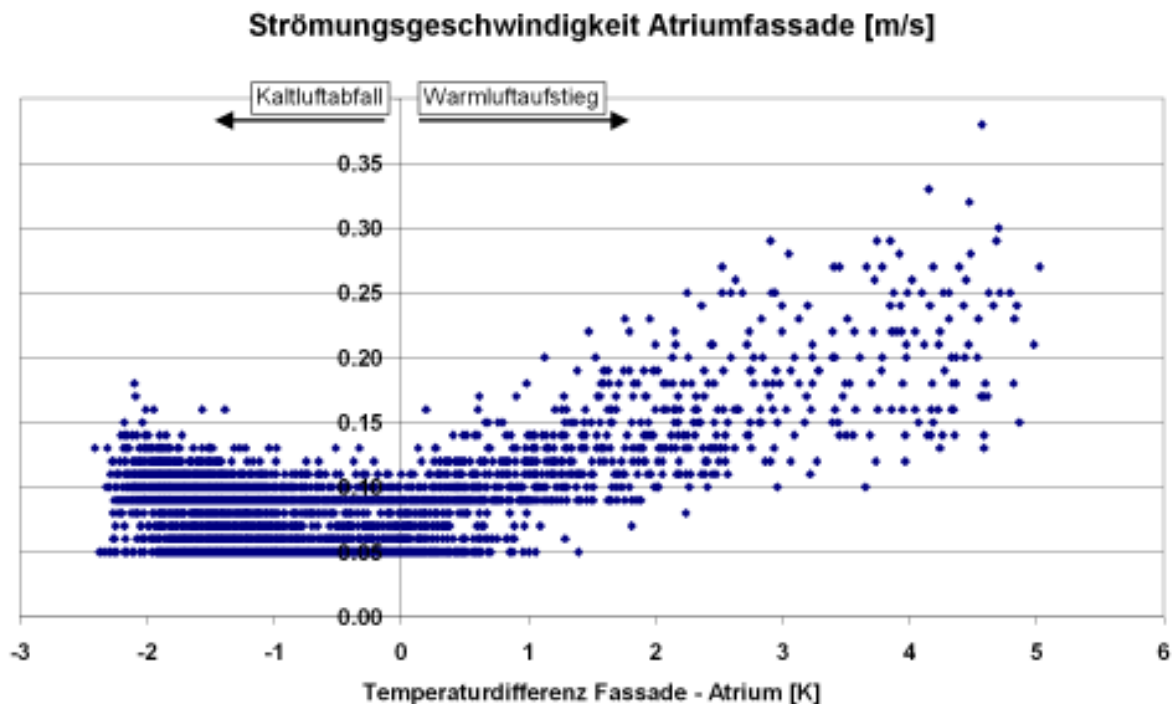


Abb. 133: Strömungsgeschwindigkeit als Funktion der Temperaturdifferenz. Ist die Temperatur an der Fassade größer als diejenige im Atrium, so steigt die warme Luft an der Fassade empor; ist sie niedriger, fällt die Luft ab.

Der Kaltluftabfall an der Fassade findet dagegen nur mit niedrigen Geschwindigkeiten statt. In der Messperiode traten Außentemperaturen bis etwas unter 0 °C auf. Unter diesen Bedingungen wurden keine Geschwindigkeiten über 0,2 m/s gemessen.

Eine genauere Interpretation dieser Ergebnisse ist mit Hilfe einer Strömungssimulation möglich. Simulationsergebnisse zu einem ähnlich gelagerten Fall lagen bereits vor und werden nachfolgend dargestellt. Die Randbedingungen stimmen mit denen der hier ausgewerteten Messung zwar nicht überein, die Grafiken (Abb. 134) können jedoch Hinweise auf den qualitativen Verlauf von Luftgeschwindigkeit und Temperatur geben.

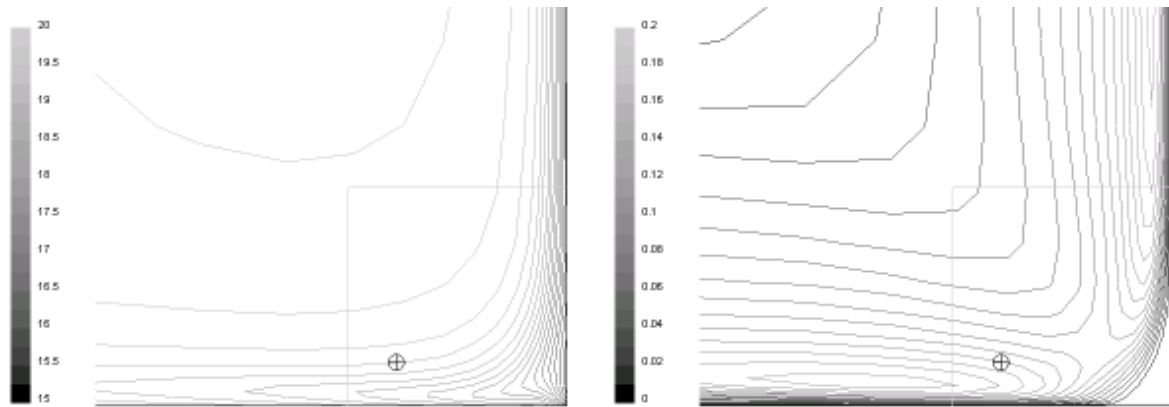


Abb. 134: CFD-Berechnung zur räumlichen Verteilung der Lufttemperatur (links, in °C) und Luftgeschwindigkeit (rechts, in m/s) am unteren Ende einer 5 m hohen Fassade. Zur Orientierung ist in 20 mm Höhe und 78 mm Entfernung von der Fassade der Referenzpunkt eingezeichnet, an dem sich in den Messungen im Projekt SurTec der Luftgeschwindigkeitssensor befand. Das umgebende Quadrat hat eine Kantenlänge von 100 mm. Randbedingungen: Außentemperatur -14 °C , mittlere Raumlufthtemperatur 21 °C , U-Wert der Fassade $0,85\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, Luftgeschwindigkeit im Referenzpunkt $0,11\text{ m/s}$, Temperatur am Referenzpunkt $19,1\text{ °C}$.

In der Simulation sind die Temperaturen im Bereich des Punktes, an dem die Messungen vorgenommen wurden, etwa 2 K niedriger als im Raum. Die simulierte Luftgeschwindigkeit beträgt dabei $0,11\text{ m/s}$, was gut mit den Messergebnissen aus Abb. 133 korrespondiert. In der Geschwindigkeitsdarstellung in Abb. 134 rechts sieht man, dass die Luftgeschwindigkeiten noch etwas höher werden können als am Messpunkt: Am Boden vor dem Fenster bildet sich eine Geschwindigkeitskeule, die größenordnungsmäßig bis $0,5\text{ m}$ in den Raum reicht. Bei niedrigeren Außentemperaturen, als sie während der Messung auftraten, kann es somit einzelne Punkte im Raum geben, an denen die Luftgeschwindigkeiten und -temperaturen die Grenze des Komfortbereichs erreichen. Ab einem Abstand von ca. $0,5\text{ m}$ von der Fassade ist jedoch mit Beeinträchtigungen des Komforts nicht mehr zu rechnen.

Als zentrales Ergebnis der Messungen bleibt somit festzuhalten, dass die Luftgeschwindigkeiten und -temperaturen vor der Fassade bei der hier gegebenen hohen thermischen Qualität komfortabel bleiben, und dies trotz der großen Höhe der Fassade.

In Abb. 132 ist zu erkennen, dass die im Abstand von 15 Minuten aufeinander folgenden Messwerte der Luftgeschwindigkeit sich erheblich unterscheiden können. Es war daher von Interesse, den Zeitverlauf innerhalb eines Messintervalls näher zu untersuchen: Welcher Art sind die kurzzeitigen Fluktuationen der Geschwindigkeit? Bilden sich eventuell Kaltluftblasen, die in regelmäßigen Abständen an der Fassade herunterfallen? Zur Untersuchung dieser Fragen wurde in der Zeit vom 4.3., 17 Uhr bis zum 5.3., 12:30 Uhr die Messdatenerfassung auf 1-Minuten-Werte umgestellt. Aus technischen Gründen konnten in dieser Periode nur diejenigen Messdaten festgehalten werden, die unmittelbar mit der Strömungsmessung zusammenhängen;



die Datenerfassung im übrigen Gebäude musste vorübergehend abgeschaltet werden.

Wie man in Abb. 135 sieht, spielen sich die auftretenden Fluktuationen auf kürzeren Zeitskalen als einer Minute ab: Kontinuierliche Zeitverläufe der Luftgeschwindigkeit sind auch bei dieser Auflösung nicht zu erkennen. Eine Fourieranalyse der 1-Minuten-Werte zeigte ebenfalls keine bevorzugte Frequenz. Besondere Eigenschaften der Strömungsschwankungen, die über die bei Raumluftströmungen in der Praxis stets vorhandene Turbulenz hinausgehen, konnten nicht nachgewiesen werden.

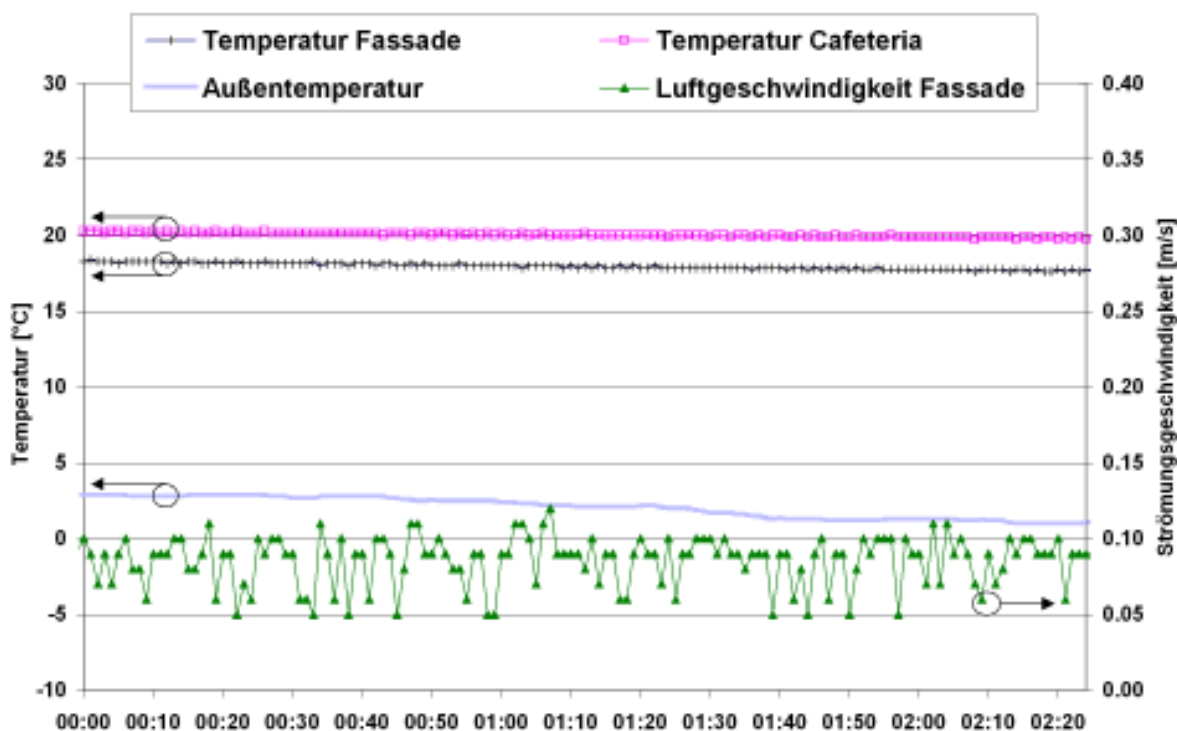


Abb. 135: Lufttemperaturen in der Cafeteria und Strömungsgeschwindigkeit am Messpunkt als 1-Minuten-Momentanwerte über einen Zeitraum von ca. 2 Stunden.

7.6 Tageslichtnutzung

Zur Beurteilung der Tageslichtausnutzung im Büroteil des Gebäudes SurTec wurde eine Lichtstärkemessung durchgeführt. Der Tageslichtquotient stellt das Verhältnis der Lichtstärke im Gebäude (ohne Kunstlicht) zur außerhalb des Gebäudes vorhandenen Beleuchtungsstärke dar. Er wird bei bedecktem Himmel, mit möglichst gleichmäßiger Leuchtdichteverteilung, gemessen. Zeiten mit direkter Sonnenstrahlung oder auch nur teilbewölktem Himmel scheiden für die Messung aus.

Die Messungen zur Bestimmung des Tageslichtquotienten wurden am 28.2.02 in einem ausgewählten Büroraum und einigen Hauptverkehrswegen im Gebäude durchgeführt. Dazu wurden zwei digitale Lichtstärke-Messgeräte vom Typ „MAVO-LUX digital“ der Fa. Gossen eingesetzt (Leihgabe vom ISE/Freiburg). Ausgewählt wurde als typischer Arbeitsplatz das mittlere Büro im 1. OG des nördlichen Büroflügels. Der Raum verfügt über zwei großflächige Fenster Richtung Osten, Glastrennwände zu den Nachbarbüros sowie zwei Glastüren zum Atrium. Vermessen wurde der nördliche der beiden Arbeitsplätze an drei Messpunkten auf der Schreibtischoberfläche (siehe Abb. 137).



Abb. 136: Repräsentatives Büro im Projekt SurTec, in dem die Lichtstärkemessung durchgeführt wurde. Das Licht-Messgerät befindet sich auf der Schreibtischoberfläche.

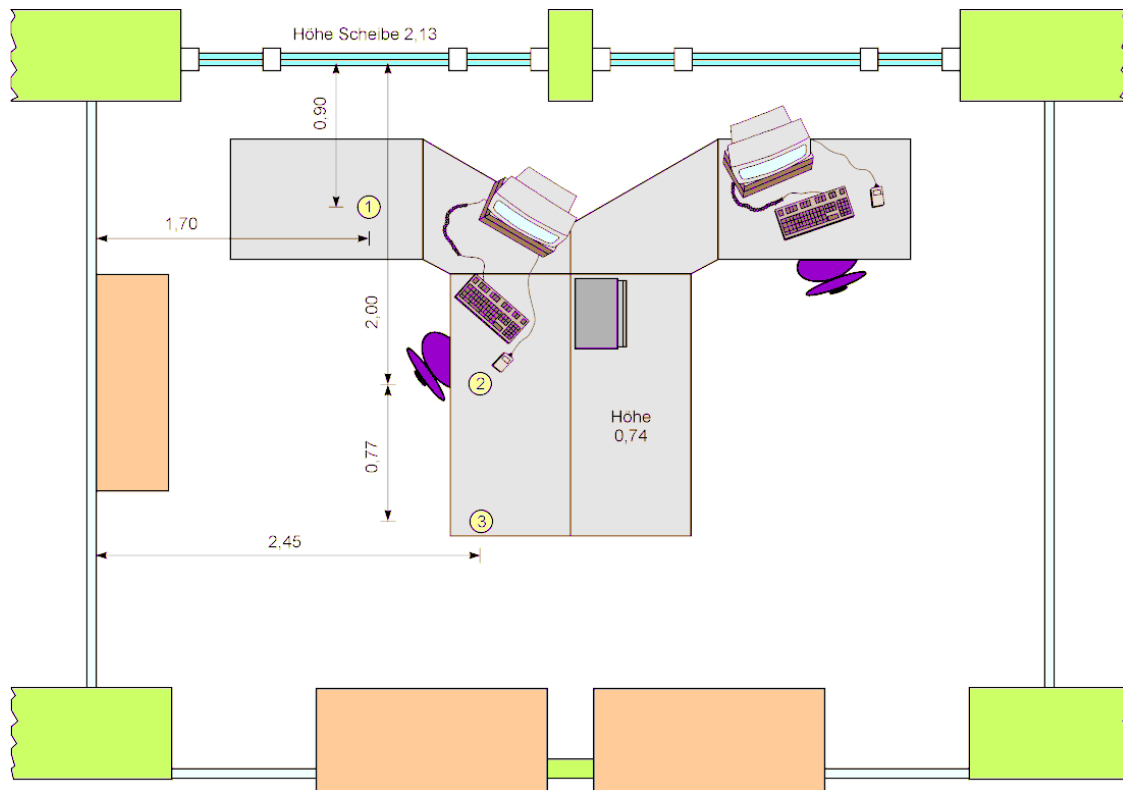


Abb. 137: Raumgeometrien des Büroraumes in dem die Lichtmessung durchgeführt wurde. Auf dem linken Schreibtisch (L-Form) sind die drei Messpunkte eingezeichnet und bemaßt.

Bei der Messung wurden die Innbeleuchtungsstärke an der jeweiligen Stelle und die Außenbeleuchtungsstärke auf dem Dach gleichzeitig gemessen (Absprache der Mess-Zeitpunkte mit Funkgeräten). Für das Büro ergeben sich die folgenden Ergebnisse:

Meßpunkt	Raumtiefe (ab Scheiben- oberfläche)	Beleuchtungs- stärke innen [lux]	Beleuchtungs- stärke außen [lux]	Tageslicht- quotient (Mittelwert)
1	90 cm	126	3426	3,7 %
2	200 cm	67	4618	1,4 %
3	277 cm	102	3528	2,9 %

Tabelle 20: Messdaten der Tageslichtquotient-Messungen im ausgewählten Büroraum mit den berechneten Ergebnissen. Die Messdaten stellen jeweils den Mittelwert aus 7 bis 10 Einzelmessungen dar.

Der Tageslichtquotient nimmt normalerweise mit steigender Entfernung zum Fenster ab. Hier fällt der Wert des Messpunktes 2 mit 1,4 % etwas aus der Reihe. Dies hat seine Ursache in der Verschattung durch den Bildschirm. Die Ergebnisse stellen insgesamt normal gute Tageslichtquotienten für einen Büroraum dar. Werte zwischen 2 bis 4 % sind nach [SEV 8911] als normal zu bewerten.



Bei künstlicher Beleuchtung wurden in diesem Büro bei Stufe 1 der Lampe (110 W) 450 lux auf der Schreibtischoberfläche gemessen. Bei Stufe 2 (220 W) waren es 530 lux. Ohne künstliche Beleuchtung wurden 290 lux gemessen. Die Daten stellen gute Verhältnisse für normale Arbeitsplätze dar.

Die Messungen einiger ausgewählter Verkehrswege ergaben folgende Ergebnisse:

Ort	Lage	Beleuchtungs- stärke innen [lux]	Beleuchtungs- stärke außen [lux]	Tageslicht- quotient (Mittelwert)
Atrium, Steg 1. OG, vor Bürofront	9,0 m zur Nordfassade	439	7021	6,2 %
Atrium EG	11,8 m von Nordfassade	1050	9919	10,6 %
Lichtgang 1. OG	Lagerwand 0,9 m Produktionswand 1,5 m	292	2272	12,8 %

Tabelle 21: Messdaten der Tageslichtquotient-Messungen von drei Verkehrswegeflächen. Die Messdaten stellen jeweils den Mittelwert aus 9 bis 10 Einzelmessungen dar.

Die Werte liegen für Verkehrswege im Gebäude sehr hoch. Dies liegt daran, dass sich alle drei Messpunkte unter Dachverglasungsflächen befinden. Dies stellt eine gute Voraussetzung für effiziente Tageslichtausnutzung dar.



8 Literatur

- [AG EWT 2002] **Protokoll der AG Erdwärmetauscher** auf dem SolarBau TK3 Workshop in Zwingenberg, 22.3.2002
- [DIN EN 27726] DIN EN 27726: **Instrumente und Verfahren zur Messung physikalischer Größen**, Deutsche Fassung EN 27726 : 1993, Deutsches Institut für Normung e.V., Dez 1993.
- [DIN 1946] DIN 1946: **Raumluftechnik**, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln); Teil 2, Deutsche Norm, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Januar 1994.
- [DIN 277] DIN 277: **Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau**. Deutsche Norm, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Juni 1987.
- [EnEV] **Energieeinsparverordnung**: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Bundeskabinettdvorange, 16 November 2001.
- [Gemis] Fritsche, U.; Leuchtner, J.; Matthes, F.C.: **Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)**, Version 3.0, Öko-Institut, Darmstadt 1997.
- [ISO 7730] DIN EN ISO 7730: **Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit**; Gemäßigtes Umgebungsklima, Deutsche Fassung EN ISO 7730 : 1995, Deutsches Institut für Normung e.V., September 1995.
- [Peper 2001] Peper, Søren; Feist, Wolfgang: **Wissenschaftliche Begleitung, Qualitätssicherung und Messdatenauswertung beim Projekt „Fabrik als Passivhaus“**, Zwischenbericht. Darmstadt, Passivhaus Institut, Oktober 2001.
- [Peper 2002] Peper, Søren; Feist, Wolfgang: **Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Analyse im dritten Betriebsjahr**. Endbericht, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juli 2002.



- [Pfafferott 2002] Pfafferott, Jens: **Standardgrafiken zur Auswertung von Messdaten für die nächtliche Entwärmung von Gebäuden**. Arbeitspapier auf Grundlage des SolarBau Workshops in Zwingenberg zu „Strategien und Konzepten für schlanke Gebäude“. Freiburg, Fraunhofer ISE, November 2002
- [Schnieders 2001] Schnieders, Jürgen: **Dynamische Gebäudesimulation für das Passivhaus-Produktionsgebäude der Firma SurTec in Zwingenberg**, Endbericht, Darmstadt, Passivhaus Institut, Januar 2001
- [Schnieders 2001a] Schnieders, Jürgen; Feist, Wolfgang; Pfluger, Rainer; Kah, Oliver: **CEPHEUS – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht**. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22, Passivhaus Institut, Darmstadt 2001.
- [Schwertfeger 2000] Schwertfeger, Peter: **Darstellung Lüftungstechnik und Wärmeversorgung in einer Passivhausfabrik**. Interner Bericht, Büro inPlan, Pfungstadt Mai 2000
- [SEV 8911] SEV 8911: **Innenbeleuchtung mit Tageslicht**, SLG Leitsätze, Schweiz 1989
- [Reise/Pfafferott 2001] Reise, Christian; Pfafferott, Jens: **Erd-Luft-Register-Auswertung I**. Beispielhafte Auswertung im Rahmen des SolarBau Projektes. Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme ISE, Freiburg Oktober 2001
- [RWE 1998] RWE Energie Bau-Handbuch, 12. Ausgabe, Essen, 1998