

ETA-Fabrik – Ein Industriegebäude als Teil der Prozesskette

Die Reduktion des Primär und Endenergiebedarfs sowie der CO₂-Emissionen bei gleichzeitiger Steigerung der Produktivität und der Lastflexibilität stellen gegenläufige Ziele dar, die aus politischer, ökologischer und ökonomischer Sicht in den kommenden Jahren in Deutschland umzusetzen sind. Im Rahmen des von BMWi sowie Land Hessen geförderten und von der TU Darmstadt gemeinsam mit Industriepartnern unterstützten Forschungsprojektes ETA-Fabrik sollte ein neues Verständnis von Energieeffizienz entwickelt werden. Energiesysteme zu verstehen und Abhängigkeiten zu erkennen standen im Vordergrund.

Durch den Einsatz der richtigen Energieform in der notwendigen Menge zur richtigen Zeit am richtigen Ort werden Überkapazitäten vermieden und die Energieeffizienz wird auf diese Weise gesteigert. Über eine isolierte Optimierung jeder Subeinheit hinaus (z. B. Einzelmaschine, Heizungssystem, Kühlsystem) wurde das System Produktionsfabrik als Ganzes betrachtet und dadurch zusätzliche Einsparpotenziale identifiziert. Die ETA-Fabrik steht so für die energetische Systemoptimierung durch Verschieben der Systemgrenzen. Durch diesen Ansatz werden marktfähige, wirtschaftlich realisierbare Energieeinsparpotenziale von rund 40 % (Abb. 1) gegenüber einer konventionellen Produktionsstätte erwartet unter Wahrung der Systemeffizienz und Wirtschaftlichkeit. In einer interdisziplinären Projektstruktur bestehend aus Maschinenbauern, Bauingenieuren, Architekten, Verfahrenstechnikern und den industriellen Anwendern wurde das Produktionsgebäude als „Maschine um die Maschine“ betrachtet. Somit ergaben sich als wesentliche wissenschaftliche Fragestellungen: Wie kann unvermeidlich entstehende Abwärme im Produktionsgebäude weiterverwendet werden und wie kann dafür thermische Energie auf verschiede-



Abb. 1: Einsparpotenziale bei ganzheitlicher Betrachtung einer industriellen Fertigung¹

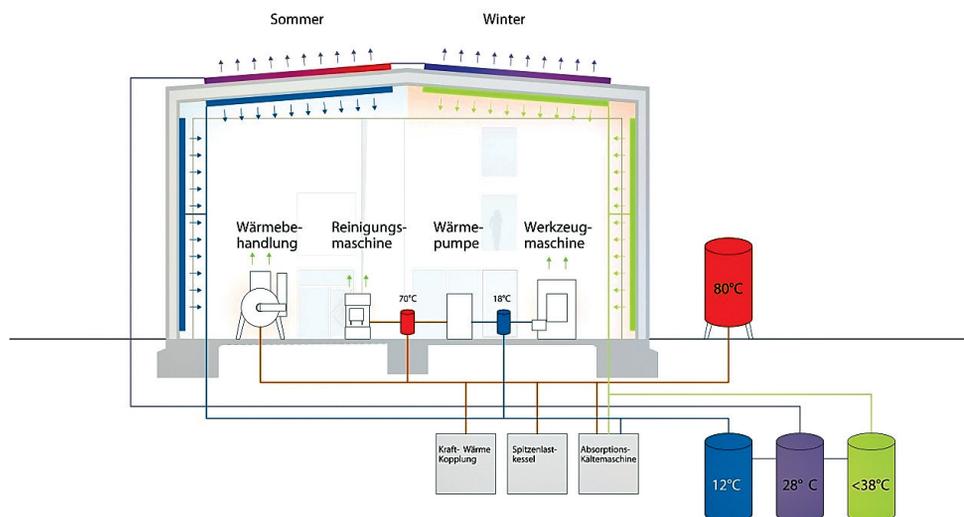


Abb. 2: Schema der gebäudeintegrierten thermischen Vernetzung²

nen Temperaturniveaus sinnvoll gespeichert werden? Wie kann eine Interaktion zwischen Produktion und Gebäude bzw. seiner umgebenden und tragenden Hülle von statten gehen? Kann beispielsweise die thermische Aktivierung von Flächen der Gebäudehülle aktiv zur Erwärmung und Kühlung des Gebäudes genutzt werden? Dafür wurde, zur Sicherstellung der Übertragbarkeit der im Projekt erzielten Ergebnisse auf möglichst viele Unternehmen, eine typische Produktionsprozesskette der metallverarbeitenden Industrie in ein eigenes entwickeltes Fabrikgebäude am Campus Lichtwiese der TU Darmstadt integriert. Durch die Verknüpfung von den Produktionsprozessen, der Gebäudetechnik sowie des Gebäudes und seiner Konstruktion wird das Effizienzpotenzial des Gesamtsystems erforscht und demonstriert. Diese Betrachtungsweise ermöglicht die Rückgewinnung bisher ungenutzter Verlustwärme sowie eine effiziente Abfuhr von Wärmeüberschüssen aus dem Gebäude. Die Planung zu einem derartigen Gebäude kann nur in einem integralen und interdisziplinären Prozess erfolgen, sodass dieser bereits Teil des Gebäudeansatzes ist: Energieeffizienz und Nachhaltigkeit. Bereits der architektonische Entwurf des Gebäudes orientiert sich also neben den Randbedingungen aus der Funktionalität vor allem an den energetischen Fragestellungen.

Energie- und gebäudetechnisches Konzept
Im Fokus der gebäudetechnischen Anlagen liegen insbesondere die Systeme zur thermischen Vernet-

zung der Produktionsmaschinen, der Versorgungstechnik und des Gebäudes. Technisch bilden drei wasserbasierte thermohydraulische Rohrleitungssysteme gemäß Abb. 2 die Grundstruktur zum Ausschöpfen der Effizienzpotenziale. Ein Kaltwasserniveau (ca. 15°C) zur Versorgung von Produktionsmaschinen, zur Kühlung und wasserbasierten Abwärmeabfuhr, ein Warmwasserniveau (ca. 35°C) zur Rückkühlung einer Absorptionskältemaschine und zur Nieder temperaturbeheizung des Gebäudes sowie ein Heißwasserniveau (ca. 85°C) zum Antrieb der Absorptionskältemaschine, gespeist aus Hochtemperaturabwärme sowie durch Blockheizkraftwerke. Die bedarfsabhängig optimale Betriebsweise des Gesamtsystems wird mit ca. 100 Feldgeräten (Pumpen, Ventilen, Großgeräten) der haustechnischen Anlagen sowie einem innovativen System der Gebäudeleittechnik mit ca. 600 Datenpunkten realisiert. Hierbei werden nicht nur konventionelle, statische Regelungsstrategien angewendet, sondern auch prädiktive Verfahren unter Einbeziehung zukünftiger Prognosedaten (Produktionsprogramm, Wetter, etc.) sowie Simulationsdaten. Die Gebäudehülle spielt eine wichtige Rolle bei der Optimierung energieintensiver Produktionsprozesse. Ziel ist es, Energie aus der Solarstrahlung (außen) und der Abwärme aus der Prozesskette (innen) zu wandeln, zu speichern und entsprechend ihrer Eignung zur energetischen Wiederverwendung in das System zurückzuführen. Die in der Raumluft befindliche prozessbedingte Überschusswärme wird gesammelt



Abb. 3: Blick auf die büroseitige Gebäudenordfassade und die thermisch aktivierte Westfassade

und einem geeigneten Produktionsschritt zugeführt oder in Speichern konserviert. Zur Gebäudekühlung werden die Wand- und Dachelemente raumseitig mit im Verhältnis zur Raumluft kühlerem Wasser aus dem Kaltwasserspeicher oder direkt aus dem Kühlprozess mittels Absorptionskältemaschine durch ein oberflächennahes und feines, kapillarähnliches Leitungsnetz durchströmt. Darüber hinaus verfügbare Abwärme wird durch den Transport von warmem Wasser durch den äußeren Teil der Gebäudehülle passiv an die Umgebung abgeführt. Falls kein Temperaturgefälle zwischen aktivierten Fassaden- und Dachplatten und der Umgebungsluft sich einstellt, lässt sich dieses mit einer Berieselung des Daches mit Grauwasser und der einhergehenden Verdunstungskühlung herstellen.

Zur Beheizung des Gebäudes im Winter kann warmes Wasser aus den Speichern oder dem Maschinenkühlprozess durch die kapillarähnlichen Rohrleitungen geführt werden. Durch die Funktion der äußeren Gebäudehülle als Massivabsorber kann aufgenommene solare Energie in das Speichersystem abgeführt werden.

Auch das elektrische Anlagensystem wurde energetisch optimiert. Hierdurch konnte die Anschlussleistung des Gesamtgebäudes schlank umgesetzt werden. Dies ermöglicht der Einsatz eines im Forschungsprojekt weiterentwickelten kinetischen Energiespeichers, welcher Lastspitzen glättet und zukünftig darauf vorbereitet wird, Netzdienstleistungen wie Blindleistungskompensation zu übernehmen.

Gestalt und Funktion der ETA-Fabrik

Die Modellfabrik befindet sich prominent am Eingang zum Campus Lichtwiese in einem Bereich, der mit dem bereits bestehenden Blockheizkraftwerk dem Thema „Energie“ gewidmet ist. Der in Nord-Süd-Richtung linear ausgerichtete Baukörper wird im nördlichen Teil erschlossen und beherbergt einen dreigeschossigen Bürobereich mit Seminar- und Besprechungsräumen. Im südlichen Gebäudeteil befindet sich der eingeschossige Hallenbereich für typische Produktionsanlagen der metallverarbeitenden Industrie. Der gesamte Baukörper wird von einer einheitlichen, in Dach- und Wandbereich identischen Hüllkonstruktion aus Betonfertigteilen umschlossen. Die beiden Gebäude Stirnseiten sind jeweils als Ganzglasfassaden konzipiert. Nach Norden, im Bereich der Büros konfiguriert sich die Fassade als Pfosten-Riegel-Structural-Glazing-Konstruktion. Darin sind opake Flächen integriert, die gleichzeitig die Öffnungselemente bilden (Abb. 3). Mit dem Ziel der Optimierung der Dämmeigenschaften der Fassade bezüglich des U- und g-Wertes wurden in die Scheibenzwischenräume der opaken Isolierverglasung erstmals in einer Fassade vliesbelegte Vakuumisolierpaneele eingelegt.

Die nach Süden orientierte Halle erhält eine Elementfassade mit integrierter Toranlage und vorgelagerter Anlieferzone. Um die Präzision des Produktionsprozesses zu gewährleisten, müssen selbst geringste Verformungen der Maschinen vermieden werden. Aus diesem Grund sind die direkte Besonnung und



Abb. 4: Blick auf die hallenseitige Gebäudesüdfassade und die thermisch aktivierte Ostfassade

der damit verbundene unkontrollierte thermische Eintrag durch die Sonne zu vermeiden. Dies wird im oberen Bereich der Glasfassaden durch wartungsfreie Lichtlenklamellen in den Scheibenzwischenräumen garantiert. Im unteren bodennahen Fassadenbereich wird der Sonnenschutz von parametrischen Glaselementen übernommen. Hierbei dienen geometrisch auskragende, mit Siebdruck belegte Glas- teiflächen, deren Neigung nach den Parametern des standortspezifischen Sonnenverlaufs im Jahresrhythmus festgelegt wurde, der Verschattung des Innenraumes. Das nach außen gekippte Mittelfeld jedoch wird mit Klarglas belegt und ermöglicht aufgrund seiner Schrägstellung Sichtbezüge nach innen und eine Entspiegelung des Glases (Abb. 4).

Thermisch aktivierte Hüllelemente

Eine schnelle thermische Aktivierung bedarf im Industriebau spezieller Hüllelemente im Dach- und Wandbereich. Hierfür eignet sich besonders der Werkstoff Beton, da eine statisch optimierte Geometrie, der Einbau und die Nutzung erforderlicher Träger- und Leitmedien sowie eine materialeinheitliche Umsetzung architektonisch ansprechend realisierbar sind und brandschutztechnische Anforderungen gut umgesetzt werden können. Darüber hinaus ist er überregional verfügbar, auf weite Sicht ausreichend vorhanden und bietet viel Potenzial hinsichtlich einer Reduzierung des Primärenergiebedarfs.

Der modulare Aufbau des Gebäudes entsteht durch die mittels oberflächennaher integrierter feiner und

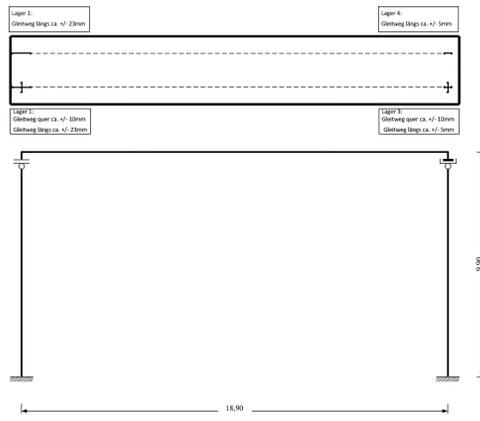
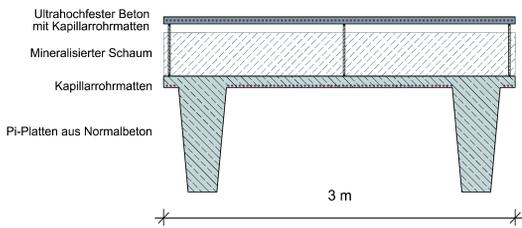


Abb. 5 links: Hüllelement für Dach- und Wandbauteile aus Beton³

Abb. 7 rechts: Statisches System des Primärtragwerks Halle mit Wegnahmefähigkeit der Dachbinder

kapillarähnlicher Leitungen thermisch aktivierbaren Wand- und Dachelemente mit einer Länge von 10 m bzw. 20 m, eine Dämmung aus mineralisiertem Schaum (MF) sowie deren Verkleidung mit Dach- und Fassadenplatten aus mikrobewehrtem ultrahochfestem Beton (mrUHPC) (Abb. 5).

Die Stahlbetonfertigteile vereinen bereits die Funktionen des Tragens und Hüllens und stellen gleichzeitig eine Schalung für den neu entwickelten, zementgebundenen, mineralisierten Schaum dar. Dieser wurde werkseitig mit einer Rohdichte von nur 180 kg/m³ bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,06 W/mK aufgebracht⁴. Den äußeren Abschluss der Hüllkonstruktion bilden 5 cm starke hinterlüftete und aktivierte Fassaden- und Dachplatten aus mikrobewehrtem, ultrahochfestem Beton⁵.

Die thermische Aktivierung erfolgt durch ein oberflächennah eingebautes und wassergefülltes Rohrleitungsnetz aus Polypropylen. Hiermit kann die in einer Fabrik nötige hohe thermische Dynamik des Systems erreicht werden (Abb. 6).

Das somit aktivierte Betonbauteil fungiert als riesige Heiz- oder Kühlfläche, die schnell auf die Erfordernisse der Raum- und Maschinenklimatisierung reagieren kann. Die Energiespeicherung erfolgt in externen Betonbehältern. Die thermische Aktivierung der Tragstruktur führt zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Querschnitt. In Kombination mit weiteren Belastungen (Kranbahnbetrieb, Imperfektionen) entstehen erhebliche statische Zusatzbelastungen. Diesen wird durch die Einführung von zwei unterschiedlich ausgebildeten Querkraftgelenken im Übergang von Wand- zu Dachelement entsprechend Abb. 7 begegnet.

Durch die Verwendung von beinahe ausschließlich zementösen Baustoffen, können die Schichten einfach getrennt und aufgrund ihres mineralischen Charakters später der Wiederverwertung zugeführt werden. Als weitere Besonderheit wurde die Decke des Seminarraums als Hypokaustendecke ausgebildet, bei der eine thermische Speichermasse über temperierte Zuluft aktiviert wird. In diesem Deckensystem werden die Hohlräume von Hohlkammerdecken zur Luftführung genutzt und die Luft über Bohrungen in den Seminarraum eingblasen. Das Luftkanalnetz ist so vollständig in die Konstruktionshöhe der Decke integriert; Tragwerk und Lüftungssystem werden zu einer Einheit.



Abb. 6: Kapillarrohrmatten vor der Betonage, mineralisierter Schaum in der Fertigung, PI-Platten nach der Montage, mrUHPC-Elemente der Gebäudehülle

Zusammenfassung

In der ETA-Fabrik wird die Gebäudehülle thermisch aktiviert und mit der Konstruktion und den thermischen Speichern in den Gebäudeenergiekreislauf einbezogen. Die Integration einer Niedertemperatur-Flächenheizung in die Hallentragkonstruktion, die Aktivierung der Gebäudeteile an sich, die damit verbundene Möglichkeit der Nutzung der Abwärme sowie die umgekehrte Möglichkeit der Kälteerzeugung der thermisch aktivierten Dachflächen wurden nur durch einen integrativen Planungsprozess von Anfang an erreicht. Weitere Elemente sind die Integration der Belüftung des Seminarraums in die Hohlräume der Hohlkammerdecken, neuartige Vakuumisolierpaneele, die in die nordseitigen Fassadenelemente integriert wurden und die innovativen Verglasungen zur Lichtstreuung, Lichtlenkung und Verschattung in den Seitenfenstern und der Südfassade.

Autoren

Andreas Maier, Jens Schneider, Ulrich Knaack, TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D, ehemals IWMB)
Martin Beck, TU Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Literaturverzeichnis

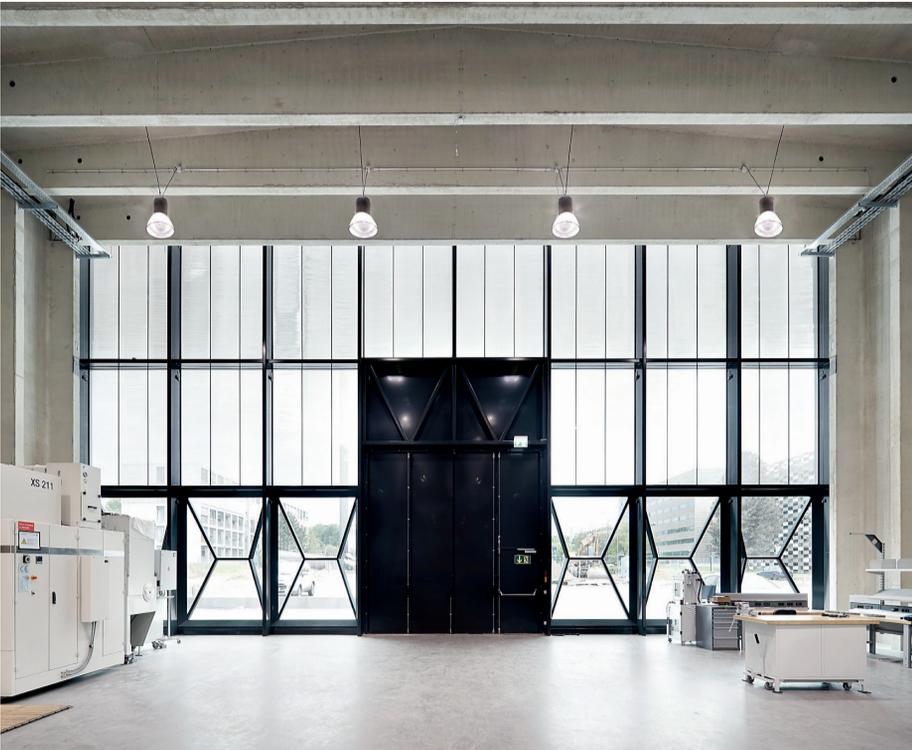
- ¹ Abele, E. ET AL.: Skizze des Forschungsprojektes „η-Fabrik“ Vorhabensbeschreibung des Forschungsprojektes „η-Fabrik“ im Rahmen des 5. Energieforschungsprogrammes der Bundesregierung „Innovation und neue Energietechnologien“, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. TU Darmstadt 2013.
- ² Dietz-Joppien Architekten AG: Energieschema. Frankfurt.2016.
- ³ Schneider, J.; Garrecht, H.; Maier, A.; Gilka-Bötzow, A.: Ein multifunktionales und energetisch aktives Fassadenelement aus Beton. Bautechnik 91 (2014), Heft 3, Berlin: Ernst&Sohn Verlag, S. 167–174.
- ⁴ Gilka-Bötzow, A.; Röser, F.; Koenders, E.A.B.: Mineral Foam in energy active Buildings. Nagasaki: International Conference on the Regeneration and Conservation of Concrete Structures (RCCS) 2015, S. 8
- ⁵ Wörner, J.D.; Hauser, S.: DUCON, ein innovativer Hochleistungsbeton. Beton und Stahlbetonbau Hefte 2 und 3. Berlin: Ernst&Sohn Verlag 1999, S. 66-75 und S. 141-145.

Projektpartner Okalux

Okalux brachte umfangreiches Know-how in die Glasfassadengestaltung ein. In der ETA-Fabrik wurden passgenaue Lösungen mit verschiedenen Systemen gefunden. So kam mit Okasolar F an der vollverglasten Südfassade ein richtungsselektives Tageslichtsystem zum Einsatz. Speziell geformte, feststehende Lamellen im Scheibenzwischenraum lenken das Tageslicht zur Decke, von dort wird es reflektiert und der Innenraum indirekt belichtet. Durch diese optimale Tageslichtnutzung entsteht eine angenehme Atmosphäre für die Mitarbeiter. Gleichzeitig bietet das System nahezu 60 % Durchsichtigkeit und hohen Wärmeschutz. An der Ost- und Westfassade sorgt ein transluzentes Kapillarsystem für eine gleichmäßige, diffuse Lichtstreuung in den Raum. Okalux+ integriert Kapillarplatten zwischen zwei Isolierglasscheiben, die eine hohe Lichttransmission und guten Sonnenschutz gewährleisten. Darüber hinaus wirken die Kapillarröhrchen im Scheibenzwischenraum als kleine Luftpolster und reduzieren Konvektion und Wärmestrahlung. So erreicht das Fassadensystem einen U_g-Wert von 0,9 W/m²K. Nordseitig kam an den nichttransparenten Flächen Okalux HPI zum Einsatz. Das innovative Hochleistungs-Isolierglasmodul garantiert den auf der Nordseite notwendigen Wärmeschutz. Dank einer im Scheibenzwischenraum integrierten Vakuumisoliereinheit glänzt das System mit einem hervorragenden U_g-Wert von 0,23 W/m²K. Okalux HPI lässt sich nahtlos in alle gängigen Fassadensysteme integrieren – die konstruktive Tiefe der Vakuummodule entspricht der Tiefe herkömmlicher Isoliergläser.

Weitere Informationen:

www.okalux.com



Forschungsprojekt
Neubau der ETA-Fabrik auf dem Campus Lichtwiese der TU Darmstadt, www.eta-fabrik.tu-darmstadt.de

Architektur
Dietz-Joppien Architekten AG, Prof. Dipl.-Ing. Anett-Maud Joppien, Dipl.-Ing. Joachim Stephan

Eisele Staniek Architekten, Prof. Dipl.-Ing. Johann Eisele

Tragwerk, thermische Aktivierung und Fassaden
TU Darmstadt, Institut für Statik und Konstruktion ISMD (ehemals IWMB), Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

Haustechnik, Energiekonzept und Maschineninterieur
TU Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Beck

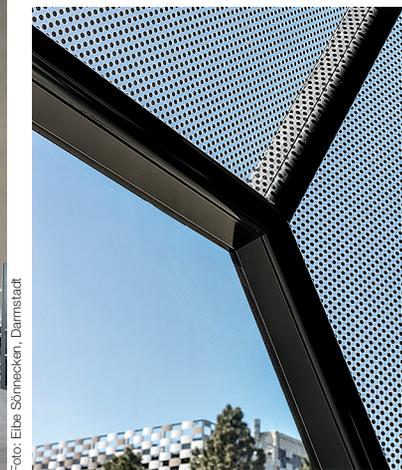


Foto: Eibe Sönnecken, Darmstadt

Foto: Schüco International KG

Tageslichtsystem Okasolar F in der Südfassade – angenehme Atmosphäre und Durchblick nach außen

Schüco Parametric System



Foto: Eibe Sönnecken, Darmstadt

Funktionsgläser Okalux+ mit Kapillareinlage im Scheibenzwischenraum sind in der Ost- und Westfassade verbaut.

Projektpartner Schüco

Vollständig verglaste Stirnseiten sind ein Gestaltungsmerkmal der Zukunftsfabrik: Auf der Nordseite schützt eine Schüco FW60+ Structural Glazing (SG)-Fassade die Büros vor Überhitzung. Ein Eyecatcher ist die spektakulär gestaltete Verglasung an der stark dem Zenitlicht ausgesetzten Südfassade. Hier wurde erstmals das Schüco Parametric System an einem Gebäude verbaut. Die parametrischen Glaselemente im unteren Fassadendrittel erlauben einen effektiven Sonnenschutz und ermöglichen zugleich vielfältige Sichtbezüge zwischen Innen und Außen. Die Fassade besteht aus sechs vorgefertigten, je 3,5 x 2,4 m großen Elementen, die mit einem Autokran in das zuvor aufgestellte Stahlskelett eingehängt wurden. Bei den drei oberen, stärker der Sonne ausgesetzten Scheiben sind 32 % des Glases mit einem Punktmuster als Sonnenschutz bedruckt. Die unterste Scheibe ist transparent und nach vorn zum Boden geneigt: So lassen sich störende Reflexionen vermeiden und Passanten können von außen blendfrei in die Halle schauen. Die Konstruktion krägt um knapp 70 Zentimeter aus.

Bislang waren individuell gestaltete 3D-Fassaden nur

mit aufwendigen Sonderlösungen realisierbar. Mit dem Schüco Parametric System lassen sich dreidimensionale Freiform-Fassaden nun erstmals als einfach zu planende Systemlösung umsetzen und mit der Sicherheit eines Serienprodukts kalkulieren. Die Projektbeteiligten können dabei in allen Entwurfs-, Planungs- und Fertigungsstufen auf eine durchgehend geschlossene digitale Prozesskette zurückgreifen. So lassen sich Schnittstellenprobleme umgehen und Kosten für Änderungswünsche frühzeitig bilanzieren. Weiterer Vorteil: Durch Kombination und Fügung der Einzelelemente lassen sich verschiedene Geometrien abbilden und unterschiedliche Gläser oder Füllungen einsetzen. „Man kann Fassadenstrukturen ein anderes Gesicht geben“, sagt Bauingenieur Prof. Jens Schneider. „Die dreidimensionale Faltung der Fassade ermöglicht es, lokale Gegebenheiten aufzugreifen, Sichtbezüge herzustellen und großflächige Fassaden zu gliedern. Vor allem bei Bürogebäuden oder Hochhäusern entstehen dadurch interessante Gestaltungsmöglichkeiten.“

Weitere Informationen:

www.schueco.de