

Nutzung von städtischen Verkehrsflächen für die Produktion von Biomasse

The Green P

K. Lichtenegger, K. Meixner,
R. Riepl, F. Schipfer,
M. Zellinger

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

25/2018

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

The Green P

Nutzung von städtischen Verkehrsflächen
für die Produktion von Biomasse

Dr. Klaus Lichtenegger
BIOENERGY 2020+ GmbH
Dr. Katharina Meixner

BIOENERGY 2020+ GmbH
DI(FH) Rosemarie Riepl
BIOENERGY 2020+ GmbH

Dr. Fabian Schipfer
Technische Universität Wien,
Energy Economics Group

Ing. Michael Zellinger, MSc
Fachhochschule Wr. Neustadt &
BIOENERGY 2020+ GmbH

Wieselburg, 5.6.2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des bmvit publiziert und elektronisch über die Plattform www.HAUSderZukunft.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	9
Abstract.....	11
1 Einleitung	13
1.1 Aufgabenstellung	13
1.2 Stand der Technik	14
1.3 Verwendete Methoden	16
1.3.1 Potenzialabschätzung: Ansatz und Alternativen.....	17
1.3.2 Technische Lösungen	21
1.3.3 Modellierung, Berechnungen, Simulation	37
1.3.4 Technische und ökonomische Bewertung	46
2 Ergebnisse.....	53
2.1 Allgemeine Einschätzungen den Projektidee	53
2.2 Ergebnisse der Simulationsstudien.....	54
2.3 Einige Ergebnisse der technoökonomischen Wieselburg, 5.6.2018Bewertung	56
2.4 Einbettung in das Programm Stadt der Zukunft	61
3 Schlussfolgerungen	62
3.1 Technische Aspekte	62
3.2 Wirtschaftliche Aspekte	63
4 Ausblick und Empfehlungen	64
5 Verzeichnisse.....	66
5.1 Abbildungsverzeichnis.....	66
5.2 Tabellenverzeichnis.....	67
5.3 Literaturverzeichnis	67
6 Anhang.....	71



Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Manche Verkehrs- und Parkplatzflächen im städtischen Umfeld werden nur während eng begrenzter Zeiten genutzt. Das gilt etwa für Parkplätze von großen, peripher gelegenen Kinos, die üblicherweise erst in den Abendstunden in nennenswertem Ausmaß belegt sind. Auch die Parkplätze vieler peripherer Einkaufszentren werden erst ab dem späten Nachmittag sowie an Samstagen intensiv genutzt. Die restliche Zeit stehen diese Flächen leer und haben weder produktiven noch dekorativen Nutzen.

Zugleich ist ein Problem bei der Nutzung erneuerbarer Energien, insbesondere von Solar- und Bioenergie, ihr Flächenbedarf, der aus der geringen Energiedichte der Sonnenstrahlung resultiert. Zu Recht wird oft kritisch angemerkt, dass die intensive Nutzung erneuerbarer Energien Flächen beanspruchen kann, die ökologisch wertvoll sind oder für andere Zwecke (insbesondere Nahrungs- und Futtermittelproduktion) gebraucht würden.

Inhalte und Zielsetzungen

Aufgrund der schlechten Nutzung mancher Verkehrsflächen bietet es sich an, solche wenig genutzte Flächen, die für Ökologie und Nahrungsmittelproduktion ohnehin bereits verloren sind, zusätzlich für die Energiegewinnung heranzuziehen.

Während es bereits Ansätze zur Nutzung von Verkehrsflächen für Photovoltaik gibt, ist das Potenzial zur Produktion von Biomasse, etwa mittels Kultivierung von Mikroalgen, noch nicht einmal ansatzweise systematisch untersucht. Diese Nutzungsform hätte den Vorteil, dass die Algen nicht nur energetisch, sondern auch stofflich (als Ausgangsmaterial für Bioraffinieren oder zur Düngerproduktion) verwendbar wären, eine kaskadische Nutzung wäre möglich.

Da dieser Ansatz so neu ist, war es ein Hauptziel des Projekts, anhand von Daten zur Flächennutzung, von Wetterdaten sowie von bekannten Eigenschaften der Mikroalgen das Potenzial für diese Art der Biomasseproduktion und der Energiegewinnung abzuschätzen. Ein weiteres Ziel war es, eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten der Umsetzung sowie über die jeweils spezifischen Herausforderungen (z.B. mechanische Stabilität, optische Eigenschaften, Sicherheitsaspekte) zu erhalten.

Methodische Vorgehensweise

Für die Analysen kamen Literaturrecherchen (inklusive Auswertung von Wetter- und Flächennutzungsdaten), technisch-naturwissenschaftliche Grundsatzüberlegungen, eigene Berechnungen sowie Simulationen mit eigens zu erstellenden Computernmodellen zum Einsatz.

Auf Basis der technisch-naturwissenschaftlichen Modelle wurde eine ökonomische Bewertung samt Analyse der kostentreibenden Faktoren erstellt. Die erfolgversprechendsten Ansätze samt der zentralen zugehörigen Überlegungen wurden im vorliegenden Bericht ausführlich dokumentiert.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Es wurden drei Konzepte für die Mikroalgenkultivierung näher ausgearbeitet:

- In den Boden integrierte tubuläre Photobioreaktoren
- Offene Kaskadensysteme in der Parkplatzüberdachung
- Lichternte in der Parkplatzüberdachung

Den Simulationsrechnungen zufolge können mit den ersten beiden Technologien Erträge von 7-8 Tonnen Biomasse pro Hektar Fläche und Monat erreicht werden, mit der Lichternte noch mehr (wobei dort die Modellunsicherheiten am größten und die Ergebnisse entsprechend am wenigsten belastbar sind).

Als wesentliches Kriterium für die Produktivität hat sich der Wärmehaushalt herausgestellt. Hier haben in den Boden integrierte Lösungen durch die Verfügbarkeit einer Wärmesenke deutliche Vorteile. Die Verdunstungskühlung in offenen Systemen ist zwar relevant, kann aber eine deutliche Reduktion der Produktivität nicht verhindern.

Wie die wirtschaftliche Analyse klar zeigt, ist eine rein energetische Nutzung der produzierten Biomasse nicht zielführend. Die Mikroalgenkultivierung kann nur bei Einbeziehung der stofflichen Komponente sinnvoll sein, sei es durch direkte Nutzung lokaler Abwasser- und Abgasströme, sei es durch Produktion von lokal genutzten Wertstoffen (z.B. Dünger für *Urban Gardening* oder Fischfutter für aquaponische Systeme). Diese beiden Ziele stehen in Konkurrenz, denn je hochwertiger die Produkte sind, desto schwerer lassen sich Abfallströme in deren Herstellung integrieren.

Ausblick

Das Projekt hat klar weiteren Forschungsbedarf gezeigt. Als nächste Schritte werden ineinandergreifend eine Verfeinerung des Modells und prinzipielle experimentelle Untersuchungen vorgeschlagen; darauf aufbauend die Errichtung einer Demo-Anlage. Diese sollte nach Möglichkeit bereits in Hinblick auf wirtschaftlichen Zusatznutzen (Einbettung in ein aquaponisches System oder Werbeeffekt eines „grünen“ Parkplatzes) gestaltet werden.

Abstract

Starting point/Motivation

Some traffic and parking areas in urban regions are only occupied for a very limited amount of time. In particular, this is the case for parking areas of large, suburban cinema centres which are mostly used only in the evening. Also parking areas of large suburban shopping centres are largely occupied only in the late afternoon and on Saturdays. The rest of the week these areas are unused and possess neither productive nor decorative function.

At the same time, a major problem for large-scale implementation of renewable energy, in particular solar energy and bioenergy, is the massive land use which results from the low energy density of solar radiation. As it has been remarked repeatedly and correctly, intensive use of renewable energy can demand areas which are either of high ecological value or would be needed for other purposes (in particular the production of food and animal fodder).

Contents and Objectives

Due to the poor use of some traffic areas, it is advisable to use such unused areas, which have already been lost for ecology and food production, for energy production.

While there are already approaches to the use of traffic areas for photovoltaics, the potential for the production of biomass, e. g. by cultivating microalgae, has not even begun to be systematically investigated. This form of use would have the advantage that the algae could be used not only energetically, but also materially (as raw material for biorefining or for fertilizer production), a cascading use would be possible.

As this approach is so new, one of the project's main objectives was to assess the potential for this type of biomass production and energy production based on land use data, weather data and known microalgae characteristics. A further goal was to obtain an overview of the various implementation options as well as the respective specific challenges (e. g. mechanical stability, optical properties, safety aspects).

Methods

For the analysis, literature research (including the evaluation of weather and land use data), basic technical and scientific considerations, own calculations as well as simulations with specifically designed computer models have been used.

On the basis of the technical-scientific models, an economic assessment was made including an analysis of the cost-driving factors. The most promising approaches and the related central considerations were documented in detail in this report.

Results

Three concepts for microalgae cultivation have been elaborated:

- Ground-integrated tubular photobioreactors
- Open cascade systems in the car park roofing
- Harvest of light in the car park roofing

According to the simulation calculations, yields of 7-8 tonnes of biomass per hectare per month can be achieved with the first two technologies, and even more with light harvesting (where, however, the model uncertainties are greatest and thus the results are less reliable).

The heat balance has turned out to be an essential criterion for productivity. In this case, solutions integrated in the ground have clear advantages due to the availability of a heat sink. Evaporation cooling in open systems is relevant but cannot prevent a significant reduction in productivity.

As the economic analysis clearly shows, a purely energetic use of the biomass produced is not appropriate. Micro-algae cultivation can only make sense if the material components are included, either through the direct use of local waste water and exhaust gas streams, or through the production of locally used resources (e. g. fertilizers for urban gardening or fish feed for aquaponic systems). These two goals are in competition with each other, because the higher the quality of the products, the harder waste streams can be integrated into their production.

Prospects / Suggestions for future research

The project has clearly shown the need for further research. The proposed next steps are an intertwined refinement of the model and experimental investigations, followed by the construction of a demonstration plant. If possible, this should already be designed with added economic value (embedding in an aquaponic system or advertising effect of a "green" parking space).

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Manche Verkehrs- und Parkplatzflächen im städtischen Umfeld werden nur während eng begrenzter Zeiten genutzt. Das gilt etwa für Parkplätze von großen, peripher gelegenen Kinos, die üblicherweise erst in den Abendstunden in nennenswertem Ausmaß belegt sind. Auch die Parkplätze vieler peripherer Einkaufszentren werden erst ab dem späten Nachmittag sowie an Samstagen intensiv genutzt. Die restliche Zeit stehen diese Flächen leer und haben weder produktiven noch dekorativen Nutzen.

Zugleich ist ein Problem bei der Nutzung erneuerbarer Energien, insbesondere von Solar- und Bioenergie, ihr Flächenbedarf, der aus der geringen Energiedichte der Sonnenstrahlung resultiert. Zu Recht wird oft kritisch angemerkt, dass die intensive Nutzung erneuerbarer Energien Flächen beanspruchen kann, die ökologisch wertvoll sind oder für andere Zwecke (insbesondere Nahrungs- und Futtermittelproduktion) gebraucht würden. Hier bietet es sich an, wenig genutzte Flächen, die für Ökologie und Nahrungsmittelproduktion ohnehin bereits verloren sind, zusätzlich für die energetische Nutzung heranzuziehen.

Während es bereits Ansätze zur Nutzung von Verkehrsflächen für Photovoltaik gibt, ist das Potenzial zur Produktion von Biomasse, etwa mittels Kultivierung von Mikroalgen, noch nicht einmal ansatzweise systematisch untersucht. Diese Nutzungsform hätte den Vorteil, dass die Algen nicht nur energetisch, sondern auch stofflich (als Ausgangsmaterial für Bioraffinieren oder zur Düngerproduktion) verwendbar wären, eine kaskadische Nutzung wäre möglich.

Da dieser Ansatz so neu ist, war es ein Hauptziel, anhand von Daten zur Flächennutzung, von Wetterdaten sowie von bekannten Eigenschaften der Mikroalgen das Potenzial für diese Art der Biomasseproduktion und der Energiegewinnung abzuschätzen. Ein weiteres Ziel war es, eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten der Umsetzung sowie über die jeweils spezifischen Herausforderungen (z.B. mechanische Stabilität, optische Eigenschaften, Sicherheitsaspekte) zu erhalten.

Für die Analysen kamen Literaturrecherchen, eigene Berechnungen sowie Simulationen mit eigens dafür erstellten Computermodellen zum Einsatz. Aus den Ergebnissen der Berechnungen und Simulationen wurde abgeleitet, welche Ansätze tatsächlich umsetzbar erscheinen, welche technischen Voraussetzungen dafür notwendig sind und welche ökonomischen Rahmenbedingungen eine wirtschaftlich sinnvolle Umsetzung erfordert.

1.2 Stand der Technik

Viele erneuerbare Energieformen sehen sich mit der Flächenproblematik konfrontiert. Während Windenergie und Wasserkraft geographische Sammlungseffekte nutzen können, ist das für Solarenergie und energetische Biomassenutzung nicht der Fall. Ein höherer Energieertrag als jener aus dem Produkt von genutzter Fläche mal effektiver Solarkonstante ist weder für direkte Solarnutzung noch für Biomasseproduktion möglich. (Die tatsächliche Ausbeute ist aufgrund der teils schlechten Wirkungsgrade der Umwandlungsprozesse meist noch deutlich geringer.) Zugleich müssen Flächen für Nahrungs- und Futtermittelproduktion sowie andere Nutzungsarten zur Verfügung stehen, und noch vorhandene Ökosystem sollen nach Möglichkeit nicht beeinträchtigt werden. Daher ist möglichst optimale Nutzung vorhandenen Flächen erforderlich, insbesondere zusätzliche Nutzung von ohnehin schon „ökologisch verlorenen“ Flächen.

Die meisten Parkplätze und Straßen werden, genau betrachtet, einen erheblichen Teil der Zeit nicht direkt genutzt. Die Zeit, in der sich über einem definierten Flächenstück Straße tatsächlich ein Auto befindet ist oft kurz verglichen mit der übrigen Zeit, insbesondere im ländlichen Raum. Auch in der Peripherie von Städten gibt es beachtliche Straßen- und Parkplatzflächen, die nur einen Bruchteil der gesamten Zeit tatsächlich als solche genutzt werden, z.B. Großparkplätze von Kino- oder Einkaufszentren.

Ein amerikanisches Vorreiter-Projekt, das sich mit der Nutzbarmachung von Verkehrsflächen für Energiegewinnung mit Hilfe von Photovoltaik (PV) beschäftigt, ist *Solar Roadways* (SolarRoad 2016). Dabei wird eine Verschmelzung des Straßennetzes mit dem Elektrizitätsnetz angestrebt. Diese „intelligenten“ Straßen sollen außer mit PV-Modulen zur Energiegewinnung noch mit diversen anderen Erweiterungen ausgestattet werden, u.a. mit LEDs für die Anzeige aktueller Verkehrswarnungen und Heizdrähten zur Verhinderung von Glatteisbildung.

Auch in Europa wurde dieser Ansatz inzwischen aufgegriffen: In den Niederlanden wurde ein 70 Meter langer Solar-Radweg installiert, der innerhalb des ersten Betriebsjahres 9.800 kWh elektrische Energie erzeugte (Radweg 2015). Nach Schätzungen von ExpertInnen könnten rund ein Fünftel der 140.000 Kilometer niederländischer Radwege zur Erzeugung von Solarstrom genutzt werden, was hochgerechnet einer Produktion von fast 4 TWh pro Jahr entspricht.

Frankreich betrachtet „Plus-Energie-Straßen“ als ein wesentliches Element eines umweltfreundlicheren und nachhaltigeren Verkehrssektors und hat einen ambitionierten Plan vorgelegt, nach dem innerhalb von fünf Jahren 1000 km Solarstraßen entstehen sollen (FrzBot 2015). Auch für Straßen mit integrierter Wärmerückgewinnung sind im Rahmen des nationalen Aktionsplans Demonstrationsprojekte geplant.

Während die direkte solare Nutzung von Verkehrsflächen also bereits ein intensiv beforschtes Thema ist, wurden alternative Nutzungsvarianten bislang kaum diskutiert. So kann es etwa sinnvoll sein, statt auf direkte Stromerzeugung auf Biomasseproduktion zu setzen. Das ist insbesondere deshalb sinnvoll, weil Biomasse neben der energetischen Nutzung auch attraktiv für stoffliche bzw. kaskadische Verwertung (etwa in Bioraffinerien oder für die Produktion von Dünger) ist und das voraussichtlich in Zukunft in noch größerem Ausmaß sein wird (Cordell 2009).

Zudem kann Biomasse gut (und weitgehend verlustfrei) gelagert werden und stellt damit eine attraktive Möglichkeit der Energiespeicherung dar, während die Möglichkeiten zur direkten Speicherung elektrischer Energie trotz intensiver Forschung und Entwicklung nach wie vor nicht zufriedenstellend sind. (Elektrochemische Speicher sind nach wie vor sehr teuer; die Potenziale bestehender Pumpspeicherkraftwerken sind schon weitgehend ausgeschöpft und Neubauten momentan nicht wirtschaftlich darstellbar. Am intensivsten werden momentan indirekte Speicher-Methoden wie Power2Gas und Power2Heat verfolgt, die aber erhebliche Umwandlungsverluste aufweisen bzw. im aktuell gängigsten Ansatz der elektrischen Direktheizungen nur mit schlechten Leistungsziffern arbeiten.)

Eine sehr effiziente Methode zur Produktion von Biomasse ist die Kultivierung von Mikroalgen. Diese kann bei ausreichendem Platzangebot in großem Maßstab in offenen Becken (*open-pond-Systemen*) erfolgen, was eine sehr kostengünstige Variante darstellt.

Ist der zur Verfügung stehende Raum hingegen sehr begrenzt, was im urbanen Kontext nahezu immer der Fall ist, bieten sich für die effiziente Kultivierung von Mikroalgen insbesondere Photobioreaktoren an. Diese sind transparente Behälter, die meist flächig oder röhrenartig ausgeführt werden und in denen Algen in wässriger Suspension kultiviert werden.

Die Algenkulturen bestehen aus einer oder mehreren Spezies, die für die Produktion des jeweils gewünschten Produkts optimiert werden. Wasser, benötigte Nährstoffe und Kohlendioxid werden in kontrollierter Weise zugeführt, während Sauerstoff aus der Lösung entfernt werden muss. Sonneneinstrahlung belichtet die Algenkultur entweder direkt durch transparente Wände oder wird fokussiert durch im Reaktor angebrachte Lichtleiter in das Medium gebracht. Künstliche Belichtung von Algen ist möglich, erweist sich aber üblicherweise als sehr kostenintensiv.

Neben den gerade genannten physikalisch-chemischen Voraussetzungen für erfolgreiche Mikroalgenzucht müssen zusätzlich mikrobiologische Aspekte berücksichtigt werden, insbesondere die Vermeidung von Kontaminationen, Biofilmen und Räubern.

Zur Kultivierung von Mikroalgen im städtischen Umfeld und insbesondere in der dicht verbauten Innenstadt wurde das Konzept der *Vertical Farm* bereits intensiv untersucht (Schipfer 2012). Auch die Nutzung von Gebäudefassaden wird prinzipiell angedacht.

1.3 Verwendete Methoden

Während die photovoltaische Nutzung von Verkehrsflächen und die Nutzung von vertikalen Flächen zur Produktion von Biomasse bereits intensiv untersucht werden, haben *Horizontal Farms* bislang wesentlich weniger Aufmerksamkeit erhalten. Diese würden sich aber für die zusätzliche Nutzbarmachung von Verkehrsflächen zur Produktion von Biomasse anbieten.

Um diesen Zugang genauer zu untersuchen, wurden Forschungsarbeiten in mehreren klar definierten Bereichen (entsprechend den „technischen“ Arbeitspaketen 2 bis 5 des Forschungsprojekts) durchgeführt, in denen unterschiedliche Methoden zum Einsatz kamen:

- **Potenzialabschätzung:** Literaturrecherche, Nutzung von Geoinformations-Datenbanken und anderen geographischen Informationsquellen
- **Technische Lösungen:** Skizzen, technische Zeichnungen, technische Berechnungen, Betrachtung diverser relevanter physikalischer und biochemischer Effekte
- **Simulations-Untersuchungen:** Erstellung eines bilanzbasierten Computermodells (implementiert in MATLAB) und Vergleich verschiedener technischer Ansätze hinsichtlich Anforderungen und Ertrag
- **Technoökonomische Analyse:** Investitionsrechnung, Sensitivitätsanalyse, Entwicklung von zusätzlichen Konzepten für wirtschaftliche Darstellbarkeit

Das entsprechende methodische Vorgehen wird in den folgenden Abschnitten detailliert dargestellt, wobei im Sinne einer geschlossenen Darstellung auch z.T. bereits Ergebnisse diskutiert werden.

1.3.1 Potenzialabschätzung: Ansatz und Alternativen

1.3.1.1 Definition von Verkehrsflächen

In diesem Projekt wurden vor allem Parkplätze untersucht. Das liegt daran, dass einerseits Parkplätze im Vergleich zu Straßen kompakter angelegt sind und daher für das Vorhaben besser geeignet erscheinen und andererseits die mechanische Belastung insbesondere auf PKW-Parkplätzen geringer ist als auf Straßen, auf denen oft auch LKWs mit erheblichen Geschwindigkeiten unterwegs sind. (Die mechanische Belastung der Oberfläche steigt gemäß grob mit der vierten Potenz der Achslast (Zeit 2011, Straube 2007), weshalb LKWs eine viel stärkere Beanspruchung der Oberfläche bewirken.)

Der Begriff der Verkehrsfläche kann nicht nur auf Straßen und Parkplätze begrenzt, sondern durchaus noch etwas weiter gefasst werden. Insbesondere Fußgängerzonen sind ebenfalls horizontale Verkehrsflächen, die für Mikroalgenkultivierung genutzt werden können. Selbst Fußböden im Inneren von Einkaufszentren kämen in Frage. Derartige Flächen weisen gegenüber Straßen und Parkplätzen sogar einige Vorteile auf:

- Typischerweise geringere mechanische Belastung (Druckbelastung, Zerkratzen durch Rollsplit-Steinchen in Reifen im Winter) und entsprechend geringere Anforderung an die mechanischen Eigenschaften des Deckenbelags,
- Im Normalfall langsamere Verschmutzung sowie zusätzlich standardmäßig regelmäßige Reinigung der Flächen,
- Temperierung der Innenräume und damit keine Probleme, die durch Überhitzung oder Unterkühlung der Algensuspension sonst auftreten können,
- Meist automatische Beschattung bei zu großer Helligkeit (Abhilfe gegen Photoinhibition),
- Künstliche Beleuchtung, die – insbesondere bei Verwendung von Lichtquellen mit passender spektraler Zusammensetzung („Tageslichtlampen“) die Länge der produktiven Phasen verlängern kann.

1.3.1.2 Erhebung der Daten

i. Bestandsflächen

Als Grundlage zur Datenerhebung diente die CSV-Datei – Regionalinformation ab 31.12.2012 vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. Der Stichtag für die Aktualisierung der verwendeten Daten ist der 31.12.2015 (Regional 2015). Die Auflösung dieser Daten geht bis auf Gemeindeebene, was für die Auswertung der jeweiligen Parkflächen von hoher Bedeutung ist. Die Aufteilung der Flächen ist in Tabelle 1 (detaillierte Übersicht nach Bundesländern) und in Abbildung 1 (grobe Übersicht) dargestellt.

Stadt der Zukunft

Tabelle 1: Flächeninanspruchnahmen in Österreich 2015

Bundesland	Gesamte					
	Gesamtfläche [m ²]	Verkehrsfläche ¹ [m ²]	Straßenverkehrsanlage [m ²]	Verkehrsrandfläche [m ²]	Parkplätze [m ²]	Schienenverkehrsanlagen [m ²]
Burgenland	3.965.198.899	153.599.484	123.148.251	26.536.764	972.945	2.941.524
Salzburg	7.154.565.505	105.005.506	88.987.293	5.184.216	1.912.316	8.921.681
Steiermark	16.398.974.647	358.295.088	299.739.501	36.878.193	4.660.390	17.017.004
Tirol	12.648.774.285	142.395.208	116.541.737	10.611.539	5.492.270	9.749.662
Vorarlberg	2.601.658.749	49.626.000	40.684.087	4.124.194	2.858.051	1.959.668
Wien	414.724.449	60.867.668	45.085.550	6.086.431	4.053.048	5.642.639
Niederösterreich	19.179.436.765	630.172.232	520.443.783	69.243.729	7.148.279	33.336.441
Oberösterreich	11.982.594.049	357.399.166	306.540.333	27.152.885	5.908.861	17.797.087
Kärnten	9.536.536.389	202.497.800	161.199.952	29.239.655	2.708.107	9.350.086
Österreich	83.882.463.737	2.059.858.152	1.702.370.487	215.057.606	35.714.267	106.715.792

In Österreich steht für Landwirtschaft, Siedlung und Verkehr eine Fläche von 31 265 km² zur Verfügung, was als Dauersiedlungsraum (kurz DSR) bezeichnet wird (Regional 2015). Diese Fläche entspricht einem Anteil von 37% der Gesamtfläche Österreich. Damit macht die gesamte Verkehrsfläche einen Anteil von 7% von DSR aus.

Die Parkplatzflächen in Österreich entsprechen mit einer Größe von 35,714 km² einem Anteil von 2% der gesamten Verkehrsflächen.

¹ Die gesamte Verkehrsfläche setzt sich zusammen aus: Straßenverkehrsanlagen, Verkehrsrandfläche, Parkplätze und Schienenverkehrsanlagen

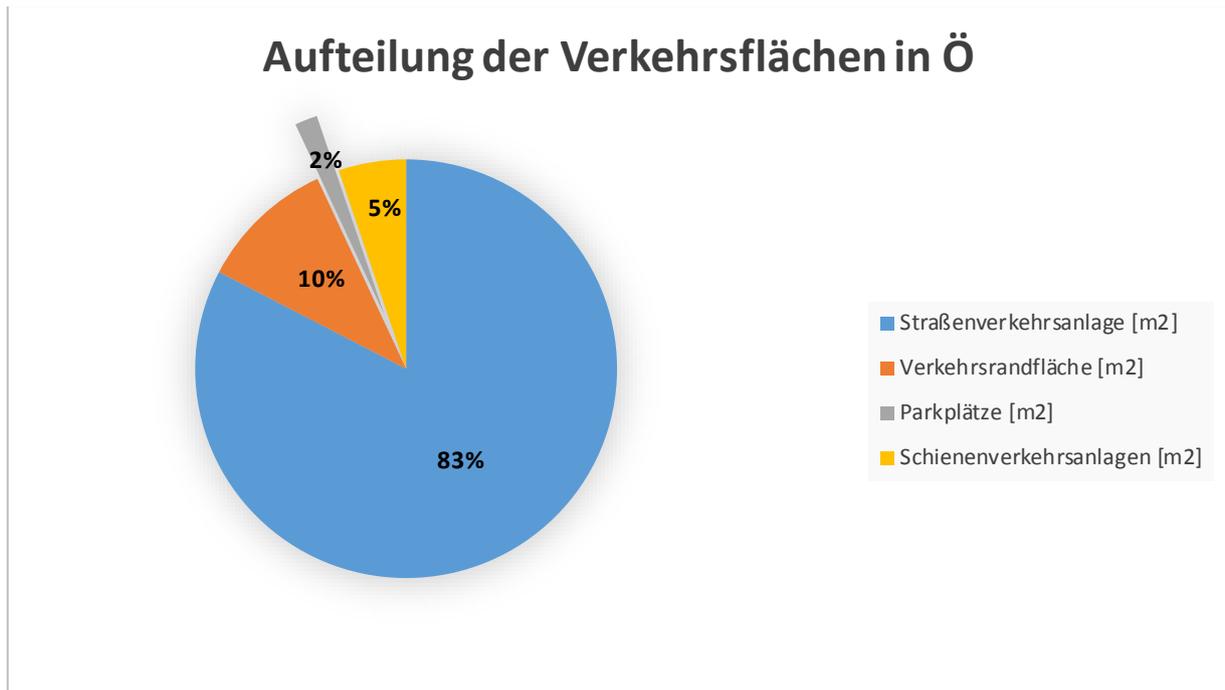


Abbildung 1: Aufteilung der Verkehrsflächen

Bei diesen Parkflächen handelt es sich allerdings um die Summe aller Parkflächen im jeweiligen Bundesland. Um die Flächen zur Kultivierung von Mikroalgen nutzen zu können, werden zusammenhängende und örtlich begrenzte Flächen benötigt, was eine detailliertere Betrachtung dieser Parkflächen notwendig macht.

In den Daten des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen sind Informationen über die Anzahl der Parkflächen enthalten. Durch Filterung der Regionen, in denen die Anzahl der Parkplätze gleich eins ist, kann auf die durchschnittliche Größe der Einzelflächen rückgeschlossen werden.

Betrachtet man nur diese Einzelflächen, so ergibt sich ein Mittelwert von 1 724 m². 75% der Flächen sind größer als 427 m², 50% größer als 847 m² und 25% sind größer als 1 698 m².

Bei dieser Betrachtung der Flächen, werden nur bereits asphaltierte Flächen berücksichtigt. Das ergibt zwar ein theoretisches Potential, es ist allerdings fraglich, ob diese Flächen nachträglich für den Einbau von Photobioreaktoren zur Verfügung stehen. Realistisch erscheint das i.A. nur im Zuge einer Sanierung.

ii. Neubauf Flächen

Ein zweiter Ansatz ist es, die neuverbauten Flächen zur Potentialabschätzung heranzuziehen. Im Durchschnitt (berechnet aus der Drei-Jahres-Periode 2013 bis 2015) werden in Österreich täglich 16,1 ha an Fläche verbaut. Diese teilt sich auf in 9,1 ha für Betriebs- Erholungs- und Anbaufläche und 7 ha/Tag Bau- und Verkehrsfläche (Umweltbundesamt 2016).

Die Bau- und Verkehrsfläche beträgt in Österreich im Jahr 2015 bereits 5 171 km². Davon entfallen 2 060 km² auf die Verkehrsflächen, was einem Anteil von 39,8% entspricht. Dies lässt einen Schluss auf die durchschnittliche Verbauung durch Verkehrsfläche zu. Die Verbauung entspricht demnach einer Fläche von 27 886 m²/Tag. Berücksichtigt man, dass der Anteil von Parkplätzen an der Verkehrsfläche 2% beträgt, ergibt das einen täglichen Zuwachs von Parkflächen von 558 m²/Tag. Das entspricht einer Fläche von 203 570 m²/Jahr.

iii. Innenliegende Verkehrsflächen

Innenliegende Verkehrsflächen systematisch zu quantifizieren ist nicht einfach. Interessant sind vor allem größere Flächen, wie sie in Einkaufszentren und Kinozentren vorzufinden sind. Als Richtwert wird davon ausgegangen, dass ca. 10% der Gesamtfläche auf allgemeine Verkehrsflächen entfällt. Eine qualitative Übersicht und Bewertung der Verkehrsflächen wird in Tabelle 2 gegeben.

Biomassepotential

Die Angaben für die Effizienz der Umwandlung von Sonnenenergie in Biomasse liegt je nach Quelle zwischen 4,59% (Zhu 2008) und 10,3% (Weyer 2010). Dabei ist berücksichtigt, dass sich nur ein gewisses Spektrum der Sonnenstrahlung zur Photosynthese eignet. Des Weiteren müssen Verluste wie Reflexions- und Wärmeverluste, Verluste bei der Kohlenhydratsynthese, Respirations- und Stoffwechselverluste berücksichtigt werden. Geht man von einem Energiegehalt der Mikroalgen von 21,4 MJ/kg (Chisti 2007) bezogen auf Trockenmasse aus, so lässt sich mit den Daten über die Sonneneinstrahlung in Österreich unter Berücksichtigung der Umwandlungseffizienz das Biomassepotential quantifizieren.

CO₂-Reduktion

Die Trockenmasse Mikroalgen besteht zu ungefähr 50% aus Kohlenstoff. Dieser Kohlenstoff wird üblicherweise aus dem CO₂ in der Umwelt bezogen, wobei, wie sich aus den Molekülmassen der häufigsten Isotope C¹² und O¹⁶ leicht abschätzen lässt, $\frac{12}{12+2 \cdot 16} \approx 27,27\%$ der Masse von CO₂ auf den enthaltenen Kohlenstoff entfallen. Durch die Produktion von 100 t Algenbiomasse werden daher rd. 183 t CO₂ aus der Umwelt gebunden, vgl. (Chisti 2007).

Tabelle 2: Qualität von österreichischen Verkehrsflächen

Kategorie	Art der Fläche	Besonderheiten	
IF	Innenflächen für Fußgänger	geringe mechanische Belastung, regelmäßig Reinigung, ggf. künstliche Beleuchtung, üblicherweise Temperaturregulierung	
FZ	Fußgängerzonen im Freien	geringe mechanische Belastung	
GP	Großparkplätze	günstig für von allen Elementen gemeinsam genutzte Infrastruktur	Für reine PKW-Parkplätze nur mittlere mechanische Belastung
KP	Kleinparkplätze		
SU	Straßenflächen im urbanen Bereich		
SR	Restliche Straßenfläche	Schwierig in urbane Stoffkreisläufe zu integrieren, i.A. hohe mechanische Belastung (schnell fahrende LKWs)	



Wesentlich für das wirtschaftliche Potenzial ist das Produkt, das mit Hilfe der Algen erzeugt werden soll. Von der Nutzungsart und der geforderten Qualität des Produkts ist z.B. abhängig, welche Temperaturschwankungen noch akzeptabel sind, ob Abwasser für die Düngung verwendet werden darf und ob die Algen vor den Abgasen aus Verbrennungsmotoren geschützt werden müssen.

Bei Nutzung von Abwasser und Abgas können unter den aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen keine Produkte für die Nahrungsmittel- oder Futtermittelindustrie erzeugt werden. Auch für Kosmetika würde die Akzeptanz der Bevölkerung fehlen.

Technologievergleich

Der im Projektantrag angedachte Vergleich von Mikroalgenkultivierung mit Nutzung der gleichen Flächen durch Photovoltaik (PV) ist schwierig durchführbar, da die Produkte (Algen-Biomasse vs. elektrische Energie) so deutlich unterschiedlich sind. Für eine rein energetische unmittelbare Nutzung ist PV dank des deutlich besseren Gesamtwirkungsgrades klar im Vorteil, während die Produktion spezieller Wertstoffe mit Mikroalgen sehr einfach erfolgen kann (während PV allenfalls die Energie für die notwendigen chemisch-verfahrenstechnischen Prozesse liefern würde). Selbst der noch am ehesten mögliche Vergleich, die Erzeugung von Methan auf beiden Wegen, hätte wenig Aussagekraft. Daher wird in den entsprechenden Analysen nur eine Mischform betrachtet, siehe Exkurs zum PV-System auf Seite 52.

1.3.2 Technische Lösungen

Bevor auf die einzelnen bekannten Technologien zur Kultivierung von Mikroalgen eingegangen wird, sollen die allgemeinen Anforderungen und Grundlagen erläutert werden. Diese, sowie die dabei auftretenden Herausforderungen werden in den folgenden Absätzen angegeben und diskutiert.

1.3.2.1 Grundlagen der Algenkultivierung

Für die Kultivierung von Algen gibt es unterschiedliche Systeme mit einzelnen Vor- und Nachteilen für bestimmte Anwendungsgebiete. Generell kann eine Kultivierungsanlage in folgende Komponenten unterteilt werden, die sich abhängig vom jeweiligen System in ihren Eigenschaften bzw. Anforderungen etwas unterscheiden können (siehe Abbildung 2).

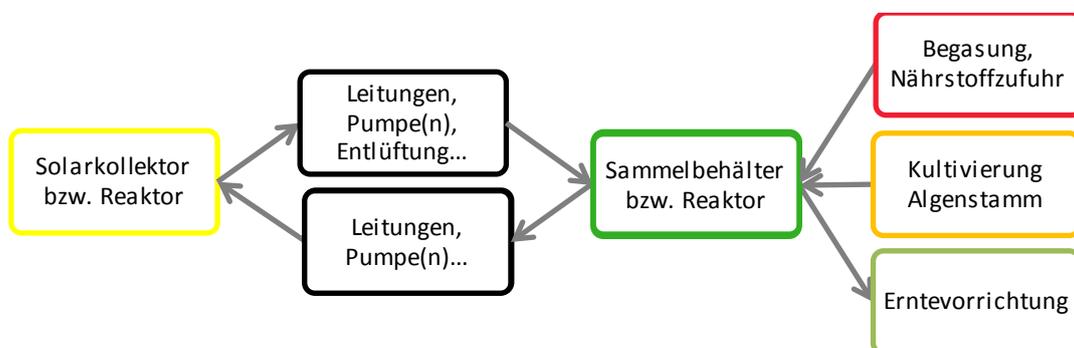


Abbildung 2: Komponenten einer Algenkultivierungsanlage

Als wichtigstes Unterscheidungskriterium gilt der Austausch mit der Umwelt. Bei sogenannten offenen Systemen ist die Algensuspension, also die Flüssigkeit in der die Algen wachsen, in direktem Austausch mit der Umwelt. Bei einem geschlossenen System kommt die Algensuspension nicht in direktem Kontakt zur Umwelt, da die Algen von dieser z.B. durch Glasflächen abgetrennt sind. Folglich können im zweiten Fall Verunreinigungen der Algensuspension einfacher kontrolliert werden bzw. das Wachstum von bestimmten Spezies geregelt werden. In Bezug auf das Zucht- bzw. Ernteverfahren wird zwischen Batchverfahren und kontinuierlichen Verfahren unterschieden, welche einander in Tabelle 3 gegenübergestellt sind.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Ernteverfahren

	Batchverfahren	Kontinuierliches Verfahren
Ernte	gesamten Algen werden auf einmal geerntet und anschließend eine neue Kultur inokuliert	z.B. tageweise ein Teil geerntet und volumenmäßig selbe Menge an neuem Inokulat eingefügt
Erntezeitpunkt	nach ca. 2 Wochen, Zeitpunkt abhängig von der Wachstumskurve festlegbar	kontinuierlich (z.B. täglich); Wachstumszustand der Algen nicht definierbar (Mischung?!)
Reinigungsmöglichkeit	nach der Ernte kann gesamte Anlage gereinigt werden	teilweise Reinigung durch Absperrern gewisser Segmente
Vorteil	immer neue Algenkultur nach Ernte (Kontaminationsgefahr geringer)	kontinuierlicher Algenertrag
Nachteil	diskontinuierlicher Algenertrag (Ausnahme: Bei Modulaufbau kann modulweise Ernte erfolgen)	Höhere Kontaminationsgefahr, Wartung schwieriger, Instandhaltungszeiten nicht klar definiert

Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile. Insbesondere aufgrund der einfacheren Wartungs- und Reinigungsmöglichkeiten und der geringeren Gefahr von Langzeit-Kontamination durch Fremdorganismen wurde im Konsortium das Batchverfahren für die Green-P-Anwendungen als aussichtsreicher eingestuft und im Rahmen dieses Projektes wurde nur noch dieses weiterverfolgt. Die Analysen und das entwickelte Simulationsmodell lassen sich aber auch leicht für ein kontinuierliches Verfahren adaptieren.

Für das optimale Wachstum der Algenkultur können folgende Anforderungen zusammengefasst werden:

- ausreichende Begasung (CO₂(Tag), Luft (Nacht))
- Temperaturkonstanz (für viele Spezies ca. 20°C)
- ausreichend Sonnenlicht (direkt und indirekt)
- ausreichend Nährstoffe, Frischwasser

Während des Algenwachstums können einige Herausforderungen und Probleme, abhängig vom System auftreten. Tabelle 4 gibt eine Auflistung dieser mit möglichen Lösungsvorschlägen:

Tabelle 4: Herausforderungen in der Algenkultivierung allgemein

Herausforderung	Beschreibung	Lösungsvorschläge
Bildung von Biofilmen	bei geschlossenen Systemen kann Lichteinfall sinken aufgrund sich bildendem Biofilm an den Innenoberflächen der Gefäße/Rohre	<ul style="list-style-type: none"> • Schaumgummiball wird nach Ernte (Batchverfahren) durch das Rohr geleitet (Bsp. BE2020) • kleine Kügelchen in der Algensuspension (Bsp. Anlage in Almeria)
Kontamination der Suspension	sowohl Kontamination durch andere (Algen)Spezies, als auch mit Fressfeinden (z.B.: Pantoffeltierchen) oder Viren/Pilzen können Ernteertrag vermindern	<ul style="list-style-type: none"> • chemische Additive, Wasseraufbereitung • gezieltes Aussetzen von best. Fressfeinden (z.B. Amöben, Nasentierchen) • „stufenweise Sterilisation“ (Aufheizen auf 70°C) • neuer Algenstamm/Reinigung (Batchverfahren) • Sterilisation der gesamten Anlage (100°C) • UV-Bestrahlung
Wärmehaushalt	Algenwachstum ist sehr stark an Betriebstemperatur gekoppelt ⇒ sowohl zu hohe als auch zu geringe Temperaturen sind zu vermeiden (abh. von Algenspezies leichte Unterschiede; guter Zielwert: 20°C) – Sinken der Produktivität, Produktqualität bis hin zum Algensterben besonders bei offenen Systemen relevant, um Stillstandzeiten zu minimieren	<ul style="list-style-type: none"> • Hitzeschutz durch Verschattungselemente; für Anwendungsfall Wieselburg eher nicht relevant • Kälteschutz: <ul style="list-style-type: none"> ○ Beheizung (z.B.: Abwärme) ○ Wärmespeicher: Wasserbad/PCM-Materialien ○ ähnlich wie Tag/Nacht-Betrieb über Tank abfedern (Betriebszeiten)
Produktinhibierung	„Verunreinigung“ der Algensuspension mit eigens produziertem Sauerstoff aus der Photosynthese führt zu CO ₂ -Mangel und verringertem Wachstum	<ul style="list-style-type: none"> • Einbau von „Degasern“ • Länge von PBR anpassen • keine Gefahr bei offenen Systemen
Photoinhibition	Hemmung der Photosynthese durch zu hohe Belichtungsstärken (Sonneneinstrahlung); eher bei dünnen Suspensionen problematisch, da bei bereits größerer Algenkonzentration die Herausforderung meist im Gegenteil, genug Licht einzubringen	<ul style="list-style-type: none"> • Abschattungsvorrichtung • bei offenen Systemen durch Verdunstungskühlung geringeres Problem • für Anwendungsfall in Wieselburg (dessen Beschreibung in Abschnitt 1.3.2.3 folgt) wahrscheinlich zu vernachlässigen

Aus den diskutierten Anforderungen an das Kultivierungssystem, sowie der bekannten Herausforderungen bzw. Nebenerscheinungen des Algenwachstums können folgende Arbeiten für die Wartung bzw. Instandhaltung einer Anlage festgehalten werden. Abhängig von den einzelnen Technologien kann sich der Aufwand für die einzelnen Punkte unterscheiden:

- Aufbereitung des Algeninokulats (Algen“stammzellen“)
- Algeninokulation (Beeimpfung der Suspension)
- Überwachung des Wachstums: Kontrolle/Sicherstellung der Anforderungen für optimales Wachstum
- bei Bedarf Reinigung bzw. Sterilisation der Komponenten

1.3.2.2 Technologien zur Kultivierung von Algen

Folgende Ansätze zur Mikroalgenkultivierung werden im Projekt näher untersucht:

1. In den Boden integrierte Photobioreaktoren (dezentrales geschlossenes System, Abbildung 3a)
2. Parkplatzüberdachung über die Algensuspension geleitet wird (dezentrales offenes System, Abbildung 3b)
3. Lichternte und Lichtleitung zu speziellen Tanks, in denen die Mikroalgenzucht erfolgt (zentrales geschlossenes System, Abbildung 3c)

Die Vor- und Nachteile dieser Ansätze sind in Tabelle 5 dargestellt. Weitere naheliegende Ansätze, die im Projekt nicht näher untersucht wurden, aber der Vollständigkeit halber angeführt werden sollen, sind:

- Photobioreaktoren in Parkplatzüberdachung (geschlossenes System)
- Photobioreaktoren in Parkplatztrenn- bzw. Lärmschutzwänden (geschlossenes System)
- *Algae turf scrubber*, vgl. (Sonnleitner 2014), als Parkplatzüberdachung (offenes System): Algen wachsen auf der Oberfläche und Wasser mit Nährstoffen wird über diese gepumpt. Der Algenfilm muss im Zuge der Ernte abgeschabt werden.
- Kombination Photovoltaik (PV) mit Mikroalgenkultivierung. Die mittels PV gewonnene elektrische Energie wird benutzt, um in zentralen Tanks, in denen die Bedingungen einfach kontrolliert werden können, Licht von genau der passenden spektralen Zusammensetzung zu erzeugen. Der PV-Wirkungsgrad liegt im Bestfall (monokristalline Solarzellen unter Laborbedingungen) bei ca. 25% (während im Praxiseinsatz eher ca. 20% realistisch erscheinen). Die Photosynthese kann etwa 50% des Sonnenlichts nutzen, d.h. es steht den Algen auch bei Erzeugung von Licht der genau passenden spektralen Zusammensetzung verglichen mit der direkten Bestrahlung höchstens die Hälfte der Energie zur Verfügung, realistischerweise eher ca. 40%. Dafür hat diese Variante den Vorteil, dass der Strom auch aus anderen Quellen stammen kann (z.B. Überschuss-Windstrom).

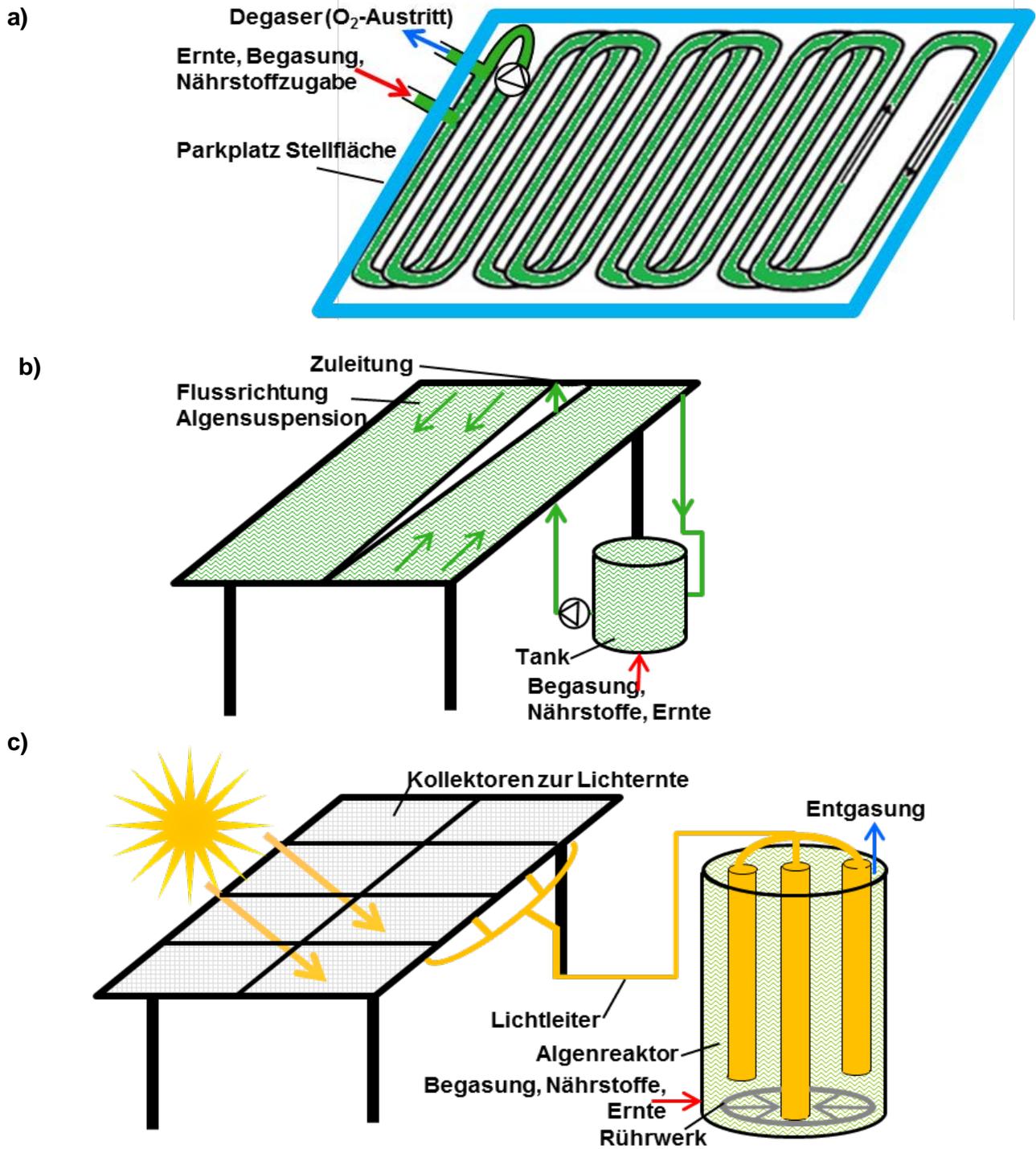


Abbildung 3: Prinzipskizzen der drei näher untersuchten Varianten

Tabelle 5: Vor- und Nachteile der in Betracht gezogenen Lösungsvarianten

Technologie	Aufstellungsart	Vorteile	Nachteile
a) Photobio-reaktoren (geschlossenes, dezentrales System)	bodenintegriert	<ul style="list-style-type: none"> • Wärmehaushalt ev. einfacher zu bewerkstelligen • Mit Versickerungsmöglichkeit ausführbar (Fläche nicht länger versiegelt) • Schutz vor Vandalismus 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Anforderungen an Werkstoffe (Druck- und Kratzfestigkeit) • Zugänglichkeit für Instandhaltungs- u. Wartungsarbeiten • Beschattung durch parkende Autos bzw. Verschmutzung ⇒ ev. kritischer Bereich, ab dem O₂ benötigt wird („Nachtmodus“)
b) Open Cascades (offenes System)	Überdachung	<ul style="list-style-type: none"> • gute Zugänglichkeit für Wartung, Reinigung, Instandhaltung • geringerer Wartungsaufwand • zusätzliche Kühlung im Sommer durch Verdunstung (keine Überhitzung) • Zusatznutzen Beschattung des Fahrzeuges; angepasste Neigung für bedarfsorientierte Beschattung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliche Geruchsbelästigung (normal Geruch nach Gras, wenn Bedingungen schlecht bzw. mit Abwässern gearbeitet wird Belästigung möglich) • Kontamination durch Autoabgase/Umwelteinflüsse • Kultivierung von speziellen Algenspezies kaum möglich durch direkten Kontakt zur Umwelt • im Sommer Verlust an verdunstetem Wasser auszugleichen
c) Lichternte (geschlossenes, zentrales System)	bodenintegriert	<ul style="list-style-type: none"> • Randbedingungen für Algenkultivierung können optimal eingestellt werden (vgl. Fermenterkultivierung) • hohe Algenkonzentrationen im Reaktor möglich (-> Ernte!) • Verzehnfachung des Reaktorvolumens pro benötigter Grundfläche gegenüber a) und b) 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexer Aufbau der Kollektoren • Komponentenverfügbarkeit • Hohe Anforderungen an Werkstoffe (Druck- und Kratzfestigkeit) • Befahrbare Abdeckung für Kollektoren → unterschiedliche Lichtbrechung • Beschattung/keine Lichternte durch parkende Autos bzw. Verschmutzung • Diffuse Strahlung bei Bewölkung kann nicht genutzt werden • Gefahr von Algenanhaftung an Lichtleitern im Reaktor
	Überdachung	<ul style="list-style-type: none"> • Randbedingungen für Algenkultivierung können optimal eingestellt werden (vgl. Fermenterkultivierung) • hohe Algenkonzentrationen im Reaktor möglich (-> Ernte!) • Verzehnfachung des Reaktorvolumens pro benötigter Grundfläche gegenüber a) und b) • optimale Ausrichtung der Kollektoren für Lichtsammlung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • komplexer Aufbau der Kollektoren • Komponentenverfügbarkeit • Gefahr von Algenanhaftung an Lichtleitern im Reaktor • Diffuse Strahlung bei Bewölkung kann nicht genutzt werden

Horizontale Photobioreaktoren (PBR)

Konzept: Algensuspension wird durch horizontale Glasröhren gepumpt, in denen durch Aufnahme des Sonnenlichts die Algen wachsen; modulare Bauweise, Beförderung der Suspension mit Pumpen, Begasung in Sammelbehälter, Entnahmestelle für Ernte u. Qualitätssicherung

Komponenten:

- PBR-Solarkollektoren (inkl. Röhren und Einhausung für Wärmehaushalt, Schutz vor mechanischer Belastung)
- Pumpen, Ventile
- Entlüftungs- und Begasungssystem
- Speichertank (Tag-/Nachtbetrieb)
- ev. PV-Modul mit Akkusystem für energieautarken Betrieb
- Wasseraufbereitung, -nachbereitung
- Evtl. Phasenübergangsmaterial (PCM) zur Temperaturstabilisierung

Anlagenbeispiele:

- Algae Parc (NL) (M. Barbosa, R. Wijffles)
- Anlage in Almería (E. Molina)

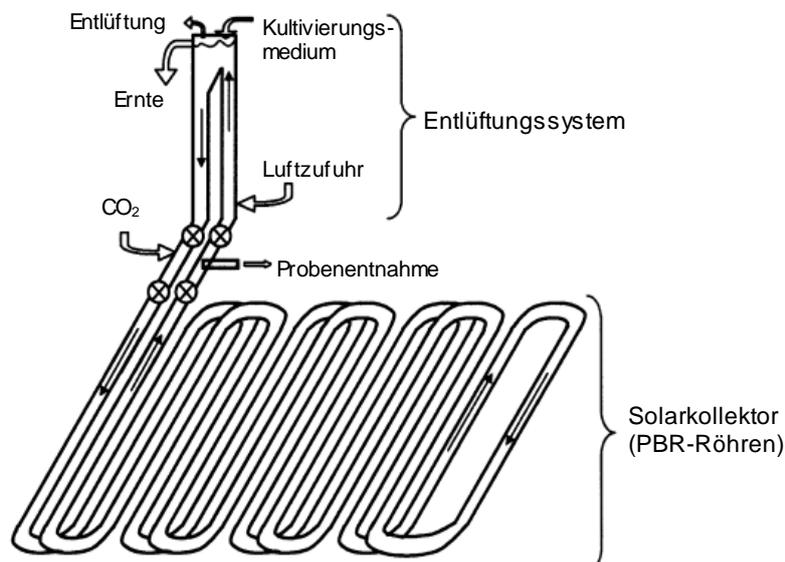


Abbildung 4: mögliches Schema horizontale Photobioreaktoren, übersetzt von (Molina 2001)

Anlagengröße: 1 Röhrenmodul = Größe von einem Stellplatz (min. 2,3 m x 5 m; behindertengerecht 3,5 m x 5 m); Röhre (d_{innen} = 6 cm) maximale Anlagengröße ist abhängig vom Druckabfall (Länge) und der möglichen Durchlaufzeit (Begasung bzw. Entlüftung)

Konzentration der Algensuspension: typischerweise 5-10 g/l

Das Schema ist in Abbildung 4 sowie spezifisch für Parkplätze in Abbildung 10 dargestellt.

Open Cascades

Konzept: schräge Dachkonstruktion über die die fließende Algensuspension geleitet wird, die meist aus unterschiedlichen Kaskaden besteht; im Anschluss wird Suspension wieder an Anfangspunkt raufgepumpt; Algensuspension ist im direkten Austausch mit der Umwelt (Aufnahme von Giftstoffen, CO₂, Abgabe von Luft...); Pumpe zur Beförderung der Algensuspension; Wassernachfüllung bzw. Wasseranschluss (Verdunstung); Wasseraufbereitung, Abwassernachbereitung

Zu beachten: In diesem Ansatz ist zu erwarten, dass eine Mischung von Algen und Bakterien kultiviert wird und dass auch bei den Algen unabhängig von den Inokulationskulturen bald lokale Spezies dominieren werden. Zudem ist mit einer Biofilmbildung zu rechnen.

Komponenten:

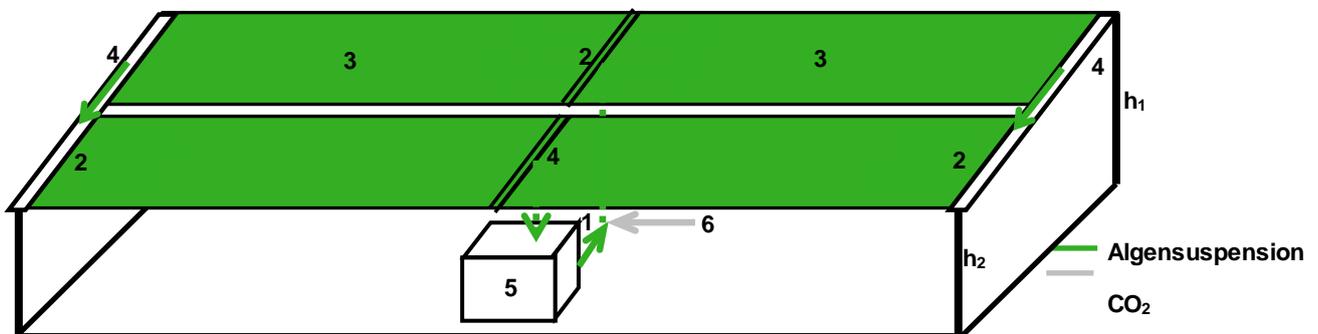
- Kaskade (Dachkonstruktion)
- Pumpen, Ventile
- Begasungssystem (nicht unbedingt nötig, steigert aber die Produktivität)
- Speichertank (Tag-/Nachtbetrieb)
- ev. PV-Modul mit Akkusystem für energieautarken Betrieb
- Wasseraufbereitung, -nachbereitung, Wassernachfüllung

Anlagenbeispiele: Institut Centre Algatech in Trebon (CZ)

Anlagen/Modulgröße: abh. von Statikberechnung – z.B. 6 Parkplätze – für minimale Anzahl an Stützen (verringert die Parkfläche) und Pumpleistung

Konzentration der Algensuspension: typischerweise 10 g/l, max. 30 g/l

Das Prinzipschema ist in Abbildung 5 sowie spezifisch für Parkplätze in Abbildung 12 dargestellt.



1...Zuleitung und Pumpe

4...Sammlung der Algensuspension

2...Verteilerrohr der Algensuspension

5...Sammelbehälter

Abbildung 5: Prinzip des "Thin-Layer" Systems in Anlehnung an die Anlage in Trebon – „Open Cascades“ (Academy of Sciences of Czech Republic) (Panuschka 2016, S. 15)

Lichternte

Konzept: Sonnenlicht wird von Kollektoren gesammelt und über Lichtleiter in einen Reaktor geleitet, wo die Algen kultiviert werden; Algenkultivierung in Art Fermenter, unabhängig von Umwelteinflüssen

Komponenten:

- Module/Kollektoren für Lichternte
- Lichtleiter
- Reaktor für Algenkultivierung inkl. Konditionierungsausrüstung (Lichtsäulen, Beheizung, Kühlung) und Begasungsvorrichtung
- ev. PV-Modul mit Akkusystem für energieautarken Betrieb
- Wasseraufbereitung, -nachbereitung

Anlagenbeispiel: Sun-Algae-Technology; für dieses System sind im Konsortium keine Messwerte verfügbar; es kann nur eine Abschätzung des Potentials auf Grund von physikalischen Gesetzmäßigkeiten gemacht werden

Aufbau/Komponenten: Module für Lichternte (z.B. zwei Parkplätze), Tank für Algenkultivierung (Lichtsäulen im Inneren, die von der Algensuspension umgeben sind), Raum für Tankaufstellung

Anlagengröße: Grundfläche abh. von Modulanzahl für Lichternte (zu recherchieren wieviel Licht/m² gesammelt werden kann); Tankgröße lt. Standardanwendung (1-2 m hoch) abh. von notwendigen Lichtsäulen, um geerntetes Licht einzubringen; pro Lichtsäule rundherum ca. 6 cm Algensuspension (Lichtreichweite)

Konzentration der Algensuspension: typischerweise bis zu 50 g/l, absolutes Maximum 100 g/l

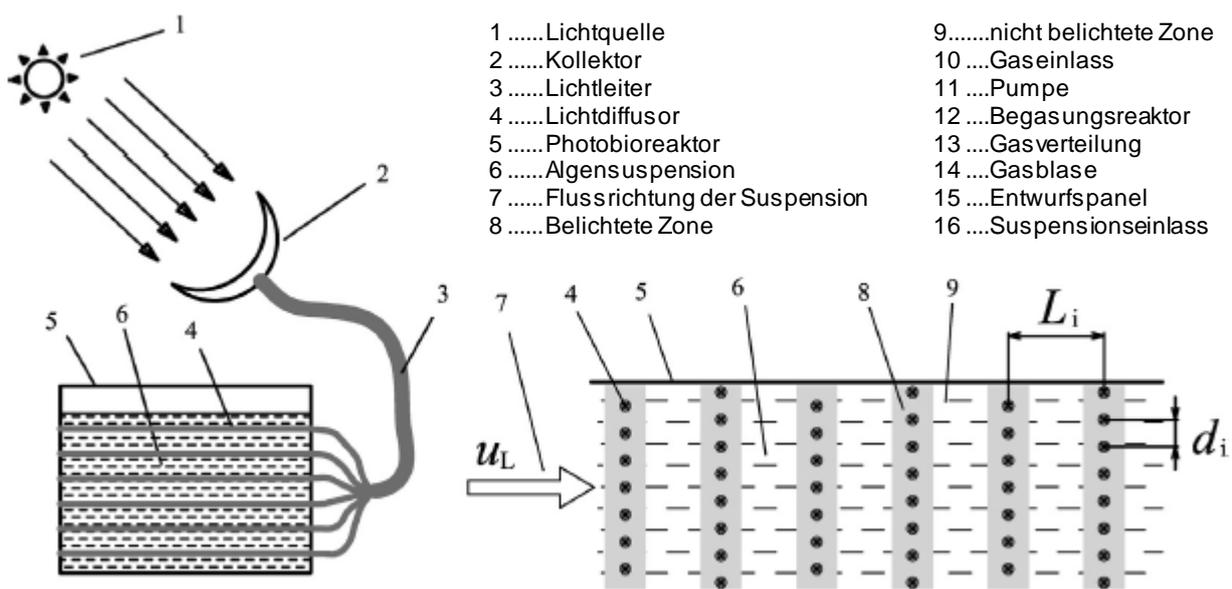


Abbildung 6: Photobioreaktor mit optischen Fasern: Entwurf Anlagenbau (links); Schema Photobioreaktor für Mikroalgen (rechts) (Xue 2013, Fig. 1), siehe auch Abbildung 7 für Elemente 10 bis 16.

Das Prinzipschema ist in Abbildung 6 bis Abbildung 9 sowie auf Parkplätze spezifiziert in Abbildung 11 dargestellt.

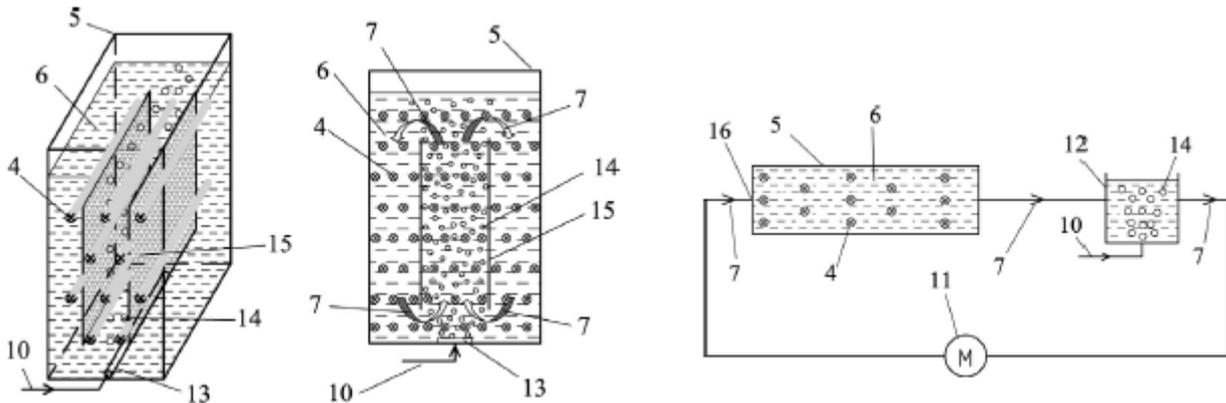


Abbildung 7: Schema eines luftbetriebenen PBR mit optischen Fasern 3D-Ansicht (links); Querschnitt (mittig); Konzept mit Pumpenbetrieb (rechts) (Xue 2013, Fig. 2 & 3); Beschriftung siehe Abbildung 6



Abbildung 8: Anlagenschema u. Kollektoren SAT GmbH (SAT 2017)

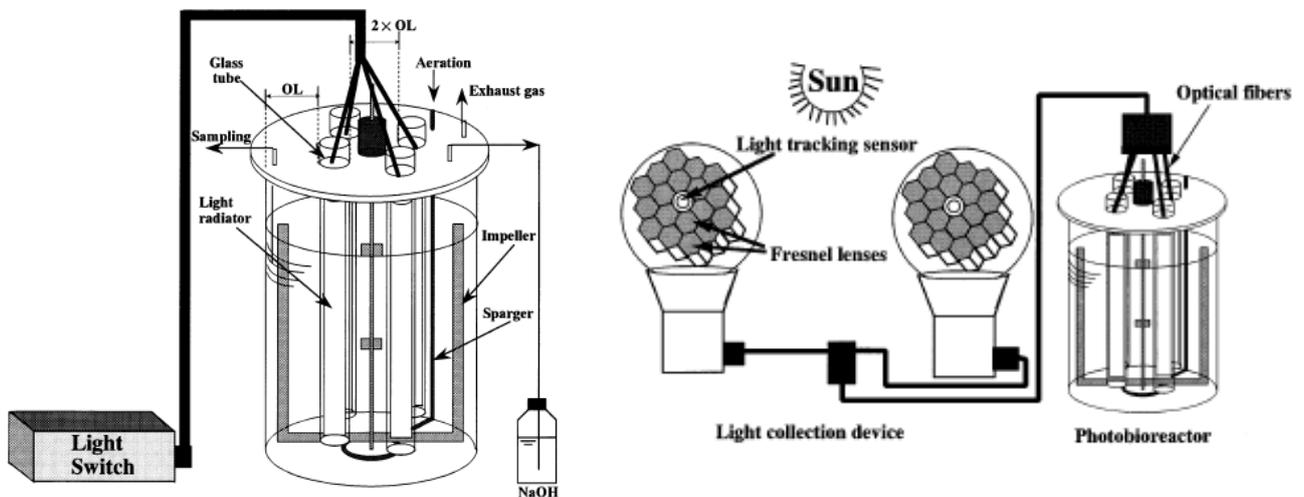
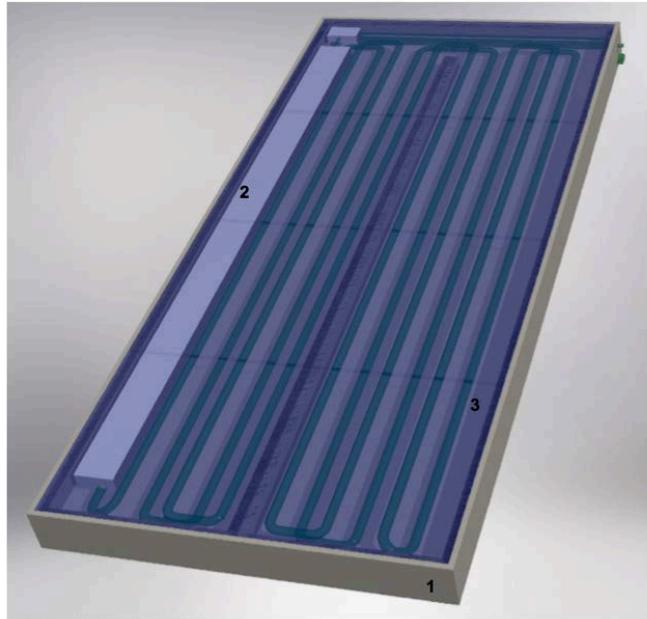
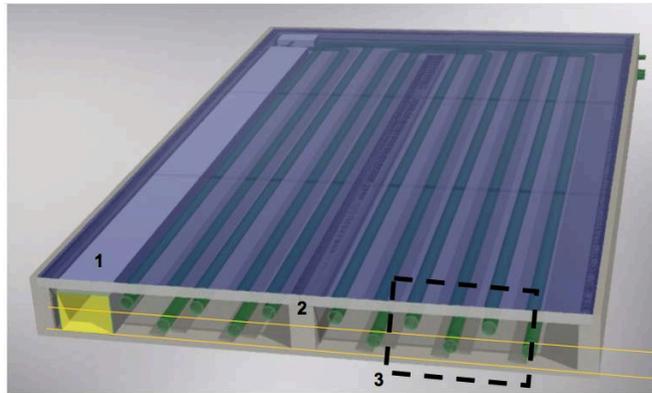


Abbildung 9: Schema Photobioreaktor mit optischen Fasern: Reaktor (links); Kollektor (rechts) (Ogbonna 1999, Fig. 1 & 2)

Stadt der Zukunft

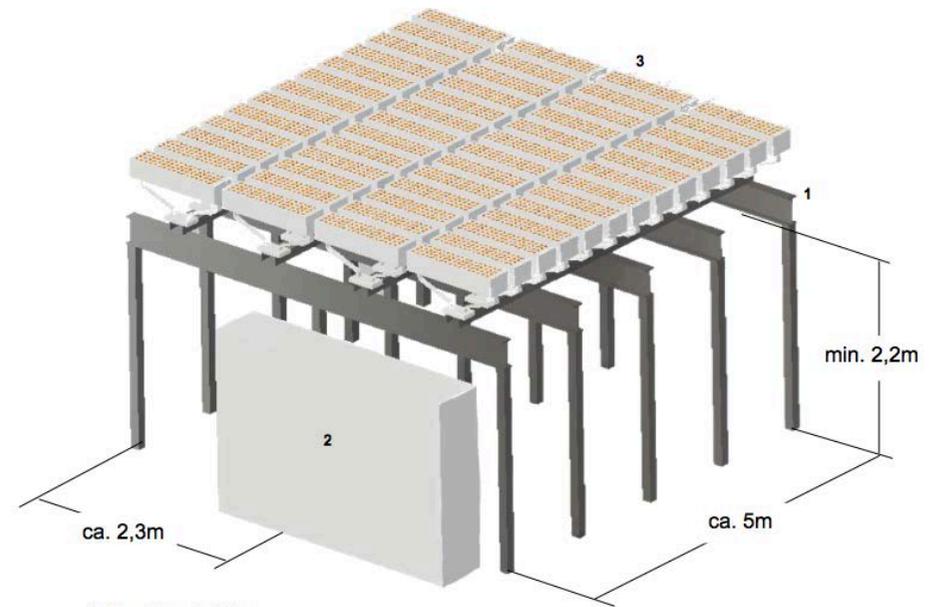


- 1..Oben offene Rahmenkonstruktion
- 2..Degaser (V=92l) + Pumpe
- 3..Glasabdeckung ca. 45mm Dick mit rutschfester Deckschicht



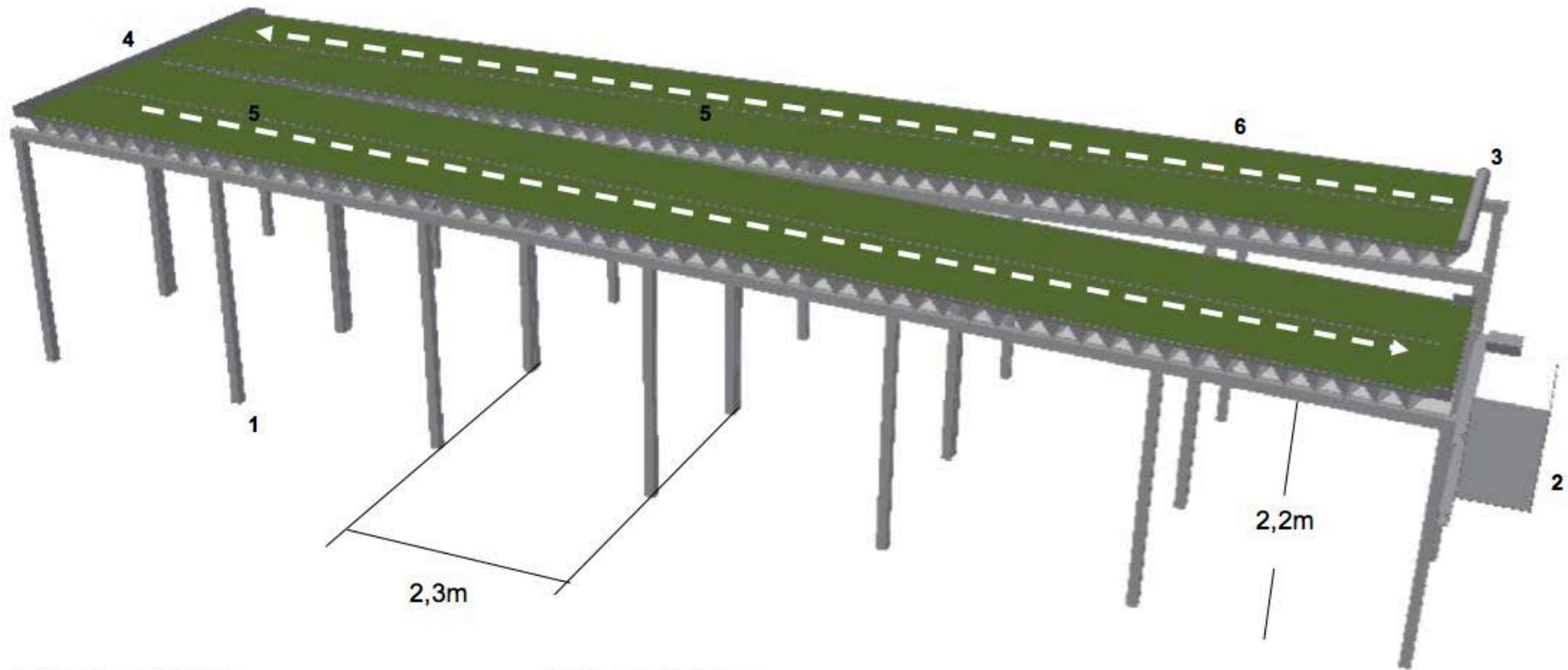
- 1..Degaser inkl. Pumpe
- 2..Stützsteg zur Reduktion der lichten Weite
- 3..Rohre in zwei Ebenen platziert
- 4..Platz für PCM

Abbildung 10: CAD-Modell für in den Boden integrierte Photobioreaktoren (Zellinger 2017)



- 1..Tragkonstruktion
- 2..Reaktor (3000l)
- 3..Solarkollektor

Abbildung 11: CAD-Modell für eine *Lichtertme* Überdachung (Zellinger 2017)



- 1..Tragkonstruktion
- 2..500l Tank inkl. Pumpeneinheit
- 3..Verteilerleitung
- 4..Sammelleitung
- 5..Flussrichtung
- 6..Kaskadenförmige Flussrinnen mit 1,7% Gefälle

Abbildung 12: CAD-Modell für eine *Open-Cascades*-Überdachung (Zellinger 2017)

CAD-Modelle aller drei Typen, spezifiziert auf die Parkplatz-Anwendung, sind in Abbildung 10 bis Abbildung 12 zusammengefasst. Die Komponenten und ihre Rolle in der gesamten Anlage sind in Tabelle 6 (ab Seite 34) aufgelistet. Dabei sind nicht immer alle Komponenten unbedingt notwendig. So sind etwa für die Photobioraktoren Strategien denkbar, alle Aufgaben des Sammelbehälters an andere Komponenten (z.B. den Degaser) auszulagern und diesen – für dieses Anlagenkonzept – einzusparen.

1.3.2.3 Anwendungsfälle

Die festgelegten Technologien sollen anhand eines konkreten Beispiels für die zwei Szenarien - Innen- u. Außenanlage – untersucht werden. In der folgenden Übersicht ergeben sich daraus die untersuchten Anwendungsfälle:

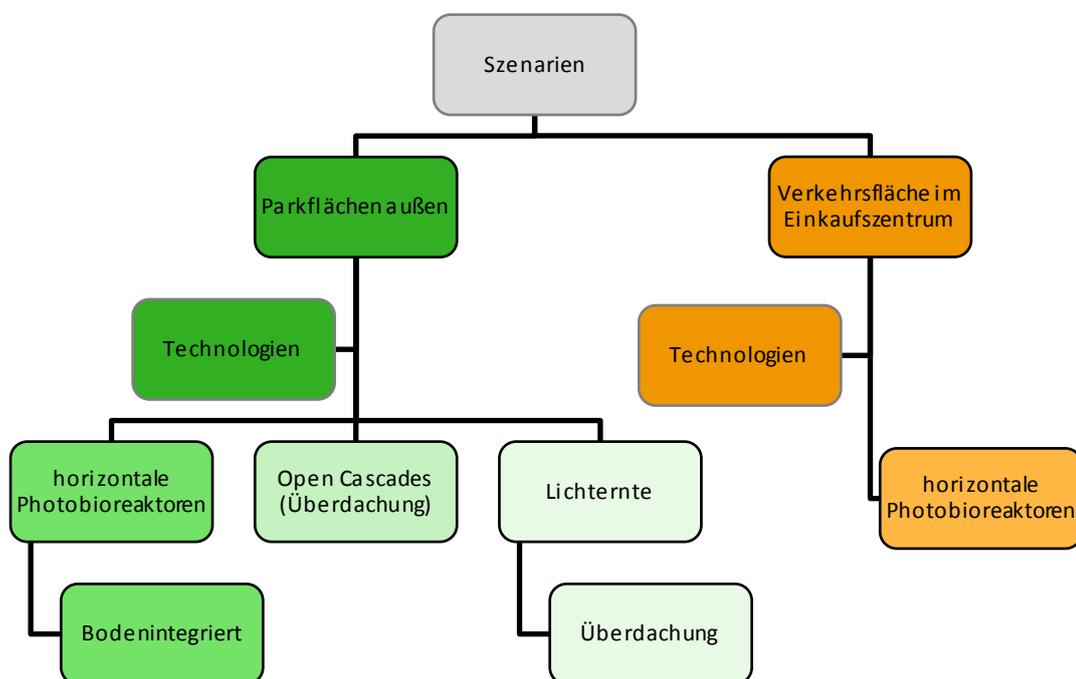


Abbildung 13: Übersicht der Anwendungsfälle

Als Beispiel soll das Einkaufszentrum CityCenter in Wieselburg herangezogen werden. Die Recherche ergab eine nutzbare Parkplatzfläche außen von 4600 m² und eine nutzbare Verkehrsfläche (Mall) im Innenraum von 1049,39 m² im Erdgeschoss und 339,31 m² im Obergeschoss. Das ergibt eine gesamte Mall -Fläche von 1388,7 m². Die Randbedingungen für die einzelnen Technologien sind in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Ausgehend von diesen Bedingungen werden Kenndaten wie Druckverlust und Wärmehaushalt abgeschätzt bzw. berechnet.

Die Konzepte werden nach Möglichkeit auf eine Modulgröße von 2 Stellplätzen (= 2 m x 2,3 m x 5 m) heruntergebrochen, um für die Berechnungen in AP4 eine Basis zu schaffen.

Tabelle 6: Eigenschaften der einzelnen Komponenten für die untersuchten Technologien

	PBR horizontal	Offene Kaskaden	Lichternte
Beschreibung	Bodenintegriert, geschlossen	Überdachung, offenes System	Überdachung, geschlossenen
Kollektor			
Aufgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Licht ernten • Algenwachstum • Schutz der Algen vor Umwelteinflüssen (Wetter, mechanische Belastung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Licht ernten • Algenwachstum • CO₂-, O₂-Austausch mit der Umgebung • Überdachung 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichternte • Überdachung
Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Lichtdurchlässigkeit • kontinuierliche Strömung • Druckbeständigkeit • Wärmedämmend • Reinigungs- und Wartungsmöglichkeit • Rutschfestigkeit aber unempfindlich gegen Schmutzablagerungen (Reifenabrieb, Staub aus der Luft...) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausreichend Höhe für PKW-Stellplatz (Mindesthöhe 2,1 m) • statische Sicherheit (Frostbeständigkeit, Hagelbeständigkeit, Schneelast) • Reinigungs- und Wartungsmöglichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • optimaler Lichteinfall - Nachfahren des Sonnenstandes • Witterungsbeständigkeit • statische Sicherheit,
Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Röhren • Einhausung⇒ Kollektor/„Modul“ • Reinigungsvorrichtung • Pumpen • Degaser („Entlüftung“) • ggf. Airlift statt Pumpen und Degaser (hohe Rohre, viel Druckluft nötig) • Vorrichtung für CO₂-Zudosierung • Sensoren 	<ul style="list-style-type: none"> • Stützen • geneigte Flächen unterschiedliche Höhen (mittig höher -> kaskadische Anordnung) • Reinigungsvorrichtung • Pumpen • Vorrichtung für CO₂-Zudosierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Kollektorfläche (z.B. Fresnel-Kollektor, Spiegel) • ev. Abdeckung der Kollektorfläche? -> nur sichtbarer Bereich des Lichtes (Wärme) • Kühlung?
Material	<ul style="list-style-type: none"> • Abdeckung (Glas)/Einhausung für Röhren ⇒ „Modul“ • Glasröhren • Verbindungsstücke • Schläuche (zu den Pumpen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pfeiler: Beton/Holz/Stahl • Platten: Edelstahl od. Sicherheitsglas (Kunststoff bricht auch, zerkratzt-> Unebenheiten->Biofilme) • Verbindungsrohre/-schläuche (Kunststoff) 	<ul style="list-style-type: none"> • Spiegel? • Filter (spezielles Lichtspektrum)
Stoffströme	<ul style="list-style-type: none"> • Photoneneinfall • Algensuspension (Wasser, Nährstoffe, Algen, CO₂, O₂) 	<ul style="list-style-type: none"> • Photoneneinfall • Algensuspension (Wasser, Nährstoffe, Algen, O₂, O₂) 	<ul style="list-style-type: none"> • Photoneneinfall

	PBR horizontal	Offene Kaskaden	Lichternte
	PBR horizontal	Offene Kaskaden	Lichternte
Leitungen vom/zum Kollektor			
Aufgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Strömung der Algensuspension (Pumpe) • Verbindung zwischen Kollektor und Speicher • ggf. Begasung (CO₂ und Druckluft für besseres Austreiben des O₂) • Entlüftung 	<ul style="list-style-type: none"> • Strömung der Algensuspension (Pumpe) • Verbindung zw. Kollektor u. Speicher • Filterung von z.B. Blättern • Begasung – CO₂ und Druckluft (O₂ hinaus) – z.B. im Steigrohr • Wasserstandkontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> • Leitung des Lichts vom Kollektor in den Reaktor
Anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtheit • keine strömungsberuhigten Zonen 	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtheit 	<ul style="list-style-type: none"> • Überhitzung vermeiden
Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Rohre • Pumpe • Ventil(e) 	<ul style="list-style-type: none"> • Rohre • Pumpe • Ventil(e) 	<ul style="list-style-type: none"> • optische Lichtleiter
Material	<ul style="list-style-type: none"> • Glas- od. Kunststoff 	<ul style="list-style-type: none"> • Kunststoffrohre 	<ul style="list-style-type: none"> • Glasfasern?
Stoffströme	<ul style="list-style-type: none"> • Algensuspension • Luft 	<ul style="list-style-type: none"> • Algensuspension • CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Photonen
Sammelbehälter/Reaktor			
Aufgabe	<ul style="list-style-type: none"> • Algeninokulation • Speicher für Algensuspension (Stagnationszeiten: Nacht, Reinigung, Instandhaltung) • Begasung, Nährstoffversorgung • Temperaturkontrolle? 	<ul style="list-style-type: none"> • Algeninokulation • Speicher für Algensuspension (Stagnationszeiten: Nacht, Reinigung, Instandhaltung, Schlechtwetter) • Wasserstandkontrolle • Begasung, Nährstoffversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> • Algeninokulation • Algenkultivierung • Begasung • Nährstoffversorgung • Durchmischung • Temperaturkontrolle
Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Tank • Vorrichtungen/Ventile für Begasung... • Erntevorrichtung • Beheizung • pH-Sonden • evt. O₂-Sonde 	<ul style="list-style-type: none"> • Tank • Wasseranschluss • Vorrichtungen/Ventile für Begasung... • Erntevorrichtung • pH-Sonden • evt. O₂-Sonde 	<ul style="list-style-type: none"> • Tank • Lichtsäulen • Rührwerk, Pumpe • Entlüftung • Erntevorrichtung • Kühlung/Beheizung?
Material	<ul style="list-style-type: none"> • Tank: Kunststoff/Metall 	<ul style="list-style-type: none"> • Tank: Kunststoff/Metall 	<ul style="list-style-type: none"> • Tank: Kunststoff/Metall • Lichtleiter (Glasfasern)
Stoffströme	<ul style="list-style-type: none"> • Algensuspension • CO₂, Nährstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Algensuspension • CO₂, Nährstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Photonenstrom • Algensuspension

Stadt der Zukunft

	PBR horizontal	Offene Kaskaden	Lichternte
			• Luft, CO ₂ , Nährstoffe



1.3.3 Modellierung, Berechnungen, Simulation

1.3.3.1 Grundlegender Ansatz

Das Modell wurde als zeitdiskretes Bilanzmodell aufgebaut. In jedem Zeitschritt werden also – meist abhängig von den äußeren Bedingungen – die sich ergebenden Differenzen für Erhaltungsgrößen berechnet. Diese Differenzen werden dann aufsummiert (wie etwa die Zuwächse der Algenbiomasse) oder es wird davon ausgegangen, dass automatisch ein Ausgleich erfolgt (z.B. Nachfüllen von verdunstetem Wasser), und es werden die erforderlichen Mengen mitprotokolliert. Auch bei den Nährstoffen wird davon ausgegangen, dass stets eine ausreichende Menge vorhanden ist, dass der limitierende Faktor für das Wachstum also die zur Verfügung stehende Lichtenergie ist. Die insgesamt benötigten Nährstoffe werden ebenfalls mitprotokolliert. Insbesondere die Gesamtmenge ist für spätere wirtschaftliche Analysen aufschlussreich.

Im Falle des Wärmehaushalts sind beide Vorgehensweisen möglich: Die gespeicherte Wärme und davon abhängig die Temperatur der Suspension kann als dynamisch, veränderliche Größe betrachtet werden. Es ist aber auch möglich, eine konstante Temperatur vorzugeben und daraus den Heiz- und Kühlbedarf zu ermitteln.

Das Modell wurde in MATLAB implementiert und umfasst knapp 300 Zeilen Code zur Definition der Systeme, ca. 400 Zeilen Code für die Durchführung der eigentlichen Simulation sowie mehrere kleinere Funktionen und Skripte, in die gut separierbare Funktionalitäten (z.B. die Berechnung der Verdunstungsrate) ausgelagert wurden bzw. die das Modell mit verschiedenen Anfangs- bzw. Randbedingungen aufrufen.

In Pseudocode-Darstellung hat das Modell folgende Struktur:

```
Initialisieren (Modellparameter festlegen, Wetterdaten laden, ...)
Für die definierte Zahl der Zeitschritte:
  Biomasse-Konzentration aus Masse und Anlagengröße berechnen
  Komponenten-Temperaturen aus den Wärmemengen bestimmen
  Wenn Konzentration >= Erntekonzentration:
    Ernte: Menge der geernteten Biomasse erhöhen
    System in den Reinigungszustand versetzen
  Sonst, wenn System noch im Reinigungszustand:
    Countdown bis zum Neustart
  Sonst, wenn Ende des Reinigungszyklus erreicht:
    Inokulation mit neuer Algen-Biomasse
  Sonst (wenn normaler Betriebszustand):
    Algenzuwachs aus vorhandener Biomasse, Sonneneinstrahlung
    und Temperatur der Suspension berechnen
    Nährstoffverbrauch für Wachstum ermitteln
    Bei Open Cascades Wasserverlust durch Verdunstung berechnen
    Wärmeflüsse von/zu Suspension berechnen
    Verbrauch an elektrischer Energie ermitteln
  Ende der Wenn-Abfrage
  Wärmeflüsse zwischen den übrigen Systemkomponenten berechnen
Ende der Zeitschritt-Schleife
Ergebnisse auswerten und darstellen
```

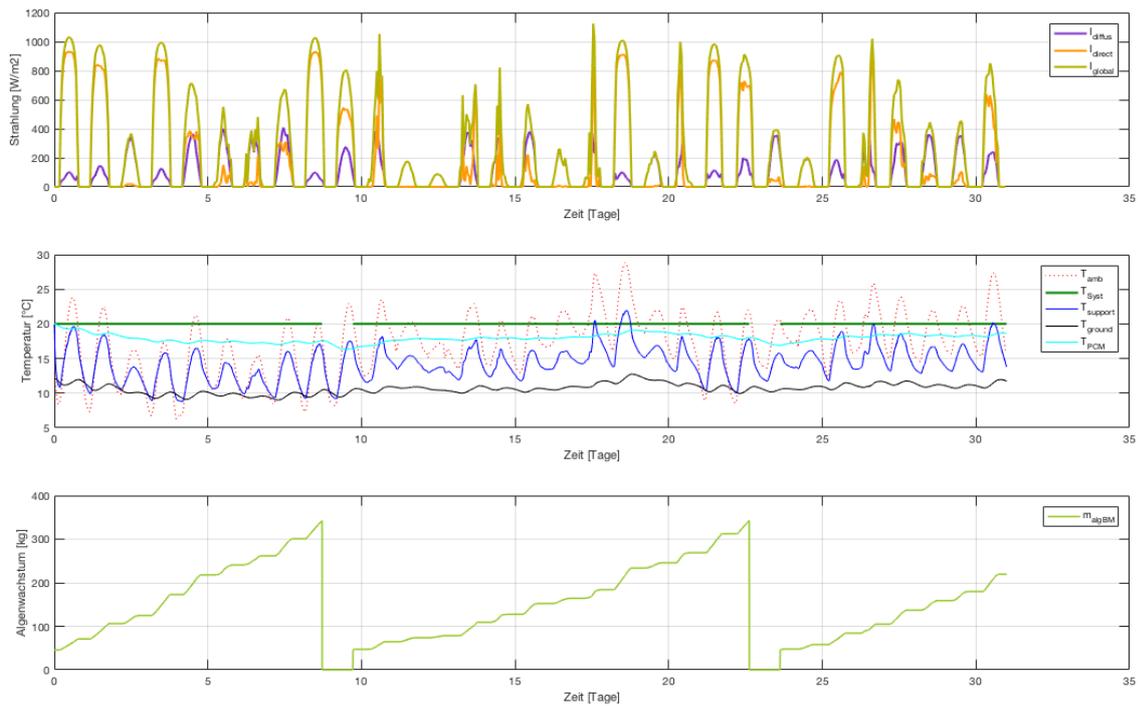


Abbildung 14: Ein beispielhafter Simulationslauf (31 Tage, jeweils eine Ernte ca. 8,5 sowie ca. 22,5 Tage nach Simulationsstart). Dargestellt sind die solare Einstrahlung (oben), die Temperaturen der Systemkomponenten (Mitte) und die Algen-Biomasse in der Suspension (unten)

Ein beispielhafter Simulationslauf ist in Abbildung 14 gezeigt. Eine grafische Darstellung, wie die einzelnen Komponenten und Parameter des Modells ineinander greifen, ist in Abbildung 15 skizziert. Zentrales Ziel des Modells ist es, für unterschiedliche Standorte und Anlagenkonzepte schnell eine Abschätzung von Kosten und Erträgen zu erhalten und so die Grundlage für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Verfügung zu stellen. Die standortspezifischen Wetterdaten wurden aus historischen Daten der ZAMG extrahiert bzw. wurden normierte Wetterprofile, die mit dem Programm Meteonorm erstellt wurden, verwendet.

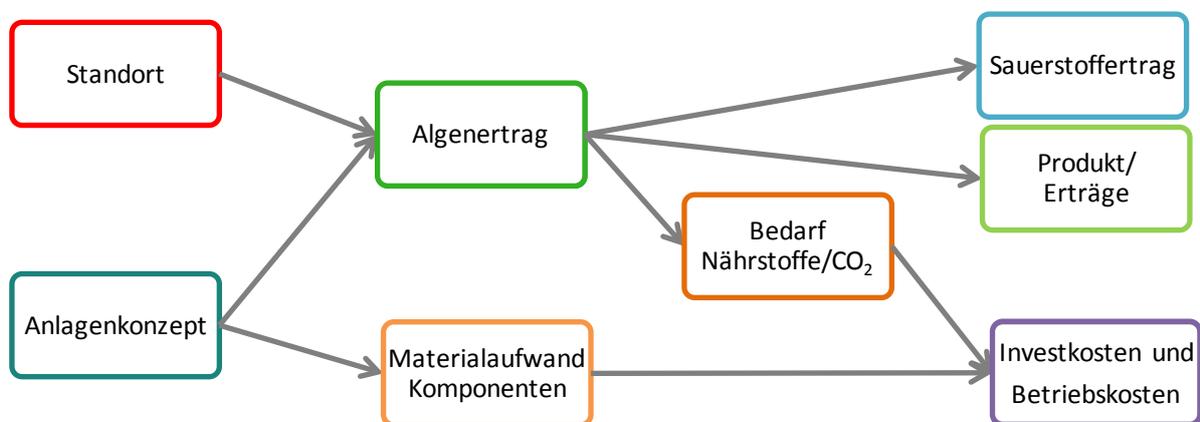


Abbildung 15: Abhängigkeiten innerhalb des Simulationsmodells

1.3.3.2 Algenwachstum und Ernte

Der Einfluss der Temperatur auf das Wachstum von Algen ist speziesabhängig von (Xin 2011, S. 3100). Wenn es keine weiteren Einschränkungen gibt, so findet man für die Spezies *Scenedesmus* und *Chlorella* zwischen 27°C und 39°C exponentielles Wachstum mit einer relativen Wachstumsrate $\mu=0,03/h$. Zur Diskussion des Algenwachstums siehe (Schipfer 2012; Molina 1999, S. 231-247; Talbot 1991; Quinn 2011). Da ein exponentielles Wachstum unter Realbedingungen unrealistisch ist, wurde das Wachstumsgesetz

$$\frac{dm(t)}{dt} = \mu m(t),$$

das auf ein solches exponentielles Wachstum führt, durch das logistische Wachstumsgesetz ersetzt:

$$m(t) = \frac{m_0 * e^{t/\tau}}{1 + \frac{m_0}{m_{Max}}(e^{t/\tau} - 1)} \quad \frac{dm}{dt} = c \cdot m \cdot (m_{Max} - m) = \frac{1}{\tau \cdot m_{Max}} \cdot m \cdot (m_{Max} - m)$$

m_{Max} ... maximale im System mögliche Algenbiomasse, $0 \leq m(t) \leq m_{Max}$

$\tau = \frac{1}{\mu}$... Zeitkonstante abh. von Temperatur & Lichtausbeute

Für die Wachstumsraten bzw. die resultierenden Zeitkonstanten wurde die Ansätze von (Quinn 2011) herangezogen:

$$\begin{aligned} \mu &= 0.036 \cdot \phi_T \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot \phi_m \cdot E_{PFD} \cdot 3600}{0.036 \cdot \phi_T}}\right) = r_{PH} \cdot \phi_T \cdot \left(1 - e^{-\frac{\eta_{irrad,PH} \cdot E_{PFD} \cdot 3600}{0.036 \cdot \phi_T}}\right) \\ &= 0.036 \cdot \phi_T \cdot \left(1 - e^{-\frac{0.01 \cdot E_{PFD} \cdot 3600}{0.036 \cdot \phi_T}}\right) \cdot \frac{1}{3600} \left[\frac{1}{s}\right] \end{aligned}$$

$$\phi_T = \frac{2}{1 + e^{\left(\frac{E_a}{R \cdot T_{opt}} - \frac{E_a}{R \cdot T}\right)^2}} \quad (\text{temperaturabhängiger Wachstumsfaktor})$$

Nutzbare Energie abhängig vom Reaktortyp, jeweils in $\left[\frac{\mu mol}{m^2 s}\right]$ mit PFD = photon flux density:

$$E_{PFD,avg} = E_0 \frac{1 - e^{-\alpha \cdot q_{Xdw} \cdot B}}{\alpha \cdot q_{Xdw} \cdot B} \quad \text{bzw.}$$

$$E_{PFD,avg} = E_0 \cdot \eta_{irrad,reactor} \eta_{irrad,coll} \quad \text{bzw.}$$

$$E_{PFD} = \frac{Q_{irr}}{E_{550} \cdot A_{irr, coll} \cdot timestep} \cdot 3600$$

Zusätzlich sollte berücksichtigt werden, dass der Zuwachs an Biomasse nicht größer sein kann als die Zufuhr an photosynthetisch nutzbarer Lichtenergie gewichtet mit der Energiedichte von Biomasse. (Das ergibt sich prinzipiell automatisch aus der Benutzung der o.a. Formeln, sofern das photosynthetisch aktive Volumen richtig in Relation zur einfallenden Strahlung gesetzt wird, ist aber als zusätzliche Plausibilitätsprüfung sehr anzuraten).

Prinzipiell wird die Wachstumsrate noch durch eine etwaige Nährstofflimitierung reduziert. Hier wird aber davon ausgegangen, dass stets ausreichend Nährstoffe vorhanden sind.

1.3.3.3 Verdunstung

Im Modell wurde die Penman-Kombinationsmethode implementiert (Koch 2013):

Sättigungsdampfdruck und Umgebungsdampfdruck:

$$p_{\text{vapSat}} = 6,11 \cdot e^{\frac{17,3 \cdot T_{\text{amb}}}{243,12 + T_{\text{amb}}}} \text{ [hPa]}, \quad p_{\text{vapAmb}} = \frac{rH_{\text{amb}}}{100} \cdot p_{\text{vapSat}} \text{ [hPa]}$$

Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve:

$$s = \frac{de_s}{dT_{\text{amb}}} = \frac{4284 \cdot p_{\text{vapSat}}}{(243,12 + T_{\text{amb}})^2} \left[\frac{\text{hPa}}{\text{K}} \right]$$

Weitere außenbedingungsabhängige Faktoren:

$$g_{\text{refLW}} = -0,97 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{sys}} + 273,15)^4 \cdot (0,56 - 0,08 \cdot (p_{\text{vapAmb}}^2)^{\frac{1}{2}}) \cdot (1 - f_{\text{cloud}} \cdot 0,1125)$$

$$g_{\text{net}} = g_{\text{global}} \cdot (1 - 0,05) + g_{\text{refLW}}$$

$$E_{\text{vent}} = (0,136 + 0,105 v_{\text{wind}}) \cdot (p_{\text{vapSat}} - p_{\text{vapAmb}})$$

potentielle Evapotranspiration (Verdunstungsmenge), Volumenstrom der Verdunstung und Enthalpie:

$$E_{\text{pot}} = \frac{s}{s + 0,66} \cdot \frac{g_{\text{net}}}{28,9 - 0,028 \cdot T_{\text{abm}}} + \frac{0,66}{0,66 + s} \cdot E_{\text{vent}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{d}} \right]$$

$$\dot{V}_{\text{Evap}} = E_{\text{pot}} \cdot \left(1 - \frac{rH_{\text{amb}}}{100} \right) \cdot \frac{1}{24 \cdot 1000 \cdot 3600} \cdot A_{\text{irr, coll}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$h_{\text{Evap}} = \left(50,09 - 0,9298 \cdot \left(\frac{T_{\text{sys}} + 273,15}{1000} \right) - 65,19 \cdot \left(\frac{T_{\text{sys}} + 273,15}{1000} \right)^2 \right) \cdot \rho_{\text{Wasser}} \left[\frac{\text{J}}{\text{mol}} \right]$$

Wärmeverlust und verdunstete Wassermasse:

$$Q_{\text{ambEvap}} = -\dot{V}_{\text{Evap}} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot \frac{h_{\text{Evap}}}{18} \cdot \Delta t \text{ [Ws = J]}$$

$$m_{\text{H}_2\text{OEvap}} = \dot{V}_{\text{Evap}} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot \Delta t \text{ [kg]}$$

1.3.3.4 Nährstoffbedarf

Der Nährstoffbedarf der Mikroalgen wurde aus einer stöchiometrischen Massenbilanz ermittelt, wobei eine durchschnittlich molekulare Formel der Mikroalgenbiomasse $\text{CO}_{0,48}\text{H}_{1,83}\text{N}_{0,11}\text{P}_{0,01}$ zugrunde gelegt wurde. Eine graphische Darstellung der resultierenden Massenbilanz findet sich in Abbildung 16; die zentralen Zahlenwerte sind in Abbildung 17 zusammengefasst.

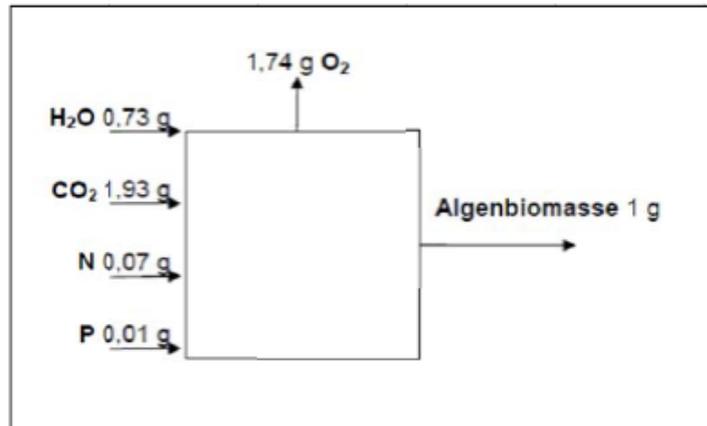


Abbildung 16: Stöchiometrische Massenbilanz Mikroalge (JoannRes 2012, S. 29)

594 Table 3 – Operating mode independent parameters

Parameter	Unit	Value	Source
Total cultivation area per batch	m ²	4500.00	Frame condition
Volume-occupied area-ratio (TLS)	m ³ ·m ⁻²	0.01	[27]
Volume-occupied area-ratio (PBR)	m ³ ·m ⁻²	0.05	[31]
Stoichiometric carbon-dioxide need	g·g ⁻¹ _{alge}	1.95	Derived: [46, 47]
Carbon-dioxide utilization	%	39.00	38.7% here: [48]
Stoichiometric water need	g·g ⁻¹ _{alge}	0.73	Derived: [49, 50]
Stoichiometric nitrogen need	g·g ⁻¹ _{alge}	0.04	Derived: [51]
Stoichiometric potassium need	g·g ⁻¹ _{alge}	0.01	Derived: [51]
Stoichiometric phosphorus need	g·g ⁻¹ _{alge}	0.008	Derived: [51]
Stoichiometric oxygen production	g·g ⁻¹ _{alge}	1.738	Derived: [49, 50]
Salinity	g·l ⁻¹ _{medium}	9.0	Assumption

Abbildung 17: Annahmen aus (Panuschka 2016, S. 29)

1.3.3.5 Detaillierte Umsetzung abhängig von der Technologie

Auflistung der zu modellierenden Komponenten mit den notwendigen Eigenschaften, um die gesuchten Ströme/Daten berechnen zu können:

Bodenintegrierte Photobioreaktoren

notwendige Eigenschaften/Parameter	zu berechnende Ströme/Daten
Solkollektor inkl. Einhausung	
Länge & Breite (⇒Fläche) Volumen "freier" Raum (Beheizung/Kühlung) U-Werte: Glas, Rahmen,... Transmissionseigenschaften	Solarer Ertrag zum PBR: Strahlung & Wärme Transmissionsverluste (Wärme/Strahlung)
Photobioreaktor-Röhren	
Länge, Durchmesser, Wandstärke U-Wert(e)/λ-Wert(e) Transmissionseigenschaften	Menge Algensuspension solarer Ertrag zur Algensuspension Algenwachstumsrate (Nährstoffbedarf, CO2-Bedarf, O2-Ertrag, nächtlicher Luftbedarf ⇒ ggf. ph-Wert-Verlauf (hier nicht betrachtet) ⇒ Kultivierungsdauer ⇒ Jahresertrag Transmissionsverlust (Strahlung) Wärmeverlust Druckverlust
Leitungen, Ventile, Pumpe(n), Zusatzheizung	
Länge Druckverlustbeiwerte Leistungsdaten	Druckverlust Pumpenleistung bzw. Strombedarf Heizbedarf

Annahme: PBR-Röhren liegen in Einhausung unter Glasabdeckung (window), Zwischenraum (gap) ist mit Luft gefüllt. Für den U-Wert erhält man entsprechend:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_{amb}} + \frac{1}{U_{window}} + \frac{1}{\alpha_{gap}} + \frac{s_{PBR}}{\lambda_{PBR}}$$

mit einem Wärmeübergangskoeffizienten α_{amb} zur Umgebung, einem U-Wert U_{window} für die transparente Überdeckung, einem Wärmeübergangskoeffizienten α_{gap} für die Luft innerhalb der Konstruktion sowie Rohrdicke s_{PBR} und Wärmeleitzahl λ_{PBR} für das Glas des Photobioreaktor-Rohrs selbst.

Für die elektrische Pumpenleistung pro Modul ergibt sich

$$P_{el} = \frac{P_h}{\eta_{ges}} = \frac{\Delta p}{\rho} \dot{m} \frac{1}{\eta_{ges}}$$

mit η_{ges} als Gesamtwirkungsgrad der Pumpe und einem Druckverlust der nach gängigen hydraulischen Berechnungen von der genauen Konfiguration abhängt:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c^2 + \sum \xi_i \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c^2$$

Für die Durchflussgeschwindigkeit c werden in (Molina 2001, S. 125) Werte von ca. 0,5 m/s als optimal angegeben. Zu geringe Geschwindigkeiten führen zu schlechter Durchmischung, zu hohe Geschwindigkeiten zu erhöhtem Pumpenergiebedarf und ggf. Schädigung der Zellen.

offene Kaskaden in Überdachung

notwendige Eigenschaften/Parameter	zu berechnende Ströme/Daten
Solarkollektor bzw. Reaktor	
Länge & Breite (\Rightarrow Fläche) Speicherkapazität, U-Werte Transmissionseigenschaften	Solarer Ertrag auf Oberfläche/Algensuspension (Strahlung & Wärme) Transmissionsverluste (Wärme/Strahlung) Menge Algensuspension Algenwachstumsrate (Nährstoffbedarf, CO ₂ -Bedarf, O ₂ -Ertrag, nächtlicher Luftbedarf \Rightarrow ggf. ph-Wert-Verlauf (hier nicht betrachtet) \Rightarrow Kultivierungsdauer \Rightarrow Jahresertrag Wasserverlust durch Verdunstung Druckverlust
Leitungen, Ventile, Pumpe(n)	
Länge Druckverlustbeiwerte Leistungsdaten	Druckverlust Pumpenleistung bzw. Strombedarf
Tank, Rührer	
Höhe, Durchmesser, Wandstärke U-Wert(e) Leistungsdaten Rührer	Volumen Sauerstoffbedarf und CO ₂ -Produktion (Nacht) \Rightarrow ggf. Auswirkungen auf ph- Wert-Verlauf Wärmeverlust Rührleistung bzw. Strombedarf

Der Wärmeaustausch erfolgt hier direkt mit der Umgebung (was durch den Wärmeübergangskoeffizienten α_{amb} beschrieben wird), $U = \alpha_{\text{amb}}$. Zusätzlich kommt bei dieser Technologie aber auch noch die Verdunstung zum Tragen, die zu einem erheblichen zusätzlichen Wärmeverlust führen kann, durch die Verdunstungskühlung aber das Algenwachstum i.a. positiv beeinflusst. Weitere Wärmeverluste treten bei den Rohrleitungen sowie im Tank auf.

Die Berechnung der elektrischen Leistung erfolgt im Wesentlichen analog zu jener für die Photobioreaktoren (mit einer wesentlich einfacheren Struktur der Rohrleitungen), mit einem zentralen Unterschied: Während sich die Höhenunterschiede im PBR-System ausgleichen (d.h. die aufzubringende Hebeenergie wird in den „Abwärts“-Teilen zurückgewonnen), ist das bei den offenen Kaskaden nicht der Fall. Daher ist die Hebeenergie zusätzlich zu berücksichtigen (mit den Höhen h_1 und h_2 für Ein- und Auslass in das Rohrsystem zum Hochpumpen der Suspension sowie der Erdbeschleunigung g):

$$P_{\text{el}} = \left(\left(\frac{\Delta p}{\rho} \right) + g (h_2 - h_1) \right) \dot{m} \frac{1}{\eta_{\text{ges}}}$$

Lichternte

notwendige Eigenschaften/Parameter	zu berechnende Ströme/Daten
Solarkollektor	
Länge & Breite (⇒Fläche) Transmissionseigenschaften	Solarer Ertrag zu den Leitern – Strahlung & Wärme Transmissionsverluste (Wärme/Strahlung) Menge Algensuspension
Lichtleiter	
Länge Leitungseigenschaften (Transmissionseigenschaften) Wärmekapazität	Lichtertrag zum Reaktor Transmissionsverlust übertragene Wärmeleistung
Reaktor, Rührwerk, Pumpe(n), Ventile	
Höhe, Durchmesser, Wandstärke U-Wert(e) Anzahl/Übertragungsfläche der Lichtsäulen Leistungsdaten Rührer/Pumpe	Volumen Lichteintrag von Säulen Algenwachstumsrate (Nährstoffbedarf, CO ₂ -Bedarf, O ₂ -Ertrag, Luftbedarf (Nacht) ⇒ ph-Wert-Verlauf) ⇒ Kultivierungsdauer?! ⇒ Jahresertrag Wärmeverlust bzw. Heiz-/Kühlbedarf Rührleistung bzw. Strombedarf

Für die Lichternte sind die wenigsten Literaturquellen verfügbar. Im Wesentlichen muss die Energiebilanz für den Kultivierungstank betrachtet werden. Dabei gibt es einen Energieeintrag durch die Lichtleiter sowie den Wärmeaustausch mit der Umgebung. (Auch die elektrische Energie für das Rührwerk wird letztlich in Wärme umgewandelt; wegen der sehr kleinen hier benötigten Leistungen ist dieser Beitrag aber vernachlässigbar.)

Unter der optimistischen Annahme, dass es gelingt, durch geeignete Filter/Reflektoren nur die für die Photosynthese nutzbaren Wellenlängen zu übertragen, wird noch immer ca. die Hälfte der einfallenden Strahlungsenergie in den Tank transportiert und dort Großteils in Wärme umgewandelt. (Verluste bei der Photosynthese selbst, Metabolismus-Aktivität der Algen.) Den Abtransport dieser Wärme so zu bewerkstelligen, dass die optimalen Wachstumsbedingungen für die Algen beibehalten werden, wird als zentrale Herausforderung gesehen.

1.3.4 Technische und ökonomische Bewertung

Für eine vergleichende Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen werden die Investitionskosten der unterschiedlichen Kultivierungsmethoden abgeschätzt und das im vorigen Abschnitt vorgestellte physikalische Modell mit einem Modell zur Berechnung der Betriebskosten, Umwandlungskosten und möglichen Renditen erweitert. Unsicherheiten und standortspezifische Rahmenbedingungen werden quantitativ und qualitativ als Sensitivitäten und in Form von Szenarien diskutiert. Das Arbeitspaket dient nicht dazu Vorhersagen zur Wirtschaftlichkeit der Parkplatzalgenkonzepte zu treffen oder um die kosteneffizienteste Technologie hervorzuheben. Im Gegensatz dazu werden die Kostentreiber der einzelnen Technologien diskutiert, ökonomische Vor- und Nachteile beleuchtet, urbane Integrationsideen mit möglichen Synergieeffekten beschrieben und Handlungsempfehlungen zur Umsetzung und Weiterentwicklung abgeleitet.

Abschätzung der Investitionskosten:

Um eine erste Einschätzung der Installationskosten der Parkplatzalgenkonzepte zu erhalten werden die Erfahrungswerte vom Bau eines Versuchsphotobioreaktors² mit Abschätzungen der zusätzlichen konzeptspezifischen Kostenkomponenten herangezogen. Investitionskosten für Anlagen im Labormaßstab (zwei bis 12 Parkplätze je nach Konzept) werden in weiterer Folge als Basis zum Skalieren für eine Pilot- (0,46 ha) bzw. eine erste kommerzielle Anlage (100 ha) hergenommen. Die folgenden Absätze erläutern die Überlegungen und Kostenkomponenten allgemein und konzeptspezifisch:

- *Allgemeine Investitionskostenkomponenten*

Der gemeinsame Nenner der fünf Reaktortypen setzt sich aus Wassertanks unterschiedlicher Größe, sowie Pumpen angemessener Leistung und Entgasern zur Abfuhr von produziertem Sauerstoff zusammen. Standardmäßige Wassertanks können zu einem Preis von 200 €/m³ erworben werden (Auer 2017), bei größeren Bestellmengen (ab 10 m³) werden Kosten von 100 €/m³ basierend auf (Alibaba 2017) angenommen. Speckpumpen und Frequenzumformer wurden zusammen um 1.200 € für eine Versuchsanlage eines Vorprojektes erworben. Es handelt sich dabei um eine Pumpe mit 1.1 kW Leistung, ausreichend um ein Algenmedium schonend auf eine Höhe bis zu 2 m zu pumpen (für OC) bzw. die Umwälzung in den anderen Anlagenkonzepten zu bewältigen. Die Herstellungskosten für den Entgaser des Vorprojektes werden mit 1.200 € geschätzt. Wir nehmen an, dass die Investitionskosten für den Massenfluss um nur 20% bei größeren Bestellmengen für eine Pilotanlage gesenkt werden können, da die Skalierbarkeit weniger einfach handzuhaben ist wie für die Wassertanks. Für drei der vier Anlagenkonzepte kommt des Weiteren eine Überdachungskonstruktion zum Einsatz, Kosten für unterschiedliche Bestellmengen liegen hier bei 100-120 € pro Parkplatzfläche (1,19m²) und somit bei 101 €/m² bzw. 84 €/m² für die Labor- und die Pilotanlage³.

² Anlage von BOKU und Bioenergy2020+ in Dürnrrohr für das CO2USE Projekt

³ Persönliche Kommunikation mit Bernd Mayr, Carpor GmbH, 14.06.2017

- *Investitionskosten für tubuläre, horizontale Photobioreaktoren*

Kosten für tubuläre Photobioreaktorkomponenten für unterschiedliche Bestellmengen wurden von der Firma Schott AG erfragt. Bei den Komponenten handelt es sich um Glasrohre, U-Stücke (zum Umlenken des Substratflusses) und Verbindungsstücke. Kosten und Stückzahlen für die Labor- und Pilotanlage sind in Tabelle 7 gelistet. Zusätzlich werden Tankvolumen von 100 L und 40.000 L, sowie ein bzw. 400 Entgaser und eine bzw. 400 Pumpen für die Labor- und die Pilotanlage angenommen. Ohne Referenzen und schwer abzuschätzen sind die Kosten der befahrbaren Sicherheitsgläser. Wir schätzen die Herstellungskosten für einen Prototypen mit 6.000 € und für die Pilotanlage mit 3.000 € pro Parkplatzfläche.

Tabelle 7: Investitionskostenkomponenten für den tubulären, horizontalen Photobioreaktor, Quelle: Firma Schott AG und eigene Abschätzung

Kostenkomponente	Labor	Pilot	Einheit
Glasröhrenanzahl	48	9.600	Stück
Glasröhrenkosten	28	20,5	€/Stück
U-Stückanzahl	24	4.800	Stück
U-Stückkosten	27,5	13,5	€/Stück
Verbindungsstückanzahl	48	9.600	Stück
Verbindungsstückkosten	17,5	13,5	€/Stück
Sicherheitsglasanzahl	2	400	Stück
Sicherheitsglaskosten	6.000	3.000	€/Stück

- *Investitionskosten für das offene Kaskadensystem*

Anders als bei den tubulären Photobioreaktoren werden hier keine Rohrsysteme benötigt. Das Substrat wird auf eine geneigte Plexiglasüberdachung gepumpt, wo es unter Sonneneinstrahlung und Einfluss der Gravitation als dünner Film abwärts rinnt und in einem Wassertank aufgefangen und durchmischt wird. Neben der Überdachungskonstruktion werden Plexiglasdachflächen zu 80 €/m² bzw. 64 €/m² angedacht. Ein Filtersystem soll Laub und andere Verunreinigungen der offenen Kaskaden vom Algensubstrat abtrennen. Kosten und Stückzahlen für die Labor- und Pilotanlage sind in Tabelle 8 gelistet. Zusätzlich werden Tankvolumen von 500 L und 17.000 L, sowie ein bzw. 400 Entgaser und eine bzw. 400 Pumpen für die Labor- und die Pilotanlage angenommen.

Tabelle 8: Investitionskostenkomponenten für das offene Kaskadensystem. Quellen; Carpor GmbH, (Acrylics, 2017) und eigene Abschätzungen

Kostenkomponente	Labor	Pilot	Einheit
Überdachungsfläche	138	4.600	m ²
Überdachungskosten	101	84	€/m ²
Plexiglasfläche	138	4.600	m ²
Plexiglaskosten	60	60	€/m ²
Filtersystemkosten	100	1.667	€

- *Investitionskosten für das Lichterntesystem*

In diesem System fallen vor allem Kosten für das bewegliche Lichterntesystem an. Lichtkollektoren, Glasfasern sowie Sekundaroptik zur optimalen Sonnenlichtdistribution in den Kultivierungstanks werden mit 1.500 €, 500 € und 2.000 € pro Stück abgeschätzt. Zusätzlich werden Tankvolumen von 3.000 L und 600.000 L, sowie ein bzw. 400 Entgaser und eine bzw. 400 Pumpen für die Labor- und die Pilotanlage angenommen.

Tabelle 9: Investitionskostenkomponenten für das Lichterntesystem. Quellen; Carpor GmbH,

Kostenkomponente	Labor	Pilot	Einheit
Überdachungsfläche	23	4.600	m ²
Überdachungskosten	101	84	€/m ²
Lichtkollektorenanzahl	52	10.400	Stück
Lichtkollektorenkosten	1.500	1.200	€/Stück
Glasfaserkabel	23	4.600	Stück
Glasfaserkosten	517	300	€/Stück
Sekundaroptik	2.000	10.000	€

- *Investitionskosten für das Photovoltaiksystem*

Statt wie im Lichterntesystem Sonnenlicht zu bündeln und über Glasfasern in einen Kultivierungstank zu leiten, werden in diesem Vergleichssystem PV-Anlagen eingesetzt um Strom zu produzieren und mit speziell bestückten LEDs den Kultivierungstank zu beleuchten. PV-Anlagen können zu einem Preis von 120-160 €/m² erworben werden (Held et al., 2014), selbst bestückbare LED Platinen sind mit 2,0-2,5 €/W zu bepreisen⁴. Die oberen bzw. unteren Preise werden jeweils für die Labor- und Pilotanlage herangezogen. Zusätzlich werden Tankvolumen von 3.000 L und 600.000 L, sowie ein bzw. 400 Entgaser und eine bzw. 400 Pumpen für die Labor- und die Pilotanlage angenommen.

⁴ Interview mit Alvaro Lobato, Ponix Systems GmbH, 14.07.2017

Tabelle 10: Investitionskosten für das Photovoltaiksystem. Quellen: (Held 2014), Carpor GmbH, Ponix Systems GmbH

Kostenkomponente	Labor	Pilot	Einheit
Überdachungsfläche	23	4.600	m ²
Überdachungskosten	101	84	€/m ²
Photovoltaikanlagen	160	120	€/m ²
LED-Systemkosten	2,5	2	€/W
LED-Systemauslegung	2.000	400.000	W

- *Investitionskosten Zusammenfassung*

In Tabelle 11 werden die Investitionskosten der Anlagen und die Anlagengrößen zusammengefasst. Die Kosten belaufen sich auf $4 \cdot 10^6$ €/ha für das Kaskadensystem, $6,5 \cdot 10^6$ €/ha für das tubuläre und auch das PV-system sowie $34 \cdot 10^6$ €/ha für die Lichternte. Im Vergleich dazu berichtet die Literatur über Anlagenkosten von $0,7 \cdot 10^6$ €/ha für tubuläre, vertikale (!) Photobioreaktoren und $0,07 \cdot 10^6$ €/ha für Racewayponds (Benemann 2008 in (Hingsamer 2012)). Da es sich bei den besprochenen Parkplatzalgenkonzepten um eine Innovation handelt, die Kosten für erste Labor- und Pilotanlagen abgeschätzt werden, und die Anlagen nicht nur zur Produktion von Algen sondern auch zur Parkplatznutzung optimiert sind, sind einerseits die zu erwartenden Kosten höher als bei vorhandenen, kommerziellen Anlagen. Andererseits müssen wir mit Unsicherheiten von $\pm 30\%$ bei den Kosten in Betracht ziehen, die wir bei einer Sensitivitätsanalyse berücksichtigen werden. Für den Aufbau der Anlagen, bzw. die Installation werden außerdem noch Konstruktionskosten von 20% der Investitionskosten berücksichtigt.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Investitionskosten der unterschiedlichen Anlagensysteme. Quelle: eigene Berechnung, siehe Text

Technology	Specification	Labor	Pilot	Einheit
PBR	Investitionskosten	22.574	2.979.200	€
OCS	Investitionskosten	26.146	1.849.888	€
LHS	Investitionskosten	98.810	15.500.555	€
PVS	Investitionskosten	15.599	2.982.555	€
PBR	Größe	23	4.600	m ²
OCS	Größe	112	4.600	m ²
LHS	Größe	46	4.600	m ²
PVS	Größe	46	4.600	m ²

Berechnung der Algenproduktionskosten:

Um die Vergleichbarkeit der Produktionskosten zu gewährleisten wird die Annuitätenmethode angewendet. Dabei werden Investitionskosten über die Lebensdauer der Installationen kalkulatorisch jährlich abgeschrieben. Die jährlichen Investitionsausgaben, CAPEX („capital expenditures“) werden mit den jährlichen Aufwendungen für den Geschäftsbetrieb, OPEX („operational expenditures“) summiert. Die Gesamtausgaben, TOTEX („total expenditures“) können den jährlichen Einnahmen gegenübergestellt werden um so Abschätzungen der Wirtschaftlichkeit der Konzepte zu erhalten.

Die jährlichen Investitionsausgaben werden mittels Annuitätenfaktor, CRF („capital recovery factor“) berechnet. Dabei nehmen wir für die Laboranlage eine Abschreibeperiode von $n = 15$ Jahren und für die Pilotanlage von $n = 20$ Jahren an, sowie einem (realen) Zinssatz von $i = 8\%$ und $i = 4\%$ für die größeren Anlagen angelehnt an typische Werte für stromerzeugende Anlagen (Fleischhacker, 2017).

$$CAPEX = INV * CRF \text{ mit } CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Um den Skalierungseffekt für Anlagen möglicher kommerzieller Größenordnungen zu verdeutlichen wird zusätzlich zu Labor- und Pilotanlagen eine erste kommerzielle 100 ha Anlage berechnet. Dafür wird eine klassische Skalierungsformel sowie ein Skalierungsfaktor von $s = 0,7$ verwendet, angelehnt an übliche Skalierungswerte für Bioenergieinstallationen von $\hat{s} = 0,7$ bis $0,8$ (Jenkins 1997).

$$CAPEX = refCAPEX * oSCL^s * refSCL^{-s}$$

Die jährlichen Aufwendungen für den Geschäftsbetrieb setzen sich aus (1) Energiekosten für Strom und Wärme (Heizen und Kühlen), (2) Kosten für Verbrauchsmaterialien inklusive Nährstoffe und Frischwasser, (3) Personalkosten, (4) Forschungs- & Entwicklungskosten, (5) Versicherungskosten und (6) Wartungskosten zusammen. In Tabelle 12 werden die Variablen zur Berechnung der jährlichen Gesamtausgaben zusammengefasst.

$$OPEX = EL + MT + PK + RD + IS + WT$$

Für die Berechnung der (1) Stromkosten wird der Stromverbrauch sowie der stündliche Heiz- und Kühlbedarf aus dem physikalischen Modell für das gesamte Berechnungsjahr aufsummiert. Es wird für alle Anlagen einfachheitshalber angenommen, dass der Heiz- und Kühlbedarf über eine Wärmepumpe mit einem COP von 3 gedeckt wird (Held 2014). Als (2) Nährstoffe kommen flüssige NPK-Dünger zum Einsatz. Dafür wird der limitierende Nährstoff (entweder Stickstoff oder Phosphor) aus dem physikalischen Modell abgeleitet und eine entsprechende Düngung angenommen. (3) Für die Abschätzung der Personalkosten werden Kosten für Arbeiter, Verwaltung und für die Forschung berücksichtigt.

Tabelle 12: Parameter zur Berechnung der jährlichen Gesamtausgaben

Parameter	Lab	Pilot	First	Einheit	Quelle
Zinssatz (real)	0,08	0,04	0,04		(Fleischhacker, 2017)
Lebensdauer	15	20	20	Jahre	Annahme
Versicherung	0,01	0,01	0,01	von INV	Annahme
Wärmepumpenkosten (15kW)	850	850	850	€/kW	(Held et al., 2014)
Wärmepumpeneffizienz	3	3	3		(Held et al., 2014)
NPK-Dünger 32% N und 10% P	380	380	380	€/t	(Hingsamer et al., 2012) (Campbell et al., 2009)
Strom (AT, 2016, alles inkl.)	0,15	0,15	0,15	€/kWh	(Eurostat, 2017)
Wasserbereitstellungskosten	1,09	1,09	1,09	€/m ³	(Hingsamer et al., 2012)
Kosten für Arbeiter (AT)	25.000	25.000	25.000	€/a	Annahme
Arbeiter	0,5	2	40	Personen	Annahme
Kosten für Verwaltung	52.000	52.000	52.000	€/a	Annahme
Supervision	0	1	3	Personen	Annahme
Kosten für Forschung	35.000	35.000	35.000		Annahme
Forscher	1	1	3	Personen	Annahme
Wartungskosten	0,07	0,03	0,01	von INV	Annahme

(Tredici 2016, S. 253–263) berichtet für eine 1 ha ORP-Anlage von vier Arbeiter/Innen, eine/n Geschäftsführer/In und eine/n Biologe/In. Wir nehmen an, dass für eine Laboranlage die Supervision vom wissenschaftlichen Personal ausgeht und Forschungspersonal sowie leitendes Personal mit jeweils drei Personen auch bei größeren Anlagen ausreichend ist. Es wird weiteres angenommen, dass (4) Forschungs- und Entwicklungskosten sich hauptsächlich aus Kosten für das Forschungspersonal zusammensetzen. Um dem unterschiedlichen Arbeitsaufwand der verschiedenen Parkplatz-Algenkonzepte gerecht zu werden, wird außerdem noch ein Aufwandsfaktor berechnet. Da es sich bei allen Konzepten um Batch-prozesse handelt, kann die Größe der Algentanks als ausschlaggebend für den Arbeitsaufwand für Ernte, Reinigung und Wiederbefüllung angenommen werden. Daher wird eine vereinfachte Annahme getroffen, dass die größten Anlageneinheiten (kaskadisches System) mit einem 10 m³ Tank einen Aufwandsfaktor von $\varphi = 1$ hat, das Lichterntesystem sowie das Photovoltaiksystem einen Tank von 0.5 m³ mit $\varphi = 1.2$ und das tubuläre System mit 0.2 m³ mit $\varphi = 1.5$ skaliert werden. Abschließend werden noch 1% der Investitionskosten und 1-7% der Investitionskosten für (5) Versicherungskosten und Kosten für (6) Verschleiß und Reparatur angenommen.

Für die Sensitivitätsanalyse relevante Unsicherheiten betreffen neben den Kosten für Strom (mit $\pm 20\%$ angenommen) vor allem die Personalkosten. Einerseits haben die Personalkosten Einsparungspotentiale durch Prozessoptimierung, andererseits ist der Wartungsaufwand neuer Algenproduktionsanlagen schwer abzuschätzen und kann zu unerwarteten Personalkosten führen. Wir schätzen daher hier wieder einen Unsicherheitsfaktor von $\pm 30\%$ ab.

Exkurs: PV-System

Wie bereits diskutiert wurde das Photovoltaiksystem in der vergleichenden Analyse nicht mitberechnet, da es zu keiner signifikanten Algenproduktion in diesem System nach Abzug des Strombedarfs für die Pumpen kommt. Anhand eines PV-Simulationsmodell (Blabensteiner 2011, Hartner 2015) wurde die Leistung von PV-Modulen mit 30° Neigung in Wien für ein Jahr berechnet. Es ergibt sich eine jährliche Stromproduktion von ungefähr 170 kWh/m².

Pumpen für die Durchmischung des Algensubstrates laufen laut physikalischem Simulationsmodell ungefähr 75% der Zeit mit 1,2 kW für eine Anlage mit 46 m². Daraus ergeben sich spezifische Pumpanforderungen von 171 kWh/m². Falls effizienter Durchmischungslösungen angedacht werden, könnten der Überschussstrom mittels LEDs in Photonen für die Algenproduktion umgewandelt werden. Hier kann davon ausgegangen werden, dass dunkelblaue LEDs von Osram GmbH mit 3,8 μmol/s*W aussenden (Osram 2017). Eine realistische Algenproduktion wird in (Blanken 2013) mit 1 g_{TS} pro mol Photonen abgeschätzt. Daraus würde sich ein maximales jährliches Potential von 23 t/ha in einem abgeschlossenen, gut kontrollierbaren Kultivierungssystem ergeben. Zum Vergleich, die diskutierten Anlagensysteme haben eine simulierte typische monatliche Produktion von 6-8.5 t/ha, 2.8-9.8 t/ha und max. 17.8 t/ha für das PBR-, das OC- sowie das LH-System (siehe Ergebnisse in Abschnitt 2).

Man beachte, dass sich diese Ergebnisse nicht im Einklang mit der bereits diskutierten Abschätzung sind, dass ein PV-basiertes System ca. den halben Ertrag eines optimal arbeitenden Systems mit direkter Belichtung liefern würde. Eine vertiefte Analyse des Ansatzes sowie eine genauere Untersuchung der Verlustfaktoren bei den direkt bestrahlten Systemen werden empfohlen.

2 Ergebnisse

Zentrale Ergebnisse zu den Potenzialuntersuchungen und den technischen Lösungen wurden bereits im Rahmen der Diskussion der Methodik in den Abschnitten 1.3.1 und 1.3.2 dargestellt, siehe insbesondere Tabelle 1 und Tabelle 5.

2.1 Allgemeine Einschätzungen den Projektidee

Zum Projekt gab es Rückmeldungen u.a. auch von einer Beratungsfirma im Bereich der Entwicklung und Betreuung von Einkaufs- und Fachzentren. Diese war zwar durchaus bereit, Daten (insbesondere exemplarische Pläne) zur Verfügung zu stellen, stand der Idee, Parkflächen zur Algenkultivierung einzusetzen, dennoch eher zurückhaltend gegenüber.

Die Hauptquelle zum Einholen von Meinungen waren Vorträge auf Fachveranstaltungen (z.B. Science Breakfast, Vertical-Farming-Event, Algenetzwerk-Treffen). Dabei waren natürlich vor allem Fachleute anwesend, die nur einen Teil der Stakeholder abbilden. Auch auf die Veröffentlichungen, insbesondere die online-Veröffentlichung im *Standard*, gab es positive ebenso wie kritische Reaktionen. Vorherrschende Meinungen zum Projekt waren:

- Sehr positive Beurteilung des „Querdenkens“ in diesem Projekt und des kreativen wissenschaftlichen Schaffen von Konzepten, das dazu anregt, aus den Denkmustern und der festgeschriebenen direkten „wissenschaftlichen Wertschöpfung“ etwas auszuberechnen.
- Die Wirtschaftlichkeit des Konzepts wurde wiederholt in Frage gestellt, zumindest für energetische Zwecke sowie für stoffliche Produkte von geringerem Erlöspotenzial.
- Für offene Systeme wurde die Interaktion mit den Autoabgasen als kritisch beurteilt. Dieses Problem wird sich allerdings mit der voraussichtlichen Transformation des Verkehrssystems in Richtung Elektromobilität wesentlich entschärfen.
- Die Machbarkeit eines gut transparenten, aber rutschfesten und belastbaren Sicherheitsglases, wie es für boden-integrierte Photobioreaktoren notwendig ist (es sei denn, eine andere Lösung wie z.B. Metallgitter, ist sinnvoll einsetzbar) wurde in Frage gestellt. Allerdings wäre so eine Lösung auch für vertikale Farmen speziell in gemäßigten Zonen und den Subtropen, wo das Sonnenlicht limitierter ist, eine wünschenswerte Entwicklung.
- Die Umsetzung eines Demonstrations-Green-P-Parkplatzes wurde als ausgesprochen wünschenswert angesehen.

Mit den nun vorliegenden Ergebnissen (technische Konzepte, Simulationsergebnisse, Wirtschaftlichkeitsanalyse, Ansätze für Nutzung innerhalb eines Stadtsystems) kann die Diskussion mit Stakeholdern in Zukunft allerdings wesentlich fundierter geführt werden.

2.2 Ergebnisse der Simulationsstudien

Im Folgenden werden für die Bedingungen, wie sie in Niederösterreich herrschen die Erträge pro Hektar berechnet, auf Basis jeweils einer Modellanlage mit 20 Einheiten. Dabei wurden verschiedene Parameter variiert, etwa die Art der Temperaturregulierung oder die Größe des Tanks. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Ergebnisse für den Monatsertrag aus dem Simulationsmodell für verschiedene Anlagentypen

Anl.-Typ	Temp.-Reg	Tank	Monatlicher Ertrag (t/ha)				
			Mai	Juni	Juli	August	September
PBR	T=var	-	7.5711	7.6874	8.2193	6.9992	5.9633
	PCM		7.5753	7.6835	8.2479	7.0013	5.9643
	T=fix		7.7403	7.9091	8.5236	7.0790	6.0307
OC	T=var	V _{tank} = 500 l	3.0816	2.8636	2.6447	2.835	3.3816
		V _{tank} = 5000 l	3.3730	3.1357	3.0321	3.1247	3.6190
	T=fix	V _{tank} = 500 l	8.6887	8.6353	8.8971	7.7483	6.9168
		V _{tank} = 5000 l	8.8726	8.8704	8.8705	8.1223	6.8031
LH	T=var	V _{tank} = 500 l	-	-	-	-	-
		V _{tank} = 5000 l	0.96547	1.1289	0.87525	1.0211	1.4959
		V _{tank} = 25000 l	8.7554	8.9605	8.1022	7.8373	7.8494
	T=fix	V _{tank} = 500 l	0.42574	0.43135	0.5005	0.40776	0.35387
		V _{tank} = 5000 l	4.2503	4.25610	5.0025	4.0457	3.5372
		V _{tank} = 25000 l	17.6663	14.6770	17.8006	16.1506	11.7953

Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde für alle drei Technologien eine maximale Algen-Konzentration von 25 g/l gewählt. (Da im logistischen Wachstumsmodell die maximale Konzentration in die Wachstumsrate eingeht, stellt nur ein für alle Technologien gleicher Wert einen fairen Vergleich sicher.)

Angesichts dessen, dass das Modell zahlreiche Vereinfachungen enthält, bei verschiedenen Parametern Schätzungen eingehen und – da das Projekt keine experimentellen Unter-

suchungen beinhaltetete – keine Modellvalidierung durchgeführt werden konnte, sollten diese Ergebnisse nicht vorbehaltlos als präzise quantitative Vorhersagen betrachtet werden. Als Richtwerte und zum Erkennen von grundlegenden Trends und Eigenschaften sollten sie jedoch sehr wohl brauchbar sein:

- Für die in den Boden integrierten Photobioreaktoren (PBR) ist die Abhängigkeit des Ertrags von der Art der Temperaturregulierung sehr gering. Das liegt vor allem daran, dass ein guter Wärmeübergang zum Boden, der auch im Sommer eine große Wärmesenke darstellt, angenommen wurde. Ist dieser Wärmeübergang nicht so gut bzw. die Wärmekapazität des aktiven Bodenbereichs geringer (wie es bei trockenen Böden durchaus der Fall sein kann), dann ist zu erwarten, dass die Temperaturen einen größeren Einfluss auf den Ertrag haben werden und dass Kühlung bzw. allgemein Temperaturstabilisierung durch Phasenübergangsmaterialien (PCM) einen angemessen hohen Ertrag gewährleisten kann.
- Für die offenen Kaskaden (OC) spielt die reduzierte Produktivität aufgrund hoher Temperaturen eine große Rolle. Obwohl in diesem System Verdunstungskühlung zum Tragen kommt, reduziert sich der Ertrag ohne Kühlung gegenüber dem mit Kühlung um einen Faktor zwei bis drei. Die Abhängigkeit von der Tankgröße ist hingegen gering.
- Für die Lichtenrte (LH) hingegen ist die Tankgröße ein wesentlicher Einflussfaktor. Für einen zu kleinen Tank (500 l für 20 Stellplätze) ohne Temperaturregulierung liefert das Modell aufgrund sofortiger Überhitzung der Anlage keine sinnvollen Ergebnisse. Ohne externe Temperaturregulierung ist die Pufferung der Temperatur eine zentrale Funktionalität des Tanks. Daher liefert ein größerer Tank ein überproportional gutes Ergebnis. Ist die Temperatur fixiert, so ist die wichtigste Größe das photoaktive Volumen, das zur Verfügung steht. Hier findet man über einen weiten Bereich ein lineares Wachstum des Ertrags mit der Tankgröße, das allerdings in Sättigung geht, wenn das gesamte einfallende Sonnenlicht genutzt wird (und jede weitere Volumenvergrößerung nur noch zu einer Vergrößerung der nicht photoaktiven Dunkelzone führt).

Mit einem ausreichend großen Tank ist der Ertrag für das System LH hier am größten. Allerdings gingen in das Modell für dieses System auch die meisten Annahmen ein, von denen manche möglicherweise zu optimistisch waren. Ein Ertrag von 7-8 t/ha in einem Monat mit hoher Einstrahlung erscheint aber auf jeden Fall mit jeder der drei Anlagentypen erzielbar.

2.3 Einige Ergebnisse der technoökonomischen Bewertung

Die jährlichen Algenproduktionskosten und ihre Anteile in Investitionsausgaben und Aufwendungen für den Geschäftsbetrieb sind in Abbildung 18 dargestellt. Im Vergleich zwischen den Anlagentypen schneidet das offene Kaskadensystem bei den Produktionskosten am besten ab, während die Lichternte als Pilotanlage mit einem Faktor Fünf teurer zu installieren und zu betreiben ist. Im Vergleich mit einer ersten kommerziellen Anlage (100 ha), ist deutlich zu erkennen, dass sich die Investitionsausgaben besser skalieren lassen als die Aufwendungen für den Geschäftsbetrieb. Das Photovoltaiksystem wird in der vergleichenden Analyse nicht mitberechnet, da es zu keiner signifikanten Algenproduktion in diesem System nach Abzug des Strombedarfs für die Pumpen kommt (siehe Berechnungen in *Exkurs PV-System* auf Seite 52).

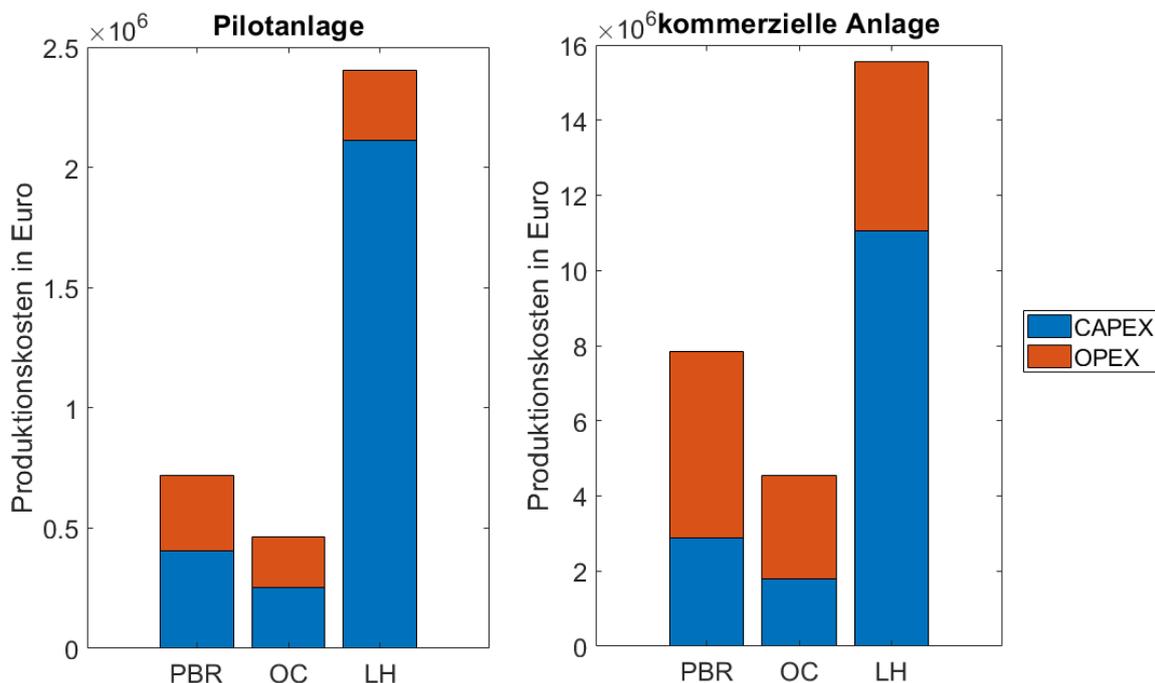


Abbildung 18: Produktionskosten für die Pilot- bzw. die erste kommerzielle Anlagen. Quelle: eigene Berechnung

Bei den Aufwendungen für den Geschäftsbetrieb führen auch bei allen dargestellten Anlagentypen und –größen die Kosten für die Pumparbeit (72%_{OPEX} beim PBR und 28%_{OPEX} bei den anderen beiden Systemen). Es wurde angenommen, dass die Pumparbeit linear skaliert werden muss da bei Algensubstrat der Einsatz von stärkeren Pumpen zu Beschädigungen der Zellen führen kann.

Mit bis zu 27% der OPEX ist die Heiz- und Kühlarbeit an zweiter Stelle (bei OC und LH), während Personalkosten mit 23-42% der OPEX ins Gewicht fallen. Die Produktionskosten belaufen sich für eine erste kommerzielle Anlage bei 12,0 €/kg_{TS} für das PBR-, bei 5,5 €/kg_{TS} für das OC- sowie 8,7 €/kg_{TS} für das LH-System noch vor der Trocknung bzw. Weiterverarbeitung. Im Vergleich dazu fassen (Hingsamer 2012) die Algenproduktionskosten in ihrer Literaturanalyse mit 1,0-5,0 €/kg_{TS} zusammen.

Für die Sensitivitätsanalyse werden Investitionskosten, Stromkosten und Personalkosten variiert. In Abbildung 19 sind die normierten Gesamtkosten (TOTEX) der Anlagen und ihre Veränderungsrate bei Veränderung der Sensitivitäten dargestellt, auf der linken Seite für die Pilotanlagen und auf der rechten Seite für eine erste kommerzielle Anlage in der Größenordnung von 10 ha.

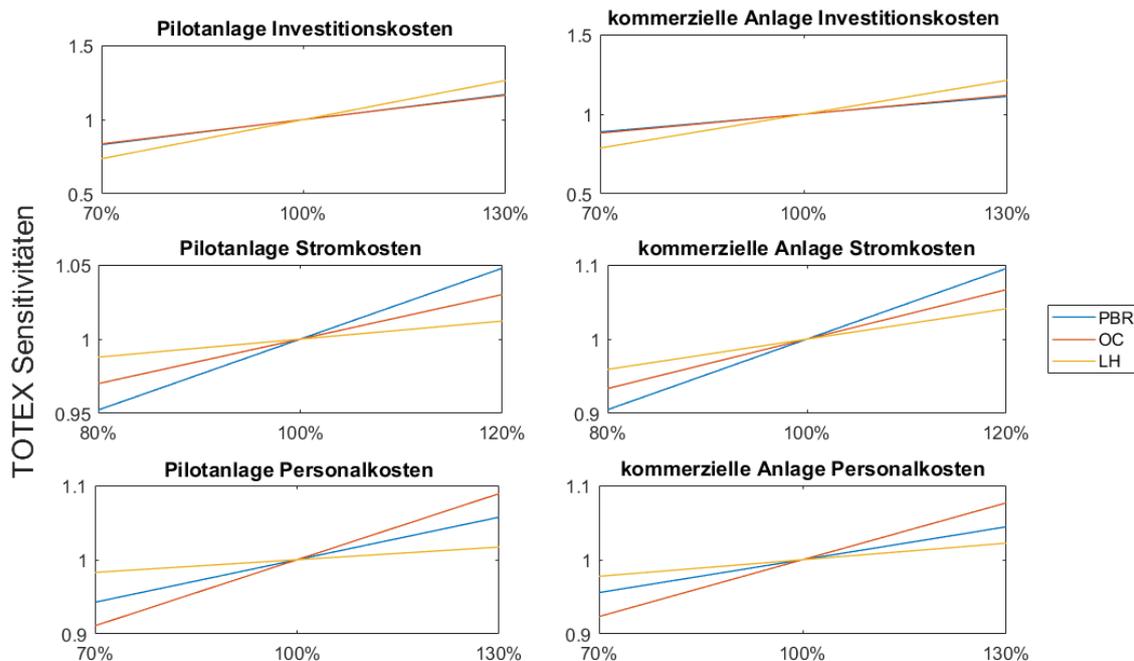


Abbildung 19: Sensitivitätsanalyse für die wichtigsten Kostentreiber, Quelle: eigene Berechnung

Unsicherheiten von $\pm 30\%$ bei den Investitionskosten wirken sich wie zu erwarten am stärksten auf die Gesamtproduktionskosten (TOTEX) der teuersten Anlage, dem Lichterntesystem aus. Mit $\pm 26\%$ Veränderung des TOTEX bei der Pilotanlage und $\pm 21\%$ bei der ersten kommerziellen Anlage verdeutlicht noch einmal das Problem, dass nur die Investitionskosten in unserer Abschätzung die Skalierungseffekte zunutze machen können solange keine Automatisierungsüberlegungen für die Ernte, Wartung sowie effizienzsteigernde Maßnahmen für die Pumpleistung ausgearbeitet werden. Das Variieren der Stromkosten um $\pm 20\%$ resultiert in einer Sensitivität von bis zu $\pm 10\%$ der TOTEX für das PBR System in der Größenordnung einer ersten kommerziellen Anlage. Das liegt vor allem an den Kosten für das Pumpsystem, das bei den kleinsten, abgeschlossenen Systemeinheiten (eine PBR-System Einheit sind zwei Parkplätze) ebenfalls am wenigsten gut skalierbar ist. Die Personalkosten tragen andererseits bei dem offenen Kaskadensystem am meisten zu den TOTEX bei. Werden die Stundenlohnkosten um $\pm 30\%$ variiert, so ändern sich die TOTEX um bis zu $\pm 9\%$ im Falle der offene Kaskadenpilotanlage.

Als Szenarien werden vor allem unterschiedliche Konzepte der Integration in das Stadtquartier diskutiert: Produktionsseitig kann dabei die Abwärmenutzung umliegender Gebäude oder Industrien genannt werden. Mit 2% bzw. 16% der TOTEX trägt die Wärmebereitstellung bei den im Boden verlegten horizontalen PBRs sowie bei den offenen Kaskadensystemen (erste kommerzielle Anlage) unterschiedlich zu den Produktionskosten bei. Diese Kennzahlen beziffern auch gleichzeitig das maximale Einsparungspotential im Falle einer saisonal abgestimmten Abwärmenutzung.

Die Nutzung von Ab- und Grauwasser kann einerseits Anforderungen zur Zudüngung mit NPK-Dünger minimieren, andererseits aber auch verdampftes Wasser kostengünstig ersetzen. Kosten für die Düngung sind, je nach produzierter Algenbiomasse, zwischen 64.000 € und 76.000 € (für das PBR- und das LH-System, kommerzielle Anlage jeweils). Verdunstung spielt vor allem bei dem offenen Kaskadensystem eine Rolle. Hier werden aus dem physikalischen Modell verbrauchte Wassermengen von 41 t für die Grundrechnungseinheit (112 m²) simuliert. Bei der Größenordnung einer ersten kommerziellen Anlage (10 ha) würde das 36.170 t verdunstetem Wasser gleichkommen was ebenfalls ungefähr 38.340 € zusätzlichen Kosten entsprechen würde (basierend auf einem Wasserpreis von 1,06 €/m³ von (Hingsamer 2012)). Abgesehen davon, dass speziell bei einem offenen System die Geruchsbelästigung minimiert werden müsste, sind die Einsparungspotentiale der Nutzung von Ab- und Grauwasser im Vergleich zu den berechneten TOTEX nicht signifikant.

Biomasse- bzw. Konzeptvalorisierung:

Für die Verwertung der produzierten Biomasse werden stoffliche und energetische Nutzungsmöglichkeiten diskutiert und berechnet. Prozesstechnische Parameter sowie Umwandlungskosten sind von (Hingsamer 2012) abgeleitet. Allen berechneten Verwertungsmöglichkeiten liegt eine primäre Flokkulation des Algensubstrates zugrunde um den Trockensubstanzanteil von 0.25 %_{TS} auf 5 %_{TS} anzuheben. Für die Produktion von trockenem Algenpulver, von Algenöl sowie bei der Veresterung zu Biodiesel (abgekürzt mit DRY, OIL, VES jeweils), kommt außerdem eine Zentrifuge zum Einsatz, um den Algenanteil von 5 %_{TS} auf 25 %_{TS} zu heben. Erst dann kommt entweder die Trocknung mit Heißluft oder die Ölextraktion und bei Biodieselproduktion anschließend zur Ölextraktion noch eine Veresterungsstufe zum Einsatz. Bei der Methanisierung wird das Algensubstrat mit 5 %_{TS} direkt in eine Biogasanlage geleitet und das produzierte Biogas zu Biomethan aufbereitet.

Die von (Hingsamer 2012) abgeleiteten Parameter sind im Annex dieses Berichtes aufgelistet. Trockenem Algenpulver sowie Algenöl (Soley 2017) können zur Zeit mit 55 €/t und ungefähr 500 €/t bepreist werden. Biomethan und Biodiesel werden mit 0,68 €/m³ und 1 337 €/t angenommen. Neben Biodiesel fallen bei der Veresterung auch noch Glycerin und Futtermittel an, Preise von 150 €/t bzw. 127 €/t werden ebenfalls von (Hingsamer 2012) übernommen. In Abbildung 20 werden mögliche Einnahmen und Kosten der Umwandlungsmethoden basierend auf dem Output der Anlagentypen dargestellt.

In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass die Trocknung, die Produktion von Algenöl sowie die Veresterung zu Biodiesel mit Kosten in ähnlichen Größenordnungen (Mittelwerte von $9,9 \cdot 10^3$ € bis $27,4 \cdot 10^3$ € für PBR und LH jeweils in der Pilotanlage) verbunden ist während die Produktion von Biomethan durch anaerober Vergärung um einiges kosteneffizienter zu bewerkstelligen ist. ($3,0 \cdot 10^3$ € bis $8,3 \cdot 10^3$ € für PBR und LH jeweils in der Pilotanlage).

Im Gegensatz dazu stehen die berechneten Einnahmen; Einnahmen für reines Algenpulver und Algenöl sind geringer (!) als die Kosten die für die Trocknung und Extraktion aufgebracht werden müssen. Erst durch die Veredelung zu Biodiesel können geringe positive Bilanzen von $2,5$ - $6,9 \cdot 10^3$ € für PBR und LH jeweils in der Pilotanlage, bzw. $54,4$ - $151,1 \cdot 10^3$ € für PBR und LH jeweils in der kommerziellen Anlage berechnet werden. Durch die Methanisierung können $87,8$ - $244,2 \cdot 10^3$ € für PBR und LH jeweils in der kommerziellen Anlage berechnet werden.

Diese Bilanzabschätzungen betreffen allerdings nur die Algenproduktaufbereitungskosten sowie mögliche Einnahmen daraus. Das Algenproduktionssystem selbst muss das Rohmaterial zu diesen Kosten produzieren können um wirtschaftlich dargestellt werden zu können. Ein Vergleich mit Abbildung 18 macht deutlich, dass bei Produktionskosten zwischen 8 und $16 \cdot 10^6$ € diese Parität bei weitem nicht gegeben ist.

Andere Valorisierungsmethoden müssen daher angedacht werden: Ohne Vorbehandlung, und unter der Prämisse der Integration in ein innovatives Stadtquartier könnte das Algensubstrat für die Produktion von Fischen in aquaponischen Anlagen genutzt werden (Resh, 2012). Hier können Preise für Fischfutter zwischen 2.000 €/t und 4.000 €/t angenommen werden⁵ (TechRev 2017). Voraussetzung ist, dass Fischbecken in der Nähe des Parkplatzes zur kommerziellen Züchtung von Speisefischen vorhanden sind. Das würde auch die Personalkosten für Algenernte und Anlagenwartung minimieren, da das Algensubstrat zum Beispiel einfach in die Fischbecken abgelassen werden könnte.

Modifizierungen zu einem kontinuierlicheren Produktionssystemen wären trotzdem noch erforderlich, da die Erntezeiten bis jetzt mit ungefähr einmal im Monat berechnet sind und die Nährstoffzufuhr in kürzeren Abständen vorstattengehen muss.

Eine weitere Einkommensquelle soll mit der eigentlichen Nutzung der Fläche, und zwar mit der Nutzung als Parkplatz diskutiert werden; Während die Kosten der Parkraumbewirtschaftung in Städten eher in der Literatur beleuchtet wird, konnten keine Abschätzungen zu den Kosten von großflächigen Parkplätzen vor Einkaufszentren, die in den vorliegenden Berechnungen und Bericht primär untersucht werden, gefunden werden.

⁵ Persönliche Kommunikation Aquaponikexperte Alexander Penzias, 25.09.2017

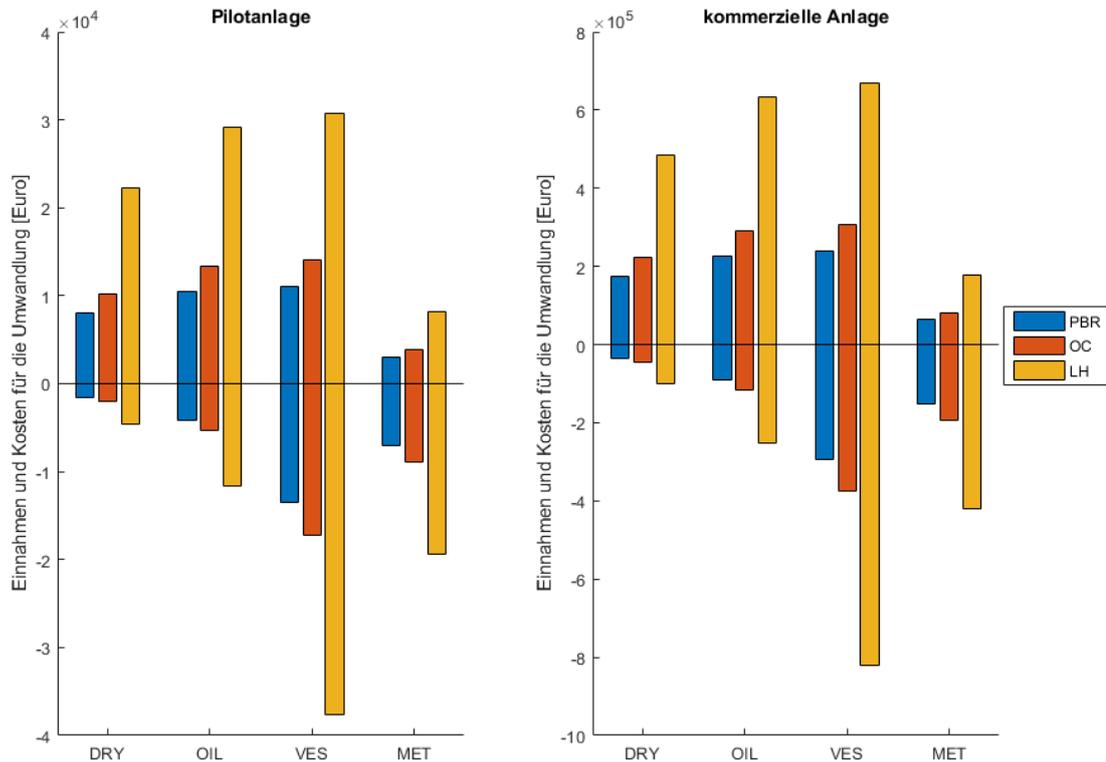


Abbildung 20: Einnahmen (negative Werte) und Kosten (positive Werte) für die Umwandlung der Algenbiomasse in Produkte zur stofflichen und energetischen Nutzung. Produktion von trockenem Algenpulver (DRY), von Algenöl (OIL), Veresterung zu Biodiesel (VES) bzw. Produktion von Biomethan (MET) in den vier Reaktortypen.

Für die horizontalen, abgeschlossenen Photobioreaktoren ist die Installation bei einem entstehenden Einkaufszentrum vorteilhaft, da noch nicht versiegelte Fläche direkt umgewidmet werden kann. Für die anderen beiden Systeme kann auch eine Überdachung der Parkplätze und Nachrüstung zur Algenproduktion zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Diese Unterschiede, sowohl als auch der Unterschied in der Funktionalität zwischen Überdachung und freiliegenden Parkplätzen sowie auch Parkplätzen mit Kühleffekten (Evaporation bei den offenen Systemen) müssen bei einer standortspezifischen Wirtschaftlichkeitsberechnung bedacht werden. Die wirtschaftliche Bedeutung der sichtbaren Doppelnutzung der Parkplätze als Werbemaßnahme für die Einkaufszentren würde dabei aber wahrscheinlich im Vordergrund stehen.

2.4 Einbettung in das Programm Stadt der Zukunft

Wie sich gezeigt hat, ist ein rein energieorientierter Zugang zur Mikroalgenkultivierung auf Parkplätzen (bzw. allgemein Verkehrsflächen) nicht zielführend. Dennoch hat das hier untersuchte Konzept das Potenzial, einen Beitrag zum Ziel resilienter Städte mit hoher Ressourcen- und Energieeffizienz, verstärkter Nutzung erneuerbarer Energieträger sowie hoher Lebensqualität zu leisten.

Dabei ist insbesondere der Aspekt von auf kurzem Raum weitgehend geschlossenen Stoffströmen hervorzuheben. Bei entsprechender Einbettung in ein urbanes Gesamtkonzept können Abwässer (insbesondere Grauwasser) und lokale CO₂-Emissionen direkt vor Ort genutzt werden, um Produkte zu erzeugen, die ebenfalls wieder lokal genutzt werden können (z.B. Dünger für *Urban Gardening* oder Fischfutter für aquaponische Kulturen).

Für die Erzeugung sehr hochwertiger Produkte (Lebensmittelzusätze, Farbstoffe) ist, wie diskutiert, die Nutzung lokaler Abfallströme kaum möglich. Die lokale Produktion von entsprechend werthaltigen Produkten ermöglicht aber zumindest sehr kurze Transportwege, wenn vor Ort ein entsprechender Absatzmarkt zugänglich ist.

Nicht zu unterschätzen ist zudem die Möglichkeit, insbesondere durch bodenintegrierte Photobioreaktoren eine ansprechende „grüne“ Gestaltung von Verkehrsflächen zu erreichen und so zu einem freundlichen Stadtbild beizutragen. Dieser Aspekt ist bei Überdachungssystemen weit weniger ausgeprägt. Die Verdunstungskühlung in offenen Systemen könnte bei geringer Luftfeuchtigkeit jedoch zur besseren Temperierung der Parkplätze beitragen.⁶

Wie das Projekt deutlich gezeigt hat, sind noch viele Fragen offen. Eine Fortführung der Forschungsaktivitäten in diesem Bereich (siehe Empfehlungen in Abschnitt 4) hätte das Potenzial, zu Aufbau der Technologieführerschaft österreichischer Unternehmen in diesem Bereich sowie zu einem Wissensvorsprung der involvierten Forschungsinstitute beizutragen.

Da die verbesserte Nutzung urbaner Flächen angesichts von Urbanisierung, Klimawandel und Ressourcenknappheit ein sehr aktuelles Thema ist, ist von starker internationaler Aktivität in diesem Bereich auszugehen. Eine Weiterführung des Projekts in Österreich wäre also anzuraten, um den hier erarbeiteten Know-how-Vorsprung nicht schnell wieder einzubüßen.

⁶ Bei ohnehin hoher Luftfeuchtigkeit ist die Verdunstung weniger effektiv und ohnehin gar nicht wünschenswert, da sie die Kühlgrenztemperatur erhöht und damit die Hitze „unangenehmer“ macht. Entsprechend ist bei der Auswahl der Technologie auch auf solche klimatischen Gegebenheiten Rücksicht zu nehmen.

3 Schlussfolgerungen

3.1 Technische Aspekte

Aus den im Kapitel 1.3.1 erhobenen Flächendaten ist ersichtlich, dass ein enormes technisches Potential für die Umsetzung dieses neuartigen Ansatzes der Nutzung von Verkehrsflächen vorhanden ist. Jedoch sind noch einige technische Herausforderungen bis zu einer denkbaren Umsetzung zu lösen.

So sind die Anforderungen bei den Bodenintegrierten Photobioreaktoren vor allem an die befahrbare Glasoberfläche enorm. Die Oberfläche muss neben der hohen Abriebfestigkeit einen ausreichenden Grip bei allen Witterungsbedingungen für Fahrzeuge und Menschen bieten. Die Glasplatte muss die sehr hohen mechanischen Kräfte, welche bei beispielsweise einer abrupten Bremsung eines Fahrzeuges auftreten ohne Beschädigung oder Bruch aushalten. Die *Open Cascades* sind, was die technischen Anforderungen betrifft, sehr einfache Systeme. Bei diesem System besteht die Herausforderung darin, die Temperatur der Algensuspension so weit zu temperieren, dass es zu keinen Ausfällen in der Produktion durch zu hohe Temperaturen kommt. Ein Teil der Kühlung wird durch eine natürliche Verdunstungskühlung bewerkstelligt, die Simulation zeigt aber, dass mit einer zusätzlichen Kühlung weitaus höhere Erträge erzielbar sind.

Bei den Lichternte Modulen müssen die Kollektor Spiegle, welche für das Einfangen und die Bündelung des Sonnenlichtes zuständig sind sehr exakt dem Sonnenstand nachgeführt werden. So kann es bereits bei kleinen Ungenauigkeiten zu einem Ausfall der Lichtversorgung der Algensuspension im Tank kommen. Die exakte Nachführung stellt somit einen Schlüsselparameter bei der Lichternte dar.

Das entwickelte Simulationsmodell liefert, verglichen mit bestehenden Anlagen zur Mikroalgenzucht durchaus plausible Werte. Jedoch ist anzumerken, dass das Modell eine Vielzahl von Annahmen und Vereinfachungen beinhaltet, welcher in vieler Hinsicht sehr grob sind. Daher sollten die Ergebnisse aus der Simulation für eine erste Abschätzung der Produktivität der jeweiligen technischen Lösung an einem geplanten Standort herangezogen werden, jedoch nicht zur exakten Auslegung einer Anlage. Das gilt insbesondere für die Lichternte Systeme, wo die meisten Annahmen getroffen werden mussten und die wenigsten Vergleichsdaten einer realen Anlage vorhanden sind.

3.2 Wirtschaftliche Aspekte

Die Anlagenkonzepte wurden einer ersten Untersuchung ihrer generellen Wirtschaftlichkeit unterzogen und deren kostentreibender Faktoren sowie Rahmenbedingungen für eine wirtschaftlich sinnvolle Umsetzung diskutiert. Da es sich bei den besprochenen Parkplatzalgenkonzepten um eine Innovation handelt, die Kosten für erste Labor- und Pilotanlagen abgeschätzt werden, und die Anlagen nicht nur zur Produktion von Algen sondern auch zur Parkplatznutzung optimiert sind, sind die zu erwartenden Kosten höher als bei vorhandenen, kommerziellen Anlagen. Im Vergleich zwischen den Anlagentypen schneidet das offene Kaskadensystem bei den spezifischen Produktionskosten (€/t Algensubstrat bzw. Trockenmasse) am besten ab, während die Lichternte als Pilotanlage mit einem Faktor fünf teurer in Installation und Betrieb ist. Der geschlossene, horizontale Photobioreaktor hat mit höheren Investitions- und Betriebskosten als das offene Kaskadensystem und mit der niedrigsten Produktivität die höchsten spezifischen Produktionskosten, während das Lichterntesystem zwar am teuersten zum Installieren ist, allerdings durch eine hohe Produktivität nur ungefähr ¼ höhere spezifische Produktionskosten als das offene Kaskadensystem aufweist.

Bei den Aufwendungen für den Geschäftsbetrieb führen bei allen dargestellten Anlagentypen und –größen die Kosten für die Pumparbeit. Im Vergleich zwischen Pilotanlagen (0,42 ha) und einer ersten kommerziellen Anlage (10 ha), ist außerdem deutlich zu erkennen, dass sich die Investitionsausgaben besser skalieren lassen als die Aufwendungen für den Geschäftsbetrieb. Das liegt vor allem daran, dass soweit keine Automatisierungsüberlegungen für die Ernte, Wartung sowie effizienzsteigernde Maßnahmen für die Pumpleistung ausgearbeitet wurden. Zusätzlich fällt auf, dass sich die Größe der kleinsten Installationseinheit (bei den PBR zwei Parkplätzen, bei den OC-System z.B. 6 oder 12 Parkplätze) sich weiteres negativ auf die Pumpkosten aber auch auf die Personalkosten für Ernte und Wartung auswirken. Unsicherheiten in den Personalkosten bzw. Personalaufwand tragen bei den offenen Kaskadensystemen den größten Anteil der Produktionskosten, Einsparungspotentiale bzw. Risiken bei variierenden Personalkosten und –aufwand sind daher bei diesen Systemen am ehesten zu bedenken.

Die Simulation der Aufbereitung des Algensubstrates zeigt, dass Einnahmen durch den Biodiesel- und Biomethanverkauf nicht die Algensubstratkosten decken können und sogar um einen Faktor 40 bis Faktor 140 gesteigert werden müssen um die Anlagenkonzepte wirtschaftlich abbilden zu können. Ökonomisch sinnvoll können die Anlagen daher nur durch die Integration in ein umfassenderes urbanes Konzept dargestellt werden;

Produktionsseitig zeigt die Wirtschaftlichkeitsbewertung, dass eine Abwassernutzung für Düngerbereitstellung oder zur Substitution von verdampftem Wasser nur ein verschwindendes Potential mit sich trägt. Andererseits könnte sich die Abwärmebereitstellung von Prozessen bzw. Raumwärmebereitstellung aus der Umgebung vor allem bei den offenen Kaskadensystemen am besten auf die Bilanz auswirken.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojekts haben klar weiteren Forschungsbedarf aufgezeigt:

Verfeinerung und Kalibrierung des Simulationsmodells

Um exakte Aussagen über die Standortabhängige Produktivität der einzelnen Technologien mithilfe des Simulationsmodells treffen zu können, muss dieses noch weiter verfeinert und kalibriert werden. Aktuell eignet sich das Modell sehr gut für eine grobe erste Abschätzung, nicht aber für eine exakte Berechnung. Vor allem das Modell der Lichternte würde eine experimentelle Kalibrierung benötigen. Bei diesem Modell fehlen Vergleichswerte von realen Anlagen gänzlich, was eine Abschätzung der Plausibilität der Simulationsergebnisse sehr erschwert. Diese Kalibrierung ist auf jeden Fall zu empfehlen, bevor der Aufbau einer Demoanlage mit dieser Technologie geplant wird.

Experimentelle Untersuchungen

Die Weiterentwicklung des Konzepts würde wesentlich von experimentellen Untersuchungen profitieren. Diese sollten parallel zur bereits diskutierten Verfeinerung des Modells erfolgen und dazu beitragen, Aspekte des Modells zu kalibrieren und zu validieren.

Insbesondere für das Lichternte-System, den offenbar investitionsintensivsten Ansatz sollten zuerst Untersuchungen in kleinem Maßstab durchgeführt werden, um das Modell zu verbessern, bevor eine reale Demo-Anlage errichtet wird. Bei den beiden anderen Systemen (PBR und OC) erscheint dieser Aspekt weniger kritisch. Dennoch werden auch für diese beiden Systeme experimentelle Voruntersuchungen (z.B. von realen Verdunstungsraten und Wärmeübergängen im Boden) empfohlen.

Labormaßstab Kostenpunkte:

Um eine Markteinführung der Anlagenkonzepte zu ermöglichen, ist es zunächst notwendig die technologische Machbarkeit zu demonstrieren. Investitionskosten für einen Prototypen liegen dabei zwischen 20.000 € und 100.000 € für das PBR- und das LH-System (siehe Abbildung 19) für ein Äquivalent von zwei bzw. vier (überdachten) Parkplätzen. Das offene Kaskadensystem mit einer Überdachung von zehn Parkplätzen ist mit ungefähr 30.000 € abgeschätzt. Jährliche variable Kosten können mit ungefähr 100.000 € berechnet werden (siehe Berechnungsbasis in den Abschnitten 1.3.4 und 2.3).

Typischerweise überwiegen bei den variablen Kosten hier die Personalkosten, auch in Bezug auf Kosten für die Forschung und Entwicklung. Durch eine strategische Wahl möglicher Firmenpartner können Investitionskosten noch minimiert werden, Personalkosten müssten allerdings durch eine genaue Projektplanung für eine Demonstrationsprojektlaufzeit verringert werden. Damit wäre eine Demonstration eines Prototypen als kleineres kooperatives F&E-Projekt grundsätzlich möglich.

Um ein (oder die) Anlagenkonzept(e) weiterzuentwickeln ist es notwendig, ein erstes Demonstrationsprojekt zu konzeptualisieren. Dies könnte in Form eines kooperativen F&E-Projektes erfolgen und würde mit zwei bis drei Jahren und mit ungefähr 200.000-300.000 € an Projektkosten beziffert werden. Zur Minimierung der Kosten und zur Maximierung des Nutzen und der Verwertung wären hier strategische Partner aus der Industrie vorteilhaft. *Verwertungsseitig* sind zwei Modelle angedacht, deren weitere Untersuchung empfohlen wird:

Kopplung mit Aquakulturen:

Das produzierte Algensubstrat könnte direkt für die Produktion von Fischen in Aquakulturen verwendet werden. Voraussetzung ist, dass Fischbecken in der Nähe des Parkplatzes zur kommerziellen Züchtung von Speisefischen vorhanden sind. Das würde auch die Personalkosten für Algenernte und Anlagenwartung minimieren, da das Algensubstrat zum Beispiel einfach in die Fischbecken abgelassen werden könnte. Modifizierungen zu einem kontinuierlicheren Produktionssystem wären trotzdem noch erforderlich, da die Erntezeiten bis jetzt mit ungefähr einmal im Monat berechnet sind und die Nährstoffzufuhr in kürzeren Abständen vorstattengehen muss. Durch ein automatisiertes Ablasssystem wäre diese Modifizierung allerdings schon relativ leicht durch variierende Produktionszyklen der Systemeinheiten zu bewerkstelligen. Preise für Fischfutter variieren stark je nach Qualität und Nachfrage, eine wirtschaftliche Darstellung der Konzepte kann allerdings erwartet werden vor allem bei abgeschlossenen Produktionssystemen (PBR oder LH-System) in denen die Algenqualität i.A. gesteuert werden kann. Allerdings ist den Autoren zurzeit noch kein urbaner Standort in Österreich mit der nötigen Kombination bekannt. Im Sonnwendviertel in Wien ist für 2018 der „grüne Markt“ geplant, der neben Wohnungen auch einen Markt für lokale Produkte und eine aquaponische Anlage mit Speisefisch- und Gemüseproduktion beherbergen soll. Die Möglichkeit der Erweiterung mit Parkplatzalgenproduktion soll über dieses Projekt hinaus diskutiert werden.

Parkplatzbranding für nachhaltige Einkaufszentren:

Die eigentliche Nutzung der Flächen als Parkplätze sollte außerdem auch als Haupteinkommensquelle diskutiert werden. Der vorliegende Bericht diskutiert hier Algenproduktionssysteme, die bei der Errichtung eines Einkaufszentrums mitgebaut werden müssten (PBR-Systeme) und Systeme, die auch als zusätzliche Abschattungsmaßnahmen (und zusätzliche Kühlmaßnahmen durch Evaporation) im Nachhinein nachgerüstet werden könnten (OC- und LH-System). Die Wirtschaftlichkeit weder von Parkplätzen für Einkaufszentren noch von Werbemaßnahmen wurden in diesem Projekt quantifiziert, da diese Überlegungen den zeitlichen und finanziellen Rahmen sprengen würden. Vor allem aber auch im Hinblick auf eine mögliche Realisierung im Sonnwendviertel sollte das Branding des „grünen Marktes“ mitbedacht werden.

5 Verzeichnisse

5.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufteilung der Verkehrsflächen.....	19
Abbildung 2: Komponenten einer Algenkultivierungsanlage	21
Abbildung 3: Prinzipskizzen der drei näher untersuchten Varianten	25
Abbildung 4: mögliches Schema horizontale Photobioreaktoren, übersetzt von (Molina 2001)	27
Abbildung 5: Prinzip des "Thin-Layer" Systems in Anlehnung an die Anlage in Trebon – „Open Cascades“ (Academy of Sciences of Czech Republic) (Panuschka 2016, S. 15)	28
Abbildung 6: Photobioreaktor mit optischen Fasern: Entwurf Anlagenaufbau (links); Schema Photobioreaktor für Mikroalgen (rechts) (Xue 2013, Fig. 1), siehe auch Abbildung 7 für Elemente 10 bis 16.	29
Abbildung 7: Schema eines luftbetriebenen PBR mit optischen Fasern 3D-Ansicht (links); Querschnitt (mittig); Konzept mit Pumpenbetrieb (rechts) (Xue 2013, Fig. 2 & 3); Beschriftung siehe Abbildung 6	30
Abbildung 8: Anlagenschema u. Kollektoren SAT GmbH (SAT 2017)	30
Abbildung 9: Schema Photobioreaktor mit optischen Fasern: Reaktor (links); Kollektor (rechts) (Ogbonna 1999, Fig. 1 & 2).....	30
Abbildung 10: CAD-Modell für in den Boden integrierte Photobioreaktoren (Zellinger 2017) 31	
Abbildung 11: CAD-Modell für eine <i>Lichternte</i> Überdachung (Zellinger 2017).....	31
Abbildung 12: CAD-Modell für eine <i>Open-Cascades</i> -Überdachung (Zellinger 2017)	32
Abbildung 13: Übersicht der Anwendungsfälle	33
Abbildung 14: Ein beispielhafter Simulationslauf (31 Tage, jeweils eine Ernte ca. 8,5 sowie ca. 22,5 Tage nach Simulationsstart). Dargestellt sind die solare Einstrahlung (oben), die Temperaturen der Systemkomponenten (Mitte) und die Algen-Biomasse in der Suspension (unten).....	38
Abbildung 15: Abhängigkeiten innerhalb des Simulationsmodells.....	38
Abbildung 16: Stöchiometrische Massenbilanz Mikroalge (JoannRes 2012, S. 29)	41
Abbildung 17: Annahmen aus (Panuschka 2016, S. 29).....	41
Abbildung 18: Produktionskosten für die Pilot- bzw. die erste kommerzielle Anlagen. Quelle: eigene Berechnung.....	56
Abbildung 19: Sensitivitätsanalyse für die wichtigsten Kostentreiber, Quelle: eigene Berechnung.....	57
Abbildung 20: Einnahmen (negative Werte) und Kosten (positive Werte) für die Umwandlung der Algenbiomasse in Produkte zur stofflichen und energetischen Nutzung. Produktion von trockenem Algenpulver (DRY), von Algenöl (OIL), Veresterung zu Biodiesel (VES) bzw. Produktion von Biomethan (MET) in den vier Reaktortypen.	60

5.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Flächeninanspruchnahmen in Österreich 2015.....	18
Tabelle 2: Qualität von österreichischen Verkehrsflächen	20
Tabelle 3: Gegenüberstellung der Ernteverfahren	22
Tabelle 4: Herausforderungen in der Algenkultivierung allgemein.....	23
Tabelle 5: Vor- und Nachteile der in Betracht gezogenen Lösungsvarianten.....	26
Tabelle 6: Eigenschaften der einzelnen Komponenten für die untersuchten Technologien ..	34
Tabelle 7: Investitionskostenkomponenten für den tubulären, horizontalen Photobioreaktor, Quelle: Firma Schott AG und eigene Abschätzung	47
Tabelle 8: Investitionskostenkomponenten für das offene Kaskadensystem. Quellen; Carpor GmbH, (Acrylics, 2017) und eigene Abschätzungen	48
Tabelle 9: Investitionskostenkomponenten für das Lichterntesystem. Quellen; Carpor GmbH,	48
Tabelle 10: Investitionskosten für das Photovoltaiksystem. Quellen: (Held 2014), Carpor GmbH, Ponix Systems GmbH.....	49
Tabelle 11: Zusammenfassung der Investitionskosten der unterschiedlichen Anlagensysteme. Quelle: eigene Berechnung, siehe Text	49
Tabelle 12: Parameter zur Berechnung der jährlichen Gesamtausgaben.....	51
Tabelle 13: Ergebnisse für den Monatsertrag aus dem Simulationsmodell für verschiedene Anlagentypen	54
Tabelle 14: Kosten und Energieverbrauch von unterschiedlichen Umwandlungsmethoden .	71
Tabelle 15: Massenbilanzen und Preise für diverse Algenprodukte	73

5.3 Literaturverzeichnis

Alibaba 2017

Alibaba – Polypropylen tank – Wasseraufbereitung – Produkt ID: 60531328252:

<https://german.alibaba.com/p-detail/polypropylene-tank-60531328252.html>

(accessed 2017-08-08)

Auer 2017

AUER, 2017. IBC Container mit Kunststoffplatte, IBC 1000 K 225.80-UN: https://www.auer-packaging.com/at/de/IBC-Container-mit-Kunststoffpalette/IBC-1000-K-225.80-UN.html?customer_type=private (accessed 2017-08-08)

Blabensteiner 2011

Blabensteiner, R.: *Modellierung eines Wärmeschichtspeichers mit Solareinbindung* (Bachelorarbeit). Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, Wien 2011.

Blanken 2013

Blanken, W., Cuaresma, M., Wijffels, R.H., Janssen, M.: *Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost*. Algal Research, Vol. 2 (2013) p. 333–340

Chisti 2007

Chisti Y.: *Biodiesel from microalgae*, Biotechnol Adv. 2007 May-Jun; 25(3):294-306. Epub 2007 Feb 13, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

Cordell 2009

Cordell, D., Drangert, J. O., White, S. *The story of phosphorus: Global food security and food for thought*. Global Environmental Change (2009): 19(2): S.292-305.

Doucha 2009

Doucha, J.; Lívanský, K.: *Outdoor open thin-layer microalgal photobioreactor: potential productivity*. Journal of Applied Phycology, Vol. 21, Issue 1, Sp. 111-117; 2009, <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9336-2>

Fleischhacker 2017

Fleischhacker, A.: *Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsrechnung* (Vorlesungsskriptum, TU Wien, 2017)

FrzBot 2015

Wissenschaftsportal der französischen Botschaft in Deutschland: *Frankreich, Pionier der Solarstraßen?* 17. Dezember 2015 <https://www.wissenschaft-frankreich.de/energie/erneuerbare-energie/frankreich-pionier-der-solarstrassen/>
Letzter Aufruf 2018-06-04

Hartner 2015

Hartner M., Ortner A., Hiesl A., Haas R.: *East to west – The optimal tilt angle and orientation of photovoltaic panels from an electricity system perspective*. Applied Energy, Vol. 160 (2015) p. 94–107

Held 2014

Held A., Ragowitz M., Sensfuss F., Pudlik M., Pfluger B., Resch G., Olmos L., Ramos A., Rivier M., Kost C., Senkpiel C., Frank P., Veum K., Slobbe J., Joode J.: *Estimating energy system costs of sectoral RES and EE targets in the context of energy and climate targets for 2030*. (2014)

Hingsamer 2012

Hingsamer M., Könighofer K., Jungmeier G., Pucker J., Canella L., Pena N., Rauc, R., Flammini A., Hrbek J., Bochmann G., Drosch B., Sonnleitner A., Bacovsky D., Ludwiczek N.: *Endbericht ALGAE&ENERGY:AUSTRIA Algen - eine zukünftige erneuerbare Energiequelle? Stand der Technik und Zukunftsperspektiven für das österreichische Energiesystem*. Joanneum Research, Graz 2012

Jenkins 1997

Jenkins B.M.: *A comment on the optimal sizing of a biomass utilization facility under constant and variable cost scaling*. Biomass and Bioenergy, Vol. 13 (1997) p 1–9

JoannRes 2012

Joanneum Research Resources (Hrsg.): *ALGAE&ENERGY:AUSTRIA Algen – eine zukünftige erneuerbare Energiequelle? Stand der Technik und Zukunftsperspektiven für das österreichische Energiesystem*. Endbericht; FFG-Projekt-Nr: 825403; Graz; Juni 2012.

Koch 2013

Koch M.: *Ingenieurhydrologie I* (Vorlesungsskript); Universität Kassel, FG Geohydraulik und Ingenieurhydrologie Universität Kassel; Kassel (GER); 2013.

Molina 1999

Molina, E.; Fernández, J.; García Camancho, F., Chisti Y.: *Photobioreactors: light regime, mass transfer and scaleup*; Journal of Biotechnology, Vol. 70 (1999)

Molina 2001

Molina, E.; Fernández J., F. G, Ación; F. G.,; Chisti Y.: *Tubular photobioreactor design for algal cultures*; Journal of Biotechnology, Vol. 92 (2001).

Ogbonna 1999

Ogbonna J. C., T. Soejima T.,; H. Tanaka H.: *An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors*. Journal of Biotechnology, Vol. 70; 1999; S. 289-297; Download am 2017-01-25 von <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168165699000814>.

Osram 2017

OSRAM, 2017. OSRAM – the OSOLON family: deep blue, hyper red and far red.

Panuschka 2016

Panuschka S. B.: *Design einer Demonstrationsanlage zur photoautotrophen PHB Produktion* (Maserthesis).; Universität für Bodenkultur – Department für Agrarbiotechnologie, Institut für Umweltbiologie (Hrsg.);, Wien; 2016.

Quinn 2011

Quinn J., de Winter L., Bradley T.: *Microalgae bulk growth model with application to industrial scale systems*. Bioresource Technology, Vol. 102, (2011); p. 5083–5092.

Radweg 2015

Global Magazin: *Solar-Radweg in Holland übertrifft Erwartungen*, <http://globalmagazin.com/themen/klima/solar-radweg-bei-amsterdam-uebertrifft-erwartungen>
Erstellt: 2016-11-15, letzter Aufruf 2018-06-04

Regional 2015

Regionalinformation der Grundstücksdatenbank (Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen) aufbereitet durch das Umweltbundesamt, 31.12.2015

Resh 2012

Resh H.M.: *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*, Seventh Edition. CRC Press, 2012.

SAT 2017

Homepage der Sun Algae Technology GmbH (SAT): <http://sunalgae.com/technology/>;
(letzter Zugriff: 2017-02-06).

Schipfer 2012

Schipfer, F.: *Physics of the urban production of algae in photo-bioreactors for the utilization in vertical farms* (Diplomarbeit, Studienrichtung: Physik); Technische Universität Wien; Wien, 2012.

Schramek 2009

H. Recknagel H., Schramek E.-R. (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik – einschließlich Wasser- und Kältetechnik.*; 74. Auflage; Oldenbourg Industrieverlag, München (GER), 2009.

SolarRoad 2016

Projekt Solar Roadways, © 2016, <http://www.solarroadways.com/>
letzter Zugriff 2018-04-06

Soley 2017

Soley Institute 2017 – Microalgae Oil Trade – Soley Biotechnology Institute
<http://www.soleybio.com/oil-trade.html> (accessed 2017-08-16)

Sonnleitner 2014

Sonnleitner A, Bacovsky D, Bochmann G, Drosig B, Schagerl M. *Synergies of Wastewater and Microalgae Cultivation*, Word Sustainable Energy Days next 2014, 26.-28. Februar 2014, Wels, Österreich.

Straube 2007

Straube, E.: *Standardisierte Bemessung von Verkehrsflächen nach den RStO'01*, Übung im Sommersemester 2007, Universität Duisburg / Essen, https://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-17018/Bemessung_nach_den_RStO_-_Präsentation.pdf, letzter Zugriff 2018-06-05

Talbot 1991

P. Talbot P., Thibault J.-M., A. Dauta A., J. de la Noon J.: *A comparative study and mathematical modeling of temperature, light and growth of three microalgae potentially useful for waste water treatment*. Water. Research, Vol. 25 No. 4 (1991.) No. 4, p. 465-472

TechRev 2017

Technology Review 2017 – *Fliegen retten Fische*. Technology Review: <https://www.heise.de/tr/artikel/Fliegen-retten-Fische-3052338.html> (accessed 2017-09-25)

Tredici 2016

Tredici M. R., Rodolfi L., Biondi N., Bassi N., Sampietro G.: *Techno-economic analysis of microalgal biomass production in a 1-ha Green Wall Panel (GWP®) plant*. Algal Research, Vol. 19 2016.

Umweltbundesamt 2016

Elfter Umweltkontrollbericht. Umweltsituation in Österreich. Umweltbundesamt, 2016, Wien

Weyer 2010

Weyer K. M, Bush D. R, Darzins A., Willson B. D. *Theoretical Maximum Algal Oil Production*, Bioenerg. Res. (2010) 3: 204. <https://doi.org/10.1007/s12155-009-9046-x>

Xin 2011

Li Xin L., Hu Hong-yYing H., Zhang Yu-Pping Z.: *Growth and lipid accumulation properties of a freshwater microalga Scenedesmus sp. under different cultivation temperature*. Bioresource Technology, Vol. 102, (2011) p 3098–3102,

Xue 2013

Xue S., Q. Zhang Q., X. Wu X., C. Yan C., W. Cong W.: *A novel photobioreactor structure using optical fibers as inner light source to fulfill flashing light effects of microalgae*. Bioresource Technology, Vol. 138 (2013) p. 141-147.

Zeit 2011

Christoph Drösser: *Stimmt's / Stimmt's?: Beansprucht ein Lkw die Straße 10.000-mal so stark wie ein Pkw?* 28. Juli 2011 DIE ZEIT Nr. 31/2011, <http://www.zeit.de/2011/31/Stimmts-Strasse>, letzter Zugriff 2018-06-05

Zellinger 2017

Michael Zellinger: *Nutzung von Verkehrsflächen zur Biomasseproduktion*, Masterarbeit, Fachhochschule Wr. Neustadt, Wieselburg 2017

Zhu 2008

Zhu X.-G.: *What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?* Curr Opin Biotechnol. 2008 Apr; 19(2): 153-9. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>

6 Anhang

Tabelle 14: Kosten und Energieverbrauch von unterschiedlichen Umwandlungsmethoden

Spezifikation	Wert	Einheit	Quelle
Flok&Flot infrastructure	1100	Euro/ha	(Hingsamer 2012)
Flokkulation Reference Size	110	t/ha	Flächenproduktivität (für 2020) aus Report und Excel abgeleitet
Flokkulant cost	1448	Euro/t	(Hingsamer et al., 2012)
Flokkulant need	0,008		(Hingsamer 2012)
Flok&Flot electricity	0,23	kWh/kg_TS	(Hingsamer 2012, S.67)
Centrifugation cost	14000	Euro	(Hingsamer 2012, S.67)
Centrifugation electricity	0,17	kWh/kg_TS	(Hingsamer 2012, S.67)
Centrifugation reference size	110	t/ha	Flächenproduktivität (für 2020) aus Report und Excel abgeleitet
Dryer cost	5000	Euro/ha	(Hingsamer 2012, S.70)
Dryer electricity	0,4	kWh/kg_TS	Lardon et al, 2009 in (Hingsamer 2012, S.69)
Dryer heat	1,82	kWh/kg_TS	Lardon et al, 2009 in (Hingsamer 2012, S.69)
Dryer reference size	110	t/ha	Flächenproduktivität (für 2020) aus Report und Excel abgeleitet
Oil extraction costs	18000	Euro/ha	(Hingsamer 2012, S.70)
Oil extraction reference size	110	t/ha	Flächenproduktivität (für 2020) aus Report und Excel abgeleitet
Oil extraction electricity	0,31	kWh/kg_TS	Lardon et al, 2009 in (Hingsamer 2012, S.70)
Oil extraction heat	0,82	kWh/kg_TS	Lardon et al, 2009 in (Hingsamer 2012, S.70)
Oil extraction solvent needs	0,30		(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Oil extraction solvent costs	584	Euro/t	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Esterification costs	20000000	€	(Hingsamer 2012) Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel

Spezifikation	Wert	Einheit	Quelle
Esterification size	178444	t_TS/year	(Hingsamer 2012) Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Esterification auxiliaries need	0,08		(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Esterification auxiliary costs	165,7	Euro/t	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Esterification electricity	0,015	kWh/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Esterification heat demand	0,040	kWh/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Fermentation & Upgrading costs	21266125	€	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Fermentation & Upgrading reference size	16733	t_TS/year	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Fermentation & Upgrading electricity consumption	0,278	kWh/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Fermentation heat consumption	0,143	kWh/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Fermentation auxiliary needs	0,000		(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
Fermentation auxiliary costs	0,000	€	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel

Tabelle 15: Massenbilanzen und Preise für diverse Algenprodukte

Technologie	Spezifikation	Wert	Einheit	Quelle
DRY	Dry biomass yield	1	kg/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
VES	Efficiency diesel production	0,25	kg/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
VES	Efficiency glycerin production	0,02	kg/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
VES	Efficiency feed production	0,91	kg/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
VES	Diesel price	1337,00	€/t	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
VES	Glycerin price	150,00	€/t	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
VES	Feed price	127,00	€/t	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
DRY	Income Chlorella	55,00	€/t	Erfahrungswert (K. Meixner)
OIL	Production algal oil	0,28	kg/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
OIL	Income for algal oil	500,00	€/t	(Soley 2017)
MET	Digestate yield	17,31	kg_w/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
MET	Biomethane yield	345,60	L/kg_TS	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
MET	Digestate price	0,00	€/kg	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel
MET	Biomethane price	0,679	€/m ³	(Hingsamer 2012) from Wirtschaftlichkeitsrechnung Excel