

Jan Wurm, Cornelius Schneider,
Martin Kerner, Jörg Ribbecke, Markus Ticheloven

Hinterlüftete Fassadenkonstruktion aus Photobioreaktoren

F 2856

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-9108-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



ABSCHLUSSBERICHT

FORSCHUNGSBERICHT
HINTERLÜFTETE FASSADENKONSTRUKTION AUS
PHOTOBIOREAKTOREN

PROJEKTLEITUNG	DR. JAN WURM
BEARBEITUNG	CORNELIUS SCHNEIDER
LAYOUT VON	MARTIN BASSLER
ZUARBEIT VON	DR. MARTIN KERNER JÖRG RIBBECKE MARKUS TICHELOVEN

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

ABSCHLUSSBERICHT

FORSCHUNGSBERICHT

HINTERLÜFTETE FASSADENKONSTRUKTION AUS

PHOTOBIOREAKTOREN

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung	8
1.1	Hintergrund	8
1.1.1	Erneuerbare Energien	8
1.1.2	Biomasse als erneuerbare Energiequelle	11
1.1.3	Biomasse aus Mikroalgen	12
1.1.4	Systeme zur Erzeugung von Biomasse aus Mikroalgen	13
1.2	Gebäudeintegrierte Biomasseerzeugung	16
1.3	Forschungsvorhaben	19
1.3.1	Ziele	19
1.3.2	Partner	19
1.3.2.1	Arup Deutschland GmbH	19
1.3.2.2	Strategic Science Consulting GmbH (SSC)	19
1.3.2.3	Colt International GmbH	19
1.3.3	Herangehensweise	20
1.3.3.1	Grundlagenermittlung	20
1.3.3.1.1	Konzeptentwicklung	20
1.3.3.3.2	Verfahrensentwicklung: Integriertes Energiemanagement	21
1.3.3.2	Entwicklung Fassadensystem / Bau Prototyp	21
1.3.3.3	Test Prototyp	21
1.3.3.4	Optimierung des Prototypen und Bau einer Modellfassade	22
1.3.3.5	Verfahrensentwicklung: Steuerungssystem	22
1.4	Vorarbeiten – Stand der Technik	22
1.4.1	Systeme zur Energiegewinnung in der Sekundärfassade	22
1.4.1.1	Photovoltaik	23
1.4.1.2	Solarthermie	24
1.4.2	Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen TERM	24
1.4.2.1	Photobioreaktor-Technologie (PBR)	24
1.4.2.2	Energiegewinnung	26
1.4.3	Interdisziplinäre Planungs- und Entwicklungsleistungen	29
1.4.4	Vom Wettbewerb zum Pilotprojekt	29
2.	Grundlagenermittlung Planungsvoraussetzungen	32
2.1	Vorbemerkungen	32
2.2	Anforderungen der Mikroalgen	32
2.3	Anforderungen der Photobioreaktor-Technologie	33
2.4	Anforderungen für eine Fassadenanwendung	34
2.4.1	Verwendete Normen und Richtlinien	34
2.4.2	Lastannahmen	35
2.4.3	Brandschutz	35
2.4.4	Schallschutz	35

3.	Konzeptentwicklung	36
3.1	Zielsetzung	37
3.2	Einflußgrößen	37
3.2.1	Standort / Position	37
3.2.2	Orientierung	37
3.2.3	Nachführung	37
3.2.4	Paneelanordnung	38
3.2.5	Lastabtragendes System	38
3.2.5.1	Primäre Tragstruktur	38
3.2.5.2	Sekundäres Trägersystem - Unterkonstruktion	38
3.2.5.3	Tertiäres Trägersystem - Rahmen PBR-Einheit	38
3.3	Materialauswahl	39
3.4	Zusammenfassung	40
3.4.1	Fassadensystem	40
3.4.2	Integration Haustechnik	42
4.	Fassadensystem	44
4.1	Systembeschreibung	44
4.2	Baugruppen	45
4.2.1	Photobioreaktor-Paneel	45
4.2.1.1	Photobioreaktor	45
4.2.1.2	Vierseitiger Rahmen	49
4.2.1.3	Auflager Photobioreaktor	51
4.2.2	Unterkonstruktion mit Versorgungsleitungen	52
5.	Prozessführung und Steuerung	55
5.1	Hydraulisches System	55
5.2	Gewinnung und Nutzung der Energieträger	56
5.3	Steuerung	58
6.	Energetische Kennwerte	60
7.	Ausblick und weitere Forschung	62
8.	Bildverzeichnis	64
9.	Tabellenverzeichnis	66
10.	Literaturverzeichnis	67
11.	Bildanhang	70

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Forschungsvorhaben wurde ein Sekundärfassadensystem entwickelt, das durch die Integration von Photobioreaktoren 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 Photobioreaktor-Paneel, die notwendigen Versorgungsleitungen und eine Unterkonstruktion zum Abtrag der auftretenden Lasten in das Tragwerk des Gebäudes. Das Photobioreaktor-Paneel ist mit allen erforderlichen Anschlüssen für Medien und Druckluft sowie einer Füllstandssensorik ausgestattet.

Die Versorgungsleitungen können verdeckt in der Unterkonstruktion zu den einzelnen Photobioreaktor-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 m² aktiver Fläche wird am BIQ-Gebäude auf der Internationalen Bauausstellung in Hamburg (IBA) im März 2013 der Öffentlichkeit vorgestellt.

1. EINLEITUNG

1.1 Hintergrund

1.1.1 Erneuerbare Energien

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 CO₂ zu reduzieren und gleichzeitig die Abhängigkeit von fossilen Energiequellen zu verringern.

Dafür müssen die Primärenergieträger Strom, Wärme und Kraftstoffe für die drei großen Verbrauchssektoren „Industrie“, „Bau und der Betrieb von Gebäuden“ sowie „Transport und Mobilität“ weitestmöglich aus Erneuerbaren bereitgestellt werden.

Zu den Erneuerbaren zählt Energie, die aus Wasser- und Windkraft oder solarer Strahlung gewonnen wird. Biomasse und Geothermie stellen weitere wichtige Quellen für erneuerbare Energie dar.

Die entscheidenden Faktoren für eine erfolgreiche Umstellung auf Erneuerbare ist die bedarfsgerechte Verfügbarkeit und die effiziente Verteilung der Energieträger. Für eine bedarfsgerechte Bereitstellung ist entweder eine steuerbare An- bzw. Abschaltung oder eine gute Speicherbarkeit notwendig. Die meisten Erneuerbaren weisen entweder das Eine oder das Andere auf.

Beispielsweise ist hochwertiger und gut zu verteiler elektrischer Strom aus Photovoltaik und Windenergie nur dann verfügbar, wenn die Sonne scheint oder der Wind weht. Zusätzlich ist elektrischer Strom schlecht speicherbar. Mit Wasserkraft läßt sich elektrischer Strom bedarfsgerecht zur Verfügung stellen. In Deutschland sind allerdings die Kapazitäten nicht hoch genug, um den Bedarf zu decken. Solarthermische

Wärme und Bio-Treibstoffe lassen sich einfacher speichern, sind aber schlechter zu verteilen als elektrischer Strom. Hieraus wird deutlich, dass nur eine Kombination von verschiedenen Strategien eine flächendeckende Umstellung auf Erneuerbare ermöglicht.

In Deutschland wird der Ausbau der Erneuerbaren zur Deckung des Energiebedarfs durch verschiedene Initiativen vorangetrieben. Beispielsweise wird die Einspeisung von elektrischer Energie aus Erneuerbaren gesondert durch die öffentliche Hand vergütet und die Kraft-Wärme-Kopplung gefördert. Diese Maßnahmen werden im Erneuerbare-Energie-Gesetz (EEG) und im Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz (EEWärmeG) geregelt (1, 2).

In den vergangenen Jahrzehnten konnte ein starker Anstieg des Anteils der Energie aus erneuerbaren Quellen am Gesamtenergieverbrauch verzeichnet werden. Im Jahr 2011 lag beispielsweise der Anteil von Erneuerbaren am Brut-

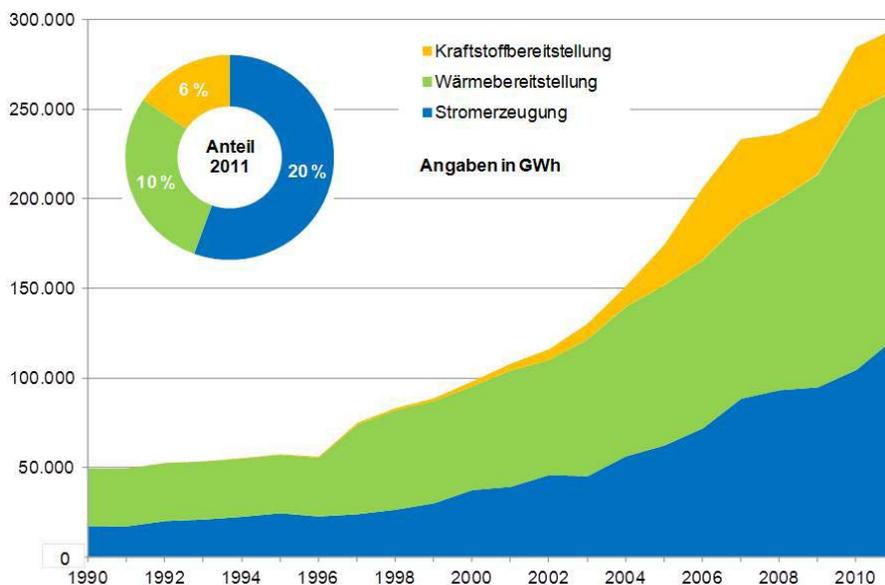
tostromverbrauch in Deutschland bereits bei über 20 % (Abbildung 1) (3). Allerdings wird auch deutlich, dass weitere Anstrengungen notwendig sind, um die deutschen Klimaziele zu erreichen. Bei der Betrachtung des Energieverbrauchs nach Sektoren in Deutschland (Abbildung 2) wird deutlich, dass über ein Drittel des Gesamtbedarfs im Gebäudekontext entsteht (Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungssektor). Durch die Entwicklung weiterer Möglichkeiten, um den Energieverbrauch im Gebäudekontext zu senken, kann also ein großer Beitrag zum Erreichen der Klimaziele geleistet werden. Der ab 2020 vorgeschriebene Null-Energie-Haus-Standard für Neubauten setzt hierzu einen gesetzlichen Anreiz.

Um eine Null-Energie-Bilanz eines Gebäudes zu erzielen, muss nicht nur der Energieverbrauch möglichst stark reduziert werden, sondern auch Energie am Gebäude generiert werden, um den verbleibenden Energiebedarf zu decken. Die gebäudeintegrierte Bereitstellung

von Energie lässt sich in Erzeugung von elektrischem Strom und von Wärme unterteilen.

Elektrischer Strom lässt sich durch Photovoltaik (PV) am Gebäude erzeugen. Windenergie oder Wasserkraft sind zur Stromerzeugung im Gebäudekontext aufgrund der Anlagengröße in den allermeisten Fällen ungeeignet. Wärme kann am Gebäude durch Solarthermie gewonnen werden.

Abbildung 1 Anteil regenerativer Energie am gesamten Energieverbrauch in Deutschland (3)



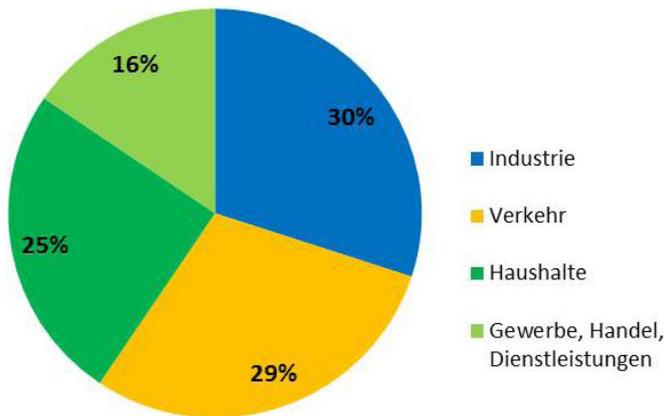


Abbildung 2 Energieverbrauch in Deutschland 2011 nach Sektor (4)

% stellt Biomasse die wichtigste erneuerbare Resource für die Erzeugung von Wärme in Deutschland dar (3). Die intensive Nutzung von Biomasse ist auf die gute und bedarfs-gerechte Verfügbarkeit und seine sehr gute Speicherfähigkeit zurückzuführen.

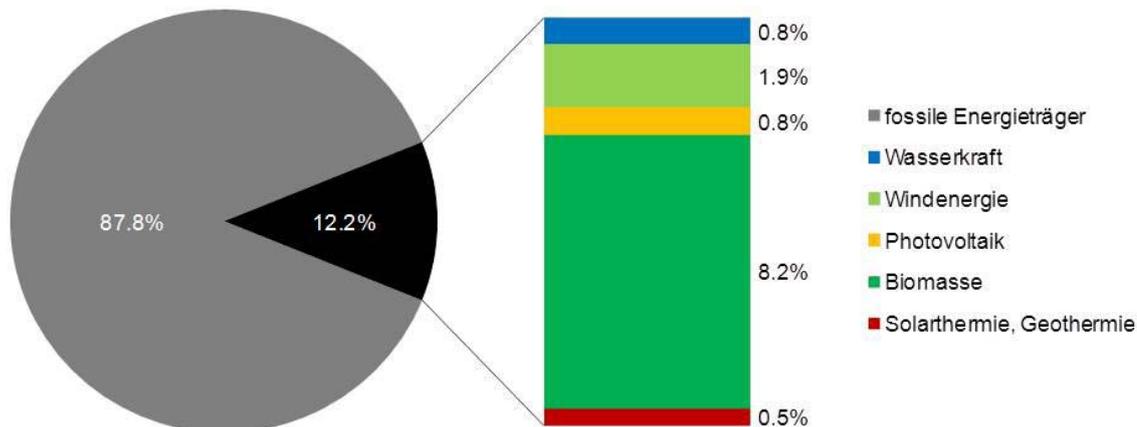
In Deutschland wurden im Jahr 2011 gut 3 % des Stromverbrauchs durch PV-Anlagen erbracht (5). Der Endenergieverbrauch für Wärme wurde in Deutschland im Jahr 2011 lediglich zu 0,4 % durch Solarthermie erbracht (5).

Allerdings wird die verwendete Biomasse praktisch vollständig gebäudefern erzeugt und muss angeliefert werden.

Damit stellt sich die Frage, ob sich Biomasse gewinnbringend im oder am Gebäude erzeugen läßt, um diese dann wieder im Gebäude nutzbar zu machen. Bisher wird keine Biomasse im Gebäudekontext gewonnen und für die Energieerzeugung genutzt; geeignete Kultivierungssysteme fehlen.

Dagegen wurde der überwiegende Teil der benötigten Wärme durch Biomasse bereitgestellt. Mit einem Anteil von 92

Abbildung 3 Anteil erneuerbarer Energien (Schwarz) am Endenergieverbrauch in Deutschland vorläufig für das Jahr 2011 (3)



1.1.2 Biomasse als erneuerbare Energiequelle

Biomasse stellt aufgrund ihrer vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten eine der wichtigsten erneuerbaren Energiequellen dar. Weltweit werden über 50 % der erzeugten Erneuerbaren Primärenergie durch Biomasse bereitgestellt und die Tendenz ist steigend (6). Deutschland steht dabei mit einem Anteil von 92 % bei der Wärmebereitstellung auf einem Spitzenplatz (3).

Biomasse ist dabei als Ressource für alle primären Energieträger relevant. In Deutschland wurden im Jahr 2011 insgesamt 36,9 Mrd. kWh Strom, 126,5 Mrd. kWh Wärme und 3,6 Mio. Tonnen Biokraftstoffe aus Biomasse erzeugt.

Neben der guten Speicherbarkeit, der bedarfsgerechten Verfügbarkeit und der einfachen und vielseitigen Nutzbarkeit ergeben sich weitere Vorteile aus der erneuerbaren Energiequelle Biomasse:

- Durch den Entzug von klimaschädlichem CO₂ aus der Atmosphäre während des Biomasse-Aufbaus ist die Erzeugung von Energie aus Biomasse beispielsweise durch Verbrennung annähernd CO₂ neutral.
- Die Abhängigkeit vom Import von fossilen Energieträgern in Ländern

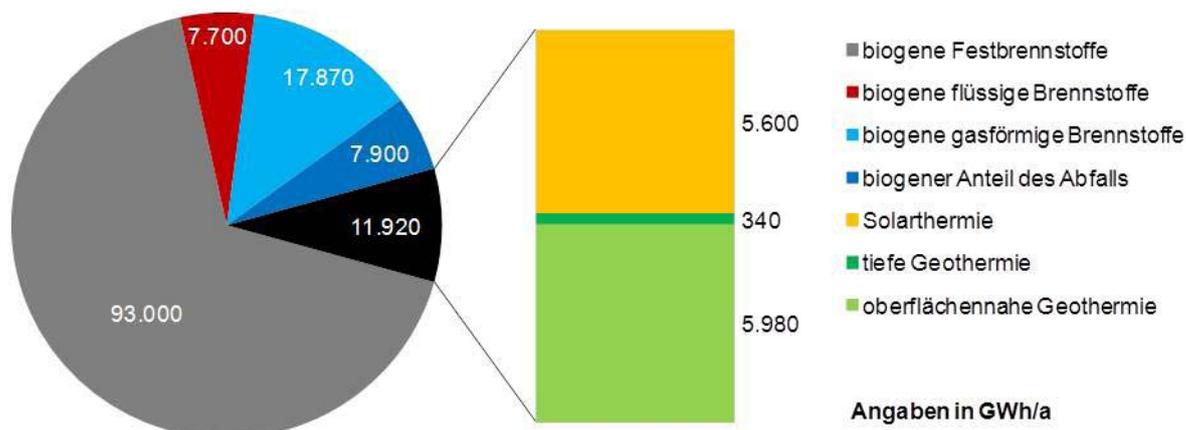
mit geringem Vorkommen kann durch die Erzeugung von Biomasse verringert werden

Allerdings bringen viel genutzte Biomasse-Quellen wie Holz und Energiepflanzen wie Mais und Raps einige Nachteile mit sich:

- Bei nicht nachhaltiger Holzwirtschaft werden große Waldflächen gerodet und können veröden (Desertifikation).
- Durch die Verbrennung solcher Hölzer werden große Mengen CO₂ aus dem natürlichen CO₂-Kreislauf herausgelöst und tragen damit zur Schädigung des Klimas bei.
- Energiepflanzen stellen durch Land- und Wassernutzung eine Konkurrenz zu Futterpflanzen dar und verbrauchen lebenswichtige Ressourcen, die in vielen Teilen der Welt äusserst knapp sind.

Eine vielversprechende Alternative zu höheren Pflanzen bieten Algen und insbesondere Mikroalgen als Biomassequelle.

Abbildung 4 Vorläufiger Anteil für das Jahr 2011 an der Wärmebereitstellung (Endenergieverbrauch in GWh/a) aus erneuerbaren Energien in Deutschland (3)



1.1.3 Biomasse aus Mikroalgen

Biomasse aus Mikroalgen stellt eine schnell wachsende Alternative zu höheren Pflanzen (Gehölze, Energie-Pflanzen) dar. Die Nachteile können weitestgehend überwunden werden (7).

Neben den terrestrischen Pflanzen nutzen auch Algen das Sonnenlicht als Energiequelle zur Biomasseproduktion und stellen in der Gruppe der phototropen Organismen sogar die wichtigsten Primärproduzenten der Erde dar. In ihrem Stoffwechsel fixieren sie CO_2 , produzieren O_2 und bilden den Anfang der wichtigsten globalen Nahrungsketten und Stoffkreisläufe. Ohne Mikroalgen gäbe es auf unserem Planeten weder auf dem Land noch im Meer höheres Leben, weil fast 90 Prozent des Sauerstoffbedarfs von Mikroalgen geliefert wird. Mikroalgen sind phototrophe uni- und oligozelluläre Organismen, die ubiquitär verbreitet sind und eine sehr hohe Biodiversität aufweisen.

Mikroalgen benötigen neben einem geeigneten Kultivierungsgefäß (offene oder geschlossene Systeme) mit wässrigem Medium Sonnenlicht, Kohlendioxid und Nährsalze zum Aufbau von Biomasse

durch Photosynthese. Die Vermehrung der Biomasse wird durch Zellteilung erreicht. Bei ausreichender Versorgung kann die Mikroalgen-Biomasse innerhalb eines Tages verdoppelt werden. Der Biomasse-Aufbau ist gut zu kontrollieren und unter Berücksichtigung der jeweiligen Bedingungen gut vorhersagbar.

Durch die Kultivierung im wässrigen Medium ist die Erzeugung von Biomasse aus Mikroalgen weitgehend unabhängig von Agrarflächen. Der Wasserverbrauch relativ zum Biomasse-Aufbau ist gegenüber anderen Nutzpflanzen sehr gering und es besteht keine Gefahr von Versalzung oder Ähnlichem. Mikroalgen-Biomasse weist einen hohen Anteil an Fetten und Ölen auf, die einfach und vielseitig nutzbar gemacht werden können. Unter anderem kann die Biomasse zu Bio-Treibstoffen wie Bio-Diesel oder Methangas weiterverarbeitet werden. Daneben finden sich durch den hohen Reinheitsgrad der Bestandteile Anwendungen im Kosmetik-, Pharma- und Lebensmittelbereich.

Die Vorteile, die Mikroalgen im Vergleich zu Landpflanzen als nachwachsende Rohstoffe aufweisen, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Höhere Produktausbeute bezogen auf Fläche und Zeit
- Keine Abfallbiomasse wie z.B. Wurzeln und Stämme (Zellulose)
- Kein Wettbewerb mit landwirtschaftlicher Anbaufläche

Die enormen Stoffwechselleistungen von Mikroalgen implizieren zahlreiche Einsatzgebiete mit einem hohen Marktpotenzial:

- Hochwertige Nahrungsmittel sowie Futter- und Lebensmittelzusatzstoffe
- Carotinoide und andere Farbpigmente
- Essentielle Fettsäuren, Aminosäuren und Vitamine
- Enzyme und andere Proteine
- Antibiotika, antivirale und andere pharmakologisch wirksame Stoffe
- Energie aus Algenbiomasse (Biogas)
- CO_2 -Fixierung und Recycling (in Biogasanlagen und Kraftwerken)
- H_2 -Produktion
- N_2 -Fixierung



Abbildung 5 Beispiele für die Kultivierung in industriellen Großanlagen (8) © Seabiotic

1.1.4 Systeme zur Erzeugung von Biomasse aus Mikroalgen

Systeme zur Erzeugung von Biomasse aus Mikroalgen können allgemein in zwei Typen eingeteilt werden: offene und geschlossene Systeme.

In Abbildung 5 sind zwei Beispiele offener Systeme dargestellt, die im Gegensatz zu geschlossenen Systemen weitaus verbreiteter und besser erforscht sind. Offene Systeme werden in natürliche Gewässer, bspw. Seen oder Lagunen, und künstliche Gewässer wie Behälter oder angelegte Teiche unterteilt. Sie zeichnen sich durch einen vergleichsweise einfachen Bau- und Betrieb und den Einsatz von hauptsächlich low-tech Technologie aus.

Die Effizienz von offenen Systemen ist aufgrund des ungünstigen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses eingeschränkt. Wegen der geringen Eindringtiefe des auftreffenden Sonnenlichts trägt nur die oberflächennahe Mediumregion zur Vermehrung der Biomasse bei. Im restlichen Mediumvolumen besteht aufgrund von Inaktivität eine erhöhte Gefahr für Absterben der Mikroalgen und Biofoul-

ing. Durch das große Mediumvolumen lassen sich Prozessparameter wie Temperatur und Nährstoffgehalt nur schwer kontrollieren. Insbesondere die CO_2 Bereitstellung ist durch Ausgasen aus dem Medium und lange Diffusionswege zur Mikroalge nicht optimal. Nährstoffe müssen in großen Mengen beigemischt werden, damit in den aktiven Regionen ausreichende Konzentrationen erreicht werden. Der Ernteprozess benötigt wegen der geringen Kulturlösung einen hohen energetischen Aufwand. Durch Ausgleich von verdunstetem Medium entsteht ein hoher Wasserverbrauch. Das Risiko von Kontaminationen bedingt eine Beschränkung auf besonders robuste Mikroalgen-Spezies.

Geschlossene Systeme lösen einen Großteil der Probleme offener Systeme und können erheblich effektiver betrieben werden. Die Komplexität von geschlossenen Systemen ist gegenüber offenen wesentlich gesteigert, was erhöhte Kosten und operative Risiken mit sich bringt. Verschiedene Konzepte befinden sich bereits in der Entwicklung wobei es deutliche unterschiedliche bei Formgebung, Materialien und Anlagentechnik gibt.



Abbildung 6



Abbildung 7



Abbildung 8



Abbildung 9

Durch eine starke Verringerung der Bauteiltiefe und des Mediumvolumens des Kultivierungsgefäßes (Photobioreaktor, PBR) wird das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis bei geschlossenen Systemen gegenüber offenen deutlich verbessert. Verschiedene Umwälzungssysteme mit teilweise hohen Fließgeschwindigkeiten ermöglichen die Vergrößerung des aktiven Anteils am Mediumvolumen und eine Reduktion des Biofouling-Risikos. Die Systemparameter lassen sich gegenüber offenen Systemen erheblich einfacher kontrollieren und Nährstoffe wesentlich effektiver einsetzen. Das Kontaminationsrisiko entfällt und der Wasserverbrauch beschränkt sich auf ein Minimum. Ein ganzjähriger Betrieb ist auch in kalten Regionen möglich.

Eine Auswahl bisheriger Anlagenkonzepte ist in Abbildung 6-9 dargestellt. Dabei gibt es beim Biomasseertrag und dem Biofouling-Risiko erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Technologien. Photobioreaktoren aus Rohren oder Polyethylen-Schläuchen (Abbildung 6 und 7) erweisen sich als nachteilig gegenüber Flachpaneel-Modellen aus Kunststoff (Abbildung 8 und 9). Umwälzung und Sonnenlichteintrag sind

erschwert und das aktive Mediumvolumen damit verringert.

Die hohe Effizienz und die Bauweise von Flachpaneel-Kollektoren ermöglicht einen Einsatz beispielsweise an Fassaden oder auf Dachflächen. Damit wird eine gebäudeintegrierte Kultivierung und die urbane Erschließung des Energieträgers Mikroalgen-Biomasse denkbar.

Abbildung 6 - 9 Anlagentypen für Mikroalgen-Kultivierung in geschlossenen Systemen, oben links: Glas- oder Kunststoffrohre (9), oben rechts: Polyethylen-Schläuche, unten links: flache Kunststoff-Paneele (10), unten rechts: flache Kunststoff-Paneele (11)
www.biopro.de

1.2 Gebäudeintegrierte Biomasseerzeugung

Konzepte für die Nutzung von Fassadenflächen im urbanen Raum zur gebäudeintegrierten Energieerzeugung mittels solarer Strahlung sind weitreichend bekannt und werden immer stärker eingesetzt. Bis heute beschränken sich diese Konzepte allerdings auf die Erzeugung von elektrischer Energie durch Photovoltaik und Wärme durch Solarthermie.

Ein Energieträger, der trotz starker Nutzung und großer Vorteile noch nicht gebäudeintegriert erzeugt wird, ist die Biomasse. Dies ist hauptsächlich auf den Mangel an geeigneten Kultivierungs- und Nutzungssystemen zurückzuführen.

Wie bereits in 1.1 beschrieben, stellen Photobioreaktoren mit ihrer vielfältigen Formgebung zur Kultivierung von Biomasse aus Mikroalgen eine vielversprechende Möglichkeit dar, dieses Defizit auszugleichen. In den letzten Jahren haben Entwicklungen im Bereich der Photobioreaktoren (PBR) das Thema „Gebäudeintegrierte Biomassekultivierung“ belebt. So zeigt beispielsweise 2009 ein Bericht über „Geo-Engineering“ der Institution of Mechanical Engineers

die Möglichkeit, röhrenförmige PBR an Hochhausfassaden zur CO₂-Bindung einzusetzen (Abbildung 10) (12).

Professor Peter Head (University of Bristol), ehemaliger Leiter der Abteilung für Stadtentwicklung bei Arup, sieht in der urbanen Nutzung von Algen nicht nur die Zukunft der Energieversorgung, sondern auch eine Möglichkeit, Nahrungsmittel- und Versorgungsknappheit vorzubeugen (13, 14).

Aus der zunehmenden Aufmerksamkeit für Biomasse aus Mikroalgen entwickelten sich in den letzten Jahren verschiedene Konzepte für die gebäudeintegrierte Kultivierung. In Abbildung 11-14 sind einige davon dargestellt.

Ennesys (15, 18, 19) Frankreich

Ennesys ist ein französisches Joint-venture aus dem Technologietransfer Beratungsunternehmen Pacific Junction Corporation und Algenproduzent Origin Oil. Das Ziel des Unternehmens ist es, mit Hilfe von gebäudeintegrierten Photobioreaktoren und dem Grauwasser des Gebäudes Biomasse aus Mikroalgen, Sauerstoff und aufbereitetes Wasser zu gewinnen (Abbildung 11).

Der Zielmarkt beschränkt sich zunächst auf Frankreich. Die PBR-Technologie wird nicht eingehender beschrieben. Die Verwendung der gewonnenen Biomasse soll im Gebäude erfolgen, allerdings ist Genaueres nicht bekannt. Ein erstes Demonstrationsobjekt wurde bereits für März 2012 angekündigt, ist bisher jedoch nicht umgesetzt worden.

Emergent Architects (16) Los Angeles

Emergent haben verschiedene Entwürfe für Fassaden und ganze Gebäude generiert, die Photobioreaktoren in die Hülle integrieren (Abbildung 12). Soweit bekannt ist noch keiner dieser Entwürfe realisiert worden. Die PBR-Technologie wird nicht genauer beschrieben, allerdings sprechen die Architekten von tiefgezogenem Acrylglas als PBR-Material. Extrahiertes Öl aus der Algenbiomasse soll zur Energiegewinnung genutzt werden.



Abbildung 10 Rendering von fassadenintegrierten Photobioreaktoren im urbanen Raum (12).
© Institution of Mechanical Engineers, London, 2009

SymBio2 (17, 20)

Frankreich

SymBio2 ist ein französisches Konsortium bestehend aus den Architekten X-TU, dem auf Algentechnologie spezialisierten AlgoSource Technologies, dem Forschungslabor GEPEA der Universität Nantes und dem Fassadenbauer Permas-teelisa. Das Ziel des Konsortiums ist die Entwicklung eines Photobio-reaktors der in ein Doppelfassadensystem integriert ist (Abbildung 13 und 14). Die PBR-Einheiten verwenden die sogenannte AirLift-Technologie, um die Mikroalgen in Bewegung zu halten und ein Anhaften an der PBR-Wandung zu verhindern. Die PBR-Technologie soll auf Südfassaden eingesetzt werden. Solarstrahlung, die sonst zum Aufheizen des Gebäudes füh-

ren würde, soll in Biomasse umgewandelt werden. Die gewonnene Biomasse soll als Ressource für Nahrungsmittel oder Bio-Kraftstoffe genutzt werden. Derzeit werden Prototypen gebaut und getestet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass alle bisherigen Anstrengungen geeignete Systeme zur Kultivierung von Mikroalgen-Biomasse im Gebäudekontext zu entwickeln zum Zeitpunkt des vorliegenden Forschungsvorhabens noch kein marktreifes System hervorgebracht haben.

Abbildung 11 -14 Übersicht Konzepte für gebäudeintegrierte Kultivierung von Mikroalgen – 11 Ennesys © Ennesys; 12 Emergent Architects © Emergent Architects; 13 und 14 SymBio2 © SymBio2 (15, 16, 17)



Abbildung 11

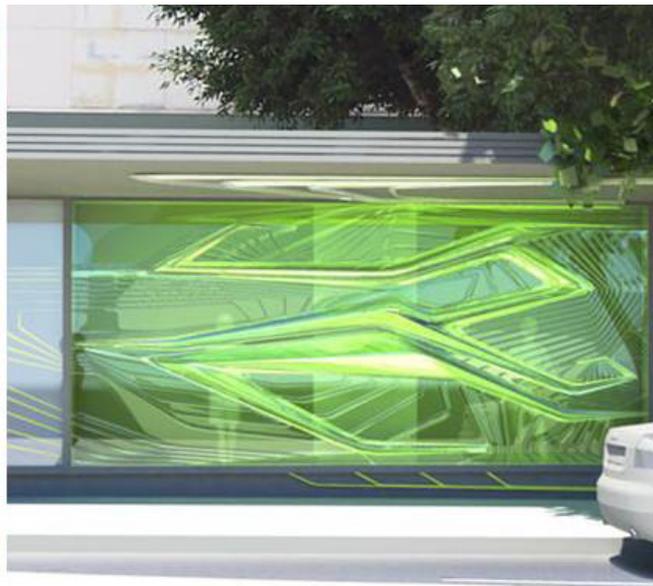


Abbildung 12



Abbildung 13



Abbildung 14

1.3 Forschungsvorhaben

Das vorliegende Forschungsvorhaben soll, durch die Entwicklung eines geeigneten Fassadensystems, die gebäudeintegrierte Kultivierung von Biomasse aus Mikroalgen für Deutschland erschließen.

1.3.1 Ziele

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines hinterlüfteten Fassadensystems aus Photobioreaktoren 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.

1.3.2 Partner

1.3.2.1 Arup Deutschland GmbH

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.

1.3.2.2 Strategic Science Consulting GmbH (SSC)

SSC Strategic Science Consult GmbH ist für die Bereitstellung der Photobioreaktor (PBR)- und Mikroalgentechnologie verantwortlich. Insbesondere gehört 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.

1.3.2.3 Colt International GmbH

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.

Arbeitspaket	Ziel
0	Projektmanagement
1	Grundlagenermittlung, Konzeptentwicklung und Analyse inkl. Energiemanagement
2	Entwicklung Fassadensystem und Bau Prototyp
3	Test Prototyp
4	Optimierung Prototyp, Bau einer Modellfassade und Entwicklung einer Prozessführung
5	Entwicklung einer softwarebasierten Steuerung der Bioreaktorfassade

Tabelle 1 Übersicht Arbeitspakete und Ziele
© Arup Deutschland GmbH

1.3.3 Herangehensweise

Die Herangehensweise für das vorliegende Forschungsvorhaben lässt sich in sechs übergeordnete Themengebiete, entsprechend der obenstehenden Tabelle 1 aufteilen. Im Folgenden werden die Themengebiete dargestellt und den festgelegten Arbeitspaketen zugeordnet.

1.3.3.1 Grundlagenermittlung

Aus den bisherigen Forschungsergebnissen der Versuchsanlage TERM werden die für die Entwicklung des Systems notwendigen Parameter und Rahmenbedingungen, wie Biomasseerträge und Betriebstemperaturen in Abhängigkeit zu Orientierung im Jahresverlauf, zusammengestellt. Durch Bauteilversuche werden relevante Parameter zu Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit

des Bioreaktors ermittelt, um notwendige Modifikationen an dem bestehenden Reaktorsystem zu identifizieren. Als Grundlage für die Dimensionierung und Ausführung der Leitungen für die Gas-, Druckluft- und Wasserversorgung am Trägersystem können die Mess- und Erfahrungswerte der Pilotanlage in Hamburg-Reitbrook herangezogen werden. Die Grundlagenermittlung kann Arbeitspaket 1 zugeordnet werden.

1.3.3.1.1 Konzeptentwicklung

Im zweiten Schritt werden die gesammelten Parameter für eine hinterlüftete Fassade mithilfe von computergestützten Simulationen und Modellrechnungen in Bezug gesetzt und mit Hinblick auf Biomasse- und Energiegewinnung und Wärmeschutz untersucht. Aufbauend auf das Anforderungsprofil werden Kon-

struktionsvarianten untersucht und nach Aufwand und Nutzen ausgewertet.

Es wird ein Konzept für Energiemanagement und Haustechnik entwickelt, das sich für die drei Anwendungsfälle Lagerhaus, Wohnhaus und Industriegebäude umsetzen lässt. Die Konzeptentwicklung kann dem Arbeitspaket 1 zugeordnet werden.

1.3.3.3.2 Verfahrensentwicklung: Integriertes Energiemanagement

Die Nutzung der Wärme aus den PBR setzt voraus, dass diese saisonal gespeichert wird. Geeignete Wärmespeicher sind aus der Solarthermie bekannt und können als Stand der Technik im Projekt integriert werden. Die Modellfassade soll auf der Pilotanlage durch einen Wärmespeicher ergänzt werden.

Die Art und Größe des Speichers entwickelt sich aus den vorliegenden Daten der SSC aus dem Betrieb der Pilotanlage. An dem integrierten System aus Modellfassade und Speicher sollen Versuche zur Entwicklung einer Software für ein integriertes Energiemanagement durchgeführt werden, das die Anlagen zum Wärmehaushalt und die Produktion von Biomasse steuern kann. Energiemanagement und Steuerung werden in Arbeitspa-

ket 3 und 5 untersucht.

1.3.3.2 Entwicklung Fassadensystem / Bau Prototyp

Aufbauend auf den Ergebnissen der Konzeptphase wird für ein ausgewähltes Fassaden- und Trägersystem im Detail weiterentwickelt. Das System schließt die Nachführung der PBR mit den für den Betrieb der Photobioreaktoren notwendigen Zu- und Abläufen ein. Das System wird als Prototyp umgesetzt. Neben den Produktionsraten werden durch eine entsprechende Sensorik sowohl die Luftströmungen als auch Isolations- und Kühlleistungen an der Modellfassade unter verschiedenen Umweltbedingungen, d.h. im Jahresverlauf, bestimmt. Die Entwicklung des Fassadensystems, der Bau von Prototypen und Tests zur Systemoptimierung werden in Arbeitspaket 2, 3 und 4 vorgenommen.

1.3.3.3 Test Prototyp

Anhand von Prototypen wird das System im Freiland getestet. Die Tests überprüfen die Funktionalitäten des Systems hinsichtlich der Produktion von Biomasse und Wärme. Ziel der Tests ist die Weiterentwicklung des Systems.

1.3.3.4 Optimierung des Prototypen und Bau einer Modellfassade

Basierend auf den Erkenntnissen der Testergebnisse wird das Fassadensystem überarbeitet und das Design des Photobioreaktors entsprechend angepasst. Eine neue Generation von Prototypen wird geplant, gebaut und für abschließende Versuche genutzt.

1.3.3.5 Verfahrensentwicklung: Steuerungssystem

Auf Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Modellrechnungen und gewonnenen Meßdaten erfolgt die Entwicklung eines Verfahrens, mit dem die verschiedenen Funktionalitäten hergestellt werden können. Darauf basierend wird ein Steuerungsmodell entwickelt, mit dem eine automatische Prozessführung des Fassadensystems in Abhängigkeit von den Außenbedingungen und der zu erzielenden Funktionalität erfolgt, wobei die Kenndaten für eine optimale Biomasseproduktion mit verrechnet werden. Energiemanagement und Steuerung werden in Arbeitspaket 3 und 5 untersucht.

1.4 Vorarbeiten – Stand der Technik

1.4.1 Systeme zur Energiegewinnung in der Sekundärfassade

Mit der Diskussion zur zukünftigen Energiebereitstellung und zum Einsatz rationaler Energieverwendung in Gebäuden, rückt die Energiegewinnung durch aktive regenerative Systeme in der Gebäudehülle immer mehr in den Mittelpunkt moderner Gebäudetechnik.

Als aktive Energieerzeuger (oder genauer gesagt Energiewandler) integriert in Fassaden, sind vorrangig Solarthermie- und die Photovoltaik-Systeme zu nennen. Betrachtet man die kurze Geschichte der beiden Technologien, findet sich diese

größtenteils als Produkt für Dachanwendungen wieder. Dies ist einerseits nachvollziehbar und vernünftig, erhalten doch in der Regel Dächer weitaus größere solare Einstrahlungsmengen als Fassaden.

Zudem sind Bauregelwerke für Aufdachanlagen häufig weniger restriktiv als für Fassaden. Dem gegenüber steht das Streben nach architektonisch ansprechenden Lösungen für energieerzeugende Systeme an Fassaden. Ein weiteres Argument findet sich in dem Flächenpotential für Fassaden, das weitaus größer ist, als das der zur Verfügung stehenden Dachflächen.

Grundsätzlich gilt für alle energieerzeugenden Systeme, die für eine Fassadenanwendung zum Einsatz kommen sollen:

- Flexible Dimensionen: Speziell im Objektbereich geben Haupttraster und Geschosshöhen Breiten- und Höhenquoten vor. Smartes Produktdesign reagiert mit flexiblen Baugrößen.
- Produktausführung muss architektonischer Akzeptanz standhalten
- Betrieb und Wartung sollten durch Haustechnik abgedeckt werden können
- Flexibilität in Form- und Farbgebung
- Erfüllung der bautechnischen Spezifikation
- Langlebigkeit und Wartungsfreundlichkeit
- Systemtechnik des Energiewandlers modular auf Anlagengröße adaptierbar
- Effiziente und darstellbare Energieumwandlung
- Darstellbares Kosten- / Nutzenverhältnis

Planerisch sind Verkehrslasten (Statik / Dynamik) genauso zu berücksichtigen wie Einstrahlungsmengen (Standort,

Fassaden-ausrichtung), Systemauslegung, potentielle gegenseitige Verschattung sowie architektonische Form- und Farbgebung. Konstruktionen sollten einen hohen Vormontagegrad aufweisen. Im Betrieb ist auf einen leichten Zugang für Wartungsarbeiten zu achten. Alle Materialien sollten für den Außenbereich geeignet sein.

1.4.1.1 Photovoltaik

Besonders die kristalline Solarzellentechnik ist durch ihre flexible Größengestaltung gut für eine Fassadenintegration geeignet. Insbesondere durch die Verbindung mit anderen Funktionselementen wie etwa Sonnenschutzanlagen können Synergien erreicht werden. Zusätzliche Steigerungen der Energieausbeute und des Kundennutzens können beispielsweise durch eine Nachführung, die dem Sonnenstand folgt, erzielt werden.

- Sommerlicher Wärmeschutz (Schutz vor Überhitzung)

- Erhöhung der Stromausbeute durch solare Nachführung
- Hinterlüftung der Module (erhöhter Stromertrag und geringerer Gesamt g-Wert erzielbar)
- Minimierung von Kühllasten (idealerweise kann auf Kühlung verzichtet werden)
- Sicherstellung Tageslicht
- Langlebigkeit, geringer Wartungsaufwand (selbst auf Spezial-PV-Module werden 20 Jahre Gewährleistung gegeben).

Nachfolgend ausgeführte Beispiele zeigen verschiedene Realisierungen von gebäudeintegrierten PV-Sekundärfassaden. Die Projektrealisierung sämtlicher Anlagen erfolgte durch die Colt International.

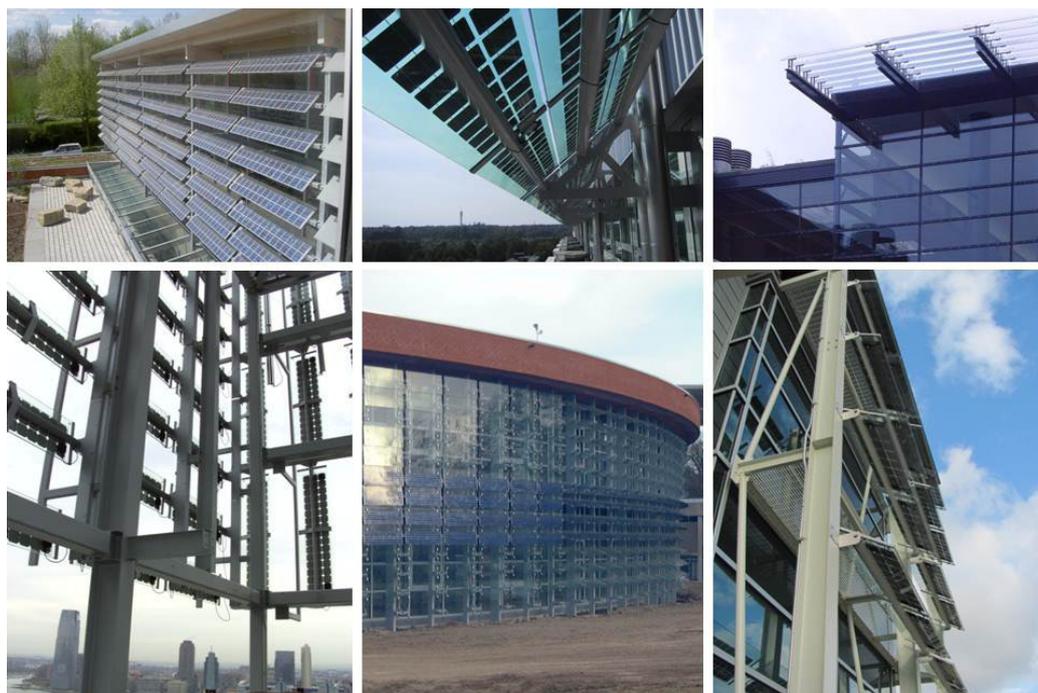


Abbildung 15 Ausgeführte Photovoltaik-Projekte
Colt
© Colt International GmbH

1.4.1.2 Solarthermie

Solarthermie bezeichnet die Nutzung von Sonnenenergie zur Bereitstellung von Wärme. Meist wird dabei Wasser bzw. ein Wasser-Glykol Gemisch als Trägermedium in sogenannten Absorbern erwärmt. Daneben stellen sogenannte Luftkollektoren, die Luft als Trägermedium verwenden, eine gängige Alternative dar. Durch die höhere Wärmekapazität von Wasser ergeben sich Vorteile für die Absorbervariante.

Neben den oben genannten Systemen mit erzielbaren Temperaturen von bis zu 180°C kommen auch Vakuumröhren-Kollektoren zum Einsatz, die Temperaturen von bis zu 280°C erzielen können. Alle drei Systeme werden fassadenintegriert angewendet. Die erzeugte Wärme dient der Warmwasserbereitung bzw. wird je nach Einbindung in die Haustechnik auch für Heizungsunterstützung herangezogen. Hierbei werden größere Schichtspeicher beladen. Neuerdings wird immer häufiger eine Kombination von Solarkollektor und Wärmepumpe eingesetzt. Hier ist die hohe Energieeffizienz der Wärmepumpe bereits bei sehr niedrigen Kollektor-Temperaturen ausschlaggebend.

Ein Beispiel für eine vollintegriertes System ist die Energiefassade Unisol der österreichischen Firma Unimet. Hier ist ein kombinierter Wasser/Luft-Kollektor voll in eine gängiges Pfosten-Riegel-Fassadensystem integriert. Die sich schnell erwärmende Luft wird als niedrig

temperierte Wärme direkt für die Erwärmung des Gebäudes verwendet. Das höher temperierte Wasser wird für die Warmwasserbereitung verwendet oder gespeichert. Die farbig eloxierten und extrudierten Kollektoren aus Aluminium sind so konzipiert, dass sie sich nahtlos und architektonisch ansprechend in die das Fassadensystem einfügen lassen.

1.4.2 Technologien zur Erschließung der Ressource Mikroalgen TERM

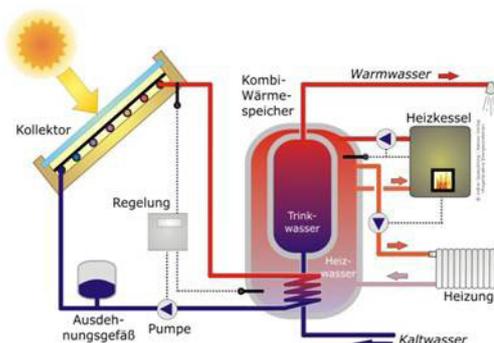
1.4.2.1 Photobioreaktor-Technologie

Die gegenwärtig existierenden Technologien zur Kultivierung von Mikroalgen in geschlossenen Systemen (vgl. 1.1.4) unterscheiden sich sowohl in Bezug auf die Photobioreaktoren (PBR) als auch auf die dazugehörige Prozesstechnik.

Die patentierte PBR-Technologie zur Erschließung der Ressource Mikroalgen (TERM) der SSC GmbH dient dem vorliegenden Forschungsvorhaben als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Fassadensystems aus Photobioreaktoren (21). Die Besonderheit des plattenförmigen PBR der SSC GmbH liegen in einem speziellen Airlift-System. Dabei werden große zusammenhängende Gasblasen von ca. 20 cm Durchmesser in periodischen Luftstößen am Fuß des PBR erzeugt. Die Gasblasen steigen in vertikalen, unten offenen Kanälen im unteren Drittel des PBR nach oben. Nur jeder zweite Kanal wird mit einer Gasblase beaufschlagt. Beim Aufsteigen der Gasblase wird ein

Abbildung 16 Quaschnig – Regenerative Energiesysteme

© Fa. Unimet – Typ Unisol



Aufwärtsstrom erzeugt, der in den nicht beaufschlagten Kanälen einen entgegengerichteten Abwärtsstrom induziert.

Da große Gasblasen schneller aufsteigen als kleine Blasen, können mit diesem speziellen Antrieb hohe Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 2 m/s erzielt werden. Durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten wird eine turbulente Durchmischung des Kulturmediums erreicht.

Wie in Untersuchungen von SSC gezeigt werden konnte, ist eine turbulente Durchmischung des Kulturmediums die Voraussetzung für eine optimale Lichtausnutzung durch die Mikroalgen. Je besser die Lichtausnutzung desto höher die Stoffwechselaktivität und damit auch der Biomasseaufbau (22). Alternative Systeme arbeiten mit kontinuierlichem Lufteintrag, was mit geringeren Strömungsgeschwindigkeiten bei gleicher Luftmenge und damit geringerer Lichtausnutzung und höherem Energieaufwand verbunden ist (23).

Darüber hinaus führen große Gasblasen dazu, dass die Wände der PBR mechanisch belastet werden, wodurch zusammen mit den erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten die Bildung von Biofilmen signifikant verringert wird. Um Biofilme vollständig zu verhindern, werden in den PBR der SSC zusätzlich Schwebekörper eingesetzt, die durch die Turbulenz an die Oberfläche des PBR gestoßen werden und damit kontinuierlich mechanisch reinigen und so einen ungehinderten Lichteintritt garantieren.

Der damit zu erzielende Wärmeertrag liegt mit 38% der eingestrahnten Lichtenergie niedriger als für etablierte solarthermische Module. Allerdings erfolgt die Gewinnung von 35°C Wärme zusätzlich zur Biomasseproduktion. Außerdem ist

eine Wärmeabfuhr bzw. effiziente Wärmeabfuhr aus dem Kulturmedium für eine hohe und stabile Biomasseproduktion unter erhöhten Lichteinstrahlungen im Sommer eine notwendige Voraussetzung.

So würde der Photobioreaktor ohne die Wärmeabfuhr aufheizen und im Kulturmedium sehr schnell eine Temperatur von 40°C erreicht werden, welche für viele Mikroalgen bereits kritisch ist. Aus diesem Grund werden PBR ohne kontrollierte Wärmeabfuhr meist nicht direkt zur Sonneneinstrahlung exponiert (z.B. in Gewächshäusern und in eng nebeneinander stehenden Reihen zur Selbstverschattung) und/oder mit einer Kühlung über ein Besprühen der PBR mit Wasser (Verdunstungskälte) ausgerüstet.

Keine direkte Sonnenexposition bedeutet, dass nur ein geringer Anteil der Globalstrahlung in die PBR und damit an die Mikroalgen gelangt und damit auch nicht für das Wachstum zur Verfügung steht. Da das Wachstum direkt an das zur Verfügung stehende Licht gekoppelt ist, sind indirekt beleuchtete PBR (Streulicht) grundsätzlich wenig effizient. Die energetischen Kennwerte des Prototyps werden in Kapitel 6 und die dafür notwendigen Entwicklungen in der Prozessführung und Steuerung in Kapitel 5 eingehender dargestellt.

In Bezug auf die CO₂ Versorgung wurde im Rahmen einer von der SSC GmbH durchgeführten Studie festgestellt, dass ca. 70% der Energie für den Betrieb einer Algenanlage für die Versorgung der Algen mit CO₂ aufgewendet werden muss (24). Um den Energieaufwand zu senken, entwickelte die SSC in Kooperation mit der AWAS GmbH Dresden ein Saturationsverfahren, mit dem CO₂ aus Rauchgas mit einer Effizienz von 70% ins Kulturmedium eingebracht wird. Dies

ist eine notwendige Voraussetzung, um die in den Reaktoren der SSC realisierten Produktionsraten von bis zu 100 g TS/qm/Tag erreichen zu können. Der Einsatz dieses Saturationssystems wurde bisher sowohl im Labormaßstab als auch an der Pilotanlage eingesetzt.

Dieses System bietet erstmals die Möglichkeit, das Kulturmedium mit CO₂ zu übersättigen und damit das C Angebot im Vergleich zum N Angebot für die Algen temporär zu erhöhen bzw. im Wachstumsverlauf zu variieren. Da Stärke bzw. Ölen vorzugsweise dann gebildet werden, wenn ein Energieüberschuss zusammen mit einer N-Limitierung vorhanden ist, ist zu erwarten, dass über eine CO₂-Übersättigung die Produktion dieser Speicherstoffe angeregt bzw. gesteuert werden kann.

Diese Annahme wird durch Laborversuche im Rahmen von TERM an der Alge *Chlorella vulgaris* unterstützt, die zeigten, dass es bei hohen CO₂-Gehalten im Kulturmedium auch bei moderaten N-Konzentrationen zu einer verstärkten Bildung von Stärke kommt (25).

1.4.2.2 Energiegewinnung

Eine aktuell stark diskutierte und erforschte Verwendungsmöglichkeit für Mikroalgenbiomasse stellt die energetische Nutzung dar. Dafür spricht, dass Mikroalgen CO₂-neutral hergestellt werden können. Die Geschwindigkeit der Einführung von Treibstoffen aus Mikroalgen wurde allerdings überschätzt. Bislang sind die flächenspezifischen Investitionskosten, der Bedarf an Hilfsenergie und der Aufwand für die Aufarbeitung noch zu hoch.

Intensive Forschungsarbeit richtet sich gegenwärtig darauf, die Effizienz der Photobioreaktoren zu erhöhen und die Ausnutzung des Rohstoffs Algenbiomasse durch die Entwicklung von

Mikroalgen-Bioraffinerien zu optimieren. Durch die kombinierte Nutzung von hochwertigeren Produkten und der energetischen Nutzung der Restbiomasse soll so ein wirtschaftlich nachhaltiger Prozess etabliert werden“ (26).

Im Zuge der Treibstoffentwicklung richtet sich die F&E auf die Produktion von Lipiden durch Mikroalgen. Tabelle 2 zeigt, dass Mikroalgenarten Lipide in sehr unterschiedlichen Konzentrationen in der Zellbiomasse anreichern. Dabei ist eine hohe Akkumulation immer mit einer starken Verringerung der Stoffwechsellaktivität verbunden. In eigenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass schnell wachsende Algen mit einem relativ geringeren Lipidgehalt eine höhere Lipidproduktion aufweisen, als langsam wachsende Spezies mit hohem Lipidgehalt, die bisher als aussichtsreiche Kandidaten für eine wirtschaftliche Lipidproduktion für die Treibstoffgewinnung galten (27). Um hohe Biomasse Produktionen zu erzielen gilt grundsätzlich, dass an den Standort angepasste Algen eingesetzt werden. Aus diesem Grund arbeitet die SSC GmbH in ihrer Freilandanlage in Hamburg Reitbrook vornehmlich mit eigenen, aus Gewässern der Umgebung isolierten Grünalgen Stämme der Spezies *Chlorella vulgaris* und *Scenedesmus obliquus*. Um das Artenspektrum zu erweitern, isoliert und testet SSC gegenwärtig auch Blaualgen verschiedener Arten.

Neben der direkten Nutzung der Lipide als Treibstoff kann die Algenbiomasse biologisch durch Fermentation oder physikalisch-chemisch durch eine sogenannte Hydrothermale Konversion in die Energie-träger Methan und Wasserstoff umgewandelt werden. In umfangreichen Forschungsarbeiten hat die SSC GmbH zusammen mit der Technischen Universität Hamburg Harburg die Verfahren für eine effiziente biologische Konversion

entwickelt (37, 38). Dabei konnte gezeigt werden, dass damit die Energie in der Algenbiomasse zu 80% in die Energieträger CH_4/H_2 konvertiert werden kann, was Algen zu einem besseren Substrat für Biogasanlagen als Maissilage macht (Abbildung 17). Gegenwärtig entwickelt die SSC GmbH in Kooperation mit dem Karlsruhe Institut für Technologie in einem von der AIF geförderten Projekt einen Prototyp für eine Hydrothermale Konversion, mit der Algenbiomasse auch in einem Gebäude direkt zu Me-

than konvertiert werden kann. Diese Technologie wird notwendig, da eine biologische Konversion von Biomasse in einer Biogasanlage im urbanen Bereich keine Genehmigung erhalten würde und somit zwar technisch, jedoch nicht von der Akzeptanz her umsetzbar ist. Für die Ernte der Biomasse wurde, basierend auf dem Prinzip der Flotation, zusammen mit der Firma AWAS ein Erntesystem für Mikroalgen entwickelt. Das Erntesystem erlaubt eine kontinuierliche Aberntung der Algen aus dem Kulturmedium um

somit konstante Zelldichten einzustellen. Gleichzeitig ermöglicht es selektiv Zelldebris, Schleime und Bakterien abtrennen zu können. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für eine hohe Produktion und dauerhaft stabile Kultur.

Spezies Mikroalge	Lipid-Gehalt
Scenedesmus obliquus	11-22/35-55
Scenedesmus dimorphus	6-7/16-40
Chlorella vulgaris	14-40/56
Chlorella emersonii	63
Chlorella protothecoides	23/55
Chlorella sorokiana	22
Chlorella minutissima	57
Dunaliella bioculata	8
Dunaliella salina	14-20
Neochloris oleoabundans	35-65
Spirulina maxima	4-9

Tabelle 2 Lipid-Konzentration in der Trockenmasse (TS) verschiedener Spezies © (28 - 36)

Biogas (l/kg org TS)

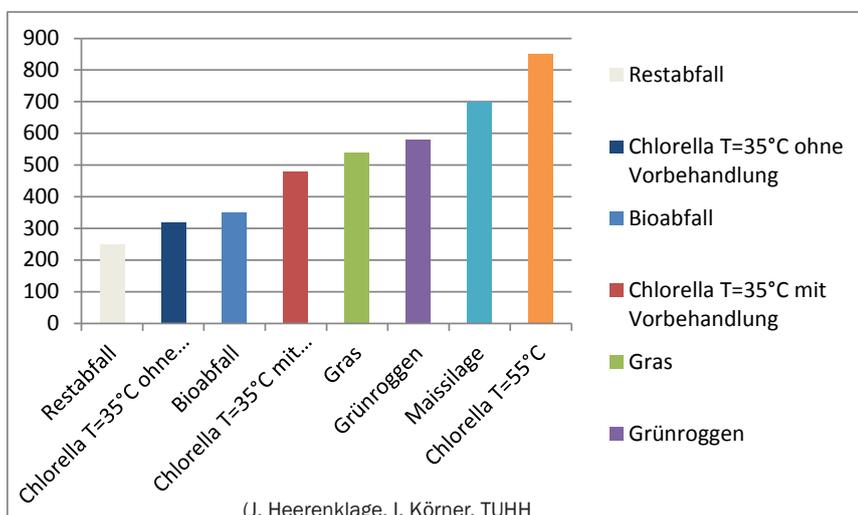


Abbildung 17 Biogaserträge bei der Fermentation der Mikroalge Chlorella spec. im Vergleich mit anderen Substraten. © SSC GmbH

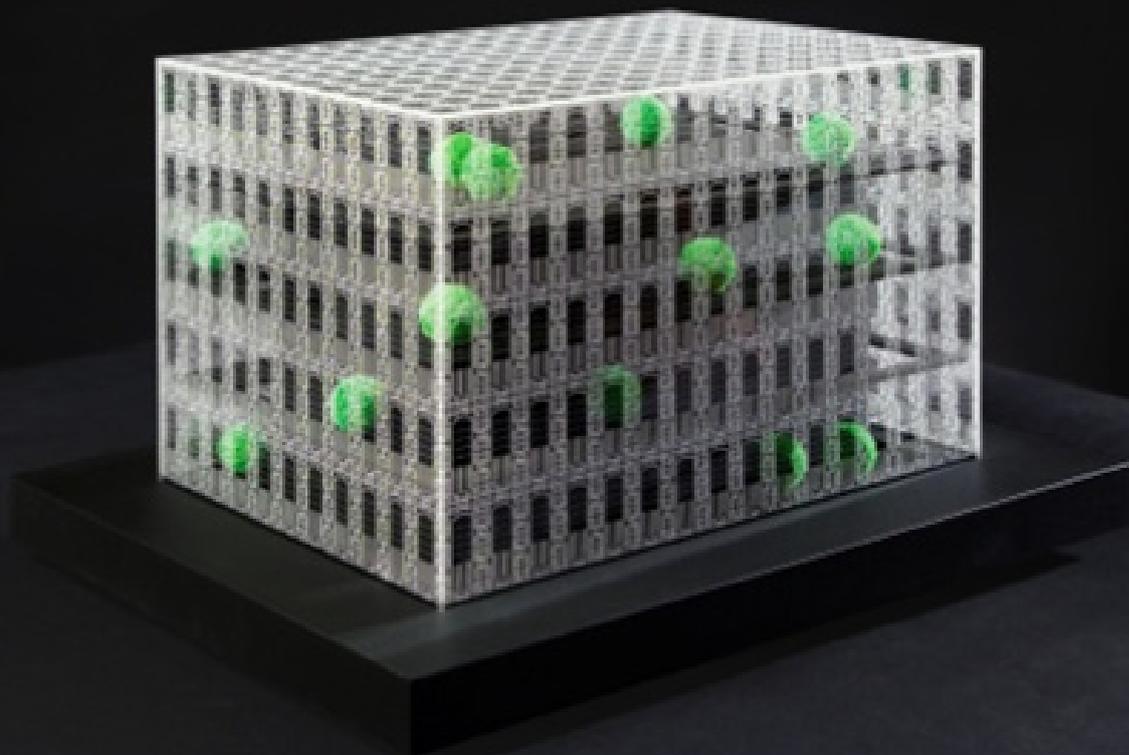


Abbildung 18 „Smart Treefrog“ Beitrag zum
„Smart Material House“-Wettbewerb Internation-
ale Bauausstellung (IBA) 2013
© Splitterwerk Architekten

1.4.3 Interdisziplinäre Planungs- und Entwicklungsleistungen

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es, zwei fachfremde Gewerke mit sehr unterschiedlichen Anforderungen zusammenzubringen. Auf der einen Seite steht die Flachpaneel-Photobioreaktor (PBR)-Technologie für die Kultivierung von Mikroalgen, auf der anderen eine Anwendung am Gebäude inklusive der notwendigen Fassaden- und Haustechnik.

Die erfolgreiche Integration beider Seiten in ein Fassadensystem bedarf interdisziplinärer Planungs- und Entwicklungsleistungen. Arup, als einer der weltweit größten Ingenieursdienstleister, besetzt diese Schnittstelle zwischen den Planungsdisziplinen durch die Vereinigung von verschiedenen Fachabteilungen unter einem Dach und eine darauf ausgerichtete Koordinationsstruktur, sowohl intern als auch mit externen Partnern.

Der Gedanke der urbanen Erzeugung und Nutzung von erneuerbaren Energien ist eng mit dem nachhaltigen Selbstverständnis von Arup und seinen Mitarbeitern verknüpft. In verschiedensten Disziplinen und Regionen finden sich bei Arup Konzepte und Entwicklungen in dieser Richtung. So weist Peter Head, Direktor von Arup und Leiter der Abteilung Planning and Integrated Urbanism in seinen Vortagsreihe Entering the Ecological Age wiederholt auf das Potential der Integration von Bioreaktoren mit Hinsicht auf die Abscheidung und Umwandlung von Kohlenstoff hin (Carbon Capturing) (39). Ricky Tsui, Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung für den Asiatischen Raum ist vom Potential und der Zukunft von Kraftstoffen auf Basis von Biomasse aus Mikroalgen überzeugt (40).

Daneben beschäftigt sich eine ganze Fachdisziplin bei Arup mit Energie und Ressourcen. Unter anderem wird hier die Abwasseraufbereitung mit Hilfe von Mikroorganismen und Mikroalgen untersucht.

1.4.4 Vom Wettbewerb zum Pilotprojekt

Mitte 2009 wurde durch die Internationale Bauausstellung in Hamburg (IBA), die Anfang 2013 eröffnet wird, ein dreistufiger Auswahlprozess für ein „Smart Material House“ ausgelobt. Ein Gebäudekonzept sollte entwickelt werden, bei dem Technologien und Baustoffe so kombiniert werden sollten, dass Material- und Energieströme minimiert werden (41).

Den Wettbewerb in der ersten Phase der Auslobung gewann u.A. der „Smart Treefrog“ Entwurf, den das Grazer Architekturbüro Splitterwerk in Zusammenarbeit mit Bollinger & Grohmann (Tragwerk), Immosolar (Energietechnik), Arup Deutschland (Bauphysik, Materialberatung, Fassade) und SSC entwickelt hatte (Abbildung 18).

Für den prämierten Entwurf „Smart Treefrog“ kam neben intelligenten Tragwerks- und Belüftungskonzepten auch eine übergeordnete Hülle, eine sogenannte „Supernature“ aus Photobioreaktoren (PBR) zum Einsatz welche auf einer Konzeption von Arup beruht. In der Supernature sollte der Energiebedarf des Gebäudes generiert werden. Solare Wärme sollte in wassergefüllten Flachpaneel-PBR eingefangen werden und gleichzeitig Biomasse aus Mikroalgen kultiviert werden. Beide Energieträger sollten für das Gebäude nutzbar

gemacht. Zusätzliche Funktionalitäten wie die Möglichkeit einer dynamischen Verschattung und aktiver Kühl- bzw. Isolationsmechanismen sollten ebenfalls durch die Photobioreaktorhülle realisiert werden. (Abbildung 19).

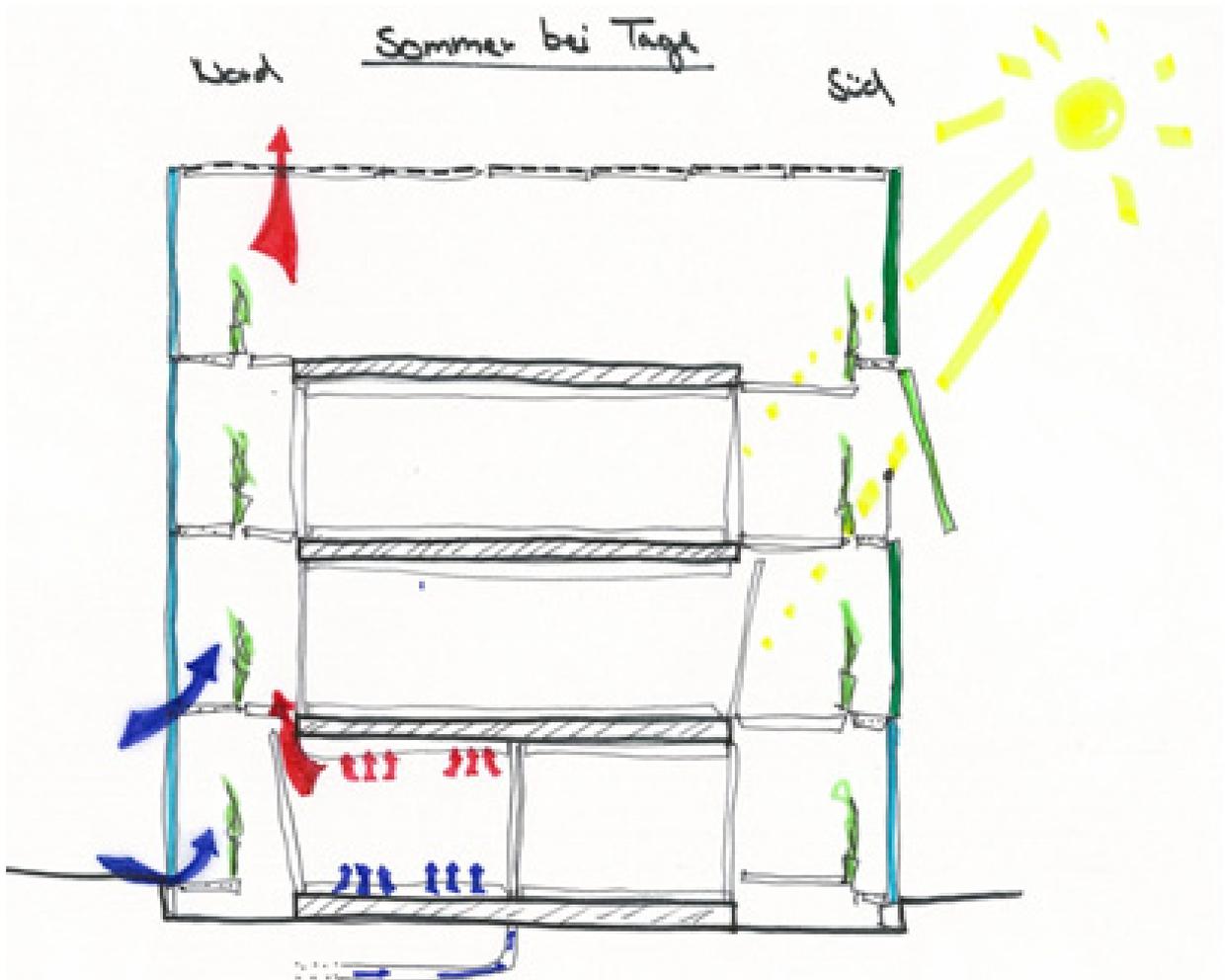


Abbildung 19 Entwurfsskizzen für zusätzliche Funktionalitäten
© Arup Deutschland GmbH

Nach dem gewonnen Wettbewerb wurde der ursprüngliche „Smart Treefrog“-Entwurf in der zweiten und dritten Phase der IBA-Auslobung weiterentwickelt, mit dem Ziel private Investoren zu finden.

Als vielversprechendster Teil des „Smart Treefrog“-Entwurfs wurde die Fassade aus Photobioreaktoren und die Nutzung der gewonnenen Mikroalgenbiomasse und solarer Wärme für das Gebäude als Exzellenz-Gewerk der IBA übernommen.

Allerdings existierte zu diesem Zeitpunkt noch kein funktionstüchtiges System zur gleichzeitigen Kultivierung von Biomasse und der Gewinnung von solarer Wärme. Somit ergab sich die Notwendigkeit ein solches System zu entwickeln, woraufhin

der Antrag für das vorliegende Forschungs-vorhaben bei der Forschungsinitiative ZukunftBau durch ein Entwicklungskonsortium bestehend aus Arup Deutschland, Colt International und SSC gestellt wurde.

Nach erfolgreichem Antrag konnte mit der Entwicklung eines „Hinterlüfteten Fassadensystems aus Photobioreaktoren“ begonnen werden. Als privater Investor konnte daraufhin Otto Wulf Bauunternehmung gewonnen werden

2. GRUNDLAGENERMITTLUNG PLANUNGSVORAUSSETZUNGEN

Die Entwicklung eines Systems zur gebäudeintegrierten Erzeugung und Nutzung von Biomasse aus Mikroalgen und solar-thermischer Wärme beruht auf grundlegenden Voraussetzungen. Neben den Anforderungen, die sich aus der Kultivierung von Mikroalgen und der verwendeten Flachpaneel-Photobioreaktor (PBR)-Technologie ergeben, sind gebäude- und zulassungsrelevante Gesichtspunkte einzubeziehen.

2.1 Vorbemerkungen

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird ein System für eine Sekundärfassade entwickelt, welches neben den notwendigen konstruktiven Verbindungen durch Konsolen keinerlei Wechselwirkungen mit der Primärfassade aufweist. Dadurch bestehen keine Anforderungen für

Wärme-, Witterungs- und Sonnenschutz.

2.2 Anforderungen der Mikroalgen

Aus der Verwendung von Grünalgen zur Gewinnung von Biomasse und Erzeugung von Energie ergeben sich verschiedene Anforderungen. Für die Entwicklung eines Fassadensystems aus Photobioreaktoren ergeben sich die in Tabelle 3 dargestellten Anforderungen.

Tabelle 3 Übersicht der Anforderungen für die Kultivierung von Mikroalgen.

© Arup Deutschland GmbH

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

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 Clustering zur Gewährleistung der Versorgung

Tabelle 4 Anforderungen - Flachpaneel-Photobioreaktor-Technologie
© Arup Deutschland GmbH

2.3 Anforderungen der Photobioreaktor-Technologie

Die unter 1.4.2 beschriebene patentierte Photobioreaktor-Technologie stellt bestimmte konstruktive Anforderungen an das System, um einen effizienten Betrieb zu gewährleisten. Insbesondere bestehen feste Vorgaben für die Geometrie und die AirLift-Technologie zur Umwälzung der Mikroalgen. Die Ausführung der PBR-Einheit im Hochformat gewährleistet eine effektive und effiziente Umwälzung des Kulturmediums im Photobioreaktorraum.

Die einzelnen PBR-Einheiten müssen in einem Kreislaufsystem untereinander und mit der Ernte- und Versorgungszentrale verbunden werden. Aus versorgungstechnischen Gründen werden PBR-Einheiten in Clustern von wenigen Einheiten zusammengefasst und mit dem Kreislaufsystem verbunden. Die PBR-Einheiten innerhalb der Cluster befinden sich in Reihenschaltung. In Tabelle 4 ist eine Übersicht der verschiedenen Anforderungen aus der PBR-Technologie dargestellt.

Tabelle 5 Übersicht Anforderungen
Wohngebäude
© Arup Deutschland GmbH

Anforderungen	Wert
Bauphysik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Regen
Tragwerksplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lastabtrag (Eigengewicht, Wind) ▪ Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegung) ▪ Anforderungen Dauerhaftigkeit ▪ Resttragfähigkeit
Gebäuderaster	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variabel bis 1500 mm
Energiedesign	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung Biomasseertrag / CO₂-Bindung ▪ Optimierung Wärmeeintrag
Haustechnik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Wärmespeicherung ▪ Externe CO₂-Quelle notwendig (Benachbarte Industrie, BHKW, etc.)
Gestaltung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Transluzenz / teilweise Transparenz ▪ Profilierung der Rahmen

2.4 Anforderungen für eine Fassadenanwendung

In diesem Kapitel werden die Anforderungen dargestellt, die sich aus der Anwendung als Fassadensystem an einem Wohngebäude ergeben (siehe auch Tabelle 5). Um eine klare Bemessungsgrundlage zu haben wurde eine deutsche Windlastzone 2 und eine Gebäudehöhe bis 25 m für Auslegung und Nachweis zugrunde gelegt.

Dabei ist zu beachten, dass die Bauart des zu entwickelnden Fassadensystems teilweise nicht durch die gängigen technischen Regeln abgedeckt ist und daher eine Zulassung im Einzelfall (ZiE) notwendig wird.

2.4.1 Verwendete Normen und Richtlinien

Dieser Abschnitt fasst die wesentlichen Normen zusammen, für die Standsi-

cherheitsnachweise der Verglasungen des Photobioreaktors zugrunde gelegt werden (gemäß der Liste der in Hamburg bauaufsichtlich eingeführten Technischen Baubestimmungen im Amtlichen Anzeiger Nr. 47 vom Juni 2012).

Lastannahmen

- DIN EN 1991-1-1 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke
- Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau (Dezember 2010) zusammen mit
- DIN EN 1991-1-1/ NA Nationaler Anhang (Dezember 2010)
- DIN EN 1991-1-4 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke
- Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen, Windlasten (Dezember 2010) zusam-

men mit

- DIN EN 1991-1-4/ NA Nationaler Anhang (Dezember 2010)

Glas und Glaskonstruktionen

- DIN EN 572-1 Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natron-silicatglas – Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften (September 2004)
- DIN EN 572-2 Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natron-silicatglas – Teil 2: Floatglas (September 2004)
- DIN EN 572-9 Glas im Bauwesen – Basiserzeugnisse aus Kalk-Natron-silicatglas – Teil 9: Konformitätsbewertung/Produktnorm (Januar 2005)
- DIN EN 12150-1 Glas im Bauwesen – Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas – Teil 1: Definition und Beschreibung (November 2000)
- DIN EN 12150-2 Glas im Bauwesen – Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheibensicherheitsglas – Teil 2: Konformitätsbewertung/Produktnorm (Januar 2005)
- DIN EN 1279-1 Glas im Bauwesen – Mehrscheiben-Isolierglas – Teil 1: Allgemeines, Maßtoleranzen und Vorschriften für die Systembeschreibung (August 2004)
- DIN EN 1279-5 Glas im Bauwesen – Mehrscheiben-Isolierglas – Teil 5: Konformitätsbewertung (Februar 2009)
- DIN EN 1863-1 Glas im Bauwesen – Teilvorgespanntes Kalknatronglas – Teil 1: Definition und Beschreibung (Februar 2012)
- DIN EN ISO 12543-1 Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas – Teil 1: Definitionen und Beschreibung von Bestandteilen (August 1998)

- DIN EN ISO 12543-2 Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas – Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas (März 2006)
- DIN EN 14449 Glas im Bauwesen – Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas – Konformitätsbewertung / Produktnorm (Juli 2005)
- „Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen (TRLV)“, August 2006

Metallbau

- DIN EN 1999-1-1 Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken
- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln (Mai 2010) zusammen mit
- DIN EN 1999-1-1/ NA Nationaler Anhang (Dezember 2010)
- DIN EN 755-2 Aluminium und Aluminiumlegierungen - Teil 2: Mechanische Eigenschaften (Juni 2008)

2.4.2 Lastannahmen

Das System wird für planmäßige Lasten aus Eigengewicht, Wasserdruck und Klimalast im Scheibenzwischenraum und außerplanmäßige Lasten nachgewiesen.

Die Lastannahmen wurden unter den folgenden Gesichtspunkten beurteilt:

- Lasten aus Eigengewicht
- Wasserdruck
- Windlast
- Klimalasten im Scheibenzwischenraum von Doppelverglasungen

Darüber hinaus sind dynamische Lasten zu erwarten, die aus Vibrationen durch Turbulenzen und einströmender Luft verursacht werden. Die dynamischen

Lasten wurden nicht näher quantifiziert.

Folgende Lasten werden im Rahmen des Forschungsvorhabens ausgeschlossen:

- Anpralllasten
- Stoßbelastungen
- Absturzsicherung

2.4.3 Brandschutz

Die Hauptkomponenten der Konstruktion bestehen aus nichtbrennbaren Werkstoffen entsprechend Baustoffklasse A nach DIN 4102. Daher ist das System brandschutztechnisch für eine Anwendung als Sekundärfassade grundsätzlich für jegliche Gebäudeklasse tauglich.

2.4.4 Schallschutz

Bei motorbetriebenen Sonnen-, Blendenschutz-, Öffnungs- und sonstigen Anlagen ist der zulässige max. Schalldruckpegel gem. DIN 4109/ A1 einzuhalten. Die Antriebe müssen von der Fassadenkonstruktion körperschallentkoppelt befestigt werden, damit eine Schallübertragung wirksam verhindert wird.

3. KONZEPT ENTWICKLUNG

für ein „Hinterlüftetes Fassadensystem aus Photobioreaktoren“

Ziel der Konzeptentwicklung ist es, die Machbarkeit einer Gebäudeintegration der bestehenden Flachpaneel-Photobioreaktor-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.

wicklung werden zunächst übergeordnete Zielvorgaben für ein geeignetes System festgelegt. Danach werden verschiedene Kenngrößen definiert und eine Materialauswahl getroffen. Abschließend wird das Konzept für ein „Hinterlüftetes Fassadensystem aus Photobioreaktoren (PBR)“ vorgestellt.

Die ermittelten Grundlagen bzw. Planungsvoraussetzungen bilden die Voraussetzungen für eine entsprechende Gebäudeanwendung. Für die Konzeptent-

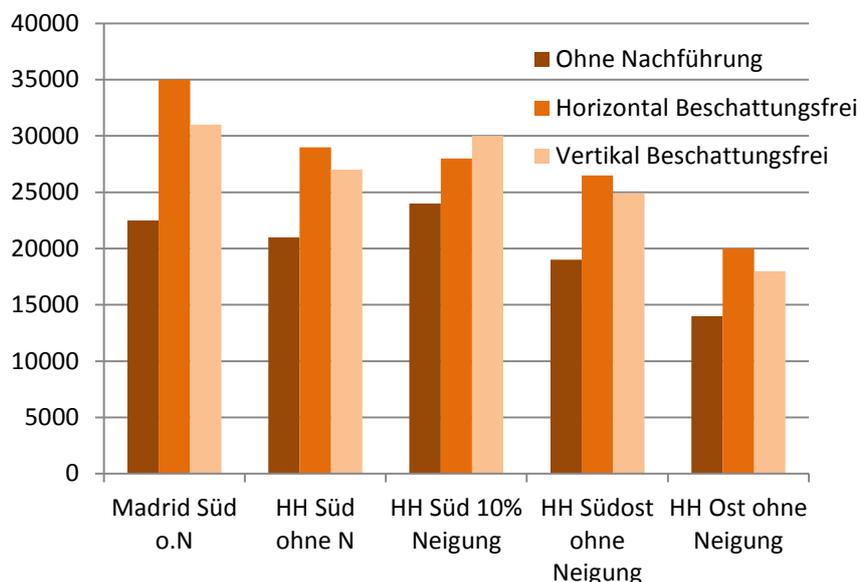


Abbildung 20 Vergleich von Jahres-Einstrahlungssummen für Fassaden unterschiedlicher Süd-Ausrichtung mit und ohne Nachführung in Madrid und Hamburg. Die Nachführung ist so optimiert, dass keine gegenseitige Verschattung auftritt.

3.1 Zielsetzung

Die verschiedenen Zielsetzungen lassen sich in die folgenden Gebiete gliedern:

Ökologisch

- Bindung von CO₂ in Biomasse
- CO₂-neutrale Nutzung der Biomasse
- Ressourcenschonende/Nachhaltige Konstruktion (Materialien, Herstellung, Betrieb, Wartung)
- Vermeidung von Verbundkonstruktion für einfache Rezyklierbarkeit

Energetisch

- Ein optimaler Ertrag aus Biomasse und solarthermischer Wärme wird angestrebt
- Eine effiziente Nutzung der Energieträger Biomasse und solarthermische Wärme
- Maximierung des Licht- und Energieeintrags zur Optimierung des Biomasse- und Wärmeertrags
- Minimierung der Wärmeverluste aus dem System zur Optimierung der Energiebilanz

Ökonomisch

- Wirtschaftlichkeit des Systems
- Herstellung und Bau mit Standard-Technologien
- Möglichst hoher Einsatz von Standardbauteilen
- Hoher Wiederholungsgrad

Architektonisch

- Flexible und breite Anwendbarkeit im Gebäudekontext
- Anwendbarkeit und Akzeptanz der Konstruktion (Berücksichtigung von Normen und Regularien, Akzeptanz beim Architekten/Planer)
- Ausführung als Kaltfassade/Vorgehängter Sonnenschutz

Konstruktiv

- Minimierung des Eigengewichts von Bioreaktoreinheit und Unterkonstruktion zur Optimierung der auftretenden Eigenlasten und zur Vereinfachung von Installation und Wartung
- Sicherheitskonzept möglichst konstruktiv einbinden (safety by design)

3.2 Einflußgrößen

Zusätzlich zu den Grundlagen und Planungsvoraussetzungen wurden verschiedene Kennwerte erarbeitet, die für die Entwicklung eines hinterlüfteten Fassadensystems aus Photobioreaktoren relevant sind.

3.2.1 Standort / Lage

Photobioreaktor-Einheiten können wie Photovoltaik-Module sowohl auf horizontalen Dachflächen als auch an vertikalen Flächen der Gebäudehülle (Fassade) angebracht werden.

Aus folgenden Gründen wird eine Fassadenanwendung bevorzugt:

- Vorteile durch zusätzliche Funktionalitäten wie beispielsweise eine dynamische Verschattung können genutzt werden.
- Einsatz der Photobioreaktoren als architektonisches Gestaltungsmittel für Fassadenflächen.

3.2.2 Orientierung

Auf Grundlage einer Simulation von Strahlungseinträgen für verschiedene Szenarien, die in Abbildung 20 dargestellt sind, konnten die Kennwerte für Orientierung und Nachführung der PBR-Einheiten festgelegt werden. Die Strahlungssimulation zeigt, dass auf Süd-

und Süd-West- bzw. Süd-Ost-Fassaden ausreichende Strahlungsmengen für eine ganzjährige Kultivierung von Mikroalgen erreicht werden.

3.2.3 Nachführung

Die Ergebnisse der unter 3.2.2 beschriebenen Simulation zeigen, dass eine Nachführung der PBR-Einheiten den nutzbaren Anteil der eintreffenden Globalstrahlung erhöht (Abbildung 20). Dabei wird die Vermeidung von gegenseitiger Verschattung der PBR-Einheiten vorausgesetzt.

Die Nachführung um eine zentrale horizontale Achse weist im Jahresmittel einen geringen Vorteil gegenüber einer vertikalen Achse auf. Der konstruktive Aufwand, um eine horizontale Nachführungsachse zu realisieren steht allerdings nicht im Verhältnis zu diesem Vorteil. Daher wird die Nachführung um eine vertikale Achse bevorzugt. Zur Minimierung von exzentrischen Lasten auf die PBR-Einheit wird die vertikale Achse zentral angeordnet.

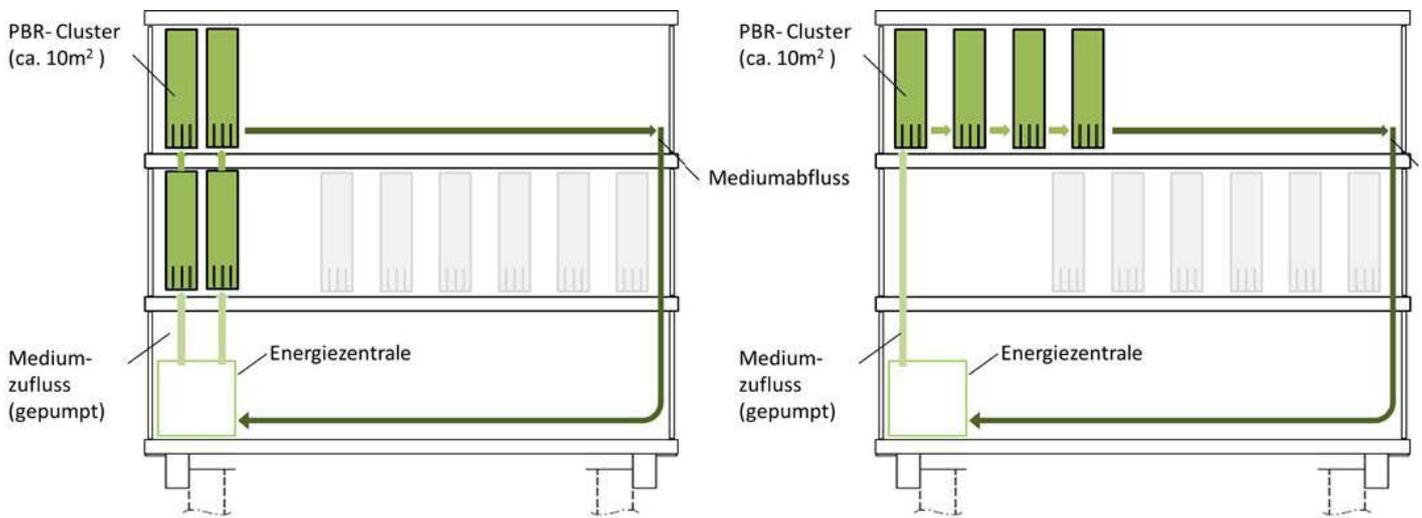


Abbildung 21 Optionen für Paneelanordnung. Links: übereinander; rechts: geschossweise nebeneinander.
© Arup Deutschland GmbH

3.2.4 Paneelanordnung

Wie in Abbildung 21 gezeigt, kann die Anordnung der einzelnen PBR-Einheiten an der Fassade geschossweise horizontal nebeneinander (rechts) oder vertikal übereinander erfolgen (links). Die Belastung in der untersten PBR-Einheit aus einer gebäudehohen Wassersäule würde bei einer vertikalen Anordnung gegenüber einer horizontalen Anordnung sehr hoch werden. Daher wird eine horizontale Anordnung nebeneinander bevorzugt.

3.2.5 Lastabtragendes System

3.2.5.1 Primäre Tragstruktur

Zum Abtrag der auftretenden Lasten wird das Tragwerk des Gebäudes als primäre Tragstruktur angenommen. Entsprechende Schnittstellen und Anschlüsse müssen für den jeweiligen Einsatzfall angepasst werden.

3.2.5.2 Sekundäres Trägersystem - Unterkonstruktion

Als tragende Unterkonstruktion für die Aufhängung der PBR-Paneele sowie der Aufnahme des Nachführungs- und Versorgungssystems kommen prinzipiell sowohl eine Pfosten-Riegel-Konstruktion

als auch ein System zur horizontalen Lastsammlung für einen geschossweisen Abtrag in Betracht.

Ein System zum geschossweisen Lastabtrag wird aufgrund der erhöhten baulichen Anpassungsfähigkeit sowie der einfacheren Aufnahme und Führung des Versorgungssystems bevorzugt.

3.2.5.3 Tertiäres Trägersystem - Rahmen PBR-Einheit

Eine seitliche, eine endständige sowie eine vierseitige Lagerung ist möglich. Zusätzlich sind bspw. Punkt- oder Linienlagerungen in der Fläche denkbar.

Um die Lasten in der PBR-Einheit zu minimieren sowie eine zentrale Nachführungsachse zu ermöglichen, wird eine vierseitige Lagerung bevorzugt.

Grundsätzlich können zum Abtrag der an der PBR-Einheit auftretenden Lasten (Eigenlast, Windlast, Last aus Wasserdruck des Kulturmediums, Verkehrslasten) und der Gewährleistung der Dichtigkeit geklebte oder mechanische Verbindungsmöglichkeiten verwendet werden.

Eine mechanische Halterung und Lastübertragung wird aus verschiedenen Gründen bevorzugt:

- Mechanische Verbindungen sind standardisiert und gut zu erfassen (rechnerisch).
- Mechanische Verbindungen sind in der Regel lösbar und vereinfachen die Reinigung und Wartung.
- Die Dauerhaftigkeit von Klebstoffen unter den Bedingungen in und an der PBR-Einheit ist nicht gesichert (Dauerfeuchte, Befall Mikroorganismen, Wasserdruck). Laut deutschem Baurecht gibt es keine Bemessungsgrundlage. Hieraus ergeben sich Planungsrisiken.

Geklebte Verbindungsmöglichkeiten können zu einem späteren Zeitpunkt eingehender geprüft werden.

3.3 Materialauswahl

Als Werkstoff für die transparente Wandung der PBR-Einheit eignen sich transparente Kunststoffe und Glas. Aus dem Vergleich der beiden Werkstoffe in Tabelle 6 geht hervor, dass Glas deutliche Vorteile gegenüber transparenten Kunststoffen wie PET, PMMA oder PC aufweist. Daher werden die entsprechenden Komponenten für die Anwendung als Fassadenpaneel aus den folgenden Gründen mit veredelten Flachglasprodukten ausgeführt:

- Hohe Dauerhaftigkeit und mechanische Festigkeit bei hoher Durchstrahlbarkeit
- Nicht brennbarer Werkstoff
- Etabliert im Architekturbereich für Fassadenanwendung

Tabelle 6 Werkstoffvergleich
© Arup Deutschland GmbH

Eigenschaft	Glas	Kunststoff
Dauerhaftigkeit	+	-
Festigkeit	+	-
Lichttransmission	++	+
Thermische Isolation	-	+
Korrosionsbeständigkeit	+	0
Eigengewicht	-	++
Bearbeitbarkeit	-	++
Kosten	-	+
Wartungsaufwand	+	+
Brennbarkeit	++	--
Erscheinungsbild	++	-

3.4 Zusammenfassung

3.4.1 Fassadensystem

In Abbildung 22 ist das Gesamtkonzept für das Fassadensystem dargestellt.

1 - Primäre Tragestruktur

- 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)
- Abtrag der auftretenden Lasten (Eigenlast, Windlast) zum primären Trägersystem

- Aufnahme der Sekundärdichteebene zur Reduktion des Leckagerisikos

4 - Nachführung

- Lagerung auf zentral angeordneten Zapfen und vertikaler Lamellenaufnahme
- Holzapfen 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 hydrostatischem Druck des Mediums
- Umlaufender Abstandhalter mit Primärdichtung und erforderlichen Anschlüssen
- Vertikale Stege im unteren Bereich für Umwälzfunktion
- Thermische Isolierung durch Mehrscheibenaufbau

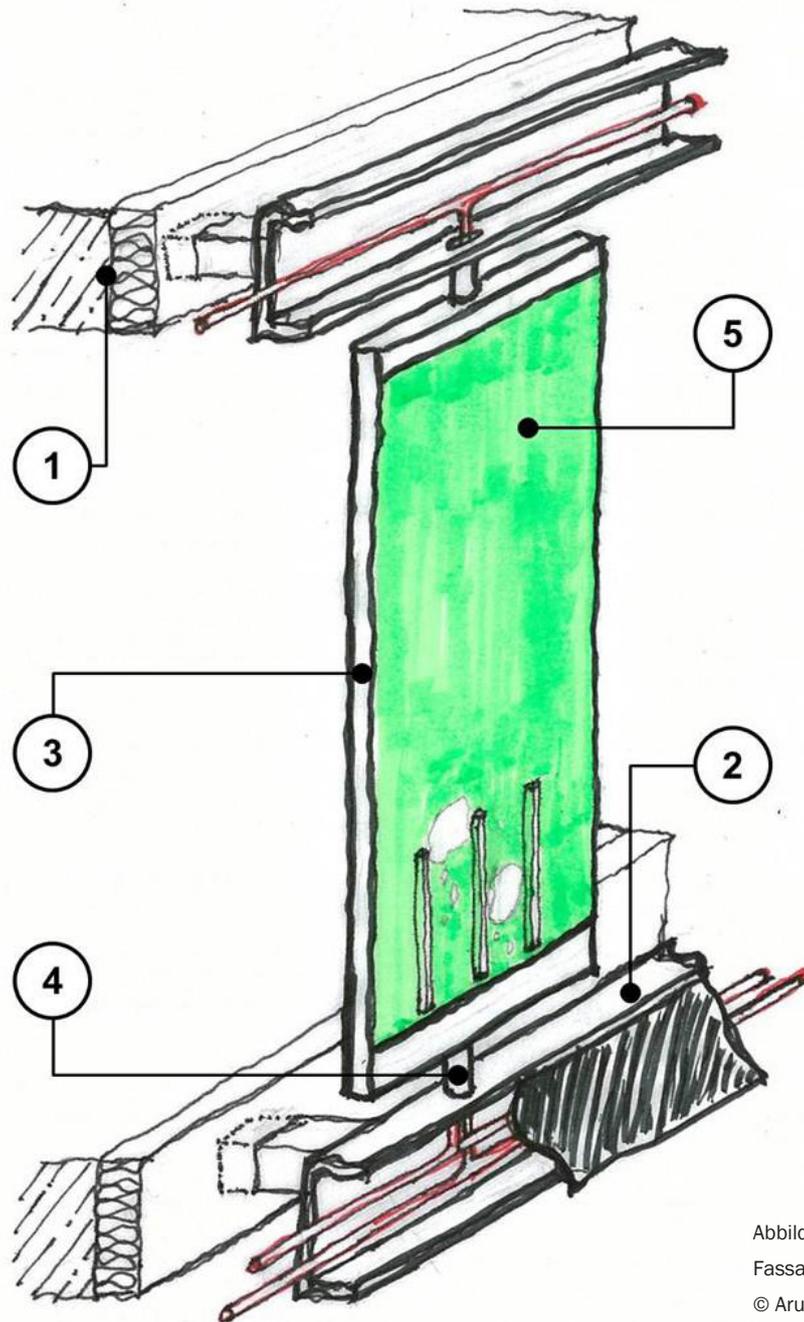


Abbildung 22 Konzeptskizze „Hinterlüftetes PBR-Fassadensystem mit einachsiger Nachführung“
© Arup Deutschland GmbH

3.4.2 Integration Haustechnik

In Abbildung 23 ist schematisch dargestellt, wie ein PBR-Fassadensystem in die Haustechnik eines Wohngebäudes integriert werden kann.

Durch die Algen wird das einfallende Sonnenlicht in die Energieformen Wärme und Algenbiomasse umgewandelt. Um mit einer gegebenen Anzahl von Photobioreaktoren einen möglichst hohen Ertrag zu erzielen, sollte die Fassade idealerweise nach Süden orientiert und möglichst auf allen unverschatteten Fassadenflächen mit PBR bestückt sein.

Biomasse werden die Algen abgeerntet. Die Algen dürfen sich weder ablagern noch zu Klumpen kumulieren, weil sonst einzelne Algen absterben könnten und dadurch die Algenkultur "kippen" könnte. Ein wirksames Mittel dagegen ist der bereits beschriebene Airlift. Das Algenfluid im PBR wird durch periodisches, wechselseitiges Einblasen von Druckluft so durchmischt, dass durch die pulsive Bewegung einzelne Algenketten wieder aufgelöst werden und keine Ablagerung der Algen auftritt.

Eine zentrale Ver- und Entsorgung der Algen ist wirtschaftlicher als eine dezentrale Lösung. Die PBR sind in einem Kreislaufsystem mit der Energiezentrale des Gebäudes verknüpft, in der die Versorgung mit Nährstoffen und Kohlendioxid, das Wärmemanagement, die Druckluftherzeugung und die Ernte der Algen-Biomasse erfolgt.

Um die Anzahl der Druckluftleitungen zu reduzieren, gibt es eine Hauptleitung, aus der über Magnetventile geschaltete, kleinere PBR-Cluster versorgt werden. Für die Magnetventile und Strangreguliertventile sind auch Elektroleitungen erforderlich. Weitere Kabel werden zur Messung von Temperaturen oder Drücken benötigt.

Das Algenfluid wird über Pumpen kontinuierlich im Kreislauf geführt. In der Energiezentrale werden dem Algenfluid Nährstoffe und Kohlendioxid in Form eines Rauchgases zugeführt. Das Rauchgas stammt idealerweise aus einem Blockheizkraftwerk oder einem industriellen Prozess. Klimaschädliches Kohlendioxid kann so in der Biomasse gebunden werden. Die Erzeugung von Kohlendioxid im Gebäude erfolgt beispielsweise über eine Gastherme. Sobald Wärme für

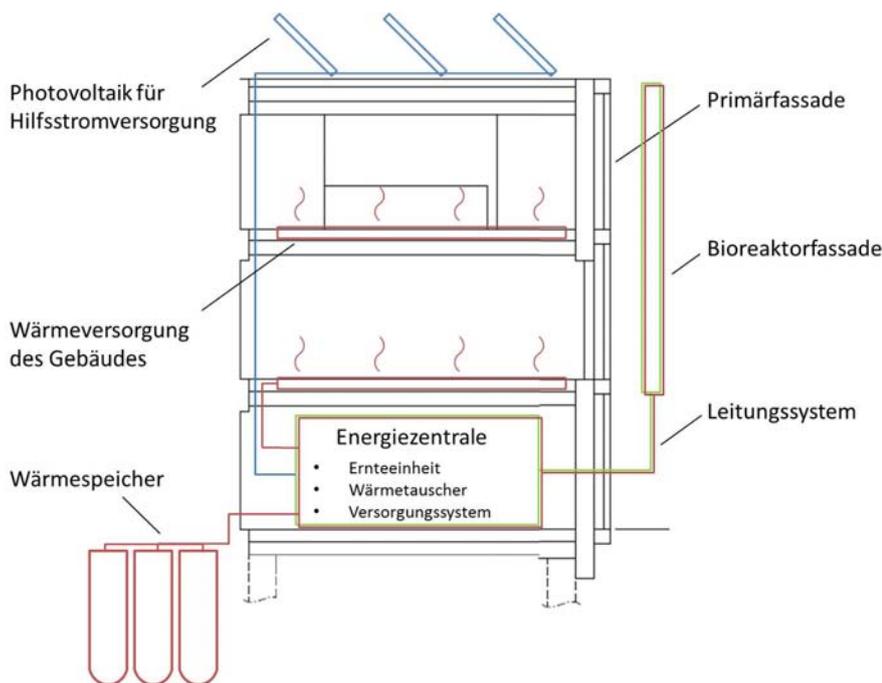


Abbildung 23: Schematische Darstellung der Gesamtsystems inkl. Haustechnik
© Arup Deutschland GmbH

Damit die Algen wachsen, brauchen sie Nährstoffe und Kohlendioxid. Zudem erfordern sie ein bestimmtes Temperaturniveau, weshalb den Algen je nach Außentemperatur oder Solarstrahlungsangebot entweder Wärme zu- oder abgeführt werden muss. Zur Gewinnung der

das Trinkwarmwasser benötigt wird, verbrennt die Gastherme Erdgas und das Rauchgas kann zur Fütterung der Algen genutzt werden. Hierzu wird das Rauchgas in das Algenfluid eingebracht.

Eine geeignete Erntemethode für Mikroalgen stellt die sogenannte Flotation dar. Bei dieser Methode werden überschüssige Algen inklusive abgestorbener Algenzellen kontinuierlich aus dem Kreislaufsystem entnommen und die Algenkultur verjüngt. Die gewonnene Biomasse kann entweder gelagert oder weiter verarbeitet werden. Beispielsweise kann die Algenbiomasse vor Ort oder in einer nahen Biogasanlage zu Biogas umgewandelt werden.

Über einen Wärmeübertrager zwischen dem Algenfluid-Kreislauf und den Heizkreisen des Gebäudes wird der PBR-Fassade Wärme zu- oder abgeführt. Gewinnen die PBR durch solare Strahlung Wärme, kann damit entweder

Trinkwarmwasser vorerwärmt oder Erdwärmesonden beladen werden. Haben die PBR einen Heizwärmebedarf, wird die Wärme so weit wie möglich direkt aus den Erdwärmesonden bereitgestellt bzw. aus der Gastherme.

Neben einer Regelungseinheit befinden sich in der Energiezentrale auch noch die Anschlüsse für Gas, Wasser und Strom sowie die Verteilungen zu Erdwärmesonden. In diese Erdsonden wird überschüssige Wärme aus der Bioreaktorfassade im Sommer gespeichert und im Winter wieder entnommen und direkt über den Wärmeübertrager zur Beheizung der PBR-Fassade oder über eine Wärmepumpe für die Beheizung des Gebäudes genutzt.

Da die Umwälzpumpen für den Algenfluid-Kreislauf vor allem bei Sonnenschein laufen, könnte der Strom dafür aus einer Photovoltaikanlage auf dem Dach kommen.

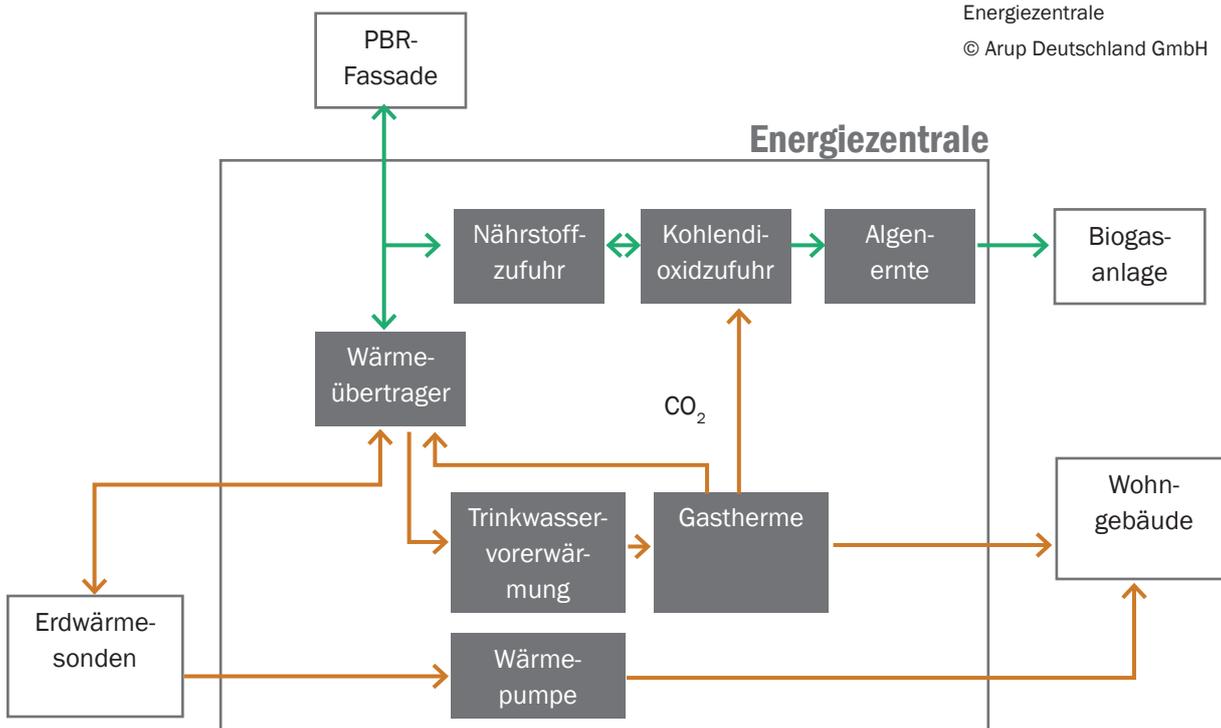


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Energiezentrale

© Arup Deutschland GmbH

4. FASSADENSYSTEM

Basierend auf dem Konzept für ein Fassadensystem aus Photobioreaktoren wurden verschiedene Prototypen entwickelt, geplant und gebaut. Intensive Leistungs- und Belastungstests wurden an den verschiedenen Prototypengenerationen durchgeführt und Optimierungen hin zu einem funktionalen Gesamtsystem unternommen. In diesem Kapitel werden die einzelnen Komponenten des entwickelten Fassadensystems vorgestellt und die Funktionsweise erläutert.

4.1 Systembeschreibung

Das entwickelte System zur Integration von Photobioreaktoren (PBR) in eine Sekundärfassade zur Kultivierung von Biomasse aus Mikroalgen und Gewinnung von solarer Wärme ist aus verschiedenen Untereinheiten und einer Vielzahl von Einzelkomponenten aufgebaut (Abbildung 25).

Die funktionalen Baugruppen lassen sich wie folgt beschreiben:

- **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 (PBR ohne Klemmrahmen)
- **1b** - vierseitiger Klemmrahmen
- **1c** - Auflager PBR bzw. Lastabtrag in die Unterkonstruktion
- **1d** - Anschlussmimik, Verschaltung und Durchführung Versorgungsleitungen

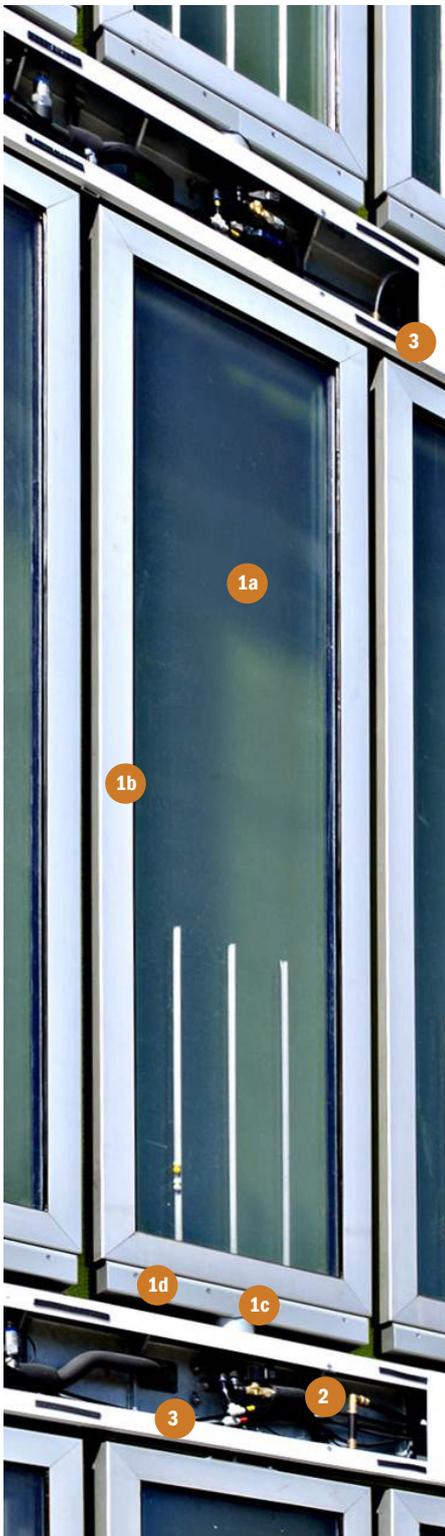


Abbildung 25 zeigt den finalen Prototypen im Betrieb am BIQ-Gebäude in Hamburg - Wilhelmsburg
© Arup Deutschland GmbH

4.2 Baugruppen

4.2.1 Photobioreaktor-Paneel

4.2.1.1 Photobioreaktor

Die Einheit in der die Kultivierung von Mikroalgen-Biomasse und die Aufnahme von solarer Wärme erfolgt ist der Photobioreaktor (PBR). Der PBR stellt die eigentliche funktionale Einheit des Systems dar und weist daher eine erhöhte Komplexität auf. Der PBR setzt sich aus folgenden Hauptkomponenten zusammen:

- Transparente PBR-Wandung auf Vorder- und Rückseite
- Umlaufender Abstandhalter für die PBR-Wandungen mit integrierter Primärdichtung
- Ventile und Anschlüsse für Zu- und Ablauf Medium
- Ventile und Anschlüsse für Einleitung Druckluft
- Stege zur Trennung der vertikalen AirLift-Kanäle
- Sensorik
- Scrabber

Transparente PBR-Wandung

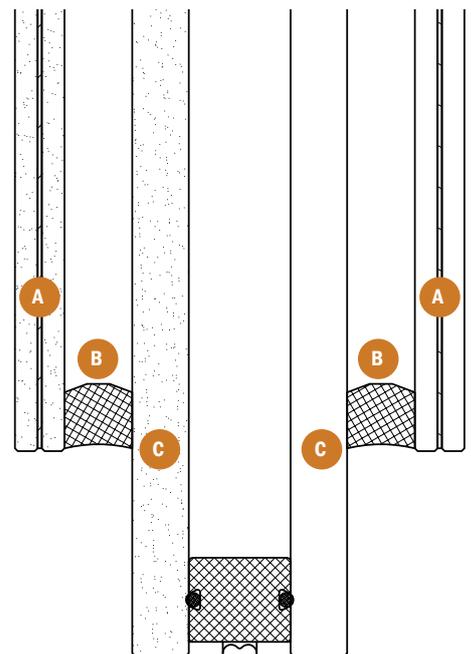
Die transparente Vorder- und Rückseite der PBR-Einheit lässt den Eintrag von solarer Energie in Form von Sonnenlicht in den Reaktorraum zu und ermöglicht so die Kultivierung von Mikroalgen und die Aufnahme von solarer Wärme im wässrigen Medium. Gleichzeitig muss durch die Wandung ein Verlust von Energie in die Umwelt verhindert werden und der Schutz der Umgebung vor Medium und Glassplittern, die bei einem Versagen austreten

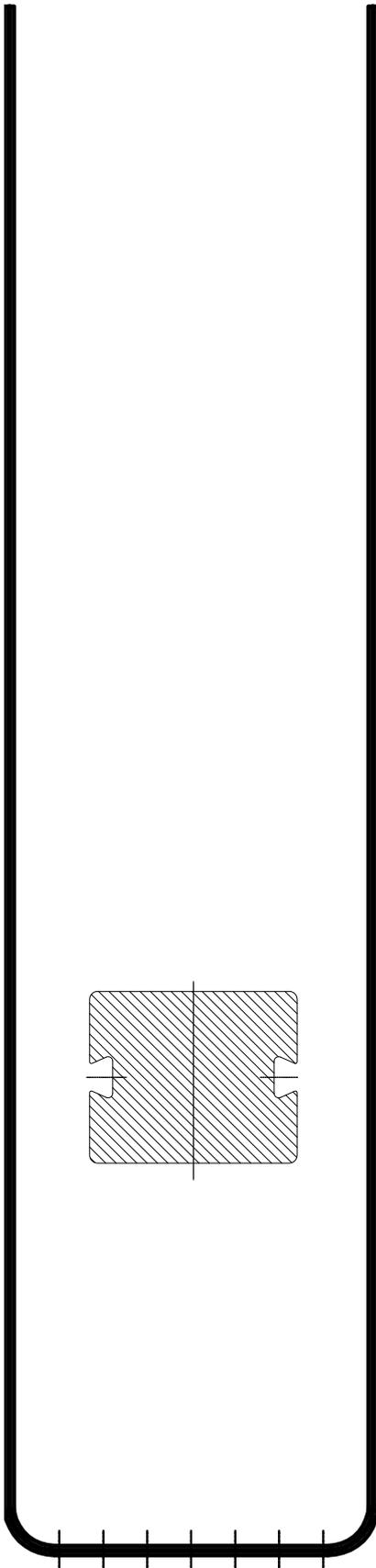
können gewährleistet sein. Um die oben genannten Aufgaben zu erfüllen werden zwei speziell veredelte Stufenisoliertgläser verwendet.

Der Aufbau gestaltet sich von außen nach innen wie in Abbildung 26 gezeigt:

- **A** - Verbundsicherheitsglas (VSG) zum Abfangen von etwaigen Glassplittern und Medium von Innen und Schutz der tragenden Scheibe von Außeneinwirkungen.
- **B** - Randverbund mit Argon-gefülltem Scheibenzwischenraum
- **C** - Einscheibensicherheitsglas (ESG) als tragende Scheibe, die den statischen Wasserdruck aufnimmt.

Abbildung 26 Schnitt durch den Photobioreaktor
© Colt International GmbH





Um den Energieeintrag zu optimieren und Abstrahlverluste zu minimieren wurden die folgenden Maßnahmen umgesetzt:

- Auf der sonnenzugewandten Vorderseite sind alle Gläser aus speziellem eisenoxidarmen Glas ausgeführt.
- Für die äußerste Scheibe der Vorderseite im VSG wird eine spezielle mikrostrukturierte Scheibe aus der Photovoltaik- Anlagentechnik eingesetzt.
- Im Scheibenzwischenraum wird eine lowE-Beschichtung (low emissivity – niedrige Emissivität/Abstrahlung) verwendet.

Umlaufender Abstandhalter

Die transparenten PBR-Wandungen auf Vorder- und Rückseite werden durch einen umlaufenden Abstandhalter auf Distanz gehalten, wodurch der eigentliche Reaktorraum aufgespannt wird.

Im, mit wässrigem Kulturmedium gefüllten Reaktorraum erfolgen die Kultivierung der Mikroalgen und die Aufnahme von solarer Wärme. Der umlaufende Abstandhalter begrenzt den Reaktorraum auf allen vier Seiten. Aufgrund von günstigen thermischen Ausdehnungen sowie der guten Bearbeitbarkeit wurde eine Aluminium-Knetlegierung für den Abstandhalter verwendet, die nach dem

Abbildung 28 zeigt eine speziell angefertigte Verlängerungshülse für die Durchführung der Anschlüsse am unteren vertikalen Teil des Abstandhalters

© Colt International GmbH

Abbildung 27 zeigt den Aluminium-Abstandhalter in der Ansicht und im Schnitt

© Colt International GmbH

Umformen Anodisiert wurde.

Der Abstandhalter stellt aufgrund seiner Position ein kritisches Bauteil dar durch das mehrere Funktionen des Photobioreaktors gewährleistet werden müssen. Alle Anschlüsse und Dichtungen müssen in den Abstandhalter integriert werden, da hierfür die Randposition zwischen den transparenten Wandungen günstig ist und der Werkstoff gegenüber Glas das Einbringen von Bohrungen und Nuten zulässt.

- Für jegliche Anschlüsse (Medien Zu- und Abflüsse, Druckluftversorgung) sind im unteren horizontalen Teil des Abstandhalters Gewindebohrungen eingebracht, in die entsprechende Ventile und Anschlussstutzen eingeschraubt werden können.
- An der Schnittstelle zwischen Abstandhalter und den transparenten Wandungen muss die primäre Dichtigkeit des Reaktorraums gewährleistet werden. Hierfür sind auf Vorder- und Rückseite des Abstandhalters O-Ring Dichtungen in entsprechenden Nuten integriert.





Abbildung 29 zeigt ein handelsübliches Rückschlagventil, das einen Rückfluss des Mediums in die Druckluftleitungen verhindert

© Colt International GmbH

- Im Reaktorraum entstehen beim Wachsen der Mikroalgen und durch das Einblasen von Druckluft für den AirLift-Antrieb Gase, die nicht dort verbleiben können, da sonst ein gefährlicher Überdruck entsteht. Zu diesem Zweck befinden sich im oberen horizontalen Teil des Abstandhalters vertikale Öffnungen mit ausreichendem Querschnitt zur kontinuierlichen Entgasung des Reaktorraums.
- Zur Verhinderung eines Überlaufens durch die Entgasungsöffnungen und die Nachverfolgung des Füllstandes im Reaktorraum ist im oberen horizontalen Teil des Abstandhalters eine entsprechende Sensorik untergebracht.

Anschlüsse

Alle Anschlüsse für Medien und Druckluft mittels handelsüblichen Anschlussstutzen und Ventilen (Abbildungen 28 und 29) befinden sich am Fuß des PBR und werden mediendicht in den Abstandhalter geschraubt. Die Anordnung wird von der optimalen Einleitung des Kulturmediums sowie der gezielten Einleitung der Druckluft mittig unter den AirLift-Kanälen bestimmt.

Einer Verstopfung insbesondere des Medien-Abflusses wird durch einen redundanten Anschluss entgegengewirkt. Um durch den Klemmrahmen zur Anschlussmimik im Auflager zu gelangen werden speziell gefertigte Verlängerungshülsen (Abbildung 28) verwendet.

Stege für AirLift-Kanäle

Die vertikalen Stege zur Abtrennung der AirLift-Kanäle

Sensorik
Integriert in den oberen horizontalen Teil des Abstandhalters befindet sich eine speziell entwickelte Sensorik zur kontinuierlichen Kontrolle des Füllstandes (Abbildung 30).

Falls die Sensorik ein Ansteigen des Füllstandes über ein kritisches Niveau registriert, beispielsweise durch Verstopfen der Abläufe, kann für jede PBR-Einheit einzeln und autonom (ohne zentrale Steuerung) der Zulauf gestoppt werden und ein Überlaufen wird verhindert.



Abbildung 30 zeigt die AirLift Antriebseinheit am unteren Ende des PBR. Aluminium L-Profile als vertikale Stege zur Kanaltrennung auf der hinteren PBR-Wandung.

© Colt International GmbH

Abbildung 31 zeigt den Füllstandssensor integriert in den oberen horizontalen Abstandhalter vor dem Einbau in den Photobioreaktor.

© SSC GmbH



Sensorik

Integriert in den oberen horizontalen Teil des Abstandhalters befindet sich eine speziell entwickelte Sensorik zur kontinuierlichen Kontrolle des Füllstandes (Abbildung 31). Falls die Sensorik ein Ansteigen des Füllstandes über ein kritisches Niveau registriert, beispielsweise durch Verstopfen der Abläufe, kann für jede PBR-Einheit einzeln und autonom (ohne zentrale Steuerung) der Zulauf gestoppt werden und ein Überlaufen wird verhindert.

Die Schwebekörper werden von den turbulenten Strömungen ständig durch den Reaktorraum gewirbelt und schaben kontinuierlich über die PBR-Wandungen ohne diese zu verletzen. Damit stellen die Scrabber eine weitere Maßnahme zur kontinuierlichen und autonomen Reinigung der transparenten Flächen dar, um diese von Anhaftungen frei zu halten und den optimalen Betrieb zu gewährleisten.



Abbildung 32 zeigt einen speziell entworfenen Scrabber aus 3D-gedrucktem Kunststoff.

© Colt International GmbH

Scrabber

Im PBR-Raum befinden sich frei bewegliche Schwebekörper die durch die turbulente Durchströmung ständig in Bewegung gehalten werden. Die sogenannten Scrabber sind mittels 3D-Druckverfahren aus weichem Kunststoff gefertigt und weisen optimierte Kanten und Flächen auf der Oberfläche auf (Abbildung 32).

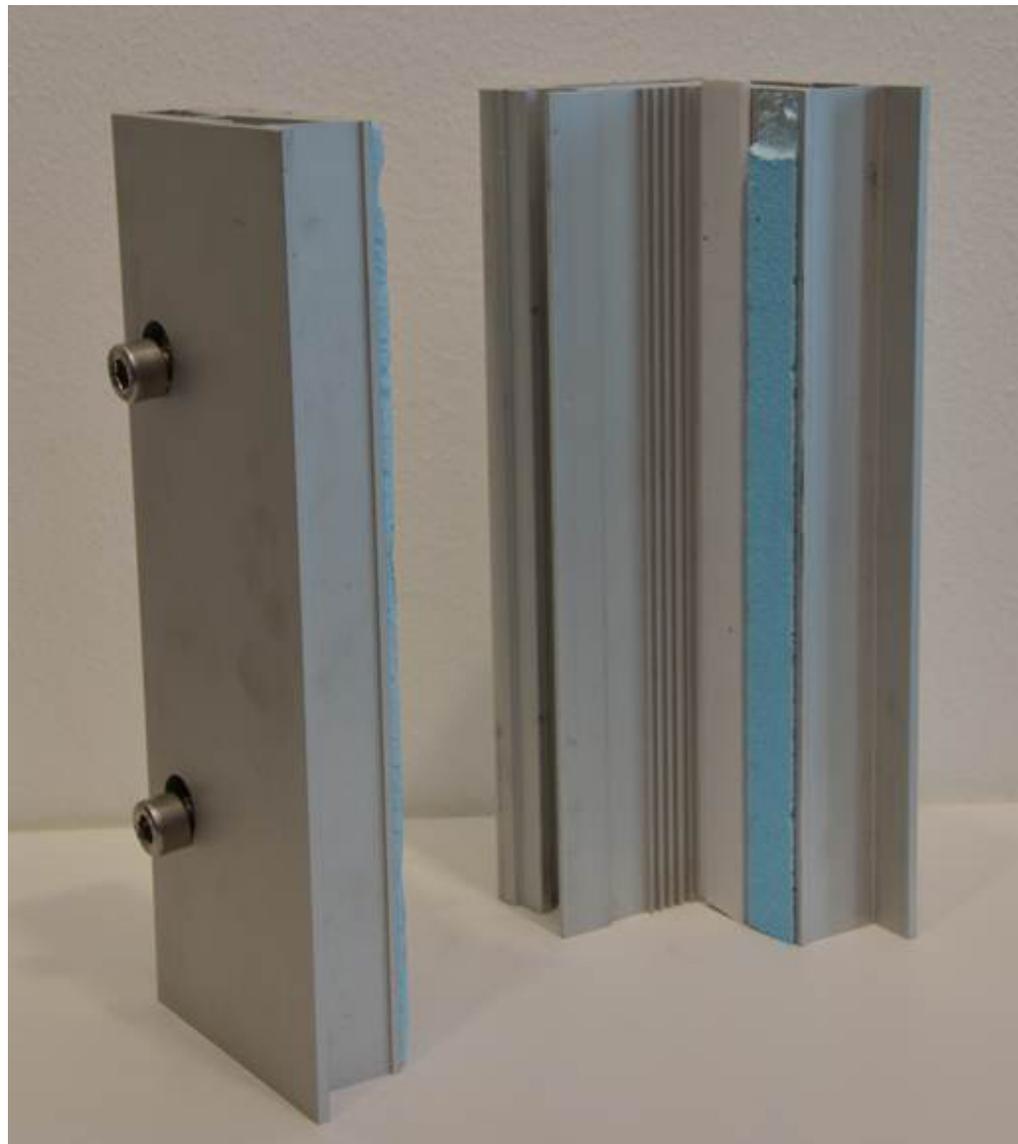
4.2.1.2 Vierseitiger Rahmen

Der Lösungsansatz eines vierseitigen, mechanisch zusammen gefügten Klemmrahmens wird aufgrund des komplexen Anforderungsprofils und der geringen Erfahrungswerte mit anderen Verbindungsmöglichkeiten wie beispielweise Verklebungen verfolgt.

Durch die Rahmenkonstruktion am PBR werden neben dem Abtrag der auftretenden Lasten (Eigenlast, Windlast, Verkehrslasten, Last aus Wassersäule) der Zusammenhalt der PBR-Komponenten und insbesondere die Dichtigkeit des Reaktorraums gewährleistet. Zusätzlich wird der Energieverlust durch die Randbereiche des Photobioreaktors mit geeigneten Maßnahmen minimiert werden.

Die tragenden Rahmen-Komponenten bestehen aus anodisierten Aluminium-Extrusionsprofilen, die speziell für das Projekt entworfen und hergestellt werden (Abbildung 33).

Der vordere Teil des Rahmens setzt sich aus vier Teilen zusammen, die an den Ecken schubsteif durch einen speziellen Eckverbinder mittels Verschrauben verbunden werden (Abbildung 34). Der vierseitige Rahmenteil bildet die spätere sichtbare Vorderseite des PBR. Die Rahmenprofile des vorderen Rahmenteils sind so bemessen, dass alle Lasten außer dem statischen Druck der Wassersäule durch diesen Teil abgetragen werden.



Die einzelnen Komponenten des Photobioreaktors (Wandungen, Abstandhalter, Dichtung, etc.) werden durch eine Klemmkraft zusammengehalten, die gleichzeitig die Last der Wassersäule aufnimmt und die Dichtigkeit des Reaktorraums gewährleistet. Die Klemmkraft wird durch vier frei bewegliche Klemmbacken erzeugt, die auf jeder Seite des vorderen Rahmenteils mit diesem verschraubt werden.

Abbildung 33 zeigt ein Teilstück des PBR-Klemmrahmens: Klemmbacke mit Bolzen (links) und vorderer Rahmenteil (rechts)
© Arup Deutschland GmbH



Abbildung 34 zeigt den vorderen Rahmenteil: Schubsteife Ecke mit Verschraubung zum Eckverbinder

© Colt International GmbH

Die Verschraubung des vorderen Rahmenteils und der Klemmbacken liegt zwischen der Lagerung der Glaswandungen und einem Wiederlager. Dadurch kann die Klemmkraft mittels Einstellung des Anzugsdrehmoments der Verschraubung sehr definiert aufgebracht werden. Die Positionen und die Anordnung der Verschraubung sind dem Anstieg des Wasserdrucks zum unteren Ende des Photobioreaktors angepasst.

Die seitliche Einspannung der Glaswandungen durch den Rahmen und die Klemmbacken stellt durch ihre komplexen Anforderungen eine kritische Stelle dar. Die Lagerung der Glaskomponenten für die Einleitung der Klemmkraft muss sowohl einen Winkelversatz aufnehmen, als auch Glas und Rahmenmaterial thermisch trennen.

Der statische Wasserdruck des Mediums im PBR bewirkt eine ständige Verformung der Glaswandungen nach außen. Hierdurch entsteht ein Winkelversatz an der Einspannung. Um die Spannungen

im Glas möglichst gering zu halten und gleichzeitig eine thermische Trennung zu realisieren, wird eine speziell entworfene „weiche“ Lagerung aus zwei Komponenten verwendet, die den Winkelversatz zulässt und eine sehr geringe Wärmeleitung aufweist.

Die spezielle Glaslagerung wurde in verschiedenen Simulationen sowohl für die Kraftübertragung und den Winkelversatz als auch für die thermische Trennung der Komponenten optimiert. Dadurch werden die Gebrauchstauglichkeit und die Robustheit der Konstruktion gewährleistet.

Eine umlaufende mechanische Sicherung der außen liegenden VSG-Scheiben auf Vorder- und Rückseite des Photobioreaktors ist direkt in die Rahmenprofile integriert. Die Bemessung der mechanischen Sicherung sieht die kurzzeitige Aufnahme des Wasserdrucks durch die VSG-Scheibe vor, die nach einem möglichen Bruch der tragenden Glaswandung auftreten kann.

Im Verlauf der Produktentwicklung wurden kontrollierte Bauteilversuche zu Tragfähigkeit der PBR-Wandung und des vierseitigen Rahmens unternommen. Im Zuge der Anwendung am Pilotprojekt BIQ wurde eine ordentliche Zulassung im Einzelfall (ZiE) inklusive einer Prüfstatik erwirkt.

Der Energieverlust aus dem Reaktorraum durch konduktive Wärmeübertragung wird mittels der thermischen Trennung von Glaswandung und Klemmrahmen an der Einspannung deutlich reduziert. Abgesehen von der Einspannungsstelle ergeben sich verschiedene Flächen im Rahmenbereich, die über konduktiven Wärmeübertrag, Strahlungsübertrag oder Konvektionsübertrag Energie aus dem Reaktorraum an die Umgebung verlieren können. Diese Flächen sind durch nicht lasttragende Isolierungen abgedeckt.

Im unteren horizontalen Teil des Rahmens sind Bohrungen eingebracht, die eine Durchführung von Anschlüssen bis zum Abstandhalter erlauben. Im oberen horizontalen Teil des Rahmens sind horizontale Öffnungen unsichtbar nach hinten eingebracht, die eine Entgasung des Photobioreaktors in die Umgebung ermöglichen.



Abbildung 36 zeigt die Anschlussmimik und Durchführung durch den mittigen Hohlzapfen an der Unterseite des PBR im Auflager
© SSC GmbH

4.2.1.3 Auflager Photobioreaktor und Anschlussmimik

Auflager PBR

Die Drehbarkeit des Photobioreaktors wird durch eine zentrale Achse realisiert. Die zentrale Drehachse macht eine mittige Zusammenführung aller Anschlüsse am unteren Ende des PBR und einen Lastabtrag in die Drehachse notwendig. Hierfür wurde ein spezielles Auflager für den Photobioreaktor entwickelt (Abbildung 35).

Die Auflagerkonstruktion verfügt über einen horizontalen Träger, der mit dem unteren horizontalen Rahmenteil fest verbunden wird. Der Träger führt die auftretenden Lasten in einen zentral angeschweißten Hohlzapfen, der auf einer drehbaren Lagerung steht und die Lasten in die Unterkonstruktion abträgt. Analog zum unteren Auflager, ist am oberen horizontalen Teil des PBR-Rahmens mittig ein Zapfen angebracht, der drehbar in der Unterkonstruktion gelagert ist. Da hier lediglich ein Teil der auftretenden Windlasten abgetragen wird und

Abbildung 35 zeigt das untere Auflager für den PBR: Probemontage auf Unterkonstruktion, leicht ausgestellt.

© SSC GmbH

keine Anschlüsse durchgeführt werden müssen, ist der Zapfen massiv und ohne spezielles Auflager ausgeführt. Durch eine axiale Verschiebbarkeit des Zapfens in seinem Lager werden auftretende Bauteiltoleranzen sowie thermische Längenänderungen aufgenommen.

Anschlussmimik und Durchführung Versorgungsleitungen

Neben dem Lastabtrag schafft der horizontale Träger des Auflagers den nötigen

Bauraum, um unterhalb des Photobioreaktors die erforderliche Anschlussmimik für den Photobioreaktor unterzubringen. Die Anschlussmimik fasst alle Anschlüsse die unten aus dem Photobioreaktor ragen mittig zusammen, isoliert diese thermisch und akustisch und führt die Verschlauchung unsichtbar durch den Hohlzapfen nach unten zur Schnittstelle in der Unterkonstruktion (Abbildung 36).

Durch den Zusammenbau von Photobioreaktor und Rahmen sowie die Verschlauchung und Verschaltung der einzelnen Anschlüsse in der Anschlussmimik und die feste Verbindung mit den Auflagern ergibt sich das Bauteil „PBR-Panel“. Der komplette Zusammenbau des PBR-Panels erfolgt werksseitig. So kann das PBR-Panel vor Ort in die Unterkonstruktion eingehoben werden und per „Plug and Play“ mittels vordefinierter Übergabepunkte an die Haustechnik des Kreislaufsystems angeschlossen werden.





Abbildung 38 zeigt die abnehmbare Blechverkleidung der Unterkonstruktion: links geschlossen, rechts geöffnet mit sichtbaren Versorgungsleitungen

© SSC GmbH

4.2.2 Unterkonstruktion mit Versorgungsleitungen

Die Unterkonstruktion, welche losgelöst vom eigentlichen Photobioreaktor (PBR)-Panel, die Anbindung der Bioreaktorfassade an das jeweilige Bauwerk realisiert, soll folgende Aufgaben erfüllen:

- Aufnahme der PBR-Paneele
- Einleitung aller einwirkenden Kräfte in das primäre Tragwerk des Gebäudes
- Thermische Trennung zwischen Gebäude und Unterkonstruktion
- Aufnahme der Installation/Verrohrung zur Medienversorgung der Reaktoren
- Nachführung der PBR-Paneele um eine zentrale Achse

Die Unterkonstruktion besteht im Wesentlichen aus einem horizontalen Lastsammler auf den die PBR-Paneele aufgestellt werden und Konsolen zur Anbindung und Lastabtrag an die primäre Tragstruktur des Gebäudes (Abbildung 37).

Der horizontale Lastsammler wird durch ein lokal verstärktes C-Profil aus Stahl realisiert. Der C-Träger wird geschossweise in einem definierten Abstand und nach vorne offen an der Gebäudefassade mit Hilfe von Stahlkonsolen befestigt.

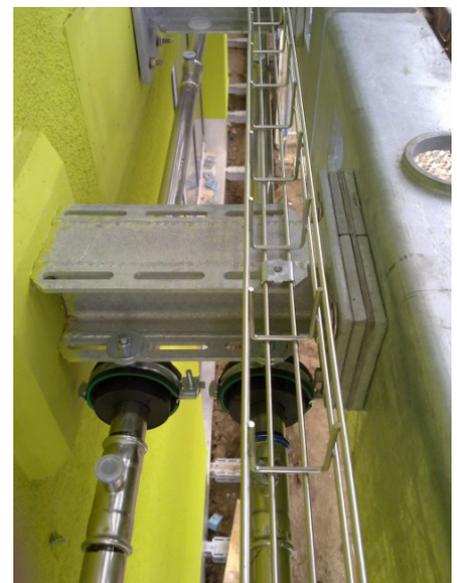
Die Versorgungs- und Elektronikleitungen für die PBR-Paneele werden thermisch und akustisch isoliert im C-Träger und dahinter geführt. An geeigneten Stellen sind verschiedene Durchbrüche nach oben, unten und hinten zur Hauswand angebracht, um die PBR-Paneele mit den Versorgungs- und Elektronikleitungen zu verbinden.

Die Aufnahme der Versorgungsleitungen erfolgt geschossweise in der Unterkonstruktion unterhalb der PBR-Paneele. An der Traufe des letzten Geschosses welches mit PBR-Paneelen bestückt ist, sind damit keine Versorgungsleitungen notwendig.

Abbildung 37 zeigt die Unterkonstruktion mit Versorgungsleitungen und Anschluss an die primäre Tragstruktur des Gebäudes

© SSC GmbH

Sowohl das obere, als auch das untere Auflager für die PBR-Paneele sind in den Lastsammler integriert. Zum Schlagregenschutz und zur ästhetischen Verblendung der Leitungsführung innerhalb der Unterkonstruktion werden die C-Träger mit revisionierbaren Blechen verkleidet (Abbildung 38).



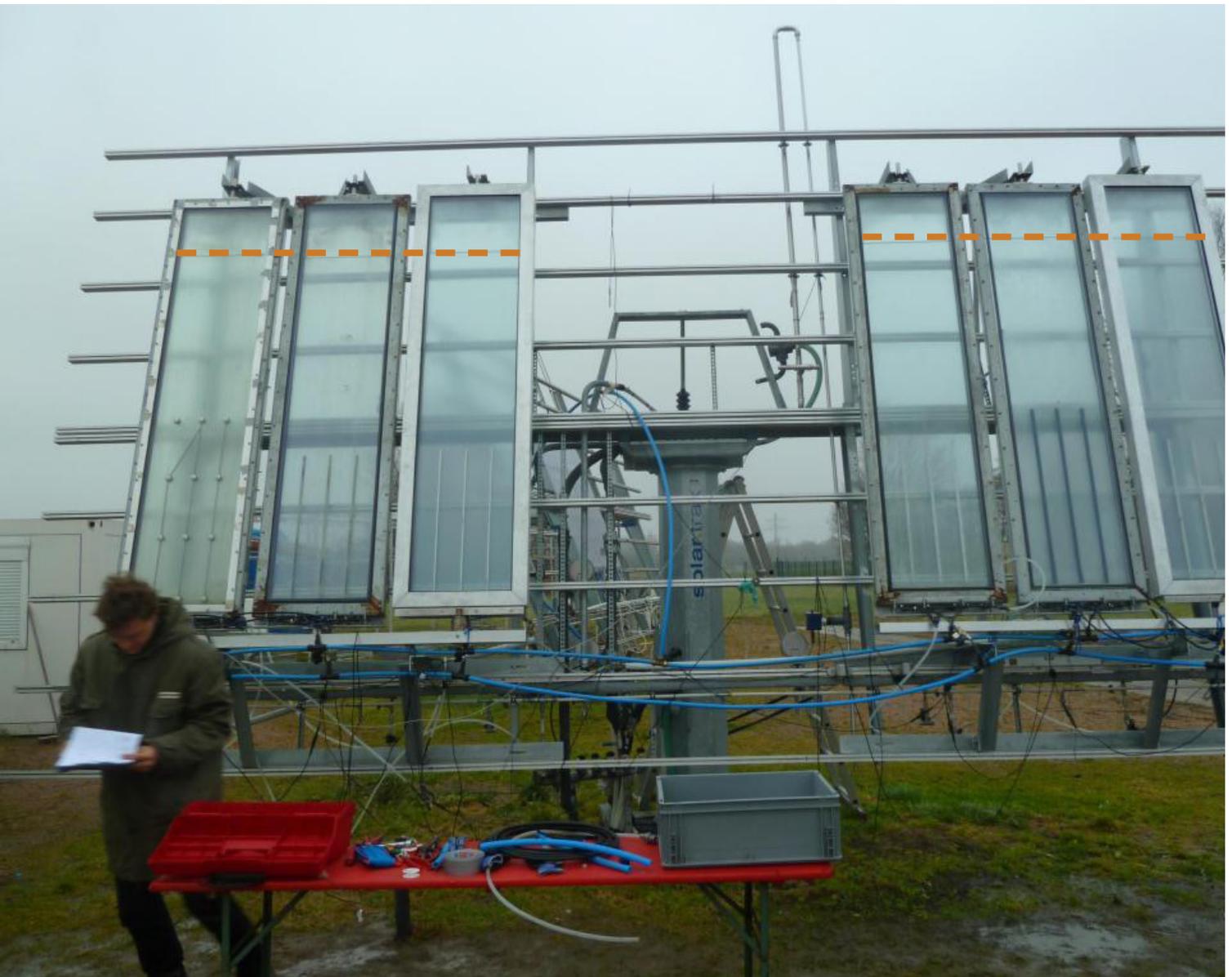


Abbildung 39 Einstellung von gleichen Füllhöhen in sechs PBR in Reihe verschaltet bei einem Gesamtvolumenstrom von 5 L/min. Die jeweils linken PBR sind Prototypen der ersten Generation, die jeweils rechten jene der zweiten.
© SSC GmbH

5. PROZESSFÜHRUNG UND STEUERUNG

5.1 Hydraulisches System

Wie schon in Kapitel 3.4.2 dargestellt, ist es für eine großflächige Anwendung von Photobioreaktoren (PBR) an der Fassade notwendig, dass eine Vielzahl von PBR miteinander direkt verschaltet werden können, um so eine gemeinsame und geregelte Mediumführung in einem Kreislaufsystem zu ermöglichen. Die Notwendigkeit für eine Kreislaufführung ergibt sich daraus, dass Wärme aus den PBR zu- oder abgeführt werden muß.

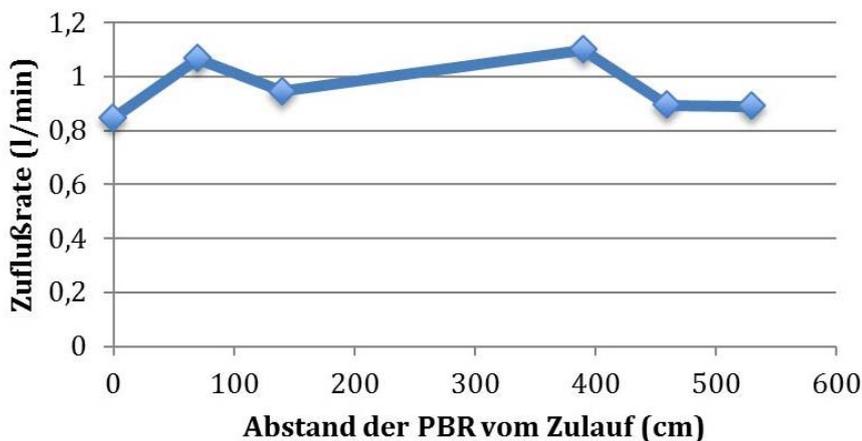


Abbildung 40 Aufteilung des Zuflusses von 5L/min auf sechs Photobioreaktoren (je Rautenmarkierung ein PBR), die nebeneinander in Reihe stehen
© SSC GmbH

Darüber hinaus müssen die von den Algen zum Wachsen benötigten Nährstoffe (N,P, Spurenstoffe) und CO₂ kontinuierlich ins Kulturmedium zudosiert und Al

gen abgeerntet werden, um eine optimale Zelldichte aufrecht zu erhalten.

Modellrechnungen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden, ergaben für die Glas PBR-Prototypen und für die bei hohen Lichteinträgen bestimmenden Größen Wärme und CO₂ maximal notwendige Durchflußgeschwindigkeiten von 1 l/min pro PBR. Dieser Wert wurde durch Tests an der Versuchsanlage der SSC GmbH bestätigt.

Um in allen miteinander verschalteten PBR eine möglichst gleichmäßige Durchströmung zu erreichen, wurden Reihenschaltungen mit unterschiedlichen Zu- und Abläufen erfolgreich getestet. Dabei wurde auch untersucht, wie möglichst gleichmäßige Füllhöhen in einer Vielzahl von miteinander verschalteten PBR erzielt werden können. Abbildung 40 zeigt die Messergebnisse eines Versuches mit sechs PBR die in Reihe über ein gemeinsames Zu- und Ablaufsystem miteinander verschaltet waren. Der Gesamtvolumenstrom betrug 5 L/min und wurde über die anlagenseitige Steuerung konstant gehalten.

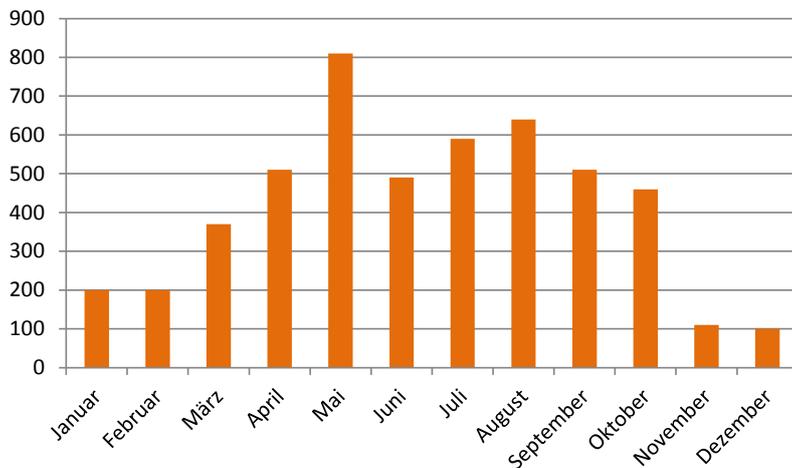


Abbildung 41 Aufnahme von CO₂ beim Aufbau der Biomasse in einer 312 m² großen Bioreaktorfassade.

© SSC GmbH

Die Messung der einzelnen Zuläufe erfolgte zeitlich kurz hintereinander mit Hilfe eines Sensors der Firma Endress und Hauser (Flowphant). Vor Beginn des Versuchs wurde der Sensor auf einen maximalen Durchflusswert von 11/min kalibriert (100 %), um so eine möglichst genaue Bestimmung der Zuflußraten zu erzielen. Wie in Abbildung 40 zu erkennen, konnten keine signifikanten Unterschiede in den Zuflußraten aufgrund der Lage der PBR in der Reihe bestimmt werden. Die erkennbaren Unterschiede zeigen, dass die PBR bzw. ihre Zu- und Abflüsse leicht unterschiedlich sind und selbst kleinste Rohrwiderstände aufgrund von Abknicken o.ä. den Zulauf und Ablauf beeinflussen können. In Übereinstimmung mit den Zuflußraten waren, wie Abbildung 39 zeigt, auch keine signifikanten Unterschiede in den Füllständen der in Reihe verschalteten PBR erkennbar (<2 cm).

Aus den Ergebnissen ist zu schliessen, dass es bei der gewählten Anordnung bzw. Rohrgeometrien auch bei einer Verschaltung von einer größeren Anzahl an PBR Unterschiede in den Zu- und Abläufen bzw. in den Füllhöhen zwischen den PBR verhindert werden können, die die Funktion einer Anlage beeinträchtigen

könnten. Bei der Montage ist darauf zu achten, dass alle Reaktoren möglichst gleich gearbeitet und ohne Knickstellen in den Leitungen verrohrt werden.

Es bedarf für die Kultivierung der Mikroalgen einer beträchtlichen Menge an CO₂ (Abbildung 41). Das benötigte CO₂ wird mit Hilfe einer Saturationsanlage kontinuierlich in der Energiezentrale des Gebäudes zudosiert und mit Hilfe des Kreislaufsystems verteilt. Für den Eintrag des CO₂ in das Kulturmedium verfügt die SSC GmbH über eine spezielle Technologie der Saturation, mit der es möglich ist, Rauchgas verlustfrei d.h. vollständig im Wasser zu lösen.

5.2 Gewinnung und Nutzung der Energieträger

Wie schon in Kapitel 1.4.2 ausgeführt, verfügt die SSC GmbH über ein Erntesystem basierend auf dem Prinzip der Flotation, mit dem hochgradig effizient die im Kulturmedium suspendierten Mikroalgen mit einer Größe von 5-10 µm abgetrennt und bei einer entsprechenden Prozessführung auf 5-8 Gew. % d.h. 50-80 g TS/kg angereichert werden können. Neben der Ernte dient dieses System zur Regulation der Zellzahl, dem „Waschen“

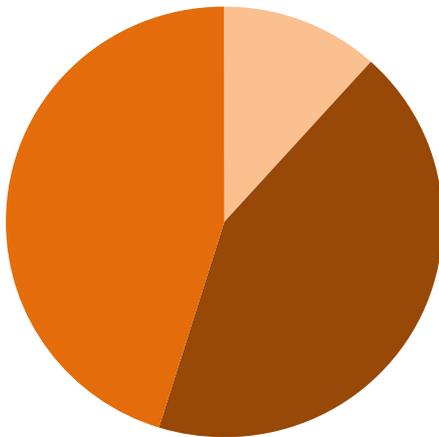


Abbildung 42 Zusammensetzung des Gases, das bei einer hydrothermalen Konversion von Mikroalgen entsteht.

© SSC GmbH

- C₂H₆
- CH₄
- H₂

der Zellkultur, d.h. der Abtrennung von nicht aktiven Zellen oder Zellbruchstücken bei minimalem Energieaufwand (0,1 kWh/m³). Da die Mikroalgen selber einen Wassergehalt von etwa 90 % haben, wird also fast das gesamte, die Algen umgebende Wasser abgetrennt. Die geerntete Biomasse kann bei etwa 5 °C bis zu 10 Tagen ohne Wertverlust gelagert werden.

Erste Ergebnisse in Kooperation mit dem KIT zeigten, dass die mittels Flotation abgetrennte Biomasse ohne weitere Aufbereitungsschritte in einer Anlage zur Hydrothermalen Konversion direkt in Methan und Wasserstoff konvertiert werden kann. Wie aus Abbildung 42 zu ersehen, besteht das Konversionsgas zu 45,2 % aus Wasserstoff, zu 43,2 % aus Methan und einem Rest von 11,7 % aus Ethan.



Abbildung 43 Abtrennung/Ernte der Mikroalgen Biomasse über Flotation als dicker Schaum.

© SSC GmbH



Abbildung 44 Foto eines neu entwickelten elektronischen Bauteils basierend auf einer Mosfet-Schaltung, mit dem über stabförmige Fühler ein Anstieg des Kulturmediums im PBR erfasst und dann der Zulauf über ein Magnetventil abgesperrt wird. © SSC GmbH

Der solare Eintrag in die PBR erwärmt das Kulturmedium. Über das Kreislaufsystem kann die Wärme, genauso wie die Mikroalgen-Biomasse in der Technikzentrale des Gebäudes entnommen werden und zur Nutzung weitergeleitet werden.

Die zentrale Entnahme erfolgt über einen Wärmetauscher. Da die Temperatur für eine Kultivierung der Mikroalgen nicht über 40 °C steigen darf, hat die nutzbare Wärme aus einer Bioreaktorfassade nie mehr als 35 °C. Für eine Nutzung in einem Gebäude kann diese Wärme für die Heizung und die Vorerwärmung von Trinkwasser dienen. Da Heizungswärme meist nur im Winter benötigt wird, bedarf es für eine effiziente Nutzung dieser niedrigen Temperatur/Wärme eines Wärmespeichers. Hierfür bietet sich eine Speicherung in Erdsonden an.

5.3 Steuerung

Die Entwicklung der Steuerung im Rahmen des vorliegenden Projektes betraf sowohl die Steuerung der Füllhöhen als auch die Steuerung der Prozessführung. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, konnte das hydraulische System soweit optimiert werden, dass im Normalbetrieb die Füllstandhöhen und die Durchflüsse konstant gehalten wurden. Allerdings zeigt sich im Dauerbetrieb, dass es zu kleinsten Störungen in den Zu- und Abläufen der PBR aufgrund von Flockenbildung kommen kann. Diese können letztendlich den Abfluss soweit verringern, dass es zu einem Aufstau und zum Überlaufen in einzelnen PBR kommt. Erste Versuche richteten sich darauf, diese Störungen zu verhindern, indem ein zweiter Auslauf in den PBR gelegt wurde. Darüber hinaus wurden die PBR mit Überläufen ausgerüstet,

über die ein zumindest geregelter Ablauf erfolgen sollte. Allerdings zeigte es sich, dass ein geregelter Überlauf für eine Bioreaktorfassade keine Lösung darstellt, da das austretende Medium aufwendig über Ablaufrinnen kontrolliert abgeführt werden muss, was einen hohen technischen Aufwand bedeutet. Außerdem würde die darin enthaltene Biomasse verloren gehen und den Biomassertrag signifikant vermindern. Aus diesen Gründen entwickelte die SSC GmbH im Rahmen des Projektes ein elektronisches Bauteil, das die Füllstandhöhe automatisch mittels Regulierung der Zuflußrate kontrolliert (Abbildung 44).

Diese Neuentwicklung war notwendig, da es auf dem Markt kein Bauteil gibt, das ähnliche Eigenschaften aufweist bzw. klein genug ist, um in dem begrenzten Reaktorraum den Füllstand exakt zu erfassen und ein Magnetventil zu schalten. Das Bauteil zur automatischen Füllstandskontrolle wurde auf der Pilotanlage über Monate erfolgreich getestet und wurde mittlerweile in den PBR Prototyp planerisch und technisch voll integriert. Da es unabhängig von der Prozesssteuerung quasi autonom regelt, bedurfte es keiner Integration in die übergeordnete Prozesssteuerung.

Grundsätzlich gilt in Bezug auf die Steuerung der Prozessführung, dass für eine kontinuierliche Mikroalgenproduktion über lange Zeiträume (Monate – Jahre) und für eine hohe Biomasseproduktion mit gleichbleibend hoher Qualität, die Steuerung in hohem Masse automatisiert sein muss, um die Kultivierungsbedingungen immer im Optimum halten zu können. Dabei ist es vor allem wichtig, die Zelldichte an die Einstrahlungsintensitäten anzupassen. Aus diesem Grund wurde die Erntemaschine in die Prozesssteuerung integriert.

Über umfangreiche Messungen wurden dazu zunächst die Beziehung zwischen Licht und Zelldichte bestimmt, anhand derer die Ernte der Mikroalgen gesteuert werden kann. Diese können auf der SPS als Kenngrößen hinterlegt werden, um die Ernte über die kontinuierlich erfassten Messdaten Licht und Trübung voll automatisch zu steuern. Für die Steuerung von Wärmeentnahme bzw. -zufuhr werden gleichermaßen die thermischen Kennwerte der PBR berücksichtigt.

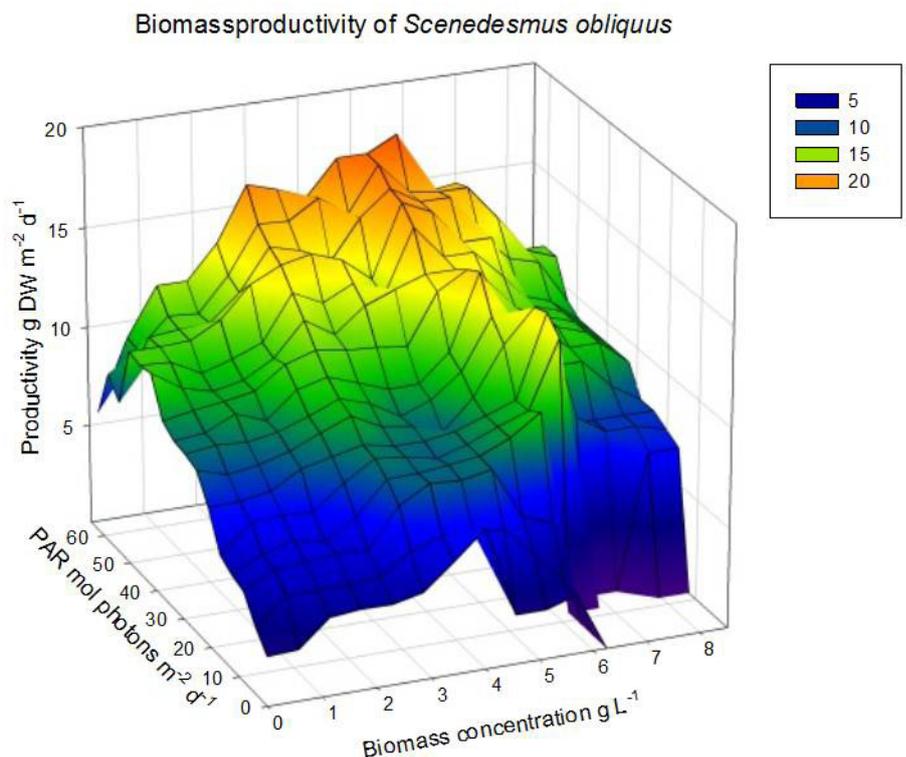


Abbildung 45 Abhängigkeit der Produktion von Licht und Zelldichte in den PBR-Prototypen.
© SSC GmbH

6. ENERGETISCHE KENNWERTE

Wie aus Abbildung 46 zu ersehen, können, im Gegensatz zu Photovoltaik, in den Photobioreaktoren (PBR) durch die Mikroalgen auch geringe Lichteinstrahlungen mit hoher Effizienz zu Biomasse konvertiert werden. Dieser Befund ist vor allem für ein Fassadensystem von großer Bedeutung, da dieses senkrecht ausgerichtet ist und damit nur eingeschränkt einstrahlendes Sonnenlicht einfängt.

Wie aus Abbildung 47 zu ersehen, können auch in den Monaten mit geringer Einstrahlung immer noch signifikante Erträge erzielt werden, was eine ganzjährige Kultivierung nahe legt.

Der Berechnung liegt auf der Basis von experimentell ermittelten Kenndaten der Wärmedurchgangskoeffizienten und Produktionsraten zugrunde, dass in den Photobioreaktoren von der eingestrahnten Sonnenenergie 38% zu Wärme und 10%

zu Biomasse konvertiert wird. Der Jahresertrag aus solarer Wärme liegt dabei bei 68 MWh. Die Daten in Abbildung 47 berücksichtigen dabei noch nicht die zusätzlichen Gewinne durch den Einsatz von Spezialgläsern.

Durch den Einsatz spezieller Gläser aus der Photovoltaik-Technik konnte das Mikro-algenwachstum zusätzlich um bis zu 100 % gesteigert werden (Abbildung 48).

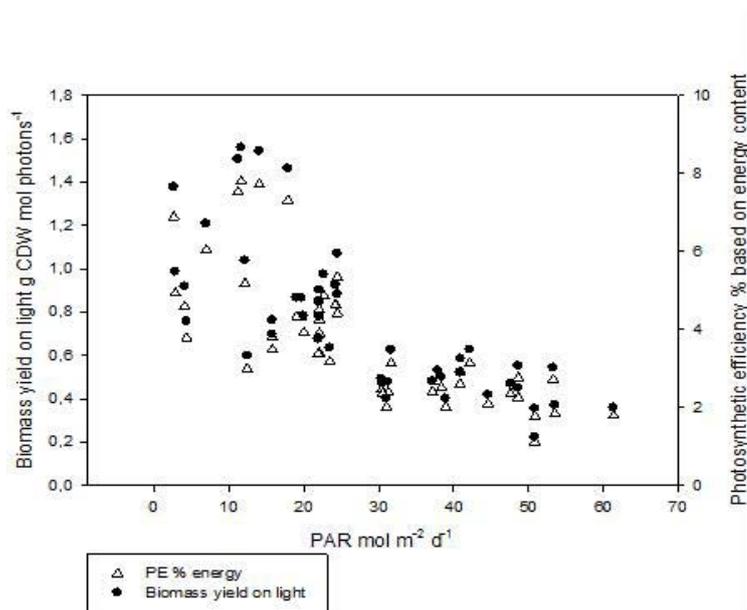


Abbildung 46 Biomasseerträge in Abhängigkeit von der Menge an über einen Tag eingestrahlem photosynthetisch aktiven Licht. Der biomass yield gibt an, wieviel Gramm Trockengewicht pro Mol-Photonen erzielt werden. Dabei werden die thermodynamisch erreichbaren maximalen Werte von 1,6 bei niedrigen Einstrahlungsbedingungen durchaus reicht, was darauf hinweist, dass die Photobioreaktoren optimale Bedingungen für das Mikroalgenwachstum stellen.

© SSC GmbH

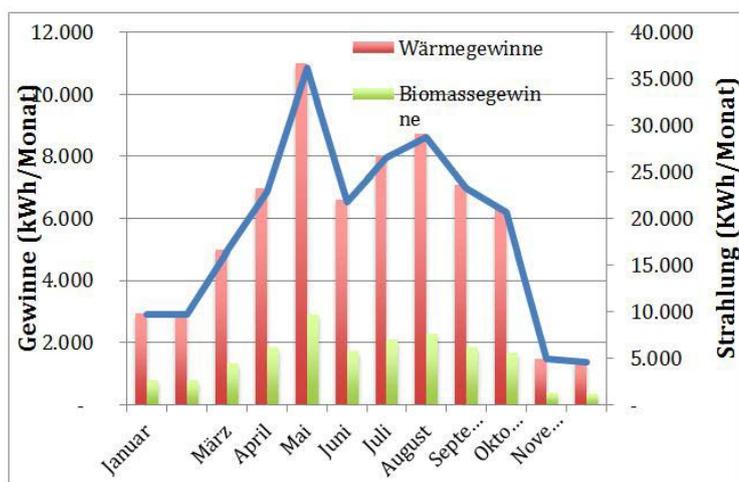


Abbildung 47 Monatssummen der Einstrahlung in die PBR und der damit zu erzielenden Erträge an Wärme und Biomasse für eine Bioreaktorfassade mit einer Fläche von 312 m² bei einer Südwest-Ausrichtung.

© SSC GmbH

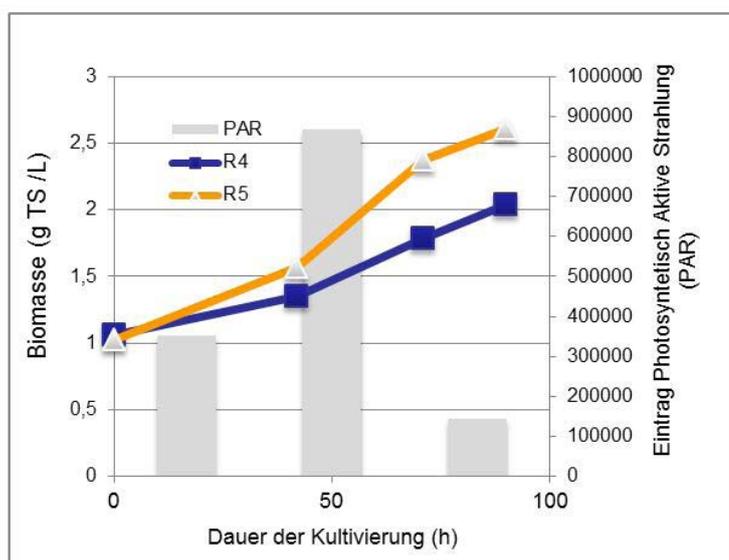


Abbildung 48 Zunahme der Biomasse in PBR mit (R5) und ohne (R4) Spezialglas.

© SSC GmbH



Abbildung 49 Rendering BIQ-Gebäude
© SPLITTERWERK / KOS Wulff Immobilien

7. AUSBLICK UND WEITERE FORSCHUNG

Der unmittelbare Ausblick bezieht sich auf die Fertigstellung und Inbetriebnahme des BIQ Gebäudes in Hamburg, das im Rahmen der IBA Ende März 2013 eingeweiht wird. Dies wird weltweit das erste Pilotprojekt sein, das eine aktive Photobioreaktor (PBR)-Fassadenfläche von ca. 200 m² aufweist, welche sich über die vier Geschosse der Süd-West und Süd-Ost-Ansicht erstreckt.

Das Projekt beruht maßgeblich auf den Erkenntnissen, die im Rahmen dieses von ZukunftBau geförderten Projektes erar-

beitet wurden. Die Umsetzung dieses Pilotprojektes, die von dem Exzellenzfond der IBA unterstützt wurde, wäre ohne die durch dieses Forschungsvorhaben geleistete Arbeit nicht möglich gewesen.

Das BIQ-Gebäude wurde auf Grundlage des „Smart Treefrog“-Entwurfs geplant (Abbildung 49). Als Bauherr fungiert das Hamburger Bauunternehmen Otto Wulff, welches auch als Generalplaner für das Gebäude beauftragt ist. Splitterwerk ist mit der künstlerischen Oberleitung betraut. Das Exzellenz-Gewerk

„Photobioreaktor-Fassade“ wurde von SSC bauherrentechnisch übernommen. Arup Deutschland GmbH wurde mit der Planung der Haustechnik beauftragt; die PBR Fassade wird von Colt International gefertigt und montiert.

Das Pilotprojekt dient als Demonstration-sanlage, die für einen Zeitraum von mindestens 5 Jahren von SSC betrieben wird. Durch ein intensives Monitoring wird das Projekt zusätzlich über die ersten zwei Jahre begleitet. Das Monitoring wird ebenfalls durch die Forschungsinitiative ZukunftBau gefördert und umfasst neben energetischen und technischen Gesichtspunkten die sozio-ökonomischen Aspekte der Neuentwicklung „Photobioreaktor-Fassade“, um die Nutzerakzeptanz dieser neuen Technologie erfassen zu können.

Das Monitoring wird gemeinsam durch Arup Deutschland, die HafenCity Universität Hamburg, SSC und Colt durchgeführt. Durch die ganzheitliche Betrachtung und Begleitung des neuartigen Fassadensystems soll die Leistungsfähigkeit, aber auch die Interaktion mit dem Nutzer erfasst werden. Aus den Ergebnissen können wichtige Optimierungsansätze für die Weiterentwicklung des Systems gewonnen werden. Insbesondere die Fragen nach dem Wartungsaufwand und den Nettoenergiegewinnen können so ermittelt werden.

Ziele weiterführender Forschungsarbeiten beziehen sich auf die Optimierung der haustechnischen Anlagen, des PBR-Designs und der Kombination mit organischen PV-Zellen.

So wird im Rahmen des Projektes Phykon daran gearbeitet, den Methananteil bei weniger Fremdgasen zu erhöhen, sowie die Anlagentechnik auf einen Einsatz in Gebäuden zu optimieren. Im Ergebnis stünde dann eine Anlagen-

technik zur Verfügung, mit der vor Ort die Algenbiomasse aus einer Bioreaktor-fassade zu Methan konvertiert werden kann, das dann ins Erdgasnetz eingespeist werden könnte.

Durch die Verwendung geeigneter Klebstoffsysteme kann das PBR Design dahingehend optimiert werden, das dünnere Gläser zum Einsatz kommen können, um das Gewicht und damit auch die Kosten der Elemente zu reduzieren.

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 CO₂ 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 CO₂ neutrale Siedlungskonzepte dar, deren Energiebedarf vollständig durch lokal gewonnene erneuerbare Energien gedeckt wird.

8. BILDVERZEICHNIS

Abbildung 1	Anteil regenerativer Energie am gesamten Energieverbrauch in Deutschland	9
Abbildung 2	Energieverbrauch in Deutschland 2011 nach Sektor	10
Abbildung 3	Anteil erneuerbarer Energien (Schwarz) am Endenergieverbrauch in Deutschland vorläufig für das Jahr 2011	10
Abbildung 4	Vorläufiger Anteil für das Jahr 2011 an der Wärmebereitstellung (Endenergieverbrauch in GWh/a) aus erneuerbaren Energien in Deutschland	11
Abbildung 5	Beispiele für die Kultivierung in industriellen Großanlagen	13
Abbildung 6 - 9	Anlagentypen für Mikroalgekultivierung in geschlossenen Systemen	15
Abbildung 10	Rendering von fassadenintegrierten Photobioreaktoren im urbanen Raum. © Institution of Mechanical Engineers, London, 2009	17 17
Abbildung 11-14	Übersicht Konzepte für gebäudeintegrierte Kultivierung von Mikroalgen – 1 Ennesys © Ennesys; 2 Emergent Architects © Emergent Architects; 3 und 4 SymBio2 © SymBio2	18
Abbildung 15	Ausgeführte Photovoltaik-Projekte Colt © Colt International GmbH	23
Abbildung 16	Quaschning – Regenerative Energiesysteme © Fa. Unimet – Typ Unisol Biogas (l/kg org TS)	24
Abbildung 17	Biogaserträge bei der Fermentation der Mikroalge Chlorella spec. im Vergleich mit anderen Substraten.	27
Abbildung 18	„Smart Treefrog“ Beitrag zum „Smart Material House“-Wettbewerb Internationale Bauausstellung (IBA) 2013 © Splitterwerk Architekten	28
Abbildung 19	Entwurfsskizzen für zusätzliche Funktionalitäten © Arup Deutschland GmbH	30
Abbildung 20	Vergleich von Jahres-Einstrahlungssummen für Fassaden © SSC GmbH	36
Abbildung 21	Optionen für Paneelanordnung © Arup Deutschland GmbH	38
Abbildung 22	Konzeptskizze „Hinterlüftetes PBR-Fassadensystem mit einachsiger Nachführung“ © Arup Deutschland GmbH	41
Abbildung 23:	Schematische Darstellung der Gesamtsystems inkl. Haustechnik © Arup Deutschland GmbH	42
Abbildung 24:	Schematische Darstellung der Energiezentrale © Arup Deutschland GmbH	43 43
Abbildung 25	Finaler Prototyp im Betrieb am BIQ-Gebäude in Hamburg - Wilhelmsburg	45

Abbildung 26	Schnitt durch den Photobioreaktor © Colt International GmbH	45
Abbildung 27	Aluminium-Abstandhalter in der Ansicht und im Schnitt © Colt International GmbH	46
Abbildung 28	Speziell angefertigte Verlängerungshülse für Anschlüsse © Colt International GmbH	46
Abbildung 29	Rückschlagventil © Colt International GmbH	47
Abbildung 30	Aluminium L-Profile als vertikale Stege zur Kanaltrennung der AirLift-Antriebseinheit © Colt International GmbH	47
Abbildung 31	Füllstandssensor integriert in den oberen horizontalen Abstandhalter © SSC GmbH	48
Abbildung 32	Scrabber aus 3D-gedrucktem Kunststoff © Colt International GmbH	48
Abbildung 33	Teilstück des PBR-Klemmrahmen © Arup Deutschland GmbH	49
Abbildung 34	Schubsteife Ecke mit Verschraubung zum Eckverbinder © Colt International GmbH	50
Abbildung 35	Unteres Auflager für den PBR © SSC GmbH	51
Abbildung 36	Anschlussmimik und Durchführung © SSC GmbH	51
Abbildung 37	Unterkonstruktion mit Versorgungsleitungen und Anschluss an die primäre Tragstruktur des Gebäudes © SSC GmbH	52
Abbildung 38	Abnehmbare Blechverkleidung der Unterkonstruktion © SSC GmbH	52
Abbildung 39	Einstellung Füllhöhen © SSC GmbH	54
Abbildung 40	Aufteilung des Zuflusses © SSC GmbH	55
Abbildung 41	Aufnahme von CO ₂ beim Aufbau der Biomasse © SSC GmbH	56
Abbildung 42	Zusammensetzung des Gases © SSC GmbH	57
Abbildung 43	Abtrennung/Ernte der Mikroalgen Biomasse über Flotation als dicker Schaum. © SSC GmbH	57
Abbildung 44	Elektronisches Bauteils - Fühler © SSC GmbH	58
Abbildung 45	Abhängigkeit der Produktion von Licht und Zelldichte in den PBR-Prototypen. © SSC GmbH	59
Abbildung 46	Biomasseerträge © SSC GmbH	61
Abbildung 47	Monatssummen der Einstrahlung in die PBR © SSC GmbH	61
Abbildung 48	Zunahme der Biomasse in PBR mit (R5) und ohne (R4) Spezialglas. © SSC GmbH	61
Abbildung 49	Rendering BIQ-Gebäude © SPLITTERWERK / KOS Wulff Im- mobilien	62

9. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Übersicht Arbeitspakete und Ziele	20
Tabelle 2	Lipid-Konzentration in der Trockenmasse (TS) verschiedener Spezies	27
Tabelle 3	Übersicht der Anforderungen für die Kultivierung von Mikroalgen. © SSC GmbH	32
Tabelle 4	Anforderungen - Flachpaneel-Photobioreaktor- Technologie, © Arup Deutschland GmbH	
Tabelle 5	Übersicht Anforderungen Wohngebäude © Arup Deutschland GmbH	34
Tabelle 6	Werkstoffvergleich © Arup Deutschland GmbH	39

10. LITERATURVERZEICHNIS

1. Erneuerbare Energieen Gesetz EEG. Umwelt, Bundesministerium für. 2012.
2. Erneuerbare Energien Wärmegesetz (EEWärmeG). Umwelt, Bundesministerium für. 2008.
3. AGEE-Stat, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. www.erneuerbare-energien.de. [Online] 08. März 2012. [Zitat vom: 07. August 2012.] http://www.erneuerbare-energien.de/erneuerbare_energien/datenservice/zeitreihen/doc/45919.php.
4. Technologie, Bundesministerium für Wirtschaft und. Energiedaten. s.l. : Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2012.
5. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Erneuerbare Energien in Zahlen. s.l. : Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2012.
6. Multiple. Renewables 2012 - Global Status Report. Paris : REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2012.
7. Hirt, Thomas. Algen - nachhaltige Rohstoffquelle für Wertstoffe und Energie. Stuttgart : Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB.
8. Seambiotic. [Online] [Zitat vom: 07. August 2012.] <http://www.seambiotic.com/>.
9. Algomed. [Online] Roquette Klötze GmbH & Co. KG. [Zitat vom: 28. September 2012.] <http://www.algomed.de>.
10. Kerner, Martin. Projektangaben aus E-Mail-Verkehr und Ranbedingungen für Mikroalgenkultur. Hamburg : SSC GmbH, 2011-12.
11. SUBITEC. [Online] [Zitat vom: 28. September 2012.] <http://www.subitec.com/>.
12. Engineers, Institution of Mechanical. Geo-Engineering - Giving us the time to act? London : Institution of Mechanical Engineers, 2009.
13. Bristol, University of. University of Bristol. Faculty of Engineering. [Online] [Zitat vom: 11. 02 2013.] <http://www.bristol.ac.uk/engineering/people/peter-head/index.html>.
14. Hurran, Beth. Arup Global home. Growing algae pushes the 'green' agenda. [Online] [Zitat vom: 11. 02 2013.] http://www.arup.com/News/2009-06%20June/30_Jun_2009_Growing_algae_pushes_the_green_agenda.aspx.
15. Ennesys. Ennesys. [Online] [Zitat vom: 11. 02 2013.] <http://www.ennesys.com/>.
16. dezeen.com. Flower Street bioreactor by Emergent. [Online] [Zitat vom: 11. 02 2013.] <http://www.dezeen.com/2009/08/18/flower-street-bioreactor-by-emergent/>.
17. Actu-Architecture. Symbio2 dévoile ses premiers prototypes de capteurs solaires biologiques à microalgues. [Online] [Zitat vom: 11. 02 2013.] <http://actu-architecture.com/2012/07/23/facade-capteurs-solaires-biologiques-microalgues/>.

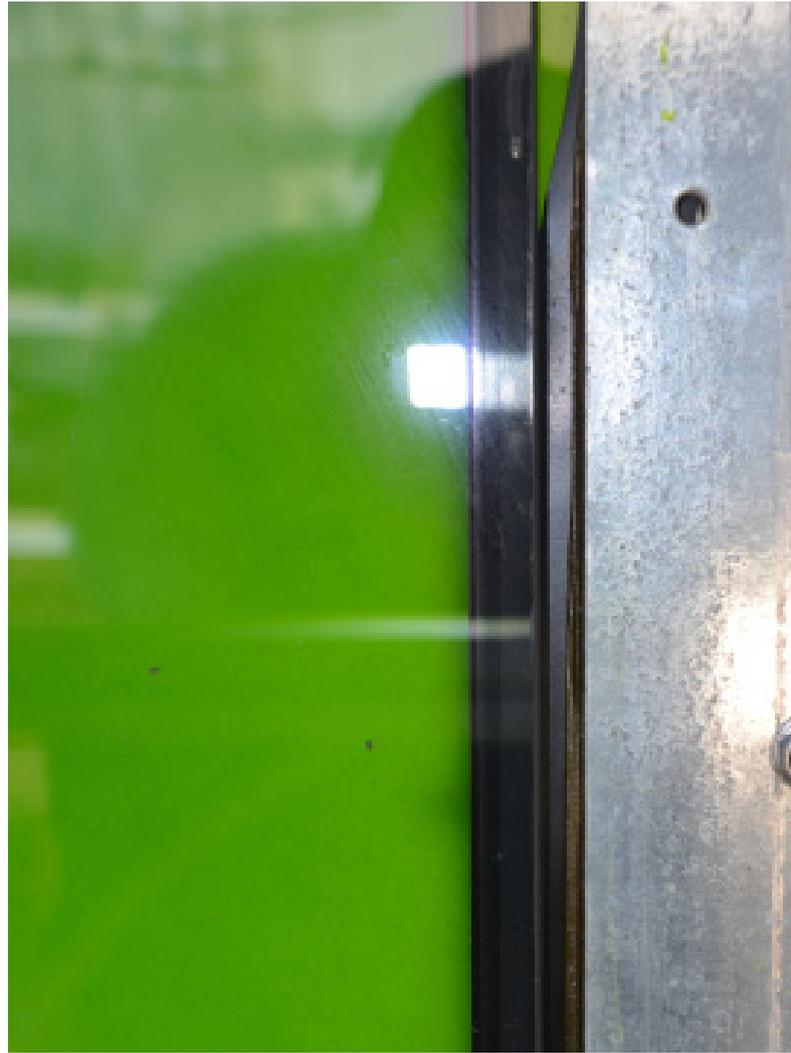
18. Oil, Origin. Origin Oil. OriginOil Receives Firm Order For Its Algae Appliance in Urban Test Program At Paris La Défense Complex. [Online] [Zitat vom: 11. 02 2013.] <http://www.originoil.com/company-news/originoil-receives-firm-order-for-its-algae-appliance-in-urban-test-program-at-paris-la-defense-complex.html>.
19. Riche, Baptiste Roux Dit. CleanTech Republic. Ennesys: energy positive buildings that run on microalgae. [Online] [Zitat vom: 11. 02 2013.] <http://www.cleantechrepublic.net/2011/10/06/ennesys-energy-positive-buildings-that-run-on-microalgae/>.
20. Architects, X-TU. SymBio2 labelisé par Advancity, met la «chimie bleue» en façade pour des îlots verts. COMMUNIQUE DE PRESSE. Paris : X-TU Architects, 2011.
21. Kerner, Dr. Martin. Bioreaktor und Verfahren zum Betrieb eines Bioreaktors. Nr.2 228 432 Europ. Patent.
22. Influence of mixing and shear stress on *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Chlamydomonas reinhardtii*. Leupold, M., S. Hindersin, G. Gust, M. Kerner and D. Hanelt. 2012, J. Appl. Phycol.
23. The effect of discontinuous airlift mixing in outdoor flat panel photobioreactors on growth of *Scenedesmus obliquus*. Leupold, M., S. Hindersin, M. Kerner and D. Hanelt. BPBSE-13-0024, 2013, Journal of Bioprocess and Biosystem Engineering.
24. Feige, S. Assessment of microalgae technology for large scale biomass production based on biofixation of carbon dioxide in flue gases from cement production. Koblenz : Universität Koblenz-Landau, 2010.
25. Schneider, J. Adaptation von *Chlorella vulgaris* an erhöhte CO₂ und Schadstoffgehalte. Hamburg : Staatsexamenarbeit Uni Hamburg, 2009.
26. Rosello Sastre R, Posten C. Die vielfältige Anwendung von Mikroalgen als nachwachsende Rohstoffe. 2010.
27. Lipid and total fatty acid production in photoauto-trophic fresh water microalgae: screening studies towards biodiesel production. Abomora, A.E., Wagner, M., El-Sheekh, M., Hanelt H. 2012, J Appl. Phycology.
28. Microalgae as a raw material for biofuels production. Gouveia L, Oliveira AC. 2009, Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, S. 36(2):269-274.
29. Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. Illman AM, Scragg AH, Shales SW. 2000, Enzyme and Microbial Technology, S. 27(8):631-635.
30. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris*. Liu Z-Y, Wang G-C, Zhou B-C. 2008, Bioresource Technology, S. 99(11):4717-4722.
31. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. Miao X, Wu Q. 2006, Bioresource Technology, S. 97(6):841-846.
32. Screening of Malaysian indigenous microalgae for antioxidant properties and nutritional value. Natrah F, Yusoff F, Shariff M, Abas F, Mariana N. 2007, Journal of Applied Phycology, S. 19(6):711-718.
33. Commercial applications of microalgae. Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A. 2006, J Biosci Bioeng, S. 101(2):87-96.
34. Lipid composition of the nitrogen starved green alga *Neochloris oleoabundans*. Tornabene TG, Holzer G, Lien S, Burris N. 1983, Enzyme and Microbial Technology, S. 5(6):435-440.

35. Efficiency of sunlight utilization: Tubular versus flat photobioreactors. Tredici MR, Zittelli GC. 1998, *Biotechnology and Bioengineering*, S. 57(2):187-197.
36. High-density fermentation of microalgae & Chlorella protothecoides in bioreactor for microbio-diesel production. Xiong W, Li X, Xiang J, Wu Q. 2008, *Applied Microbiology and Biotechnology*, S. 78(1):29-36.
37. Zapf, Alexander. Methods to enhance methane yield from anaerobic digestion of microalgae. Hamburg : Master Thesis TU-HH, 2009.
38. Maxfield, Tom. Anaerobic digestion of microalgae - methods to enhance methane yield. Hamburg : Master Thesis TU-HH, 2009.
39. Head, Peter. The ecological age. 2009.
40. Tsui, Ricky. Sustainable to evolvable / Algae biofuels: coming soon. Arup.com. [Online] [Zitat vom: 15. 02 2013.] <http://thoughts.arup.com/post/details/197/algae-biofuels-coming-soon>.
41. Hansing, Anke. www.iba-hamburg.de. [Online] IBA Hamburg GmbH. [Zitat vom: 02. 08 2012.] <http://www.iba-hamburg.de/themen-projekte/bauausstellung-in-der-bauausstellung/smart-material-houses/projekt/smart-material-houses.html>

11. BILDANHANG



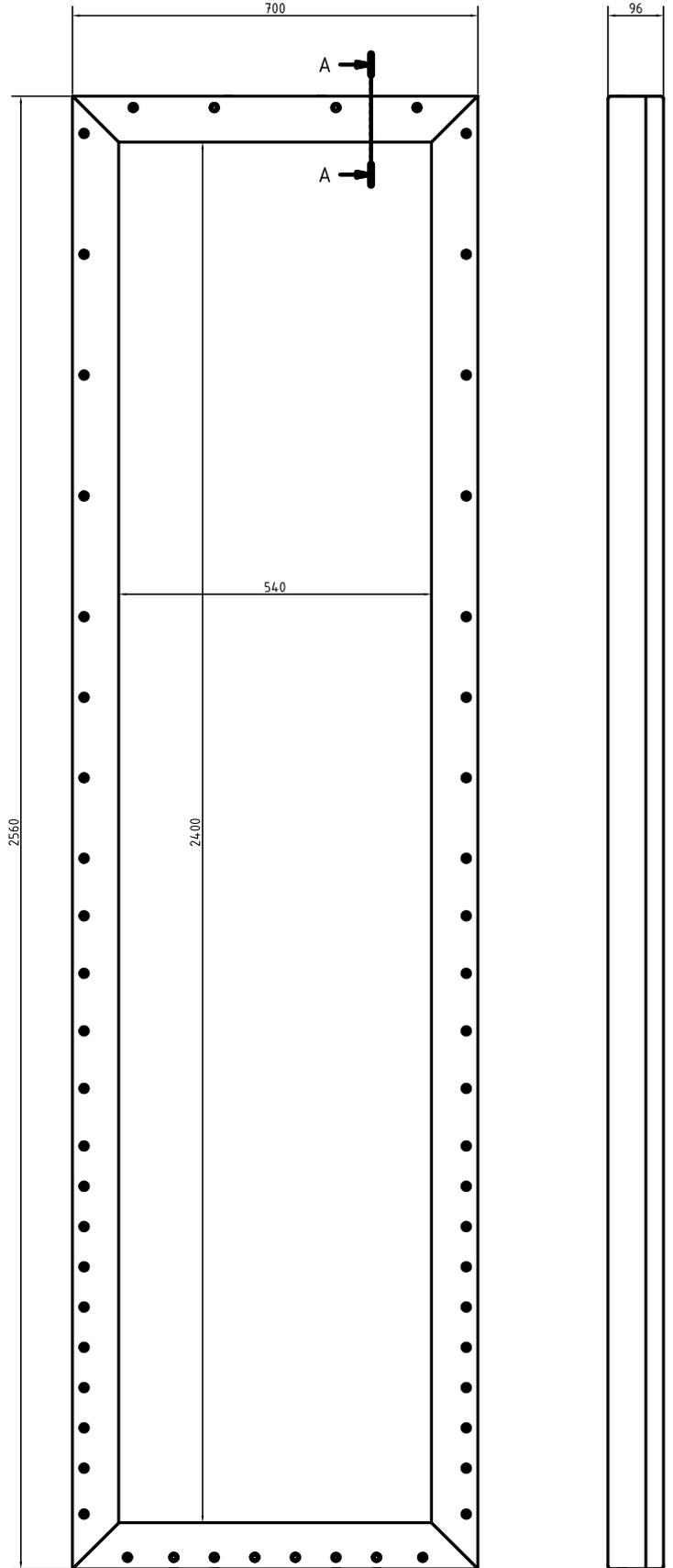
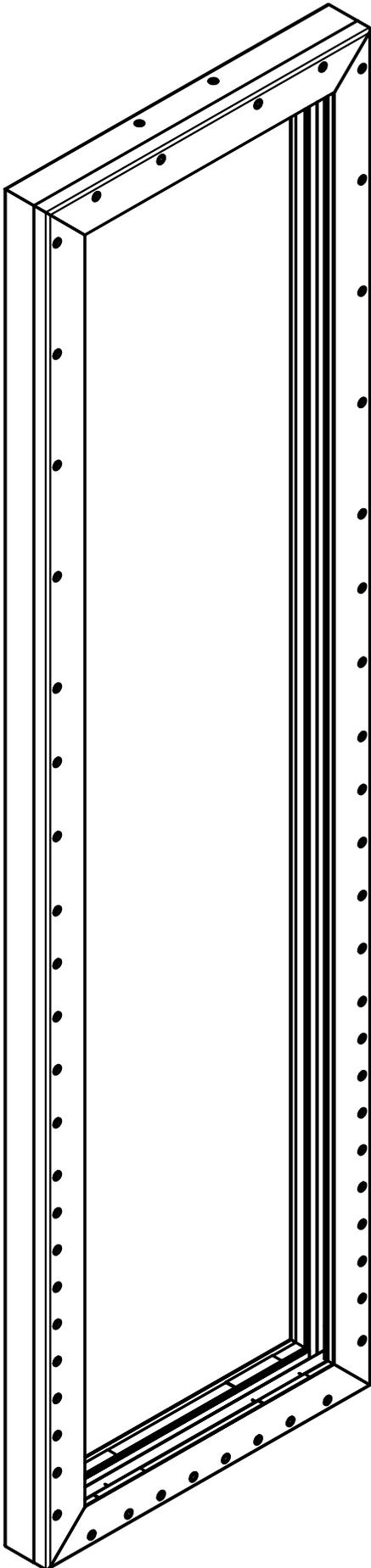
Testaufbau für die Prototypen des Photobioreaktors
der 1. Generation (Januar 2012)





Testaufbau für den Prototypen des Photobioreaktors
der 2. Generation. Präsentation des Prototyps auf der
BAU 2013. (Januar 2013)





Ansichten PBR

Schnitt A-A durch den PBR

A-A

