

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).

MASTERARBEIT

# Gebäudeintegration von Photobioreaktoren zur Mikroalgenzucht

Voraussetzungen, Einsatzgebiete und Nutzungsmöglichkeiten in der Architektur

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

**Ardeshir Mahdavi**

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

E259/3 Abteilung für Bauphysik und Bauökologie

und

**Michael Schagerl**

a.o.Univ.Prof. Mag. Dr.

Abteilung für Limnologie, Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Architektur und Raumplanung

von

**Lena Götzl**

0627291

Pettenkofengasse 1/1/20

1030 Wien

Wien, am 19.4.2013

### **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Wien, am 19.4.2013

## **Motivation**

Motivation diese Studie zu verfassen war meine Faszination an der Arbeit mit einer wenig bekannten und genutzten Technologie, die auf einem ganz natürlichen Vorgang – der Sonnenenergienutzung durch Photosynthese – basiert und die große, bislang nicht genutzte Potentiale bietet.

Ich denke, dass jetzt ein guter Zeitpunkt ist, Technologien voranzutreiben, die auf der Einbindung natürlicher Vorgänge in den menschlichen Lebensraum basieren. Umweltbewusstsein und die Nutzung erneuerbarer Energien wird von der Bevölkerung akzeptiert und als Notwendigkeit - vielleicht sogar als Chance - erkannt. Da die Speicherkapazität andere Kohlenstoffspeicher wie Wälder und Meere durch Rodung und erhöhte Temperatur vermindert wird, könnte mit der gezielten Algenzucht ein wichtiger neuer Speicher entstehen, der sich im Falle der gebäudeintegrierten Kultivierung dort befindet, wo der Kohlenstoff als Energieträger benötigt wird, nämlich in bebauten Gebieten.

Die Mikroalge kann so zu einem wichtigen Puzzlestein im städtischen Energiekreislauf werden. Verkürzung der Transportwege, Nutzung vorhandener Fassadenflächen zur Kultivierung statt Flächenkonkurrenz zu Ackerland, Hochwertigkeit der Algenbiomasse, deren vielseitige Nutzungsoptionen und Speichermöglichkeiten der gewonnenen Energie bieten hier enorme Potentiale.

## Kurzfassung

Das vorrangige Ziel der Gebäudeintegration von Photobioreaktoren (in Folge PBR) dieser Arbeit ist die Erweiterung ihrer Anwendungsgebiete in den Fachbereich der Architektur zur Verbesserung des Verhältnisses zwischen deren Kosten und Wertschöpfung.

Um die Potentiale der PBR-Fassade bestmöglich auszunützen, muss die Nachfrage nach Funktionen gegeben sein, die dem PBR neue Einsatzgebiete erschließen und dabei keine aufwändigen Adaptionen erfordern.

Um die Synergieeffekte zu optimieren, wird in dieser Arbeit vorgeschlagen, den PBR in einen größeren Stoff- und Energiekreislauf einzubinden, als den eines Einzelgebäudes.

Eine Einheit aus Aufenthaltsgebäuden und Lebensmittelproduktionsstätten kombiniert mit energetischer Infrastruktur und Abfallmanagement soll sich in seinen Stoff- und Energiezu- und -abflüssen zu einem geschlossenen Kreislauf ergänzen. Diese Einheit wird hier als „nachhaltige Stadtzelle“ bezeichnet.

Es wurden vier Varianten zur Integration in die Fassade entwickelt, die alle zur Verbesserung der thermischen Eigenschaften mit isolierender Verglasung und einem Latentwärmespeicher ergänzt wurden. Diese sind:

- das PBR-Wandelement für Skelettbau
- die PBR-Verkleidung für Massivbau
- die PBR-Doppelfassade zur akustischen Sanierung
- das PBR-„Klimaelement“ als Überhitzungsschutz.

Die folgenden möglichen Anwendungsgebiete für fassadenintegrierte PBRen wurden mittels Literaturvergleich, rechnerischer Abschätzung und persönlicher Beurteilung untersucht und bewertet:

Raumluftaufbereitung, Emissionsminderung, Abwasseraufbereitung, Gewinnung von Energie in Form von Wärme und Biomasse, Wärmespeicherung, thermischer Schutz, Wärmequelle, Wärmesenke, Beschattung, Lichtstreuung, Schall-, Witterungs- und Sichtschutz, Raumabschluss, Repräsentation, didaktische Wirkung und Gestaltung.

Hierbei zeigten sich die Anwendung zur Gewinnung von Energie in Form von Wärme und Biomasse, zur Wärmespeicherung, zum thermischen Schutz, als Wärmequelle, als Schall- und Witterungsschutz, als Raumabschluss und zur Repräsentation als besonders vielversprechend;

die Anwendung zur Raumluft- und Abwasseraufbereitung, zur Nutzung der didaktischen Wirkung und zur Gestaltung als geeignet;

und zur Emissionsminderung, als Wärmesenke, zur Beschattung und Lichtstreuung und als Sichtschutz, als bedingt geeignet.

## **Abstract**

The main goal of the building integration of photobioreactors (PBR) in this thesis is to extend their application areas into the field of architecture in order to improve their ratio between their cost and value creation.

To maximise the potential of PBR façades, there must be demand for functions providing new fields of application. However, expenses for adaption should be kept to a minimum.

In order to achieve optimised synergetic effects, this thesis proposes that integrating the PBR into a more expansive cycle of materials and energy will yield better results than if limited to a single building. A unit of buildings for residential and food industry purposes, combined with

energy infrastructure and waste management, would together create a functional cycle, enabled by the inflows and outflows of materials and energy. This thesis will refer to such a unit as "sustainable city cell".

Four options for integration in the façade were initially developed. All of these were equipped with insulating glass and latent heat storage for thermal improvement. These are:

- the PBR wall element for frame constructions
- the PBR cladding for solid constructions
- the PBR double façade for acoustic improvement
- the PBR "climate element" for protection against overheating

The following fields of application were then analysed and evaluated based on research, calculation estimations and personal judgement: ambient air treatment, emission reduction, wastewater treatment, energy production in the form of heat and biomass, heat storage, thermal insulation, heat source, heat sink, sun shading, light dispersion, noise, weather and view protection, partition, representation, didactic impact and design.

Hereby, the application areas of energy production in the form of heat and biomass, heat storage, thermal insulation, heat source, noise and weather protection, partition and representation were recognised as particularly promising options;

ambient air treatment, wastewater treatment, didactic impact and design as appropriate options;

and emission reduction, heat sink, sun shading, light dispersion and view protection as moderately appropriate options.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1	4	Gebäudeintegration .....	26
1.1	Einführung.....	1	4.1	Gebäudewahl.....	26
1.2	Problemstellung .....	1	4.1.1	Wahlkriterien .....	26
1.3	Lösungsansatz und Ziel der Arbeit.....	1	4.1.2	Die „nachhaltige Stadtzelle“ .....	27
1.4	Herangehensweise .....	1	4.2	Entwicklung der PBR-Fassade .....	29
1.5	Verwandte Arbeiten .....	1	4.2.1	Aufbau .....	29
2	Stand der Forschung .....	3	4.2.2	Funktionsschema, Kulturverlauf.....	30
2.1	Mikroalge.....	3	4.2.3	Berechnung der Paneelstärke .....	31
2.1.1	Nutzung.....	3	4.2.4	Fassadentypen .....	32
2.1.2	Kohlenstoffkreislauf .....	5	4.2.5	Ausformulierung und Detaillierung .....	33
2.1.3	Biologie .....	6	4.3	Fassadenfunktionen.....	38
2.1.4	Zucht Voraussetzungen .....	9	4.3.1	Fassade als multifunktionales Bauteil.....	38
2.1.5	Fazit .....	13	4.3.2	Demonstrationsgebäude .....	39
2.2	Photobioreaktor.....	13	4.3.3	Reinigungsfunktionen.....	39
2.2.1	Bautypen .....	14	4.3.4	Energetische Nutzung .....	41
2.2.2	Betrieb.....	15	4.3.5	Schutzfunktionen .....	48
2.2.3	Fazit .....	20	4.3.6	Optische Wirkung .....	49
3	Photobioreaktoren in Kunst & Architektur .....	21	4.3.6	Optimierungspotential.....	50
3.1	Verwirklichte Anwendungen .....	21	5	Beurteilung und Schlussfolgerung.....	51
3.1.1	BIQ / clever Treefrog .....	21	Abkürzungsverzeichnis .....	52	
3.1.2	H.O.R.T.U.S.....	22	Quellenverzeichnis.....	53	
3.1.3	Algaegarden .....	22	Abbildungsverzeichnis.....	58	
3.2	Nicht verwirklichte Entwürfe.....	23	Tabellenverzeichnis.....	59	
3.2.1	Perth Photobioreactors .....	23	Anhang .....	60	
3.2.2	Tube Photo-Bioreactor .....	23			
3.2.3	BiO2 Tower .....	24			
3.2.4	Chlorella-Pod .....	24			
3.2.5	Diplomarbeit „Membrana protegens aedificii“ ...	25			
3.2.6	Retrofit Resolution .....	25			

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung

Eine entscheidende Hürde in der Nutzung von Biomasse als Energieträger ist der hohe Platzbedarf zu deren Herstellung.

Mit der Zucht von Pflanzenbiomasse in Form von Mikroalgen in einem abgeschlossenen Zuchtbehältnis, dem PBR, entsteht die Möglichkeit, die Generierung der Biomasse von begrenztem fruchtbarem Ackerland auf bisher agrartechnisch nicht nutzbare Flächen zu übertragen.

Einen nächsten Schritt in der Effizienzsteigerung der Flächennutzung stellt die Integration der Zuchtbehältnisse in vertikale Fassadenflächen dar.

Gebäudeintegrierte PBRen werden durch die Übernahme von Fassadenfunktionen und gleichzeitiger Produktion von Biomasse zu einem integralen Hüllelement, das eine ressourcenschonende Maßnahme im Bauwesen darstellt.

Durch die Applikation einer Gebäudehülle, bestehend aus Zuchtbehältnissen zur Mikroalgenzucht, die sowohl Schutzfunktionen (Sonne, Schall, Wärme, Kälte, Witterung, Sicht), als auch die Versorgung des Gebäudes mit Frischluft, Brauchwasser sowie thermischer und elektrischer Energie übernimmt, entsteht ein Sanierungssystem für Altbauten, das durch seine Multifunktionalität den finanziellen, stofflichen und energetischen Mehraufwand der PBR-Integration in die Fassade ausgleichen soll.

## 1.2 Problemstellung

Als neue Technologie befinden sich PBRen zur Mikroalgenzucht größtenteils noch in einer Phase, in welcher die Errichtungs- und Betriebskosten ihren Ertrag übersteigen.

Um finanzielle und energetische Rentabilität zu erreichen, wurden bisher unterschiedliche Ansätze verfolgt. So wurde etwa die Produktivität der Alge durch Selektierung, Optimierung der Zuchtbedingungen und genetische Manipulation gesteigert, Errichtungs- und Betriebskosten des Reaktors durch den Einsatz von kostengünstigen

Materialien gesenkt sowie die Effizienz in Betrieb, Ernte und Biomasseaufbereitung erhöht. Der Betrieb der Reaktoren wird durch den Einsatz von Kohlendioxyd (CO<sub>2</sub>) aus Industrieanlagen kostengünstiger und es wird daran gearbeitet, Abwasser als Nährmedium nützen zu können, was eine weitere Kostenersparnis mit sich brächte. Zusätzlich wird in letzter Zeit ein Multipurpose-Ziel verfolgt, es wird also versucht, die Biomasse mehrfach zu nutzen.

## 1.3 Lösungsansatz und Ziel der Arbeit

Mein Ansatz ist, durch vielfältige Nutzung des Reaktors einen Wert zu generieren, welcher die Errichtungs-, Instandhaltungs- und Betriebskosten amortisiert.

Ziel dieser Arbeit ist die Schaffung eines Überblicks über mögliche Einsatzgebiete für gebäudeintegrierte PBRen und deren Nutzen sowie die Zusammenführung der Fachbereiche Architektur und Biotechnologie.

Dem Architekt als Gestalter und Vermittler zwischen Fachbereichen soll die vorliegende Arbeit als Wegbereitung, Anstoß, Ideensammlung und Motivation dienen, der Biomasseproduktion mit Mikroalgen ein neues Anwendungsgebiet zu erschließen und die Thematik PBR in seine Planung zu integrieren.

## 1.4 Herangehensweise

Da die Thematik der Mikroalgenzucht unter Architekten noch wenig verbreitet ist, soll der erste Teil der Arbeit diesbezüglich einen allgemein verständlichen Überblick geben.

Einleitend wird eine Übersicht über die Nutzungsmöglichkeiten des Rohstoffs Mikroalge, die ökologische Relevanz der Algen im Kohlenstoffkreislauf, ihre Biologie und die Zucht Voraussetzungen gegeben.

Anschließend wird der PBR als Verbindungsglied zwischen Organismus und Verwertung hinsichtlich möglicher Bauart und Betrieb betrachtet.

Auf dieser Basis wird eine Auswahl eines geeigneten Reaktortyps getroffen und Rahmenbedingungen abgesteckt, die eine Algenzucht ermöglichen. Anhand von Literaturvergleich, rechnerischer Abschätzung und persönlicher Beurteilung werden Gebäudetypen auf die

Eignung zur Integration der PBR-Fassade geprüft, Fassadentypen entwickelt und Fassadenfunktionen auf deren mögliche Übernahme durch die PBR-Fassade untersucht.

Eine abschließende Bewertung der Lösungsansätze rundet die vorliegende Studie ab.

## 1.5 Verwandte Arbeiten

Arbeiten die sich ebenfalls mit der Gebäudeintegration von PBRen beschäftigen sind unter anderem:

- die Diplomarbeit von Pola Dietrich, „membrana protegens aedificii“ (2011),
- die Masterarbeit von Karina Smorzewski, „Grüne Lunge“, Nutzung von Algenbiomasse und Photovoltaikmodulen zur Abdeckung des Energiebedarfs des Fußballstadions SC Freiburg (2011), und
- die Einführung zu Bioreaktorfassaden von Martin Kerner, „Gebäudeintegrierte Photobioreaktoren (PBR) als Energieerzeugungssystem bei gleichzeitiger Regulierung des Tageslichteintrages und des Wärmehaushaltes“ (2012).

Pola Dietrich entwickelte ein PBR-System unter Verwendung von Plattenreaktoren mit zwei Kammern, in denen parallel Mikroalgen und Purpurbakterien gezüchtet werden. Die Reaktoren werden innerhalb einer Doppelfassade angebracht und mittels Verschattungssystem, passiver Hinterlüftung und aktiver Temperierung über Wärmeaustausch mit dem Grundwasser unterstützt. Dietrich integrierte diese Entwicklung in den Gebäudeentwurf eines Künstlercampus [Dietrich 2011].

In der Masterarbeit von Karina Smorzewski werden die Ausmaße einer gebäudeintegrierten PBR- und Photovoltaik (in Folge PV) -Anlage berechnet um ein Fußballstadion mit der benötigten Energie zu versorgen. Hierzu wird die Umwandlung der Algenbiomasse in Biogas und dessen Verwertung mittels eines Blockheizkraftwerks (in Folge BHKW) zu thermischer und elektrischer Energie vorgesehen, die, speziell im Sommer, durch Strom der PV-Anlage ergänzt wird [Smorzewski 2011].

Martin Kerners Einführung zu Bioreaktorfassaden beschreibt ein Fassadenkonzept aus plattenförmigen PBRen, das auf Basis von Forschungsreihen an Pilotanlagen entwickelt wurde und am sogenannten „BIQ“ (siehe Kapitel 3.1.1) auf der IBA, der Internationalen Bauausstellung 2013 in Hamburg zum Einsatz kommt. Es werden ähnliche Ansätze, wie jene, die in dieser Arbeit untersucht werden, beschrieben. Auch Kerner beschäftigt sich mit der Wertsteigerung durch Mehrfachnutzung der PBR-Elemente, mit den Möglichkeiten zu deren Integration in die Fassade und mit der Frage, der Eignung unterschiedlicher Gebäudetypen. Diese Arbeit gibt einen kurzen Überblick über Forschungsansätze und Ideen, wobei eine genauere Betrachtung in dieser Schrift nicht veröffentlicht ist [Kerner 2012].

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Ideen und Ansätze zur Gebäudeintegration von PBRen zur Mikroalgenzucht werden auf Basis von Hintergrundrecherche und rechnerischer Abschätzung genauer betrachtet, beurteilt und die Ergebnisse möglichst offen dargelegt, um die daraus gewonnenen Informationen für zukünftige Planungen nutzbar zu machen. Die Arbeit versteht sich somit als Planungsgrundlage für die architektonische Umsetzung.

## 2 Stand der Forschung

In diesem Kapitel sollen Rahmenbedingungen für die architektonische Anwendung dargestellt werden, die durch Algen und PBRen vorgegeben werden.

### 2.1. Mikroalge

Mikroalgen eignen sich aus mehreren Gründen besonders gut zur Biomassebildung.

Die erhöhte Produktivität von Mikroalgen gegenüber Gefäßpflanzen gründet auf ihrem einfachen Aufbau, bei dem jede Zelle durch die fehlende Notwendigkeit der Investition in Stützelemente photosynthetisch aktiv sein kann [Schagerl 2012]. Die geringere Anzahl interner - miteinander konkurrierender - physiologischer Prozesse, ihr rascher Reproduktionskreislauf, geringere Anforderungen an Nährstoffversorgung und Anpassung an ein breites Lichtspektrum führt zu außerordentlich hoher Photosyntheseeffizienz der Mikroalgen [Gordon 2007].

Die höhere Biomasseproduktivität der Mikroalgen im Vergleich zu Gefäßpflanzen ergibt sich des Weiteren daraus, dass die Vermehrung überwiegend auf vegetativem Weg erfolgt. Vegetative Vermehrung in Form von Zellteilung resultiert in exponentiellem Wachstum, wodurch entsprechend höhere Produktivität erreicht wird [Rösch 2012].

Zudem ist in dem geschützten flüssigen Zuchtmedium die genaue Einstellung optimierter Wachstumsbedingungen, wie Temperatur, die Versorgung mit CO<sub>2</sub>, Mikro- und Makronährstoffen und die Einhaltung einer optimalen Zelldichte leichter möglich, wodurch sich die Vegetationsperiode theoretisch auf das gesamte Jahr ausdehnen lässt [Carvalho et al. 2006].

### 2.1.1. Nutzung

Durch die hohe Diversität der Mikroalgen in Aufbau, Zusammensetzung und Inhaltsstoffen sind deren Nutzungsmöglichkeiten entsprechend vielseitig.

Neben der Nutzung der Gesamtbiomasse oder einzelner Wertstoffkomponenten kann sowohl energetisch als auch stofflich von den Stoffwechselforgängen des Organismus profitiert werden [Costa & Morais 2010]. Potentiale der Algennutzung sind in Abb.2.1 dargestellt.

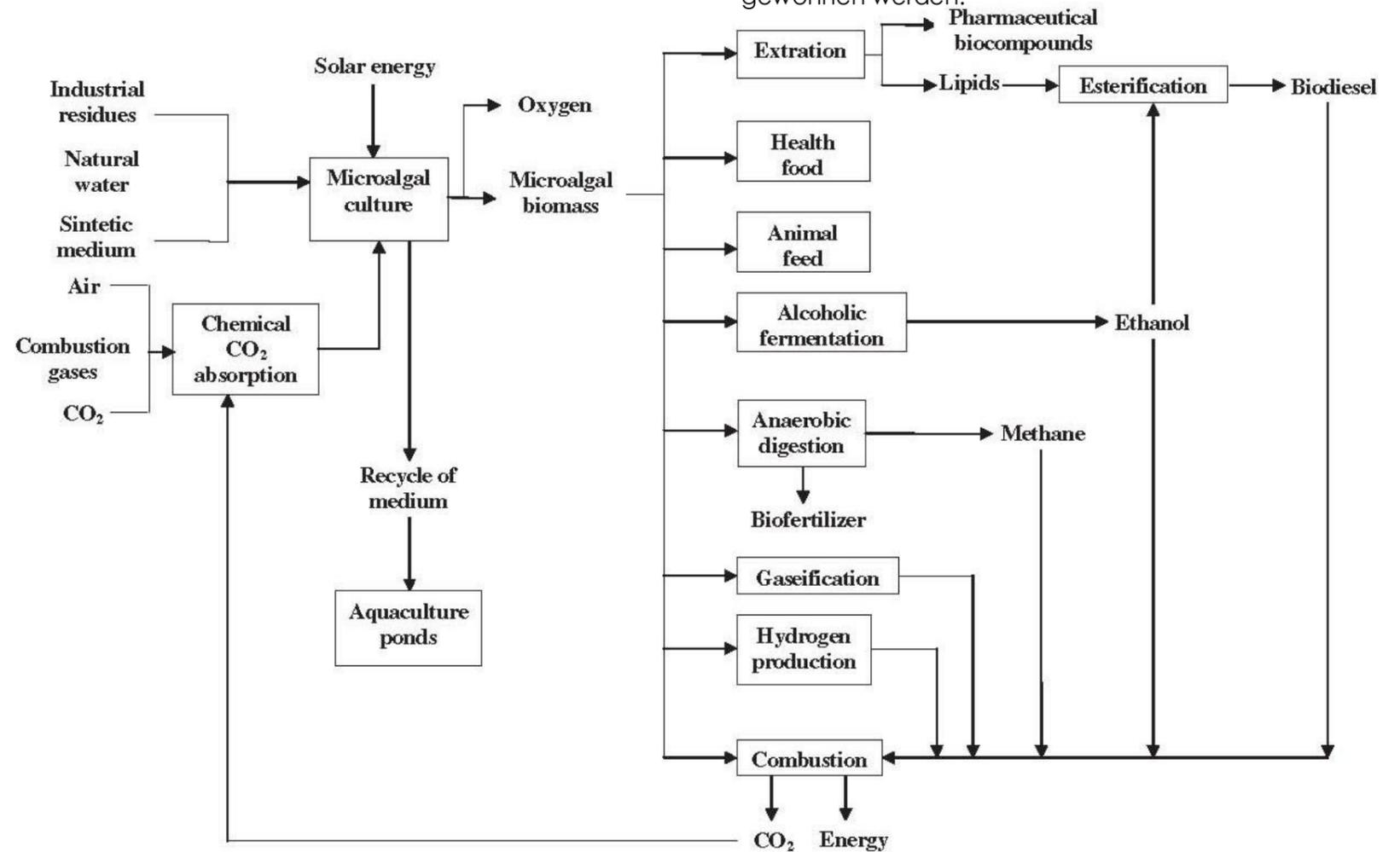


Abb. 2.1: Flussdiagramm von Mikroalgenbiomassepotentialen [Costa & Morais 2010]

Die **energetische Nutzung der Biomasse** erfolgt im Allgemeinen über die thermische Verwertung der Sekundär-Energieträger, also der Fermentationsprodukte wie Biogas(Methan)und Alkohol(Ethanol) sowie der Pflanzenöle und deren Produkten(Biodiesel). Direkte Verbrennung von Algenbiomasse ist ebenso denkbar, ist durch die Notwendigkeit der vorangehenden Trocknung auf maximal 50% Wassergehalt aber weniger effizient [Costa & Morais 2010]. Aus diesen verlustfrei speicherbaren Sekundär-Energieträgern kann bei Bedarf die gespeicherte chemische Energie in Form von thermischer, kinetischer und elektrischer Energie gewonnen werden.

Chemisch gespeicherte Sonnenenergie in Mikroalgenbiomasse ist durch den geringen Anteil an Zellulose und ihren hohen Anteil an gut aufzuspaltenden Aminosäuren, Lipiden und Kohlenhydraten gut nutzbar [Christi 2007].

Durch ihren teilweise hohen Ölgehalt, der stark abhängig von Art und Wachstumsbedingungen ist und bis zu 80% [Costa & Morais 2010] betragen kann, besteht besonders in Hinblick auf die Ölgewinnung zur Herstellung von diesel- und kerosinartigen Treibstoffen für das Transportwesen, besonders den Flugverkehr, großes Interesse.

Einige Forscher sehen die Mikroalge als einzigen Biomasselieferanten, der das Potential besitzt fossile Treibstoffe zu ersetzen. Dies wird durch ihre hohe Produktivität, deren Kultivierbarkeit auf Flächen, die nicht mit Feldfrüchten in Konkurrenz stehen, und die semikontinuierliche Ernte über den Jahresverlauf ermöglicht [Christi 2007, Schenk et al. 2008].

Für das in der Realisierung befindliche Wohngebäude mit PBR-Fassade „BIQ“ wird angenommen, dass bei einer Biomasse-Produktion von  $15\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  und Tag mit seiner gut  $200\text{m}^2$  großen PBR-Fassade rund 4.500 kWh an Biogas aus Algenbiomasse gewonnen werden kann [biq 2012].

Zur optimalen Ausnutzung der in der Biomasse gespeicherten chemischen Energie kann eine kombinierte Umwandlung in die gewünschten Formen Wärme (bzw. Kälte), Bewegung und Strom mittels Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit technischer Umsetzung in einem BHKW erfolgen. Als BHKW bezeichnet man eine kompakte Einheit aus einem Kraftwerk, bestehend aus Motor und Generator, mit angebundener Abwärmenutzung. Dabei entstehende Rauchgase

können direkt zur Versorgung der Algen mit  $\text{CO}_2$  und Wärme verwendet werden (vergleiche Kerner 2012).

Neben der Menge an Hilfsenergie die zur Kultivierung der Mikroalgen benötigt wird, ist die Ernte und Weiterverarbeitung meist mit hohem Aufwand verbunden. Produkte, die sich durch einen geringen Verarbeitungsgrad auszeichnen, wie Biomasse als Nahrungsergänzung oder Biogas, zu dessen Nassvergärung das Substrat einen Wassergehalt von über 85% haben kann, sind vorteilhaft. Bei dieser Art der Nutzung können langwierige und kostenintensive Extraktionsverfahren wegfallen, etwa das Aufbrechen der Zellmembranen zur Extraktion von Wertsstoffen [Molina Grima et al. 2002].

Vorteile der Mikroalgenzucht in PBRen zur Produktion von Biomasse gegenüber der Nutzung von Gefäßpflanzen sind folgende (abgewandelt nach Schenk et al. 2008):

- Die Ernte erfolgt kontinuierlich über die Vegetationsperiode mit verringerten saisonalen Schwankungen durch gute Steuerungsmöglichkeit des Zuchtumfelds.
- Abhängig von der kultivierten Algenart und der vorgesehenen Verwendung der Biomasse kann Salz- und/oder Abwasser als Kulturmedium genutzt werden.
- Algenkultivierung verbindet die Produktion hochwertiger erneuerbarer Rohstoffe für Treibstoff mit der Speicherung von  $\text{CO}_2$  vor dessen Eintritt in die Atmosphäre.
- Die Gewinnung ungiftigen und biologisch abbaubaren Treibstoffs ist möglich.
- Die Photosyntheseeffizienz und dadurch das Wachstum von Algen sind deutlich höher als jene von Gefäßpflanzen.

### **Nicht-energetische Nutzung der Algenbiomasse**

Um ökonomische Effizienz zu erreichen, erfolgt eine Mischnutzung mit Produkten die auf dem Weltmarkt hohe Preise erzielen.

Eine hochwertige Nutzung erfolgt als getrocknete Biomasse in Pulver- und Tablettenform als Nahrungsergänzungsmittel für Menschen und Nutztiere speziell in der Aquakultur. Sie haben hohen Nährwert und sind je nach Art reich an Proteinen und mehrfach ungesättigten Fettsäuren wie den essentiellen Fettsäuren DHA (Docosahexaensäure) und EPA (Eicosapentaensäure), wobei letztere häufig Babynahrung zugesetzt wird.

Phycobiliproteine und Carotinoide werden als natürliche Farbstoffe in Kosmetika, Lebensmittel und Medikamente eingesetzt. Erstere färben stark rot und blau, letztere rot, orange und gelb. Carotinoide wie Astaxanthin werden in der Aquakultur verfüttert um eine rötliche Färbung des Fleisches zu erzielen.  $\beta$ -Carotin wird als gelboranger Farbstoff eingesetzt und dient als Vitamin A-Vorstufe.

Der mit Abstand absatzstärkste Bereich ist aktuell der von Nahrungsergänzungsmitteln und Nahrungsmittel-Zusatzstoffen.

Als Nahrungsmittel werden Mikroalgen bisher nur in einigen Ländern wie in China und dem Tschad genutzt. Da sie zum Anbau keine fruchtbaren Böden benötigen, besitzen sie das Potential, den Welthunger zu vermindern.

Zudem kann eine Nutzung als Düngemittel entweder direkt als Algensuspension oder nach Nutzung der chemisch gespeicherten Energie als Fermentationsrest erfolgen. Eine längerfristige Kohlenstoffbindung erfolgt durch das Einarbeiten der Algen in Form von

Pflanzkohle in die Humusschicht zur Erhöhung der Nährstoffspeicherung im Boden.

Algen können als Rohstoff für Basischemikalien genutzt werden, die wiederum als Ausgangsstoff für Industriechemikalien dienen.

Erste Einsätze erfolgen auch im Bereich von Baumaterialien als Füllstoff [Milledge 2010, Carlsson et al. 2007]

### **Energetische Nutzung des Algenorganismus**

Als „**melken**“ wird die Exkretion von Wasserstoff, Ethanol oder Öl von der lebenden Algenkultur bezeichnet, die ein in der Entwicklung befindlicher Ansatz ist. Mit Hilfe gentechnischer Veränderungen der Mikroalgen oder dem Aussetzen einer Stresssituation wie Nährstoffmangel oder elektrischen Impulsen, soll die Alge dazu gebracht werden eingelagerte Reservestoffe an die Umgebung abzugeben, von wo aus die Ernte einfacher ist als aus der Alge selbst [Rösch 2012, Ramachandra et al. 2009].

### **Nicht-Energetische Nutzung des Algenorganismus**

Bei der Aufbereitung von Abwässern können Algen Reinigungsprozesse übernehmen, die ansonsten einen hohen Energieaufwand hätten [Wang et al. 2009].

Schneider (2011) untersuchte das Potential der CO<sub>2</sub>-Bindung, „Carbon Capture and Conversion“. Mikroalgen können zur Kohlenstoffsequestrierung aus Rauchgas etwa aus Kraftwerken verwendet werden. Nach Nutzung der Abwärme kann das Rauchgas - je nach Verträglichkeit der Algenart - auch ungereinigt und verdichtet direkt als Nährgas in die Reaktoren eingeleitet werden und wird nicht wie im Falle der Aufnahme durch Landpflanzen erst in die Umgebungsluft abgegeben, wo es zur Erhöhung der

CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre beiträgt [Schneider 2011].

Die Menge des emittierten CO<sub>2</sub> kalorischer Kraftwerke ist allerdings so hoch, dass die vollständige Bindung durch alleinige Mikroalgenzucht nicht durchführbar ist. Selbst im Falle sehr optimistischer Schätzungen bräuchte ein sehr kleines Kraftwerk mit jährlicher CO<sub>2</sub>-Emission von zwei Millionen Tonnen eine 5000ha-Anlage zur vollständigen CO<sub>2</sub>-Bindung [Lubbadeh 2008].

Ein Unternehmen kann durch CO<sub>2</sub>-Sequestrierung Emissionen vermeiden, die dann im Zuge des EU-Emissionshandelssystem als Zertifikate verkauft werden können. Der Preis pro Tonne lag im Februar 2013 bei rund 6,65€ [e&t 2013]. Die hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration der Abgase verglichen zu der der Atmosphärenluft regt die Biomasseproduktion durch verringerte Photorespiration an, wodurch die Aufnahme und Speicherung des Kohlenstoffs und das Wachstum der Mikroalgen beschleunigt werden.

Die Art der Nutzung ist in hohem Maß von der verwendeten Algenart abhängig. Entscheidungskriterien für die Selektion der geeigneten Art geben Carlsson et al. (2007), Schneider (2011) und Schagerl (2012) wie folgt an: Kultivierbarkeit in breitem Temperaturspektrum, Robustheit der Alge gegen Scherkräfte, hohe Produktivität von Biomasse und deren gewünschten Bestandteile, hohe Lipidkonzentration aufgrund der höheren Energiedichte, unproblematische Kultivierung, Ernte und Weiterverarbeitung, vielseitige Verwendbarkeit der Algenbiomasse, ausnehmend gute CO<sub>2</sub>-Verträglichkeit, geringe Anfälligkeit auf Kontamination durch Fremdorganismen und geringe Neigung zu Wandwachstum und Absetzen am Reaktorboden.

## **2.1.2. Kohlenstoffkreislauf**

Prokaryotische Mikroalgen (ohne Zellkern) konnten sich vor rund 700 Mio. Jahren auf der Erde durchsetzen und ermöglichten durch ihr Stoffwechselprodukt Sauerstoff höheres Leben. Gemeinsam mit eukaryotischen Algen (mit Zellkern) sind sie heute für ca. 45% der globalen O<sub>2</sub>-Produktion verantwortlich [Schagerl 2012] und stellen einen der wichtigsten CO<sub>2</sub>-Konsumenten dar.

Im globalen System befindlicher Kohlenstoff unterliegt einem Kreislauf (siehe Abb. 2.2), wobei das in der Atmosphäre (gasförmige Hülle der Erde) befindliche CO<sub>2</sub> in erhöhter Konzentration, als sogenanntes Treibhausgas, zur globalen Erwärmung beiträgt. Im Vergleich zum Wert des vorindustriellen Zeitalters von 280ppm liegt der aktuelle Wert zwischen 350 und 380ppm, die als kritisch erachtete Schwelle wird bei 450ppm angesetzt [IPCC2007].

Wird der Kohlenstoff in Lithosphäre (Erdkruste und äußerer Erdmantel), Hydrosphäre (ober- und unterirdische Wasservorkommen) oder Biosphäre (von Lebewesen bewohnter Raum) gespeichert, sinkt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre.

Langzeitspeicher sind organische fossile Kohlenstoffressourcen wie Erdgas, Erdöl und Kohle, und durch Sedimentation entstehende anorganische Karbonate.

Kurzfristige Speicherung findet durch Einbindung in pflanzliche Biomasse statt, die den fixierten Kohlenstoff nach Wochen, Monaten oder Jahren der

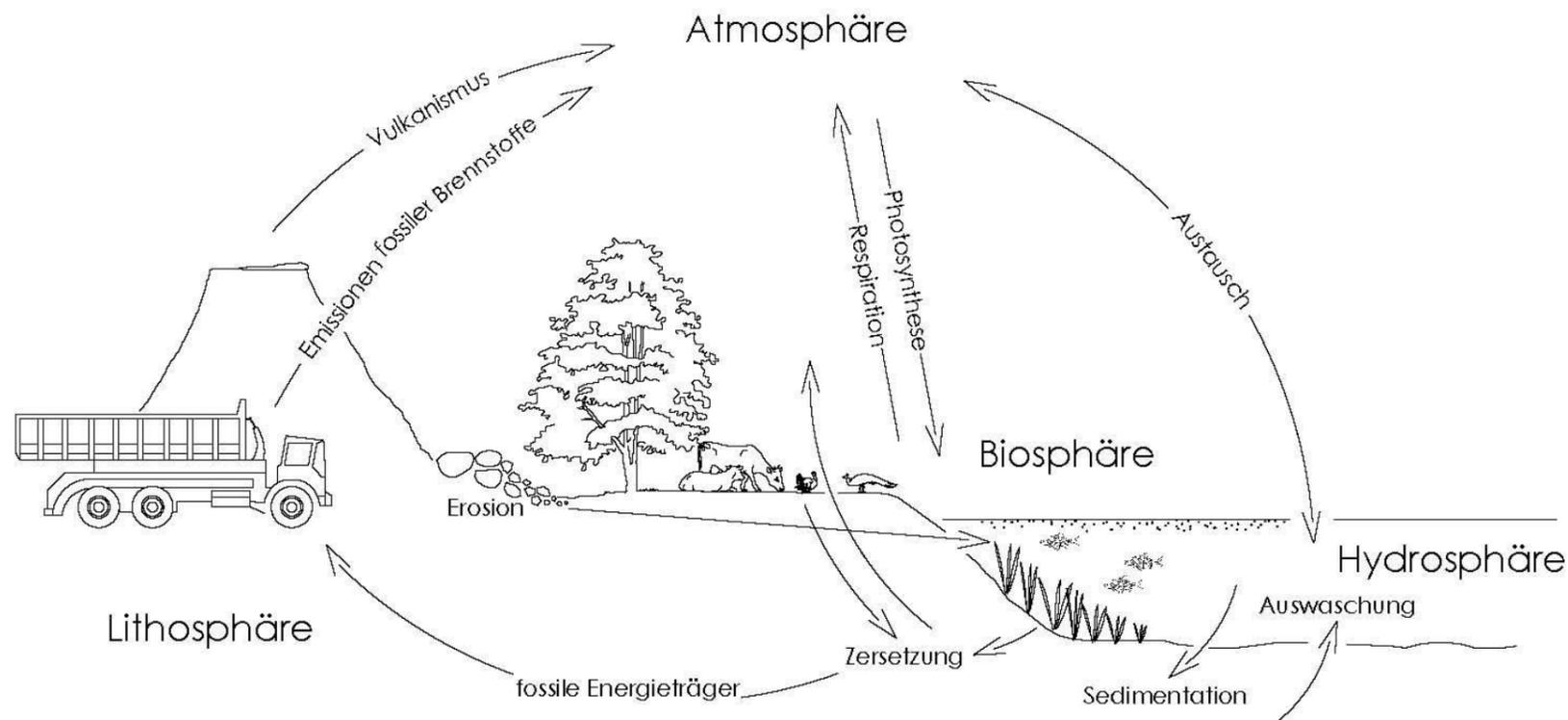


Abb. 2.2: Schematische Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs des globalen Systems

Vegetationsperiode wieder abgibt. Wird Biomasse als Energieträger genutzt, und deren Kohlenstoffemission aber nicht sofort wieder in die Atmosphäre abgegeben, sondern in konzentrierter Form zu beschleunigter Biomasseproduktion verwendet, erfolgt sozusagen CO<sub>2</sub>-Recycling durch einen CO<sub>2</sub>-neutralen Kreislauf. Für die gleiche Menge an emittiertem Kohlenstoff kann so die daran gebundene Energie mehrfach genutzt werden. Sonnenenergie wird über den biochemischen Prozess der Photosynthese in Biomasse gespeichert, wobei grob gesagt CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O zu Zucker (Glucose C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) umgewandelt werden, der dann zu weiteren Stoffwechselprodukten, wie Stärke, Proteinen und Fett, umgebaut wird.

### 2.1.3. Biologie

#### 2.1.3.1. Systematik

Der Begriff „Alge“ beschreibt im biologischen Sinn keine systematische Einheit, der Terminus hat funktionelle Bedeutung. Algen sind Organismen, die überwiegend oxygene (=sauerstofferzeugende) Photosynthese betreiben, deren Thalli (=Vegetationskörper) nicht in Blatt, Stamm und Wurzel untergliedert sind und die keine Leitgewebe besitzen. Es gibt kein einziges positives Merkmal, welches ausschließlich Algen haben, daher umfasst der Begriff eine künstliche Gruppe. Algen kommen in vielen Biotopen vor und besiedeln auch Lebensräume, die zunächst nicht mit Wasser in Verbindung gebracht werden. Neben aquatischen Ökosystemen in Salz-, Brack- und Süßwasser sind Algen

auch im Boden, auf Schnee und Gletschereis, in Wüsten, auf Felsen oder sogar auf der menschlichen Haut anzutreffen. Zusätzlich stellen Algen wichtige Symbiosepartner etwa in Einzellern, Korallen und Flechten dar [Schagerl 2012].

Algen decken ein enormes Größenspektrum ab, von unter einem Mikrometer bis zu vielen Meter langen Tangen. Sowohl Mikroalgen (ca. 1- 50µm), als auch Makroalgen haben wirtschaftliche Bedeutung. Für PBRen eignen sich Mikroalgen, die frei schwebend leben und so in einer Nährlösung als Wachstumsmedium gehalten werden können [Wagening 2013].

Die Gruppe der Algen setzt sich zwar hauptsächlich aus Eukaryonten zusammen, schließt aber auch die Blaualge mit ein. Die zu den Bakterien zählenden Blaualgen (Cyanobakterien) besitzen im Gegensatz zu höher entwickelten Lebensformen wie Gefäßpflanzen keinen Zellkern und keine Organellen wie Chloroplasten und Mitochondrien (sie zählen zu den Prokaryoten).

Algengruppen (=Abteilungen) werden u.a. nach ihrer chemischen Zusammensetzung und der Ultrastruktur unterschieden. So spielen etwa Speicherstoffe, Photosynthesepigmente oder Zellwandbestandteile eine zentrale Rolle für die Großsystematik. Ständige Weiterentwicklung der Einteilungsstruktur und Unstimmigkeit unter den Wissenschaftlern führen allerdings zu uneinheitlichen Angaben in der Literatur [Botanik 2012].

Algenabteilungen werden in Klassen und weiter in Arten unterteilt. Schätzungen über eine Anzahl der existierenden Arten gehen von weit über 50.000 [Mata et al. 2010] bis zu mehreren Millionen [Rösch 2012].

Abteilungen werden unterteilt in:

- Rhodophyta (Rotalgen)
- Euglenophyta (Schönaugengeißler)
- Chlorophyta (Grünalgen)
- Streptophyta (Armleuchteralgen und Gefäßpflanzen)
- Heterokontophyta (z.B.: Braunalgen, Goldalgen und Kieselalgen)
- Dinophyta (Panzerflagellaten)
- Cyanoprokaryota (Blaualgen)
- Cryptophyta (Schlundgeißler)

[Botanik 2012, Wissenschaft-Online 2013, Schagerl 2012]

Die meisten Abteilungen haben sowohl Vertreter der Mikro- als auch der Makroalgen, wobei sich nur Mikroalgen für die Kultivierung im PBR eignen.

Panzerflagellaten, Schönaugengeißler und Schlundgeißler sind meist einzellig; Rot-, Grün- und Braunalgen sind meist vielzellig; Grün- und Rotalgen haben auch einzellige Vertreter [Gießen 2012].

Je nach Gruppenzugehörigkeit, Art und Wachstumsbedingungen haben Algen unterschiedliche Inhaltsstoffe in variablen Mengen, beispielsweise hohen Proteingehalt mit dem kompletten Spektrum essentieller Aminosäuren, Kohlenhydrate hauptsächlich in Form von komplexen Heteropolysacchariden, ungesättigte Fettsäuren, Mineralstoffe und Spurenelemente wie Kalzium, Phosphor, Eisen, Mangan, Zink, Chrom und Selen, Pigmente wie Chlorophyll, Carotinoide und Phycobiliproteide [Bley 2009, Schagerl 2012].

### 2.1.3.2. Zellaufbau

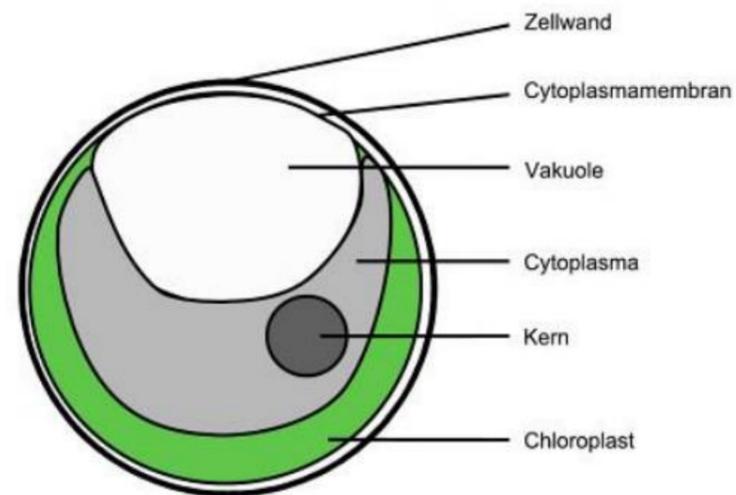


Abb. 2.3: Schematische Darstellung des Zellaufbaus der Grünalge Chlorella [Cypionka 2010]

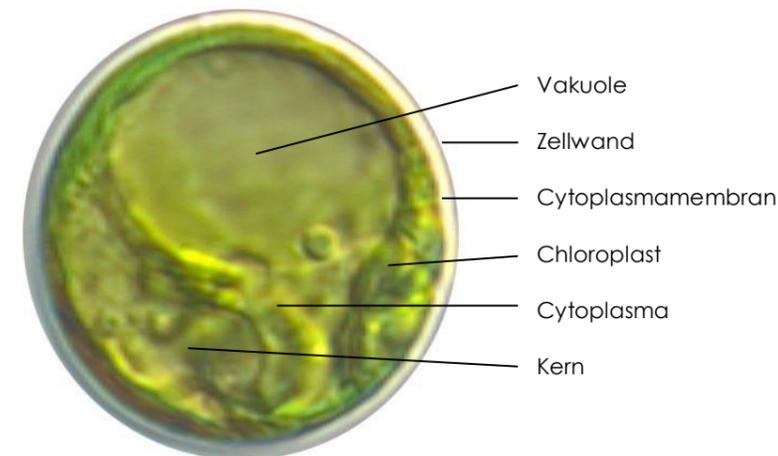


Abb. 2.4: Lichtmikroskopische Aufnahme der Grünalge Chlorella ermerstonii

Abbildungen 2.3 und 2.4 zeigen den Aufbau einer Grünalge.

Die Zellwand dient dem Schutz, etwa gegen Scherkräfte oder als Widerlager gegen osmotische Schwankungen.

Die Cytoplasmamembran dient dem spezifischen Austausch von Substanzen mit der Umwelt und grenzt das

Zellinnere von der Umwelt ab – somit können Gradienten entgegen dem Konzentrationsgefälle aufgebaut werden.

Das Cytoplasma ist die Zellsubstanz, in dem die Zellorganellen eingebettet sind.

Die Vakuole ist ein mit Flüssigkeit gefülltes Organell, das hauptsächlich der Stabilisierung und Lagerung von Speicher- und Abfallsstoffen dient.

Der Chloroplast ist ein membranumschlossenes Organell, in dem die Photosynthese abläuft.

Der Zellkern enthält das Erbmateriale, die DNA. Weitere DNA ist in den Organellen zu finden [Cypionka 2010].

### 2.1.3.3. Energiequelle & Energiespeicherung

Die meisten Mikroalgen sind photoautotroph, das heißt, sie nutzen Licht als Energiequelle, wobei sie über Photosynthese Kohlenstoff aus anorganischen Verbindungen wie CO<sub>2</sub> zum Aufbau von Biomasse aufnehmen. Viele Arten sind in der Lage von photoautotrophem zu heterotrophem Wachstum zu wechseln und gewinnen dann ihre Energie und Wachstumsbausteine über organische Kohlenstoffverbindungen, wie etwa Glukose aus dem Umgebungsmedium. Algen, die parallel beide Arten der Energiegewinnung nutzen können, nennt man mixotroph [Carlsson et al. 2007].

Bei der Photosynthese werden mit Hilfe von Strahlungsenergie aus energiearmen Stoffen (wie hauptsächlich CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O) energiereiche Kohlenhydrate synthetisiert. Die vereinfachte Summenformel der Gesamtgleichung der oxygenen Photosynthese (ohne Zwischenschritte) ist:



Durch Energiezufuhr in Form von Licht entstehen aus Kohlendioxid und Wasser → Glucose und Sauerstoff

Die Photosynthese kann in zwei Phasen unterteilt werden:

1) Die Licht-abhängige Reaktion:

Licht wird über Antennenkomplexe zu aktiven Chlorophyll-Molekülen geführt und diese dadurch angeregt. Energie, die genutzt wird, kann in Form von ATP (Adenosintriphosphat) und NADPH (Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat) gespeichert werden. Überschüssige Energie (bei Licht mit einer Wellenlänge unter 680nm) wird als Fluoreszenz und/oder Wärme abgegeben.

2) Die Dunkelreaktion:

Im Calvin-Kreislauf reagieren die Zwischenprodukte ATP und NADPH mit CO<sub>2</sub> mithilfe der Elektronenquelle Wasser und der Energiequelle Licht zu Glucose [Carvalho et al. 2010].

Pigmente sind hauptverantwortlich für die Absorption des Lichts. Je nach Pigmentzusammensetzung in den Mikroalgen werden unterschiedliche Teile des sichtbaren Lichtspektrums genutzt. Die anderen Anteile werden reflektiert und sind somit farbgebend oder passieren die Zellen. Die wichtigsten Pigmente hierbei sind:

- Chlorophylle, sie erscheinen grün und absorbieren Licht mit Wellenlängen zwischen 450-475nm (blau-blauviolett) und 630-675nm (orange).
- Phycobiline, sie sind blau oder rot und absorbieren Licht im Bereich von 500-600nm (blaugrün, grün, gelb, orange).
- Carotinoide, sie sind gelb oder orange und absorbieren Licht im Bereich von 400-500nm (violett, blau, grün) [Masojídek et al. 2004.]

Die direkte Umwandlung von Strahlungsenergie in chemische Energie erfolgt über Chlorophyll a, das sämtliche Algengruppen besitzen. Chlorophyll b und c fungieren wie Carotinoide und Phycobiline als Antennenpigmente und absorbieren unterschiedliche Wellenlängen. Einige Carotinoide (wie z.B. Zeaxanthin und Diatoxanthin) sind zusätzlich essentielle Schutzpigmente gegen überschüssiges Licht [Carvalho et al. 2010, Schagerl 2012].

Licht kann als Welle oder Teilchen behandelt werden.

Als Welle ist es Teil der elektromagnetischen Strahlung im Bereich von 400-750nm (siehe Abb.2.5).

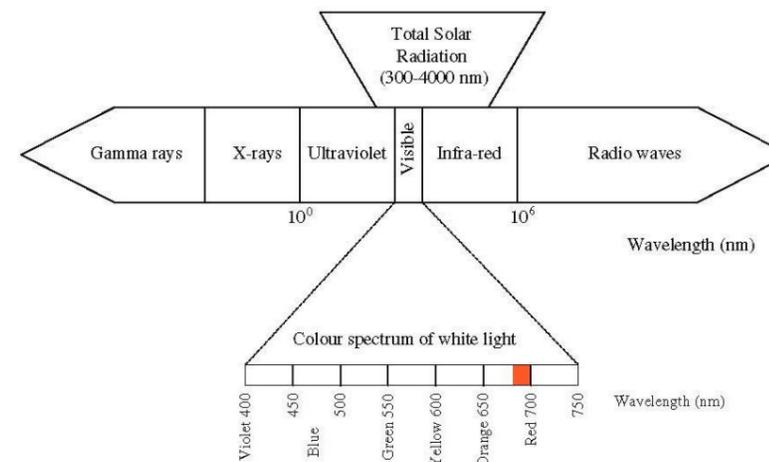


Abb. 2.5: elektromagnetisches Spektrum mit detaillierter Darstellung des sichtbaren Lichts und Markierung im Bereich von 680-700nm [Carvalho et al. 2010, leicht verändert]

Ein Lichtteilchen bzw. Photon enthält eine bestimmte, von der Wellenlänge abhängige Menge an Energie. Photonen mit geringer Wellenlänge haben mehr Energie als solche mit hoher. Ein Chlorophyll-a-Molekül benötigt für die Photosynthesereaktion ziemlich genau die Menge an Licht, die ein Photon mit einer Wellenlänge von 680nm bereitstellt und erfüllt die Energieversorgung somit am effizientesten. Bei geringeren Wellenlängen wird das Chlorophyll zwar auf höhere Anregungszustände

gehoben, diese sind aber zu kurzlebig, um daraus chemische Energie zu gewinnen [Schagerl 2012].

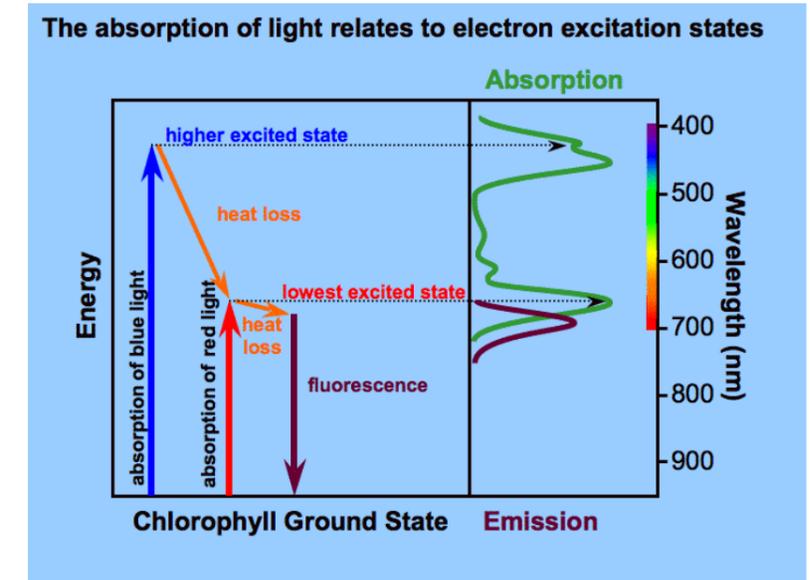


Abb. 2.6: Lichtabsorption von Chlorophyll in Bezug auf Elektronenanregung [Koning 1994]

Abb.2.6 zeigt die Absorptionsmaxima von Chlorophyll im blauen und roten Spektrum und den minimal nötigen Anregungszustand zur Photosynthese für Licht im Wellenlängenbereich von 680nm. Die Energiedifferenz zwischen blauem und rotem Licht wird als Überschuss in Form von Wärme und Fluoreszenz abgegeben. Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass der Großteil des sichtbaren Lichts die Algenzelle mit Energie überversorgt [Koning 1994].

Die Photosyntheseeffizienz ist das Verhältnis des einfallenden Lichtes zu chemisch in Biomasse umgewandelter Energie. Sie liegt laut Rösch (2012) bei schnellwachsenden Feldpflanzen bei rund 1%, bei Mikroalgen bei rund 5%. Abb.2.7 veranschaulicht die Verluste zwischen solarem Input und potentiell produzierter Biomasse. Das Nutzungspotential der einfallenden Sonnenenergie liegt bei rund 9%. Vom

gesamten solaren Eintrag wird die photosynthetisch nicht aktive Infrarot- und Ultraviolettstrahlung, Ineffizienz durch Photonen mit geringer Wellenlänge und Verluste durch Stoffwechselforgänge abgezogen [Wageningen 2013].

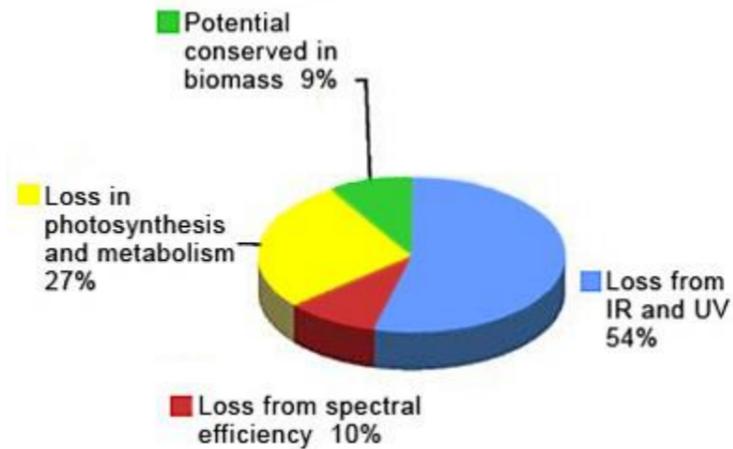


Abb. 2.7: Energiehaushalt der Mikroalgen Biomasseproduktion [Wageningen 2013]

## 2.1.4. Zuchtbedingungen

### 2.1.4.1. Lichtenergie

In der Phykologie, der Algenkunde, wird Licht im Allgemeinen in der Einheit  $\mu\text{mol}_{\text{Photonen}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} = \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (E steht für Einstein) angegeben. Sie kann näherungsweise nach Tab.2.1 in  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$  und Lux umgerechnet werden.

Tab. 2.1: (Operationelle) Umrechnungsfaktoren für Tageslicht (nach Nusch aus Schwöbel 1994)

	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	lux	$\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	1	240	4,6
lux	0,00417	1	0,0195
$\mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	0,217	51	1

Bei der Umrechnung ist besonders der betrachtete Spektralbereich zu beachten. Die oben angegebenen Werte gelten für Sonnenlicht. Licht ist der sichtbare Teil der Sonnenstrahlung und umfasst etwa die Hälfte der gesamten eingestrahlteten Energie. Für eine Umrechnung in

Lux bzw. eine Betrachtung photosyntheserelevanter Strahlung ist nur der sichtbare Anteil der Sonnenstrahlung zu berücksichtigen. Sichtbare Strahlung, also Licht mit einem Spektralbereich von 400nm bis 750nm, überschneidet sich weitestgehend mit der photoaktiven Strahlung (in Folge PAR für photosynthetic active radiation) für die ein Bereich von 400nm bis 700nm [Posten 2009, Wang et al. 2008] und ein Anteil von etwa 45% [Wang et al. 2008] am gesamten Strahlungsspektrum angegeben wird.

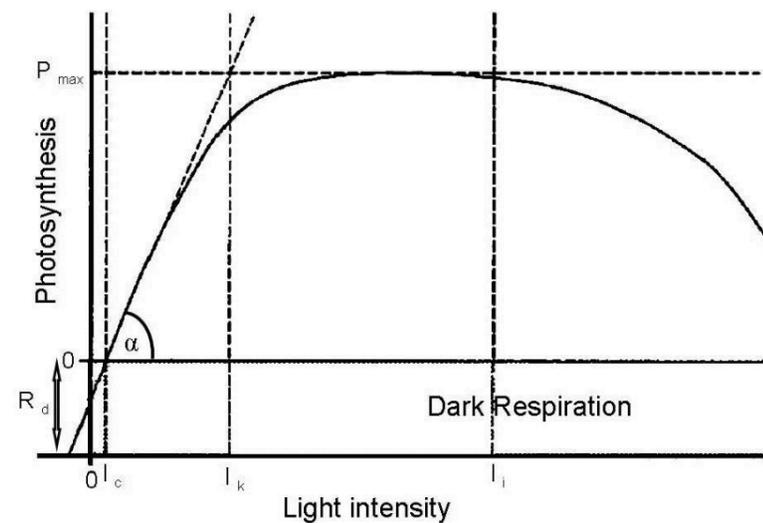


Abb. 2.8: Lichtsättigungskurve von Photosynthese und Lichtintensität [Grobelaar 2006]

Die Lichtsättigungskurve in Abb.2.8 zeigt die Photosynthesereaktion, die auf eine bestimmte Lichtintensität erfolgt. Einfallende Lichtenergie wird über Photosynthese chemisch als Biomasse gespeichert. Bis zur Sättigungsgrenze gilt in linearem Anstieg: je höher die Lichtintensität, desto höher ist die Photosynthese und somit Wachstumsrate und Produktivität bis zu dessen Maximum  $P_{\text{max}}$ . Überschüssige Energie wird ab  $I_k$ , der Lichtintensität beim Übergang von Lichtlimitierung zu Lichtsättigung als Wärme und Fluoreszenz abgeleitet, wobei die Produktivität auch bei höherer Lichtintensität konstant bis

zur Grenze  $I_l$  bleibt, ab der Lichtinhibition, also Hemmung durch zu starke Bestrahlung eintritt. Von da an fällt die Wachstumsrate mit steigender Lichtintensität ab, es kann zu Zellschädigung und dem Absterben der Zellen durch Photoinhibition und Photooxidation kommen [Illuz et al. 2011].

Photoinhibition ist die Hemmung der Alge durch zu hohen Lichtfluss, wodurch es zu verringertem Wachstum und Schädigung der Zelle bis zu deren Absterben kommen kann. Photooxidation ist eine Art der Hemmung, bei der sich aggressive Lipid-Peroxide bilden, wenn die Ableitung der überschüssigen Energie über Carotinoide oder durch Fluoreszenz nicht mehr ausreicht und diese an  $\text{O}_2$  weitergegeben werden. Dabei kommt es zur Bildung von stark oxidierenden Sauerstoffradikalen, die unter anderem die Zellmembranen zerstören. Photoakklimatisation ist die Anpassung der Alge an gegebene Lichtverhältnisse zu deren optimaler Nutzung. Sie erfolgt durch räumliche Anordnung der Pigmentmoleküle und Anpassung der Menge der Antennenpigmente [Schagerl 2012, Carvalho et al. 2010].

Der Winkel  $\alpha$  in Abb.2.8 vergrößert sich bei schwacher Photoakklimatisation; Lichtsättigung und Photoinhibition treten also bei geringerer Lichtintensität ein als bei entsprechend stärker akklimatisierten Algen, die bei höherem  $P_{\text{max}}$  höhere Lichtintensität vertragen.

Respiration (=Atmung) entspricht etwa der gegenteiligen Reaktion der Photosynthese. Es kommt dabei unter  $\text{O}_2$ -Aufnahme und  $\text{CO}_2$ -Abgabe zu Biomasseabbau. Die unterhalb des Werts der Lichtlimitierung  $I_c$  eintretende Atmung  $R_d$  tritt bei stärker akklimatisierten Algen in höherem Maß auf, als bei schwächer akklimatisierten [Illuz et al. 2011].

Man unterscheidet zwischen Brutto- und Netto-Biomasseproduktion, wobei beim Nettowert Biomasseverluste durch Respiration miteingerechnet werden. Der Prozentsatz des Verlusts ist am geringsten bei idealen Temperaturbedingungen mit ca. 20% der BM-Tagesproduktion [Richert 1999].

$I_c$ , also die Lichtintensität, bei welcher die Atmungsaktivität der Alge durch den Photosyntheseprozess kompensiert wird, BM-Abbau also dem BM-Aufbau entspricht, liegt bei etwa 1% der einfallenden Strahlung bei unbedecktem Himmel und maximalem Sonnenstand [Schagerl 2012]. Durch relativ geringe künstliche Beleuchtung kann so nächtlichen Biomasseverlusten entgegengewirkt werden, wobei die dadurch erhaltene Biomasse den Energieaufwand der Beleuchtung nicht decken kann. Dient die Beleuchtung also ausschließlich der Biomasseerhaltung ist diese aus energetischer Sicht nicht gerechtfertigt. Eine mögliche Nutzungskombination wäre allerdings Straßenbeleuchtung, die so positioniert wird, dass auch die Algenfassade profitieren kann.

Vollmondlicht, das in einem Winkel von  $60^\circ$  auftrifft, hat 0,68lux [Schwörbel 1994] und entspricht etwa 0,0007% der maximalen Strahlung. Somit hat es keinen relevanten Nutzen zur Vorbeugung von Biomasseverlusten.

Die optimale Lichtstärke ist die Menge an Photonen, bei der die Photosynthese voll ausgelastet ist, ohne dass bereits hemmende Effekte auftreten. Sie ist neben der Akklimatisation unter anderem abhängig von der Art der Alge, der Temperatur der Suspension, der Phase im Wachstumszyklus, der Vermischungsrate und der Selbstbeschattung beeinflusst durch Kulturtiefe und Biomasse-Konzentration sowie der Nährstoffversorgung, Art der Lichtquelle und Dauer der Bestrahlungsperiode.

Die Sättigungslichtstärke sinkt dabei mit fallender Temperatur [Kommareddy & Anderson 2004, Carvalho et al. 2010].

Als Sättigungsstrahlung von Sonnenlicht wird häufig ein Bereich von  $200-400\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  angegeben, was einem photoaktiven Anteil von ca.  $100$  bis  $200\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  und 5-10% der Einstrahlung an einem sonnigen Sommertag entspricht [Carvalho et al. 2010, Schwörbel 1994].

Diese Lichtmenge muss allerdings nicht kontinuierlich bereitgestellt werden. Studien belegen gleiche Produktivität bei gleicher Photonenzahl, egal ob die Bestrahlung gleichmäßig erfolgt oder in intensiveren Intervallen bis zu einer Intensität von  $5000\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , solange die Lichtperioden nicht länger als  $100\mu\text{s}$  dauern [Park & Lee 2001, Tennessen et al. 1995].

Während der Dunkelphase, die bis zu 10x länger sein kann, wird der Lichtüberschuss verarbeitet [Janssen et al. 2001]. Diese Blitz-artige Belichtung erfolgt beispielsweise durch ständiges Durchmischen der Algenzellen, wobei diese der beleuchteten Reaktoraußenwand abwechselnd näher und ferner sind.

#### 2.1.4.2. Einfluss von $\text{CO}_2$ und $\text{O}_2$

##### Kohlenstoff

Je nach pH-Wert liegt Kohlenstoff in Wasser als gelöstes Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  und Kohlensäure  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , als Hydrogenkarbonat  $\text{HCO}_3^-$  und/oder Karbonat  $\text{CO}_3^{2-}$  vor [Duscher 2009]. Siehe dazu Abb.2.9.

Algen nehmen Kohlenstoff in energiearmer anorganischer Form aus Kohlendioxid und Hydrogenkarbonat auf. Bei niedrigen pH-Werten bis 7 überwiegen Kohlendioxid und Kohlensäure, im Bereich bis 10 ist Hydrogencarbonat

dominant. Bei noch höheren pH-Werten verlagert sich das Gleichgewicht in Richtung Karbonat, das jedoch von Algen nicht genutzt werden kann [Duscher 2009, Schagerl 2012].

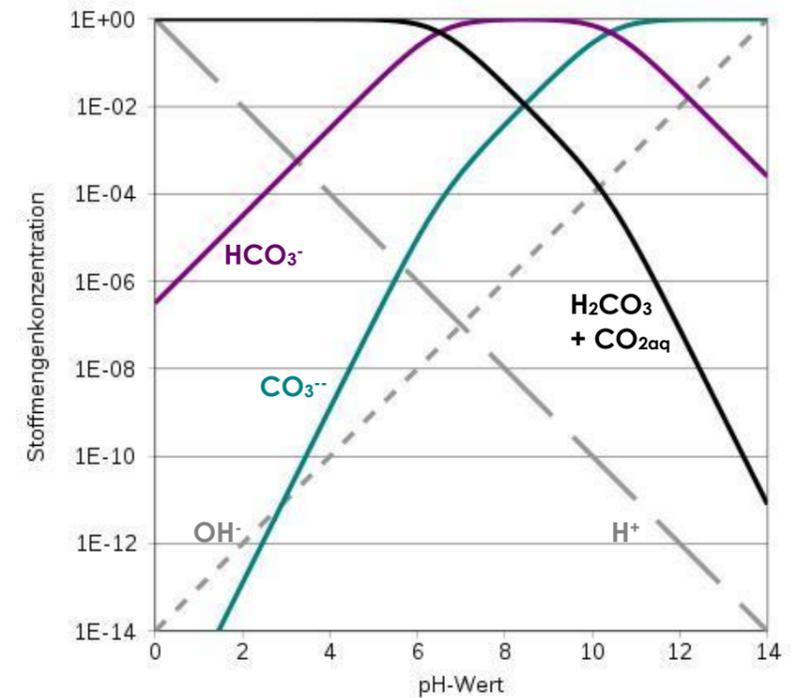


Abb. 2.9: Hägg-Diagramm von Kohlendioxid in Wasser [Wikipedia 2009] leicht verändert.

$\text{CO}_2$  stellt eine geeignete C-Quelle dar, da es einfach kontrollierbar ist und optimal zur Regulierung des pH-Wertes eingesetzt werden kann [Carvalho et al. 2006].

Anhand des jeweiligen Kohlenstoffgehalts in der Biomasse der Algen kann der  $\text{CO}_2$ -Bedarf ermittelt werden. Der Kohlenstoffgehalt liegt zwischen 45% bei kohlenhydratreicher und 80% bei ölreicher Biomasse. Demzufolge liegt der Bedarf bei  $1,85\text{g}_{\text{CO}_2}\cdot\text{g}^{-1}\text{BM}$  oder höher. In Verbindung mit der Wachstumsrate der Algen kann die tatsächlich zuzuführende Menge ermittelt werden. Bei einer Wachstumsrate von  $\mu = \text{d}^{-1}$  und einer Biomassedichte von  $1\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  wären es  $1,85\text{g CO}_2$  pro Liter und Tag [Posten 2009].

Mikroalgen reagieren generell mit erhöhter Biomasseproduktion auf moderat erhöhte CO<sub>2</sub>-Zufuhr. Die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Fixierungsrate steigt bei steigendem CO<sub>2</sub>-Angebot allerdings überproportional an [Chiu et al. 2008, Douskova et al. 2010].

Verschiedene Arten vertragen unterschiedlich hohe CO<sub>2</sub>-Sättigung des Zuchtmediums. Die Bandbreite geht von wenigen Vol% bis zu kompletter CO<sub>2</sub>-Sättigung des Zuchtmediums, die ohne Schäden der Kultur oder Wachstumshemmung geduldet wird [Maeda et al. 1995].

Da eine CO<sub>2</sub>-Düngung nur in abgeschlossener Umgebung möglich ist, kommt sie nur für einige Kultivierungsarten in Frage, etwa für Landpflanzen in abgedichteten Gewächshäusern und für Wasserpflanzen in geschlossenen Behältern wie PBren.

### **Sauerstoff**

Der bei der Photosynthesereaktion abgespaltene Sauerstoff reichert sich im Zuchtmedium an und wirkt sich negativ auf die Photosynthese aus. Ab einer bestimmten Konzentration wirkt er toxisch auf die kultivierte Alge [Raso et al. 2012].

Beim Überschreiten der Sauerstoffkonzentration im Medium, die der Luftsättigung entspricht, tritt verstärkt Photorespiration ein. Die Zelle produziert unter Abgabe von Energie CO<sub>2</sub> und Wasser aus Glucose und Sauerstoff [Raso et al. 2012].

Grund für diese Lichtatmung (= Zellatmung bei Lichtübersversorgung) ist das Enzym Ribulosebisphosphatcarboxylase (Rubisco) welches sowohl für C-Einbau als auch für C-Abspaltung zuständig ist. Die Richtung der Enzymtätigkeit wird durch den Partialdruck von CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> bestimmt [Schagerl 2012].

### **2.1.4.3. Nährstoffbedarf**

Nährstoffe werden je nach benötigter Menge als Makro- oder Mikronährstoffe bezeichnet [Wageningen 2013].

Nach dem Hauptnährstoff Kohlenstoff werden Stickstoff und Phosphor als mengenmäßig wichtige Nährstoffe angegeben. C, N und P sollten entsprechend der Zusammensetzung der Mikroalgenbiomasse etwa im Verhältnis 106:16:1 bereitgestellt werden [Richert 1999].

Zu den Makronährstoffen zählen außerdem Magnesium, Natrium, Schwefel und Kalium. Eine mittelgroße Menge an Nährstoffen wird benötigt an Kalzium, Chlor, Eisen und Bor. Mikronährstoffe werden in sehr geringen Mengen benötigt, zu ihnen zählen Kupfer, Zink, Mangan, Molybdän und Kobalt. Der Nährstoffbedarf ist teilweise artspezifisch, Kieselalgen benötigen beispielsweise Silizium für ihren Zellwandaufbau, andere Algen bestimmte Vitamine. Heterotroph wachsende Algen brauchen zusätzlich organische Substanzen wie Glukose, Acetat, Glycerol oder Aminosäuren zur Deckung ihres Energiebedarfs [Ulloa 2011, Wageningen 2013].

Der Bedarf an Nährstoffen ist bei Algen weniger spezifisch als bei Gefäßpflanzen [Brückner & Höfner 1977], wobei sich nur durch optimale Nährstoffzufuhr die Produktivität der Alge optimieren lässt.

Bei mehrstufigem Zuchtprozess zur Gewinnung bestimmter Bestandteile oder Erzeugnisse der Algen, werden diese durch Nährstoffentzug unter Stress gesetzt. Zur Maximierung des Ölgehalts in der Biomasse beispielsweise wird Stickstoff reduziert, zur Gewinnung von Wasserstoff Schwefel [Singh & Kumar 1992, Melis et al. 2000].

Die Nährstoffquelle stellt einen erheblichen Kostenfaktor dar. Bisher wird meist eine Lösung definierter Salze

verwendet. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen könnten alternativ auch Reststoffe als Nährlösung verwendet werden [Schagerl 2012].

Richert (1999) beschreibt die Nutzung von Nährstoffen, insbesondere von CO<sub>2</sub>, Stickstoff und Phosphaten aus Prozesswässern und Kondensaten von Kompostierungsanlagen zur Kultivierung von Mikroalgen in PBren zu deren Aufbereitung. Prozesswasser aus dem Rottetunnel wird anaerob vergoren. Diese Vorbehandlung dient neben der Hygienisierung des Substrates der verbesserten Abtrennbarkeit von Schwermetallen, dem Aufschließen enthaltener Nährstoffe in bioverfügbaren Zustand und der Methangewinnung. In den untersuchten biokonversionsrelevanten Stoffströmen der Kompostierungsanlage lagen die Nährstoffe in einem Verhältnis von C:N:P = 1944:15,8:1 vor.

Ebenso wurde bereits die Verwendung von kommunalen und industriellen Abwässern, wie jenen von Molkereien, erfolgreich getestet [Wang et al. 2010].

Nährgas, beispielsweise die Abluft von Verbrennungsanlagen (Kraftwerke, Öfen, etc.) oder aus Vergärungs- oder Verrottungsprozessen (Kompostierung, Fermentation von Lebensmitteln oder Fermentation von Abfällen zu Biogas, etc.) enthält neben CO<sub>2</sub>, Schwefel- und Stickoxiden, Schwefelwasserstoff und Ammoniak.

Durch die Nutzung von Biogas als Stickstoff-, Schwefel- und Kohlenstoffquelle wird dessen Qualität durch deren Reinigung deutlich gesteigert [Mann et al. 2009].

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre beträgt ca. 0,035%. Der Kohlenstofffluss aus normaler Umgebungsluft ist selbst bei großer Kontaktfläche und starker Durchmischung gering [Carvalho et al. 2006]. Pure Ausatemluft mit ca. 4% CO<sub>2</sub>

wäre eine geeignete, wenn auch unrealistische Quelle, aber auch schlechte Raumluft mit 0,2-0,5% CO<sub>2</sub> kann bei ausreichender Belüftung der Kultur zur CO<sub>2</sub>-Versorgung ausreichen (siehe dazu Berechnung im Anhang).

#### **2.1.4.4. Zuchtmedium**

##### **2.1.4.4.1. Wasserqualität**

Für viele Algen ist die Nutzung von Oberflächen-, Grund-, Salz-, Ab-, oder Brackwasser möglich [DOE 2009].

Die genannten „unreinen“ Wasserquellen können wertvolle Nährstoffe enthalten, aber auch durch Schwermetalle, überhöhte Gehalte an Spurenelementen, Hormonen, und anderem verunreinigt sein, was zur Schädigung der Algenkultur oder Anreicherung von toxischen Substanzen in den Zellen führen kann und damit negativen Einfluss auf die Qualität des Endprodukts hat [Schenk et al. 2008].

##### **2.1.4.4.2. pH-Wert**

Durch Ionen-Aufnahmen und Zellstoffwechsel unterliegt der pH-Wert des Zuchtmediums ständigen Veränderungen. Der pH-Wert kann zur Abschätzung des CO<sub>2</sub>-Gehalts verwendet werden, umgekehrt ist es üblich den pH-Wert durch Zugabe von CO<sub>2</sub> zu regulieren oder starke Basen oder Säuren zuzuführen [Schenk et al. 2008].

Der bevorzugte pH-Bereich von Mikroalgen ist stark artspezifisch, wobei beispielsweise von den meisten Vertretern der Abteilung der Grünalgen ein Bereich von pH= 3<x≤9 vertragen wird [Maeda 1995, Galloway & Krauss 1961]. Das Optimum liegt dabei häufig in neutralem Milieu bei pH=7. Die Blaualge *Arthrospira* wächst optimal in basischem Milieu bei pH=10 [Dasgupta et al. 2010].

##### **2.1.4.4.3. Temperatur**

Die Temperatur des Zuchtmediums beeinflusst den gesamten Stoffwechsel der Alge. Erhöhte Temperaturen kurbeln den Stoffwechsel an, verminderte bremsen ihn [Schagerl 2012].

Auch die optimale Temperatur und die verträgliche Temperaturspanne sind je nach Algenart sehr unterschiedlich. Die optimale Wachstumstemperatur einiger psychrophiler Vertreter (Organismen, die optimal an niedrige Temperaturen angepasst sind) beispielsweise liegt bei unter 0°C bis zu wenigen Plusgraden [Wagening 2013]. Thermophile Algen hingegen leben bei 42-100°C [Ono & Cuello 2003]. Mesophile Arten bevorzugen mittlere Temperaturbereiche, wobei viele der wirtschaftlich interessantesten Algen ein Temperaturoptimum von rund 25°C haben. Thermotolerante Algen können in einem breiten Temperaturbereich wachsen. *Chlorella Sorokiniana* beispielsweise von 5 bis 45°C [Wagening 2013].

Auch auf die Lichtsättigungsintensität hat die Umgebungstemperatur Einfluss. Bei niedrigen Temperaturen ist die Sättigungsintensität geringer und Photoinhibition tritt früher auf. Auf Grund dessen kann es besonders bei intensiver Morgensonne zu Schädigung der Kultur kommen [Vonshak et al. 2001].

##### **2.1.4.4.4. Durchmischung**

Hauptaufgabe der Durchmischung der Algenkultur ist der Transport der Zellen zwischen hellen und dunklen Bereichen und die gleichmäßige Verteilung von Zellen im Medium um Wandwachstum und Absetzen der Algenzellen zu verhindern. Die Durchmischung gewährleistet außerdem die homogene Verteilung von

Nährstoffen, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> und der Temperatur. Zusätzlich hilft sie, die Algen zwischen PBR-Modulen, wie der Lichtsammel-, Gasaustausch- und Ernteeinheit zu transportieren. Die Bewegung der Flüssigkeit wirkt stimulierend auf Photosyntheseaktivität und Wachstumsrate [Carvalho et al. 2006, Ugwu & Aoyagi 2012, Posten 2009, Leupold 2012]

In Reaktoren bilden sich üblicherweise drei Zonen aus: im Inneren, vom Licht abgewandt herrscht Photolimitation, im Mittelbereich eine photoaktive Zone im Lichtsättigungsbereich und an der Reaktoroberfläche, dem Licht zugewandt kommt es zur Hemmung durch zu intensive Einstrahlung. Unbewegte Bereiche nennt man Totzonen. Hier sedimentieren Algen, wobei es zu Zellverfall und der Entstehung giftiger, kulturschädigender Substanzen kommen kann. Biomasseklumpen, die bei zu geringer Mischrate entstehen können, stören die Flüssigkeitsbewegung noch zusätzlich [Panda et al. 1989].

Eine zu hohe Mischrate hingegen führt zu Zellverletzungen durch zu hohe Scherkräfte. Bei durchlüfteten Kulturen können empfindliche Zellen zerstört werden, die mit Luftblasen an die Wasseroberfläche getragen werden und dort beim Zerplatzen der Luftblase zerstört werden [Carvalho et al. 2006].

Um eine gleichmäßige Verteilung der Algensuspension zu gewährleisten und dem Wandbewuchs vorzubeugen, wurde von Quiang und Richmond (1996) für die Blaualge *Arthrospira fusiformis* eine Mindestbelüftungsrate von 0,6min<sup>-1</sup> (Zuluft pro Liter Algensuspension pro Minute) ermittelt. Die optimale Wachstumsrate stellte sich bei 4,2min<sup>-1</sup> ein. Die maximal getestete Durchlüftung von 6,3min<sup>-1</sup> verursachte Schäden an der Alge und deutlich geringere Produktivität.

Je geringer die Biomassekonzentration (=Zelldichte) und einwirkende Lichtintensität, desto geringer war auch die Auswirkung auf die Produktivität [Quiang & Richmond 1996].

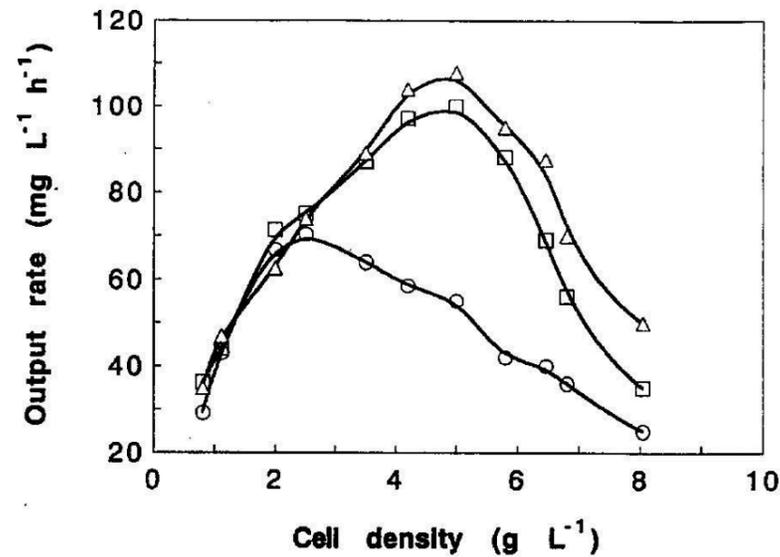


Abb. 2.10: Produktionsrate der Blaualge *Arthrospira fusiformis* bei 500  $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$  in Abhängigkeit von Zelldichte und Mischrate  $\circ=0,6$ ;  $\square=2,1$ ;  $\triangle=4,2$  [ $\text{l}^{-1}\text{min}^{-1}$ ] [Quiang, Richmond 1996]

Abb.2.10 zeigt die Abhängigkeit der Produktivität bei unterschiedlichen Belüftungsraten. Bei einer Zelldichte von  $5\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  beträgt die Differenz des Ertrags zwischen  $0,6\text{min}^{-1}$  und  $4,3\text{min}^{-1}$  fast 100%. Für die praktische Anwendung muss die erhöhte Produktivität dem erhöhten Energieaufwand für die Durchlüftung gegengerechnet und je nach Lichtintensität und Biomassekonzentration abgestimmt werden [Sierra et al. 2007].

#### 2.1.4.4.5. Zelldichte

Um gegenseitiger Verschattung durch die Algenzellen vorzubeugen, kann die maximale Zelldichte (auch CCD – Critical Cell Density) in Abhängigkeit von der beleuchteten Fläche, dem durchschnittlichen Zelldurchmesser und dem Kulturvolumen berechnet werden [Carvalho et al. 2010].

Durch exponentielles Wachstum der Algen führen hohe Zelldichten auch zu hohem Biomassezuwachs. Je weniger Zuchtmedium für die gleiche Menge an Algenzellen bewegt, temperiert, aufbereitet, in einem Behälter gefasst und bei der Ernte aus der Algensuspension entfernt werden muss, desto effizienter ist der Betrieb des PBRs. Eine möglichst hohe Zelldichte sollte demnach angestrebt werden [Posten 2009].

Posten (2009) gibt eine typische Biomassekonzentration für PBRen mit bis zu  $5\text{g}$  Trockenbiomasse pro Liter Suspension an und einen Wert von  $10\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  als wünschenswert und erreichbar.

#### 2.1.5. Fazit

Der durch die Vielzahl an existierenden Mikroalgenarten entstehende weite Rahmen der physikalischen Anforderungen an die Algenzucht vermittelt Zuversicht, dass eine Art existiert, die sich effizient in gebäudeintegrierten PBRen züchten lässt.

Eigenschaften, die die Mikroalge zur Gebäudeintegration mitbringen soll, sind folgende:

- Optimales Wachstum bei rund  $24^\circ\text{C}$ . Diese Temperatur stellt bei Kontakt des PBRs mit dem Raum eine angenehme Oberflächentemperatur dar.
- Verträglichkeit gegenüber Fremdorganismen, mit denen sie durch unreines Nährgas oder Nährmedium in Kontakt kommt, um den Stoffwechsel der Alge zur Aufbereitung von Abluft und Abwässern nutzen zu können.
- Die Anforderungen an Belichtung sollten im gemäßigten Bereich liegen, wobei die Alge mit nicht unerheblichen Schwankungen zurecht kommen muss, da sie durch die Eigenverschattung des Gebäudes zu bestimmten

Tageszeiten nur diffuses Licht zur Verfügung hat, das zudem durch Wärmeschutzverglasung und einen steilen Einfallswinkel abgemindert wird.

- geringe Anforderungen an die Nährstoffzusammensetzung um Quellen aus Reststoffen nutzen zu können.
- geringe Empfindlichkeit gegenüber Scherkräften.
- hohe Wachstumsrate unter den oben genannten Bedingungen

Aufgrund ihres starken Wachstums, einer für die Gebäudeintegration geeigneten bevorzugten Umgebungstemperatur und einer generellen Unempfindlichkeit könnte beispielsweise eine Art der Grünalge der Gattung *Chlorella* in Frage kommen.

## 2.2. Photobioreaktor

Ein PBR ist ein abgeschlossener Zuchtbehälter für die Kultivierung photoautotropher Organismen.

Zur Mikroalgenzucht werden gezielt ausgewählte Algenstämme in Behältnissen unterschiedlicher Form kultiviert, die üblicherweise mit Nährlösung befüllt sind.

In der Praxis stellen PBRen wasserundurchlässige Behältnisse mit transparenten Außenwänden dar. Glas- und Plastiktanks, Glas- und Hartplastikröhren, Folienschläuche und Ähnliches dienen der Lichtexposition. Manche Modelle haben neben diesem Lichtkollektor separate Module zum Gasaustausch und/oder zur Ernte. [Carvalho et al. 2006].

Die Aufstellung der Reaktoren erfolgt üblicherweise in Abstimmung mit idealem Lichteintrag [Lee 2001].

Ein kontrollierter Abschluss des PBRs dient der Gewährleistung einstellbarer Zuchtbedingungen wie der Vermeidung von Verunreinigung besonders durch Fremdorganismen, optimierter Temperatur, Nährstoffzugabe, CO<sub>2</sub>-Konzentration und Vermischung [Carlsson et al. 2007].

Zu einem optimierten Zeitpunkt werden die Algenzellen geerntet, also vom Zuchtmedium getrennt.

### 2.2.1. Bautypen

Auf der Suche nach Gewährleistung optimaler Zuchtparameter und möglichst energie- und kosteneffizienter Kultivierung entstanden unterschiedliche PBR-Bautypen, die sich hauptsächlich in Form und Abmessung, Art der Flüssigkeitsbewegung, CO<sub>2</sub>-Ver- und O<sub>2</sub>-Entsorgung sowie der Temperaturkontrolle unterscheiden.

Die Hülle des PBRs besteht im Allgemeinen aus transluzentem Material mit ausreichender Festigkeit, um der Masse der Algensuspension und durch Flüssigkeitsbewegung erzeugte Schubbeanspruchung standzuhalten. Verwendete Materialien sind unter anderem Glas, Polymethylmethacrylat (Plexiglas), Polyvinylchlorid (PVC) und Polyethylen (PE) [Carvalho et al. 2006].

Zur bestmöglichen Energieversorgung der kultivierten Algensuspension mit Licht wird ein höchstmögliches Oberflächen zu Volumen-Verhältnis angestrebt [Posten 2009].

Die hier vorgenommene und in der Literatur übliche Einteilung der in Abb.2.11 dargestellten Reaktoren, ergänzt durch den Plattenreaktor in Abb.2.12, basiert auf ihrer Form.

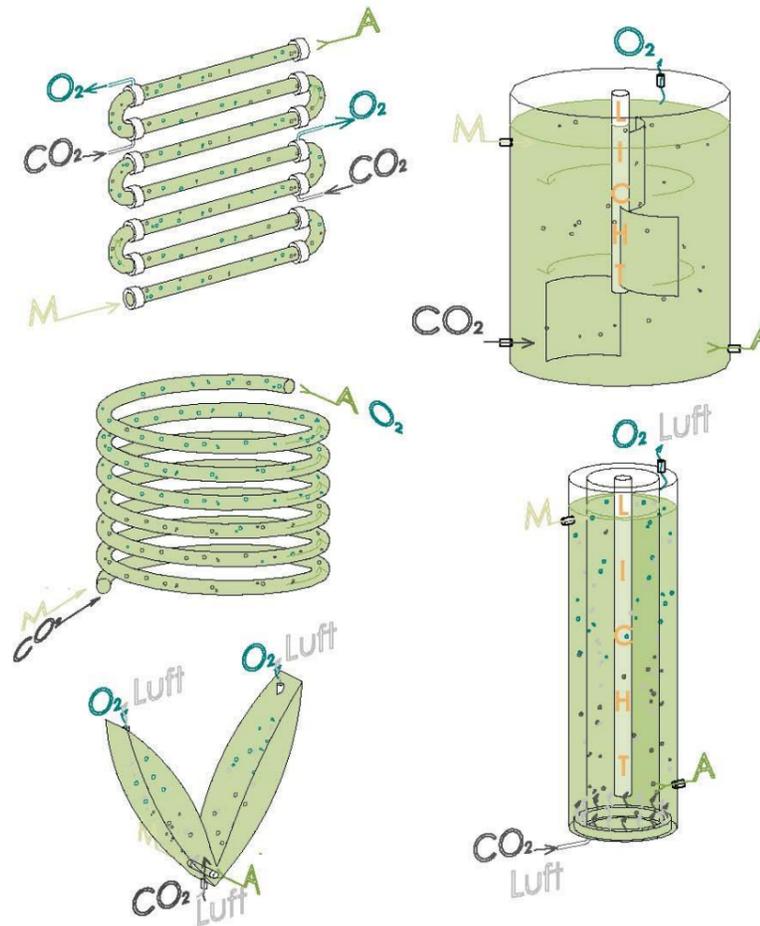


Abb. 2.11: Darstellung einer Auswahl an PBR-Grundformen

Die beiden ersten Bilder links der Abb.2.11 zeigen **Röhrenreaktoren**. Sie werden horizontal, geneigt, vertikal, spiralförmig, α-förmig, dreiecksförmig oder in daraus kombinierten Formen angeordnet und bestehen aus Glas oder Hartkunststoff. Der Verlauf der Röhren kann im Grunde beliebig gewählt werden, solange auf gute Belichtung geachtet wird. Die Algensuspension wird durch die Röhren gepumpt. An den Verbindungsstellen der Rohre erfolgt Zu- und Ableitung. Da es bei diesem System

keinen direkten Kontakt zwischen Algensuspension und Luftraum gibt, muss besonders auf die Ableitung des entstehenden Sauerstoffs geachtet werden. Zur Reinigung wird eine Schwammkugel mittels Druckluft durch den Reaktor bewegt [Chae et al. 2005].

Die unterste Darstellung links zeigt einen **polsterartigen Reaktortyp**, dessen Hülle aus flexibler Kunststoffolie besteht und dessen Form V-förmig, schlauchförmig oder flächig sein kann. Er wird an stabilen Gerüsten oder zwischen Metallgittern aufgehängt oder in einem Wasserbecken oder natürlichen Gewässer durch den umgebenden Wasserdruck stabilisiert. Die Durchmischung der Kultur erfolgt durch Belüftung. Dem Vorteil der geringeren Investitionskosten, steht eine kürzere Lebensdauer der empfindlichen Hülle gegenüber, die nicht gereinigt, sondern ausgetauscht wird.

Der **Fermenter-Typ** (oben rechts) ist transparent oder opak und wird zusätzlich oder ausschließlich von innen beleuchtet oder zur Zucht von heterotrophen Algen unbeleuchtet eingesetzt. Vorteil dieses Reaktors ist der geringe Platzbedarf und geringere Temperaturschwankungen des Zuchtmediums. Durchmischung erfolgt mittels Rührwerk.

Die letzte Darstellung zeigt einen **Säulenreaktor**. In einem relativ schlanken Zylinder werden die Algen durch Zuluft bewegt. Um das Oberflächen- zu Volums-Verhältnis zu verbessern kann die Säule wie in der Abbildung dargestellt, innen hohl sein, wodurch sich Platz für eine zusätzliche Lichtquelle bietet. Zur besseren Kontrolle der Flüssigkeitsbewegung ist eine Zonierung oder Kombination mehrerer Säulen möglich [Zittelli et al. 2006, Carvalho et al. 2006, Posten 2009, Ugwu & Aoyagi 12].

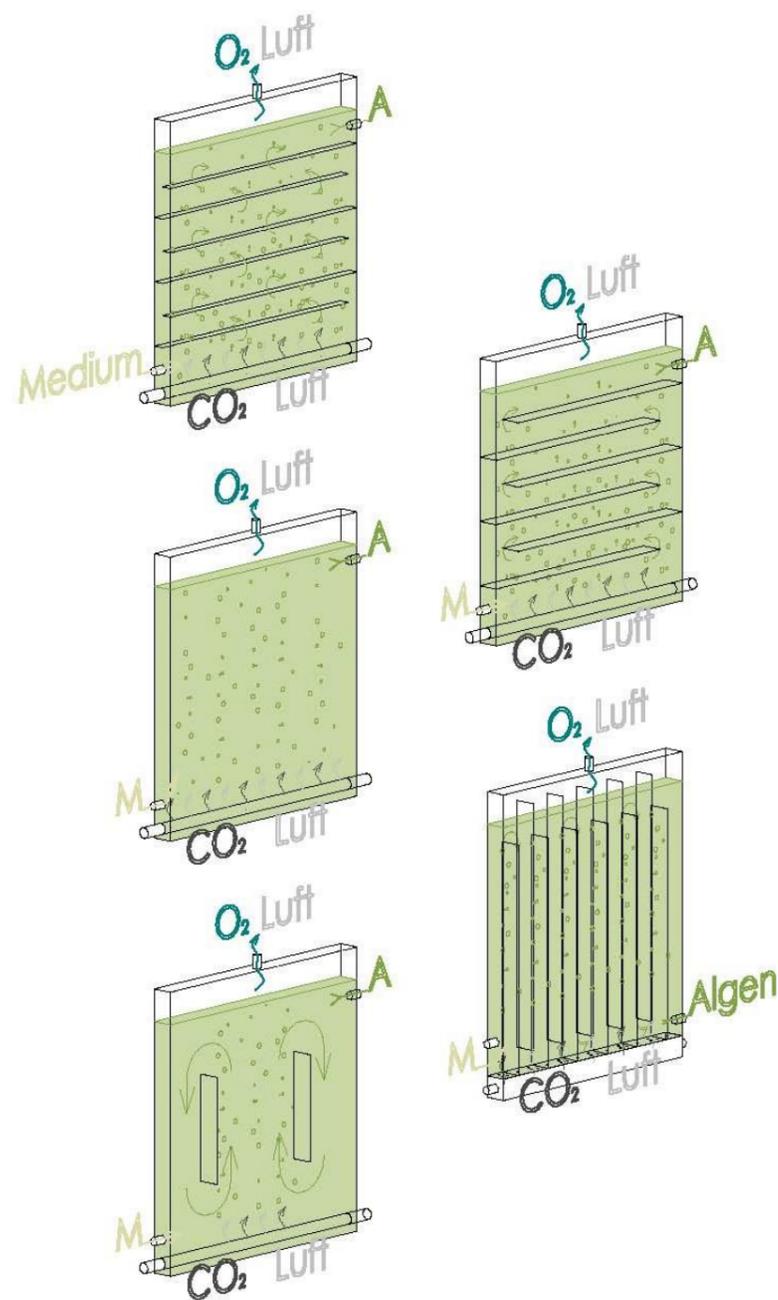


Abb. 2.12: Darstellung unterschiedlicher Unterteilungsmöglichkeiten von Plattenreaktoren

Der **flächige Reaktortyp** wird für die Gebäudeintegration als besonders geeignet erachtet und deshalb in Abb.2.12 etwas genauer dargestellt. Der Plattenreaktor hat einen flachen Korpus aus Glas oder festem Kunststoff und kann zur kontrollierteren Flüssigkeitsbewegung zusätzlich

unterteilt sein. Hierzu kann entweder ein interner Strömungskreislauf erzeugt werden, oder durch Barrieren der Reaktorinnenraum in eine lange Zuchtstrecke gegliedert werden. Zwischen diesen Varianten liegt die horizontale Unterteilung, bei der sich die Barrieren über die gesamte Breite des Reaktors erstrecken, aber nur einen Teil der Tiefe abdecken. Die Algen werden so abwechselnd von der lichtzugewandten zur lichtabgewandten Seite geleitet, davon abgesehen legen sie einen vorwiegend vertikalen Weg zurück [Ugwu & Aoyagi 2012].



Abb. 2.13: Flachplatten-Airlift-Reaktor der Firma Subitec [Subitec 2013]

Nach diesem Prinzip funktioniert beispielsweise der Flachplatten-Airlift-Reaktor der Firma Subitec, der in Abb.2.13 dargestellt ist.

Ein besonderes Merkmal dieses Reaktors ist der präzise definierte Verlauf der Algen durch den Reaktor. Die Hürden sind so ausgeformt, dass Mikrowirbel erzeugt

werden, wodurch eine Frequenz von 1Hz der Licht-Dunkel-Intervalle sichergestellt wird. Die tiefgezogenen Kunststoff-Module sind ca. 5cm dick werden in einer maximalen Größe von 190 x 263cm mit einem Fassungsvermögen von 180l hergestellt. Eine weitere horizontale Unterteilungsmöglichkeit (oben rechts) provoziert eine hauptsächlich waagrechte Bewegung und ist mit einem horizontal geführten Röhrenreaktor vergleichbar. Auch hier bildet sich entlang des Weges eine zunehmende Sauerstoffkonzentration bevor sie im oberen Teil des Reaktors an die Luft abgegeben werden kann.

Geringe Sauerstoffanreicherung entsteht bei vertikaler Unterteilung, wie sie in Abb. 2.12 unten rechts dargestellt ist. Der Luftpolster im oberen Bereich ermöglicht eine gleichmäßige O<sub>2</sub>-Ausgasung [Ugwu & Aoyagi 2012].

Neben den bereits genannten Formen gibt es eine Vielzahl von weiteren Varianten wie z.B.: kuppel- oder wabenförmige Module, oder auch solche, bei denen die Mikroalgen nicht in Flüssigkeit schwimmend sondern an Vlies kultiviert werden, das durch einen Sprühnebel befeuchtet wird. Vorteil dieser Methode ist der geringe Wassergehalt, den die Algen bei der Ernte haben und der durch die dichte Kultivierung geringe Platzbedarf [Bayless et al. 2002].

### 2.2.2. Betrieb

Zur erfolgreichen, maximalen Produktivität bei Kultivierung einer Mikroalgenzucht ist die optimale Einstellung der Zuchtparameter von größter Bedeutung. Angepasste Versorgung mit Licht, Kohlenstoff, Nährstoffen, eine optimale Einstellung von pH-Wert, Temperatur und Flüssigkeitsbewegung sowie Durchmischung und die Entfernung von Sauerstoff sind immanent.

### 2.2.2.1. Lichtversorgung

Optimale Beleuchtung stellt als Energieversorgung der photoautotrophen Algen einen der Hauptaspekte der Gestaltung des PBRs dar.

Das Ziel ist, einfallendes Licht bestmöglich in der Algensuspension zu verteilen, um weder zu geringe noch zu hohe Lichtintensität auf die Algenzellen einwirken zu lassen. Damit sollen bestmögliche Bedingungen für deren Photosynthese gewährleistet und somit höchstmögliche Biomasseproduktion erreicht werden. Ausschlaggebend sind neben dem Aufbau des Kollektors, die Bescheinungsdauer, die Intensität und Wellenlänge des Lichts sowie die Ausrichtung des PBRs in Bezug auf die Lichtquelle. Herausforderungen stellen Schwankungen der Lichtintensität mit einhergehender Über- oder Unterversorgung, Überhitzung der Kultur durch hohe Lichtintensität und hohe Lichtverluste durch Reflexion bei Materialübergängen dar [Carvalho et al. 2010].

Für die Mikroalgenzucht zur Gewinnung von Biomasse zu energetischer Nutzung wird in erster Linie die Sonne als Energiequelle als sinnvoll erachtet. Der Vorteil einer elektrischen Energiequelle wäre die Möglichkeit der genauen Einstellung der benötigten Wellenlänge, Bescheinungsdauer und Photonenzahl [Carvalho et al. 2010].

Eine bereits erwähnte Methode zur optimierten Lichtnutzung ist die Maximierung der Reaktoroberfläche im Verhältnis zu dessen Volumen. Das kann durch hohe Außenoberfläche, also Behältnisse mit geringer Tiefe bzw. geringem Querschnitt erfolgen. Eine vergrößerte Innenoberfläche der Reaktorhülle, etwa mittels aufgerauten und somit seitlich abstrahlenden Stegen oder

Glasfasern, leitet das empfangene Licht in tiefere Bereiche des Behältnisses und verbessert somit die Lichtverteilung, wodurch wiederum eine höhere Biomassekonzentration ermöglicht wird [Rosello Sastre et al. 2007, Ogbonna et al. 1999, Posten 2009].

Übliche Werte für des A:V-Verhältnis sind  $50\text{-}100\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$ , wobei moderne Konzepte zu höheren Werten tendieren [Posten 2009]. Für einen flächigen Reaktor mit beidseitiger Belichtung entspricht dies einer Reaktorstärke von 4-2cm.

Eine weitere Möglichkeit intensives Licht zu „verdünnen“ ist die Aufstellung von Plattenreaktoren schräg zu den Sonnenstrahlen, wie es z.B. Teil des Konzepts der „Hanging Gardens“ von Ecoduna ist. Zur optimierten Lichtausnutzung durch Lichtverteilung und somit der Maximierung des photoaktiven Bereichs sind mehrere Paneele mit geringer Stärke parallel zueinander mit geringem Abstand in einem Rahmen zu einer Reaktoreinheit zusammengefasst. Der Reaktor wird fast parallel zur Sonneneinstrahlung ausgerichtet und Sensor – oder Daten-gesteuert weitergedreht. Durch den spitzen Einfallswinkel wird das Licht „verdünnt“ auf eine große Oberfläche verteilt, um Photoinhibition und Überhitzung vorzubeugen [Ecoduna 2012a].

Bei einer angenommenen Sättigungslichtstärke von  $100\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  (PAR) [Posten 2009, Kitaya et al. 2005], was etwa 5% der einfallenden Lichtenergie im Sommer zu Mittag in Europa entspricht, sollte die Reaktorfläche 20x der Grundfläche entsprechen, um diesen maximalen Lichteinfall effizient nutzen zu können.

Die PBR-Tiefe beeinflusst neben dem A:V-Verhältnis gemeinsam mit der Biomassekonzentration die Eigenverschattung der Algen, die ein weiteres Werkzeug ist, um Lichthemmung entgegenzuwirken. Durch

gegenseitige Beschattung verringert sich die Lichtstärke, je weiter das Licht in die Algensuspension eindringt. Dieser Abstand der Reaktoroberfläche zur Algenzelle ist deren spezifischer Lichtpfad. In Verbindung mit guter Durchmischung entsteht ein Lichtblitzeffekt, wobei ein intensiver kurzer Lichteinfall in einer folgenden Dunkelphase verarbeitet werden kann, ohne Schaden an der Algenzelle zu verursachen [Posten 2009].

Um das Intervall der Licht-/Dunkel-Phasen an die Photosynthesereaktionen, die im Bereich von Sekundenbruchteilen ablaufen, anzupassen, sind geringe Reaktorstärken vorteilhaft, da die Algenzellen somit den kurzen Weg von der hellen zur dunklen Seite des Reaktors beim Mischvorgang in geringerer Zeit zurücklegen. Richmond et al. (2003) schlägt zu diesem Zweck eine Reaktortiefe von 5-10mm vor.

Hohe Zelldichten mit entsprechend geringer Lichtpfadlänge haben den Vorteil, dass die gleiche Menge Algen in einer geringeren Menge Medium kultiviert wird, was wiederum geringeren Platzbedarf, weniger Pumpenergie sowie effizientere Ernte und Weiterverarbeitung mit sich bringt [Richmond et al. 2003].

Neben den transparenten Außenwänden des Reaktors kann Licht auch über Kollektoren gesammelt und mittels Lichtkabeln in die Suspension geleitet werden [Carlsson et al. 2007]. Bayless et al. (2002) beschreibt einen solchen Reaktor, der Sonnenlicht über einen Parabolkollektor sammelt und mittels Glasfaserkabeln zu den Algen leitet. Ähnlich funktioniert der „Green Solar Collector“, der eine lineare Fresnel-Linse verwendet und über Kunststofflichtkabel in Flachplatten-PBRen verteilt [Zijffers et al. 2008].

Pegallapati (2011) untersuchte die Nutzung von künstlichem Licht in einem intern beleuchteten Säulenreaktor mit 2x 30Watt-Leuchtstoffröhren. Die Energieeffizienz wird über produzierte Biomasse in Gramm pro Watt benötigter Energie für Beleuchtung und pneumatische Durchmischung pro Tag [ $\text{g}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ] dargestellt. Die besten Ergebnisse wurden mit  $1,42\text{g}\cdot\text{W}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$  für die Grünalgenart *Scenedesmus* ermittelt. Für den durchschnittlichen Energiegehalt von  $23\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$  bzw.  $6,4\text{Wh}\cdot\text{g}^{-1}$  [Kerner 2012] ergibt dies eine Energieeffizienz von 37%.

Wie in Kapitel 2.1.3 bereits dargestellt wurde, wird Licht mit einer Wellenlänge von 680nm am effizientesten für die Photosynthese genutzt. Wird eine künstliche Lichtquelle gewählt, ist es also sinnvoll, hauptsächlich Rotlicht zur Optimierung der Photosyntheseeffizienz zu nutzen. Ein Anteil 5-10% blauem Licht wird zur Anregung weiterer Wachstumsfunktionen benötigt [Kommareddy & Anderson 2004].

Carvalho et al. (2010) empfiehlt auf Grund eines möglichen engen Spektralbereichs, hoher Lichtausbeute ( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ) und somit geringer Wärmeerzeugung, langer Lebensdauer, guter Bündelbarkeit des Lichts mit einer geeigneten Linse sowie hoher erreichbarer Lichtintensität die Nutzung von LEDs (light emitting diodes) als künstliche Lichtquelle.

### 2.2.2.2. Temperaturkontrolle

Viele Algenarten haben die höchste Biomasseproduktivität in einem engen Temperaturbereich von wenigen Graden [Kitaya et al. 2005]. Um trotz unregelmäßiger solarer Einträge gleichmäßige Temperaturbedingungen zu gewährleisten, ist

ausreichender Hitze- und Kälteschutz, sowie die Möglichkeit zu kühlen oder zu wärmen essentiell.

Zum Schutz gegen Überhitzung bestehen unter anderem folgende Möglichkeiten:

- Kühlung der Reaktoren durch umgebendes Wasser - in einem Wasserbecken oder natürlichem Gewässer
- Kühlung durch Besprühen oder Beträufeln des Reaktors zur Nutzung der Speicherkapazität des Wassers und der Verdunstungskälte
- Verringerung des solaren Eintrags durch gegenseitige Beschattung,
- Verringerung des solaren Eintrags durch geeigneten Winkel zur Sonneneinstrahlung,
- Verringerung des solaren Eintrags im infraroten Bereich durch Spektrum-spezifisch filternde Folien oder Beschichtungen,
- Ableitung der überschüssigen Wärme über einen Wärmetauscher,
- Ableitung der überschüssigen Wärme an ein Speichermedium,
- Regulierung der Temperatur über eingebrachte Nährflüssigkeiten und -gase.

Zum Schutz gegen Unterkühlung bestehen unter anderem folgende Möglichkeiten:

- Verringerung der Transmissionswärmeverluste durch Einhausung oder Isolierung,
- Regulierung der Temperatur über eingebrachte Nährflüssigkeiten und -gase, speziell über warme Rauchgase,
- Zuleitung der benötigten Wärme über einen Wärmetauscher,
- Maximierung der solaren Einträge durch rechtwinkelige Stellung des PBRs gegenüber der Sonnenstrahlung

[Dasgupta et al. 2010, Xu et al. 2009, Kerner 2012, Schagerl 2012, Ecoduna 2012a].

### 2.2.2.3. Nährstoffversorgung

Nährstoffe werden dem Kulturmedium gasförmig oder flüssig zugeführt (siehe Kapitel 2.1.4.3).

Die Einbringung von Nährgas erfolgt für verbesserte Lösung der enthaltenen Nährstoffe im unteren Bereich des Reaktors. Gemeinsam mit komprimierter Luft wird es über Sterilfilter, Membranen oder perforierte Schläuchen eingeblasen. Die Übertragung der Nährstoffe erfolgt an der Fläche zwischen Blase und Zuchtmedium. Je größer diese Fläche (also je kleiner die Blasen durch höhere Gesamtoberfläche des Gasvolumens), je länger der Kontakt (also je höher die Verweildauer des Gases in der Flüssigkeit) und je höher die Flussgeschwindigkeit (durch Verringerung der Flüssigkeitsschicht) gewählt wird, desto effizienter ist die Übertragung. Eine weitere Möglichkeit der  $\text{CO}_2$ -Einbringung erfolgt über mikroporöse Membranen, wie beispielsweise Hohlfaser-Membranen oder Silikonmembranen [Carvalho et al. 2006].

Eine Sauerstoff-Entgaser-Technik ist nur notwendig, wenn kein oder zu wenig Kontakt zur Umgebungsluft besteht und der Sauerstoff die Flüssigkeit nicht an der Oberfläche verlassen kann.

Für die Sauerstoffabgabe ist ebenfalls der Einsatz von Membranen in Verbindung mit einer Unterdruckpumpe möglich. Für großflächige Sauerstoffausgasung kann die Reaktorwand selbst eine gasdurchlässige Membran sein [Posten 2009].

Nährstoffe werden dem Zuchtmedium im Allgemeinen als Lösung beigemischt. Überschüsse werden nach Bildung der Algenbiomasse durch unterschiedliche Ernteverfahren

abgetrennt und im Idealfall ressourcenschonend rückgeführt.

#### 2.2.2.4. Flüssigkeitsbewegung

Zur Durchmischung und zum Weitertransport der Kultur werden üblicherweise Pumpen, Druckluft oder mechanische Rührvorrichtungen verwendet. Sehr energieeffizient ist die Ausnützung natürlicher Schwerkraftphänomene wie das Prinzip kommunizierender Gefäße und der Gasliffeffekt.

Die Auswahl der Technik erfolgt nach Aspekten wie Form, Dimension und Typ des Reaktors sowie nach der Art der Alge, da diese unterschiedlich empfindlich auf hydrodynamische Belastungen reagieren [Carvalho et al. 2006]. Die benötigte Hilfsenergie zwischen den Techniken variiert stark und beträgt oft 10-30% der einfallenden Lichtenergie. Bei einer durchschnittlichen Photosyntheseeffizienz von 5% der Algen übersteigt die „traditionelle“ Mischenergie den energetischen Output um das 2-6-fache. Energieeffiziente Mischmethoden können dagegen diesen Bedarf auf bis zu 1% der einfallenden Lichtenergie drosseln [Schenk et al. 2008].

Für eine Flachplattenreaktorfassade mit Durchlüftung wird von Posten (2009) ein Hilfsenergiebedarf von 30% des Energiegehalts der gewonnenen Biomasse angegeben.

Pumpen werden meist für den Transport zwischen mehreren Einheiten des PBRs, z.B. zwischen der lichtsammelnden Einheit und der Ernteeinheit und bei Röhrenreaktoren verwendet und haben einen relativ hohen Energieaufwand. Durch hohe Scherkräfte verursachen Pumpen Beschädigungen an empfindlichen Algenzellen. Eingesetzte Pumpen sind unter anderem

Membranpumpen, Kreiselpumpen, Kolbenpumpen, rotierende Verdrängerpumpen und Schlauchpumpen.

Mechanisches Mischen mit einem **Rührwerk** eignet sich besonders für einen zylindrischen Fermenter-Typ-PBR mit einem Zuchtgefäß.

**Die Durchlüftung** mit im Bodenbereich eingeleiteter Druckluft gilt als sehr energieeffiziente Mischmethode. Die Bewegung der aufsteigenden Gasblasen provoziert Flüssigkeitsbewegung und verursacht dabei im Allgemeinen weniger Schäden an empfindlichen Algen als Pumpen, birgt aber die Gefahr vom Aufschwimmen der Algen [Carvalho et al. 2006].

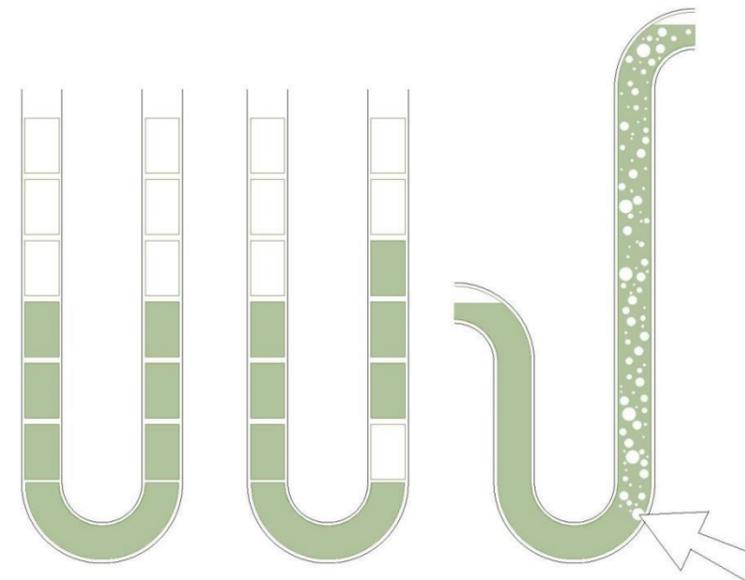


Abb. 2.14: Prinzip der kommunizierenden Funktionsweise des Gasliffeffekts [nach Gutteck 2007]

Das Prinzip kommunizierender Gefäße besagt, dass in unten miteinander verbundenen aber oben offenen Behältnissen der Flüssigkeitsstand einer homogenen Flüssigkeit gleich hoch ist. Der Gasliffeffekt hebt diesen Pegel ungleich an, wenn in der Flüssigkeit Gasblasen enthalten sind, wodurch Höhe überwunden werden kann. Siehe dazu Abb.2.14.

Abb.2.15 zeigt eine Patentzeichnung des Reaktors „Hanging Gardens“ der Ecoduna GmbH [Ecoduna 2009].

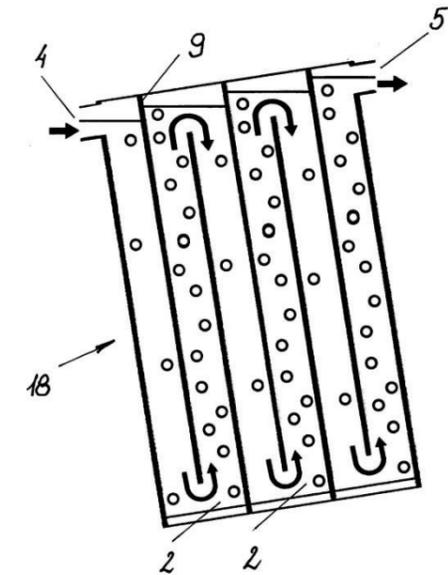


Abb. 2.15: Patentzeichnung der Anwendung des Gasliffeffekts beim Reaktor „Hanging Garden“ der Ecoduna GmbH [Ecoduna 2009]

Hier wird dargestellt, wie das Zuchtmedium mit Hilfe des Prinzips der kommunizierenden Gefäße in Kombination mit dem Gasliffeffekt genutzt wird um den Pegel der Flüssigkeitssäule zu heben und damit Höhe zu überwinden, wodurch ein Weitertransport des Mediums ermöglicht wird. Die Nummer 2 weist in der Abbildung auf ein Reaktorelement hin. Der Einlass 4 ist niedriger angeordnet als der Auslass 5. 9 ist der Steg zwischen zwei Reaktorelementen, über den die Flüssigkeit nicht zurücklaufen darf und 18 ist ein gesamtes Reaktorpaneel.

Neben den Vorrichtungen, die tatsächlich für die Flüssigkeitsbewegung zuständig sind, gibt es solche, die selbst unbeweglich durch Umleiten den Flüssigkeitsstrom und somit die Zellenbewegung dirigieren. Sie können, wie bei der Anwendung beim Flachplatten-Airlift-Reaktor der Firma Subitec (siehe Kapitel 2.2.1) der Optimierung der Lichtversorgung durch Steuerung der Licht-Dunkel-Intervalle dienen. Auf die benötigte Energie zur Bewegung

der Flüssigkeit wirken sich diese Barrieren jedoch nachteilig aus [Schenk et al. 2008].

Static mixers sind Hürden, die von der Flüssigkeit umflossen werden müssen. Durch dirigierten Flüssigkeits- und Gasstrom können definierte Wirbel zur optimalen Vermischung genutzt werden. Draft Tubes bzw. Zugrohre bilden innerhalb von Säulenreaktoren Zonen aus, in denen Flüssigkeit aufsteigt und solche in denen sie abwärtsfließt. [Ugwu & Aoyagi 2012].

### 2.2.2.5. Monitoring & Optimierung

Für effiziente Ressourcennutzung durch bedarfsgerechte Einbringung von CO<sub>2</sub> und weiteren Nährstoffen, sowie der Gewährleistung optimaler Temperatur und Zelldichte ist eine kontinuierliche Messung der Kulturbedingungen unerlässlich.

Der Bedarf an Nährstoffen ist abhängig vom Algenwachstum, welches sowohl im Verlauf des Wachstumszyklus der Alge als auch abhängig von Temperatur und Lichteintrag schwankt. Häufig erfolgt die Versorgung über indirekte CO<sub>2</sub> Regulierung, das heißt über die Kontrolle des pH-Werts. Da der pH-Wert auch durch andere gelöste Ionen beeinflusst wird, ist diese Methode ungenauer als eine direkte CO<sub>2</sub>-Messung mittels Sonde. Bei der Regulierung kann zwischen dem ON-OFF-Typ und einer modellbasierten, vorhersagenden Kontrolle unterschieden werden. Beim ersten Typ erfolgt die CO<sub>2</sub>-Zugabe, sobald ein Grenzwert überschritten wird, wobei eine Verzögerung der Versorgung durch die nötige Verteilung entsteht. Vorausberechnende Methoden beziehen neben dieser Verzögerung Daten über Solarstrahlung mittels mathematischer Modelle in die Berechnung der zukünftigen Photosyntheserate und damit

einhergehender CO<sub>2</sub>-Entwicklung mit ein [Carvalho et al. 2006, Fuentes 1999].

### 2.2.2.6. Ernte & Aufbereitung

Aufgrund der geringen Größe der Mikroalgen ist die Ernte ein aufwändiger und energieintensiver Prozess, deren Optimierung bereits bei der Wahl des Algenstamms beginnt. Abhängig von der Algenform und -größe sowie ihrer Bereitschaft zur Klumpenbildung, zum Aufschwimmen und Sedimentieren können unterschiedliche Erntemethoden angewendet werden. Der Energiebedarf der Ernte ist an die Menge der zu filternden Algensuspension, nicht an den Biomassertrag gebunden, wodurch die Ernte umso energieeffizienter erfolgt, je dichter die Kultur ist. Der optimale Zeitpunkt der Ernte ist in Abstimmung auf den Wachstumszyklus der Alge zu wählen. Die Wachstumsphasen der Alge können in eine Anpassungsphase(=Lag-Phase), eine Wachstumsphase mit exponentiellem Wachstum(=Log-Phase), einen Übergang mit verringertem Wachstum, eine stationäre Phase mit gleichbleibender Zellzahl und eine Absterbephase gegliedert werden [Schneider 2011].

Die Ernte erfolgt am Ende des Lichttages, nachdem möglichst viel Sonnenenergie eingesammelt wurde und bevor Biomasserückbau durch Zellatmung eintritt [Posten 2012].

Die Ernte erfolgt entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich im Batch-Verfahren. Wird kontinuierlich ein Teil der Algenzellen ohne Unterbrechung des Wachstumsprozesses aus dem Zuchtmedium gefiltert, kann durch gleichmäßige Neubildung bei optimaler Zelldichte und maximaler Anzahl an jährlichen

Betriebstagen höchstmögliche Jahresproduktion erreicht werden [Mulaku & Nyanchanga 2004].

Beim Batch-Verfahren wird der Wachstumsprozesses für die Dauer der Ernte durch den Wechsel aus dem optimierten Zuchtbehältnis in die Erntevorrichtung unterbrochen. Die nach der diskontinuierlichen Ernte rückgeführte Suspension enthält einen geringen Anteil an Algen als Grundstamm für die nächste Kultur, die Zelldichte liegt somit selten im optimalen Bereich, der für die besonders effiziente exponentielle Kulturphase benötigt wird [Chen et al. 2011, DOE 2009].

### Entnahme aus dem Zuchtmedium

Je nach Form, Verwendungszweck und Wassergehalt der Alge werden unterschiedliche Erntemethoden angewendet.

Die **Filtration** ist mit geringem Energieaufwand verbunden, eignet sich aber nur für fadenförmige oder kolonienbildende Algen. In großen Anlagen tritt häufig eine Verstopfung des Filters auf, wodurch es zu hohen Unterhaltungskosten kommen kann [Schenk et al. 2008].

Bei der **Schaumfraktionierung** lagern sich die Algenzellen an der Oberfläche feinsten Luftbläschen an, mit welchen sie an die Suspensionsoberfläche getragen werden und dort konzentriert als feiner Schaum aufschwimmen [Coward 2012].

Die **Flockung** ist eine Zusammenballung der Algen aus der Suspension, die sich in Folge leichter an aufsteigende Gasbläschen anlagern und so an die Oberfläche transportiert werden können (=Flotation). Je nach Wahl des Flockungsmittels ist die weitere Nutzung der Biomasse unterschiedliche stark eingeschränkt, weshalb im Bereich der **Selbstflockung** geforscht wird. Diese kann durch

Umgebungsveränderung wie erhöhtes oder reduziertes Nährstoffangebot und pH-Wert-Änderung provoziert werden. Einige Algen tendieren zur Selbstflockung und können andere Algen dabei in ihre Flocken miteinschließen. Diese Methode wird **Co-Bio-Flockung** genannt [Molina Grima et al. 2002].

Ist eine Algenkultur nicht in Bewegung und die Dichte der Algen geringer als jene des Nährmediums, kommt es zu **Sedimentation**, also zum Absetzen der Algen. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Alge absetzt ist abhängig von der Dichtedifferenz zwischen Zelle und Medium und der Zellgröße, wobei sich dickwandige Zellen mit einem Durchmesser  $> 5\mu\text{m}$  schneller absetzen. Nachteil dieser Erntemethode ist ihr hoher Platz- und Zeitaufwand [Schenk et al. 2008].

Bei der **Ultraschalltrennung** wird durch sanfte Schallimpulse Agglomeration mit nachfolgender Sedimentation der Algen ausgelöst [Bosma et al. 2002].

Eine weitere Methode ist die Einleitung der Algensuspension als Futterquelle in Tilapia-Zuchtbecken. Dieser Speisefisch kann die Alge nur zu geringem Teil verwerten. Wird der Fischkot aufgefangen und getrocknet kann ein Großteil der Algenbiomasse zu energetischen Zwecken weitergenutzt werden [Schenk et al. 2008 zitiert Algae Biomass Summit 2007].

Das bei der Algenzucht für hochwertige Nutzung häufig verwendete **Zentrifugieren** ist energie- und kostenintensiv und somit für die Primärernte aus energetischer Sicht ungeeignet. Für die sekundäre Ernte, um den Algenbrei der ersten Stufe ( $10\text{-}20\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) auf eine Algenpaste ( $100\text{-}200\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) zu konzentrieren ist sie besser einsetzbar [Schenk et al. 2008]. Eine weitere Trocknung erfolgt optimalerweise mit Sonnenenergie oder Abwärme.

### 2.2.3. Fazit

In Kapitel 4 wird zur Wertsteigerung der PBR-Fassade nach möglichen Aufgaben gesucht, welche der PBR übernehmen kann um innerhalb seines Lebenszyklus aufgewendete Investitions- und Erhaltungskosten zu amortisieren.

Anforderungen, die sich daraus an den PBR ergeben sind:

- Übernahme von Schutzfunktionen der Fassade (vor Witterung, Lärm, Einsicht, Hitze und Kälte),
- Übernahme einer raumabschließenden Funktion,
- konstruktive Stabilität und Robustheit gegenüber „äußeren Einflüssen“,
- höchstmögliche Kompaktheit zur Minimierung von Transmissionswärmeverlusten,
- hohe Lichtexposition der Algenkultur,
- hohes Produktivitätspotential und gute energetische Bilanz,
- gute Sichtbarkeit und ansprechende Optik,
- geringer Aufwand für Betrieb und Instandhaltung und
- geringe Anschaffungskosten.

Anhand der Recherche wurde zur Fassadenintegration ein Flachplattenreaktor mit gläsernen Außenwänden gewählt. Die Unterteilung soll vertikal nach dem Vorbild einzelner Reaktorpaneele der „Hanging Gardens“ der Ecoduna GmbH verlaufen. Der Reaktor kombiniert formell die Systeme des Röhren- und die des Flächenreaktors. Das plattenförmige Reaktorvolumen wird durch senkrecht angeordnete Stege in eine zusammenhängende Kammer mit geringem Querschnitt unterteilt. Entlang dieser U-förmigen Kammern fließt das Zuchtmedium mäanderförmig auf und ab und dann weiter ins nächste Reaktorpaneel. Der Transport des Zuchtmediums erfolgt

ohne Pumpen durch kontinuierliches Einleiten der Flüssigkeit und wird mittels Schwerkraft die einen geringen Höhenunterschied zwischen Zu- und Abfluss ausgleichen möchte, nach dem Prinzip kommunizierender Gefäße weitertransportiert, wodurch sich der Hilfsenergiebedarf auf ein Minimum reduziert. Durch eingeleitetes Nährgas am unteren Ende des aufsteigenden Rohrs hebt sich zufolge des Gas-Lift-Prinzips die Oberflächenebene der Flüssigkeitssäule, wodurch der Abfluss nötigenfalls auch höher als der Zufluss liegen kann.

Die Zuleitung der Nährgase hat als zusätzlichen Nutzen eine reinigende Wirkung auf die Innenoberfläche des Reaktors, durch Verwirbelung der Suspension erfolgt bessere Lichtversorgung, außerdem kann über das Gas eine kontrollierte Temperierung vorgenommen werden.

Die Kammern eines Panels sind nach oben hin geöffnet, wodurch Sauerstoff selbständig ausdiffundiert und über ein Ventil an die Atmosphäre abgegeben wird [Ecoduna 2009].

### 3 Photobioreaktoren in Kunst & Architektur

#### 3.1 Verwirklichte Anwendungen

##### 3.1.1 BIQ / clever Treefrog

Auf der IBA, der Internationalen Bauausstellung in Hamburg, entsteht seit Ende 2011 die erste physische Anwendung einer PBR-Fassade. Im Zuge der Serie „Smart Material Houses“ planten die Grazer Architekten von Splitterwerk und Projektpartner ein 15-Parteien-Wohngebäude mit plattenförmigen PBR-Paneelen als äußerste Gebäudehülle an der Südost- und Südwestfassade (siehe Abb. 3.1 und 3.2). Kultivierung, Ernte und Verwertung der Algen sind, wie in Abb. 3.2 dargestellt, an die Haustechnik gekoppelt, wodurch ein Kreislauf der Energie- und Stoffströme entsteht. Überschüssige Wärmeenergie wird über einen Wärmetauscher abgenommen, in Erdsole- und Phasenwechselmaterialspeichern (in Folge PCM = Phase Change Material) zwischengespeichert, oder zur Brauchwassererwärmung genutzt. Aus den Algen wird Biogas erzeugt, welches über ein Brennstoffzellen-BHKW verwertet wird. Dabei entstehende Rauchgase werden zur Versorgung der Mikroalgen in die Reaktoren rückgeleitet. Die in Abb. 3.4 dargestellten 2cm starken Glaspaneele bilden eine zweite Fassadenhülle und bieten Schutz vor Schall, Sonne, Kälte und Hitze. Zur Reduktion des Wartungsaufwandes wird eine automatisierte Prozessführung eingesetzt. Die Haustechnikergänzung wurde als Plug-in so konzipiert, dass sie sich für einen nachträglichen Einbau bei der Sanierung eignet. Die planmäßige Fertigstellung wird bis März 2013 erwartet [Splitterwerk 2012, Kerner 2012].

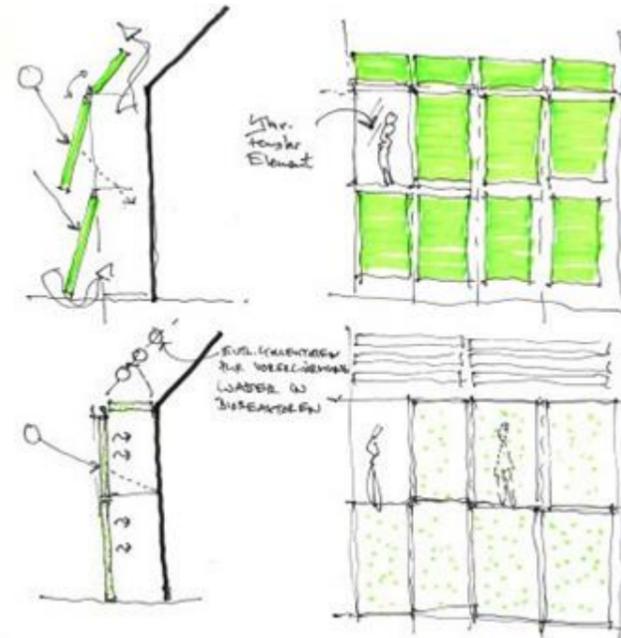


Abb. 3.1: Funktionsskizze der PBR-Fassade © Arup Deutschland GmbH [baunetzwissen 2012]



Abb. 3.2: Wohngebäude mit PBR-Fassade © Arup Deutschland GmbH [dbz 2012]

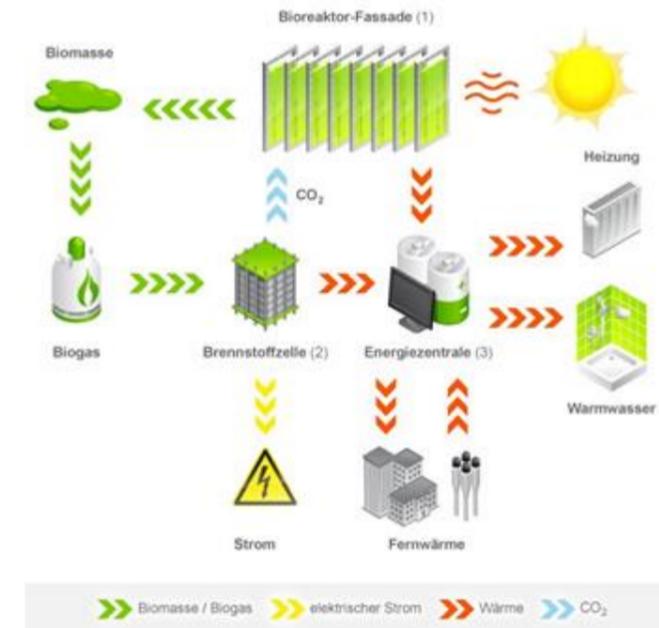


Abb. 3.3: Darstellung des Energiekreislaufs der Reaktorfassade © Otto Wulff Bauunternehmung GmbH / schönknecht: gmbh [dbz 2012]



Abb. 3.4: PBR-Fassadenelement © Arup Deutschland GmbH [dbz 2012]

### 3.1.2 H.O.R.T.U.S

"Hydro. Organism. Responsive. To. Urban. Stimuli." ist der Titel der Kunstinstallation, die in London von den italienischen Architekten Claudia Pasquero and Marco Poletto ausgestellt wurde.

EcoLogicStudios stellt mit seiner Installation „H.O.R.T.U.S.“ einen neuen Garten-Prototyp vor, der von den Eingriffen der Ausstellungsbesucher abhängig ist.

Die Kunstinstallation, die auf Abb. 3.5 zu sehen ist, besteht aus, von der Decke abgehängten, Plastiksäckchen, die mit einer Suspension aus Wasser und Mikroalgen, Makroalgen, sowie biolumineszierenden Bakterien aus Londons Gewässern befüllt sind. Während der vierwöchigen Wachstumsphase werden die Organismen von Besuchern der Ausstellung über einen dünnen Schlauch per Atemluft mit CO<sub>2</sub> versorgt (siehe Abb. 3.6) [ecoLogicStudio 2012].



Abb. 3.5: Kunstinstallation „H.O.R.T.U.S.“ [ecoLogicStudio 2012]



Abb. 3.6: CO<sub>2</sub>-Versorgung der Kunstinstallation „H.O.R.T.U.S.“ [ecoLogicStudio 2012]

### 3.1.3 Algaegarden

Als Verbindung der Fachbereiche Kunst, Landschaftsarchitektur und Biotechnologie entstand in London ein Ausstellungsgarten. In schlauchförmigen PBR-Modulen werden ortsansässige Mikroalgen kultiviert. Die ausgestellten Arten unterscheiden sich optisch durch unterschiedliche Farben – von Rot- und Rosa- über Braun- zu Grüntönen (siehe Abb. 3.7). Eine davon, *Pyrocystis lunala* ist biolumineszent und leuchtet bei Störung, was bei Dunkelheit durch blaues funkeln sichtbar wird. Die Reaktoren sind als Folienschläuche von Stahl-Holzgerüsten abgehängt und werden von Besuchern der Ausstellung, wie in Abb. 3.7 dargestellt, über Handpumpen belüftet und dadurch mit atmosphärischem CO<sub>2</sub> versorgt. Das gefilterte Kulturmedium entstammt Oberflächengewässern in denen die Algen heimisch sind [Fredericks et al. 2011].



Abb. 3.7: Entwurfsskizze des Algaegarden [Fredericks et al. 2011]



Abb. 3.8: CO<sub>2</sub>-Versorgung des Algaegarden [Fredericks et al. 2011]

## 3.2 Nicht verwirklichte Entwürfe

### 3.2.1 Perth Photobioreactors

Die Abb. 3.9 und 3.10 zeigen Tom Wiscombs Entwurf einer PBR-Kunstinstallation für den städtischen Außenraum auf 700m<sup>2</sup>.

Für den Reaktor verwendet er das Helix-Röhrenreaktor - Konzept von OriginOil, das aus einer von innen beleuchtbaren PBR-Röhrenspule besteht. Die Außenhülle des Reaktors, aus transparentem Polycarbonat, ist von einer gefalteten Faserverbundschalenkonstruktion gestützt. In die Oberfläche sind stromsammelnde Dünnschichtsolartransmitter für eine ergänzende Beleuchtung eingebettet, die bei Nacht gleichzeitig der Beleuchtung des Reaktors und der Umgebung für Passanten dient. Der Reaktor ist mit roten und grünen Algenkulturen gefüllt, die über Photosynthese und CO<sub>2</sub> aus der Umgebungsluft Wasserstoff und Öl produzieren und bei Nacht in ihren Farben leuchten [Wiscomb 2009].

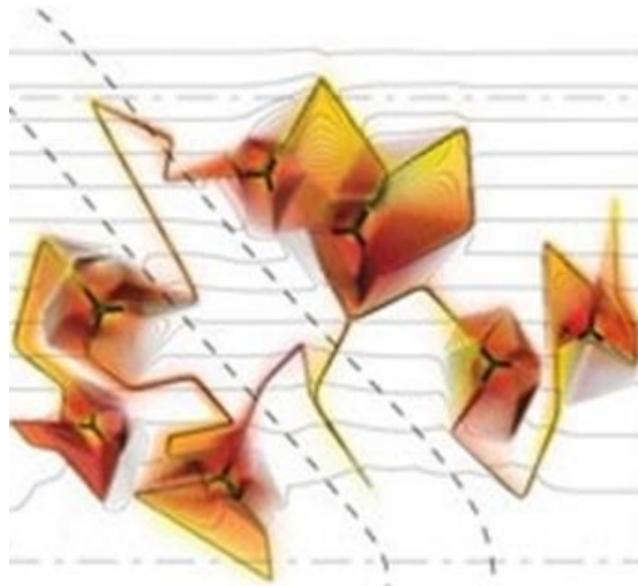


Abb. 3.9: Grundriss der PBR-Kunstinstallation [Wiscomb 2009]



Abb. 3.10: PBR-Kunstinstallation im städtischen Kontext [Wiscomb 2009]



Abb. 3.11: Seitenansicht des PBR-Moduls von Christopher Lee [Lee 2011]

### 3.2.2 Tube Photo-Bioreactor

Der Entwurf von Christopher Lee dient in erster Linie der maximierten Algenbiomasseerzeugung. So soll die große lichtzugewandte Oberfläche, die durch wechselnde Krümmung in unterschiedlichen Winkeln zur Sonne geneigt ist, einen maximalen Produktionsertrag ermöglichen.

Die Hülle aus transparentem Polycarbonat schützt den PBR und bildet einen Innenraum, der beispielsweise als Wartehäuschen oder Fahrradunterstand dienen kann. Diese Nutzung soll der Öffentlichkeit die Algenzucht näher bringen.

Die Abb. 3.11 und 3.12 zeigen Lees PBR-Modul von zwei Ansichten und im Größenvergleich zu einem Kind [Lee 2011].



Abb. 3.12: Frontansicht des PBR-Moduls von Christopher Lee [Lee 2011]

### 3.2.3 BiO2 Tower

Die Verwirklichung des 40-geschoßigen Bürogebäudes mit rund 70.000m<sup>2</sup> Geschoßfläche ist laut Architekten-Homepage für 2015 in Nanterre, Frankreich, geplant. Die Energiebilanz des Hochhauses soll mittels einer Doppelfassade optimiert werden, die Platz für Säulen-PBRen bietet (siehe Abb. 3.13 und 3.14). Die PBRen sorgen mit Hilfe ihrer thermischen Speichermasse für eine Wärmeregulierung und reduzieren Wärmeverluste. Die Flüssigkeitsbewegung und Ernte verlaufen vollautomatisch. Die täglich geerntete Algenbiomasse soll vor Ort zu Lebensmitteln und Treibstoff veredelt werden und jährlich die gleiche Menge CO<sub>2</sub> absorbieren können wie 1.700ha Wald. Über Pipelines erfolgt die Versorgung der PBRen mit CO<sub>2</sub>-haltigen Abgasen und der Abtransport von produziertem Algentreibstoff [X-TU Architects 2012].



Abb. 3.13: Fassadenausschnitt des BiO2 Towers [X-TU Architects 2012]

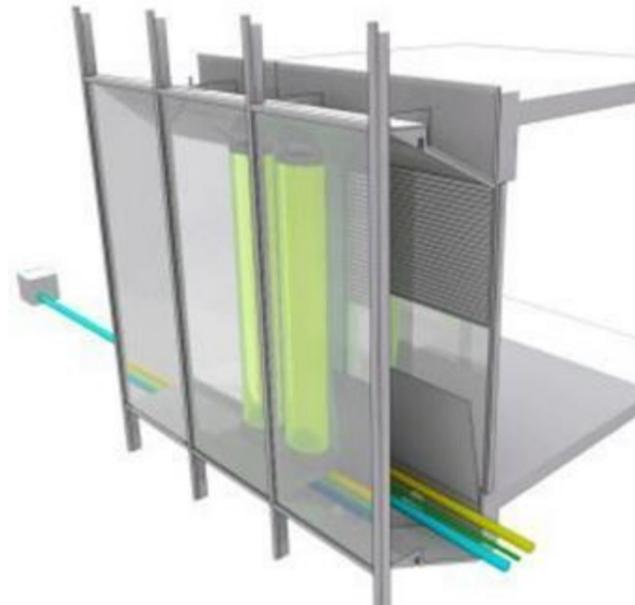


Abb. 3.14: PBR-Fassadenelement des BiO2 Towers [X-TU Architects 2012]

### 3.2.4 Chlorella-Pod

Ádám Miklósi Entwurf ist eine transportable Frischluftoase, in der Mikroalgen das CO<sub>2</sub> aus der Atemluft der Nutzer in O<sub>2</sub> umgewandelt. Besucher des Pavillons sitzen, durch eine semitransparente Teflonmembran teilabgeschirmt von akustischen und visuellen Eindrücken, in Entspannungssesseln und atmen von den Algen aufbereitete Luft. PBR-Röhren laufen, der Sonne ausgesetzt, an der Außenfläche des Pavillons und sammeln sich in dessen Zentrum wo sie zusätzlich künstlich beleuchtet werden. Inspiriert wurde Miklósi durch die Vorhersage der World Health Organisation, dass 2030 etwa 60% der Weltbevölkerung in Städten leben und von Studien über selbstversorgende Lebenserhaltungssysteme, die etwa auch in Raumstationen eine erdähnliche Atmosphäre erzeugen können. Abb. 3.15 und 3.16 zeigen diese Chlorella-Pods von innen und außen [Miklosi 2012].

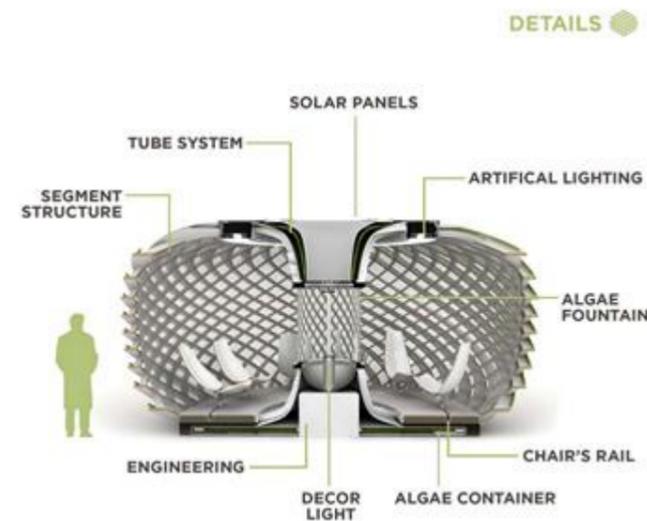


Abb. 3.15: Schnittdarstellung durch den Chlorella-Pod [Miklosi 2012]



Abb. 3.16: Chlorella-Pods im städtischen Gefüge [Miklosi 2012]

### 3.2.5 Diplomarbeit „Membrana protegens aedificii“

Pola Dietrich befasste sich in ihrer Diplomarbeit mit der Integration von PBRen in die Fassade und plante auf dieser Basis den Neubau eines Künstler-Campus.

Innerhalb der Fassade soll eine Mischung aus Mikroalgen und Purpurbakterien Grauwasser reinigen. Der Prototyp, der noch nicht ganz ausgereiften Technik, soll die Bevölkerung noch während der Entwicklungsphase, der gebäudeintegrierten Anwendung der PBR, an die neue Technologie gewöhnen. In Abstimmung der klimatischen, biologischen und architektonischen Faktoren wurde ein Gebäudekomplex entwickelt, in dessen Doppelfassade PBRen geschützt ausgestellt und betrieben werden.

Die Abb. 3.16 und 3.17 zeigen den Entwurf des Künstler-Campus mit PBR-Fassade [Dietrich 2012].

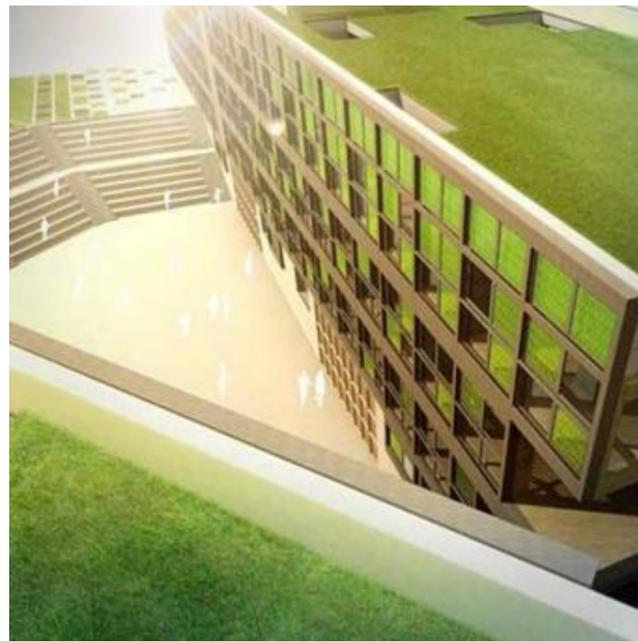


Abb. 3.17: Vogelperspektive der PBR-Fassade des Künstler-Campus [Dietrich 2012]



Abb. 3.18: Ansicht der PBR-Fassade des Künstler-Campus aus dem gegenüberliegenden Gebäude [Dietrich 2012]



Abb. 3.19: Vogelperspektive des Entwurfs zur Sanierung eines Verwaltungsgebäudes [HOK 2011]

### 3.2.6 Retrofit Resolution

Im Zuge eines Jung-Architekten Wettbewerbs entwickelten Architekten von HOK und Ingenieure von Vanderweil den Siegerentwurf, der in den Abb. 3.17 und 3.18 zu sehen ist.

Thema des Wettbewerbs war die Sanierung eines Verwaltungsgebäudes der 1960er im Zentrum von Los Angeles zu einem Nullenergiegebäude. Der Vorschlag des Teams beinhaltet neben einer Tageslichtversorgung über Atrien und Lichtschächte auch PV, solarthermische Kollektoren und ca. 2.300m<sup>2</sup> PBR-Fläche. Die mit Mikroalgen gefüllten Reaktorröhren wandeln das CO<sub>2</sub> der nahen Autobahn, die Nährstoffe aus den Gebäudeabwässern und das Sonnenlicht zu ölhaltiger Biomasse um, die als Heizmaterial bis zu 9% des Energiebedarfs des sanierten Gebäudes deckt [HOK 2011].



Abb. 3.20: PBR-Fassade des Entwurfs zur Sanierung eines Verwaltungsgebäudes [HOK 2011]

## 4 Gebäudeintegration

Die Technologie der Mikroalgenzucht in PBRen zur energetischen Nutzung steht erst am Beginn einer möglichen energetischen und finanziellen Rentabilität. Die Hauptanforderung an die PBR-Fassade ist somit, Vorteile zu bieten die den Wert des Reaktors so steigern, dass seine Nutzung wirtschaftlich wird. Diese Anforderung bringt mit sich, dass zusätzliche konstruktive und energetische Maßnahmen, die allein für die Integration der PBRen in die Fassade nötig sind, möglichst gering bleiben sollen. Um den heutigen baulichen Erfordernissen Rechnung zu tragen, soll sich die entwickelte Fassade außerdem für die Sanierung bereits bestehender Gebäudes eignen.

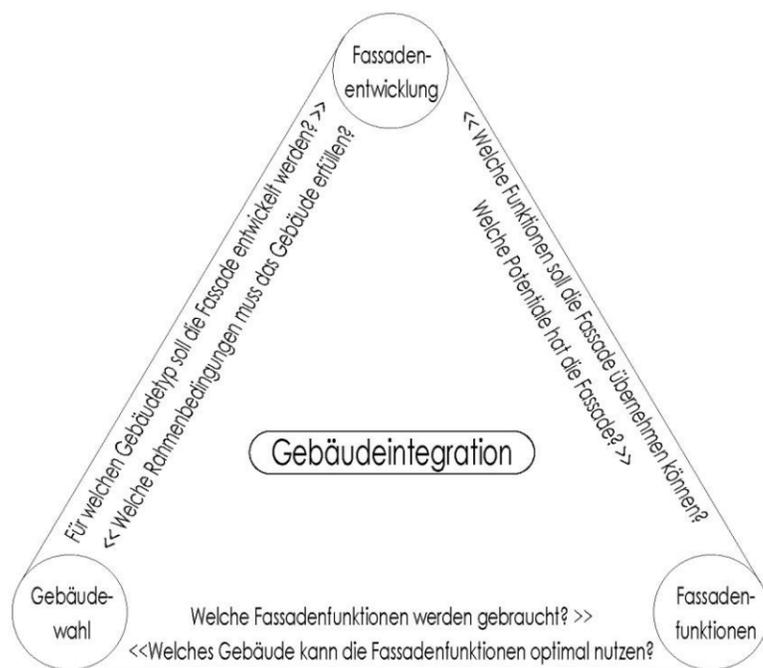


Abb. 4.1: Darstellung der übergreifenden Zusammenhänge bei der Entwicklung von Fassade, Gebäudewahl und Fassadenfunktionen

Die übergreifenden Zusammenhänge bei der Entwicklung der PBR-Fassade, Übernahme von Fassadenfunktionen durch den PBR und die Wahl eines geeigneten

Gebäudetyps zu deren Anwendung werden in Abb. 4.1 dargestellt.

### 4.1 Gebäudewahl

Ein PBR ist eine komplexe technische Anlage. Zur optimalen Ausnützung seiner Potentiale und zur Ressourcenschonung muss er in eine Stoff- und Energiekreislauf eingebunden sein. Da er auf Basis lebender Organismen funktioniert, sind die Rahmenbedingungen, die konstant aufrecht erhalten werden müssen enger, als bei anderen Solaranlagen, wie etwa Photovoltaik oder Solarthermie.

Die Eignung von Gebäudetypen für die Anwendung der PBR-Fassade soll in Kapitel 4.1.1 ermittelt werden. Die Wahl wird durch Kriterien, die die Sinnhaftigkeit und den Nutzen der PBR-Fassade prüfen, auf ein geeignetes Nutzungsbeispiel eingegrenzt.

#### 4.1.1 Wahlkriterien

Vorab wurde mittels Einschlusskriterien eine Eingrenzung der Gebäudetypen vorgenommen, die nachfolgend anhand gewichtender Kriterien beurteilt werden.

##### Einschlusskriterien

Die PBR-Fassade soll als dezentrale Energie- und Rohstoffquelle in Verbrauchernähe dienen und ihren Wert durch Steigerung des Raumkomforts erhöhen.

Für die Prüfung sinnvoller Anwendbarkeit der PBR-Fassade sollen also nur Gebäude herangezogen werden, deren vorgesehene Nutzung

- dem menschlichen Aufenthalt dienen und
- in urbanem Gebiet betrieben werden.

##### Gewichtende Kriterien

Beurteilt wird die Eignung der Bauten nach Anwendbarkeit der Nutzungskriterien. Diese Auswahl soll folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Die PBR-Fassade soll sich entweder als Bauteil oder durch den Algenstoffwechsel in Stoff- und Energieflüsse des Gebäudes integrieren lassen.
- Notwendige Gebäudefunktionen, die von der PBR-Fassade übernommen werden können, wie Beschattung, Dämmung, Imagebildung, Schallschutz, Gestaltung u.ä., müssen gegeben sein.
- Der Kostenträger muss über entsprechende Investitionsmittel verfügen.
- Ausreichend große Fassadenflächen müssen verfügbar sein.
- Gute Belichtung der Fassadenflächen ist für höchstmöglichen Biomasseertrag erforderlich – wie sie etwa repräsentative, freistehende bzw. hohe Gebäude bieten.
- Für ökologischen und ökonomischen Betrieb soll eine ständig verfügbare CO<sub>2</sub>-Quelle vorhanden sein.
- Für ökologischen und ökonomischen Betrieb soll eine geeignete Quelle aller notwendigen Mikro- und Makronährstoffe verfügbar sein.
- Als beispielhafte, ideologische und neuartige Technologie soll die Installation aus didaktischen Gründen gut sichtbar und zugänglich für die Öffentlichkeit sein.
- Ein zentraler Entscheidungsträger sollte über die Anlage verfügen um Realisierung und Wartung einfacher umsetzen zu können.

- Für den Kostenträger soll positive Imagebildung durch Innovativität und ökologisches Engagement entstehen.
- Die Möglichkeit finanziellen Nutzen aus der CO<sub>2</sub>-Einsparung zu ziehen, etwa durch Emissionszertifikatehandel ist vorteilhaft.

Zur Bewertung erfolgte in Tab. 4.1 eine Reihung durch Punktevergabe nach eigenem Ermessen von 0=Forderung wird nicht erfüllt bis 4=Forderung wird erfüllt. Zusätzlich fand eine Gewichtung der Kriterien statt, je nachdem ob sie die Sinnhaftigkeit(x3) oder Effizienz(x2) der PBR-Fassade bedingen oder einen Zusatznutzen(x1) bieten, wurde mit dem angegebenen Gewichtungsfaktor multipliziert.

Eine Bewertung der Gebäudenutzungstypen nach gewichtenden Kriterien macht deutlich, dass kein einzelnes Gebäude für sich alle gewünschten Kriterien erfüllt.

Deshalb wird, um einen besseren Ausgleich zwischen Bedarf und Überschuss zu schaffen, einerseits jene Gebäudefunktionen kombiniert die einzeln oder gemeinsam möglichst viele der gewichtenden Kriterien erfüllen, also in der Bewertung eine hohe Punktezah erzielen, andererseits werden Gebäudefunktionen kombiniert, die sich gemeinsam mit der PBR-Fassade in den Stoff- und Energieflüssen sowie funktioneller Hinsicht zu einem Kreislauf fügen. Dieser urbane, möglichst geschlossene Stoff-, Energie- und Funktionskreislauf soll hier „nachhaltige Stadtzelle“ genannt werden.

Tab. 4.1: Bewertung der Gebäudenutzungstypen nach gewichtenden Kriterien

Nutzungstypen	gewichtende Kriterien												Punktesumme
	Verknüpfung Energieflüsse	Verknüpfung Stoffflüsse	Übernahme von Fassadenfunktionen	Verfügbarkeit Investitionsmittel	Flächenverfügbarkeit - Dimension	Lichtexponiertheit der Flächen	ganzzährige CO <sub>2</sub> -Quelle	ganzzährige Nährstoffquelle	Sichtbarkeit, Zugänglichkeit	Zentrale Zuständigkeit	Nutzen aus positivem Image	finanzieller Nutzen aus CO <sub>2</sub> -Einsparung	
hypothetischer Idealfall	12	12	12	12	12	8	8	8	4	4	4	4	100
Abfallverwertung	9	12	0	12	12	8	8	8	0	4	3	0	76
Energieversorgung	12	12	0	12	6	8	8	0	0	4	4	4	70
Lebensmittelindustrie	12	12	0	9	6	8	8	8	1	3	3	0	70
Bildungsstätten	0	6	12	12	12	6	6	0	3	4	4	0	65
Beherbergung und Gastro	6	9	12	12	6	2	6	2	4	2	4	0	65
Öffentliche Verwaltung	0	6	12	12	12	6	4	0	4	4	4	0	64
Krankenhäuser	0	6	12	9	12	6	8	0	4	4	2	0	63
Wohnen Miete	0	6	12	9	12	6	6	0	3	4	4	0	62
Papierherstellung	0	9	0	9	12	8	8	4	0	4	3	4	61
Verwaltung Bürogebäude	0	6	12	9	12	6	4	0	3	4	4	0	60
Spezialfall: urban farming	0	12	12	6	12	6	0	0	3	4	4	0	59
Genussmittel und Tabak	0	9	0	12	12	8	6	4	0	4	3	0	58
Holzverarbeitung	6	9	0	9	12	8	6	0	0	4	3	0	57
Textilverarbeitung	0	9	0	9	12	8	6	0	0	4	3	0	51
Landwirtschaft Tierhaltung	0	12	0	6	12	8	2	0	0	4	2	0	46
Handel	0	3	6	12	3	2	2	0	4	3	4	0	39
private Dienstleistung	0	3	12	6	3	0	4	0	2	2	4	0	36
Landwirtschaft Pflanzen	0	12	0	6	3	8	0	0	0	4	2	0	35
Wohnen Eigentum	0	6	12	0	0	4	6	0	2	0	0	0	30

#### 4.1.2 Die „nachhaltige Stadtzelle“

Eine „nachhaltige Stadtzelle“ kombiniert wichtige urbane Funktionen, die sich gemeinsam mit PBR-Anlagen in ihren stofflichen und energetischen Zu- und Abflüssen ergänzen, wie diese in Abb. 4.2 dargestellt und im Folgenden beschrieben sind.

Die „nachhaltige Stadtzelle“ setzt sich zumindest aus den urbanen Funktionen

- Lebensmittelproduktion,
- energetische Infrastruktur und Abfallmanagement und

- Gebäude für menschlichen Aufenthalt

zusammen und wird durch die PBR-Fassade zu einem Stoff- und Energiekreislauf vervollständigt.

Die PBR-Fassade produziert Biomasse als Nahrungsmittel und zur energetischen Verwertung. Verbesserungen des Raumkomforts von Aufenthaltsräumen der sozialen Einrichtungen durch Lichtregulierung, Luftaufbereitung, Nutzwasseraufbereitung, Schallschutz, thermische Regulierung, optische Aufwertung, Raumabschluss, etc. werden durch den PBR als Bauelement oder durch die Mikroalgenkultur übernommen.

Zusammenhänge durch Stoff- und Energieflüsse zwischen der PBR-Fassade und den genannten urbanen Funktionen werden im Folgenden dargestellt:

In der **Lebensmittelproduktion**, wie Molkerei, Brauerei, Bäckerei und Urban Farming anfallende organische Abfälle (wie Filtrate, Gärflüssigkeiten, Molke...) finden Verwendung in der Nährstoffversorgung der Mikroalgen. Feste Abfälle, wie Ausschussware und Hilfsstoffe werden in einer Biogasanlage vergoren. CO<sub>2</sub>-hältige Abluft und Rauchgase aus der Lebensmittelverarbeitung dienen der Kohlenstoffversorgung der Algenzucht. Rohstoffe für hochwertige Lebensmittel zum menschlichen Verzehr werden nach dem Prinzip des Urban Farming, zur effizienten Flächennutzung innerhalb des städtischen Gefüges angebaut, um Transportwege zu minimieren und den Kontakt zwischen Produkt und Konsument zu erhöhen.

**Energetische Infrastruktur und Abfallmanagement** werden auf Basis einer Biogasanlage mit angebundenem BHKW bereitgestellt, über welche die Versorgung mit elektrischer, thermischer und chemischer Energie stattfindet. Aus

organischen Abfällen aus Lebensmittelindustrie, Urban Farming und Bioabfällen sowie Mikroalgenbiomasse wird Biogas erzeugt. Dieses wird durch Einleitung in die PBR-Fassade von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_x$  gereinigt und mittels BHKW in thermische und elektrische Energie umgewandelt. Die Energie wird von Lebensmittelindustrie, Urban Farming und sozialen Einrichtungen (hauptsächlich während der Werkzeit) sowie umliegenden Wohnbauten (hauptsächlich außerhalb der Werkzeit) und der PBR-Fassade genutzt.

Rauchgase des BHKWs und  $\text{CO}_2$ -haltige Gärgase dienen der Kohlenstoffversorgung der PBR-Fassade. Gärreste werden als Wachstumssubstrat und Dünger im Urban Farming genutzt.

**Gebäude für den menschlichen Aufenthalt**, insbesondere Beherbergung mit Gastronomie und Bildungseinrichtungen bieten der PBR-Fassade die notwendige Fläche und nützen gleichzeitig deren Fassadenfunktionen.

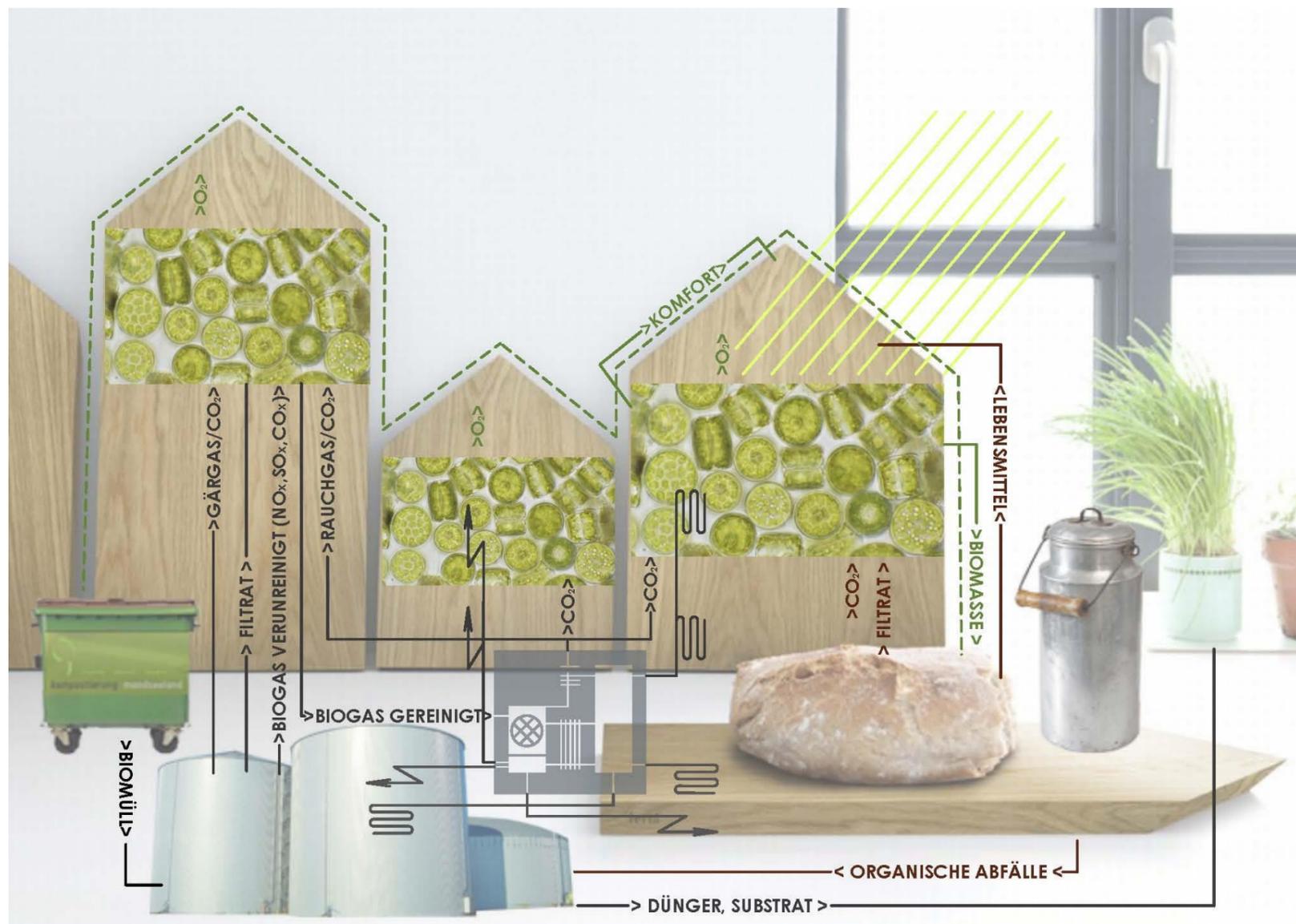


Abb. 4.2: Kreislauf der stofflichen und energetischen Flüsse in einer nachhaltigen Stadtzelle [ferm-living 2012, verändert]

## 4.2 Entwicklung der PBR-Fassade

Das vorrangige Ziel der Gebäudeintegration des PBRs in dieser Arbeit ist die Verbesserung des Verhältnisses von dessen Kosten zur Wertschöpfung. Das soll durch Übernahme von zusätzlichen Aufgaben bei gleichzeitig geringen konstruktiven Veränderungen erfolgen.

Bei der Integration eines PBRs in eine Fassade müssen einige Aspekte beachtet werden:

Zur Versorgung und zum Transport der Mikroalgen müssen die Zuleitung von Kultur, Nährstoffen und Nährgasen und die Ableitung von Kultur und Abluft ermöglicht werden. Diese Leitungen müssen einerseits thermisch und mechanisch geschützt andererseits für regelmäßige Wartung zugänglich sein.

Für Ernte und Weiterverarbeitung der Algenbiomasse muss Raum zur Verfügung stehen, der in direkter Verbindung zur PBR-Anlage steht. Dieser muss zumindest der Abtrennung der Algen vom Zuchtmedium, in optimaler Weise auch für deren Vergärung zu Biogas, dessen Aufbereitung und energetischen Verwertung Platz bieten.

Die Fassade eines Gebäudes bietet durch ein hohes Oberflächen- zu Grundflächenverhältnis viel Fläche zur Anbringung der PBRen. Die Belichtungsschwankungen, die durch die Verschattung durch das Gebäude selbst entstehen und die Aufnahmefähigkeit der Algen müssen durch geeignete Maßnahmen aufeinander abgestimmt werden.

Die exponierte Position an der Fassade erfordert zudem thermischen und mechanischen Schutz, wozu eine kompakte, stabile Form notwendig ist.

Speziell zur Erfüllung der letzten Anforderung wird der plattenförmige PBR als bester Reaktortyp angesehen und deshalb in dieser Arbeit fortan ausschließlich betrachtet.

Notwendige Anpassungen des PBRs sind die Ergänzung eines thermischen Schutzes, um die Fassade ganzjährig nützen zu können, eine Konstruktion zur Montage an der Fassade statt der üblichen Aufständigung am Boden und thermische Speichermasse zum Ausgleich von Temperaturspitzen, da ansonsten gebräuchlicher Überhitzungsschutz wie Besprühen mit Wasser oder gegenseitige Beschattung der Paneele an der Fassade nicht praktikabel ist.

### 4.2.1 Aufbau

Der generelle Aufbau erfolgt wie in Abb. 4.3 dargestellt. Das plattenförmige Zuchtbehältnis erhält zur Außenluft hin thermischen und mechanischen Schutz durch Mehrscheibenisolierverglasung und an der Innenseite thermische Speichermasse zum Ausgleich der unregelmäßigen solaren Einträge in Form eines latenten Speichers aus PCM, der wiederum durch wärmeschutzbeschichtetes Einscheibensicherheitsglas nach innen abgegrenzt ist.

Zur Abschätzung der nötigen Speichermasse, die die Schichtdicke des PCMs definiert, wird der maximale effektiv wirksame Energieeintrag (Reduktionsfaktor für effektiven g-Wert = 0,45 [Climatop 2013, Mahdavi et al. 2007]) mit der Schmelzenthalpie des PCMs verglichen. Die maximale Energie die an einem Tag in den Reaktor einfällt, muss vom PCM aufgenommen und bis zum nächsten Tag wieder abgegeben werden können.

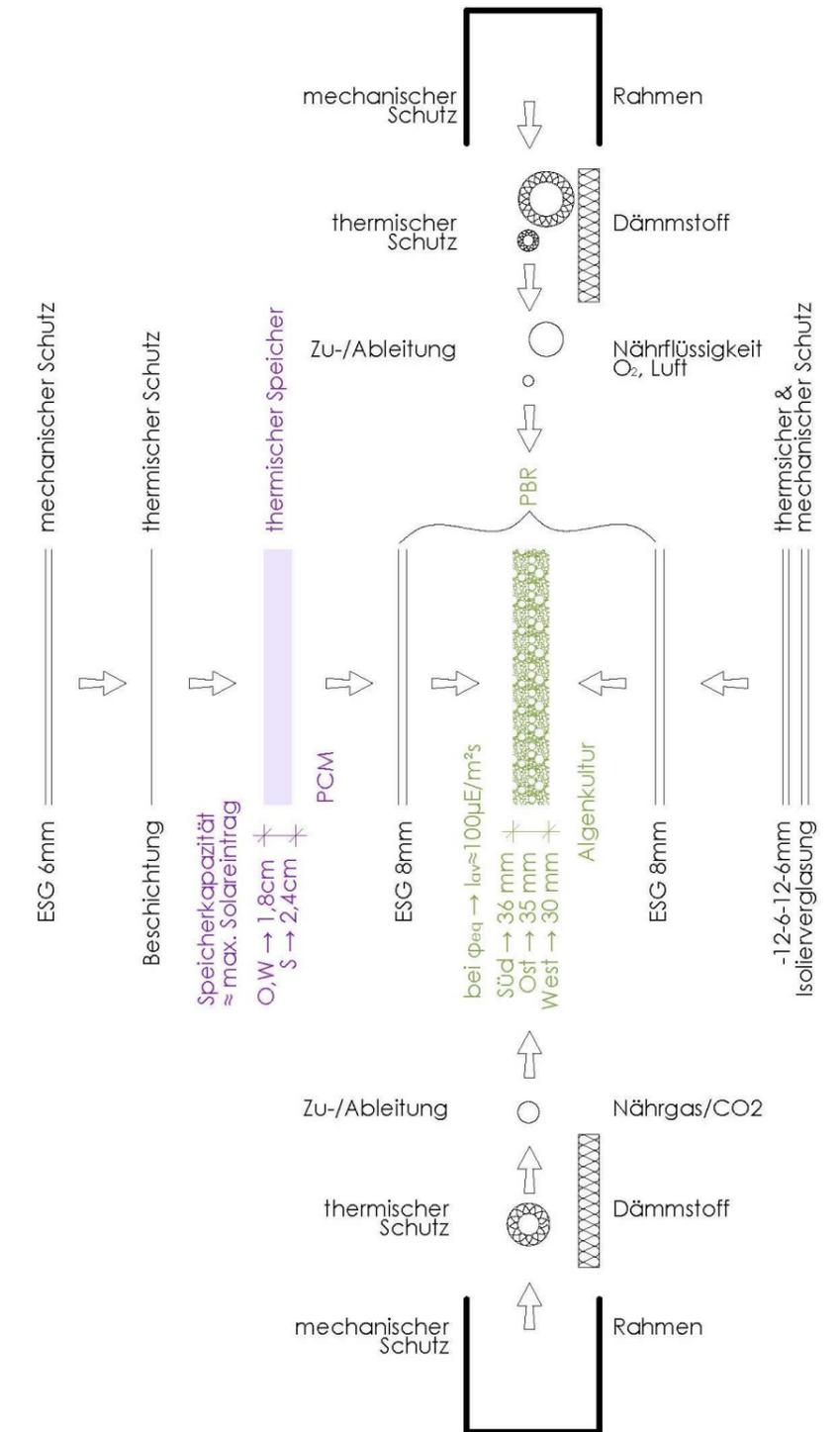


Abb. 4.3: Schematische Explosionsdarstellung des Aufbaus eines PBR-Fassadenelements

Die angenommene Schmelzenthalpie von 190J/g des PCMs und eine Dichte von 1.625kg/m<sup>3</sup> [Weinländer 2003] ergeben eine Schmelzenthalpie von 858Wh pro 1cm

Schichtdicke. Über den maximalen täglichen Strahlungseintrag [energyplus 2012a] lassen sich die benötigten PCM-Schichtstärken von 2,4cm für die Südfassade und jeweils 1,8cm für Ost- und Westfassade abschätzen.

GlassX bietet das Produkt glassXComfort an, ein Isolierglasfenster, dessen innerster Scheibenzwischenraum mit PCM ausgefüllt ist. Laut Herstellerangaben hat das Produkt eine thermische Speicherkapazität von  $1.185\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$  bei einer Speichertemperatur von  $26\text{-}28^\circ\text{C}$  [GlassX 2012]. Ähnlich diesem Produkt ist die Hülle der Mikroalgenkultur aufgebaut.

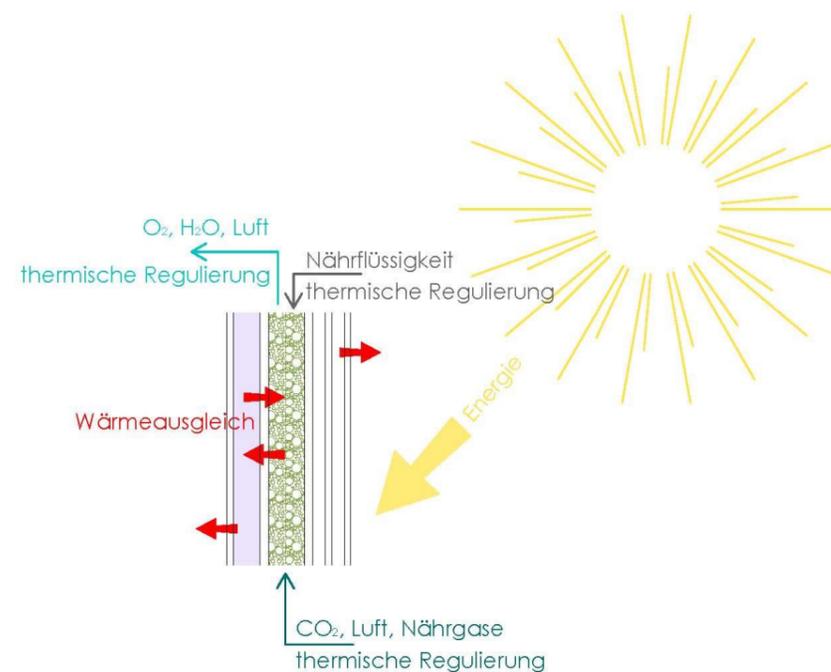


Abb. 4.4: Energiehaushalt der PBR-Fassade

Der Energieeintrag erfolgt durch solare Gewinne durch die Isolierverglasung (siehe Abb. 4.4). Diese soll bei guter Dämmung zur Minimierung der Wärmeverluste höchstmöglichen Lichtdurchlass zur Maximierung der Photosyntheseleistung der Mikroalgen ermöglichen.

In möglichst direktem Kontakt mit der Innenscheibe der Algenkultur sorgt eine Schicht aus PCM für einen Temperaturengleich zwischen Phasen direkter Sonneneinstrahlung mit hohem Energieeintrag und solchen mit geringer oder fehlender Einstrahlung, also während diffuser Lichtverhältnisse oder bei Nacht.

Nährgas und Nährflüssigkeit werden der Algenkultur zugeführt, Abluft abgeführt. Über diese Stoffströme ist eine ergänzende Temperierung der Kultur möglich.

Der Aufbau wird mittels Rahmen fixiert, in denen auch Zu- und Ableitungen sowie eine Aufhängung zur Montage untergebracht sind.

#### 4.2.2 Funktionsschema, Kulturverlauf

Einzelne PBR-Elemente werden zu einem Kreislauf zusammengeschaltet, der in definierten Intervallen eine zentrale Kontroll- und Erntestation durchläuft. Der Weg der Algenkultur entlang der Fassade verläuft, wie in Abb. 4.5 dargestellt, schlangenlinienförmig von unten nach oben, da im unteren Bereich von generell höherer Verschattung ausgegangen wird. Die Eigenverschattung der Algen nimmt während des Aufstiegs bzw. mit zunehmender Biomassedichte zu und wirkt so ausgleichend auf die Lichtexposition der Algenzellen. Die Paneele sind durch Kunststoffstege in Kanäle mit etwa quadratischem Querschnitt eingeteilt und so in Fassadenbereiche gegliedert, dass sich Zuchtstrecken von rund 3,8km ergeben, die von den Algen an einem Tag durchflossen werden [Ecoduna 2012b]. Diese Strecke entspricht je nach Paneelstärke rund  $100\text{m}^2$  Fassadenfläche.

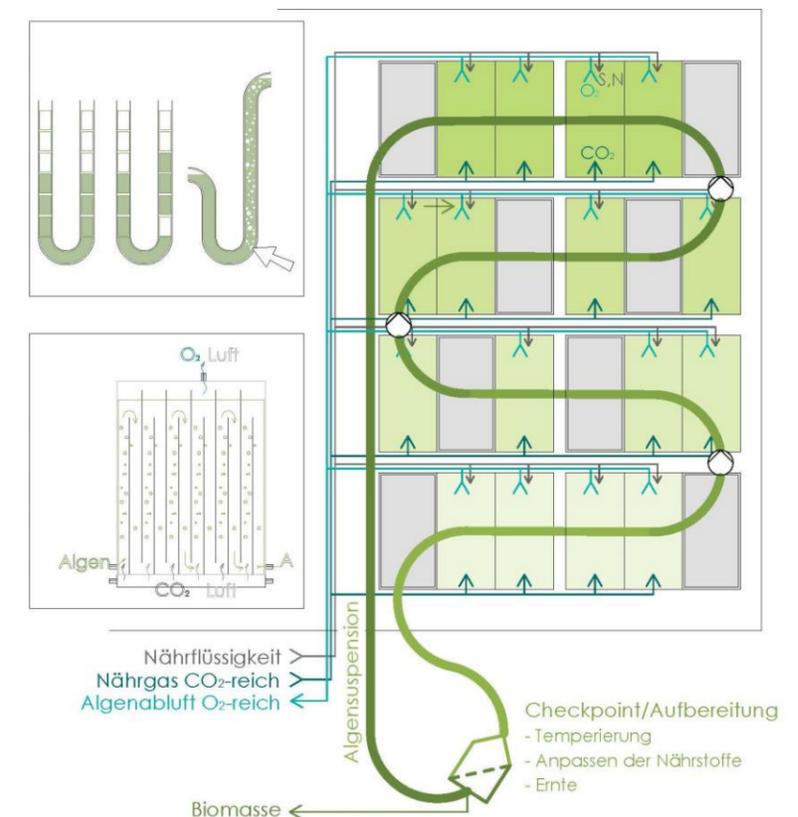


Abb. 4.5: Schematischer Kulturverlauf entlang der Fassade

An der zentralen Kontroll- und Erntestation, die von der Kultur täglich passiert wird, erfolgt eine Kontrolle von Biomassedichte, Temperatur und Nährstoffzusammensetzung im Kulturmedium, woraufhin zentral temperiert, geerntet und Nährstoffgehalte angepasst werden können. Es entsteht eine beinahe kontinuierliche Zucht, bei der die Algen möglichst in einer Phase mit maximalem Wachstum gehalten werden [Mulaku & Nyanhanga 2004].

Zur gleichmäßigen Lichtversorgung, guten Durchmischung und Versorgung der Kultur mit Nährstoffen erfolgt entlang der Zuchtstrecke eine Zuleitung von  $\text{CO}_2$ -haltiger Druckluft-Gas-Mischung von unten in das Zuchtbehältnis. Die eingebrachte Luft wird mit nun erhöhtem  $\text{O}_2$ -Gehalt im oberen Bereich jeder Etage wieder abgeführt. Nährlösung

wird ebenfalls im oberen Bereich jedes Paneels zugeführt, da so zur Einbringung weniger Druck erforderlich und eine gleichmäßigere Temperierung der Kultur möglich ist. Die besagte Temperaturanpassung erfolgt durch Temperieren von Nährlösung und Nährgas vor deren Einleitung. Der Kulturtransport innerhalb einer Etage erfolgt mittels Gaslift (siehe Kapitel 2.2.2.4) [vergleiche Ecoduna 2012a]. Zur Anhebung der Suspension auf die nächsthöhere Etage werden Pumpen eingesetzt.

### 4.2.3 Berechnung der Paneelstärke

Die vertikale Applikation von PBRen an einem opaken, bestehenden Objekt wie einem Gebäude bringt mit sich, dass sich die Ausrichtung der PBRen den vorhandenen Gegebenheiten anstatt den idealen Lichtbedingungen anpassen muss.

Anhand einer Gleichung die Beleuchtungsintensität, Kulturtiefe, Algenbiomassekonzentration und deren Licht-Absorptionsmaß miteinander in Beziehung setzt wurden geeignete Paneelstärken der Mikroalgenzuchtbehältnisse berechnet, die die passende Lichtintensität für unterschiedliche Orientierung und Jahreszeiten gewähren. Hierbei wird die Reaktortiefe für die Lichtsituation bei direkter Einstrahlung optimiert, da die Algenzellen durch zu starke Belichtung Schaden nehmen, bei schwacher Belichtung etwa durch diffuse Strahlung in der Zeit der Verschattung durch das Gebäude hingegen die Produktivität „nur“ sinkt, aber keine Zerstörung der Algen zu erwarten ist [Grobelaar 2006].

Die Lichtpfadlänge monatsdurchschnittlich typischer Lichteintragswerte an vertikalen Flächen, ausgerichtet gegen Nord, Ost, Süd und West wurde ermittelt.

Sie stellt in dieser Anwendung jene Distanz dar, die das Licht innerhalb der Algendispersion zurücklegt, bis sich die Lichtintensität des auf der Reaktorfläche auftreffenden Sonnenlichts auf ein Maß reduziert hat, das einer für das Algenwachstum optimalen Lichtintensität entspricht (siehe dazu Abb. 4.6).

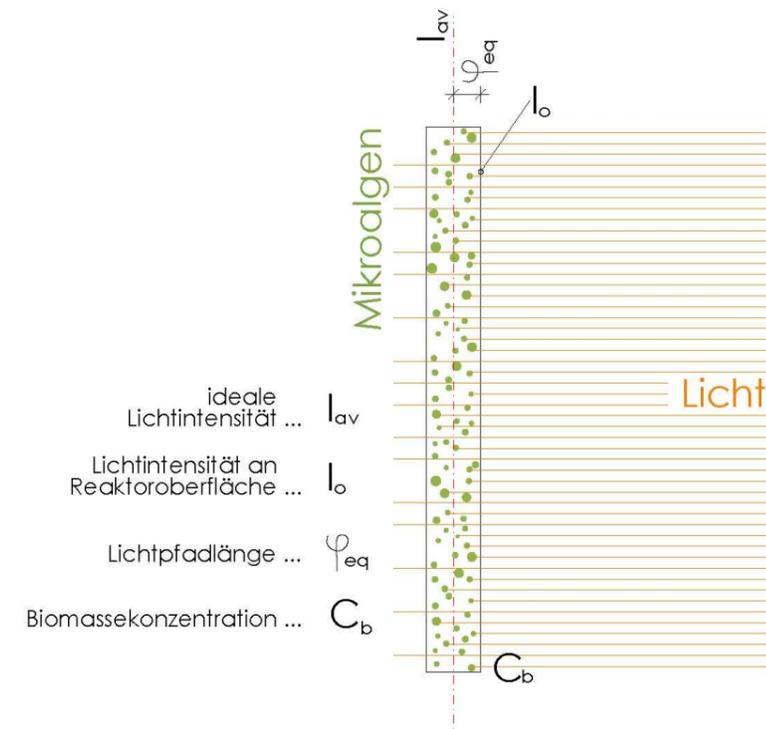


Abb. 4.6: Beziehung zwischen Lichtpfadlänge, Lichtintensität und Biomassekonzentration

Die Reduktion der Lichtintensität entsteht in erster Linie durch Absorption des Lichts durch die Mikroalgen und ist abhängig von deren Biomassekonzentration in Verbindung mit einem Absorptionskoeffizienten.

Die berechnete Lichtpfadlänge wird als halber Scheibenzwischenraum des Paneels angenommen – eine Algenzelle, die sich genau in der Mitte des Paneels befindet, ist also der optimalen Lichtintensität ausgesetzt. Kontinuierliche Durchmischung der Kultur soll ein gleichmäßig gutes Lichtangebot gewährleisten.

Für die Berechnung der halben Reaktorstärke wird folgende Gleichung verwendet [Carvalho et al. 2010]:

$$I_{av} = \frac{I_o}{\varphi_{eq} * K_a * C_b} * [1 - \exp(-\varphi_{eq} * K_a * C_b)]$$

wobei die Lichtpfadlänge  $\varphi_{eq}$  in m ermittelt werden soll.

Die Berechnung stellt eine Annäherung dar, um Aussagen zur Dimensionsabschätzung eines fassadenintegrierten PBRs und besonders dessen Veränderlichkeit nach Himmelsrichtung treffen zu können. Für eine genauere Betrachtung sollten unter anderem weitere Faktoren wie der Winkel des auftreffenden Lichts, die Durchmischungsrate der Kultur, Photoakklimatisation der Algen, Verschattung der Paneele, genauer Filtereffekt der Glasscheiben auf das Lichtspektrum und abweichende Lichtabsorptionseigenschaften der verwendeten Algenart berücksichtigt werden. Die hier verwendeten Werte sind der Literatur entnommen, wobei der dort zu findenden Bandbreite insofern Rechnung getragen wurde, als gehäuft vorkommende Werte, oder solche des mittleren Bereichs verwendet wurden.

**Vorgaben:** Für die durchschnittliche Lichtintensität  $I_{av}$ , die im Abstand von  $\varphi_{eq}$  zur Reaktoroberfläche innerhalb des Mediums herrscht, wird ein gewünschter optimaler Lichtwert von mindestens  $100 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  bzw. 5.100 lux [Posten 2009] angenommen, wobei dieser Wert eine maximale Lichtintensität von  $400 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  bzw. 20.400 lux [Carvalho et al. 2010] zu keiner Zeit überschreiten soll um Lichtinhibition zu vermeiden. Dieser Maximalwert ist stark von der Durchmischung innerhalb der Kultur abhängig. Wird eine Algenzelle durch turbulente Durchmischung in kurzen Intervallen Starklicht ausgesetzt, verträgt sie

deutlich höhere Lichtintensitäten als bei Dauerbeleuchtung [Park & Lee 2001].

Als Lichtintensität an der Kulturoberfläche  $I_0$  wird der durchschnittliche momentane Lichteinfall eines typischen Kalendermonats während des astronomischen Tages in Haupthimmelsrichtung (N, O, S oder W) an einer vertikalen Oberfläche eingesetzt. Hierzu wurden von Frau Mahnameh Taheri typische Wetterdaten aus dem Raum Schwechat (Niederösterreich) [energyplus 2012a] aufbereitet und die Ableitung der Werte der Strahlungsstärken für den Einfall auf vertikale Flächen durchgeführt [energyplus 2012b].

Die einfallende Sonnenstrahlung wurde wie in Kapitel 2.1.4.1 beschrieben umgerechnet: um ausschließlich den photoaktiven bzw. sichtbaren Anteil der Strahlung zu berücksichtigen wurde mit dem Faktor 0,45 [Wang et al. 2008] multipliziert. Diese Werte wurden näherungsweise mit einem Umrechnungsfaktor von 4,6 von  $W \cdot m^{-2}$  in  $\mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  für die Berechnung und mit dem Faktor 240 zur Veranschaulichung in Lux umgerechnet [Schwöbel 1994].

Als Abminderungsfaktor zur Beachtung von Reflexion und Absorption der 3-Scheiben-Isolierverglasung wird ein effektiv wirksamer Lichttransmissionswert  $T_L$  von 0,64 [Climatop 2013, Mahdavi et al. 2007] verwendet, der einen Lichtdurchlass von 64% durch die Scheiben beschreibt.

Für das Absorptionsmaß  $K_a$  wird ein von Carvalho et al. (2010) als typisch angegebener Wert von  $0,037 m^2 \cdot g^{-1}$  verwendet.

Je nach Jahreszeit und Ausrichtung der PBR-Fassade wird für die Berechnung eine Biomassekonzentration  $C_b$  von 2-

7g, mit einem jährlichen Durchschnitt von 5g Algentrockenmasse pro l Algendispersion [Posten 2009] angenommen.

Die für die Berechnung verwendeten Werte beziehen sich auf die Sonneneinstrahlung für die Zeit zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang, also während des astronomischen Tages, sofern nicht anders angegeben. Für die Berechnung des Scheibenzwischenraums wurde für Osten, Süden und Westen der Durchschnittswert der Summe diffuser und direkter Einstrahlung während der Zeit direkter Einstrahlung auf die orientierte Fläche verwendet und für Norden der Durchschnittswert der Summe diffuser und direkter Einstrahlung während des astronomischen Tages. Zur Kontrolle der Vermeidung von Lichtinhibition wurde der Maximalwert der Summe diffuser und direkter Einstrahlung stündlich gemessener Werte des jeweiligen Monats verwendet.

**Ergebnis:** Aus der Berechnung ergibt sich für eine durchschnittliche jährliche Biomassedichte von  $5g \cdot l^{-1}$  und einer optimalen Lichtintensität  $I_{av} \approx 100 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  im Abstand des halben Scheibenzwischenraums  $\phi_{eq}$  von der Reaktorinnenoberfläche für den Scheibenzwischenraum  $2 \cdot \phi_{eq}$  eine Größe von:

36 mm an Südfassaden,  
35 mm an Ostfassaden und  
30 mm an Westfassaden.

Im Norden wird die gewünschte Lichtintensität von  $100 \mu E \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  nach der Abschwächung der 3-Scheiben-Verglasung selbst an der äußersten Schichte der Kultur nicht erreicht, womit keine optimale Belichtung für die Algenzucht an der Nordfassade gegeben ist. Die Anbringung eines PBRs an der Nordfassade wird auf

Grund dessen nicht für sinnvoll erachtet und scheidet für die weitere Betrachtung aus. Die Paneelstärken für Süden, Osten und Westen entsprechen jenen, die auch in der Literatur [Hu & Richmond 1994] empfohlen werden und werden für die weitere Betrachtung verwendet.

#### 4.2.4 Fassadentypen

Je nach Bauweise des zu sanierenden Gebäudes wird das oben beschriebene PBR-Element in leicht abgewandelter Form an unterschiedlichen Positionen und für leicht variierenden Aufgaben eingesetzt.

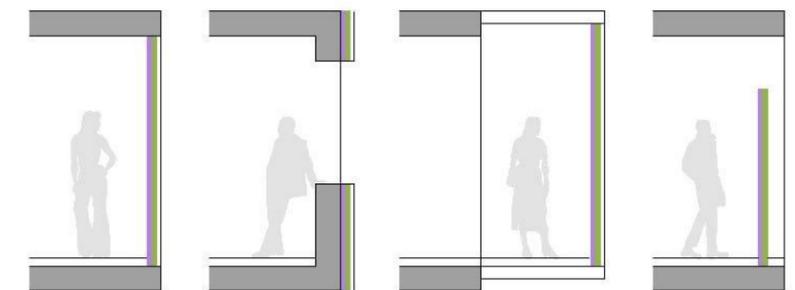


Abb. 4.7: Schematische Darstellung der vier Fassadenvarianten

Zur Sanierung von Skelettbauten, beispielsweise bei der Umnutzung ehemaliger Gewerbebauten, kann wie in Abb. 4.7 links dargestellt, der PBR als **Außenwandelement** eingesetzt werden. Für Belichtungsflächen wird die PBR-Fläche durch offenbare Glaselemente unterbrochen. Für Nebenräume und Erschließung, für die keine Aussicht benötigt wird, ist durch die durchschnittliche Lichttransmission von rund 4-11% auch bei geschlossener PBR-Fassade eine geringe Belichtung gegeben.

An Massivbauten mit Lochfassade kann der PBR als **Verkleidungspaneel** angebracht werden, siehe Abb.4.7 zweite von links. Für gute Wärmeleitung zwischen PBR und Außenmauer werden eventuell vorhandene Dämmschichten oder loser Putz abgetragen und eine

thermische Verbindung durch eine formbare PCM-Matte hergestellt. Die Fassade wird bis auf die Fensterflächen komplett eingekleidet.

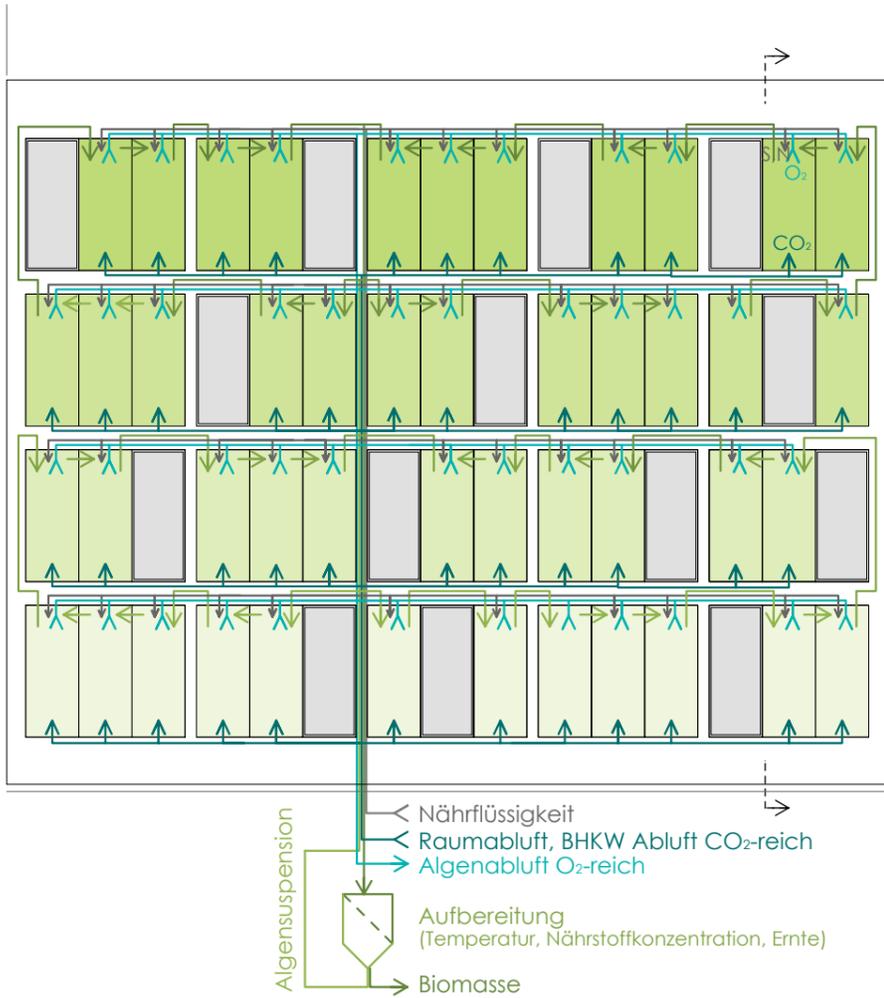
Fassaden, die vor Schall geschützt werden müssen, werden PBR-Paneele als **Doppelfassade** vorgesetzt (Abb.4.7 zweite von rechts). Die entstehenden Loggien können während des gesamten Jahresverlaufs wie ein zusätzlicher Wohnraum genutzt werden, da ihre Temperatur über die PBR-Fassade reguliert wird. Diese Variante ist nur bei vorhandenem Platz für die Erweiterung möglich.

Für vollflächig verglaste Bürogebäude, die zu Überhitzung neigen, eignet sich ein „PBR-Klimaelement“ (Abb.4.7 rechts), das im Innenraum hinter der bestehenden Verglasung aufgestellt wird. Durch die hohe Speicherkapazität der Algenkultur und der PCM-Schichte werden solare Einträge gespeichert und gleichmäßig im Tagesverlauf abgegeben, wodurch sich besonders die Spitzenkühlkosten reduzieren lassen.

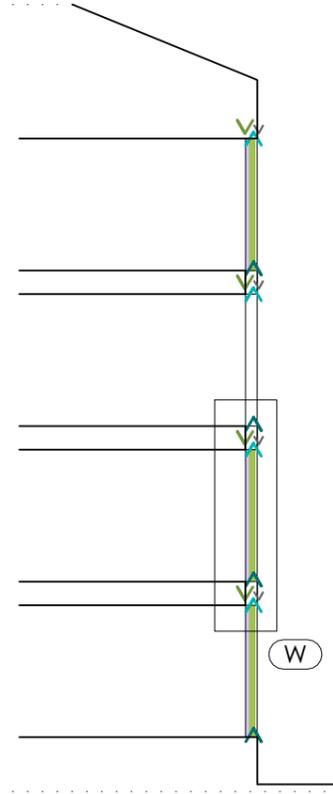
#### 4.2.5 Ausformulierung und Detaillierung

Auf den folgenden Seiten werden die vier oben beschriebenen Varianten zur Ausformulierung einer PBR-Fassade dargestellt. Gezeigt werden in Abb.4.8, Abb.4.9, Abb.4.10 und Abb.4.11 jeweils die schematische Kulturbewegung entlang der Fassade inklusive Zu- und Ableitung von Nährflüssigkeit, Nährgas und Algenabluft sowie eine Fotocollage zur Veranschaulichung, die Einschätzung der Anwendbarkeit der Fassadenfunktionen in Listenform und ein Fassadenschnitt zur Darstellung der konstruktiven Umsetzung.

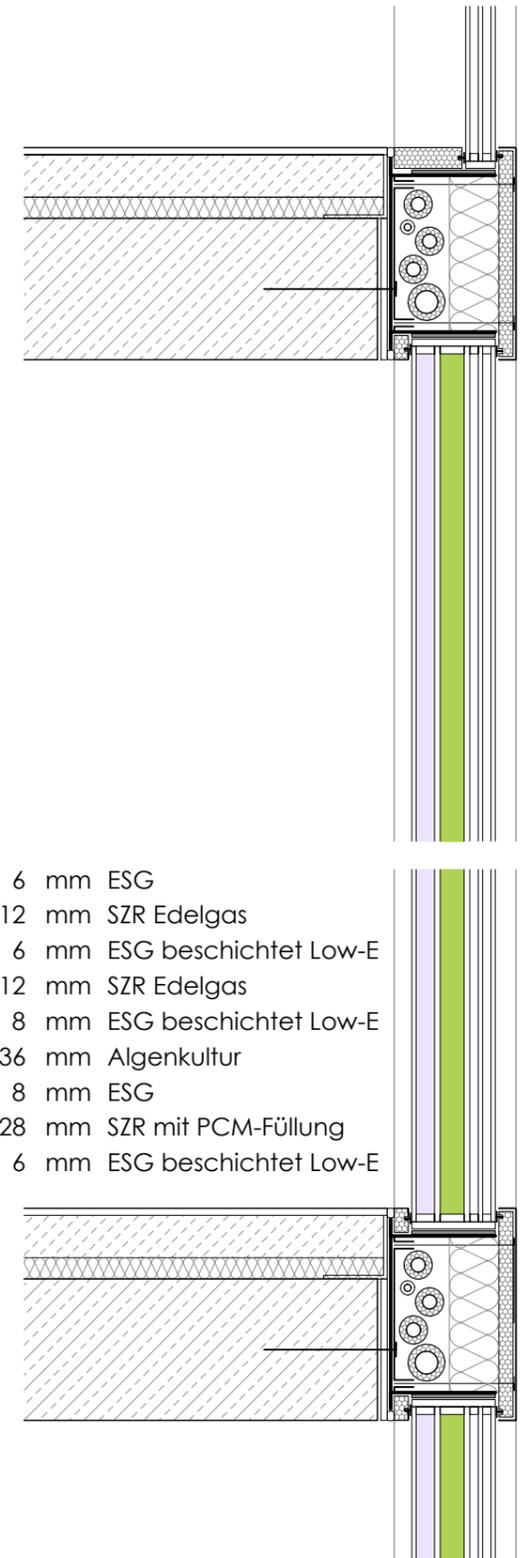
a) Kulturbewegung entlang der Fassade



b) Fassadenschnitt M 1:150



c) Fassadenschnitt (W) M 1:10



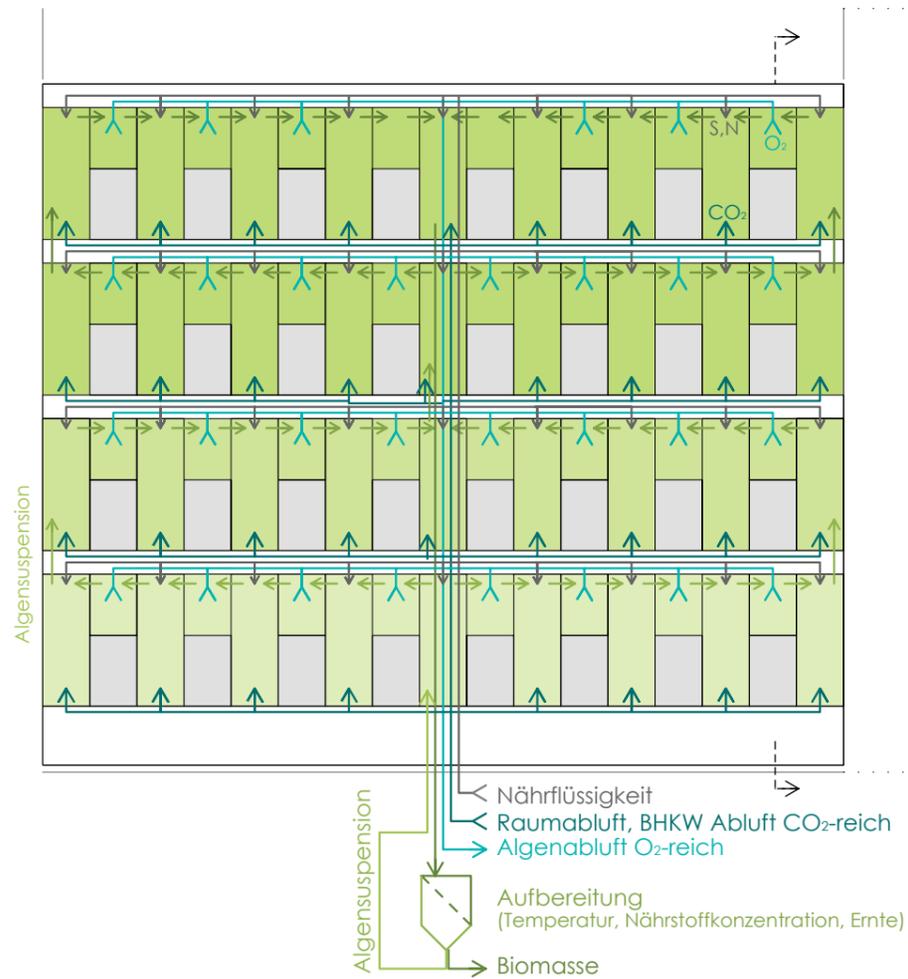
e) Anwendungsbeispiel

- Raumluftauflbereitung
- Emissionsminderung
- Abwasseraufbereitung
- variable Beschattung
- Lichtleitung
- Schallschutz
- thermischer Speicher
- thermischer Schutz
- Gestaltungselement
- Imageaufwertung
- didaktische Wirkung
- Energiegewinnung
- Heizung
- Kühlung
- Raumabschluss
- Sichtschutz
- Witterungsschutz

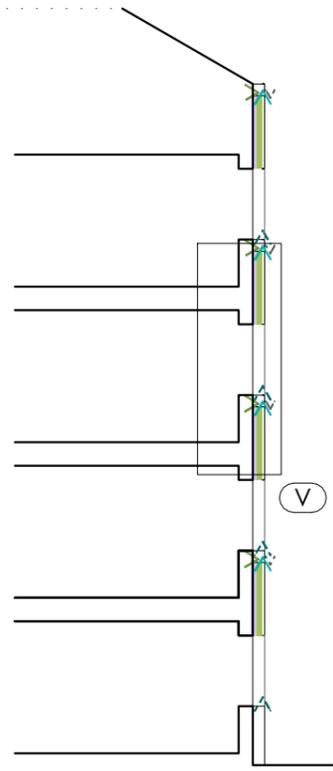
d) Fassadenfunktionen - Checkliste

Abb. 4.8: PBR als Wandelement  
a) Kulturbewegung entlang der Fassade b) Fassadenschnitt M 1:150  
c) Fassadenschnitt M 1:10 d) Checkliste der Fassadenfunktionen  
e) Anwendungsbeispiel als Fotomontage [Schlot 2011, verändert]

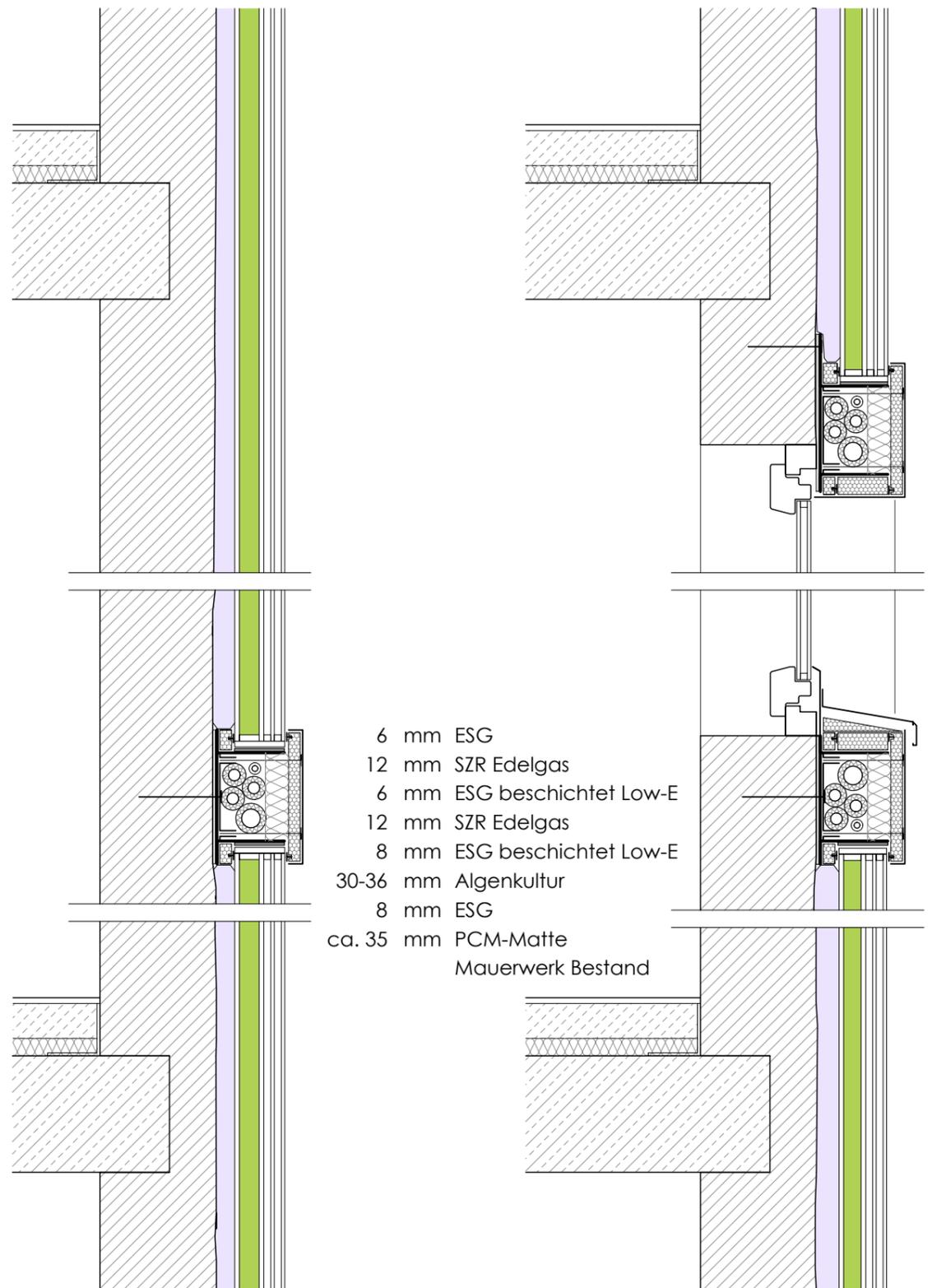
a) Kulturbewegung entlang der Fassade



b) Fassadenschnitt M 1:150



c) Fassadenschnitt (V) M 1:10



e) Anwendungsbeispiel

- Raumluftaufbereitung
- Emissionsminderung
- Abwasseraufbereitung
- variable Beschattung
- Lichtleitung
- Schallschutz
- thermischer Speicher
- thermischer Schutz
- Gestaltungselement
- Imageaufwertung
- didaktische Wirkung
- Energiegewinnung
- Heizung
- Kühlung
- Raumabschluss
- Sichtschutz
- Witterungsschutz

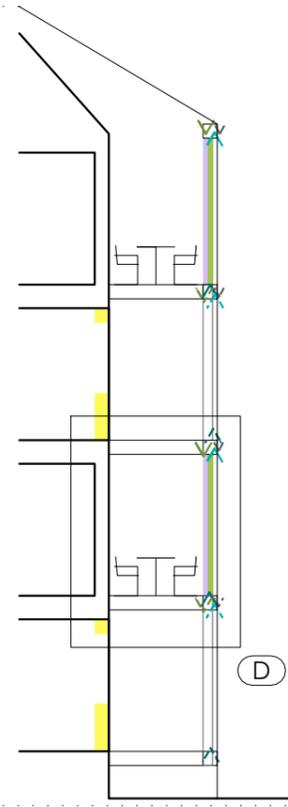
d) Fassadenfunktionen - Checkliste

Abb. 4.9: PBR als Verkleidung  
 a) Kulturbewegung entlang der Fassade b) Fassadenschnitt M 1:150  
 c) Fassadenschnitt M 1:10 d) Checkliste der Fassadenfunktionen  
 e) Anwendungsbeispiel als Fotomontage [Standard 2013, verändert]

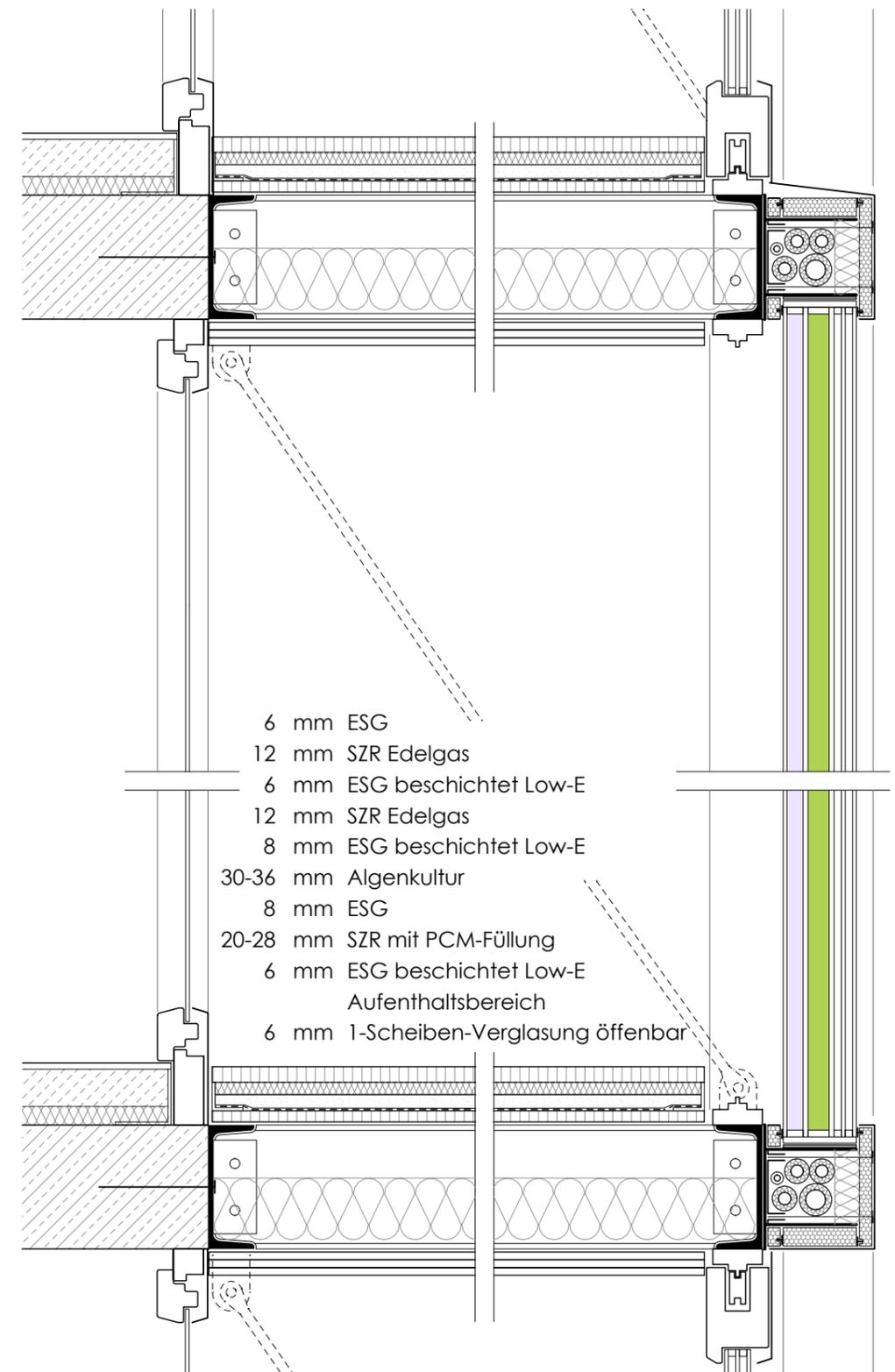
a) Kulturbewegung entlang der Fassade



b) Fassadenschnitt M 1:150



c) Fassadenschnitt (D) M 1:10



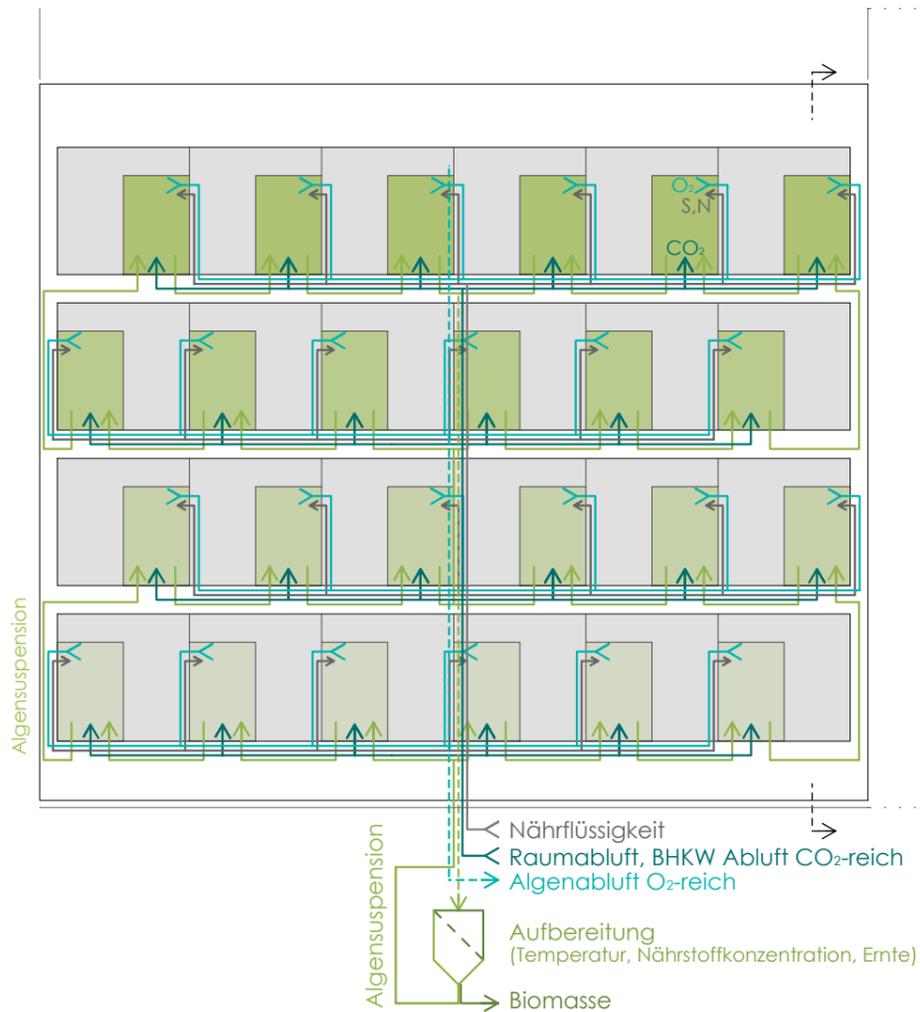
e) Anwendungsbeispiel

- Raumluftaufbereitung
- Emissionsminderung
- Abwasseraufbereitung
- variable Beschattung
- Lichtleitung
- Schallschutz
- thermischer Speicher
- thermischer Schutz
- Gestaltungselement
- Imageaufwertung
- didaktische Wirkung
- Energiegewinnung
- Heizung
- Kühlung
- Raumabschluss
- Sichtschutz
- Witterungsschutz

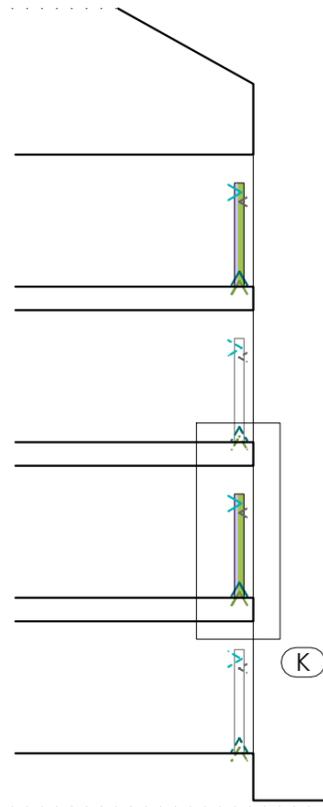
d) Fassadenfunktionen - Checkliste

Abb. 4.10: PBR als Doppelfassade  
a) Kulturbewegung entlang der Fassade b) Fassadenschnitt M 1:150  
c) Fassadenschnitt M 1:10 d) Checkliste der Fassadenfunktionen  
e) Anwendungsbeispiel als Fotomontage [baulinks 2011, verändert]

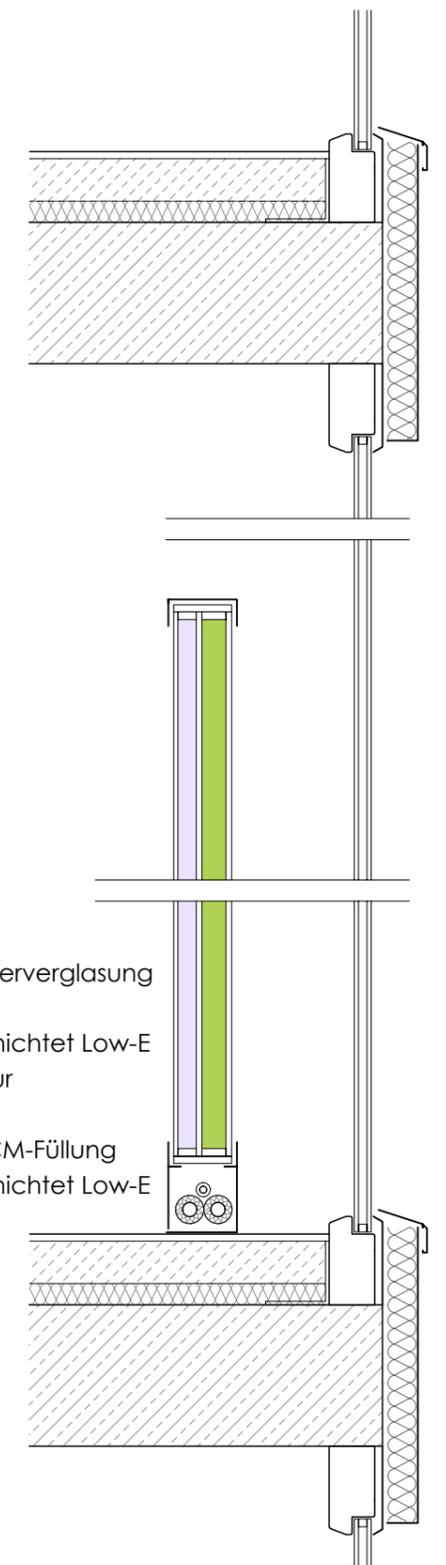
a) Kulturbewegung entlang der Fassade



b) Fassadenschnitt M 1:150



c) Fassadenschnitt (K) M 1:10



e) Anwendungsbeispiel

- Raumluftaufbereitung
- Emissionsminderung
- Abwasseraufbereitung
- variable Beschattung
- Lichtleitung
- Schallschutz
- thermischer Speicher
- thermischer Schutz
- Gestaltungselement
- Imageaufwertung
- didaktische Wirkung
- Energiegewinnung
- Heizung
- Kühlung
- Raumabschluss
- Sichtschutz
- Witterungsschutz

d) Fassadenfunktionen - Checkliste

- 6-12-6 mm 2-Sch. Isolierverglasung
- mm Raumluft
- 8 mm ESG beschichtet Low-E
- 30-36 mm Algenkultur
- 8 mm ESG
- 20-28 mm SZR mit PCM-Füllung
- 6 mm ESG beschichtet Low-E

Abb. 4.11: PBR als "Klimaelement"

a) Kulturbewegung entlang der Fassade b) Fassadenschnitt M 1:150

c) Fassadenschnitt M 1:10 d) Checkliste der Fassadenfunktionen

e) Anwendungsbeispiel als Fotomontage [Detail360 2011, verändert]

PBR als "Klimaelement"

### 4.3 Fassadenfunktionen

Funktionen, die von der PBR-Fassade übernommen werden sollen Mehrwerte generieren um bei einer Bilanzierung den Wert des PBRs im Vergleich zu seinen Kosten zu steigern.

#### 4.3.1 Fassade als multifunktionales Bauteil

Von einer *polyvalenten Wand* (siehe Abb.4.12) forderte Mike Davis 1981, alle Fassadenfunktionen in einem Bauteil zu übernehmen. Unterschiedliche Schichten sollten dabei thermische, optische und akustische Schutzfunktionen und die Energieversorgung übernehmen [Knaack 2007].

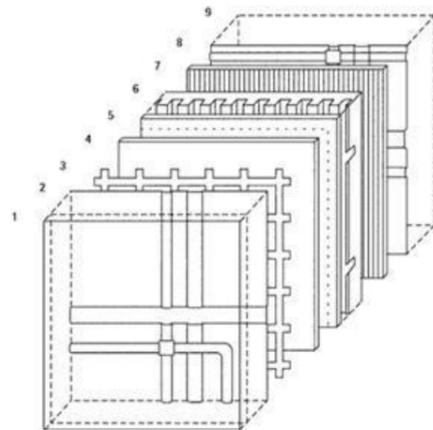


Abb. 4.12: Schichtenaufbau der polyvalenten Wand von Mike Davis [Knaack 2007]

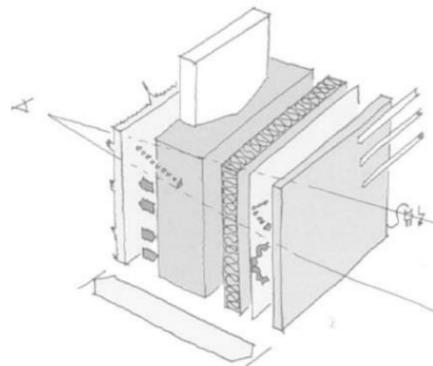


Abb. 4.13: Schichtenaufbau der integralen Hülle von Ulrich Knaack [Knaack 2007]

Ulrich Knaack sieht in der integralen Fassade (siehe Abb. 4.13) „eine Vision, die sich schrittweise mit der Entwicklung von neuen Komponenten und Technologien erfüllen wird“ und deren Weiterentwicklung, die „immer im Sinne von Nutzer, Energieeinsparung und architektonischer Qualität erfolgen“ muss [Knaack 2007, S.131]. Auch er geht von der Fassade der Zukunft als ganzheitliches Element aus und beschreibt deren Aufgaben mit Tragen, Dämmen, Dichten, Lüften, gesteuerter Transparenz und Energiegewinnung.

Die PBR-Fassade besteht ebenso aus einzelnen Komponenten die Fassadenfunktionen übernehmen können (vergleiche Kerner 2012). Sie verteilen sich auf die Mikroalgen selbst, den PRB als Bauteil und die Zuchtbedingungen die für die Kultivierung der Algen hergestellt werden müssen (siehe Abb. 4.14).

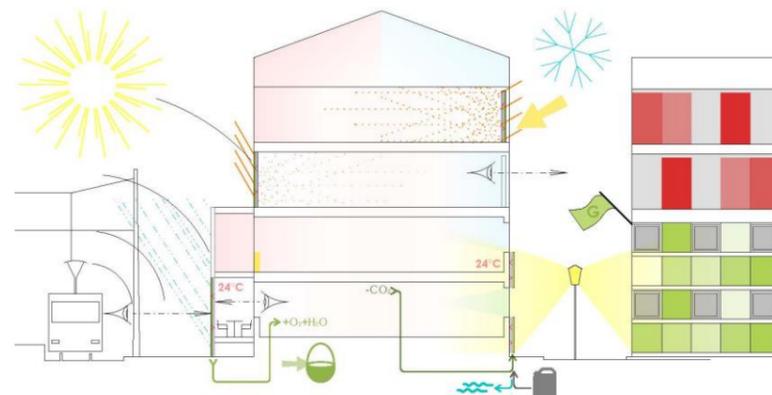


Abb. 4.14: Nutzung der PBR-Fassade zur Erfüllung verschiedener Fassadenfunktionen

Funktionen, die von den Mikroalgen, dem PBR als Bauteil oder durch die hergestellten Zuchtbedingungen übernommen werden könnten und im Weiteren untersucht werden sollen, sind folgende:

- Die Algen selbst verstoffwechseln zur eigenen Nährstoffversorgung Stoffe, die der Mensch abgibt - so

können sie in dessen unmittelbarer Nähe für Recycling von Abluft und Abwässern sorgen.

- Die als Energiequelle „verbrauchte“ Sonnenenergie dient der Beschattung der Gebäudehülle.
- Übermäßig absorbierte Sonnenstrahlung wird als Wärmeenergie im Zuchtmedium und der PBR-Hülle gespeichert und zur Raumheizung und Warmwassererwärmung genutzt.
- Die Mikroalgenkultur ist durch Anbringung an der Fassade von außen deutlich sichtbar. Sie demonstriert Umwelt-Engagement und Innovativität und verhilft zu „grünem“ Image.
- Aus den Stoffwechselprozessen entstandene Biomasse kann für energetische und nichtenergetische Zwecke genutzt werden.
- Der Photobioreaktor als Zuchtgefäß übernimmt Schallschutz.
- Zuchtmedium und Zuchtgefäß wirken als thermischer Speicher.
- Reflexionen innerhalb des erstarrten PCMs führen durch Lichtstreuung zu besserer Tageslichtausnutzung.
- Der PBR übernimmt als plattenförmiges Bauteil die Funktion einer Wand und dient dem Witterungs- und Sichtschutz sowie dem Raumabschluss.
- Die Gewährleistung geeigneter Wachstumsbedingungen dient auch dem Raumkomfort.
- Die warme PBR-Hülle verhindert Transmissionswärmeverluste aus dem Innenraum und ersetzt so eine Wärmedämmung.
- Der PBR wirkt als temperiertes Bauelement als Flächenheizung bzw. -kühlung.
- Um gleichmäßige Temperaturverhältnisse für die Algen zu schaffen, wird Latentwärmespeichermaterial in den PBR

eingebaut, das für ausgeglichene Temperaturen auch im Rauminnen sorgt.

Die Abstimmung aller aktiven Fassadenfunktionen aufeinander, auf die Algen und auf Umwelteinflüsse kann über automatisierte Prozess- und Anlagenführung erfolgen, wie Kerner (2012) beschreibt. Sie steuert Stoff- und Energieflüsse und kann in bestehende Haustechniklösungen integriert werden.

Im Folgenden wird geprüft, inwieweit die Umsetzung der oben angeführten Fassadenfunktionen durch die PBR-Fassade übernommen werden kann.

### 4.3.2 Demonstrationsgebäude

Zur besseren Beurteilung der Fassadenfunktionen und als Basis für Berechnungen wird ein einfaches Demonstrationsgebäude (siehe Abb. 4.15) mit den Maßen des beheizten Bruttovolumens von 20x20x14m verwendet.

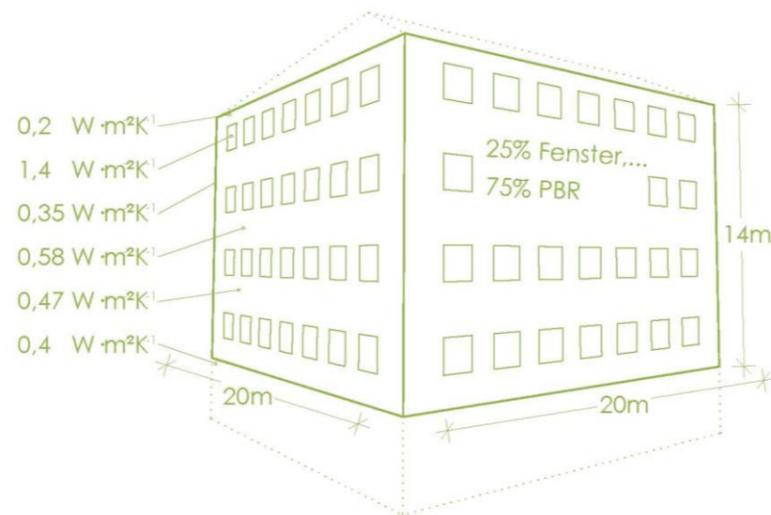


Abb. 4.15: Schematische Darstellung des Demonstrationsgebäudes incl. definierender Werte

75% der Fassadenfläche sind mit PBR-Fläche bedeckt, 25% mit Fenstern, Türen, Rahmen und dergleichen. Aufgrund des angenommenen urbanen Standorts wird von halbverschatteter Lage ausgegangen, wofür ein Reduktionsfaktor von 0,75 [Mahdavi et al. 2007] einberechnet wird. Der Fassadentyp ist variabel. Für die Berechnungen werden die Varianten „PBR als Wandelement“ und „als Verkleidung“ verglichen. Die Varianten „PBR als Doppelfassade“ bzw. „Klimaelement“ werden durch ihren fehlenden Kontakt zum Innen- bzw. Außenraum für die Berechnungen als weniger aussagekräftig erachtet.

### 4.3.3 Reinigungsfunktionen

Ähnlich dem Sauerstoff-Kohlenstoffkreislauf in der Atmosphäre zwischen photoautotrophen und heterotrophen Organismen funktioniert ein Kreislauf zwischen PBR und Gebäude.

#### 4.3.3.1 Luftaufbereitung

Die Mikroalgenkultur kann über Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Minderung, O<sub>2</sub>-Anreicherung und Luftbefeuchtung zur Raumluftaufbereitung und Emissionsreduktion beitragen.

Mittels eines konventionellen mechanischen Lüftungssystems erfolgen die Frischluftverteilung im Gebäude und der Luftaustausch zwischen Außen und Innen, wobei im Großen und Ganzen CO<sub>2</sub> gegen O<sub>2</sub> ausgetauscht wird. Bei Zu- und Entlüftung der Algenkultur erfolgt der gegensätzliche Austausch von O<sub>2</sub> gegen CO<sub>2</sub>. Werden beide Lüftungssysteme zusammengeschlossen, entsteht ein Kreislauf. Wie in Abb. 4.16 dargestellt, wird ein Teil der Gebäudeabluft bei Bedarf vorgewärmt, und als Nährgas komprimiert dem PBR zugeführt.

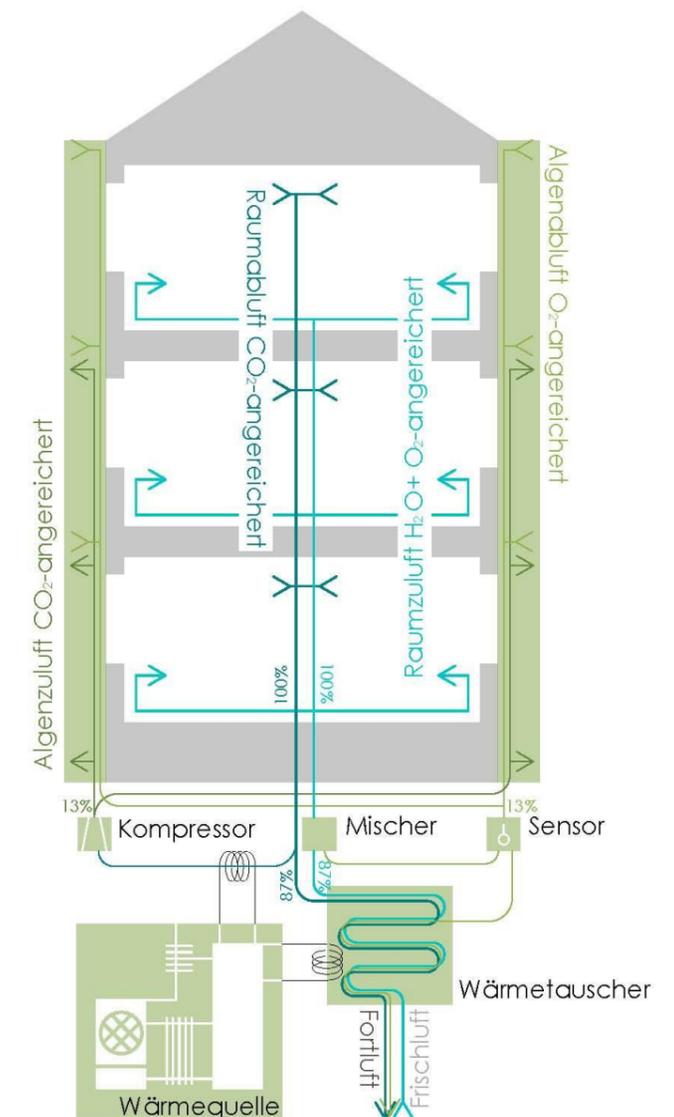


Abb. 4.16: Schematische Darstellung der Raumluftaufbereitung  
Im Zuge von Photosynthese und Zellwachstum werden CO<sub>2</sub> und weitere unerwünschte Luftbestandteile von den Algen als Nährstoffe aufgenommen und O<sub>2</sub> abgegeben. Die mit Feuchtigkeit und Sauerstoff angereicherte Abluft wird zur Lüftungsanlage rückgeführt, auf eventuell verbleibenden CO<sub>2</sub>- und Schadstoffrestgehalt geprüft, die bei unerwartet geringer Photosyntheserate auftreten können, und bei geeigneter Qualität vorgewärmter Frischluft beigemischt, um als Raumzuluff verteilt zu werden.

Für das verwendete Demonstrationsgebäude ergibt sich für eine CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumabluft von 0,1% (nach Max Pettenkofer), eine Raumlftwechselzahl von 2·h<sup>-1</sup> in Verbindung mit einer Photosyntheseeffizienz der photoaktiven Strahlung beschatteter Reaktoren von 11,4% [Zittelli et al. 2006] und einer Durchlüftungsrate der Algenkultur von 1·min<sup>-1</sup> [Sierra et al. 2007], dass etwa 606% im Winter und 271% im Sommer des für das Algenwachstum benötigten CO<sub>2</sub> über eine anteilige Menge von 13% der Raumabluft bereitgestellt werden kann. Untersucht müsste werden, ob die relativ kurze Verweilzeit des CO<sub>2</sub> in der Algensuspension ausreicht, um (annähernd) vollständig aufgenommen zu werden. Bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration der Raumabluft von 0,1% müssten die Algen knapp 2/3 des CO<sub>2</sub> aufnehmen, um Abluft mit gleichem CO<sub>2</sub>-Gehalt abzugeben wie den der atmosphärischen Luft.

Die hohe Luftfeuchte der Algenabluft, die der Raumzuluft beigemischt wird, kann deren Befeuchtung übernehmen. Um die relative Luftfeuchtigkeit der Raumlft bei 20°C von trockener Raumlft im Winter ohne Luftbefeuchtung mit ca. 30% auf behagliche 45% [Zürcher & Frank 2010] anzuheben, müssten bei zweifachem stündlichen Luftwechsel mit einem Lüftungsvolumen von 9.550m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>, 1.417m<sup>3</sup> Algenabluft mit einer Luftfeuchte von 100% bei 24°C zugemischt werden. Für diese Menge müsste die Durchlüftung der Algen 1,37·min<sup>-1</sup> betragen. Die Raumlftaufbereitung und Luftbefeuchtung mittels PBR ist in erster Linie durch die Möglichkeit der Reduktion des Lüftungswärmeverlustes und durch den Ausgleich des geringen Wassergehaltes in der kalten Frischluft für das Winterhalbjahr relevant. Eine Durchlüftungsrate von 1,37·min<sup>-1</sup> ergibt im Winter allerdings eine CO<sub>2</sub>-

Übersorgung der Algen von 730%, was dazu führt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Algenabluft mit rund 880ppm deutlich über jener der Frischluft liegt und sich somit nicht als Bestandteil der Raumzuluft eignet. Um zu verhindern, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Algenabluft 380ppm (atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration) übersteigt, kann je nach Priorität – Luftbefeuchtung, Energieeffizienz oder maximaler Düngeneffekt - entweder die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Algenzuluft mit Frischluft „verdünnt“, die Durchlüftungsrate der Kultur reduziert und eine zusätzliche Feuchtequelle gefunden werden oder der Algenabluft wird über einen Wärmetauscher die Wärme entzogen und sie selbst nicht als Raumlft verwendet.

Für eine Raumlftaufbereitung im Sommerhalbjahr würde der entsprechende CO<sub>2</sub>-Gehalt der Algenabluft sprechen, dagegen allerdings der Energieaufwand der mechanischen Lüftung im Vergleich zur Fensterlüftung und die im Sommer nötige Entfeuchtung der aufbereiteten Zuluft. Die lichtabhängige Produktivität und somit der CO<sub>2</sub>-Bedarf der Mikroalgen verlaufen gegensätzlich zum üblichen jahreszeitlichen CO<sub>2</sub>-Angebot eines Gebäudes. Da der Warmwasserbedarf leicht über die solaren Gewinne der PBR-Fassade gedeckt werden kann und somit eine zusätzliche Wärme- und gleichzeitig CO<sub>2</sub>-Quelle nicht benötigt wird, wird eine alternative CO<sub>2</sub>-Quelle, wie in Kapitel (4.1.2) angeführt, benötigt.

Diese Beobachtungen ergeben, dass das BHKW als CO<sub>2</sub>-Quelle für die PBR-Fassade aufgrund der schlechten Übereinstimmung zwischen Wärme- und CO<sub>2</sub>-Angebot und -Nachfrage wenig geeignet ist.

Fraglich ist, ob ein halbjährlicher Wechsel zwischen Abgas- und Frischluftaufbereitung in denselben Leitungen

stattfinden kann, oder ob sich Verunreinigungen in den Leitungen halten und im Winter an die Raumzuluft abgegeben würden.

Um eine Aussage über die Effizienz der Luftaufbereitung treffen zu können, müsste das Zusammenspiel zwischen CO<sub>2</sub>-Versorgung, Luftbefeuchtung, Energieeinsatz, Biomasseaufbau und Lichtverhältnissen detailliert untersucht werden.

Wird die Algenabluft nicht direkt als Raumzuluft verwendet, sondern nur deren thermische Energie mittels Wärmetauscher abgenommen, ist eine starke Übersorgung der Kultur mit CO<sub>2</sub> möglich. Diese führt zu verstärktem Einbau von Kohlenstoff und somit zu verstärktem Wachstum [Schneider 2011].

Die Emissionsminderung, also der CO<sub>2</sub>-Bedarf der Algen des Demonstrationsgebäudes liegt voraussichtlich bei 2,7t<sub>CO2</sub>·a<sup>-1</sup>. Beim Wert eines CO<sub>2</sub>-Zertifikates von 6,65€ (Stand 17/02/2013 [e&t 2013]) entspricht diese Menge einem monetären Wert von 18€·a<sup>-1</sup>, was für die Gegenrechnung der Anschaffungskosten vernachlässigbar gering ist. Zum Vergleich: ein/-e Österreicher/-in war im Jahr 2008 im Durchschnitt für die Emission von 8,6t<sub>CO2</sub>·a<sup>-1</sup> verantwortlich [Wikipedia 2013c].

#### 4.3.3.2 Abwasseraufbereitung

Für die Mikroalgenbiomasseproduktion zur Gewinnung von Nahrungsmitteln, Futter, pharmazeutischen oder kosmetischen Produkten ist auf eine geeignete Qualität und Herkunft der Nährstoffe zu achten. Für Biomasse, die von Tieren oder Menschen konsumiert wird, dürfen keine Rohstoffe aus Abfällen oder Abwässern verwendet werden [Ecoduna 2012a]. Um Abwasseraufbereitung

trotzdem mit der Erzeugung hochwertiger Produkte zu kombinieren, kann diese in einem mehrstufigen Prozess erfolgen, wie in Abb.4.17 [Ecoduna 2012a] dargestellt ist und im Folgenden erläutert wird:

Den ersten Schritt stellt eine grobe Vorreinigung des Abwassers von Feststoffen dar, um eine gute Lichtverteilung zu gewährleisten.

Im zweiten Schritt erfolgt eine Aufbereitung im PBR durch Kultivierung von Mikroalgen mit Nutzung des Abwassers als Kulturmedium und zur Nährstoffversorgung und CO<sub>2</sub> aus

Rauchgasen bis ein „Bewässerungswasser“-Standard erreicht ist. Die gewonnene Biomasse wird zu Biogas vergoren, von dem gereinigtes CO<sub>2</sub> abgetrennt wird. CO<sub>2</sub>-freies Methan verbleibt als Brennstoff. Als weiteres Produkt der Fermentation verbleiben Nährstoffe.

Die produzierten Rohstoffe aus Stufe 2 – Wasser und CO<sub>2</sub> werden mit zugelassenem Dünger ergänzt und können nun in einem dritten Schritt zur Kultivierung von hochwertiger, zu tierischem und menschlichem Konsum vorgesehener Mikroalgenbiomasse verwendet werden [Ecoduna2012a].

Für die Nutzung von Abwässern aus der Lebensmittelindustrie, wie etwa der Molkerei, Bäckerei oder Brauerei als Nährstoffquelle für hochwertige Algenprodukte ist auch eine direkte Nutzung der Abwässer ohne oben beschriebenes mehrstufiges Verfahren denkbar [Wang et al. 2010], wozu es aber einer rechtlichen Klärung bedarf.

#### 4.3.4 Energetische Nutzung

Neben dem Hauptziel der Biomasseproduktion dient der PBR als solarthermischer Kollektor, dessen Überschüsse direkt und indirekt als Raumwärme und zur Brauchwassererwärmung genutzt werden können. Das integrierte PCM besitzt neben einer hohen Speichermasse eine lichtstreuende Wirkung, die gemeinsam mit dem Lichtfiltereffekt der Mikroalgen zur gleichmäßigen Raumbelichtung dienen kann.

##### 4.3.4.1 Energiegewinnung

Die wohl wichtigste Triebfeder für die Erforschung der Mikroalgenzucht stellt die Aussicht auf energetische Verwertung der gewonnenen Biomasse dar (siehe Kapitel 2.1.1). Der Energiegehalt von Mikroalgentrockensubstanz liegt je nach Fettgehalt bei rund 23 kJ/g. Nach Umwandlung zu Biogas (mit dem Hauptenergieträger Methan) durch mikrobielle Fermentation oder hydrothermale Konversion sind 70-80% der chemisch gespeicherten Energie nutzbar [Kerner 2012].

##### Biomasse als speicherbarer Energieträger

Zufolge überdurchschnittlicher Produktivität werden Mikroalgen als besonders geeignete Biomassebildner beurteilt [Rösch 2012, Gordon 2007]. Problematisch ist, dass bisher eine positive Nettoenergiebilanz bei der

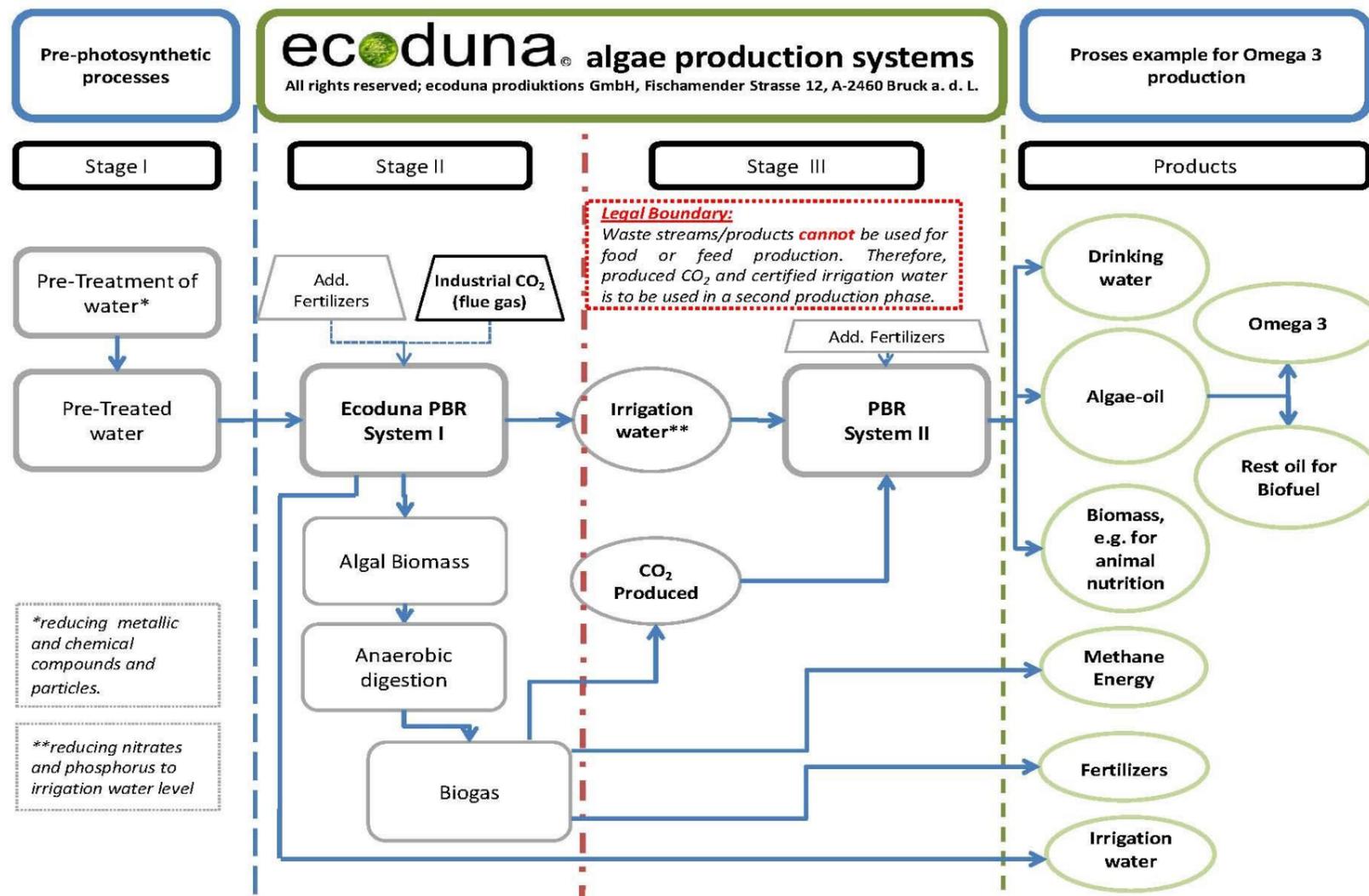


Abb. 4.17: Mehrstufiger Prozess kombiniert Abwasseraufbereitung mit Produktion hochwertiger Mikroalgenprodukte [Ecoduna 2012a]

Mikroalgenzucht im PBR nicht erreicht wird [Garofalo 2011]. Sonnenenergie wird über Photosynthese in Form von Biomasse als Energieträger gespeichert. Die vielfältige Nutzung der Biomasse ist in Kapitel 2.1.1 genauer beschrieben. Zur Versorgung mit elektrischer und thermischer Energie eines Gebäudes scheint die Umwandlung zu Methan am effizientesten, da im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen der flächenbezogene Energieertrag höher ist [FNR 2009] und der Wassergehalt der Biomasse zur Fermentation bei über 85% liegen kann [IEU 2004]. Biogas kann über den PBR von CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> gereinigt und beispielsweise in einem BHKW in elektrische und thermische Energie umgewandelt werden. Die Wirkungsgrade reichen dabei je nach Optimierung für elektrische (besonders Zündstrahlmotoren) oder thermische Ausbeute (besonders Ottomotoren) von  $\eta_{el}=40\%/ \eta_{th}=37\%/ \eta_{ges}=72\%$  bis  $\eta_{el}=30,5\%/ \eta_{th}=70\%/ \eta_{ges}=100,5\%$ <sup>1</sup> [ASUE 2011].

Die Abschätzung der voraussichtlichen Biomasseproduktivität ist schwierig. Bei der Übernahme von Zahlen aus der Literatur ergeben sich Spannen von mehreren hundert Prozent. Folgt man der Angabe über eine tägliche Verdoppelung der Biomasse aufgrund durchschnittlicher Zellteilung von 1 pro Tag [Kitaya et al. 2005] folgt daraus für eine Biomassekonzentration von 5g·l<sup>-1</sup> bei einer Reaktortiefe von 34mm eine tägliche Biomasseproduktion von 170g/m<sup>2</sup><sub>PBR</sub>.

Ripplinger (2010) (zitiert in Schneider 2011) gibt eine volumsbezogene Biomasseproduktion von

<sup>1</sup> Ein Wert von über 100% kann deshalb entstehen, weil sich die Wirkungsgradangabe auf den Heizwert des Brennstoffs bezieht, moderne Geräte jedoch mit Brennwerttechnologie ausgestattet sind und jene Energie, die durch Kondensation der im Abgas befindlichen Flüssigkeit frei wird, auch gewinnen können.

800-1000g<sub>BM</sub>·m<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup> an. Daraus ergibt sich für den oben genannten Reaktor eine Biomasseproduktion von 27,2 - 34g·m<sup>-2</sup><sub>PBR</sub>.

Wird die durchschnittliche Photosyntheseeffizienz im photoaktiven Bereich bei beschatteten Reaktoren von 11,4% [Zittelli et al. 2006] und einem Energiegehalt von 6,39Wh·g<sup>-1</sup> [Kerner 2012] der Biomasse bei 780,2Wh·m<sup>-2</sup><sub>PBRd</sub><sup>-1</sup> durchschnittlichem Lichteintrag in den halbverschatteten vertikalen PBR mit effektivem Lichttransmissionsfaktor von 0,64 orientiert nach Ost, Süd und West im Jahresschnitt [energyplus 2012a] zur Abschätzung herangezogen, beträgt die voraussichtliche tägliche Produktion 6,27g·m<sup>-2</sup><sub>PBR</sub> Algenbiomasse. Diese flächenabhängige Produktivität liegt noch deutlich unterhalb jener, die Hindersin (2011) (zitiert in Kerner 2012) für die PBR-Fassade des BIQ in Hamburg (siehe Kapitel 3.1.1) mit 15g·m<sup>-2</sup><sub>PBR</sub> angibt.

Da der Wert von 6,27g·m<sup>-2</sup><sub>PBR</sub> durch seine Abhängigkeit vom Lichteintrag Bezug zur hier betrachteten Fassade hat, ist er am besten nachvollziehbar und soll für weitere Berechnungen verwendet werden.

**Thermische Energie aus solaren Gewinnen** wird direkt und indirekt über eine Zwischenspeicherung im PCM zur Temperierung der Algenkultur und über Abstrahlung an den Innenraum zur Heizung der Gebäudenutzflächen verwendet. Zusätzlich werden Wärmeüberschüsse an zentraler Stelle mittels Wärmepumpe (vergleiche Kerner 2012) über PBR-Abluft und während der Filtervorgänge aus dem Zuchtmedium zur Erwärmung des Brauchwassers genutzt.

Abb. 4.18 und Tab. 4.2 stellen die Energieflüsse zwischen der Einheit aus Gebäude inkl. PBR-Fassade und der

Umgebung dar, wobei die Gegenüberstellung der Orientierungen der Fassaden die höheren solaren Einträge an der Südfassade und der damit verbundenen höheren Biomassegewinne verdeutlicht.

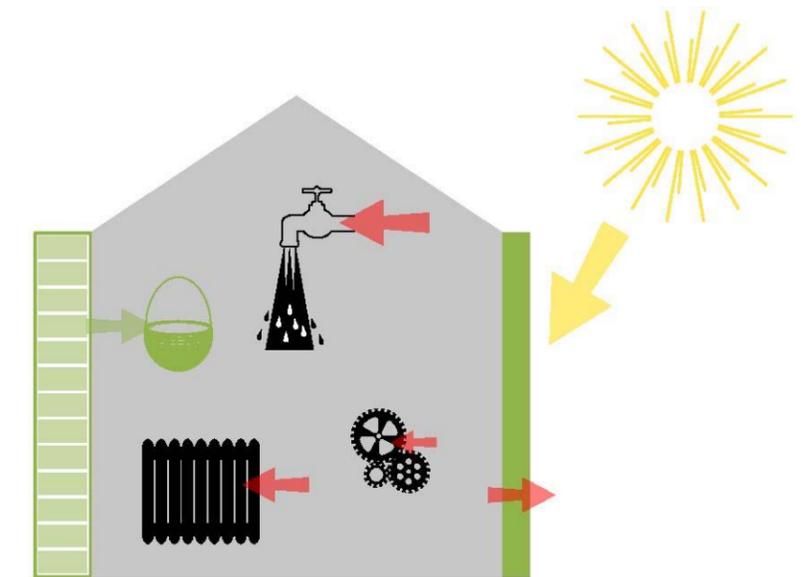


Abb. 4.18: Schematische Darstellung der Energiebilanz des Demogebäudes mit PBR-Fassade

Als benötigte Hilfsenergie wird ein Anteil von 30% aus der Biomasse gewonnenen Energie angegeben, der hier verwendet werden soll [Posten 2009].

Einfallendes Sonnenlicht abzüglich Verschattungseffekt, Reflexion, Absorption der Scheiben und Energie die für die Photosynthese genutzt wird sowie die produzierte Biomasse stellen in Tab. 4.2 die Positiv-Positionen dar. Energie für Heizwärme- und Warmwasserbedarf des Gebäudes sowie Hilfsenergie und Transmissionswärmeverluste der PBR-Fassade nach außen werden in Abzug gebracht.

Pro m<sup>2</sup> PBR-Fläche und Tag werden durchschnittlich 3,9g Trockenbiomasse im Winterhalbjahr bzw. 8,7g im Sommerhalbjahr mit einem Energiegehalt von rund 25Wh bzw. 55Wh erwartet.

Für den Warmwasserbedarf wird je nach Nutzung, die im Zuge der Gebäudewahl empfohlen wurde (siehe Kapitel 4.1.2) ein Mittelwert von  $411 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}\text{PBRd}^{-1}$  angenommen.

Tab. 4.2: Energiebilanz des Demogebäudes mit PBR-Fassade gegliedert nach Orientierung, Fassadentyp und Jahreszeit

Energiebilanz Süd + Ost + West		[Wh·m <sup>-2</sup> PBRd <sup>-1</sup> ]				[kWh·m <sup>-2</sup> BGF(a/2) <sup>-1</sup> ]			
		Verkleidung		Wandelement		Verkleidung		Wandelement	
		Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So
+	Solare Gewinne	308	689	308	689	22	49	22	49
+	Biomasse	25	55	25	55	2	4	2	4
-	HWB Gebäude	-706	0	-640	0	-51	0	-46	0
-	Warmwasser	-411	-411	-411	-411	-30	-30	-30	-30
-	Transmission PBR <sub>Q<sub>TG</sub></sub>	-301	-113	-301	-113	-22	-8	-22	-8
-	Hilfsenergie	-7	-17	-7	-17	-0,5	-1,2	-0,5	-1,2
=	Summe ·(a/2) <sup>-1</sup>	-1093	203	-1027	203	-79	15	-74	15
=	Summe ·a <sup>-1</sup>	-890		-824		-64		-59	

Energiebilanz Süd		[Wh·m <sup>-2</sup> PBRd <sup>-1</sup> ]				[kWh·m <sup>-2</sup> BGF(a/2) <sup>-1</sup> ]			
		Verkleidung		Wandelement		Verkleidung		Wandelement	
		Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So
+	Solare Gewinne	481	766	481	766	12	18	12	18
+	Biomasse	39	62	39	62	1	1	1	1
-	HWB Gebäude	-706	0	-640	0	-17	0	-15	0
-	Warmwasser	-411	-411	-411	-411	-10	-10	-10	-10
-	Transmission PBR <sub>Q<sub>TG</sub></sub>	-301	-113	-301	-113	-7	-3	-7	-3
-	Hilfsenergie	-12	-18	-12	-18	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4
=	Summe ·(a/2) <sup>-1</sup>	-911	284	-845	284	-22	7	-20	7
=	Summe ·a <sup>-1</sup>	-626		-561		-15		-13	

Energiebilanz Ø Ost, West		[Wh·m <sup>-2</sup> PBRd <sup>-1</sup> ]				[kWh·m <sup>-2</sup> BGF(a/2) <sup>-1</sup> ]			
		Verkleidung		Wandelement		Verkleidung		Wandelement	
		Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So
+	Solare Gewinne	222	650	222	650	5	16	5	16
+	Biomasse	18	52	18	52	0	1	0	1
-	HWB Gebäude	-706	0	-640	0	-17	0	-15	0
-	Warmwasser	-411	-411	-411	-411	-10	-10	-10	-10
-	Transmission PBR <sub>Q<sub>TG</sub></sub>	-301	-113	-301	-113	-7	-3	-7	-3
-	Hilfsenergie	-5	-16	-5	-16	-0,1	-0,4	-0,1	-0,4
=	Summe ·(a/2) <sup>-1</sup>	-1184	162	-1118	162	-28	4	-27	4
=	Summe ·a <sup>-1</sup>	-1021		-956		-24		-23	

Im Heizwärmebedarf des Gebäudes sind aufgrund des umgekehrten Temperaturgefälles von der Fassade zum

Raum keine Transmissionswärmeverluste des Gebäudes durch den PBR zu erwarten und somit nicht eingerechnet.

Vom Transmissionswärmeverlust des PBRs wird nur der Verlust nach außen berücksichtigt, da der Verlust nach innen eine Energieverschiebung innerhalb des betrachteten Systems darstellt.

Die Summe zeigt einen Energieüberschuss im Sommerhalbjahr von  $15 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\text{BGFa}^{-1}$  und einen Energiebedarf im Winterhalbjahr von  $79 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\text{BGFa}^{-1}$  für den PBR als Verkleidung bzw.  $74 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\text{BGFa}^{-1}$  für den PBR als Wandelement.

Im Jahresschnitt ergibt sich ein Energiebedarf von  $64 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\text{BGFa}^{-1}$  bzw.  $59 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\text{BGFa}^{-1}$ . Der Anteil am Energiebedarf für die Gebäudeheizung und das Warmwasser beträgt hierbei  $81 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\text{BGFa}^{-1}$  bzw.  $76 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\text{BGFa}^{-1}$ , der Anteil der Reaktorfassade an der Energiebilanz selbst ist sowohl im Sommer- als auch im Winterhalbjahr positiv.

#### 4.3.4.2 Thermischer Speicher

Die PBR-Fassade funktioniert nach den Prinzipien des solarthermischen Kollektors und der transparenten Wärmedämmung. Kurzwelliges Licht fällt durch die Isolierverglasung, wird von der Algenbiomasse absorbiert und größtenteils (abzüglich des Anteils der für Photosynthese genutzt wird) in langwellige Wärmestrahlung umgewandelt. Für eine maximale Biomasseproduktion ist die Einhaltung einer optimalen Temperatur des Zuchtmediums mit Abweichung von wenigen Graden von großer Bedeutung [Kitaya et al. 2005]. Diese Bedingung wird durch eine PCM-Schicht im innersten Scheibenzwischenraum bzw. zwischen PBR-

Paneel und bestehender Außenmauer erfüllt. Die Stärke der Schicht wird so gewählt, dass sie ausreichend Speicherkapazität besitzt, um die Sonnenenergie zwischenspeichern, die während eines Tages auf die Fassade auftrifft (siehe Kapitel 4.2.1). Diese Energie wird zeitverzögert im Tages- und Nachtverlauf wieder abgegeben.

Erwärmt sich die Algenkultur auf einen Wert über dem Schmelzpunkt des PCMs, schmilzt dieses und nimmt während des Wechsels des Aggregatzustandes bei gleichbleibender Temperatur der Substanz große Mengen an Wärmeenergie auf. Sinkt die Temperatur unter den Schmelzpunkt, erstarrt das PCM und gibt die gespeicherte Wärme wieder ab.

Als PCM eignen sich u.a. Paraffine und Salzhydrate, wobei die Phasenwechseltemperatur von Paraffinen zwischen  $10^\circ\text{C}$  und  $90^\circ\text{C}$  theoretisch beliebig einstellbar ist. Paraffine haben ein gleichmäßigeres Erstarrungsbild als Salzhydrate und erzeugen geringere Spannungen beim Phasenwechsel. Salzhydrate hingegen haben durch ihre höhere Schmelzenthalpie höhere Wärmespeicherkapazität [Weinländer 2003].

Wie bereits erwähnt, sind die Temperaturschwankungen im Zuchtmedium gering zu halten. In welchem Temperaturbereich das zu geschehen hat hängt von der kultivierten Algenart ab, wobei für einen Bereich von  $20^\circ\text{C}$  bis  $35^\circ\text{C}$  davon ausgegangen werden kann, dass sich eine geeignete Art findet [Schagerl 2012].

Da das PCM-Paneel Wärme an den Innenraum abgibt, ist der Raumkomfort ausschlaggebend für den gewählten Temperaturbereich. Die Wand soll idealerweise im Winter als Wärmequelle und im Sommer bei Temperaturspitzen

als Wärmesenke dienen. Dazu wird eine Temperatur von 24°C als geeignet erachtet.

Der Einsatz eines PCM als Speichermasse zum Ausgleich des schwankenden Energieinputs wird auch von Kerner (2012) für den Einsatz von PBRen in der Fassade verfolgt.

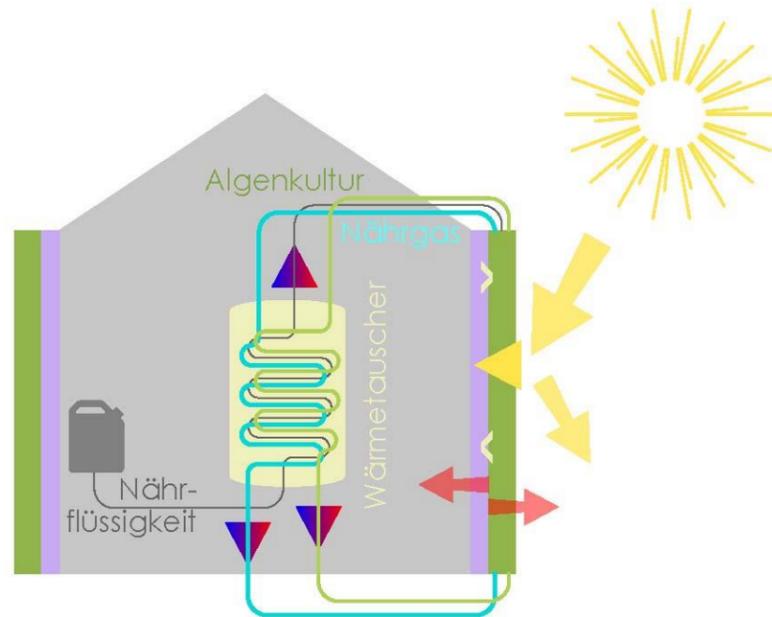


Abb. 4.19: Schematische Darstellung der Regulierung des Wärmehaushalts der PBR-Fassade durch zentralen Wärmetauscher mit den Trägermedien Nährgas, Nährflüssigkeit und Algenkultur

Abb. 4.19 und Tab. 4.3 stellen die Wärmebilanz der PBR-Fassade dar, wobei der Vergleich der Orientierung der Fassaden in Tab. 4.3 in erster Linie den erhöhten solaren Wärmegewinn an der Südfassade besonders im Winterhalbjahr verdeutlicht. Die im Anschluss besprochenen Maßnahmen zur Wärmeregulierung variieren leicht in Abhängigkeit der Kulturmenge und somit der Tiefe des PBRs, die je nach Orientierung zwischen 30mm und 36mm beträgt.

Aus Tab. 4.3 lässt sich ablesen, dass die solaren Wärmegewinne durch Transmissionswärmeverluste nach außen und innen reduziert werden. Verbleibender

Überschuss bzw. Bedarf wird über temperierte Nährflüssigkeit, Wärmetauscher und Durchlüftung der Kultur mit temperiertem Nährgas ausgeglichen (vergleiche Ecoduna (2012a) und Kerner (2012)). Dieses Regulierungspotential wurde anhand der Annahmen abgeschätzt, dass täglich  $1 \cdot \text{min}^{-1}$  Nährgas und 10% der Menge des Zuchtmediums an Nährflüssigkeit mit einer Temperatur von mindestens 10°C und maximal 38°C, also einer maximalen Temperaturdifferenz  $\Delta T = 14\text{K}$  eingeleitet werden können, und das gesamte Medium über den zentralen Wärmetauscher um maximal  $\Delta T = 5\text{K}$  auf bis zu 19°C abgekühlt bzw. auf 29°C geheizt werden kann. Diese Annahmen folgen aus eigener Einschätzung einer verträglichen Temperaturdifferenz in der Kultur und eine effizient über „Erdkühle“ erreichbare Temperatur der eingeleiteten Nährmedien. Die Abschätzung des Regulierungspotentials ergibt einen möglichen durchschnittlichen Ausgleich über zugeführte Nährflüssigkeit von  $54\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBRd}^{-1}$ , über einen zentralen Wärmetauscher von  $198\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBRd}^{-1}$  und über die Durchlüftung mit Nährgas von  $225\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBRd}^{-1}$  bei einem 1-fachen Luftwechsel. Für einen höheren Regulierungsbedarf kann der Luftwechsel bis  $4,3 \cdot \text{min}^{-1}$  [Quiang & Richmond 1996] gesteigert werden. Praktisch bedeutet dies, dass der durchschnittliche tägliche solare Wärmebedarf (solare Wärmegewinne abzüglich Transmissionswärmeverluste) von  $185\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$  bzw.  $363\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$  (je nach Fassadenvariante, siehe Tab. 4.3) im Winterhalbjahr bzw. Wärmüberschuss von  $575\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$  im Sommerhalbjahr und der maximale Bedarf von  $891\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$  bzw. Überschuss von  $2.056\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$  über mehrere Wege ein- bzw. abgeleitet werden muss um besonders bei länger anhaltenden Hitzeperioden einer Überhitzung der Kultur vorzubeugen.

Tab. 4.3: Wärmebilanz der PBR-Fassade des Demonstrationsgebäudes gegliedert nach Orientierung, Fassadentyp und Jahreszeit

Wärmebilanz PBR Süd + Ost + West		[Wh·m <sup>2</sup> <sub>PBRd</sub> <sup>-1</sup> ]				[kWh·m <sup>2</sup> <sub>BGF(a/2)</sub> <sup>-1</sup> ]			
		Verkleidung		Wandelement		Verkleidung		Wandelement	
		Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So
+	Solare Gewinne	308	689	308	689	22	49	22	49
-	Transmission innen	-192	0	-370	0	-14	0	-27	0
-	Transmission außen	-301	-113	-301	-113	-22	-8	-22	-8
±	Regulierungsbedarf	185	-575	363	-575	13	-41	26	-41
±	Nährflüssigkeit	21	-54	41	-54	1	-4	3	-4
±	Wärmetauscher	77	-198	151	-198	5	-14	11	-14
±	Lüftung	87	-324	171	-324	6	-23	12	-23
=	Summe	0	0	0	0	0	0	0	0

Wärmebilanz PBR Süd		[Wh·m <sup>2</sup> <sub>PBRd</sub> <sup>-1</sup> ]				[kWh·m <sup>2</sup> <sub>BGF(a/2)</sub> <sup>-1</sup> ]			
		Verkleidung		Wandelement		Verkleidung		Wandelement	
		Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So
+	Solare Gewinne	481	766	481	766	12	18	12	18
-	Transmission innen	-192	0	-373	0	-5	0	-9	0
-	Transmission außen	-301	-113	-301	-113	-7	-3	-7	-3
±	Regulierungsbedarf	12	-652	194	-652	0	-16	5	-16
±	Nährflüssigkeit	1	-59	22	-59	0	-1	1	-1
±	Wärmetauscher	5	-209	80	-209	0	-5	2	-5
±	Lüftung	6	-384	91	-384	0	-9	2	-9
=	Summe	0	0	0	0	0	0	0	0

Wärmebilanz PBR Ø Ost, West		[Wh·m <sup>2</sup> <sub>PBRd</sub> <sup>-1</sup> ]				[kWh·m <sup>2</sup> <sub>BGF(a/2)</sub> <sup>-1</sup> ]			
		Verkleidung		Wandelement		Verkleidung		Wandelement	
		Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So
+	Solare Gewinne	222	650	222	650	5	16	5	16
-	Transmission innen	-192	0	-373	0	-5	0	-9	0
-	Transmission außen	-301	-113	-301	-113	-7	-3	-7	-3
±	Regulierung	271	-537	452	-537	6	-13	11	-13
±	Nährflüssigkeit	31	-53	52	-53	1	-1	1	-1
±	Wärmetauscher	112	-189	187	-189	3	-5	4	-5
±	Lüftung	128	-295	213	-295	3	-7	5	-7
=	Summe	0	0	0	0	0	0	0	0

Vom durchschnittlichen Wärmeüberschuss im Sommerhalbjahr kann die Nährflüssigkeit rund 9%, ein Durchlauf durch den Wärmetauscher rund 34% und die Belüftung mit einer Rate von  $1 \cdot \text{min}^{-1}$  rund 39% des Ausgleichs übernehmen. Mit einer gesteigerten

Belüftungsrate von  $4,3 \cdot \text{min}^{-1}$  kann eine Wärmemenge von 168% und insgesamt von 211% des durchschnittlichen Wärmeüberschusses im Sommerhalbjahr abgeleitet werden. Die Energieüberschussmaxima, an Tagen mit maximalem Energieeintrag, an denen aufgrund der hohen Außentemperatur keine Wärme durch Transmission abgeleitet wird, liegen allerdings bei rund 357% vom Sommerhalbjahresdurchschnitt. Der Durchlauf durch die Zuchtstrecke wird überwiegend von der Zuluft angetrieben. Wenn die Belüftung also bei hoher Bestrahlung gesteigert wird, verringern sich die Intervalle zwischen zwei Durchläufen durch den „Checkpoint“, an dem überschüssige Wärme abgeleitet werden kann. Bei der vereinfachten Annahme, dass sich die Durchlaufgeschwindigkeit bei 4,3-facher Durchlüftung um den gleichen Wert steigert, können so theoretisch weitere 112% abgeleitet werden.

Hierbei ist positiv zu bewerten, dass die Biomasseproduktion bei hohem Lichtfluss durch stärkere Belüftung gesteigert wird und der Energiebedarf für die stärkere Durchlüftung somit weniger ins Gewicht fällt [Quiang & Richmond 1996].

Beobachtet müsste werden, wie stark sich die ungleiche Wärmeverteilung entlang der Zuchtstrecke auswirkt, da die Wärmeableitung durch Belüftung zwar gleichmäßig erfolgt, die gekühlte Algensuspension aber hauptsächlich die PCM-Elemente im ersten Teil der Zuchtstrecke entlädt. Dieses Ungleichgewicht wird dadurch verstärkt, dass die PBRen am Ende der Zuchtstrecke, also in den oberen Geschoßen tendenziell weniger verschattet sind und die Algensuspension dort bereits dichter ist und mehr Sonnenenergie absorbiert. Ein gewisser Ausgleich könnte mit Einleitung der gesamten Nährflüssigkeit gegen Ende

der Zuchtstrecke geschaffen werden, da die Nährstoffkonzentration nach dem „Checkpoint“ erst gemächlich abnimmt und nicht sofort ergänzt werden muss. Dadurch ließe sich sowohl die Verteilung der Biomassekonzentration als auch die der Temperatur im Verlauf der Zuchtstrecke verbessern. Auf diesem Weg könnte durch Einleiten kalter Flüssigkeit den verbleibenden 34% Überhitzung an Tagen mit extremer Einstrahlung entgegengewirkt werden. Nachteilig ist hierbei, dass die zugeführte Flüssigkeit die Biomassekonzentration der Algensuspension verringert und so den Energiebedarf der Ernte erhöht. Die Inkaufnahme eines temporären Temperaturanstiegs um die Wärme zeitversetzt abführen zu können entspräche mit  $39,2 \text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$  je Grad rund 7% des durchschnittlichen Wärmeüberschusses im Sommerhalbjahr.

Die maximal erforderliche Wärmezufuhr im Winter von  $891 \text{Wh}/\text{m}^2 \text{PBR}$  bei minimalem Energieeintrag und maximalen Transmissionswärmeverlusten wird durch die dargestellte 1-fache Regulierung zu 54% ausgeglichen. Mit einer gesteigerten Belüftungsrate von  $2 \cdot \text{min}^{-1}$  und dadurch 2-fachem täglichen Durchlauf durch den Wärmetauscher kann ein vollständiger Ausgleich erreicht werden.

#### 4.3.4.3 Thermische Hülle

Durch die rund  $24^\circ\text{C}$  warme PBR-Hülle werden Transmissionswärmeverluste des Innenraums vermieden. Heizwärmebedarf bzw. Kühllast werden dabei auf die Außenhülle verschoben, die nun vor Auskühlung und Überhitzung zu schützen ist.

Die Mikroalgenkultur wird durch Isolierverglasung geschützt. Um die Waage zwischen Wärmedämmung und solaren Gewinnen zu halten, sind dem Zuchtmedium drei

Scheiben mit zwei gasgefüllten Zwischenräumen vorgesetzt. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Schicht außerhalb des geheizten Bereichs und damit der tatsächlichen Wärmedämmung ist jener der Isolierverglasung und beträgt  $0,60 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$  [Eckelt 2013, abgewandelt]

Diese Art der „aktiven Wärmedämmung“ wurde im kubischen Sichtbetongebäude von Sanaa-Architekten in Essen umgesetzt (siehe Abb.4.20a und b). Die Bauteilaktivierung der einschaligen, ungedämmten Betonaußenwände mit vorhandenem, warmem Grubenwasser verhindert ein Auskühlen der Innenräume [Detail 2008].



Abb. 4.20 a und b: Der Zollverein-Kubus von Sanaa Architekten wurde 2006 als Musikhochschule fertiggestellt [Detail 2008]

Die Bezeichnung „aktive Wärmedämmung“ ist irreführend. Tatsächlich wird die Wärmequelle so weit nach außen verschoben, dass sie zwischen Umgebung und zu schützendem Raum liegt und eine Dämmung überflüssig macht. Dieses Prinzip ist energetisch ineffizienter als eine „echte Dämmung“ und benötigt weitere Rechtfertigung. Im Falle des Sanaa-Kubus ist es die günstige unterirdische Wärmequelle, die die hohen Wärmeverluste „leistbar“

werden lassen. Im Fall der PBR-Fassade ist es die Kombination der Funktionen.

In ungefülltem Zustand, etwa während einer Wartung, kommt je nach Verwendung des PBR-Fassadenpaneels als Wandelement, Fassadenverkleidung oder Doppelfassadenhülle die Dämmwirkung der Luftzwischenräume in Doppelfassade und Isolierverglasung mit einem U-Wert von  $0,58\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  [GlassX 2012, verändert] zum Tragen. Die Dämmwirkung des PBRs ist somit deutlich geringer als die Anforderungen an ein opakes Außenbauteil. Die Transmission vom Innenraum durch den PBR wird aber dennoch verhindert, da der Wärmefluss durch dessen hohe Temperatur vom PBR nach innen stattfindet, nicht umgekehrt. Somit bleibt zwar der Wärmebedarf des PBRs, die Funktion des Transmissionswärmeschutzes der Fassade ist aber erfüllt.

In Abb. 4.21 ist dargestellt, wie sich die Transmissionswärmeverluste in einer kombinierten Anwendung wie der Gebäudeintegration von PBRen dadurch minimieren, dass sie dem jeweils anderen System zugutekommen. Verluste treten also nur noch über die gemeinsame Hülle auf. Die PBR-Fassade wirkt nicht als Dämmung, sondern ersetzt diese.

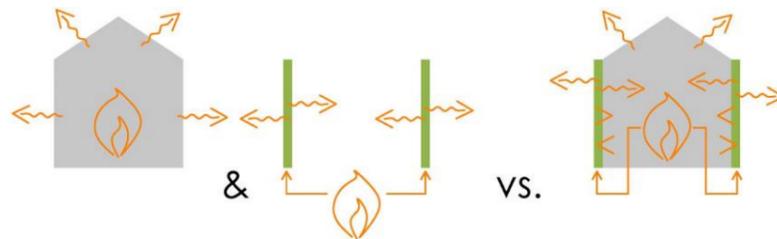


Abb. 4.21: Schematische Darstellung der Verringerung der Transmission durch Reduktion der thermischen Hüllfläche.

#### 4.3.4.4 Heizung und Kühlung

Das Heizen der Hülle verschiebt den Heizwärmebedarf vom Innenraum in die Zuchtebene der Algen. Bei einer konstanten Temperatur von  $24^\circ\text{C}$  wirkt die PBR-Fassade im Winter durch Wärmeabstrahlung als Flächenheizung. Ab einer Raumtemperatur von  $24^\circ\text{C}$  gibt es keinen Wärmefluss vom PBR in den Raum, bei höheren Lufttemperaturen kann er durch die PCM-Rückwand Wärme aufnehmen, ohne sich dabei zu erwärmen und wirkt so als Wärmesenke. Solange es nicht zu Überhitzung des Reaktors kommt, schützt er den dahinterliegenden Raum vor Überhitzung.

Die Heizwirkung der PBR-Fassade wirkt sowohl direkt über die oben genannte flächige Abstrahlung als auch indirekt über zentrale Nutzwasser- und Raumlüfterwärmung mittels Wärmetauscher, der Wärme aus Algenabluft und Suspension nutzbar macht.

Je nach Art der Integration des PBRs wirkt sich die direkte Heiz- bzw. Kühlwirkung unterschiedlich stark auf den Innenraum aus. Als Wandelement wirkt das PBR-Panel direkt als Flächentemperierung. Die dafür geeigneten Temperaturen liegen im Bereich von  $24\text{-}29^\circ\text{C}$  [Wikipedia 2012a] wobei die Differenz zwischen Lufttemperatur und Oberflächentemperatur  $\leq 4^\circ$  sein sollte [Wikipedia 2012b]. Unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs zwischen PCM-Schicht und Raumluft wird die Wärmeabgabe an den Raum abgeschätzt. Kommt der PBR als Verkleidung zum Einsatz, überträgt dieser durch direkten Kontakt zwischen PBR-Element und massiver Wand die Funktion der Flächentemperierung an die dahinterliegende Wand, wobei die Wärmeabgabe an den Raum durch den höheren Wärmewiderstand der Wand geringer ist als bei

freistehenden Anwendungen. Eine Hinterlüftung ist aufgrund der ähnlichen Temperaturen von der Innenseite der Fassade, durch die Außenwand bis zum Innenraum nicht erforderlich, da kein Dampfdruck besteht.

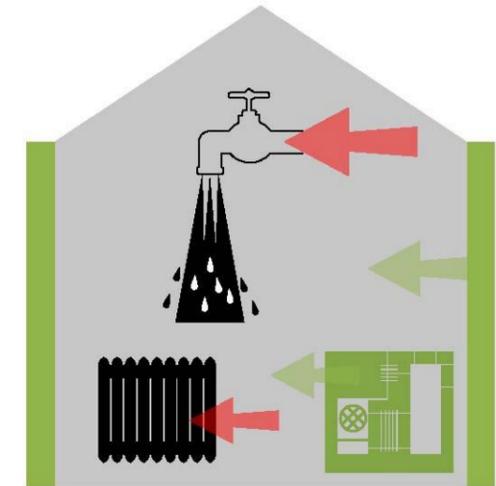


Abb. 4.22: Schematische Darstellung der Wärmebilanz des Demogebäudes

Abb.22 und Tab. 4.4 stellen die Wärmebilanz des Gebäudes dar. Die Wärmezufuhr erfolgt über direkte und indirekte Wärmeabgabe vom PBR an das Gebäude, ein Wärmebedarf besteht als Heizwärmebedarf und Warmwasserbedarf. Solare und interne Wärmegewinne sind im Heizwärmebedarf berücksichtigt.

Tab. 4.4: Wärmebilanz des Demogebäudes gegliedert nach Fassadentyp und Jahreszeit

Wärmebilanz Gebäude	[Wh·m <sup>2</sup> <sub>PBR</sub> d <sup>-1</sup> ]				[kWh·m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> (a/2) <sup>-1</sup> ]			
	Verkleidung		Wandelement		Verkleidung		Wandelement	
	Wi	So	Wi	So	Wi	So	Wi	So
+ Überschuss PBR	7	575	7	575	1	41	1	41
- HWB Gebäude	-706	0	-640	0	-51	0	-46	0
- Warmwasser	-411	-411	-411	-411	-30	-30	-30	-30
= Summe -(a/2) <sup>-1</sup>	-1110	164	-1044	164	-80	12	-75	12
= Summe a <sup>-1</sup>	-946		-880		-68		-63	

Tab. 4.4 zeigt, dass auch im Winterhalbjahr eine geringe Wärmeabgabe vom PBR durch Überschuss von

7 Wh·m<sup>-2</sup><sub>PBRd</sub><sup>-1</sup> an das Gebäude erfolgt, die im Sommerhalbjahr mit 575 Wh·m<sup>-2</sup><sub>PBRd</sub><sup>-1</sup> den Warmwasserbedarf übersteigt, wodurch ein Überschuss von 164 Wh·m<sup>-2</sup><sub>PBRd</sub><sup>-1</sup> entsteht. Dieser kann, wenn er rasch genug abgeführt und genützt oder gespeichert wird, zu erhöhter Wertschöpfung beitragen. Gelingt dies nicht, führt er zu Überhitzung, was die Kultur gefährden und zu unerwünschter erhöhter Wärmeabgabe an den Gebäudeinnenraum führen kann. Der verbleibende Wärmebedarf im Winterhalbjahr beträgt 1.110 bzw. 1.044 Wh·m<sup>-2</sup><sub>PBRd</sub><sup>-1</sup> und kann zu rund 4% über Biogas aus der jährlich gewonnenen Algenbiomasse gedeckt werden.

Ein Ausgleich zwischen zeitversetztem Energieangebot und -bedarf kann über Langzeitspeicher, wie ihn Kerner (2012) als Erdspelespeicher vorschlägt oder über einen Anschluss an ein Nahwärmenetz im Sinne der „nachhaltigen Stadtzelle“ erfolgen.

#### 4.3.4.5 Tageslichtoptimierung

Über Beschattung und Lichtstreuung soll eine Optimierung des Tageslichteintrages erfolgen. Unterschiede von PBR-Paneelen zu herkömmlichen Bauelementen zum Zweck der Beschattung liegen im höheren Gewicht, in einer Teiltransparenz, in eingeschränkter Beweglichkeit aufgrund von Gas- und Flüssigkeitsanschlüssen, in gewissen Mindestabmessungen und der Empfindlichkeit der Algen gegenüber zu viel oder zu wenig Licht. Eine besonders gewichtige Herausforderung liegt darin, dass eine Konkurrenz zwischen Mensch und Alge um eine gleichmäßige und gemäßigte Besonnung besteht. Die Sonnenenergie trifft entweder das Paneel oder das Fenster, bei geringer Einstrahlung verringert sich also das spärliche Angebot für beide, bei sehr intensiver

Einstrahlung durch rechtwinklig auftreffendes Zenitlicht können die Algen Schaden nehmen. Die Abschwächung der einfallenden Sommersonne auf die vertikale Fassade durch einen steileren Winkel hingegen optimiert das Lichtangebot.



Abb. 4.23: PBR-Fassadenelement mit Zu- und Ableitung an der Drehachse [dbz 2012] ©Arup GmbH

Gegen ein unbewegliches horizontales Verschattungspaneel spricht demnach die stärkere Schwankung der Lichtintensität zwischen steil einfallender Sommersonne und flach einfallender Wintersonne. Für Beweglichkeit müssten sich alle Anschlüsse an der Dreh- oder Kippachse befinden, wie bei der Umsetzung in Abb.23. Gleitende Anschlüsse scheinen nicht realistisch, da ein hohes Maß an Dichtheit erforderlich ist um eine Kontamination durch Fremdalgen etc. und Leckagen zu vermeiden.

Arup GmbH entwickelte im Zuge der Planung des in Hamburg entstehenden Clever-Treefrog für die IBA 2013 mehrere Versionen von PBR-Fassaden. Die Beschattung ist eine zentrale Funktion dieser Fassadenkonzepte. Das System in Abb. 4.24 links zeigt starre bzw. einachsige nachgeführte Sonnenschutzmarkisen bzw.

Sonnenschutzgroßlamellen. Rechts in Abb. 4.24 sind starre oder ein- bzw. zweiachsig nachgeführte Großlamellen zu sehen, die auch als außenliegende Sonnenschutzelemente bei Glasdächern verwendet werden können [Kerner 2012].

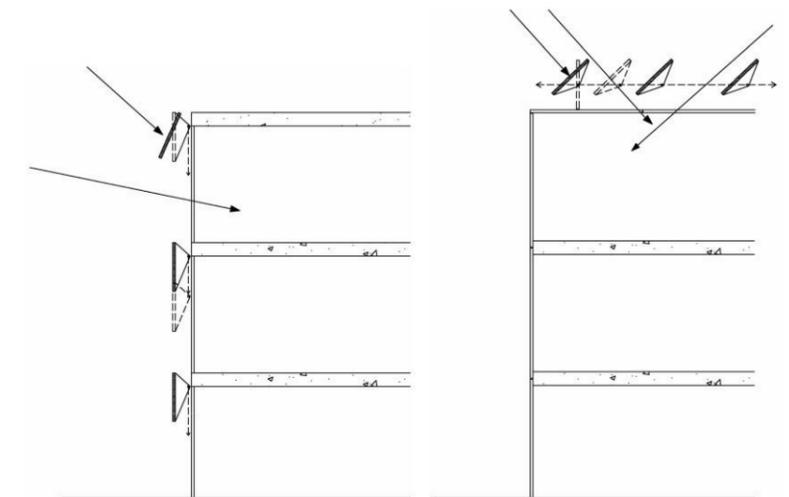


Abb. 4.24: bewegliche PBRen von Arup GmbH als Sonnenschutz [Kerner 2012] ©Arup GmbH

In Abb. 4.23 ist der Leitungsanschluss über die Drehachse zu sehen, der ein Schwenken des PBRs ermöglicht.

Zu Gunsten einer dichten Gebäudehülle und weniger komplizierten Anschlüssen wurden bewegliche PBRen im Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit ausgeschlossen. Eine bedarfsgerechte Verschattung erfolgt hier über variable Biomassekonzentration der Zuchtkultur. Sie wird den jahreszeitlichen Lichtverhältnissen angepasst und absorbiert so in Monaten mit hohem Lichtangebot mehr Licht als zu sonnenarmen Jahreszeiten. Diese Anpassung könnte bei der vorgesehenen täglichen Ernte unter Berücksichtigung kurzfristiger Lichteinfallprognosen und in Einberechnung der voraussichtlichen Biomasseproduktion für den Folgetag abgestimmt werden. Eine Anpassung der Verschattung an die gegebenen Lichtverhältnisse

wäre so abhängig von der Verlässlichkeit der Wetterprognose möglich. Die Lichttransmission durch den PBR beträgt, wie in Abb. 4.25 dargestellt, bei einer Biomassekonzentration  $C_B$  von  $2\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  rund 11,2%, bei  $C_B=7\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  rund 3,7%.



Abb. 4.25: schematische Darstellung der Tageslichtoptimierung durch Verschattung und Lichtleitung. Variierende Biomassekonzentration im Jahresverlauf steuert die Verschattungswirkung.

In flüssigem Zustand ist das PCM transparent und bietet bei den Varianten als Wandelement, Doppelfassade und „Klimaelement“ Sicht auf eine sich stets in Bewegung befindliche Algenkultur und, je nach Biomassekonzentration, mehr oder weniger Durchsicht nach außen. Ein unregelmäßiges Bild zeigt sich während des Phasenübergangs. Das erstarrte PCM hat eine Mikrostruktur, die das Material milchig erscheinen lässt wodurch eine gewisse lichtstreuende Wirkung entsteht [Weinländer 2003]. Auftreffendes Licht, das je nach Biomassekonzentration zu 3,7-11,2% durch den PBR dringt wird in diesem Fall gestreut an den Innenraum abgegeben. Die zweite Fassadenebene der Fassadenvariante „Doppelfassade“ wirkt wie ein Vordach, dass das Eindringen flach einfallender Wintersonne im Gegensatz zu steiler einfallender Sommersonne bevorzugt. Verschattung der opaken Fassadenflächen durch Paneele der Variante „Verkleidung“ in Kombination mit Speicherung der Sonnenenergie und der beschriebenen Wärmeregulierung verhindern ein Überhitzen der Außenwände.

## 4.3.5 Schutzfunktionen

### 4.3.5.1 Schallschutz

Der mehrschichtige Aufbau des PBR-Elements hat durch seine hohe Dichte und den Effekt der Mehrschaligkeit eine relativ gute Schalldämmwirkung. „Relativ“ bezieht sich hierbei darauf, ob das Fassadenelement als opaker oder transparenter Bauteil verstanden wird.

Für das PBR-Fassadenelement ergibt sich ein bewertetes Schalldämmmaß  $R_w = 47\text{dB}$ . Dieser Wert leitet sich von jenem des Produkts GlassXcomfort [Felsenstein 2013] (siehe Abb. 4.26) ab, das einen vergleichbaren Aufbau zu jenem des PBRs hat.

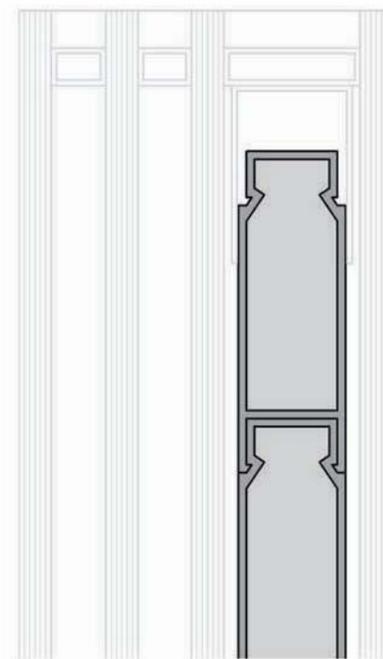


Abb. 4.26: Aufbau des Produkts GlassXcomfort, einer Isolierverglasung mit integrierter thermischer Speichermasse [GlassX 2012]

Ein Wert von 47dB ist für ein transparentes Bauteil ein sehr guter Wert und wird beispielsweise von einer ausgewiesenen Schallschutzverglasung, z.B. dem Produkt

sgGCLT SILENCE 44/47 mit dem Aufbau 8mm Verbundsicherheitsglas VSG – 12mm Scheibenzwischenraum SZR mit Argonfüllung – 4mm Glas – 12mm SZR mit Argonfüllung – 8mm VSG erreicht [Saint-Gobain Glass 2013]. Im Vergleich dazu erfüllt eine verputzte Ziegelmauer mit 15cm Stärke ebenfalls eine Schalldämmwirkung von 47dB [Zürcher & Frank 2012].

Der Unterschied im Aufbau zwischen dem Referenzprodukt GlassXcomfort und dem untersuchten PBR-Wandelement liegt in einer zusätzlichen Glasscheibe und einem flüssigkeitsgefüllten Zwischenraum, wobei die bereits bestehenden schalldämmwirksamen Komponenten unverändert bleiben. Die zusätzliche Masse wirkt jedoch durch den vollflächigen Kontakt zwischen Flüssigkeit und Glasscheibe nur geringfügig verbessernd.

Zwischen den Fassadenvarianten PBR als Verkleidung, Doppelfassade und „Klimaelement“ gibt es hierbei folgende schallschutzrelevante Unterschiede im Vergleich zum PBR als Wandelement:

Beim PBR als Verkleidung wird die innerste Glasscheibe durch die bestehende Außenmauer ersetzt, wodurch die flächenbezogene Masse und somit der Schallschutz deutlich erhöht werden. Der PBR bringt bei geschlossener Doppelfassade neben der höheren Masse durch die zweite Fassadenebene zusätzliche Verbesserung durch den Effekt der Mehrschaligkeit. Unter Berücksichtigung der Schallübertragung über Flankenbauteile werden die Dämmwerte beider Konstruktionen annähernd addiert. Der PBR als „Klimaelement“ hat nur geringfügige abschirmende Schalldämmwirkung. Eine gewisse Verbesserung von rund 10dB im Bereich direkt hinter dem PBR-Element kann durch Reflektion des auftreffenden

Schalls und Reduktion der Schallenergie an umgebenden absorbierenden Oberflächen erwartet werden.

Für alle PBR-Varianten muss beachtet werden, dass das resultierende Bauschalldämmmaß der gesamten Fassade maßgeblich durch den schwächsten Bauteil bestimmt wird, was bedeutet, dass die Geschlossenheit der Konstruktion ausschlaggebend für die Schalldämmwirkung der gesamten Fassade ist. Auch Unterbrechungen geringer Größe, wie Fensterflächen mit deutlich schlechteren Werten haben einen hohen Einfluss.

Das erforderliche bewertete Schalldämmmaß  $R_w$  für opake Außenbauteile beträgt im Allgemeinen 43dB, wobei das bewertete resultierende Bauschalldämmmaß  $R'_{res,w}$  der Außenbauteile gesamt für Hotels und Bildungseinrichtungen 38 dB nicht unterschreiten darf.  $R_w$  von Fenstern darf  $R'_{res,w}$  um max. 5dB unterschreiten [OIB RL5 2011], was zu einem erforderlichen bewerteten Schalldämmmaß für transparente Bauteile von 33dB führt.

Diese erforderlichen Werte werden von den drei außenliegenden PBR- Fassadenvarianten erfüllt.

#### **4.3.5.2 Raumabschluss & Witterungsschutz**

Der PBR ist ein dichtes teiltransluzentes Flächenbauteil mit integrierter Flächenheizung. Aufgrund seiner Form, Materialität und Dichtheit schirmt der PBR Innenraum bzw. Fassade vor Wind, Niederschlag und Temperaturschwankungen ab und übernimmt die Funktion eines wandähnlichen Bauteils. Er dient je nach Anwendungsvariante dem Raumabschluss und dem Witterungsschutz - Funktionen, die bei der Beurteilung der Kosten zu berücksichtigen sind.

#### **4.3.5.3 Sichtschutz**

Der PRB hat, wie zuvor beschrieben eine Lichttransmission zwischen 3,7-11,2%. Die Durchsicht wird voraussichtlich durch die Mikrostruktur des PCM und/oder durch ausreichende Biomasse im Reaktor verhindert. Während der lichtarmen Zeit des Jahres, die mit geringer Biomassedichte verbunden ist, verbleibt das PCM durch fehlenden Wärmeüberschuss in festem Zustand und somit milchig. Wenn die Biomassekonzentration wie geplant auf den solaren Eintrag abgestimmt werden kann, ist der Fall, dass bei geringer Biomassekonzentration die PCM-Schicht durch hohen Wärmeeintrag vollständig schmilzt und der Reaktor somit durchsichtig wird, unwahrscheinlich.

Das PBR-Paneel kann als feststehender, teiltransluzenter Sichtfilter zur Schaffung von Intimität bei eng stehenden Häusern und in der Erdgeschoßebene, oder zur Abgrenzung gegen Bereiche, die nicht wahrgenommen werden möchten, wie Verkehrsflächen, Abfallsammelstellen, u.Ä. eingesetzt werden.

#### **4.3.6 Optische Wirkung**

Die optische Wirkung einer aus gerahmten Glasflächen bestehenden Fassade, hinter der grüne Flüssigkeit blubbert ist in erster Linie subjektiv, jedenfalls aber ist sie auffällig.

##### **4.3.6.1 Repräsentation**

Mit steigendem Umweltbewusstsein der Bevölkerung steigt auch das Interesse, diese positive Assoziation zu nutzen. Eine sich in Entwicklung befindende Technologie wie die der PBR-Fassade steht für Innovation und Umwelt-Engagement. Diese sind Eigenschaften, mit denen ein

Unternehmen meist gerne in Verbindung gebracht wird. Ein Firmengebäude repräsentiert nach außen - die erwähnten Eigenschaften gut sichtbar und medienwirksam an der Fassade anzubringen kann einen hohen Wert für ein Unternehmen darstellen.

##### **4.3.6.2 Didaktische Wirkung**

Auch wenn dadurch möglicherweise kein direkter finanzieller Nutzen entsteht, kann es für staatliche oder soziale Einrichtungen sinnvoll sein, Vorbildwirkung zu haben und Umwelt-Engagement zu zeigen. Durch Aufklärung und Kontakt mit grünen Technologien wird möglicherweise Umweltbewusstsein durch Sensibilisierung in der Bevölkerung geschürt und zu ökosozialer Eigeninitiative motiviert. Besonders wirksam kann ein PBR an der Fassade einer Bildungseinrichtung sein. Auch Ernte und Weiterverarbeitung der Algen sowie die Umwandlung in nutzbare Energie könnte einsehbar und zugänglich gestaltet werden.

##### **4.3.6.3 Gestaltungselement**

Grün gilt als ausgleichende, harmonisierende Farbe und soll positive Auswirkung auf die Stimmung haben.

Die Biolumineszenz einiger Mikroalgenarten (bestimmte Dinoflagellaten) kann ebenfalls zur Gestaltung genutzt werden – induzierte Lumineszenz wird durch deren kräftige Bewegung provoziert und könnte durch nächtliche Durchlüftung erzeugt werden, was als Lichtfunken sichtbar wäre [Botanik online 2012].

Eine Kombination aus Fassaden- und Straßenbeleuchtung zu gestalterischen Zwecken hätte den positiven Nebeneffekt, nächtliche Biomasseverluste zu reduzieren.

Dazu wäre eine Abstimmung auf effizient nutzbare Wellenlängen sinnvoll.

Durch getrennte Zuchtkreisläufe innerhalb einer Fassadenfläche kann ein Farbspiel erzeugt werden. Beispielsweise könnte ein Muster aus unterschiedlich satten Grüntönen durch variierende Biomassekonzentration entstehen. Ebenso könnten diese getrennten Zuchtkreisläufe mit ungleichen Algenarten in unterschiedlichen Grün-, Gelb-, Braun- und Rottönen besetzt sein, nach dem Konzept, das auch beim Algaegarden von Fredericks, Parker und Ring (siehe Kapitel 3.1.3.) verfolgt wurde. Eine kontrastreiche Gestaltung ergäbe das 2-stufige Zuchtverfahren der Süßwasseralge *Haematococcus* zur Astaxanthin-Gewinnung, in deren erster Stufe zur Biomasseaufzucht die Alge grün erscheint und unter veränderten Zuchtbedingungen in der zweiten Stufe durch Produktion des Carotinoids Astaxanthin zu einem tiefen dunkelrot wechselt [Milledge 2010].

#### **4.3.7 Optimierungspotential**

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Energiebilanz der PBR-Fassade könnte die zeitweise Entleerung der Reaktoren in kalten, lichtarmen Wintermonaten durch Reduktion der Transmissionswärmeverluste darstellen. Diese Reduktion ergäbe sich einerseits aus der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und dem beheizten Raumvolumen im Vergleich zur wärmeren Algenkultur. Andererseits ist die Dämmwirkung des gesamten PBR-Paneels (bei der Variante PBR als Verkleidung inkl. der Außenmauer) höher als jene der 3-Scheiben-Isolierverglasung, die ansonsten die Algenkultur schützt. Auf einige der besprochenen

Fassadenfunktionen, wie Schall- und Witterungsschutz sowie den Raumabschluss hätte die Entleerung des PBRs kaum oder keinen Einfluss. Funktionen, die aus der Stoffwechselfähigkeit der Algen resultieren, wie Raumluftaufbereitung, Emissionsminderung, Abwasseraufbereitung und der Gewinnung von Biomasse verlieren in der lichtarmen Jahreszeit durch verringertes Wachstum an Bedeutung. Der leere Reaktor behält seine Funktion als Solarkollektor. Einfallendes Licht wird zwar teilweise an der hellen Oberfläche des PCMs reflektiert, teilweise aber absorbiert, im PCM gespeichert und als Wärme an den Raum abgestrahlt sowie zu 38% [GlassX 2012] gestreut in den Raum weitergeleitet. Der thermische Schutz würde von einer „aktiven Dämmung“ durch eine beheizte Hülle zu einer tatsächlichen, transparenten Wärmedämmung. Der Sichtschutz bleibt unterhalb der Schmelztemperatur durch den kristallinen Zustand des PCMs erhalten und die wegfallende Beschattung durch die Biomasse wird im Winter positiv bewertet. Nicht erfüllt würden im Winter der Mehrwert durch Repräsentation, didaktische Wirkung und Gestaltung.

## 5 Beurteilung und Schlussfolgerung

Die große Herausforderung in der Anwendung von PBRen zur Mikroalgenzucht ist finanzielle und energetische Rentabilität zu gewährleisten.

Als Lösungsansatz wurde in dieser Arbeit vorgeschlagen, die Nutzung des PBRs in den Bereich der Architektur auszudehnen um dadurch höhere Wertschöpfung zu erzielen.

Die Bewertung der möglichen Einsatzgebiete erfolgte als qualitative Aussage durch Literaturvergleich, rechnerische Abschätzung und persönliche Beurteilung, ohne einen finanziellen Vergleich zur wirtschaftlichen Umsetzbarkeit.

++

Als besonders vielversprechend werden unter anderem die energetischen Nutzungsmöglichkeiten gesehen. Hoher Energieinput erfolgt durch die solare Kollektorwirkung des PBRs. Dieser hohe thermische Eintrag führt bei unzureichender Ableitung zu Überhitzung. Gelingt es aber diesen Energieüberschuss abzuführen, sofort zu nutzen oder bis zur Nutzung zu speichern, ergibt sich gemeinsam mit der gut speicherbaren Biomasse eine positive Energiebilanz von der das Gebäude durch die örtliche Nähe direkt profitieren kann. Die Heizleistung durch eine flächige Wärmeabgabe der PBRen an den Raum ist von der Raumtemperatur abhängig, aber nicht frei regulierbar. Eine Temperatur von 24°C der PBR-Oberfläche wird als geeignet erachtet um während des gesamten Jahresverlaufs zur Optimierung des Raumkomforts beizutragen, müsste aber durch Simulation oder praktische Tests geprüft werden um besonders einen Beitrag zu sommerlicher Überhitzung auszuschließen. Als warme Hülle vermindert die PBR-Fassade zudem Transmissionswärmeverluste des Gebäudes.

Das ökologisch-innovative Image der unübersehbaren Reaktorfassade leistet Öffentlichkeitsarbeit, die je nach Gebäudenutzung unterschiedlichen ökonomischen Wert für den Betreiber haben kann.

Als finanzielle Einsparung lässt sich die Übernahme der Funktion als raumabschließendes und teiltransluzentes wärmeaktiviertes Bauteil werten.

Die Aufbereitung von Raumabluft im PBR wird für den Zeitraum der Heizperiode empfohlen. Sie trägt gleichzeitig zur Verringerung von Lüftungswärmeverlusten und zur Raumluftbefeuchtung bei und kann den geringeren CO<sub>2</sub>-Bedarf der Algen im Winter decken. Aus hygienischen Gründen müsste die Abluft der Algen auf Schadstoff- und CO<sub>2</sub>-Gehalt geprüft werden.

Der Schallschutz der PBR-Fassade ist für ein transparentes Bauteil sehr gut, für ein opakes im mittleren Bereich. Es erfüllt die schallschutztechnischen Anforderungen als Außenwand und verbessert den Schallschutz beträchtlich als ergänzendes Bauteil als Doppelfassade oder Verkleidung, sofern eine geschlossene Ebene gegeben ist.

~

Der Einsatz zur Tageslichtoptimierung der hier entwickelten PBR-Fassade zum Zweck der Beschattung und Lichtstreuung ist durch deren fixen Einbau und geringe Lichttransmission im Bereich von 3,7-11,2% nur begrenzt möglich. Zudem muss berücksichtigt werden, dass das einfallende Licht grün erscheint. Die Variabilität der Optimierung wäre zeitverzögert über die Biomassekonzentration regelbar, die aber auf maximale Produktivität optimiert werden sollte.

Die Dynamik der wachsenden Mikroorganismen und die sichtbare Wechselwirkung auf äußere Einflüsse bietet eine interessante Grundlage für die Fassadengestaltung. Es muss aber mit Unregelmäßigkeiten im Erscheinungsbild gerechnet werden, da es auch in einem gut durchlüfteten Reaktor zu Sedimentation oder Scheibenbewuchs kommen kann.

+

Nicht direkt mit der gebäudebezogenen Nutzung verbunden, aber als Bestandteil des Stoff- und Energiekreislaufs der durch die Anwendung innerhalb einer „nachhaltigen Stadtzelle“ entstehen soll, wird die Integration der Stoffflüsse aus der Lebensmittelindustrie zur

Versorgung der Mikroorganismen und gleichzeitiger Reinigung der Abwässer positiv beurteilt.

Die Reinigung kommunaler Abwässer stellt eine Einschränkung der Nutzung der gewonnenen Biomasse dar bzw. ist durch den beschriebenen mehrstufigen Prozess aufwändiger, aber möglich.

Die Reduktion von Gebäudeemissionen kann durch direkten Einbau von Kohlenstoff aus Abgasen in die Algenbiomasse erreicht werden. Zur Einsparung des CO<sub>2</sub>, das durchschnittlich durch eine/-n Österreicher/-in verursacht wird, wird dabei allerdings eine Fassadenfläche von rund 834m<sup>2</sup> benötigt.

Der PBR funktioniert als Baustein in einem Haustechniksystem, an das er zur optimalen Nutzung seiner Potentiale hohe Anforderungen stellt. So werden ein mechanisches Lüftungssystem, ein Wärmetauscher, ein Wärmespeicher für Warmwasser, ein Langzeitwärmespeicher oder ein Anschluss an ein Netz zur Wärmeverteilung sowie eine Kontrolleinheit zur Abstimmung der komplexen Beziehungen zwischen Umwelteinflüssen, der PBR-Fassade und der restlichen Haustechnik benötigt. Zum alleinigen Betrieb der PBR-Fassade ist das ein hoher Aufwand. Kann der PBR aber in ein bestehendes System integriert werden, kann er der fehlende Baustein sein, der nötig ist um die Energie- und Stoffflüsse zu einem Kreislauf zu schließen.

Abschließend soll angeregt werden, die gebäudeintegrierte Mikroalgenzucht als vielversprechendes Forschungsgebiet mit hohem Potential zu sehen, das vielleicht noch nicht heute, aber in nicht zu ferner Zukunft zu einem wichtigen Puzzlestein im Kreislauf der urbanen Energieversorgung und ressourcenschonenden Rohstoffgewinnung werden kann.

## Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr	K <sub>a</sub>	Absorptionskoeffizient	nm	Nanometer
A	Fläche	km	Kilometer	NO <sub>x</sub>	Stickoxyd(e)
Abb.	Abbildung	kWh	Kilowattstunde	O	Osten
ATP	Adenosintriphosphat	K	Kelvin	O <sub>2</sub>	Sauerstoff
BGF	Bruttogeschoßfläche	l	Liter	P	Phosphor
BHKW	Blockheizkraftwerk	l <sub>av</sub>	„ideale“ Lichtintensität von 100 µE·m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	PAR	photoaktive Strahlung (photoactive radiation)
BM	Biomasse	IBA	Internationale Bauausstellung	PBR	Photobioreaktor
C	Kohlenstoff	l <sub>c</sub>	Lichtintensität, bei welcher die Atmungsaktivität der Alge durch Photosynthese kompensiert wird	PCM	Phase Change Material
°C	Grad Celsius	l <sub>i</sub>	Lichtintensität, ab der Hemmung durch zu starke Bestrahlung eintritt	PE	Polyethylen
C <sub>b</sub>	Biomassekonzentration	l <sub>k</sub>	Lichtintensität beim Übergang von Lichtlimitierung zu Lichtsättigung	P <sub>max</sub>	maximale Produktivität
CCD	Critical Cell Density	l <sub>0</sub>	Lichtintensität an der Reaktoroberfläche	Ppm	parts per million
cm	Zentimeter	LED	light emitting diode	PV	Photovoltaik
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxyd	lm	Lumen	Q <sub>Ta</sub>	Transmission nach außen
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Karbonat	Lux	Einheit der Beleuchtungsstärke lm·m <sup>-2</sup>	Q <sub>Ti</sub>	Transmission nach innen
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	Glucose	m <sup>2</sup>	Quadratmeter	R <sub>d</sub>	dark respiration, Zellatmung
d	Tag	m <sup>2</sup> <sub>PBR</sub>	Quadratmeter des Photobioreaktors	R' <sub>res,w</sub>	bewertete resultierende Bauschalldämmmaß
dB	Dezibel	m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub>	Quadratmeter der Bruttogeschoßfläche	Rubisco	Ribulosebisphosphatcarboxylase
DHA	Docosahexaensäure	m <sup>3</sup>	Qubikmeter	R <sub>w</sub>	bewertetes Schalldämmmaß
DNA	Desoxyribonukleinsäure	min	Minute	PVC	Polyvinylchlorid
Δ <sub>T</sub>	Temperaturdifferenz	Mio.	Million	S	Süden
E	Einstein	mm	Millimeter	So	Sommerhalbjahr
EPA	Eicosapentaensäure	µm	Mikrometer	SO <sub>x</sub>	Schwefeloxid(e)
φ <sub>eq</sub>	Lichtpfadlänge	µE·m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Mikro-Einstein pro Quadratmeter und Sekunde = Einheit der Photonenflussdichte =	SZR	Scheibenzwischenraum
g	Gramm	µmol <sub>Photonen</sub> ·m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	Einheit der Photonenflussdichte	t	Tonne
g-Wert	Gesamtenergiedurchlasskoeffizient	µs	Mikrosekunde	Tab.	Tabelle
h	Stunde	N	Norden	T <sub>L</sub>	Lichttransmission
ha	Hektar	N	Stickstoff	U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Hydrogenkarbonat	NADPH	Nicotinsäureamid-Adenin-Dinukleotid-Phosphat	V	Volumen
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Kohlensäure	NH <sub>3</sub>	Ammoniak	Vol%	Volumenprozent
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff	η <sub>el</sub>	elektrischer Wirkungsgrad	VSG	Verbundsicherheitsglas
Hz	Hertz	η <sub>th</sub>	thermischer Wirkungsgrad	W	Watt
H <sub>2</sub> O	Wasser	η <sub>ges</sub>	Gesamtwirkungsgrad	W	Westen
J	Joule			Wh	Wattstunde(n)
k	Kilo-			Wi	Winterhalbjahr
				%	Prozent

## Quellenverzeichnis

[Asue 2011] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2011): BHKW-Kenndaten 2011 Module Anbieter Kosten. Online: <http://asue.de/cms/upload/broschueren/2011/bhkw-kenndaten/asue-bhkw-kenndaten-0311.pdf> (Zugriff 12/2012)

[baulinks 2011] Website der ARCHmatic (2011): Ganzglas-System ermöglicht ruhiges Wohnen. Online: <http://www.baulinks.de/webplugin/2011/1046.php4> (Zugriff 1/2013)

[baunetzwissen 2012] Website der BauNetz Media GmbH (2012): Algen-Fassade zur Energieerzeugung. Online: [http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fassade-Algen-Fassade-zur-Energieerzeugung\\_1516729.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fassade-Algen-Fassade-zur-Energieerzeugung_1516729.html) (Zugriff 10/2012)

[Bayless et al. 2002] Bayless, D. et al. (2002): Photosynthetic CO<sub>2</sub> Mitigation using a Novel Membrane-based Photobioreactor. Ohio Coal Research Center, Ohio

[biq 2012] biq das Algenhaus (2012): Microalgen clevere Energiebündel. Online: <http://www.biq-wilhelmsburg.de/die-fassade/biologie.html> (Zugriff 06/12)

[Bley 2009] Bley, Thomas (2009): Biotechnologische Energieumwandlung, Gegenwärtige Situation, Chancen und künftiger Forschungsbedarf. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

[Bosma et al. 2002] Bosma, R. et al. (2002): Ultrasound, a new separation technique to harvest microalgae. In: *Journal of Applied Phycology* 15:143–153, 2003

[Botanik-Online 2012] Botanik online - Die Internetlehre – The Internet Hypertextbook der Uni Hamburg (2012): <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/e44/44.htm> (Zugriff 7/2012)

[Brückner & Höfner 1977] Brückner, U.; Höfner, W. (1977): Die Wachstumsraten der einzelligen Grünalge *Chlorella pyrenoidosa* in Abhängigkeit von der Fe-Versorgung. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 140:441-450

[Carlsson et al. 2007] Carlsson, A.S.; et al. (2007): Micro- and Macro-Algae: Utility for industrial applications. Outputs from the EPOBIO project, CPL press

[Carvalho et al. 2006] Carvalho A.P. et al. (2006) Microbial Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances. In: *Biotechnol. Prog.* 22, 1490-1506

[Carvalho et al. 2010] Carvalho, A.P. et al. (2010): Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects. In: *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89(5): 1275-1288.

[Chae et al. 2005] Chae, S.R (2005): Single cell protein production of *Euglena gracilis* and carbon dioxide fixation in an innovative photo-bioreactor. In: *Bioresource Technology* 97: 322-329, 2006

[Chen et al. 2011] Chen, C.Y. et al. (2011): Cultivation, Photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. In: *Bioresource Technology* 102: 71-81

[Chiu et al. 2008] Chiu, S.Y. et al. (2008): Reduction of CO<sub>2</sub> by a high density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. In: *Bioresource Technology* 99: 3389-3396

[Christi 2007] Chisti, Y. (2007): Biodiesel from microalgae. In: *Biotech Advances* 25: 294–306

[Climatop 2013] Website der Eckelt Glas GmbH (2013): Energiespargläser der SGG Climatop Familie. Online: [http://www.eckelt.at/de/downloads/produkte/waermedaemmung/climatop\\_climatop-solar.pdf](http://www.eckelt.at/de/downloads/produkte/waermedaemmung/climatop_climatop-solar.pdf) (Zugriff am 27.1.2013)

[Costa & Morais 2010] Costa, J.A.V.; Morais, de, M.G (2010): The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae. In: *Bioresource Technology* 102: 2–9, 2011

[Coward 2012] Coward, T. (2012): Low Cost Algae Harvesting Technologies. Online: <http://pig.ncl.ac.uk/coward.htm> (Zugriff 2/2012)

[Cypionka 2010] Cypionka, H. (2010): Grundlagen der Mikrobiologie, 4.Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

[Dasgupta et al. 2010] Dasgupta, C.N. et al. (2010): Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production. In: *international journal of hydrogen energy* 35: 10218-10238

[dbz 2012] Website der Deutschen Bauzeitung (2012): Bioreaktoren-Fassade als Energielieferant. Online: [http://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Bioreaktoren-Fassade\\_als\\_Energielieferant\\_Lebende\\_Algen\\_als\\_Smart\\_1475544.html](http://www.dbz.de/artikel/dbz_Bioreaktoren-Fassade_als_Energielieferant_Lebende_Algen_als_Smart_1475544.html) (Zugriff 10/2012)

[Detail 2008] Detail-Zeitschrift für Architektur+Baudetail (2008): Preisträger Architekturpreis Beton 2008. Online: <http://www.detail.de/architektur/news/preistraeger-architekturpreis-beton-2008-008831.html> (Zugriff 12/2012)

[Detail 360 2011] Website des Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG (2011): Projekt 3163. Online: [http://www.detail360.de/Db/DbFiles/projekte/3163/foto1\\_profil](http://www.detail360.de/Db/DbFiles/projekte/3163/foto1_profil) (Zugriff 1/2013)

[Dietrich 2011] Dietrich, P. (2011): „Membrana protegens aedificii“, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, unter Betreuung von Prof. Sobek, W. und Prof. Allman, M.

[Dietrich 2012] Dietrich, P. (2012): Algetektur – Entwicklung einer Photobioreaktor-Fassade. Online: <http://www.algaeobserver.com/photobioreaktor-fassade-algenfassade> (Zugriff 10/2012)

[DOE 2009] National Algal Biofuels Technology Roadmap. Algal Biofuels Technology Roadmap Workshop, U.S. Department of Energy (DOE) Office of Energy Efficiency and Renewable Energy's Biomass Program, Maryland

[Douskova et al. 2010] Douskova, I. et al. (2010): Utilization of distillery stillage of energy generation and concurrent production of valuable microalgal biomass in the sequence: Biogas-cogeneration-microalgae-products. In: Energy Conversion and Management 51:606-3611

[Dragone et al. 2010] Dragone, G. et al. (2010): Third generation biofuels from microalgae. In: Vilas AM (ed) Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology, vol 2. Formatex Research Center, Badajoz, 1355-1366

[Duscher 2010] Duscher, S. (2010): Ausführungsformen und Anwendungen der Elektrodeionisation (EDI) zur Reinstwasserbereitung, Teil 2: Chemische Grundlagen. In: F & S Filtrieren und Separieren Jahrgang 24 Nr. 6

[ecoLogicStudio 2012] ecoLogicStudio (2012): H.O.R.T.U.S.. Online: <http://www.ecologicstudio.com/v2/project.php?idcat=3&idsubcat=49&idproj=115> (Zugriff 10/2012)

[Ecoduna 2009] Mohr, M.; Emminger, F. (2009): WO 2009/094680 A1, Verfahren und Einrichtung für einen photochemischen Prozess. 6.8.2009

[Ecoduna 2012a] Ecoduna Produktions-GmbH (o.J.) Online: <http://www.ecoduna.com> (Zugriff 6/2012)

[Ecoduna 2012b] ecoduna Produktions-GmbH (2012): Handout zur Eröffnung der Demonstrationsanlage Bruck/Leitha „hanging gardens“ am 10.10.2012

[energyplus 2012a] EnergyPlus Energy Simulation Software. Weather Data: Vienna Schwechat 110360 (IWEC). Online: [@ASHRAE](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=AUT/cname=Austria) (Zugriff 11/2012)

[energyplus 2012b] EnergyPlus Energy Simulation Software. EnergyPlus 7.2.0. Online zum Download: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> (Zugriff am 11/2012)

[e&t 2013] e&t Energie Handels-GmbH (2013): Energy Market Snapshot, Preise vom 17/12/2012 08:00, Online: <https://www.eundt.at/wp-content/uploads/2012/02/Energy-Market-Snapshot-17-12-2012.pdf> (Zugriff 2/2013)

[ferm-living 2012] Website der ferm LIVING ApS (2012): Cutting Board. Online: <http://www.ferm-living.com> (Zugriff: 12/2012)

[Felsenstein 2013] Felsenstein, S., Mitarbeiter der GlassX AG (2013): Persönliche Mitteilung vom 17.1.2013

[FNR 2009] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2009): Biokraftstoffe - Basisdaten Deutschland. 2.Auflage

[Fredericks et al. 2011] Fredericks, S. (2011): Algaegarden. Online: <http://www.algaegarden.net/> (Zugriff 12/2012)

[Frey et al. 1994] Frey, K. (1994): Handbuch für Energieberater. Institut für Energieforschung, Joanneum Research, Graz

[Fuentes et al. 1999] Fuentes, M. M. R. et al. (1999): Outdoor continuous culture of *Phorphyridium cruentum* in a tubular photobioreactor: quantitative analysis of the daily cyclic variation of culture parameters. In: J. Biotechnol. 70, 271-288

[Galloway & Krauss 1961] Galloway, R.A.; Krauss, R.W. (1961): The effect of CO<sub>2</sub> on pH in culture media for algae. In: Plant and Cell Physiology 2:331-337

[Garofalo 2011] Garofalo, R. et al. (2011): Lifecycle assessment and environmental assessment. Online: [http://www.aquafuels.eu/attachments/079\\_D%203.3-3.5%20Life-Cycle%20Assessment%20and%20Environmental%20Assessment.pdf](http://www.aquafuels.eu/attachments/079_D%203.3-3.5%20Life-Cycle%20Assessment%20and%20Environmental%20Assessment.pdf) (Zugriff 1/2013)

[Gießen 2012] Universitätshomepage der Justus-Liebig-Universität (2012): Vorlesungsskript Algen, Institut für Pflanzenökologie. Online: <http://www.uni-giessen.de/~gf1178/Algen.pdf> (Zugriff 7/2012)

[GlassX 2012] Website der GlassX AG (2012): Die technischen Daten zu GLASSX@comfort. Online: [http://glassx.ch/fileadmin/pdf/Broschuere\\_klein\\_online.pdf](http://glassx.ch/fileadmin/pdf/Broschuere_klein_online.pdf) (Zugriff 1/2013)

[Götzl 2009] Götzl, L. (2009): Innenraumschließung im Schulbau. Richtlinien, Zonierung & Ausformulierung. Seminararbeit, TU Wien

[Grobbelaar 2006] Grobbelaar, J.U. (2006): Photosynthetic response and acclimation of microalgae to light fluctuation. In: Algal Cultures Analogues of Blooms and Applications, D.V. Subba Rao (Ed.), 671-683, Science Publishers, Enfield, NH, Plymouth, UK

[Gutteck 2007] Gutteck, U. (2007): Mammutpumpe, Funktion und Bauformen, Online: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Mammutpumpe.png&filetimestamp=20071213173656> (Zugriff 10/2012)

[HOK 2011] HOK-group (2011): HOK / Vanderweil Team Wins METROPOLIS 2011 Next Generation Design Competition. Online: <http://www.hoklife.com/2011/05/12/hok-vanderweil-team-wins-metropolis-2011-next-generation-design-competition/> (Zugriff 10/2012)

[Hu & Richmond 1994] Hu, Q.; Richmond, A. (1994). A flat bioreactor system for outdoor mass cultivation of microorganisms. Abstracts of Fifth International Phycology Congress, Qingdao, China

[IEU 2004] Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (2004): Handreichung, Biogasgewinnung und –nutzung Online: [http://www.msr.uni-bremen.de/werner/rw/Hintergrund/handreichung\\_biogas.pdf](http://www.msr.uni-bremen.de/werner/rw/Hintergrund/handreichung_biogas.pdf) (Zugriff 3/2013)

[Iluz et al. 2011] Iluz, D. (2011): The Enhancement of Photosynthesis by Fluctuating Light. In: Artificial Photosynthesis, Intech, 2012

[IPCC 2007] Metz, B. et al. (2007): Climate Change 2007 – Mitigation of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge and New York

[Jagnow Wolff 2009] Jagnow, K.; Wolff, D. (2009): Manuskript für "Der Energieberater". Verlag Deutscher Wirtschaftsdienst, Köln, 2003-2009

[Janssen et al. 2001] Janssen, M. et al. (2001): Photosynthetic efficiency of *Dunaliella tertiolecta* under short light/dark cycles. In: *Enzyme Microb Tech* 29:298–305

[Kerner 2012] Kerner, M. (2012): Gebäudeintegrierte Photobioreaktoren (PBR) als Energieerzeugungssystem bei gleichzeitiger Regulierung des Tageslichteintrages und des Wärmehaushaltes. Online: <http://ssc-hamburg.de/brf.pdf> (Zugriff 10/2012)

[Kitaya et al. 2005] Kitaya, Y. et al. (2005): Effects of temperature, CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> concentrations and light intensity on cellular multiplication of microalgae, *Euglena gracilis*. In: *Advances in Space Research*, 35/9:1584-1588

[Knaack 2007] Knaack, U. et al. (2007): Fassaden Prinzipien der Konstruktion, Birkhäuser Verlag, Basel, S.130-131

[Kommareddy & Anderson 2004] Kommareddy, A.; Anderson, G. (2004): Study of light requirements of a photobioreactor. North Central ASAE/CSAE Conference Presentation MB04-111, Winnipeg, USA

[Koning 1994] Koning, R. E. (1994): Light. Plant Physiology Information Website. Online: [http://plantphys.info/plant\\_physiology/light.shtml](http://plantphys.info/plant_physiology/light.shtml). (Zugriff 2/2013)

[Lee 2001] Lee, Y.K. (2001): Microalgal mass culture systems and methods: Their limitations and potential. In: *Journal of applied Phycology*. 13: S.307-315

[Lee 2011] Lee, C.C.S. (2011): Modular Algae Photo-bioreactor. Online: <http://chris-studio.blogspot.co.at/2011/05/modular-algae-photo-bioreactor.html> (Zugriff 10/2012)

[Leupold et al. 2012] Leupold, M. et al. (2012): Influence of mixing and shear stress on *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus*, and *Chlamydomonas reinhardtii*. In: *Journal of Applied Phycology*

[Lubbadeh 2008] Lubbadeh, J. (2008): Bioreaktoren: Algen sollen Kraftwerke von CO<sub>2</sub> reinwaschen. Online: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/bioreaktoren-algen-sollen-kraftwerke-von-co2-reinwaschen-a-575028.html> (Zugriff 2/2013)

[Mahdavi et al. 2007] Mahdavi, A. et al. (2007): Bauphysik & Humanökologie, Vorlesungsunterlagen. Abteilung Bauphysik und Humanökologie, TU Wien

[Mahdavi & Orehounig 2008] Mahdavi, A.; Orehounig, K. (2007): Technischer Ausbau, Vorlesungsunterlagen. Abteilung Bauphysik und Humanökologie, TU Wien

[Mann et al. 2009] Mann, G. et al. (2009): Biogas-conditioning with microalgae. In: *Agronomy Research* 2009, 7(1), S.33-38

[Masojídek et al. 2004] Masojídek J. et al. (2004): Photosynthesis in microalgae, In: *Handbook of Microalgal Culture*. In: *Biotechnology and Applied Phycology*, Richmond A, (Ed.), Blackwell, Oxford, 20–39

[Masojídek et al. 2010] Masojídek, J. et al. (2010): Productivity correlated to Photobiochemical Performance of *Chlorella* Mass Cultures Grown Outdoors in Thin-Layer Cascades. In: *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 38, S.307-317, 2011

[Mata et al. 2010] Mata, T.M. et al. (2010): Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:217-232

[Melis et al. 2000] Melis, A. et al. (2000): Sustained photobiological hydrogen gas production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga  
[Maeda et al. 1995] Maeda, K. et al. (1995): CO<sub>2</sub> fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae. In: *Energy Conversion and Management* 36(6-9):717-720

[Miklosi 2012] Miklosi, A. (2012): Portable Algae-Powered 'Chlorella' Pods Could Provide Fresh Air in Polluted Cities. Online: <http://inhabitat.com/portable-algae-powered-chlorella-pods-could-provide-fresh-air-in-polluted-cities/> (Zugriff 10/2012)

[Milledge 2010] Milledge, J.J. (2010): Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. In: *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10, 31-41, 2011

[Molina Grima et al. 2002] Molina Grima E.M. et al. (2002) Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. In: *Biotechnol Adv* 20:491–515

[Mulaku & Nyanchara 2004] Mulaku, W.O.; Nyanchara, E.N. (2004) Dissolved air flotation process for algal removal in surface water treatment in Kenya. In: *Journal of Civil Engineering Research and Practice* 1: 27-38

[Qiang & Richmond 1996] Qiang, H.; Richmond, A. (1996): Productivity and photosynthetic efficiency of *Spirulina platensis* as affected by light intensity, algal density and rate of mixing in a flat plate photobioreactor. In: *Journal of Applied Phycology* 8: 139-145

[Neufert 2009] Neufert, E. (2009): *Bauentwurfslehre*, Vieweg+Teubner Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden

[OIB RL5 2011] Österreichisches Institut für Bautechnik (2011): OIB-Richtlinie 5, Schallschutz, Online: <http://www.oib.or.at> (Zugriff 12/2012)

[Ogbonna et al. 1999] Ogbonna, J. C. (1999): An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors. In: J. Biotechnol., 70(1-3), 289-297

[Ono & Cuello 2003] Ono, E.; Cuello, J.L. (2003): Selection of Optimal Microalgae Species for CO<sub>2</sub> Sequestration. Proceedings 2nd Annual Conference on Carbon Sequestration, Alexandria, 1-7

[Panda et al. 1989] Panda, A. K. et al. (1989): Plant cell reactors-a perspective. In: Enzyme Microb. Technol. 11, 386-397

[Park & Lee 2001] Park, K.H.; Lee, C.G. (2001): Effectiveness of flashing light for increasing photosynthetic efficiency of microalgal cultures over a critical cell density. In: Biotechnol Bioprocess Eng 6:189-193

[Pflanzenforschung 2013] Website der pflanzenforschung.de c/o genius GmbH (2013): Wissenalphabetisch. Online: <http://www.pflanzenforschung.de/wissenalphabetisch/a> (Zugriff 2/2013)

[Posten 2009] Posten, C. (2009): Design Principles of Photo-Bioreactors for cultivation of Microalgae. In: Engineering in Life Sciences, 9, 3, 165-177

[Ramachandra et al. 2009] Ramachandra, T. (2009): Milking Diatoms for Sustainable Energy: Biochemical Engineering versus Gasoline-Secreting Diatom Solar Panels. In: Industrial & Engineering Chemistry Research

[Raso et al. 2012] Raso, S. et al. (2012): Effect of Oxygen Concentration on the Growth of *Nannochloropsis* sp. at Low Light Intensity. In: Journal of Applied Phycology, 24, 863-871

[Recknagel et al. 2003] Recknagel, H. (2003): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München

[Richert 1999] Richert, O. (1999): Solare Biokonversion: Einsatz von Mikroalgen zur Konversion nutzbarer Stoffströme aus einer Bioferm-Kompostierungsanlage, 1.Auflage, Wissenschaft und Technik Verlag, Berlin

[risinglifemedia 2012] Website der Rising Life Media (2012): Is Chlorella a Powerful Natural Detoxification Tool? Online: <http://risinglifemedia.com/?p=2046> (Zugriff 2/2013)

[Rösch 2012] Rösch, C. (2012): Wir machen nicht nur Energie damit. Interview mit Dr. Christine Rösch. Online: <http://blog.explore-house.eu/de/2012/10/26/wir-machen-nicht-nur-energie-damit/> (Zugriff 2/2013)

[Rosello Sastre et al. 2007] Rosello Sastre, R. et al (2007) Scaledown of microalgae cultivations in tubular photobioreactors—a conceptual approach. In: J Biotechnol 132:127-133

[Saint-Gobain Glass 2013] Saint-Gobain Glass France (2013): Prüfzeugnisse Mehrscheiben-Isolierglas, Schallschutz-Prüfung SGG Climatop

[Sastre & Posten 2010] Rosello Sastre, R. & Posten, C. (2010): Die vielfältige Anwendung von Mikroalgen als nachwachsende Rohstoffe. In: Chemie Ingenieur Technik, 82 (11), 1925-1939

[Schagerl 2012] Schagerl, M. (2012): persönliches Gespräch

[Schenk et al. 2008] Schenk, P.M. et al. (2008): Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. In: Bioenergy Res 1:20-43

[Schlot 2011] Dokumentationsplattform schlot.at (2011): Fassade Gusenleithnergasse Süd. Online: <http://schlotforum.wordpress.com/2011/01/> (Zugriff 1/2013)

[Standard 2013] Website des Immobilienstandard (2013) Online: [http://images.derstandard.at/upload/imagesanzeiger/immoimporte/topreal/DB13809235\\_2C12\\_1301050111.JPG](http://images.derstandard.at/upload/imagesanzeiger/immoimporte/topreal/DB13809235_2C12_1301050111.JPG) (Zugriff 1/2013)

[Subitec 2013] Subitec GmbH: Mikroalgen-Technologie. Online: <http://www.subitec.com/mikroalgen-technologie/> (Zugriff: 2/2013)

[Schwörbel 1994] Schwörbel, J. (1994): Methoden der Hydrobiologie / Süßwasserbiologie. 4. Aufl. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 368

[Sierra et al. 2007] Sierra, E. et al. (2007): Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. In: Chemical Engineering Journal 138, 136-147, 2008

[Singh & Kumar 1992] Singh, Y.; Kumar, H. (1992) Lipid and hydrocarbon production by *Botryococcus* spp. Under nitrogen limitation and anaerobiosis. In: World J Microbiol Biotechnol 8:121-124

[Smorczewski 2011] Smorczewski, K. (2011): Grüne Lunge. Nutzung von Algenbiomasse und Photovoltaikmodulen zur Abdeckung des Energiebedarfs des Fußballstadions SC Freiburg, Masterarbeit, FH Düsseldorf

[Splitterwerk 2012] Splitterwerk (2012): Clever Treefrog - Housing-project at the IBA Hamburg. Online: [http://www.splitterwerk.at/database/main.php?mode=view&album=2012\\_Clever\\_Treefrog&pic=02\\_Clever\\_Treefrog\\_01.jpg&di spsize=512&start=0](http://www.splitterwerk.at/database/main.php?mode=view&album=2012_Clever_Treefrog&pic=02_Clever_Treefrog_01.jpg&di spsize=512&start=0) (Zugriff 10/2012)

[Strik 2011] Strik, D.P.B.T.B. et al. (2011): Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. In: Trends in Biotechnology 29:41-47

[Tennessee et al. 1995] Tennessee, D.J. et al. (1995): Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation. In: Photosynth Res 44:261-269

[Ugwu & Aoyagi 12]Ugwu, C.U.; Aoyagi, H. (2012): Microalgal Culture Systems: An Insight into their Designs. Operation and Applications. In: Biotechnology, 11:127-132

[Ulloa 2011] Ulloa, G. et al. (2011): Effect of Mg, Si, and Sr on growth and antioxidant activity of the marine microalga *Tetraselmis suecica*. In: J. Appl. Phycol.

[Vonshak et al. 2001] Vonshak et al. (2001): Sub-optimal morning temperatures induces photoinhibition in dense outdoor cultures of the algae *Monodus subterraneus* (Eustigmatophyta) *Chlamydomonas reinhardtii*. In: *Plant Physiol* 122:127–136

[Wagening 2013] Website der Wagening Universität UR (2013): Facts on algae. Online: <http://www.algae.wur.nl/UK/factsonalgae> (Zugriff 2/2013)

[Wang et al. 2008] Wang, B. et al. (2008): CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 79:707-718

[Wang et al. 2009] Wang, L. et al (2009): Cultivation of Green Algae *Chlorella* sp. in Different Wastewaters from Municipal Wastewater Treatment Plant. *Appl Biochem Biotechnol* 162:1174–1186, 2010

[Wang et al. 2010] Wang, L. et al. (2010): Semi-continuous Cultivation of *Chlorella vulgaris* for Treating Undigested and Digested Dairy Manures. In: *Appl Biochem Biotechnol*, 162:2324–2332

[Weinläder 2003] Weinläder, H. (2003): Optische Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien zur Tageslichtnutzung. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität, Würzburg

[Wikipedia 2009] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (2009): Kohlendioxid. Online: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kohlendioxid&oldid=114240323> (Zugriff 2/2013)

[Wikipedia 2012a] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (2012): Wandheizung. Online: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wandheizung&oldid=109868572> (Zugriff 12/2012)

[Wikipedia 2012b] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (2012): Thermische Behaglichkeit. Online: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermische\\_Behaglichkeit&oldid=112126256](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Thermische_Behaglichkeit&oldid=112126256) (Zugriff 1/2013)

[Wikipedia 2012c] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (2013) Heizwert. Online: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Heizwert&oldid=111598734> Bearbeitungsstand: Dezember 2012. (Zugriff am 12.2. 2013)

[Wikipedia 2013] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie (2013): Länderliste CO<sub>2</sub>-Emission, Online: [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Länderliste\\_CO2-Emission&oldid=114794225](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Länderliste_CO2-Emission&oldid=114794225) (Zugriff 2/2013)

[Wischnewski 2013] Wischnewski, B. (2013): Online Berechnung thermodynamischer Kennwerte. Online: <http://www.peacesoftware.de/einigewerte> (Zugriff am 2.2.2013)

[Wiscomb 2009] Wiscomb, T. (2009): Perth Photobioreactor. Online: [http://tomwiscombe.com/project\\_18.html](http://tomwiscombe.com/project_18.html) (Zugriff 10/2012)

[Wissenschaft-Online 2013] Onlineportal der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH (2013): Kompaktlexikon der Biologie. Online: <http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/biok/2722> (Zugriff 2/2013)

[X-TU Architects 2012] X-TU Architect(s) (2012): BiO<sub>2</sub> Tower (Nanterre, France). Online: <http://free-d.nl/project/show/subCat/special/id/829> (Zugriff 10/2012)

[Xu et al. 2009] Xu, L. et al. (2009): Microalgal bioreactors: Challenges and opportunities. In: *Eng. Life Sci.* 9, 3, 178–189

[Yang et al. 2011] Yang et al. (2011): Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrient balance. In: *Bioresource Technology* 102:159-165

[ZAMG 2000] Website der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2000): Klimadaten von Österreich, Standort Schwechat 1971–2000 Online: [http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten\\_oesterreich\\_1971\\_frame1.htm](http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm) (Zugriff: 1/2013)

[Zhang et al. 2002] Zhang, K. et al. (2002): Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor. In: *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 25, 2:97-101

[Zijffers et al. 2008] Zijffers, J.W.F. et al. (2008): Design process of an area-efficient photobioreactor. *Marine Biotechnology* 10(4), 404–415.

[Zittelli et al. 2006] Zittelli, G.C. et al. (2006): Productivity and photosynthetic efficiency of outdoor cultures of *Tetraselmis suecica* in annular columns. In: *Aquaculture* 261: 932-943

[Zogg 2005] Zogg, M. (2005): Verbrennungsrechnung mit Emissionen. Online: [http://www.zogg-engineering.ch/publi/wkk\\_wp\\_strom\\_ref\\_8\\_gasturbine.pdf](http://www.zogg-engineering.ch/publi/wkk_wp_strom_ref_8_gasturbine.pdf) (Zugriff 2/2013)

[Zürcher & Frank 2010] Zürcher, C.; Frank, T. (2010): *Bauphysik Bau & Energie*. 3. Auflage, dvf Hochschulverlag AG, Zürich

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Flussdiagramm von Mikroalgenbiomassepotentialen [Costa & Morais 2010]	3
Abb. 2.2: Schematische Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs des globalen Systems	6
Abb. 2.3: Schematische Darstellung des Zellaufbaus der Grünalge Chlorella [Cypionka 2010]	7
Abb. 2.4: Lichtmikroskopische Aufnahme der Grünalge Chlorella ermerstonii	7
Abb. 2.5: elektromagnetisches Spektrum mit detaillierter Darstellung des sichtbaren Lichts und Markierung im Bereich von 680-700nm [Carvalho et al. 2010, leicht verändert]	8
Abb. 2.6: Lichtabsorption von Chlorophyll in Bezug auf Elektronenanregung [Koning 1994]	8
Abb. 2.7: Energiehaushalt der Mikroalgen Biomasseproduktion [Wageningen 2013]	9
Abb. 2.8: Lichtsättigungskurve von Photosynthese und Lichtintensität [Grobbelaar 2006]	9
Abb. 2.9: Hägg-Diagramm von Kohlendioxid in Wasser [Wikipedia 2009], leicht verändert	10
Abb. 2.10: Produktionsrate der Blaualge Arthrospira fusiformis bei $500 \mu\text{E} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in Abhängigkeit von Zelldichte und Mischrate $\phi=0,6$ ; $\sigma=2,1$ ; $\Delta=4,2$ [ $l^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ] [Quiang & Richmond 1996]	13
Abb. 2.11: Darstellung einer Auswahl an PBR-Grundformen	14
Abb. 2.12: Darstellung unterschiedlicher Unterteilungsmöglichkeiten von Plattenreaktoren	15
Abb. 2.13: Flachplatten-Airlift-Reaktor der Firma Subitec [Subitec 2013]	15
Abb. 2.14: Prinzip der kommunizierenden Funktionsweise des Gaslifteffekts (nach Gutteck 2007)	18
Abb. 2.15: Patentzeichnung der Anwendung des Gaslifteffekts beim Reaktor „Hanging Garden“ der Ecoduna GmbH [Ecoduna 2009]	18
Abb. 3.1: Funktionskizze der PBR-Fassade © Arup Deutschland GmbH [baunetzwissen 2012]	21
Abb. 3.2: Wohngebäude mit PBR-Fassade © Arup Deutschland GmbH [dbz 2012]	21
Abb. 3.3: Darstellung des Energiekreislaufs der Reaktorfassade © Otto Wulff Bauunternehmung GmbH / schönknecht: gmbh [dbz 2012]	21

Abb. 3.4: PBR-Fassadenelement © Arup Deutschland GmbH [dbz 2012]	21
Abb. 3.5: Kunstinstallation „H.O.R.T.U.S.“ [ecoLogicStudio 2012]	22
Abb. 3.6: CO <sub>2</sub> -Versorgung der Kunstinstallation „H.O.R.T.U.S.“ [ecoLogicStudio 2012]	22
Abb. 3.7: Entwurfsskizze des Algaegarden [Fredericks et al. 2011]	22
Abb. 3.8: CO <sub>2</sub> -Versorgung des Algaegarden [Fredericks et al. 2011]	22
Abb. 3.9: Grundriss der PBR-Kunstinstallation [Wiscomb 2009]	23
Abb. 3.10: PBR-Kunstinstallation im städtischen Kontext [Wiscomb 2009]	23
Abb. 3.11: Seitenansicht des PBR-Moduls von Christopher Lee [Lee 2011]	23
Abb. 3.12: Frontansicht des PBR-Moduls von Christopher Lee [Lee 2011]	23
Abb. 3.13: Fassadenausschnitt des BiO <sub>2</sub> Towers [X-TU Architects 2012]	24
Abb. 3.14: PBR-Fassadenelement des BiO <sub>2</sub> Towers [X-TU Architects 2012]	24
Abb. 3.15: Schnittdarstellung durch den Chlorella-Pod [Miklosi 2012]	24
Abb. 3.16: Chlorella-Pods im städtischen Gefüge [Miklosi 2012]	24
Abb. 3.17: Vogelperspektive der PBR-Fassade des Künstler-Campus [Dietrich 2012]	25
Abb. 3.18: Ansicht der PBR-Fassade des Künstler-Campus aus dem gegenüberliegenden Gebäude [Dietrich 2012]	25
Abb. 3.19: Vogelperspektive des Entwurfs zur Sanierung eines Verwaltungsgebäudes [HOK 2011]	25
Abb. 3.20: PBR-Fassade des Entwurfs zur Sanierung eines Verwaltungsgebäudes [HOK 2011]	25
Abb. 4.1: Darstellung der übergreifenden Zusammenhänge bei der Entwicklung von Fassade, Gebäudewahl und Fassadenfunktionen	26
Abb. 4.2: Kreislauf der stofflichen und energetischen Flüsse in einer nachhaltigen Stadtzelle [ferm-living 2012 verändert]	28
Abb. 4.3: Schematische Explosionsdarstellung des Aufbaus eines PBR-Fassadenelements	29
Abb. 4.4: Energiehaushalt der PBR-Fassade	30

Abb. 4.5: Schematischer Kulturverlauf entlang der Fassade	30
Abb. 4.6: Beziehung zwischen Lichtpfadlänge, Lichtintensität und Biomassekonzentration	31
Abb. 4.7: Schematische Darstellung der vier Fassadenvarianten	32
Abb. 4.8: PBR als Wandelement a) Kulturbewegung entlang der Fassade b) Fassadenschnitt M 1:150 c) Fassadenschnitt M 1:10 d) Checkliste der Fassadenfunktionen e) Anwendungsbeispiel als Fotomontage [Schlot 2011, verändert]	34
Abb. 4.9: PBR als Verkleidung a) Kulturbewegung entlang der Fassade b) Fassadenschnitt M 1:150 c) Fassadenschnitt M 1:10 d) Checkliste der Fassadenfunktionen e) Anwendungsbeispiel als Fotomontage [Standard 2013, verändert]	35
Abb. 4.10: PBR als Doppelfassade a) Kulturbewegung entlang der Fassade b) Fassadenschnitt M 1:150 c) Fassadenschnitt M 1:10 d) Checkliste der Fassadenfunktionen e) Anwendungsbeispiel als Fotomontage [baulinks 2011, verändert]	36
Abb. 4.11: PBR als "Klimaelement" a) Kulturbewegung entlang der Fassade b) Fassadenschnitt M 1:150 c) Fassadenschnitt M 1:10 d) Checkliste der Fassadenfunktionen e) Anwendungsbeispiel als Fotomontage [Detail360 2011, verändert]	37
Abb. 4.12: Schichtenaufbau der polyvalenten Wand von Mike Davis [Knaack 2007]	38
Abb. 4.13: Schichtenaufbau der integralen Hülle von Ulrich Knaack [Knaack 2007]	38
Abb. 4.14: Nutzung der PBR-Fassade zur Erfüllung verschiedener Fassadenfunktionen	38
Abb. 4.15: Schematische Darstellung des Demonstrationsgebäudes incl. definierender Werte	39
Abb. 4.16: Schematische Darstellung der Raumluftaufbereitung	39
Abb. 4.17: Mehrstufiger Prozess kombiniert Abwasseraufbereitung mit Produktion hochwertiger Mikroalgenprodukte [Ecoduna 2012a]	41
Abb. 4.18: Schematische Darstellung der Energiebilanz des Demogebäudes mit PBR-Fassade	42
Abb. 4.19: Schematische Darstellung der Regulierung des Wärmehaushalts der PBR-Fassade durch zentralen	

Wärmetauscher mit den Trägermedien Nährgas, Nährflüssigkeit und Algenkultur .....	44
Abb. 4.20a und b: Der Zollverein-Kubus von Sanaa Architekten wurde 2006 als Musikhochschule fertiggestellt [Detail 2008] .....	45
Abb. 4.21: Schematische Darstellung der Verringerung der Transmission durch Reduktion der thermischen Hüllfläche. .....	46
Abb. 4.22: Schematische Darstellung der Wärmebilanz des Demogebäudes .....	46
Abb. 4.23: PBR-Fassadenelement mit Zu- und Ableitung an der Drehachse [dbz 2012] ©Arup GmbH .....	47
Abb. 4.24: bewegliche PBRen von Arup GmbH als Sonnenschutz [Kerner 2012] ©Arup GmbH .....	47
Abb. 4.25: schematische Darstellung der Tageslichtoptimierung durch Verschattung und Lichtleitung. Variierende Biomassekonzentration im Jahresverlauf steuert die Verschattungswirkung.....	48
Abb. 4.26: Aufbau des Produkts GlassXcomfort, einer Isolierverglasung mit integrierter thermischer Speichermasse [GlassX 2012] .....	48
Abb. A.1: Schematische Darstellung des Demonstrationsgebäudes für die Berechnungen.....	60

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: (Operationelle) Umrechnungsfaktoren für Tageslicht (nach Nusch aus Schwöbel 1994) .....	9
Tab. 4.1: Bewertung der Gebäudenutzungstypen nach gewichtenden Kriterien.....	27
Tab. 4.2: Energiebilanz des Demogebäudes mit PBR- Fassade gegliedert nach Orientierung, Fassadentyp und Jahreszeit.....	43
Tab. 4.3: Wärmebilanz der PBR-Fassade des Demonstrationsgebäudes gegliedert nach Orientierung, Fassadentyp und Jahreszeit .....	44
Tab. 4.4: Wärmebilanz des Demogebäudes gegliedert nach Fassadentyp, Jahreszeit .....	46

## Anhang

A1	Beschreibung des für die Berechnungen verwendeten Demonstrationsgebäudes.....	60
A2	Abschätzung der nötigen Stärke des PCM im PBR-Fassadenpaneel.....	60
A3	Berechnungen zum Wärmehaushalt des Gebäudes und der PBR-Fassade.....	61
A4	Berechnungen zur Luftaufbereitung.....	64
A5	Abschätzung der BM-Produktion PBM.....	64

### A1 Beschreibung des für die Berechnungen verwendeten Demonstrationsgebäudes

Um repräsentative Werte zu erhalten wird ein vereinfachtes Demonstrationsgebäude verwendet, anhand dessen die Berechnungen durchgeführt werden. Dieses hat die Abmessungen  $B \times L \times H = 20 \times 20 \times 14\text{m}$  und einen wirksamen PBR-Anteil der Fassadenfläche(S,O,W) von 75%. Die verbleibenden 25%

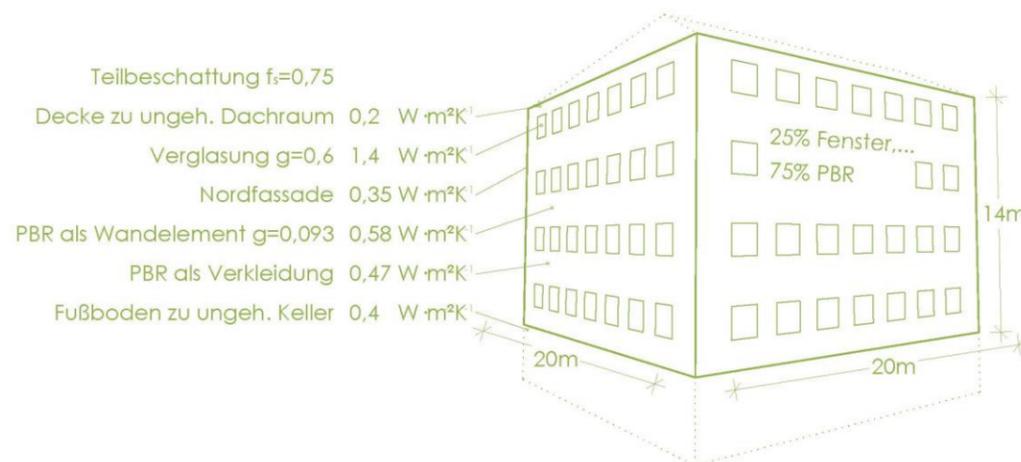


Abb. A.1: Schematische Darstellung des Demonstrationsgebäudes für die Berechnungen

teilen sich auf Belichtungsfläche, Eingänge, Rahmen der PBR u.ä. auf.

Die Berechnungen werden je nach Bedarf jeweils für den Jahresdurchschnitt und/oder für Sommer- und Winterhalbjahr berechnet und gegebenenfalls getrennt für die unterschiedlich orientierten Fassaden.

Die solaren Strahlungswerte sind die eines typischen Jahres am Standort Schwechat, Niederösterreich [energyplus 2012a].

### PBR-Fassadenflächen

$20\text{m} \cdot 14\text{m} \cdot 0,75$  PBR-Anteil der Fassade = je  $210\text{m}^2$   
Reaktorfläche an Ost-, Süd- und Westfassade =  $630\text{m}^2$

### Kulturvolumen

Für den optimalen Scheibenzwischenraum wurden in Kapitel 4.3.2 für Süd-, Ost- und Westfassade die Werte 36mm, 35mm und 30mm ermittelt.

Ost: $210\text{m}^2 \cdot 0,035\text{m}$	<u><math>= 7,35\text{m}^3</math></u>	<u><math>= 7.350\text{l}</math></u>
Süd: $210\text{m}^2 \cdot 0,036$	<u><math>= 7,56\text{m}^3</math></u>	<u><math>= 7.560\text{l}</math></u>
West: $210\text{m}^2 \cdot 0,030\text{m}$	<u><math>= 6,30\text{m}^3</math></u>	<u><math>= 6.300\text{l}</math></u>
Kulturvolumen gesamt	<u><math>= 21,21\text{m}^3</math></u>	<u><math>= 21.210\text{l}</math></u>

### A2 Abschätzung der nötigen Stärke des PCM im PBR-Fassadenpaneel

Zur Abschätzung der nötigen Speichermasse die die Schichtdicke des PCMs definiert, wird der maximale effektiv wirksame Energieeintrag (Reduktionsfaktor für effektiven g-Wert = 0,45 [Climatop 2013], [Mahdavi, Fail, Pont 2007]) mit der Schmelzenthalpie des PCM verglichen. Die maximale Energie die an einem Tag in den Reaktor einfallen kann muss vom PCM aufgenommen werden und bis zum nächsten Tag wieder abgegeben werden können.

Bei angenommener Schmelzenthalpie von  $190 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$  und Dichte von  $1625 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [Weinländer 2003] ergibt sich eine Schmelzenthalpie von  $857,64 \text{ Wh} \cdot \text{cm}^{-1}$  Schichtdicke des PCMs. Anhand der maximalen Wärmeeinträge kann die erforderliche Dicke des Speichers berechnet werden:

Maximaler Wärmeeintrag = Globalstrahlung max. an vertikaler Fläche · effektiver Gesamtenergiedurchlassfaktor durch die Isolierverglasung · Reduktion durch Photosynthese · Reduktion durch Energiedurchlass durch den Reaktor

$$\begin{aligned} \text{Ost: } & 3.731 \cdot 0,45 \cdot 0,9754 \cdot 0,93 = 1.523 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2}\text{PBR} \\ & 1.523 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2}\text{PBR} / 857,64 = 1,78 \rightarrow 1,8 \text{ cm} \\ \text{West: } & 3.672 \cdot 0,45 \cdot 0,9754 \cdot 0,93 = 1.499 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2}\text{PBR} \\ & 1.499 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2}\text{PBR} / 857,64 = 1,75 \rightarrow 1,8 \text{ cm} \\ \text{Süd: } & 5.037 \cdot 0,45 \cdot 0,9754 \cdot 0,93 = 2.056 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2}\text{PBR} \\ & 2.056 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2}\text{PBR} / 857,64 = 2,40 \rightarrow 2,4 \text{ cm} \end{aligned}$$

### A3 Berechnungen zum Wärmehaushalt des Gebäudes und der PBR-Fassade

#### Umrechnung von $U_g$ zu $U_w$

Nach der europäischen Norm EN ISO 10077-1 wurde aus Ableitung des  $U_g$ -Werts ähnlicher Produkte der  $U_w$ -Wert für den gesamten PBR und für die Isolierverglasung, die dem Kulturvolumen vorgesetzt ist abgeschätzt.

$U_w$  Wärmedurchgangskoeffizient Fenster [ $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ ]  
 $A_g$  Glasfläche [ $m^2$ ]  
 $U_g$  Wärmedurchgangskoeffizient Glas [ $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ ]  
 $A_f$  Rahmenfläche [ $m^2$ ]  
 $U_f$  Wärmedurchgangskoeffizient Rahmen [ $W \cdot m^{-2}K^{-1}$ ]  
 $l_{fg}$  Umfang des sichtbaren Glasrands [m]  
 $\psi_{fg}$  linearer Wärmedurchgangskoeffizient in [ $W \cdot m^{-1}K^{-1}$ ]  
 Der Gesamtenergiedurchlass  $g$  des PBR wird vom Produkt

GlassXcomfort [GlassX 2012] abgeleitet, jener der Isolierverglasung vom Produkt Climatop Ultra n [Climatop 2013]:

$$U_{gPBR} = 0,48 W \cdot m^{-2}K^{-1}$$

$$U_{gVerglasung} = 0,5 W \cdot m^{-2}K^{-1}$$

Annahme: Fenster: 1,5 x 3m; Rahmen durchschnittlich 5cm breit,  $U_f = 0,7$ ;  $U_{gPBR} = 0,48$ ;  $U_{gVerglasung} = 0,5$ ;  $\psi_{fg} = 0,04$  für thermisch verbesserten Randverbund

$$U_w = (A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_{fg} \cdot \psi_{fg}) / (A_g + A_f)$$

$$U_{wPBR} = (4,06 \cdot 0,48 + 0,44 \cdot 0,7 + 8,6 \cdot 0,04) / (4,06 + 0,44) = 0,58$$

$$U_{wVerglasung} = (4,06 \cdot 0,5 + 0,44 \cdot 0,7 + 8,6 \cdot 0,04) / (4,06 + 0,44) = 0,60$$

#### Abschätzung Heizwärmebedarf HWB

Um die Auswirkung der PBR-Fassade auf den Wärmehaushalt abzuschätzen, wird der Heizwärmebedarf des Demonstrationsgebäudes mit den Energieflüssen zwischen Gebäude und PBR verglichen.

Es wird angenommen, dass im Zuge der Sanierung mit der PBR-Fassade jene Bauteile, die nicht durch den PBR ergänzt werden auf den für renovierte Gebäude vorgeschriebenen Standard [OIB RL6 2011] gebracht werden. Die Abschätzung des HWBs erfolgt daher mit folgenden U-Werten:

Nordfassade	0,35 $W \cdot m^{-2}K^{-1}$
Decke zu ungeheiztem Dachraum	0,2 $W \cdot m^{-2}K^{-1}$
Fußboden zu ungeheiztem Keller	0,4 $W \cdot m^{-2}K^{-1}$
Verglasung	1,4 $W \cdot m^{-2}K^{-1}$

Bei einem Fenster mit  $U = 1,4 W \cdot m^{-2}K^{-1}$ , ist mit einem Gesamtenergiedurchlass von  $g = 0,6$  zu rechnen [Frey, Haas, Königshofer 1994]

Abschätzung des  $HWB_{Demo}$  nach [Mahdavi, Fail, Pont 2007]

$Q_h$	Heizwärmebedarf [ $kWh \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ ]
$HWB_{BGF}$	flächenbezogener Heizwärmebedarf [ $kWh \cdot a^{-1}$ ]
$BGF_B$	Bruttogeschoßfläche beheizt [ $m^2$ ]
NF	Nettonutzfläche [ $m^2$ ]
$Q_T$	Transmissionswärmeverluste
$Q_V$	Lüftungswärmeverluste
$\eta$	Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne
$Q_i$	interne Gewinne
$Q_s$	solare Gewinne
$L_T$	Leitwert der Gebäudehülle
$L_e$	Leitwert außenluftberührter Bauteile
$L_u$	Leitwert außenluftunberührter Bauteile
$L_g$	Leitwert erdberührter Bauteile
$L_\psi$	Leitwert für linienförmige Wärmebrücken
$L_\chi$	Leitwert für punktförmige Wärmebrücken
$F_i$	Temperaturfaktor
$U_i$	U-Wert
$A_i$	Fläche der Gebäudehülle
$\rho_a$	Dichte der Luft
$c_a$	spezifische Wärmespeicherkapazität der Luft
$\rho_w$	Dichte von Wasser
$c_w$	spezifische Wärmespeicherkapazität von Wasser
$n$	Wechselrate (hier Luft oder Wasser)
$V_n$	belüftetes Nettovolumen des Gebäudes
$l_j$	Strahlungssummen mit der Orientierung $j$
$A_g$	Glasfläche
$f_s$	Reduktionsfaktor für Verschattung (vereinfachend 0,75 für teilverschattete Lage)

$g_w$	effektiv wirksamer Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung ( $g_w \approx 0,9 \cdot g$ )
$q_i$	Wärmestromdichte
HT	Anzahl der Heizztage
HGT	Heizgradtagezahl
$f_{WB}$	Erhöhungsfaktor für Wärmebrücken (vereinfachend: 1,05)

#### HWB für Demogebäude mit PBR als Verkleidung

##### Transmissionswärmeverluste $Q_T$

$$L_e + L_u + L_g = (0)_{PBR^a} + (1 \cdot 1,4 \cdot 280)_{Glas} + (0,9 \cdot 0,2 \cdot 400)_{Decke} + (0,5 \cdot 0,4 \cdot 400)_{Boden} + (1 \cdot 0,35 \cdot 210)_{Nordfassade} = 17,5 W \cdot K^{-1}$$

$$L_\psi + L_\chi = 0,2 \cdot (0,75 - 617,5 / 1920) \cdot 617,5 = 52,9 W \cdot K^{-1}$$

$$L_T = 617,5 + 52,9 = 670,4 W \cdot K^{-1}$$

$$Q_T = 0,024 \cdot 670,4 \cdot 3.235 = 52.050 kWh \cdot a^{-1}$$

<sup>a</sup> Durch die PBR-Fassade treten durch umgekehrtes Temperaturgefälle keine Transmissionswärmeverluste aus dem Raum auf.

##### Lüftungswärmeverluste $Q_V$

$$L_{V70\%} \approx 0,33 \cdot 2 \cdot 4.760 \cdot 0,3 = 942,48$$

$$Q_{V70\%} = 0,024 \cdot 942,48 \cdot 3.235 = 73.174 kWh \cdot a^{-1}$$

##### Interne Wärmegewinne $Q_i$

$$Q_i = 0,024 \cdot 3 \cdot 1.600 \cdot 208 = 23.962 kWh \cdot a^{-1}$$

##### Solare Wärmegewinne $Q_s$

$$Q_s = \sum_j l_j \cdot (A_g \cdot f_s \cdot g_w)_j [kWh \cdot a^{-1}]$$

$$(356 \cdot 56 \cdot 0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,9)_{Süd} + (210 \cdot 56 \cdot 0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,9)_{Ost} + (210 \cdot 56 \cdot 0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,9)_{West} + (150 \cdot 56 \cdot 0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,9)_{Nord} = 21.002 kWh \cdot a^{-1}$$

##### Wärmebilanzgleichung $Q_h$

$$Q_h = (52.050 + 73.174) - 0,98 \cdot (23.962 + 21.002) = \underline{81.159 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}}$$

$$81.159 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1} \cdot 1000 / 365 \text{d} / 630 \text{m}^2 = 352,9 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBRd}^{-1}$$

Wärmebedarf pro m<sup>2</sup> Fassadenfläche

Heizwärmebedarf  $HWB_{BGF}$

$$HWB_{BGF} = 81.159 / 1600 = \underline{50,7 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \text{BGF} \cdot \text{a}^{-1}}$$

### HWB für Demogebäude mit PBR als Wandelement

Transmissionswärmeverluste  $Q_T$

$$L_e + L_u + L_g = (0)_{PBR^a} + (1 \cdot 1,4 \cdot 280)_{Glas} + (0,9 \cdot 0,2 \cdot 400)_{Decke} + (0,5 \cdot 0,4 \cdot 400)_{Boden} + (1 \cdot 0,35 \cdot 210)_{Nordfassade} = \underline{617,5 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$L_\psi + L_\chi = 0,2 \cdot (0,75 - 617,5 / 1.920) \cdot 617,5 = \underline{52,9 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$L_T = 617,5 + 52,9 = \underline{670,4 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$Q_T = 0,024 \cdot 670,4 \cdot 3.235 = \underline{52.050 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}}$$

<sup>a</sup> Durch die PBR-Fassade treten durch umgekehrtes Temperaturgefälle keine Transmissionswärmeverluste aus dem Raum auf.

Lüftungswärmeverluste  $Q_v$

$$L_{v70\%} \approx 0,33 \cdot 2 \cdot 4.760 \cdot 0,3 = 942,48$$

$$Q_{v70\%} = 0,024 \cdot 942,48 \cdot 3.235 = \underline{73.174 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}}$$

Interne Wärmegewinne  $Q_i$

$$Q_i = 0,024 \cdot 3 \cdot 1.600 \cdot 208 = \underline{23.962 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}}$$

Solare Wärmegewinne  $Q_s$

$$Q_s = \sum_j I_j \cdot (A_g \cdot f_s \cdot g_w)_j \text{ [kWh} \cdot \text{a}^{-1}]$$

Die Lichttransmission  $T_L$  und der Gesamtenergiedurchlass  $g$  des PBR wird vom Produkt GlassXcomfort [GlassX 2012] abgeleitet:

$T_L$  der Isolierverglasung incl. PCM ist 38% bei kristallinem PCM, 55% bei flüssigem PCM → Mittelwert = 46,5%;  $T_L$  der Algen ist durchschnittlich 20% →  $46,5 \cdot 0,2 = T_{L \text{ PBR}} = \underline{9,3\%}$ .  
Verhältnis von  $T_L$  : g-Wert von GlassXcomfort = 0,465 : 0,35 →  $g_{PBR} = \underline{7\%}$ .

$$(356 \cdot 56 \cdot 0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,9)_{Süd} + (210 \cdot 56 \cdot 0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,9)_{Ost} + (210 \cdot 56 \cdot 0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,9)_{West} + (150 \cdot 56 \cdot 0,75 \cdot 0,6 \cdot 0,9)_{Nord} + (356 \cdot 210 \cdot 0,75 \cdot 0,07 \cdot 0,9)_{PBR\text{Süd}} + (210 \cdot 210 \cdot 0,75 \cdot 0,07 \cdot 0,9)_{PBR\text{Ost}} + (210 \cdot 210 \cdot 0,75 \cdot 0,07 \cdot 0,9)_{PBR\text{West}} = \underline{28.702 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}}$$

Wärmebilanzgleichung  $Q_h$

$$Q_h = (52.050 + 73.174) - 0,98 \cdot (23.962 + 28.702) = \underline{73.613 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}}$$

$$73.613 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1} \cdot 1000 / 365 \text{d} / 630 \text{m}^2 = \underline{320,1 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

Wärmebedarf pro m<sup>2</sup> Fassadenfläche

Heizwärmebedarf  $HWB_{BGF}$

$$HWB_{BGF} = 73.613 / 1600 = \underline{46,0 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \text{BGF} \cdot \text{a}^{-1}}$$

### Energieflüsse eines m<sup>2</sup> PBR-Fassadenfläche

Solare Wärmegewinne  $Q_s$

BM... (Trocken-)Biomasse

$Q_{T i/a}...$  Transmissionswärmeverluste nach innen/außen

s... Index für Sommerhalbjahr

w... Index für Winterhalbjahr

PBR... Index für PBR-bezogen

Verkl... Index für auf PBR-Verkleidung bezogen  
WaEl... Index für auf PBR- Wandelement bezogen  
PE... Photosyntheseeffizienz  
PAR... Index für auf photoaktive Strahlung bezogen

$L_T$  3-Scheiben-Isolierverglasung 0,71  
[Climatop 2013]

Faktor zur Umrechnung von Lichteintrag zu effektivem Lichteintrag 0,9

[Mahdavi, Fail, Pont 2007]

Photosyntheseeffizienz der photoaktiven Strahlung

$PE_{PAR}$  11,4%

[Zittelli et al. 2006]

Anteil des photoaktiven Anteils der einfallenden solaren Strahlung [Wang et al. 2008] 45%

Zur Abschätzung des solaren Wärmegewinns wird vom solaren Input, das den Reaktorinnenraum erreicht, jene Energie abgezogen, die von den Mikroalgen in BM umgewandelt wird und jene, die den Reaktor durchdringt.

$$100\% \text{ Licht} \cdot 0,45 \text{ (Anteil PAR)} \cdot 0,71 \text{ (Lichttransmission)} \cdot 0,9 \text{ (Effektivitätsfaktor)} \cdot 0,75 \text{ (Verschattung)} \cdot 0,114 \text{ (Photosyntheseeffizienz)}$$

$$= \underline{2,46\%} \text{ Anteil der an der Fassadenoberfläche auftreffenden Energie die in BM umgewandelt wird}$$

$$1 - 0,0246 = 0,9754_{PS}$$

$$Q_s = \sum_j I_j \cdot (A_g \cdot f_s \cdot g_w)_j \cdot 0,9754_{PS} \cdot 0,93 \text{ [Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}]$$

$$Q_{s\text{SüdS}} = 104,2 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 0,9754 \cdot 0,93 = \underline{765,6 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

$$Q_{s\text{OstWestS}} = 88,5 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 0,9754 \cdot 0,93 = \underline{650,3 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

$$Q_{s\text{SüdOstWestS}} = \underline{688,7 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

$$Q_{sSüdW} = 65,4 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 0,9754 \cdot 0,93 = \underline{480,5} \\ \text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{sOstWestW} = 30,2 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 24 \cdot 0,9754 \cdot 0,93 = \\ 221,9 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{sSüdOstWestW} = 308,1 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

#### Transmissionswärmeverluste $Q_T$

U-Wert 25cm Vollziegelmauerwerk  $1,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Einfachwärmeschutzglas beschichtet  $3,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

[Zürcher, Frank 2010]

Durchschnittsaußenlufttemperatur Raum Wien:

Sommerhalbjahr  $16,25^\circ\text{C}$

Winterhalbjahr  $3,40^\circ\text{C}$

[ZAMG 2000]

$$Q_T = (f_i \cdot U_i \cdot A_i) \cdot f_{WB} \cdot \Delta_T \cdot 24 [\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}]$$

$$Q_{TiVerkl} = (1 \cdot 1,9 \cdot 1)_{\text{innen}} \cdot 1,05 \cdot 4 \cdot 24 = \underline{191,5 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

$$Q_{TiWaEI} = (1 \cdot 3,7 \cdot 1)_{\text{innen}} \cdot 1,05 \cdot 4 \cdot 24 = \underline{373,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

$$Q_{TaS} = (1 \cdot 0,58 \cdot 1)_{\text{außen}} \cdot 1,05 \cdot 7,75 \cdot 24 = \underline{113,3 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

$$Q_{TaW} = (1 \cdot 0,58 \cdot 1)_{\text{außen}} \cdot 1,05 \cdot 20,6 \cdot 24 = \underline{301,1 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

$Q_{Ta}$  bei  $-15^\circ\text{C}$  Tagesdurchschnitt:

$$Q_{Ta-15} = (1 \cdot 0,58 \cdot 1)_{\text{außen}} \cdot 1,05 \cdot 39 \cdot 24 = \underline{570,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}}$$

#### Regulierung Lüftungswärmeverluste/gewinne $Q_V$

$$Q_V = \rho_a \cdot c_a \cdot n \cdot V_{PBR} \cdot \Delta_T \cdot 24 [\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}]$$

$$Q_{V\Delta T7\emptyset} = 0,33 \cdot 60 \cdot 0,034 \cdot 7 \cdot 24 = \pm 112,6 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{V\Delta T14\emptyset} = 0,33 \cdot 60 \cdot 0,034 \cdot 14 \cdot 24 = \pm 225,1 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{V\Delta T14S} = 0,33 \cdot 60 \cdot 0,036 \cdot 14 \cdot 24 = \pm 239,5 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{V\Delta T14O} = 0,33 \cdot 60 \cdot 0,035 \cdot 14 \cdot 24 = \pm 232,8 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{V\Delta T14W} = 0,33 \cdot 60 \cdot 0,030 \cdot 14 \cdot 24 = \pm 199,6 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{V\Delta T14\emptyset OW} = \pm 216,2 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

#### Regulierung über Nährflüssigkeit $Q_{NF}$ mit $\Delta_T = 14\text{K}$ $Q_{NF}$

$$Q_{NF} = \rho_w \cdot c_w \cdot n \cdot V_{PBR} \cdot \Delta_T \cdot 24 [\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}]$$

$$Q_{NF\Delta T7\emptyset} = 1 \cdot 1.163 \cdot 0,1 / 24 \cdot 0,034 \cdot 7 \cdot 24 = \pm 26,9$$

$$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{NF\Delta T14\emptyset} = 1 \cdot 1.163 \cdot 0,1 / 24 \cdot 0,034 \cdot 14 \cdot 24 = \pm 53,8$$

$$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{NF\Delta T14S} = 1 \cdot 1.163 \cdot 0,1 / 24 \cdot 0,036 \cdot 14 \cdot 24 = \pm 58,6$$

$$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{NF\Delta T14O} = 1 \cdot 1.163 \cdot 0,1 / 24 \cdot 0,035 \cdot 14 \cdot 24 = \pm 57,0$$

$$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{NF\Delta T14W} = 1 \cdot 1.163 \cdot 0,1 / 24 \cdot 0,030 \cdot 14 \cdot 24 = \pm 48,8$$

$$\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{NF\Delta T14\emptyset OW} = \pm 52,9 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

Wärmespeicherkapazität von Wasser:  $1,163 \text{ Wh} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

[Zürcher, Frank 2010] =  $1.163 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1}$

Wärmespeicherkapazität der gesamten und  $1\text{m}^2$  Fassade:

$$21,21 \text{ m}^3 \cdot \text{K}^{-1} = 1.163 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-3} \text{K}^{-1} \cdot 21,21 \text{ m}^3 = \underline{24,7 \text{ kWh} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$33,71 \cdot \text{K}^{-1} = 1,163 \text{ Wh} \cdot \text{l}^{-1} \text{K}^{-1} \cdot 33,71 \cdot \text{K}^{-1} = \underline{39,2 \text{ Wh} \cdot \text{K}^{-1}}$$

#### Regulierung über zentralen Wärmetauscher mit $\Delta_T = 5\text{K}$ $Q_{WT}$

$$Q_{WT} = \rho_w \cdot c_w \cdot V_{PBR} \cdot \Delta_T [\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}]$$

$$Q_{WT\Delta T2,5\emptyset} = 1.163 \cdot 0,034 \cdot 2,5 = \pm 98,9 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{WT\Delta T5\emptyset} = 1.163 \cdot 0,034 \cdot 5 = \pm 197,7 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{WT\Delta T5S} = 1.163 \cdot 0,036 \cdot 5 = \pm 209,3 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{WT\Delta T5O} = 1.163 \cdot 0,035 \cdot 5 = \pm 203,5 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{WT\Delta T5W} = 1.163 \cdot 0,030 \cdot 5 = \pm 174,4 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_{WT\Delta T5\emptyset OW} = \pm 189,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

#### Wärmebilanz

$$\Sigma = Q_S - Q_{Ti} - Q_{Ta} [\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}]$$

#### Wärmebilanz Verkleidung

$$\Sigma_{SüdSVerkl} = 765,6 - 0 - 113,3 = 652,3 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$\Sigma_{OstWestSVerkl} = 650,3 - 0 - 113,3 = 537,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$\Sigma_{SüdWVerkl} = 480,5 - 191,5 - 301,1 = -12,1 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$\Sigma_{OstWestWVerkl} = 221,9 - 191,5 - 301,1 = -270,7 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

#### Wärmebilanz Wandelement

$$\Sigma_{SüdSWaEI} = 765,6 - 0 - 113,3 = 652,3 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$\Sigma_{OstWestSWaEI} = 650,3 - 0 - 113,3 = 537,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$\Sigma_{SüdW WaEI} = 480,5 - 373 - 301,1 = -193,6 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

$$\Sigma_{OstWestW WaEI} = 221,9 - 373 - 301,1 = -452,2 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR} \cdot \text{d}^{-1}$$

#### Extremwerte Wärmüberschuss/ -bedarf

Maximaler Wärmeeintrag wie in Abschätzung PCM

berechnet:

$$\text{Ost: } = 1.523 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$$

$$\text{West: } = 1.499 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$$

$$\text{Süd: } = 2.056 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$$

Maximaler Wärmeüberschuss im PBR (max. Wärmeeintrag

– min. Transmissionswärmeverluste innen – min.

Transmissionswärmeverluste außen)

$$\text{Sommer: } 2.056 - 0 - 0 = \underline{2.056 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}}$$

Maximaler Wärmebedarf = Globalstrahlung min. an

vertikaler Fläche · effektiver Gesamtdurchlass

durch die Isolierverglasung · Reduktion durch

Photosynthese · Reduktion durch Energiedurchlass durch

den Reaktor

$$\text{Minimaler Wärmeeintrag: } 128,4 \cdot 0,45 \cdot 0,9754 \cdot 0,93 =$$

$$52,4 \text{ Wh}_{\text{eff}} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}$$

Maximaler Wärmebedarf = min. Wärmeeintrag – max.

Transmissionswärmeverluste innen – max.

Transmissionswärmeverluste außen =

$$52,4 - 373 - 570 = \underline{-890,6 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \text{PBR}}$$

## Warmwasserbedarf

WB... Wärmebedarf

w<sub>WH</sub>... Index für Warmwasserbedarf Beherbergung mit Gastronomie, Hotel

w<sub>WB</sub>... Index für Warmwasserbedarf Bildungseinrichtung  
Beherbergung mit Gastronomie, Hotel

Wassertemperatur	45°C	a
Hotel mit Duschen/Bad	130l/Tag/Gast	a
Belegung(Ann.: 2 Personen	40m <sup>2</sup> /Zimmer	b

$$WB_{wWH} = NF / 40m^2 \cdot 2 \cdot 0,13m^3 \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \Delta T / A_{PBR} \quad [Wh \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1}]$$

$$WB_{wWH} = 1.360m^2 / 40m^2 \cdot 2 \cdot 0,13m^3 \cdot 1163 \cdot 35 / 630 = 571,2 \quad Wh \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1}$$

### Bildungseinrichtung

Wassertemperatur	45°C	c
Schule mit Duschen	40l/Tag/Schüler	c
Schülerdichte	14m <sup>2</sup> /Schüler	d

$$WB_{wWB} = NF / 14m^2 \cdot 0,04m^3 \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \Delta T / A_{PBR} \quad [Wh \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1}]$$

$$WB_{wWB} = 1360m^2 / 14m^2 \cdot 0,04m^3 \cdot 1163 \cdot 35 / 630 = 251,1$$

$$Wh \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1}$$

<sup>a</sup>[Jagnow Wolff 2009], <sup>b</sup>[Neufert 2009], <sup>c</sup>[Recknagel Schramek Sprenger 2003], <sup>d</sup>[Götzl 2009]

$$\text{Mittelwert zwischen Hotel und Bildung: } (571,2 + 251,1) / 2 = 411,15 \quad Wh \cdot m^{-2} \cdot PBR$$

## **A4 Berechnungen zur Luftaufbereitung**

### Lüftungsvolumen Kultur V<sub>LK</sub>

Belüftungsrate der Algen [Sierra et al. 2007] 1min<sup>-1</sup>

$$21,21m^3 \text{ Kulturvolumen} \cdot 60 \text{ stündlicher Luftwechsel} = 1.272,6 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$$

### Gebäudevolumen brutto V<sub>B</sub>/netto V<sub>N</sub>

$$20m \cdot 20m \cdot 14m = 5.600m^3 \text{ V}_B$$

$$5.600m^3 \text{ V}_B \cdot 0,85 \text{ Abminderungskoeffizient für Abzug der Konstruktion} = 4.760m^3 \text{ V}_N$$

### Gebäudefläche brutto A<sub>B</sub>/netto A<sub>N</sub>

$$20m \text{ L} \cdot 20m \text{ B} \cdot 4 \text{ Ebenen} = 1.600m^2 \text{ A}_B$$

$$1.600m^2 \text{ A}_B \cdot 0,85 \text{ Abminderungskoeffizient} = 1.360m^2 \text{ A}_N$$

### Lüftungsvolumen Raumluft V<sub>LR</sub>

$$4.760m^3 \text{ V}_N \cdot 2 \text{ stündlicher Luftwechsel} = 9.520 \text{ m}^3 \cdot h^{-1} \text{ V}_{LR}$$

### Anteil der V<sub>LK</sub>/V<sub>LR</sub>

$$1272,6m^3 \cdot h^{-1} \text{ V}_{LK} / 9.520 \text{ m}^3 \cdot h^{-1} \text{ V}_{LR} = 0,13 = 13\%$$

### Luftfeuchtebedarf

Die Luftfeuchte soll bei 20°C Lufttemperatur von 30% auf 45% angehoben werden.

$$20^\circ C, 30\% \rightarrow 4,6g_{H_2O} \cdot kg^{-1} \text{Luft}$$

$$20^\circ C, 40\% \rightarrow 6,9g_{H_2O} \cdot kg^{-1} \text{Luft}$$

$$\rightarrow \Delta = 2,3g_{H_2O} \cdot kg^{-1} \text{Luft}$$

$$24^\circ C, 100\% \rightarrow 20,1g_{H_2O} \cdot kg^{-1} \text{Luft}$$

$$1m^3 \text{ Luft} = 1,125 \text{ kg bei Raumtemperatur}$$

$$\text{Lüftungsvolumen Raum} = 9.550 \text{ m}^3 \cdot h^{-1} = 10.743,8 \text{ kg} \cdot h^{-1}$$

$$20,1x + 4,6y = 74.132,2$$

$$x + y = 10.743,8 \rightarrow x = 10.743,8 - y$$

$$20,1(10.743,8 - y) + 4,6y = 74.132,2$$

$$15,5y = 141.818,2$$

$$y = 9.149,6; x = 1.594,2$$

Pro Stunde werden 1.594,2 kg bzw. 1.417,1 m<sup>3</sup> Algenabluft benötigt um die Luftfeuchtigkeit von 30% auf 45% zu heben.

$$\text{Lüftungsvolumen Algen} = 1.272,6 \text{ m}^3 \cdot h^{-1}$$

$$1.272,6 \text{ m}^3 \cdot h^{-1} \cdot 1,125 \text{ kg} \cdot m^{-3} = 1.431,7 \text{ kg}_{\text{Luft}} \cdot h^{-1}$$

$$1.431,7 \cdot 20,1g_{H_2O} = 28,8 \text{ kg}_{H_2O} \cdot h^{-1}$$

$$1.417,1 \text{ m}^3 / 1.272,6 \text{ m}^3 \cdot h^{-1} = 1,11 \rightarrow \text{benötigte}$$

$$\text{Durchlüftungsrate der Algen} = 1,11 \cdot \text{min}^{-1}$$

Die verwendeten thermohygrischen Materialkennwerte stammen aus dem Werk von Zürcher, Frank (2010).

## **A5 Abschätzung der BM-Produktion P<sub>BM</sub>**

durchschnittlicher Lichtinput an PBR-Oberfläche

$$1627,9 \text{ Wh} \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1}$$

Energiegehalt von 1g Biomasse [Kerner 2012]

$$23 \text{ KJ} \cdot g^{-1} \approx 6,39 \text{ Wh} \cdot g^{-1}$$

Anteil der an der Fassadenoberfläche auftreffenden

Energie die in BM umgewandelt wird

2,46% (siehe Berechnung Energieflüsse)

$$1.627,9 \text{ Wh} \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1} \cdot 0,0246 = 40,0 \text{ Wh} \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1} \text{ Energie in Biomasse}$$

$$P_{BM} = 40,0 \text{ Wh} \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1} / 6,39 \text{ Wh} \cdot g^{-1} = 6,27 \text{ g} \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1}$$

$$6,27 \text{ g} \cdot m^{-2} \cdot PBR \cdot d^{-1} \cdot 630 \text{ m}^2 A_{PBR} = 3.948,2 \text{ g} \cdot d^{-1} \approx 3,9 \text{ kg} \cdot d^{-1}$$

## Energiegehalt der Biomasse

Jahr:  $40,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} = 5,7 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{BGF}} \cdot \text{a}^{-1} = 9.198 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$

Aufteilung auf Winter- und Sommerhalbjahr im Verhältnis 1:2,24 nach zur Verfügung stehendem Lichtinput

Winterhalbjahr:  $2.436 \text{ g} = 3,9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} = 24,7 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1}$

Sommerhalbjahr:  $5.456 \text{ g} = 8,7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} = 55,4 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} =$

$4,0 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{BGF}} \cdot (\text{a}/2)^{-1} = 6.358 \text{ kWh} \cdot (\text{a}/2)^{-1}$

$P_{\text{BM Süd S}} = 2.500,6 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 0,0246 = 61,5 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1}$

$P_{\text{BM Süd W}} = 1.569,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 0,0246 = 38,6 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1}$

$P_{\text{BM OstWest S}} = 2.123,3 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 0,0246 = 53,2 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1}$

$P_{\text{BM OstWest W}} = 725,5 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 0,0246 = 17,8 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1}$

Reduktion durch Verarbeitung zu Biogas = 30% [Kerner]

## CO<sub>2</sub>Bedarf

CO<sub>2</sub>-Bedarf/g BM [Posten 2009] 1,85 g

$3.948 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 1,85 = \underline{7.304 \text{ g}_{\text{CO}_2} \cdot \text{d}^{-1}}$

$7.304 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1} / 630 \text{ m}^2 A_{\text{PBR}} = 11,6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1}$

$7.304 \text{ g}_{\text{CO}_2 \text{Bedd}} / 12 \text{ h Wachstumsperiode} = \underline{609 \text{ g}_{\text{CO}_2}}$

Im Winterhalbjahr: 376 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>

Im Sommerhalbjahr: 842 g<sub>CO<sub>2</sub></sub>

$7.304 \cdot 365 = 2.666 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1} \approx \underline{2,7 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}}$

## CO<sub>2</sub>-Zufuhr aus Raumluff

Angenommener CO<sub>2</sub>-Gehalt der Abluft (Maximalwert nach Max Pettenkofer) 1.000 ppm

spez. Gewicht von CO<sub>2</sub> bei 1 bar, 24°C [Wischnewski 2013]

1.791 g · m<sup>-3</sup>

$1.272,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \text{ Lüftungsvolumen der Kultur} \cdot 0,001 \cdot 1.791 \text{ g} = \underline{2.279 \text{ g}_{\text{CO}_2} \cdot \text{h}^{-1}}$

$2.279 \text{ g}_{\text{CO}_2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot 12 \text{ h Wachstumsperiode} = \underline{27.351 \text{ g}_{\text{CO}_2} \cdot \text{d}^{-1}}$

Anteil des CO<sub>2</sub>-Bedarfs der über die Raumluffaufbereitung bereitgestellt werden kann:

Winter:  $100\% \cdot 2.279 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \text{ CO}_2 / 376 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \text{ CO}_2 = \underline{606\%}$

Sommer:  $100\% \cdot 2.279 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \text{ CO}_2 / 842 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \text{ CO}_2 = \underline{271\%}$

## CO<sub>2</sub> aus HWB

Heizwert von 1 m<sup>3</sup> Methan [Wikipedia 2012c] 9,968 kWh

CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Verbrennung von 1 m<sup>3</sup> Methan

[Zogg 2005] 1,828 kg

$\text{HWB}\emptyset = (352,9 + 320,1) / 2 = 336,5 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1}$

$336,5 \cdot 630 = 212,0 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1}$

$212,0 \text{ kWh} \cdot \text{d}^{-1} / 9,968 \text{ kWh} \cdot 1,828 \text{ kg} = 38,9 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$

## Nächtlicher BM-Rückbau

nächtlicher Biomasseverlust [Richert 1999] rund 20%

min. Lichtversorgung zur Vermeidung von

Biomasserückbau [Schagerl 2013] 1% der

Maximalstrahlung

Maximalstrahlung [Schwörbel 1994] 360 W · m<sup>-2</sup> (PAR)

80% = 6,27 g<sub>BM</sub> · m<sup>-2</sup><sub>PBR</sub> · d<sup>-1</sup>

20% = 1,57 g · m<sup>-2</sup><sub>PBR</sub> · d<sup>-1</sup> Biomasserückbau

bei Energiegehalt von 23 kJ · g<sup>-1</sup> ≈ 6.39:

$1,57 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}} \cdot \text{d}^{-1} \cdot 6.39 \text{ Wh} \cdot \text{g}^{-1} = 10,0 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}}$

Biomasseverlust pro Nacht

$3,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 12 \text{ h (pro Nacht)} = 43,2 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{PBR}}$

1% Energieinput (perfekte Lampe mit 100% Licht 0% Wärme) übersteigt selbst die Energie, die in Algen chemisch gespeichert ist um 332%.