

Fassade mit Tiefenwirkung

Text: Clementine Hegner-van Rooden, Philippe Willareth; clementine@vanrooden.com, pwi@luechingermeyer.ch



Eine netzartig strukturierte Fassade wird künftig das wahrhaft riesige Gebäudevolumen der neuen Kehrrechtverwertungsanlage in Kopenhagen umfassen. Lüchinger + Meyer entwickelte das Konzept für diese Fassade und stärkte damit den architektonischen Entwurf von BIG Architects.

☰ Auf einer der gegenwärtig grössten Baustellen in Dänemark wirkt Lüchinger + Meyer mit: Seit 2011 lässt die Bauherrschaft Amagerforbraending das Amager Ressource Center in Kopenhagen planen und bauen. Ab 2017 wird es an der Meerenge Öresund in Betrieb gehen und jährlich aus 400 000 t Kehricht Fernwärme für rund 140 000 Haushalte und elektrische Energie für 550 000 Einwohner gewinnen.

Diese Kehrichtverwertungsanlage steht im städtischen Industriegebiet Amager in unmittelbarer Nähe der alten Kehrichtverbrennungsanlage und eines Kohlekraftwerks. Ursprünglich war ein reiner Industriebau in einem Industriegebiet projektiert worden; doch Amager entwickelt sich zusehends auch zu einem Wohnquartier und trendigen Sportviertel. Das Bauwerk fügt sich ausserdem in die erweiterte Achse zwischen Palast und Königlicher Oper ein und ist durch seine Grösse von 200 × 60 m im Grundriss und eine Höhe von 90 m im städtischen Kontext von weiter sichtbar; auch von der touristischen Promenade Langelinie am gegenüberliegenden Ufer mit der Kleinen Meerjungfrau (Abb. 67). Die Anlage – deren Fassade bezüglich der Gesamtkosten eine relativ kleine, in puncto Architektur hingegen eine prominente Position einnimmt – war also differenzierten architektonischen und raumplanerischen Rahmenbedingungen ausgesetzt. Daher liess die Bauherrschaft für das Volumen und seine Hülle 2010 einen Architekturwettbewerb ausschreiben.

Die Bjarke Ingels Group – BIG Architects – gewann den Wettbewerb mit einem bemerkenswerten Entwurf. BIG gab dem funktionalen Volumen eine neue Form, hüllte es aufsehenerregend in eine bepflanzte Fassade ein und machte es der Öffentlichkeit zugänglich. Das Dach des abgeschnittenen Volumens soll als Skipiste dienen (Abb. 75). Auf diese Weise verkümmert die Anlage nicht zu einem reinen Industriebau, der als Kernstück eine hochtechnisierte Maschinerie beherbergt. Dank ihrer Form und Hülle fügt sie sich trotz ihrer Grösse respektvoll in die bebaute Umgebung ein und lässt diese zudem Teil des Gebäudes werden. Selbst der Schornstein wird mehr als ein Schlot sein, der Rauchgase ins Freie führt: Er soll künftig den Rauch in Form von Ringen für jede Tonne CO₂ austossens. Wie ein erhobener Zeigefinger, aber auf spielerische Weise, gemahnt er mit jedem Ring an das Umweltbewusstsein des Betrachters.



Tiefenwirkung der ebenen Fläche

Das Amager Ressource Center besteht aus unterschiedlichen funktionellen Einheiten: die Maschinen- und die Anlieferungshalle, der Müllbunker und das Administrationshochhaus. Sie alle fügen sich in das solitäre, zu einer Rampe geformte Volumen ein. Obwohl die Gebäudehülle an verschiedenen Stellen unterschiedliche Funktionen erfüllen soll – Dämmen, Schliessen, Öffnen, Verhüllen, Abdichten (Abb. 68) –, bildet sie über die gesamte 30 000 m² grosse Fläche eine einheitliche Haut.

Diese Fassade erinnert an eine widerstandsfähige Schutzmatte. Es scheint, als würden Stahlstifte breitbandige Laschen zu einem Geflecht zusammenfügen, das sich formbar und dennoch steif an das Volumen anschmiegt. Es ist indes der immense Massstab, der dieses feingliedrige Abbild trägt. Tatsächlich sind die Stahlstifte grosse Stützen und die Laschen grosse Hohlkästen.

Einer überdimensionalen gelochten Mauerwerkswand gleich fügen sich die einzelnen «Steine» – ein aus dem Mauerwerk entlehnter Begriff für die hohlkastenförmigen Pflanzenkörbe – zusammen. Zwischen ihnen bilden sich grosszügige Fensteröffnungen von 2.8 × 1.0 m. Deren Proportionen und insbesondere ihre Tiefe von 0.7 m geben der Fassade eine dreidimensionale Wirkung, die ein Schatten- und Lichtspiel kreiert.

Vom additiven zum integralen System

Während des Vorprojekts fragte BIG Lüchinger + Meyer an, sich am Planungsprozess zu beteiligen, fasziniert vom integralen Gedanken, den Architekten und Ingenieure in der Schweiz in ihrer Zusammenarbeit pflegen. Im ganzheitlichen Planen und in der engen Kooperation zwischen Ingenieuren und Architekten sahen sie ein Potenzial, das im Projekt Amager bislang noch brachgelegen hatte.

Ursprünglich war ein additiver Fassadenaufbau von 1 m Tiefe favorisiert worden (Abb. 69). Verglebung, Pflanzenkörbe und thermische Dämmung wa-

66 Eine raumhaltig und netzartig strukturierte Fassade aus Aluminium umschliesst das Gebäudevolumen der neuen Kehrichtverwertungsanlage. Die Hülle setzt sich aus kastenförmigen Einzelteilen von beachtlichen 1 m Höhe, 0.7 m Tiefe und 3.8 m Länge zusammen. Dank den ausgewogenen Proportionen ist die Fassade dieses enormen Volumens dennoch feingliedrig.

67 Lage und Situation.

ren – wie gegenwärtig in den traditionellen und nicht raumhaltigen Fassadenkonstruktionen noch üblich – klar voneinander getrennt. Ein in diesem Fall ineffizientes System. Es mangelte an einem ganzheitlichen Konzept und insbesondere an einer ingenieurspezifischen Herangehensweise.

Lüchinger + Meyer entwickelte ein Konstruktionsprinzip, das Synergien zwischen den Fassadenkomponenten und -schichten nutzt. Die Ingenieure wandten sich von der klassischen Bauweise ab, bei der Fassadentragwerk und -verkleidung getrennt sind. Sie aktivierten die Verkleidung strukturell, indem sie daraus ein dünnwandiges, gekantetes Blechtragwerk in Form der Mauerwerksgeometrie herleiteten. Ein zusätzliches Tragwerk für die Lagerung der Pflanzenkörbe wurde damit obsolet. Dabei wurden Abmessungen und Formen genutzt, die ohnehin bereits gegeben waren: Die Geometrie der «Steine» entwickelte sich aus Proportionsstudien. In der Gesamtbeachtung der Fassade erscheinen sie filigran, ihr tatsächlicher Querschnitt ist jedoch grosszügig und bewirkt eine hohe Steifigkeit. Jeder einzelne «Stein» besteht aus einem zusammengeschweissten, torsionssteifen Hohlkasten mit Abmessungen von 1 m Höhe, 0.7 m Tiefe und 3.8 m Länge. Die Höhe und Tiefe, die ein «Stein» also aus architektonischen Gründen aufweist, nutzten die Ingenieure statisch.

Aufgrund der strukturellen Aktivierung der «Steine» und der damit gewonnenen statischen Höhe kann das integrale System die Bepflanzung ohne signifikante Verstärkung oder Massänderungen aufnehmen. Anpassungen erfolgten primär in konstruktiven Details, die für das Erscheinungsbild belanglos sind. Die Weiterentwicklung des Fassadensystems vom additiven zum integralen System war also aus architektonischer und statischer Sicht vorteilhaft. Letztlich bedingten sich Architektur und Tragwerk gegenseitig.

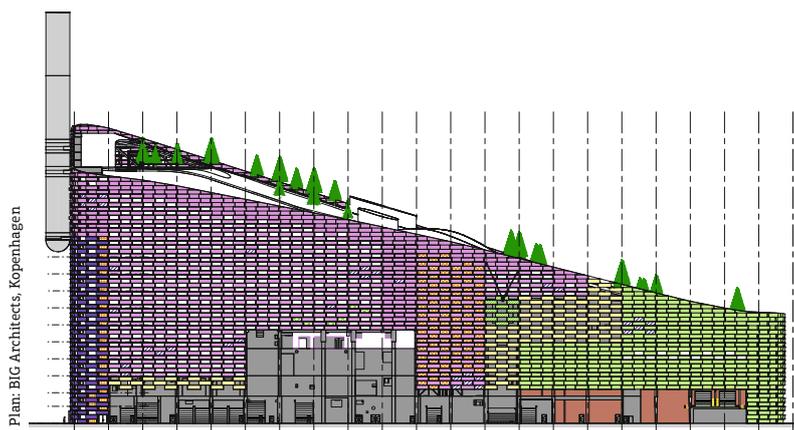
68 Trotz ihrem einheitlichen Erscheinungsbild erfüllt die Hülle an verschiedenen Stellen unterschiedliche Funktionen, entsprechend den funktionellen Einheiten im Gebäudekern.

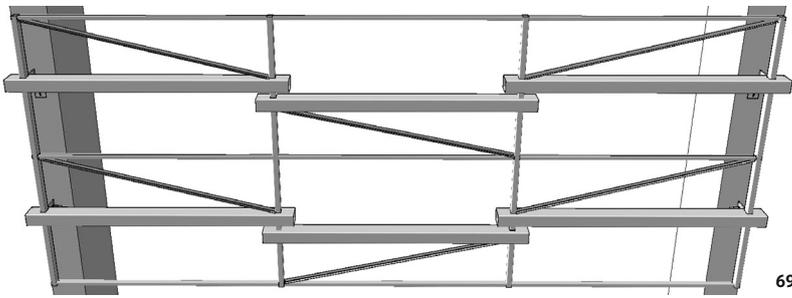
Von der Fassadenkonstruktion zum Fassadentragwerk

Die «Steine» fügen sich präzise ineinander, ihre Länge und ihre Überlappungen sind auf die Tragkonstruktion im Innern des Gebäudes abgestimmt. Die Hauptstützen des Rohbaus stehen jeweils im Abstand von 10 m entlang der Fassade und bilden das einzige Auflager für horizontale und vertikale Lasten aus der Fassadenebene. Ein feingliedrigerer Stützenabstand war nicht möglich, da dieser im Konflikt mit der gesamten Leitungsführung in der Fassadenebene gestanden wäre. Das Gebäudevolumen wurde so weit optimiert, dass es die Maschinerie exakt umhüllt und kaum noch freien Raum lässt.

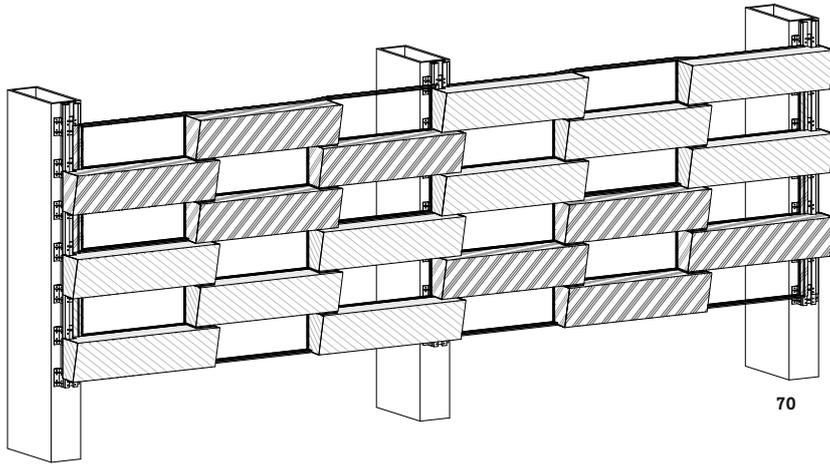
In einer ersten Version wurden je drei «Steine» überlappend zu einem Fassadenelement verschweisst, das zwischen den Hauptstützen spannte. Da jedoch in diesem zweireihigen System ungünstige Torsionskräfte an den Verbindungsstellen auftraten, entschieden sich die Ingenieure für ein dreireihiges Fassadenelement. Sie bildeten symmetrische Hohlkästen-Arrangements aus vier oder fünf «Steinen» aus. Statt des explizit exzentrischen Systems entstanden ein symmetrisches Fünfelement in H-Form und das ebenfalls symmetrische Gegenstück aus vier «Steinen» (Abb. 70). Die so zusammengesetzten Elemente bilden das statische System eines einfachen Balkens. Die Torsionskräfte werden kurzgeschlossen.

Die Fassade wird angesichts des maritimen Klimas am Öresund für eine Windlast von über 3 kN/m² dimensioniert und muss der Korrosionsklasse C4 genügen. Die Fassade inklusive ihres Korrosionsschutzes sollte eine unterhaltsfreie Lebensdauer von 50 Jahren aufweisen. Zudem war eine flache Fassadeninnenseite gefordert, um Staubablagerungen zu vermeiden. Einzelne vorgefertigte Fassadenelemente von mindestens 30 m² Grösse, die sich aus den typischen «Steinen» und weiteren Fassadenkomponenten wie Dämmung oder Fenster zusammensetzen, sollten in einem Stück transportiert und von aussen montiert beziehungsweise demontiert werden können. Auf diese Weise kann die weniger langlebige Maschinerie im Innern jederzeit und von beliebiger Position ausgewechselt werden. Nicht zuletzt haben die Fassadenelemente im Bereich der Büroräumlichkeiten auch hohe energetische Kriterien zu erfüllen – Anforderungen an eine Gebäudehülle also, die neben den funktionellen Eigenschaften auch in ihren Abmessungen das Standardmass einer üblichen Fassade übersteigt und damit auch die statische Bemessung anspruchsvoller macht.

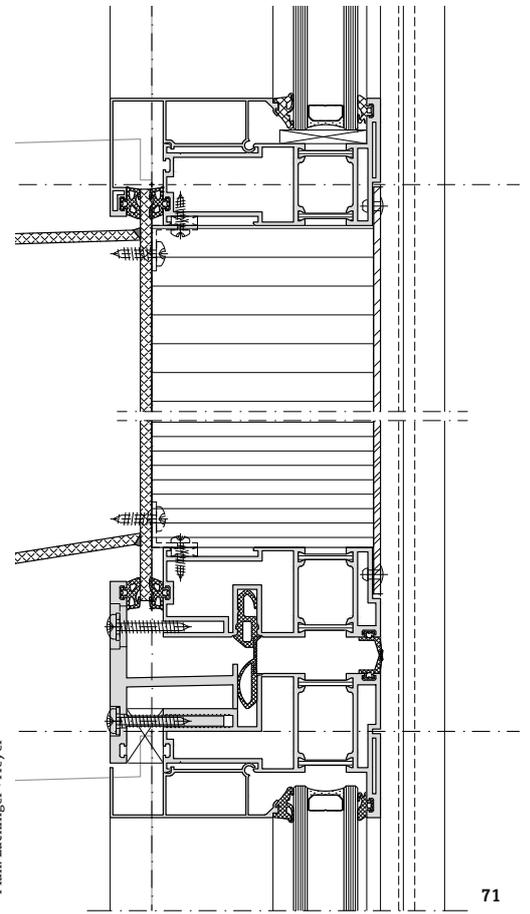




69



70



71

Plan und Visualisierung: BIG Architects, Kopenhagen

Plan: Lüchinger + Meyer

69 Ursprünglich war ein additiver Fassadenaufbau von 1 m Tiefe geplant, der zugunsten einer integralen Fassade verworfen wurde.

70 Ein Fassadenelement setzt sich aus mehreren Hohlkästen – den sogenannten «Steinen» – zusammen. Sie sind über eine Schraubverbindung gekoppelt. Ein

einzelnes so zusammengesetztes Element bildet zwischen den Hauptstützen das statische System eines einfachen Balkens mit 10 m Spannweite.

71 Detail der Fassadekonstruktion beim Übergang zwischen den «Aluminiumsteinen» und der Glashülle.

72 Das finale Mock-up auf dem Fassadenprüfstand des Kompetenzzentrums Fassaden- und Metallbau an der Hochschule Luzern.

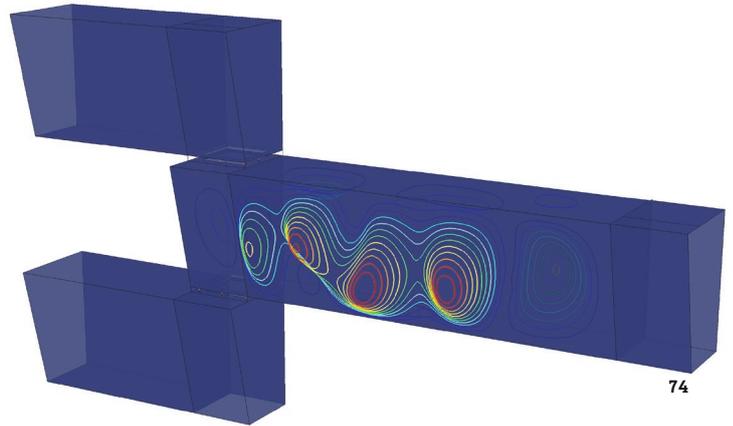


72

Foto: Lüchinger + Meyer



73



74

Dünnwandige Hohlkästen

Lüchinger + Meyer führte gemeinsam mit BIG detaillierte Abklärungen der Materialisierung und der Konstruktion durch. Verdienstvollerweise forderte und unterstützte die Bauherrschaft diese aufwendigen Entwicklungsarbeiten. An massstäblich gefertigten Aluminium- und Stahlmustern untersuchten die Ingenieure die Gesamtkonstruktion mit Fokus auf die Tektonik, die Oberflächenbeschaffenheit und -qualität, den Korrosionsschutz, die Toleranzen sowie den Verzug durch das Verzinken. An einem Fassaden-Mock-up (Abb. 72), hergestellt von der Firma Tuchs Schmid und aufgebaut auf dem Fassadenprüfstand des Kompetenzzentrums Fassaden- und Metallbau an der Hochschule Luzern, prüfte Lüchinger + Meyer das entwickelte System auf seinen mechanischen Widerstand und hinsichtlich Windeinwirkung, Luftdurchlässigkeit und Wasserdichtigkeit.

Neben der Berücksichtigung von Produktions- und Transportbedingungen stand bei der Dimensionierung und Materialisierung vor allem die Optimierung des Materialverbrauchs im Vordergrund. Dass eine Reduktion der Blechstärke um lediglich 0.5 mm bereits zu einer Materialersparnis von 50 t Aluminium oder 140 t Stahl führte, belegte die Notwendigkeit einer präzisen Bemessung.

Infolge der Materialoptimierung und der damit verbundenen Erhöhung der Schlankheit sind nahezu alle Bleche beulgefährdet. Ebenfalls hochbeansprucht sind die Hauptverbindungen, bei denen die einzelnen «Steine» verschraubt oder verschweisst sind und die Last aus den Mittelsegmenten auf das Endstück übertragen wird. Mithilfe einer Finite-Elemente-Analyse optimierten die Ingenieure die Querschnitte und Anschlussdetails (Abb. 73 und 74). Um direkt in der FE-Berechnung auch Stabilitätsnachweise durchführen zu können, muss diese nach Theorie 2. Ordnung erfolgen. Hierbei wird die Exzentrizität mitberücksichtigt, die durch das verformte System entsteht. Weil die Beanspruchung der Querschnitte jedoch die kritische Beullast überschreitet und infolgedessen die überkritischen Tragreserven berücksichtigt werden

mussten, wählten die Ingenieure hier das Newton-Raphson-Verfahren als geeignetste Methode. (Dabei bringt man die Last in einzelnen Lastschritten auf die Struktur auf, und die Steifigkeitsmatrix wird nach jedem dieser Schritte neu berechnet.) Um die Imperfektionen der Bleche zu berücksichtigen, nahmen sie eine Eigenwertanalyse der gesamten Struktur vor. Die gewählten kritischen Beulformen brachten sie anschliessend – nach einer entsprechenden Eichung der maximalen Auslenkung – als Imperfektionen auf das System auf. Letzlich konnten sie die Tragstruktur anhand der Spannungen im Querschnitt beurteilen. Mit dieser versierten Anwendung von FE-Programmen und dem entsprechenden Hintergrundwissen zu nicht-linearen Berechnungen gelang eine verfeinerte Analyse der erarbeiteten Konstruktion. Die Ergebnisse liessen sich mittels Handrechnung verifizieren.

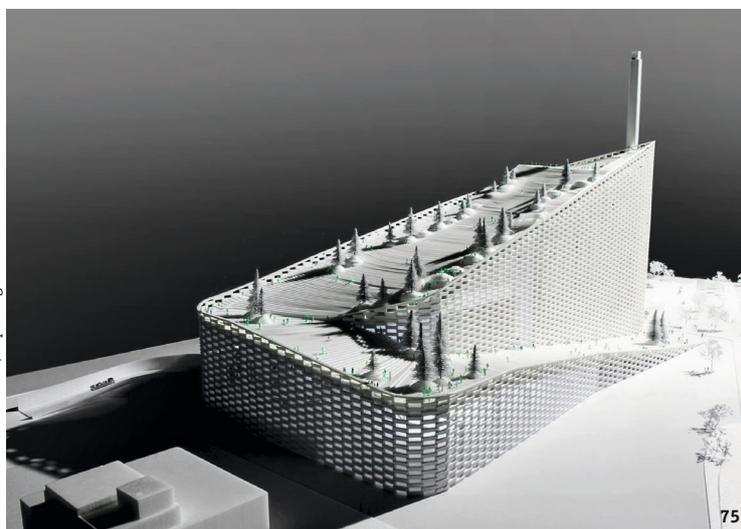
Dank der detaillierten Modellierung konnte auf konservative Vereinfachungen verzichtet und die Tragkonstruktion entsprechend optimiert werden. Die Bemessung und die finale dreireihige Elementausbildung mit vier oder fünf «Steinen» aus Aluminium erlaubten auch eine signifikante Reduktion der Blechstärken von den ursprünglich ermittelten 7 mm auf 5.5 mm. Die Durchbiegung der Elemente blieb aufgrund der unveränderten statischen Höhe klein.

Material und Oberfläche

Die definitive Materialisierung blieb während der Planung bis zum Kostenvoranschlag offen, um den spezifischen Rahmenbedingungen optimal begegnen zu können. Aufgrund seiner strukturellen Effizienz favorisierte das Planerteam zunächst Stahl. Feuerverzinkter Stahl sowie beschichteter und unbeschichteter Cortenstahl wurden in Betracht gezogen und betreffend Dauerhaftigkeit untersucht. Die Beurteilung und die experimentelle Überprüfung an Mustern bestätigten allerdings, dass die gestellten Anforderungen kaum zu erfüllen waren. So liess sich beispielsweise im Fall von Stahl der erforderliche Zinkauftrag von 150 µm nicht in angemessener Zeit im Zinkbad erstellen. Die lasergeschnittenen Kanten hätten

- 73 Die Hohlkästen werden über typische Rohrflansche zusammengeschaubt, wobei die Flansche hier gegen innen gestülpt sind.
- 74 Um die massgebende geometrische Imperfektion der Bleche zu berücksichtigen, wurde eine Eigenwertanalyse der gesamten Struktur vorgenommen. Kritische Beulformen, hier beispielsweise die 19. Beuleigenform, werden nach entsprechender Eichung der maximalen Auslenkung als Imperfektion auf das unverformte System aufgebracht.
- 75 Modell des Amager Ressource Center.

Modellfoto: BIG Architects, Kopenhagen



75

zudem nachbearbeitet werden müssen, um die Oberflächenstruktur für den Zinkauftrag wieder zu bereinigen. Des Weiteren wäre eine kontinuierliche Ausbildung aller Schweissnähte erforderlich gewesen. Daraufhin prüfte das Projektteam die Verwendung von Aluminium. Trotz den höheren Erstellungskosten erwies sich dieses Material auf den ganzen Lebenszyklus betrachtet als günstiger, weil Vor- und Nachbearbeitung sowie Unterhaltsaufwand entfallen.

In einem iterativen Prozess wurden die Formgebung und die Abwicklung der «Steine» mit der Firma Hydro Aluminium optimiert (Abb. 73). Das Abkanten der Aluminiumbleche wurde auf die Coilbreite von 2.60 m abgestimmt. Dadurch setzt sich ein einzelner «Stein» nur aus zwei Blechen zusammen, zugleich wurde die Anzahl teurer Schweissnähte minimiert. Die Bleche sind geneigt und mit einem Rückbug abgekantet, sodass Regenwasser abgeführt wird, während Schnee sicher liegen bleibt. Die «Steine» sind demnach entsprechend funktioneller Rahmenbedingungen geformt, ohne dabei die tragwerksspezifischen Anforderungen einzuschränken.

Reduktion und Vereinfachung auf allen Ebenen

Auf Basis der entworfenen Geometrie und der errechneten Materialstärke suchte Lüchinger + Meyer nach geeigneten Konstruktionsdetails. Jedes Fassadenelement sollte ein Paket bilden, das alle Komponenten und Funktionsschichten integriert, auf einen Sattelschlepper passt und vor Ort mit hoher Präzision montiert werden kann.

In einer ersten Phase war der Hauptteil der Hülle noch als unisolierte Wetterhaut vorgesehen. Lüchinger + Meyer entwickelte in Analogie zu Jean Prouvé's Konzepten ein System, in dem die Gläser ohne Rahmen direkt über Gummiprofile gelagert werden. Die fortschreitende Projektierung veränderte die Anforderung hin zu einer gesamthaft isolierten Fassade, wodurch die reduzierte Konstruktion nicht weiterverfolgt werden konnte. Stattdessen waren Profile erforderlich, die Wärmebrücken minimieren. Dennoch gelang es,

ARC – Amager Ressource Center, Kopenhagen

Bauherrschaft: Amagerforbraending, Dänemark
Architekten: BIG Architects, Kopenhagen
Unternehmen Projektentwicklung: Tuchschild AG, Frauenfeld
Fassadenprüfungen: Kompetenzzentrum Fassaden- und Metallbau, HSLU
Korrosionsprüfungen: Empa, Dübendorf
Projektierung: 2011–2014
Ausführung: 2015–2016
Bausumme: ca. 25 Mio. Fr.
Leistungen: Fassadenplanung; Vorprojekt bis Ausschreibung

die Wärmedämmung integrativ in den Fassadenaufbau zu implementieren. Die integrale Konstruktion wurde auch hier weitergedacht, indem das Innenblech der Hohlkästen als äussere Haut der Wärmedämmung fungiert.

Der Fassadenunternehmer Sipral aus Prag optimiert nun die Fassadenkonstruktion im Rahmen der Ausführungsplanung entsprechend der gewählten Logistik, Fertigung und weiterer Kostenkriterien. Der integrale Ansatz und die auf die Lebensdauer abgestimmte Materialisierung bleiben dem Projekt jedoch erhalten und prägen die Konstruktion sowie das Erscheinungsbild der Fassade.

Ingenieurwesen stützt Architektur

Die Statik und die Technik der Fassade bilden ein integrales System, wobei jedes einzelne Bauteil funktionale und statische Kriterien robust und ökonomisch erfüllt. Dieses System vermag, die verschiedenen Vorteile der einzelnen Schichten zu nutzen und als Gesamtpaket einen Mehrwert zu generieren. Lüchinger + Meyer stärkt damit den architektonischen Entwurf und begründet die Konstruktion nicht nur unter Berücksichtigung visueller, gestalterischer und technischer Aspekte, sondern auch auf tragwerksspezifischer Ebene.