

# KURZBERICHT

## FORSCHUNGSBERICHT HINTERLÜFTETE FASSADENKONSTRUKTION AUS PHOTOBIOREAKTOREN

PROJEKTLEITUNG - DR. JAN WURM

BEARBEITUNG - CORNELIUS SCHNEIDER

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau- und Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF10.08.18.7-10-30 / II 3 - F20-10-084)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt beim Autor



# KURZBERICHT

FORSCHUNGSBERICHT

HINTERLÜFTETE FASSADENKONSTRUKTION AUS

PHOTOBIOREAKTOREN

# ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde ein Sekundärfassadensystem entwickelt, das durch die Integration von Photobioreaktoren (PBR) die Gewinnung und Nutzung von Biomasse aus Mikroalgen und solarer Wärme am Gebäude ermöglicht.

Das Forschungsvorhaben wurde im Zeitraum von Dezember 2010 bis März 2013 durch ein Konsortium bestehend aus Arup Deutschland GmbH, Strategic Science Consult GmbH und Colt International GmbH mit einer Förderung der Forschungsinitiative Zukunft Bau durchgeführt.

Der funktionale Prototyp des Fassadensystems umfasst ein PBR-Paneel, die notwendigen Versorgungsleitungen und eine Unterkonstruktion zum Abtrag der auftretenden Lasten in das Tragwerk des Gebäudes. Das PBR-Paneel ist mit allen erforderlichen Anschlüssen für Medien und Druckluft sowie einer Füllstandssensorik ausgestattet. Die Versorgungsleitungen können verdeckt in der Unterkonstruktion zu den einzelnen PBR-Paneelen geführt werden. Das Gesamtsystem ist sowohl statisch als auch thermisch optimiert, um möglichst hohe Biomasse- und Wärmeerträge zu sichern.

Prototypen des entwickelten Systems wurden im Januar 2012 auf der Versuchsanlage von SSC im Hamburg Reitbrook installiert und seitdem getestet und optimiert. Im Januar 2013 wurden sechs Photobioreaktoren (PBR) in Reihe geschaltet und die Funktionalität nachgewiesen.

Eine Pilotanlage des neu entwickelten Fassadensystems mit ca. 200 m<sup>2</sup> aktiver Fläche wurde im März 2013 am BIQ-Gebäude auf der Internationalen Bauausstellung in Hamburg (IBA) der Öffentlichkeit vorgestellt.

# 1. EINLEITUNG

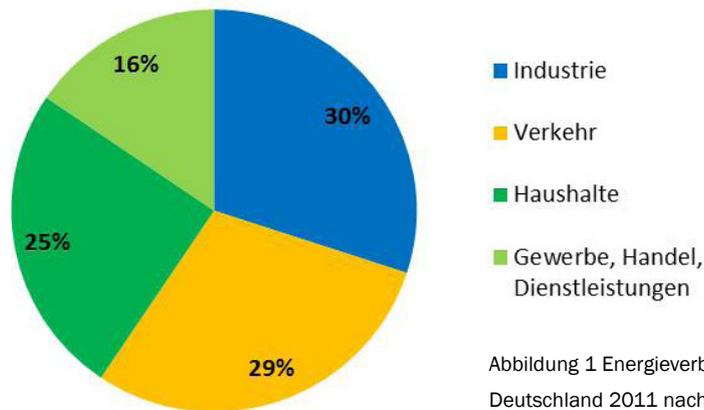


Abbildung 1 Energieverbrauch in Deutschland 2011 nach Sektor (BMWi, 2012)

## 1.1 Hintergrund

In vielen Industrienationen und insbesondere in der Europäischen Union wird eine Energiewende hin zu erneuerbaren Energiequellen (kurz „Erneuerbare“) durch die öffentliche Hand vorangetrieben. Deutschland nimmt dabei weltweit eine Vorreiterrolle ein. Gesetzlich verankerte Schritte und Maßnahmen wie der Atomausstieg und der flächendeckende Null- Energie-Haus-Standard bis 2020 für Neubauten, unterstreichen den Willen Deutschlands sowohl rechtlich als auch technologisch die Energiewende in Europa voranzutreiben. Übergeordnetes Ziel ist es, den Ausstoß von klimaschädlichem CO<sub>2</sub> zu reduzieren und gleichzeitig die Abhängigkeit von fossilen Energiequellen zu verringern.

Die entscheidenden Faktoren für eine erfolgreiche Umstellung auf Erneuerbare sind die bedarfsgerechte Verfügbarkeit und die effiziente Verteilung der Energieträger. Biomasse beispielsweise aus Mikroalgen bietet unter anderem durch die gute Speicherbarkeit und Transportierbarkeit entscheidende Vorteile für die bedarfsgerechte nachhaltige Energiebereitstellung.

Als entscheidende Kenngröße kann die Energiebilanz von Gebäuden einerseits durch Senkung des Energieverbrauchs und andererseits durch eine gebäudeassoziierte Energieerzeugung verbessert werden. Alternativ zu etablierten Systemen wie beispielsweise Photovoltaik zur Nutzung von Gebäudeflächen zur Energiegewinnung verfolgt das vorliegende Forschungsvorhaben die Kultivierung von Biomasse aus Mikroalgen zur gebäudeintegrierten Erzeugung und Nutzung von Erneuerbarer Energie.

Einzellige Mikroalgen werden in einem wässrigen Medium kultiviert und bilden durch die Aufnahme von Sonnenlicht, CO<sub>2</sub> und Nährstoffen Biomasse durch Zellteilung. Systeme zur Kultivierung von Biomasse aus Mikroalgen können allgemein in offene und geschlossene Typen eingeteilt werden. Durch eine starke Verringerung der Bauteiltiefe und des Medienvolumens des Kultivierungsgefäßes (Photobioreaktor) wird das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis bei geschlossenen Systemen gegenüber offenen deutlich verbessert und die Effektivität stark erhöht. Verschiedene Umwälzungssysteme mit teilweise hohen Fließgeschwindigkeiten ermöglichen zudem die Vergrößerung des aktiven



Abbildung 2 TERM Flachpaneel Photobioreaktor Technologie © SSC GmbH

Reduktion des Biofouling-Risikos. Ein hoch effizienter Flachpaneel-Photobioreaktor (PBR) wurde vom Projektpartner SSC GmbH im Rahmen der Forschung zu Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen (TERM) entwickelt und patentiert. Die flächige Bauweise der TERM-PBR ermöglicht zusammen mit der hohen

Effizienz einen Einsatz am Gebäude, beispielsweise an Fassaden oder auf Dachflächen. Damit werden eine gebäudeintegrierte Kultivierung und die urbane Erschließung des Energieträgers Mikroalgen-Biomasse denkbar.

## 1.2 Forschungsvorhaben

Das vorliegende Forschungsvorhaben soll, durch die Entwicklung eines geeigneten Fassadensystems, die gebäudeintegrierte Kultivierung von Biomasse aus Mikroalgen für Deutschland erschließen. Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines hinterlüfteten Fassadensystems aus Photobioreaktoren (PBR) mit einachsiger Nachführung zur Kultivierung von Mikroalgen und Aufnahme solarthermischer Energie an der Gebäudehülle. Die Biomasse aus den Mikroalgen sowie die solare Wärme sollen für das Gebäude nutzbar gemacht werden um so die energetische Bilanz des Gebäudes verbessern zu können.

### 1.2.1 Partner

Als Antragsteller übernimmt die Arup Deutschland GmbH die Projektleitung und koordiniert die Aktivitäten der Partner und der einzelnen Planungsdisziplinen im Forschungsvorhaben. Daneben werden interdisziplinäre Planungs- und Entwicklungsleistungen mit Bezug auf Testkörper, Prototypen und das Fassadensystem erbracht.

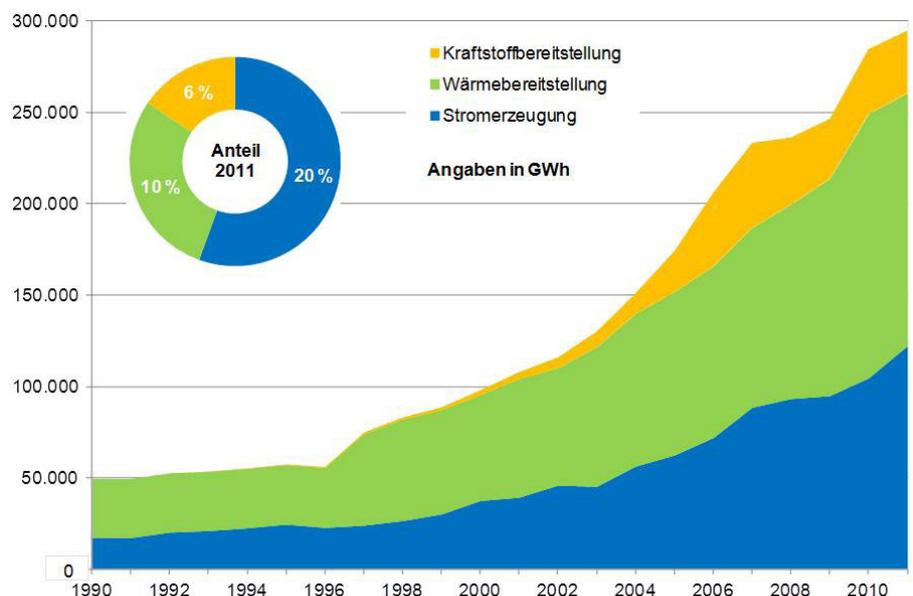
SSC Strategic Science Consult GmbH ist für die Bereitstellung der Photobioreaktor (PBR)- und Mikroalgentechnologie verantwortlich. Insbesondere gehören dazu die Prozessführung, der Betrieb und die Optimierung von Prototypen und Testanlagen und die Erhebung und Auswertung von Daten. Zusätzlich erbringt SSC spezielle Planungsleistungen in Verbindung mit der Integration der

Technologie in das Fassadensystem. Die Colt International GmbH ist für die Fassaden- und Nachführungstechnologie im Rahmen des gemeinsamen Forschungsvorhabens zuständig. Insbesondere das Erstellen der Detail- und Ausführungsplanung von Prototypen und Testkörpern einschließlich der für die Nachführung erforderlichen Komponenten ist Teil des Aufgabenfeldes von Colt. Zusätzlich ist Colt für die Fertigung der Prototypen einschließlich der Unterkonstruktion verantwortlich.

### 1.2.2 Herangehensweise

Zunächst werden in einer Grundlagenermittlung die vielfältigen Planungsvoraussetzungen für das zu entwickelnde Fassadensystem zusammen getragen. Zu den Planungsvoraussetzungen zählen die Anforderungen der Mikroalgen und der Photobioreaktor (PBR)-Technologie genauso wie bautechnische und regulatorische Voraussetzungen. Auf Basis der Grundlagenermittlung wird zusammen mit der Definition von weiteren Zielvorgaben und Kenngrößen ein Konzept für ein „hinterlüftetes Fassadensystem aus PBR“ entwickelt. Entsprechend des ermittelten Konzepts wird die Detailplanung für einen Prototyp durchgeführt und umgesetzt. Der Prototyp des Fassadensystems wird unter Freilandbedingungen getestet und weiterentwickelt. Für die Prozessführung werden ein integriertes Energiemanagement und ein entsprechendes Steuerungssystem entwickelt.

Abbildung 3 Anteil regenerativer Energie am gesamten Energieverbrauch in Deutschland (AGEE-Stat, 2012)



## 2. GRUNDLAGENERMITTLUNG PLANUNGSVORAUSSETZUNGEN

Anforderungen	Wert
Bauphysik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Regen</li> </ul>
Tragwerksplanung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lastabtrag (Eigengewicht, Wind)</li> <li>▪ Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegung)</li> <li>▪ Anforderungen Dauerhaftigkeit</li> <li>▪ Resttragfähigkeit</li> </ul>
Gebäuderaster	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Variabel bis 1500 mm</li> </ul>
Energiedesign	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Optimierung Biomasseertrag / CO<sub>2</sub>-Bindung</li> <li>▪ Optimierung Wärmeeintrag</li> </ul>
Haustechnik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wärmespeicherung</li> <li>▪ Externe CO<sub>2</sub>-Quelle notwendig (Benachbarte Industrie, BHKW, etc.)</li> </ul>
Gestaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Transluzenz / teilweise Transparenz</li> <li>▪ Profilierung der Rahmen</li> </ul>

Tabelle 1 Übersicht Anforderungen Wohngebäude

Da sich die Grundlagenermittlung auf ein Sekundärfassadensystem bezieht bestehen keine Voraussetzungen für Wärme-, Witterungs- und Sonnenschutz. Das Fassadensystem wurde exemplarisch für ein Wohngebäude entwickelt, da sich hier die höchsten Anforderungen ergeben und die Übertragbarkeit auf andere Gebäudetypen erleichtert wird. Als Bemessungsgrundlage wurde eine deutsche Windlastzone 2 und eine Gebäudehöhe bis 25 m für Auslegung und Nachweis verwendet. Eine Übersicht für die zusammengetragenen Anforderungen aus einer

entsprechenden Gebäudeanwendung ist in Tabelle 1 dargestellt. Die planungsrelevanten Voraussetzungen, die für die Kultivierung von Mikroalgen und die Verwendung der TERM Photobioreaktor (PBR)-Technologie ermittelt wurden sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 zusammengefasst.

Alle relevanten deutschen Normen und Richtlinien bezüglich Lastannahmen, Glas und Glaskonstruktionen sowie Metallbau, Brandschutz und Schallschutz wurden für die Entwicklung als Grund-

lage zusammengetragen. Eine ausführliche Übersicht ist im vollständigen Abschlussbericht einzusehen.

Anforderungen	Wert
Kultur-Medium	Wasser, wässrige Nährlösung
Betriebstemperatur	8 - 32°C
Bevorzugter Spektralbereich	um 680 nm
Benötigte Nährstoffe	CO <sub>2</sub> , Nitrat, Phosphat
Verträglichkeit	Biokompatible Materialien, Freiheit von Zellmembran zerstörenden Stoffen (Tenside, Lösungsmittel, etc.)

Tabelle 2 Anforderungen für die Kultivierung von Mikroalgen.

Tabelle 3 Anforderungen - Flachpaneel-Photobioreaktor-Technologie

Anforderungen	Wert
Dimension PBR-Einheit	Geschosshoch
Format	Hochformat - Höhe >> Breite
Tiefe PBR-Raum	15 – 25 mm
Wasserdruck	Konstruktion der PBR-Einheit muss Lasten aus Wasserdruck entsprechend Höhe Wassersäule aufnehmen.
Dichtigkeit	Dichtigkeit der PBR-Einheit muss für einen optimalen Betrieb gewährleistet sein.
Dimension AirLift-Stege	Höhe - ~ 1/3 Gesamthöhe PBR-Einheit Breite - möglichst schmal
Abstand AirLift-Stege - Unterkante PBR-Raum	~ 50-100 mm
AirLift-Kanalbreite	~ 150 mm
AirLift-Druckluft	Druck muss Wasserdruck am unteren Ende der PBR-Einheit überkommen.
Anschlüsse	Mediumzulauf Mediumablauf/Überlauf Druckluftanschluss Entlüftung
Versorgungssystem	Kreislauf System zur einfachen und kontinuierlichen Versorgung
Verschaltung PBR-Einheiten	Reihenschaltung Clusterung zur Gewährleistung der Versorgung

# 3. KONZEPT ENTWICKLUNG

## für ein „Hinterlüftetes Fassadensystem aus Photobioreaktoren“

Ziel der Konzeptentwicklung ist es, die Machbarkeit einer Gebäudeintegration der bestehenden Flachpaneel-Photobioreaktor (PBR)- Technologie nebst Versorgungs- und Nutzungsmöglichkeit aufzuzeigen. Das Gesamtkonzept setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen: einem außen liegenden System an der Gebäudehülle und einem Versorgungs- und Nutzungssystem, das in die Haustechnik integriert ist. Die im ersten Schritt ermittelten Planungsvoraussetzungen bilden die Grundlage für die Konzeptentwicklung. Auf Basis dieser Grundlage wurde durch die Festlegung von übergeordneten Zielvorgaben und der Ermittlung und Definition von weiteren Einflussgrößen ein machbares Konzept für ein „hinterlüftetes Fassadensystem aus PBR“ erstellt. Bei der Festlegung der übergeordneten Zielsetzungen wurden ökologische, energetische, ökonomische, architektonische und konstruktive Gesichtspunkte berücksichtigt. Die ermittelten Einflussgrößen umfassen den Standort bzw. die Lage der PBR am Gebäude, die Orientierung, die Nachführung, die Paneelanordnung sowie die lastabtragenden Systeme und die Materialauswahl.

Aufgrund der Möglichkeit das System durch die Integration zusätzlicher Funktionalitäten wie beispielsweise eine dyna-

mische Verschattung aufzuwerten wird eine Fassadenanwendung bevorzugt. Eine vergleichende Strahlungssimulation für den Standort Hamburg ergab eine günstige Orientierung an Südfassaden und eine Nachführung um eine zentrale vertikale Achse. Die Paneelanordnung wurde aufgrund von günstigeren Lasten auf „horizontal nebeneinander“ festgelegt. In Abbildung 4 ist das Gesamtkonzept für das Fassadensystem dargestellt.

### 1 - Primäre Tragstruktur

- Tragwerk des Gebäudes, an dem die Sekundärfassade befestigt wird.

### 2 - Sekundäres Trägersystem

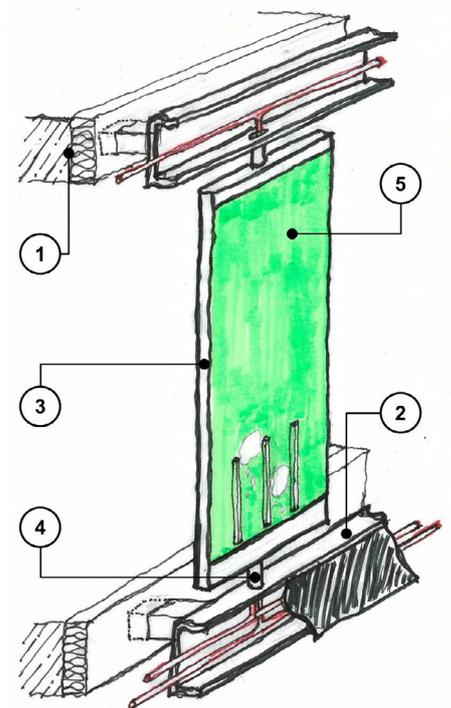
- Geschossweiser Abtrag der auftretenden Lasten (Eigenlast, Windlast)
- C-Profil zur Aufnahme des Versorgungssystems mit Revisionsmöglichkeit

### 3 - Tertiäres Trägersystem

- Umlaufender, mechanisch geklemmter Rahmen zur Gewährleistung der Dichtigkeit des Reaktorraums (hydrostatischer Druck des Mediums)

Abbildung 4 Konzeptskizze „Hinterlüftetes PBR-Fassadensystem mit einachsiger Nachführung“

© Arup Deutschland GmbH



- Abtrag der auftretenden Lasten (Eigenlast, Windlast) zum sekundären Trägersystem
- Aufnahme der Sekundärdichtebene zur Reduktion des Leckagerisikos

### 4 - Nachführung

- Lagerung auf zentral angeordneten Zapfen und vertikaler Lamellenaufnahme
- Hohlzapfen zur biegungsfreien Leitungsdurchführung

- Simultane Steuerung mehrerer PBR-Lamellen über Schubgestänge und Linearantrieb

**5 - Photobioreaktor-Einheit (PBR)**

- Vorder- und Rückseite aus Sicherheitsglas
- Aufnahme der Belastung aus hydro-statischem Druck des Mediums
- Umlaufender Abstandhalter mit Primärdichtung und erforderlichen Anschlüssen
- Vertikale Stege im unteren Bereich für Umwälzfunktion
- Thermische Isolierung durch Mehrscheibenaufbau

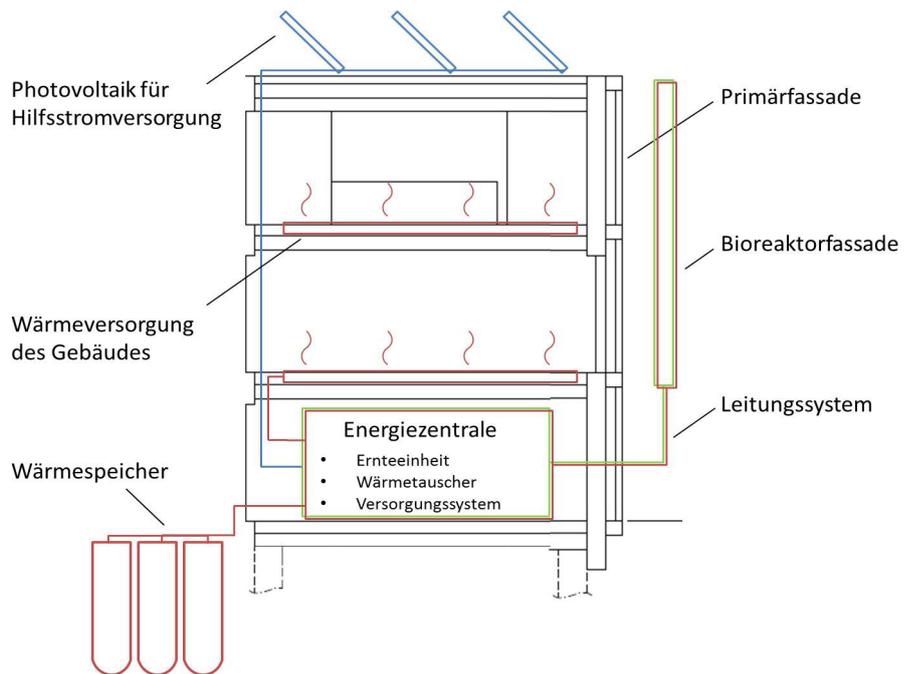


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Gesamtanlage inkl. Haustechnik  
© Arup Deutschland GmbH

Für die Integration in die Haustechnik wurde ein geschlossenes Kreislaufsystem entwickelt, das alle relevanten Funktionen umfasst und miteinander verbindet (Biomasse- und Wärmegewinnung und Entnahme, Versorgung der PBR-Einheiten, Nutzung- bzw. Speicherung der Energieträger). Eine schematische Darstellung des Konzepts für die Gebäudeintegration des Gesamtsystems ist in Abbildung 5 gezeigt. Darüber hinaus wurde eine Nutzungs- und Versorgungskonzept für das Kreislaufsystem entwickelt. Das Ergebnis für eine typische Variante ist in Abbildung 6 dargestellt.

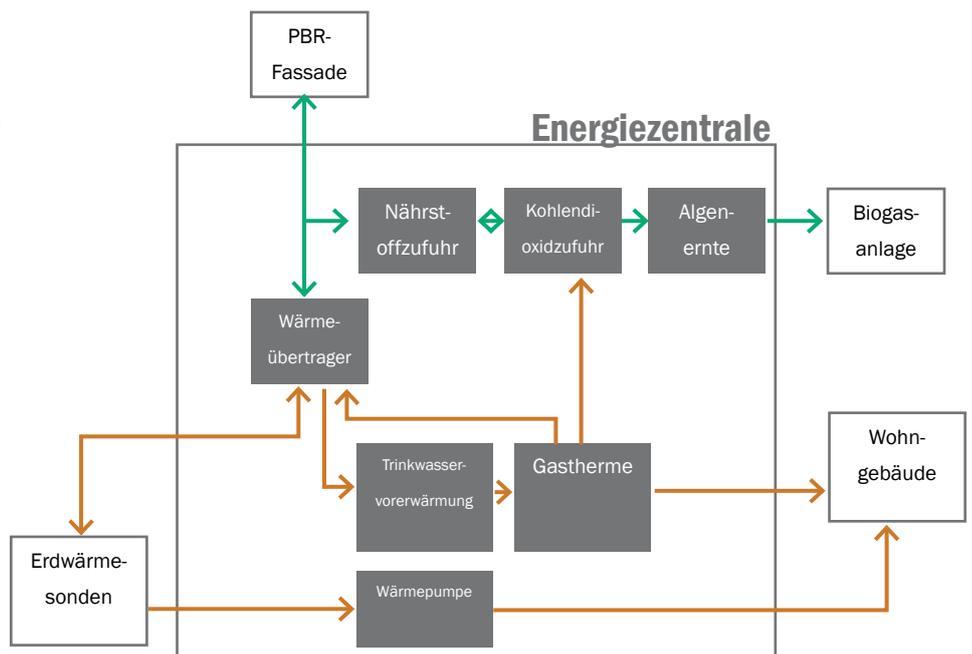
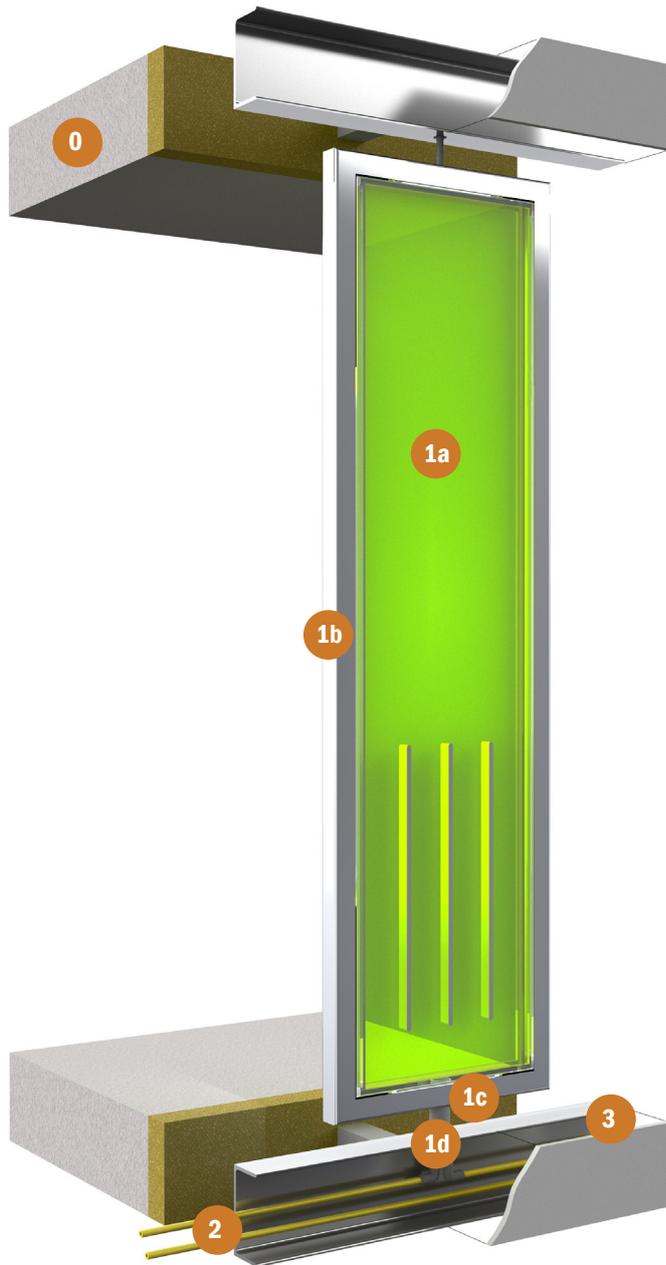


Abbildung 6 Schematische Darstellung der Energiezentrale  
© Arup Deutschland GmbH

## 4. FASSADENSYSTEM



Basierend auf dem Konzept für ein Fassadensystem aus Photobioreaktoren (PBR) wurden verschiedene Prototypen entwickelt, geplant und gebaut. Intensive

Abbildung 7 Rendering des finalen Prototypen inklusive Unterkonstruktion und Versorgungssystem

© Arup Deutschland GmbH

Leistungs- und Belastungstests wurden an den verschiedenen Prototypengenerationen durchgeführt und Optimierungen hin zu einem funktionalen Gesamtsystem unternommen. In Abbildung 7 ist das Ergebnis dargestellt.

Die funktionalen Baugruppen des Fassadensystems lassen sich wie folgt beschreiben und sind in Abbildung 7 dargestellt:

- 0 - Primärstruktur-Gebäude
- 1 - Photobioreaktor-Paneel
- 2 - Versorgungsleitungen
- 3 - Unterkonstruktion – Horizontaler Lastsammler inklusive Anschluss an das primäre Tragwerk des Gebäudes

Aufgrund der Komplexität der Baugruppe „PBR-Paneel“ wurde diese weiter untergliedert. Das PBR-Paneel lässt sich durch die folgenden Untereinheiten beschreiben:

- 1a - Photobioreaktor-Einheit (PBR ohne Klemmrahmen)
- 1b - vierseitiger Rahmen
- 1c - Auflager PBR bzw. Lastabtrag in die Unterkonstruktion
- 1d - Verschaltung und Durchführung Versorgungsleitungen

## 5. PROZESSFÜHRUNG UND STEUERUNG



Abbildung 8 Einstellung von gleichen Füllhöhen in sechs PBR. Die jeweils linken PBR sind Prototypen der ersten Generation, die jeweils rechten jene der zweiten.  
© SSC GmbH

Das hydraulische System wurde als geschlossenes Kreislaufsystem realisiert. Durch die Integration aller relevanten Funktionen in das Kreislaufsystem ist eine komplexe Prozessführung und Steuerung notwendig, um einen effektiven und effizienten Betrieb des Fassadensystems zu ermöglichen.

Durch umfassende Versuche an den verschiedenen Prototypen wurde die

systemrelevanten Kenngrößen für die Prozessführung und Steuerung ermittelt und hinsichtlich Biomasse und Wärmeertrag optimiert. Insbesondere wurde die optimale Durchflussgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Einflussgrößen Anströmung, Versorgung ( $\text{CO}_2$ , Sonnenlicht, Nährstoffe, Wärme) und Nutzung (Biomasse- und Wärmeentnahme) ermittelt und die Parameter in die Steuerung integriert.

# 6. ENERGETISCHE KENNWERTE



Berechnungen und Simulationen, die durch Experimente am Prototypsystem ergänzt wurden, ergaben die Kenndaten für Wärmedurchgangskoeffizienten und Produktionsraten mit der die Erträge des Fassadensystems ermittelt werden können. Dabei konnte durch den Einsatz spezieller Gläser aus der Photovoltaik-Technik das Biomassewachstum zusätzlich um bis zu 100 % gesteigert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass für das entwickelte Fassadensystem aus Photobioreaktoren (PBR) eine Umsetzung der eingestrahelten Sonnenenergie zu 38 % in Wärme und zu 10 % in Biomasse erreicht werden konnte.

Abbildung 10 Monatssummen der Einstrahlung in die PBR und der damit zu erzielenden Erträge an Wärme und Biomasse für eine Bioreaktorfassade mit einer Fläche von 312 m<sup>2</sup> bei einer Südwest-Ausrichtung. © SSC GmbH

Abbildung 9 Fertig gestellte PBR-Fassade am BIQ-Gebäude

© Colt International GmbH

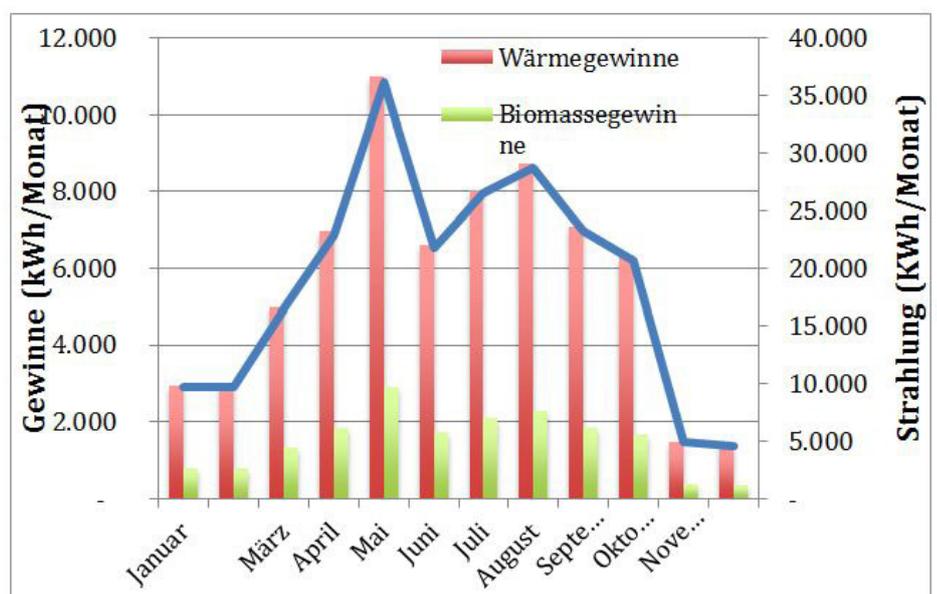




Abbildung 11 Rendering BIQ-Gebäude  
© SSC GmbH

## 7. AUSBlick UND WEITERE FORSCHUNG

Als unmittelbarer Ausblick ist das begleitende Monitoring für das Pilotprojekt BIQ zu nennen. Das BIQ-Gebäude wurde Ende März 2013 mit einer aktiven Fassadenfläche von ca. 200 m<sup>2</sup> im Rahmen der Internationalen Bauausstellung (IBA) in Hamburg der Öffentlichkeit vorgestellt. Das Monitoring wird von den Entwicklungspartnern und der HafenCity Universität Hamburg mit einer Anteilsförderung der Forschungsinitiative ZukunftBau über einen Zeitraum von zwei Jahren durchgeführt. Dabei stehen technische, energetische und nutzerorientierte Gesichtspunkte im Vordergrund. Die Erkenntnisse aus der Ermittlung der Leistungsfähigkeit und Nutzerinteraktion

des Fassadensystems im Piloteinsatz am BIQ und der Beobachtung der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Gesichtspunkten werden für die Weiterentwicklung und Optimierung des Systems eingesetzt.

Daneben werden Varianten und Weiterentwicklungen des Systems beispielsweise bei der Lastübertragung in der PBR-Einheit durch Klebeverbindungen oder bezüglich der Nutzungsmöglichkeiten für die Mikroalgenbiomasse untersucht.

Langfristig zeigt die Technologie im Bereich Neubau und energetische Sanierung

von Bestandsbauten vielversprechende Potentiale auf. Vor allem im Bereich der Stadtquartierplanung wird es in Zukunft darauf ankommen, gebäudeübergreifende Konzepte zu entwickeln, um die Massenströme von Wärme, Strom, Wasser und CO<sub>2</sub> mit dem Ziel zu vernetzen, Energie nach Bedarf zu generieren, zu speichern und effizient dem Verbraucher zuzuführen. Die PBR Technologie ermöglicht erstmals die biologischen und technischen Kreisläufe miteinander zu verbinden und stellt so einen wichtigen Baustein für CO<sub>2</sub> neutrale Siedlungskonzepte dar, deren Energiebedarf vollständig durch lokal gewonnene erneuerbare Energien gedeckt wird.



