

# Low-cost-Halle mit Pfiff

Uwe Grossmann

**Bericht zu einer Industriehalle in Kassel mit spezifischen Investitionskosten von 1100 DEM je m<sup>2</sup> Hallenfläche; Lüfterregister, Deckenstrahlungsheizung und konsequente Tageslichtnutzung.**

In Kassel wurde 1998 eine Produktionshalle im Niedrigenergie-Dämmstandard und unter Verwendung ressourcensparender Baumaterialien und mit einer natürlichen Lüftung errichtet. Das Energiekonzept wurde in einem integralen Planungsprozess zwischen Architekten, Haustechniker und Lichtplaner entwickelt. Die Halle mit einer Nutzfläche von 2070 m<sup>2</sup> und Aussenmassen von 62,4 m auf 33,4 m ist asymmetrisch in zwei Längsschiffe geteilt, die eine Spannweite von 21,28 m und 11,73 m aufweisen. Die Halle besteht aus 2-mal 5 Hallenfeldern und ist durchgängig als Holzkonstruktion in

Brettschichtholz (BSH) ausgeführt. Die Hallenhöhe beträgt 6,83 m. Jedes Schiff ist mit einer Kranbahn ausgestattet, wodurch die lichte Arbeitshöhe der Halle 5,37 m (Unterkant Kranbahn) beträgt.

In Hallenquerrichtung überspannen Fachwerkrahmen aus Brettschichtholz (BSH) die zwei Hallenfelder. In Hallenlängsrichtung sind BSH-Binder mit einer Länge von 12,76 m zwischen die BSH-Fachwerkrahmen eingehängt. Die BSH-Fachwerkrahmen sind zwischen eingespannten BSH-Stütz-Rahmen eingefügt. Die Aussteifung in Längsrichtung erfolgt durch Stahlprofilaukreuzungen in den Fassaden, in Querrichtung durch BSH-Rahmen.

Die Aussenwände sind als Holzrahmenkonstruktion in Niedrigenergiestandard ausgeführt: 18 cm Mineralwolle-Dämmung, innenseitiger OSB-Plattenverkleidung und aussenseitiger Lärchenholzschalung. Die inneren Oberflächen der Halle wurden mit Naturfarben gestrichen. Für die OSB-Wandverkleidung wurden Mineralfarben und für das Holztragewerk Naturharzöllasuren verwendet. Die Fenster in Fassaden und Sheds bestehen aus Holzfenstern mit Wärmeschutzverglasung. Das Dach wurde als Akustik-Stahltrapezblechdach mit 15 cm aussen liegender Dämmung ausgeführt und mit heller, lichtreflektierender Bitumenbahn abgedichtet. Zugunsten der «weissen» Dachbahn mit besserer Lichtreflexion, höherer Tageslichtausnutzung in den Sheds und geringerer sommerlicher Aufheizung wurde auf eine Dachbegrünung, wie sie im Vorprojekt geplant war, verzichtet. Die armierte Betonbodenplatte auf Streifenfundamenten wurde mit geschäumtem Altglasbruch als Schüttung gedämmt. Geschäumter Altglasbruch findet sonst im Strassenbau Verwendung und wurde hier das erste Mal zur Dämmung einer Bodenplatte eingesetzt, nachdem der Hersteller die Gewähr für diesen Verwendungszweck übernommen hatte. Der Bodenaushub

wurde für die Aufböschung des Geländes rund um die Halle eingesetzt. Der Jahrestransmissionswärmebedarf des Ausführungsprojekts liegt mit 3,6 kWh/m<sup>2</sup>a über 2,5-mal niedriger, als nach der Wärmeschutzverordnung 1995 für dieses Gebäude zulässig wäre. Das Referenzprojekt erreicht eine Unterschreitung des Grenzwertes für  $Q_T$  um 15%.

## Lüftung

Das Lüftungssystem ist als Quellluftsystem konzipiert und so ausgelegt, dass der thermische Auftrieb durch die Lüfterwärmung in der Halle als Antrieb ausreicht und auf Ventilatoren verzichtet werden kann. Quellluftsysteme ohne mechanischen Antrieb sind schon seit Mitte des 19. Jahrhunderts bekannt. Neu ist ihre Kombination mit Erdkanälen und Wärmerückgewinnung (WRG) im Industriebau. Damit auf den mechanischen Antrieb des Lüftungssystems verzichtet werden kann, besitzen sämtliche Komponenten einen möglichst geringen Strömungswiderstand. Ausserdem muss die Gebäudehülle luftdicht ausgeführt sein, der Fugenluftwechsel sollte daher einen Wert von 0,05/h nicht überschreiten. Lediglich für den Fall von Inversionswetterlagen sind Ventilatoren eingebaut, deren Einsatz bisher jedoch nicht notwendig war.

Die Luft strömt durch zwei Luftbrunnen, die an der südlichen Grundstückmulde in einer hainartig aufzuforstenden Wiese liegen und gelangt von dort auf einem Niveau von minus 4 m in die beiden Erdkanäle. Jeder ist 50 m lang, besteht aus konventionellen Stahlbetonrohren DN 1000, wie sie für Abwasserkanalisation eingesetzt werden, und endet unter der Halle auf einem Niveau von minus 3 m in einem Zuluftsammelschacht. Die Erdkanäle sind so ausgelegt, dass sich die Zuluft im Sommer um bis zu 5 K abkühlt und im Winter um maximal 5 K erwärmt. Die beiden im Zuluftsammelschacht installierten Wärmetauscher erwärmen die Luft auf etwa 15°C. Die Luft wird anschliessend durch ein H-förmiges Kanalnetz im Boden der Halle auf insgesamt 10 begeh- und

befahrbare, im Hallenboden integrierte Quellluftauslässe verteilt. Das ermöglicht die uneingeschränkte Nutzung der Halle ohne störende Zuluftkanäle und Zuluftputzen. Die Zuluft strömt mit so geringen Geschwindigkeiten aus den Quellluftauslässen, dass Zugescheinungen und das Aufwirbeln von Staub unterbleiben. An Wärmequellen steigt die Luft auf, wobei sie verbrauchte, schadstoffhaltige Luft nach oben verdrängt. Da eine Durchmischung der Zuluft mit der Hallenluft nicht stattfindet, ist trotz einer geringen Luftwechselrate eine bessere Luftqualität als bei einer Mischlüftung sichergestellt. Durch die insgesamt 32 Rauch- und Wärmeabzugsklappen (RWA-Klappen) kann die Luft entweichen. Der Öffnungsgrad der RWA-Klappen steuert gleichzeitig die Luftmenge, die der Halle zugeführt wird. Sie liegt je nach Bedarf zwischen 1500 und 6000 m<sup>3</sup>/h. Während der Heizperiode bleiben die RWA-Klappen geschlossen, damit die warme Abluft nur durch den in einem Shed befindlichen Luft-Wasser-Abluftwärme-Tauscher entweicht. Die dort zurückgewonnene Wärme wird durch ein Kreislaufverbundsystem dem ersten Wärmetauscher im Zuluftsammelschacht zugeführt. Der Abluft sollten so je nach Jahreszeit 36 % bis 50 % ihrer Wärme entzogen werden.



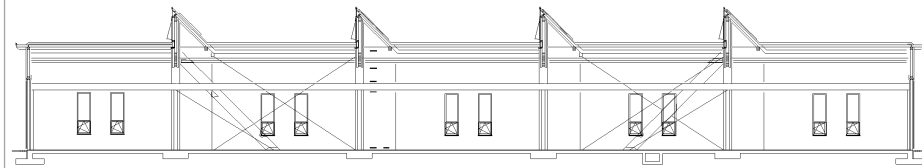
Die Fabrik auf der grünen Wiese.

Tageslichtnutzung, ohne die sommerlichen Temperaturen ansteigen zu lassen.

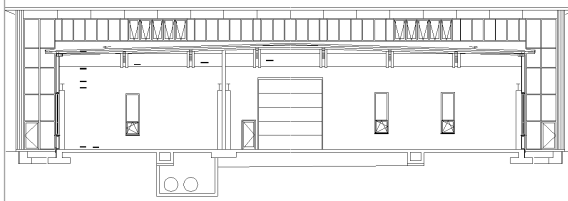
Die Werkhalle in Kassel. Die optisch unvorteilhaften diagonalen Holzbinder wurden in Abänderung des ursprünglichen Projektes anstelle von Stahlseilen eingesetzt.



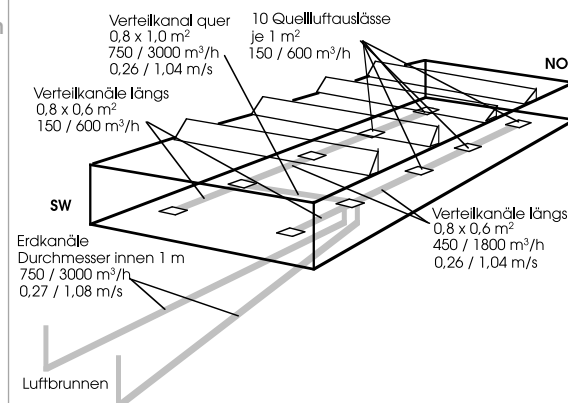
Ansicht der Südostfassade



Schnitt durch die Halle



Lüftungssystem



Die energetische Optimierung der Produktionshalle, im Speziellen die Optimierung des Betriebsenergiebedarfs, erforderte aufgrund der Komplexität und der Vielzahl der sich über den Betrachtungszeitraum häufig ändernden Einflussgrößen Simulationsprogramme. Die auftretende Datenmenge ist mit einfachen Berechnungsprogrammen oder der Tabellenkalkulation nicht zu verarbeiten. Zum Einsatz kamen ein dynamisches Gebäudesimulationsprogramm zur Berechnung der Heizenergiebilanz sowie ein fluiddynamisches Simulationsprogramm zur Berechnung der Luftströmungen in der Halle.

## Heizung

Durch den sehr guten Dämmstandard ist für die Halle nur eine geringe Heizleistung notwendig, die durch eine Nahwärmeleitung von der Kesselanlage einer benachbarten Halle mitgedeckt wird. Als Heizungssystem kommt eine Deckenstrahlheizung zum Einsatz. Dieses System bietet wesentliche Vorteile:

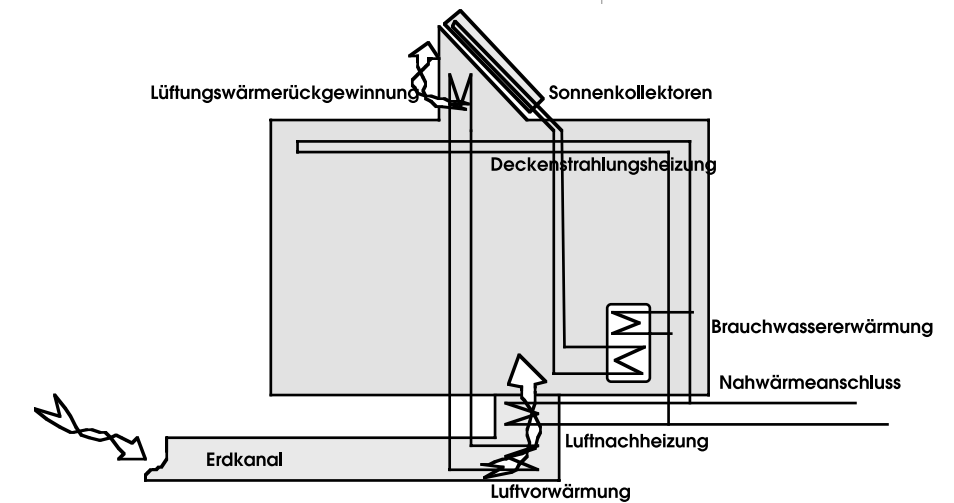
- Durch den hohen Strahlungsanteil kann bei gleichbleibendem physiologischem Wärmeempfinden der Personen die Raumlufttemperatur in Arbeitshöhe (die ersten 2 m über dem Fussboden) um rund 3K abgesenkt werden.
- Innerhalb der Halle ergeben sich nur minimale thermisch bedingte Luftströmungen. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die Funktion der Quelllüftung. Resultierend aus der geringen thermischen Luftströmung ergibt sich auch nur eine geringe Temperaturschichtung innerhalb der Halle.
- Die Temperaturerhöhung in der Hallendecke liegt nur bei etwa 3K. Dies führt zu einer günstigeren Hallenmitteltemperatur als bei der sonst üblichen Luftheizung.
- Die Heizflächen fallen aufgrund der hochwärmegeämmten Bauweise der Halle relativ klein aus. Es wird keine elektrische Energie zum Betrieb von Lüftern benötigt.
- Zusammen wird hierdurch eine Primärenergieeinsparung von 30 % bis 50 % erwartet.
- Durch den hohen Strahlungsanteil wird ausserdem ein angenehmes Wärmeempfinden am Arbeitsplatz erreicht. Durch die nur geringen Luftgeschwindigkeiten in der Halle werden Staubaufwirbelungen weitgehend vermieden und der Transport von Luftschadstoffen in Horizontalrichtung unterbunden.
- Da die Heizflächen sehr flach sind, haben sie unter der Hallendecke oberhalb der Kranbahn Platz. Die Aufstellung der Maschinen bleibt somit flexibel.
- Die Gefahr der Abschattung von Heizflächen durch die Aufstellung der Maschinen ist gering. Eine Beeinflussung oder Behinderung der Arbeitsabläufe ist somit weitgehend ausgeschlossen.
- Die Installation der Heizflächen unter der Hallendecke vereinfacht auch den Anschluss dieser Flächen. Die gesamte Verrohrung erfolgt unter der Hallendecke in offener Verlegung.

Um eine möglichst geringe Abschattung des natürlichen Lichtwurfs unter den Sheds zu erzielen und um gegenseitige Abschattungen mit der Beleuchtung zu vermeiden, sind die Deckenstrahlplatten in zehn Bändern in Hallenquerrichtung montiert. Zur Vermeidung von Schallreflektionen an den Bändern sind die Bleche mit einer Lochung ausgeführt.

## Tageslichtnutzung

Die Halle besitzt mit ihren nach Nordosten aufgestellten Oberlichtern, die seitlich als «Ausklapper» bis zum Boden herunterlaufen, ein interessantes Öffnungsdispositiv. Die Vorteile des Ausführungsprojektes gegenüber dem Vorprojekt sind:

- Das Ausführungsprojekt nimmt mit grosszügigen Nordostsheds auf das günstige Morgenlicht Bezug. Damit werden Blenderscheinungen und unerwünschte solare Wärmegewinne vermieden und zudem – zumindest unterhalb der Oberlichter – über die ganze Gebäudebreite «Tageslichtberge» erzielt.
- Ein genügender visueller Aussenkontakt ist durch die Schlitzfenster und den seitlich bis zum Boden reichenden «Ausklappern» möglich. Dies insbesondere auch, da überall normale, klar verglaste Wärmeschutzgläser und nicht opake Kunststoffprodukte oder farbverfälschende Pressgläser eingesetzt werden.
- Auf einen Sonnenschutz und damit unter diesem Titel anfallende Kosten und Tageslichtverluste bei Sonne kann bei den nordostorientierten Oberlichtöffnungen verzichtet werden. Die Variante sollte dadurch dem Anspruch «heatless lighting» zumindest bei klarem Himmel gerecht werden. Aufgrund des erheblichen Versprossungsgrades – sowohl in der Fensterebene als auch durch Tragwerksteile dahinter – erreicht schätzungsweise mindestens ein Viertel des einfallenden Tageslichtes nicht die Arbeitsplätze. Zusammen mit den üblichen Transmissionsverlusten im Wärmeschutzglas (Absorption und Reflexion zusammen ca. 28 %) gelangt somit höchstens die Hälfte des verfügbaren Himmelslichtes in den Innenraum. Daher sollte nichts unversucht gelassen werden, was tageslichtunterstützende Wirkung verspricht. Dazu gehören helle Aussenreflektoren bzw. Dachflächen vor den Sheds ebenso wie helle Decken, Wände und Betriebseinrichtungen. Derartige Sekundärmassnahmen begünstigen Interreflexionen, welche sich in einem deutlich niedrigeren Kunstlicheinsatz und einem freundlicheren Raumeindruck niederschlagen. Deshalb wurden die Innenwände hell lasiert.



Wärmeversorgung

Zur besseren Tageslichtreflexion über die inneren Dachschrägen der Sheds in die Halle verwendete man hell beschieferte Dachbahnen, die einen Reflexionsfaktor von 35% statt 15% bei grüner Beschieferung haben. Das senkt zudem die Oberflächentemperatur der Dachbahnen und damit deren sekundäre Wärmeabstrahlung nach innen und verursacht keine Mehrkosten. In Gegenlichtsituationen, hervorgerufen durch niedrige Sonnenstände oder hell hinterleuchteten Hochnebeldecken, dürften die vertikalen Schlitzfenster Blendung erzeugen. Als Gegenmassnahme wurde auf der sonnigen Südostseite ein sich auf einer Sekundärstruktur emporrankender Pflanzenschutz empfohlen (Pflanzenschutz als saisonal selektive, natürliche Beschattungsanlage) und auf der südwestlichen Lieferhofseite eine aussen liegende Verschattung oder eine isolierglasintegrierte Lösung (z.B. handbediente Mikrojalousien).



Tor zu! Die Hallentore sind ein Komfort- und Energiethema in Industriebauten.

### Riechtests

Die Riechtests werden nach der Fanger-Methode durchgeführt. Die Fanger-Methode, entwickelt von P.O. Fanger, Universität Kopenhagen, wird seit vielen Jahren zur Bewertung der Luftqualität in Gebäuden benutzt. Normalerweise beurteilen ausgesuchte und trainierte Personen die Luftqualität über die Bewertungseinheit decipol als Mass für die empfundene Luftqualität. Der Riechtest im Rahmen dieses Projektes kann aber aus zeitlichen und finanziellen Gründen nicht mit trainierten Personen durchgeführt werden. Statt dessen wird ein Verfahren mit einer grösseren Anzahl untrainierter Personen angewendet, das ebenfalls von Fanger entwickelt wurde. Die beteiligten Personen betreten das zu bewertende Gebäude, atmen tief durch die Nase ein und geben dann auf einer Skala von 10 (völlig akzeptabel) bis -10 (völlig unakzeptabel) ihren Eindruck von der Luftqualität wieder.

### Ergebnisse

Seit etwa zwei Jahren werden die Riechtests und die Befragungen der Beschäftigten durchgeführt, während die Messwerterfassung seit 21 Monaten arbeitet. Sowohl während der Vorbereitungen für die Evaluation als auch während der bisherigen Durchführung der Untersu-

chungen der Halle ergaben sich Erkenntnisse, wie ein solches Gebäude verbessert werden könnte und welche Punkte in der Planungs- und Bauphase verstärkt beachtet werden müssten. Die Simulation der realisierten Halle aus der Planungsphase liessen einen endenergiebezogenen Jahresheizwärmebedarf von  $22 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$  erwarten, während eine konventionelle Halle mit etwa gleichen Abmessungen einen Jahresheizwärmebedarf von  $296 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$  benötigt. Der gemessene und witterungsberereinigte Jahresheizwärmebedarf der Halle betrug  $1999 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$  ( $15 \text{ kWh/m}^3 \text{ a}$ ). Im Vergleich zu der Referenzhalle ergibt sich eine Heizenergieersparnis von 60%. Gegenüber den Ergebnissen der Simulation der Halle liegt der tatsächliche Verbrauch noch deutlich zu hoch. Rasch war klar, dass die geplanten Verbrauchswerte erst nach der Behebung entscheidender Mängel in der Luftdichtigkeit der Halle zu erreichen sind.

### Luftdichtigkeit

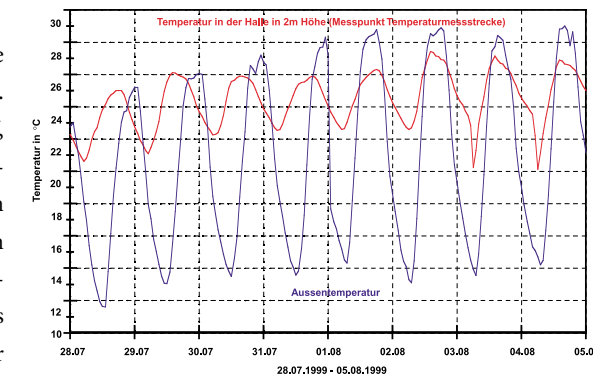
Wesentlich für das Funktionieren des Lüftungssystems und der Wärmerückgewinnung sowie für das Erreichen des geringen Heizenergieverbrauchs war eine gute Luftdichtigkeit der Halle mit einem Fugenluftwechsel von  $0,05/\text{h}$ . Erste Untersuchungen nach Inbetriebnahme der Halle ergaben einige Leckagen insbesondere an den Stössen der OSB-Platten, den Dach-Wandanschlüssen sowie den Fensteranschlüssen der Erkerfenster. Diese Leckagen wurden nachträglich abgedichtet. Auf Grund eines Planungsfehlers gab es Undichtigkeiten im Dach-Wandanschluss, deren Beseitigung sich als äusserst kostspielig erwies. Der aus dem  $n_{50}$ -Wert von  $2,1/\text{h}$  umgerechnete Luftwechsel lag bei  $0,15/\text{h}$  und damit dreimal so hoch wie gefordert. Ein vor kurzem durchgeführter zweiter Luftdichtigkeitstest ergab nach Durchführung der Abdichtmassnahmen einen  $n_{50}$ -Wert von 1, was einem Luftwechsel von  $0,07/\text{h}$  entspricht. Hierbei zeigten sich immer noch einige Undichtigkeiten an den Anschlüssen der Erkerfenster, die nachgebessert werden müssen. Es ist damit zu rechnen, dass der geforderte Luftwechsel ungefähr erreicht und das Lüftungssystem einschliesslich Wärmetauscher wie geplant funktionieren wird.

### Hallentore

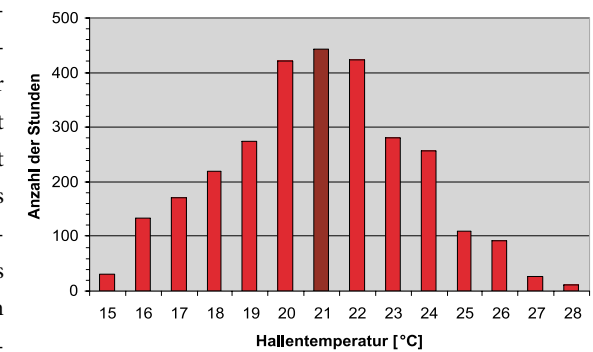
Aus Gründen der besseren Hallendurchlüftung ordnete man die Hallentore parallel zur Hauptwindrichtung an. Da in der Planung ein U-förmiger Produktionsablauf, beginnend und endend am Südtor, vorgesehen war, wurde das Nordtor mit einem kostengünstigeren langsam laufenden Sektionaltor und nur das Südtor mit einem Schnellaufator ausgerüstet. Nach Aussagen der Beschäftigten kommt es trotz der kurzen Öffnungszeiten des Südtors zu Zugerscheinungen in der Halle, weil meist der Wind aus dieser Richtung weht. Durch die Umstellung auf einen linearen Produktionsablauf wurde das nördliche Tor öfters und länger geöffnet, was erhöhte Zugerscheinungen und eine stärkere Auskühlung der Halle bewirkte. Da die Firmenleitung keine Beschränkungen der Anlieferung in die Halle wünscht, können die Tore nicht gegeneinander verriegelt werden. In der Zwischenzeit liess die Firmenleitung auf der Nordseite ein zusätzliches Schnellaufator vor den eigentlichen Sektionaltor installieren. Dadurch hat sich die Öffnungsdauer des Nordtors erheblich gesenkt. Trotzdem scheint der Luftaustausch bei geöffneten Toren erheblich zu sein, so dass für Folgeprojekte nur empfohlen werden kann, die Tore orthogonal zur Hauptwindrichtung anzuordnen und generell Schnellaufatortore, besser noch Schleusen, einzusetzen. Das Unternehmen plant inzwischen eine weitere Halle zu bauen. Hier sollen von vornherein die Tore im Südwesten mit Schleusen und alle anderen Tore mit Schnellaufatortoren ausgerüstet werden.

### Wassereinbruch im Erdkanal

Das Grundwasserniveau im Bereich der Halle liegt bei etwa 7 m. Insofern war es bei der Planung der Erdkanäle nicht notwendig, diese gegen drückendes Wasser zu sichern. Trotzdem liefen sie nach ergiebigen Niederschlägen voll Wasser. Das Niederschlagswasser versickert in den offenen Rinnen und im Teich und sammelt sich bei starken Niederschlägen im gestörten Bodenaufbau unter der Halle, von wo es wie drückendes Wasser auf die drei Gewerke der Erdkanäle wirkt. Die Leckagen wurden schliesslich im Zuluftsammelschacht gefunden. Ursache war mangelhaft verdichteter Beton. Die Betonröhren der Erdkanäle wiesen ebenfalls kleine Undichtigkeiten auf. Hier lag es daran, dass einige Rohre nicht weit genug in die Muffe des davor liegenden Rohrs eingeschoben wurden. Diese Undichtigkeiten konnten ebenfalls nachträglich abgedichtet werden.



Temperaturverlauf in der Halle während einer Sommerwoche (Berechnung: Fachhochschule Erfurt).



Häufigkeitsverteilung der Temperatur in der Halle (Berechnung: Fachhochschule Erfurt).

### Behaglichkeit

Ein wichtiger Beitrag der Erdkanäle ist Kühlung der Halle im Sommer. In Verbindung mit dem hohen Wärmedämmstandard ergeben die Temperaturmessungen angenehme Werte. Die höchste im Jahr 1999 während der Arbeitszeit gemessene Temperatur in der Halle betrug  $27,5^\circ\text{C}$ . In dieser Zeit konnte die Hallentemperatur durch die Nachtlüftung deutlich gesenkt werden. Während der Arbeitszeit ist insgesamt gesehen die Stundenzahl mit Temperaturen über  $26^\circ\text{C}$  vernachlässigbar gering. Die Befragungen der Beschäftigten zeigen damit übereinstimmend in den heissen Monaten eine sehr grosse Arbeitsplatzzufriedenheit. Die gute Wärmedämmung der Halle und die Kühlleistung der Erdkanäle haben sich bewährt. Schwierigkeiten bereitete jedoch die Temperierung der Halle in der kalten Jahreszeit.



Blower-Door zur Messung der Undichtigkeit der Bauhülle.



Besser bauen für die Industrie.

### Fazit

Der Niedrigenergie-Standard hat sich auch bei einer Produktionshalle bewährt und bisher eine Energieeinsparung von 60% bewirkt. Bei Beachtung einiger Punkte könnte der Einspareffekt noch wesentlich höher sein:

- Die Luftdichtigkeit stellt sowohl die Fachplaner als auch die ausführenden Firmen vor dieselben Probleme wie bei Wohngebäuden. Eine Übertragung der im Wohnungsbau gemachten Erfahrungen auf den Industriebau scheint also durchaus möglich.
- Schnellauftore sind für den Niedrigenergie- oder Passivhausstandard obligatorisch. Die bessere Lösung wären Schleusen.
- Schnellauftore gewährleisten eine bessere Luftdichtigkeit, als vor dem Blower-Door-Test vermutet wurde, die vorhandenen Leckagen sollten trotzdem weiter reduziert werden. Hier besteht noch Entwicklungsbedarf.
- Gegenüberliegende Tore sollten möglichst vermieden oder gegeneinander verriegelt werden, um Durchzug zu vermeiden.

Das Lüftungssystem funktioniert trotz der von den Planungen abweichenden Randbedingungen gut. Bei der Planung sollte beachtet werden, dass

- der Erdkanal für die Übergangsjahreszeit mit einem Bypass ausgerüstet wird, damit die Luft nicht unnötig abgekühlt wird.
- die Quellluftauslässe untereinander abgeglichen werden müssen, damit eine gleichmässige Verteilung der Frischluft gewährleistet ist. Zum Einregeln reichen einstellbare Klappen aus. Die Erfassung der Volumenströme ist mit guten Thermoanemometern möglich, aber am unteren Rand der Nachweisbarkeit.
- eine sehr gute Luftdichtigkeit des Gebäudes notwendig ist, und es sollte, wie im Wohnungsbau üblich, vor Beginn des Innenausbaus ein Blower-Door-Test durchgeführt werden, um Nachbesserungen zu ermöglichen.
- sorgfältig durchgeführte Abdichtungen sowohl gegen Grundwasser als auch gegen drückendes Regenwasser für das störungsfreie Funktionieren der Erdkanäle unerlässlich sind.

### Autor

**Uwe Grossmann**

Dipl. Physiker

Universität Hannover

Fachbereich Architektur

Abteilung Technischer Ausbau

und Ressourcensparendes Bauen

D-30159 Hannover

[uwe.grossmann@mbox.rsb.uni-hannover.de](mailto:uwe.grossmann@mbox.rsb.uni-hannover.de)

Kennedy, Margrit et al. Energetische Optimierung einer Produktionshalle unter besonderer Berücksichtigung eines innovativen Lüftungskonzepts. Stuttgart. Fraunhofer IRB Verlag, 1999 oder als PDF-Datei im Internet unter [www.unics.uni-hannover.de/tarsb/](http://www.unics.uni-hannover.de/tarsb/) Informationen zu diesem und den anderen SolarBau TK3 Projekten unter [www.solarbau.de](http://www.solarbau.de)