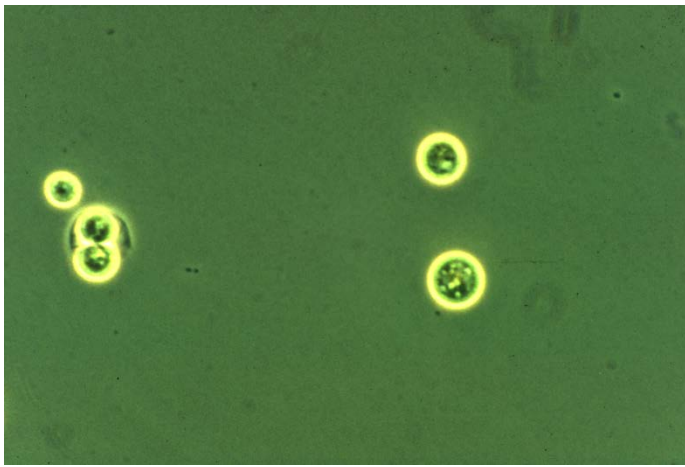
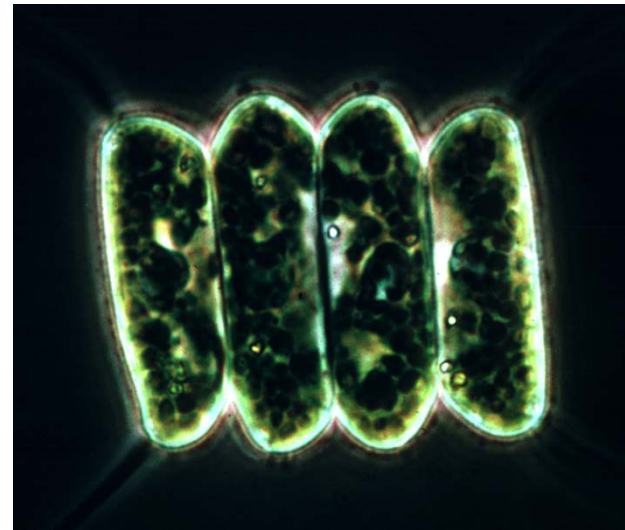


# Können Mikroalgen einen Beitrag zur künftigen Energieversorgung leisten?

1. Warum Mikroalgen?
2. Technische Grundlagen der Algenproduktion
3. Energetischer Wirkungsgrad
4. Blitzlichteffekt
5. Algen für die Entsorgung von CO<sub>2</sub> aus Verbrennungsgasen
6. Bewertung



Chlorella

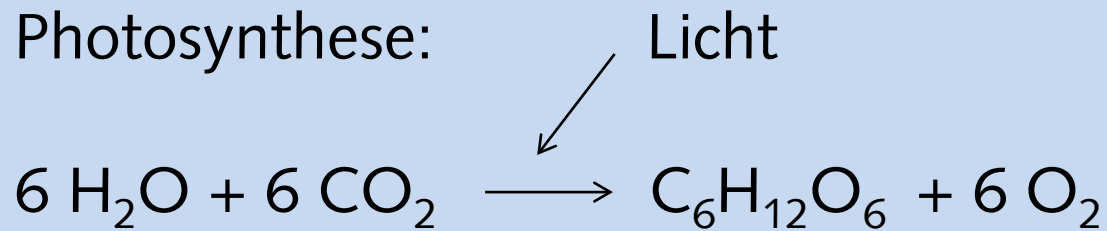


Scenedesmus  
(Prof. C J. Soeder)



Spirulina

# 1. Warum Mikroalgen?



- Im Unterschied zu höheren Pflanzen kann der Prozess durch industrielle Produktionsmethoden optimiert werden.
- Von Klima weitgehend unabhängig, keine Konkurrenz um landwirtschaftlich nutzbare Böden, niedriger Wasserverbrauch.
- Hohe metabolische Flexibilität von Mikroalgen im Vergleich zu höheren Pflanzen.

Einsatzfelder:

- Bemannte Weltraumfahrt (klassisches Beispiel).
- Nahrungsmittel, Pharmaka, Kosmetik.
- Biofuels (Methan, Biodiesel, Bioethanol)

Für die Herstellung von Biodiesel versprechen Algen große Vorteile:

- Der Anteil von Lipiden am Trockengewicht kann zwischen 20% und 80% betragen.
- Die Zusammensetzung des Öls (Fettsäurespektrum) kann mit Methoden der Gentechnik beeinflusst werden.

Datenbasis für Produktion derzeit aber noch gering!

## 2. Technische Grundlagen der Algenproduktion

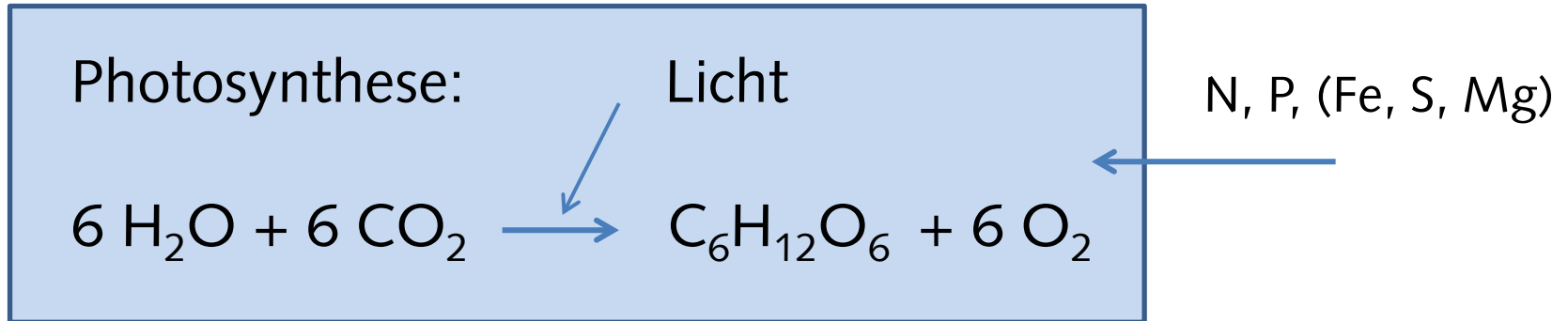


Algenanlage in Peru, Trujillo, 8°-Süd, Typ: Open Pond (Raceway), Produktion der Mikroalge Scenedesmus, 1979, eigene Aufnahme (beteiligt am Forschungsvorhaben)



Eigene Reaktorentwicklung: Typ:  
Laborreaktor, Produktion von Algen  
unter sterilen Bedingungen.  
Hersteller: Firma Bioengineering CH  
Einsatz (unter Anderen):  
European Space Agency, Barcelona  
Universität Bochum

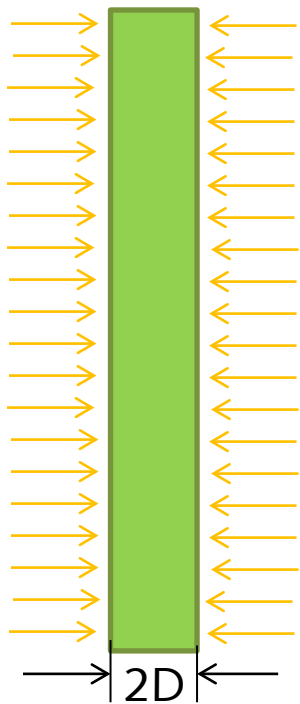
## Grundsätze technischer Algenproduktion:



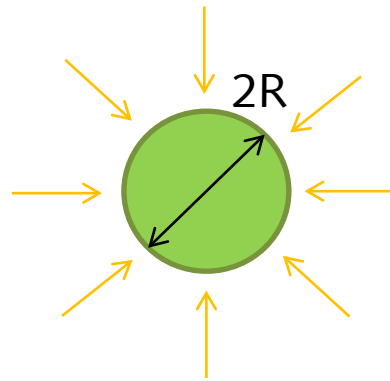
- Top Parameter ist: Licht, Licht, Licht

Die gesamte in den Algen gespeicherte Energie ( $\Delta_R H = 23 \text{ kJ/g}_{\text{Algen}}$ ) muss durch Licht zugeführt werden

Entscheidend für das natürliche Lichtangebot ist die geografische Lage der Anlage.



Licht (L)



- Auf die optimale Lichtverteilung im Reaktor kommt es an

wird bestimmt durch:

$$D \times TS = \text{Konstant (L)} \quad \text{und}$$

$$R \times TS = \text{Konstant (L)}$$

TS = Algendichte (Trockensubstanz)



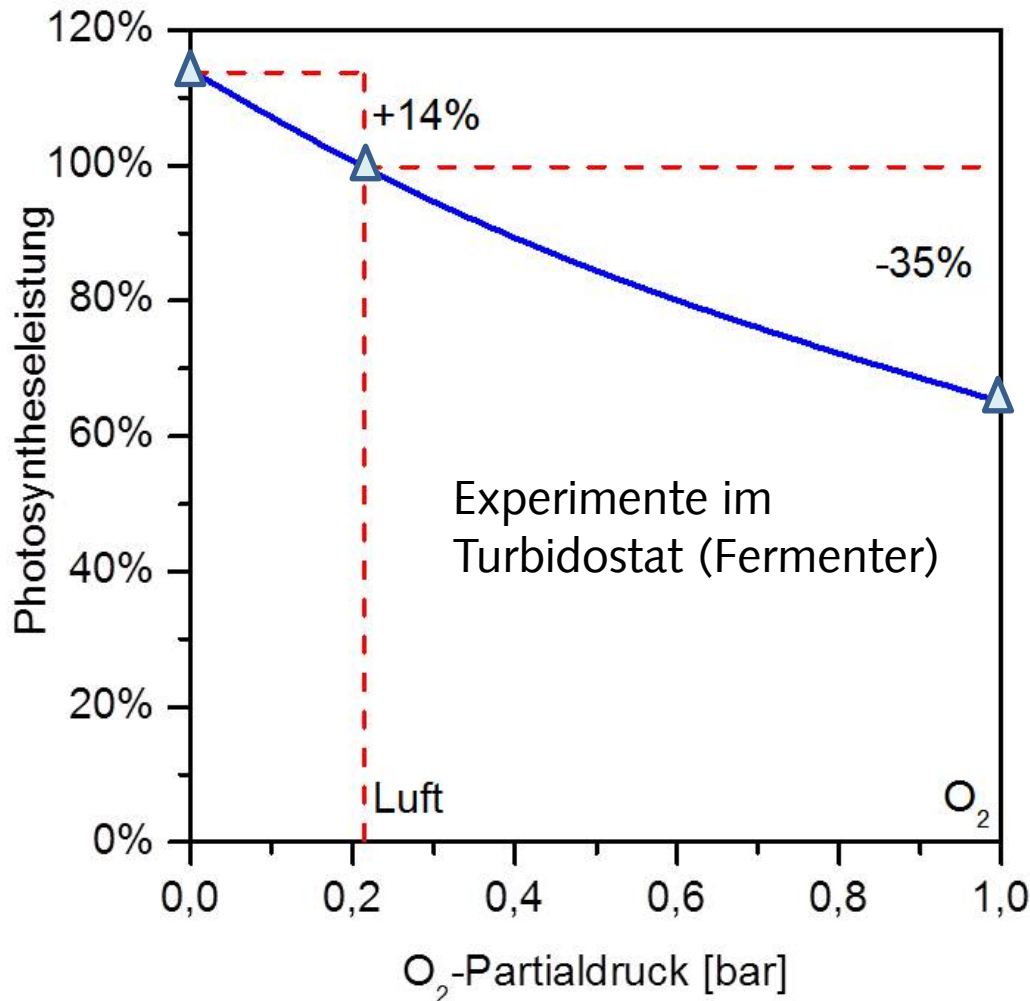
Halbiert man die Schichtdicke  $D$  bzw.  $R$ , verdoppelt sich, bei gleicher Lichtverteilung im Reaktor, die Algendichte.

Algendichte ist wichtiger wirtschaftlicher Faktor.

Beispiel: Bei einer Algendichte von  $0,2 \text{ g}_{\text{Algen}}/\text{Liter}$  müssen 5000 Liter Algensuspension gefiltert oder zentrifugiert werden um 1 kg Trockensubstanz zu erhalten (Prof. Karl-Hermann Steinberg im Spiegel Interview).



- Sauerstoff hemmt



Der Einfluss von Sauerstoff wird gewöhnlich unterschätzt.

Sauerstoffkonzentration hängt vom Stoffübergang (Mischintensität) ab.

Energieeintrag:  
 Rohrreaktoren: 500 W/m<sup>3</sup>  
 Plattenreaktoren: 50 W/m<sup>3</sup>  
 Open Ponds: 10 W/m<sup>3</sup>

Clemens Posten, KIT Karlsruhe

Die geerntete Energie/m<sup>2</sup> ist etwa 8 W/m<sup>2</sup> (30 g<sub>Algen</sub>/m<sup>2</sup>/d, 23 kJ/g<sub>Algen</sub>).

Bei einem Kulturvolumen von 100 L/m<sup>2</sup> und 50 W/m<sup>3</sup> ist diese Ernte mit 5 W/m<sup>2</sup> beinahe erreicht.

### 3. Energetischer Wirkungsgrad

Aussage 1:

„Mikroalgen wachsen bis zu zehn Mal schneller als Landpflanzen, da jede einzelne Zelle zur Photosynthese befähigt ist und somit entsprechend mehr CO<sub>2</sub> verbraucht.“

<http://www.eon-hanse.com> (Mikroalgenprojekt)

Aussage 2 (Lehrbuch):

Grünalgen und alle höheren Pflanzen besitzen granuläre Chloroplasten.

Thermodynamik:

Sowohl technische Algenkulturen als auch leistungsfähige Pflanzenkulturen sind optisch dicht, d. h. sie absorbieren praktisch das gesamte eingestrahlte Licht.

Direkter Vergleich anhand von realen Messdaten:

#### 1. Algen

Productivities	[g/m <sup>2</sup> /d]		[t/ha/a]
	average	peak	
Open Ponds	10-20	30	36-72
closed	35-50	70	125-180

Clemens Posten,  
KIT Karlsruhe

Weitere gesicherte Messdaten für Algen Trockensubstanz (Typ Open Pond):

Technische Produktionsanlage Taiwan	25–30 g/m <sup>2</sup> /d	Algae Biomass Production and Use, Elsevier, 1980
Anlage Peru, relativ nahe am Äquator	30 g/m <sup>2</sup> /d	eigene Experimente
Dortmund, Kohlenstoffbiologische Forschungsanstalt	22 t/ha/a	UNITAR MICROBIAL ENERGY CONVESION
Bangkok, Anlage baugleich Typ Dortmund	55 t/ha/a	Erich Golze KG, Göttingen, 1976

Energiepflanzen Trockensubstanz:

Mais-Ganzpflanze	17,5 t/ha/a	KTBL-Energiepflanzen, Daten für die Planung 2006
Zuckerrübe-Ganzpflanze	27 t/ha/a	DLG-Merkblatt 363, 2010
Zuckerrohr Brasilien	45,5 t/ha/a 12,5 g/m <sup>2</sup> /d	Hans Friedmann, persönliche Mitteilung, 2012
Zuckerrohr Brasilien, Potential	100 t/ha/a	

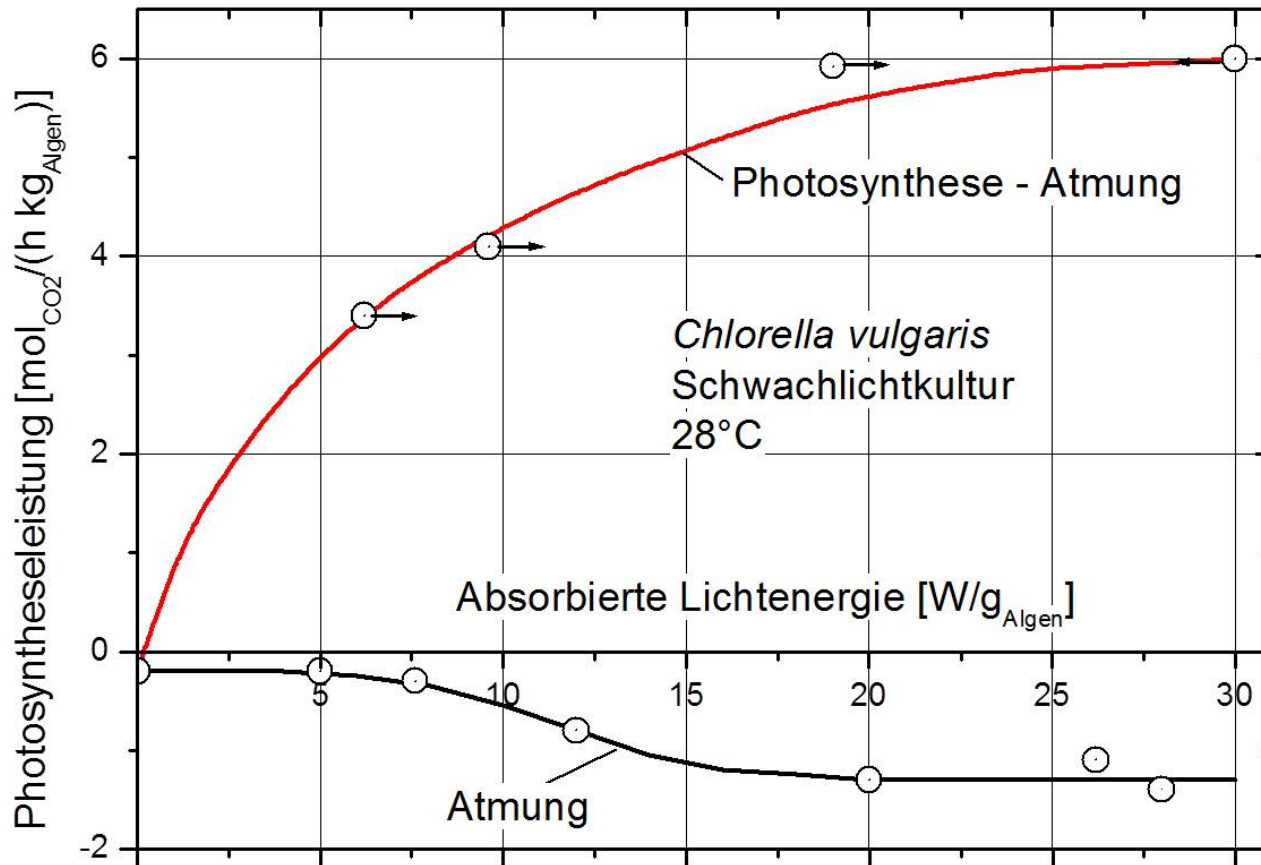


## Messung des Wirkungsgrades

Kontinuierliche Algenkultur,  
Turbidostat, stationär,  
Alge: *Chlorella vulgaris*.  
Sterile Verhältnisse.  
Gemessen wird CO<sub>2</sub>-Verbrauch  
mit IR-Absorption.

Kooperation mit  
Forschungslabor der  
Firma Osram/München.  
Kalibrierte Leuchtstoffröhren  
von Osram.  
Zugeführte Energie:  
Sichtbares Licht (zwischen 350  
und 800 nm)

Eigene Reaktorentwicklung (Hersteller: Bioengineering CH)



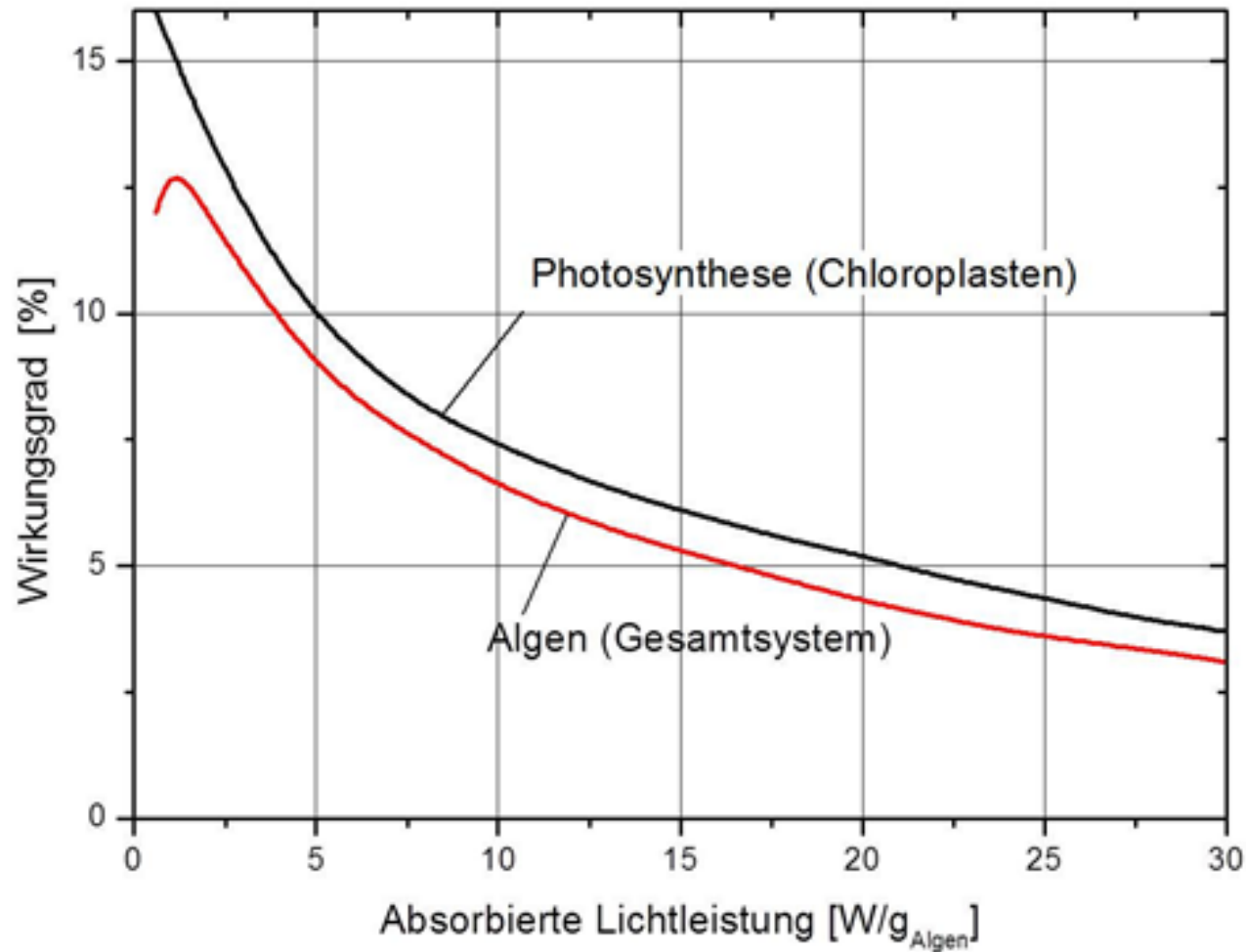
Leuchtstofflampen

Wirkungsgrad :  
Aufgebaute  
chemische  
Energie/  
Zugeführte  
Lichtenergie

Zugeführte Energie: Licht: W/g<sub>Algen</sub>

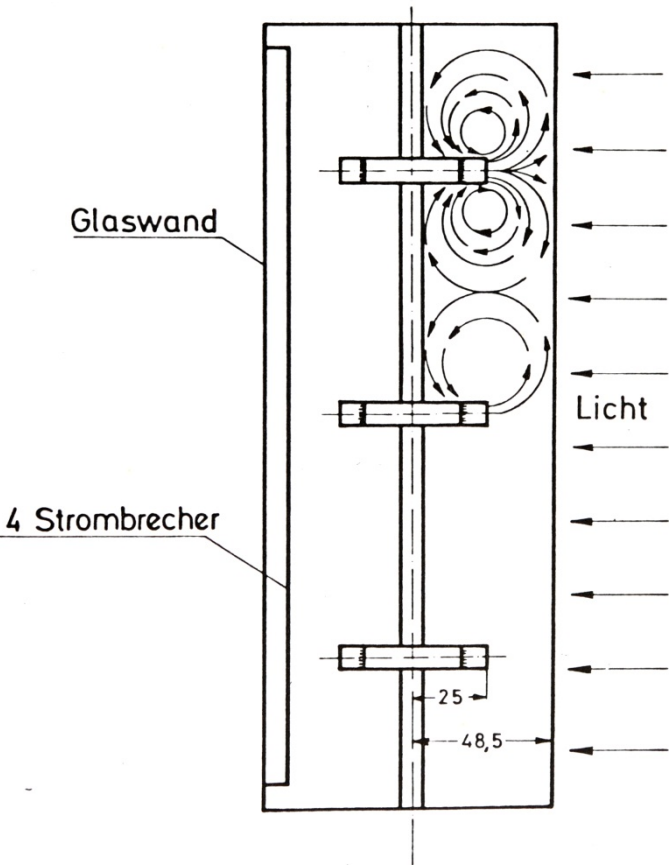
Aufgebaute Chemische Energie, Heizwert:  $(\Delta_R H)_{exp} = 23 \text{ kJ/g}_{Algen}$

1 mol CO<sub>2</sub>/h/kg<sub>Algen</sub> ---> 0,153 W/g<sub>Algen</sub>

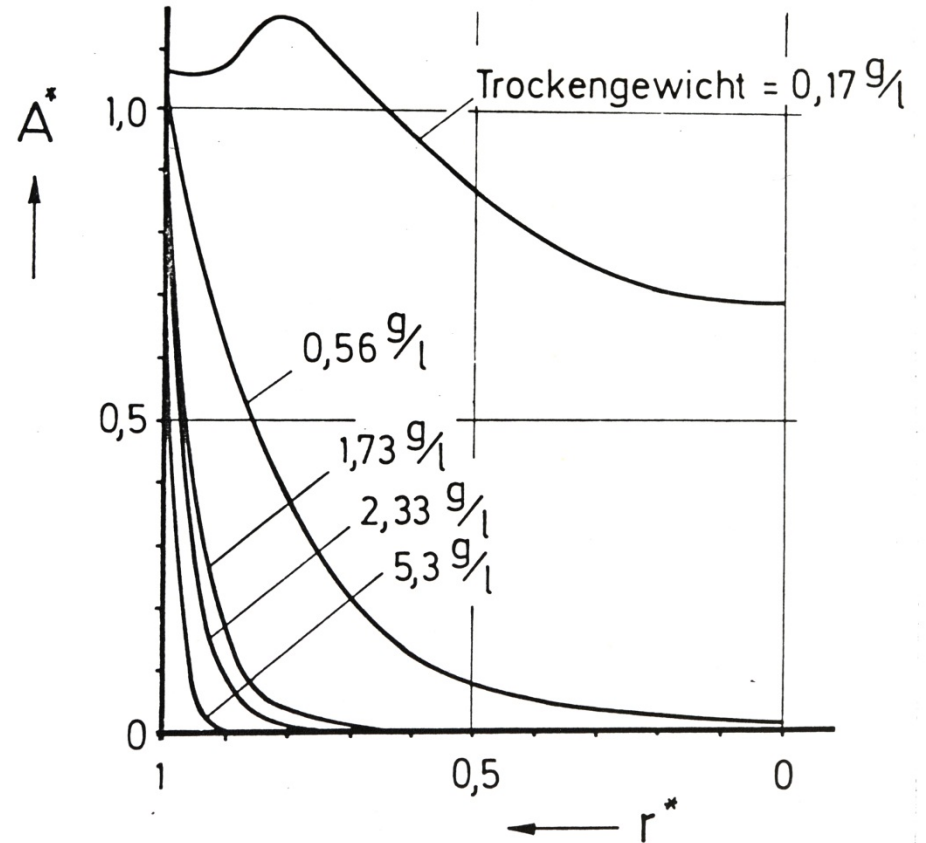


Sonnenstrahlung im Vergleich zu Leuchtstofflampen 5 mal heller.  
„Lichtverdünnung“ notwendig.

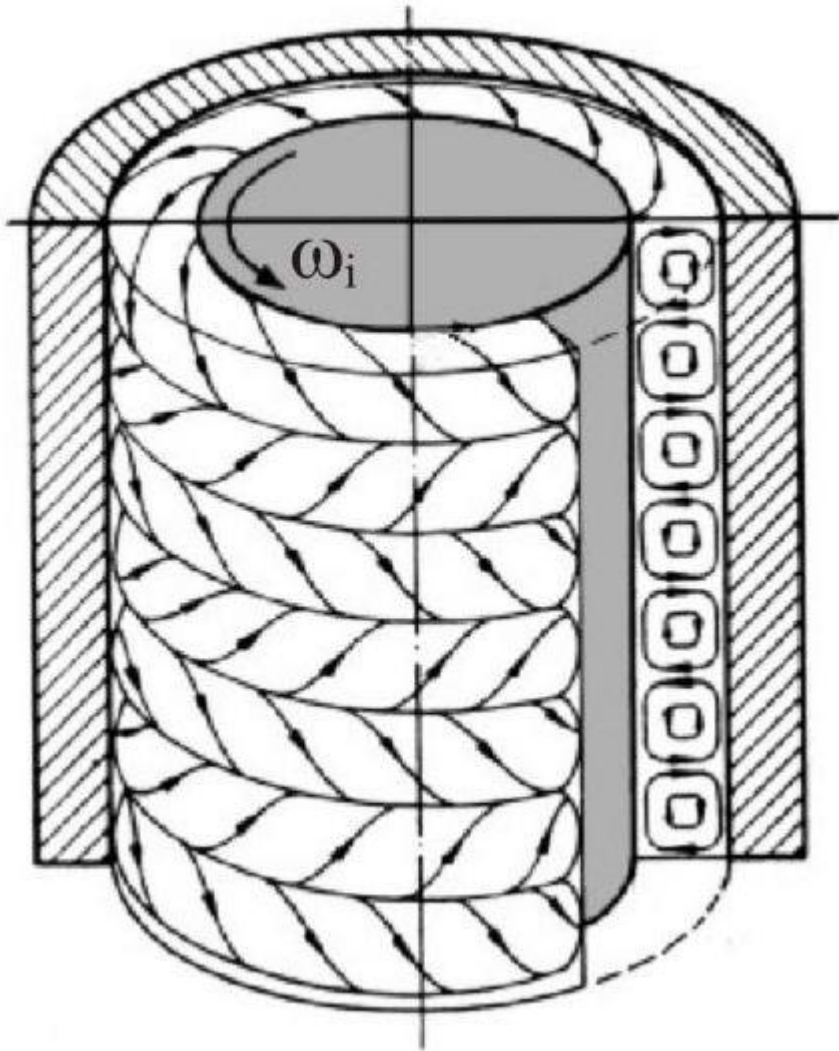
# 4. Blitzlichteffekt



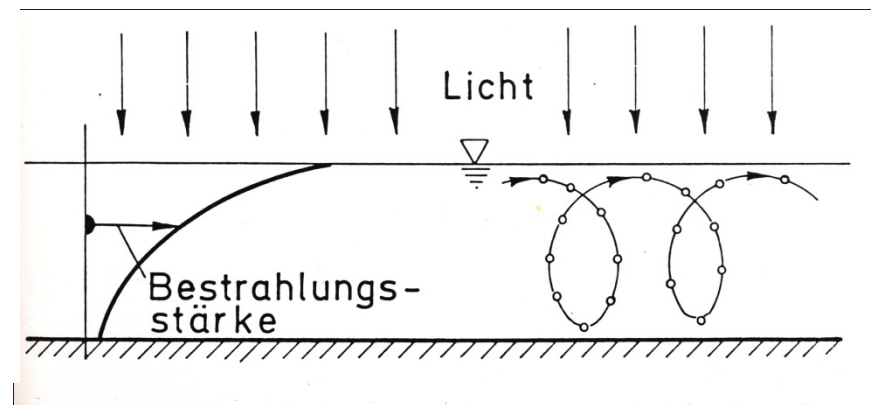
Chlorella vulgaris



## Beispiele technischer Anordnungen



Taylorwirbel



Wirbelströmung induziert in Open Pond



Elliptische Beleuchtungseinrichtung

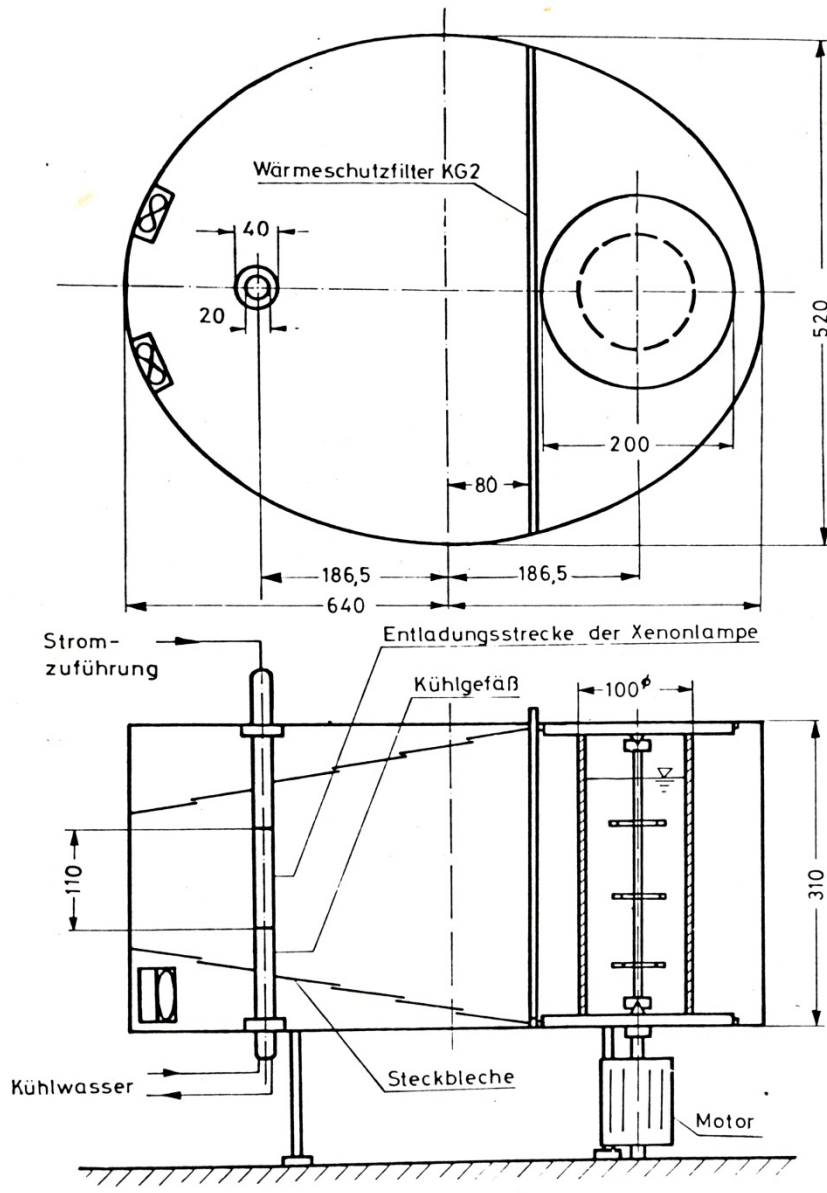
Xenon Hochdrucklampe

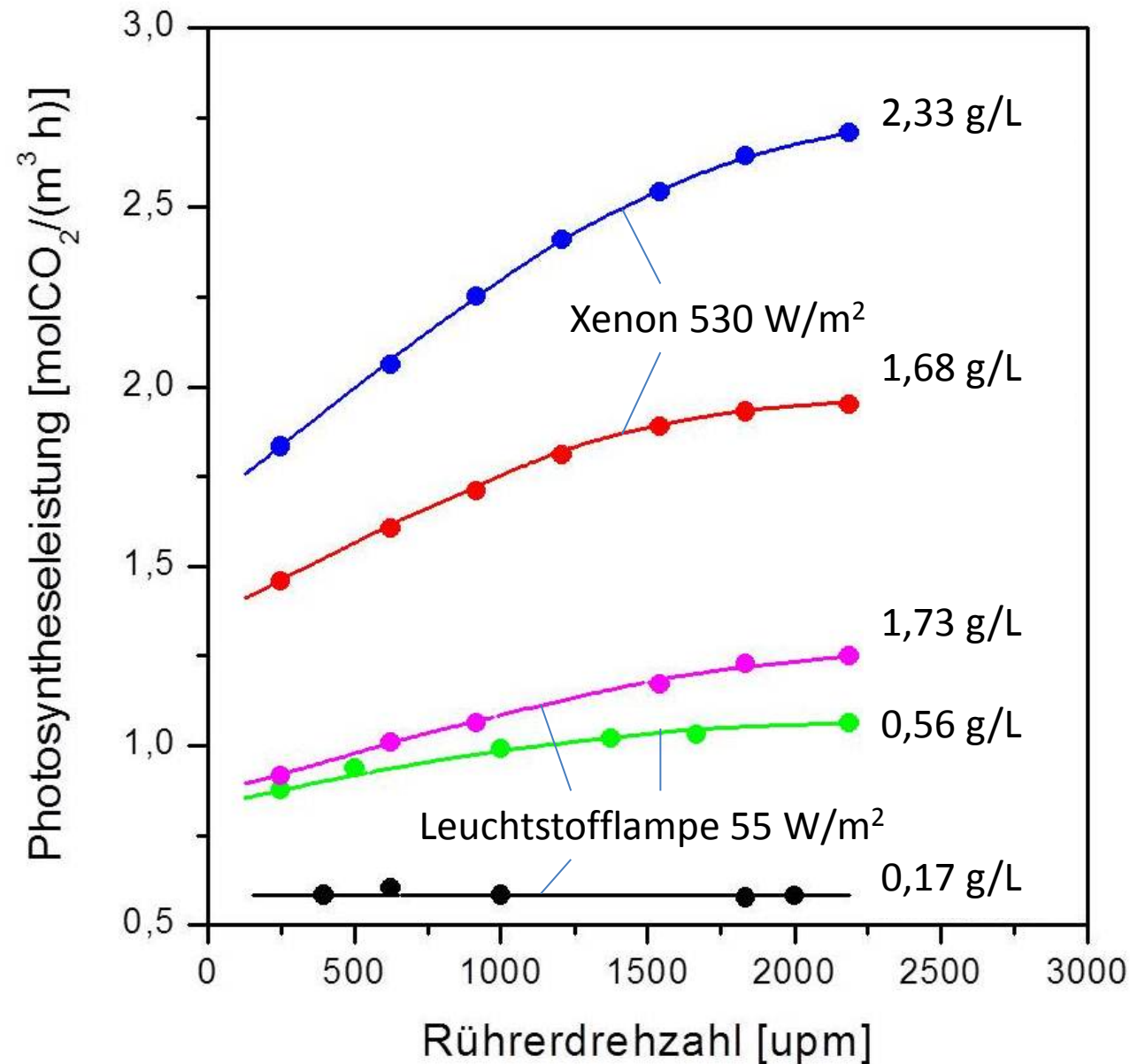
Firma Osram, 2500 W mit  
Wasserkühlung.

Wärmeschutzfilter, Firma Schott  
Typ KG2

Mittlere Bestrahlungsstärke an  
Fermenter Oberfläche zwischen  
200 und 530 W/m<sup>2</sup>,  
stufenlos regelbar.

Wellenlänge 300-900 nm.





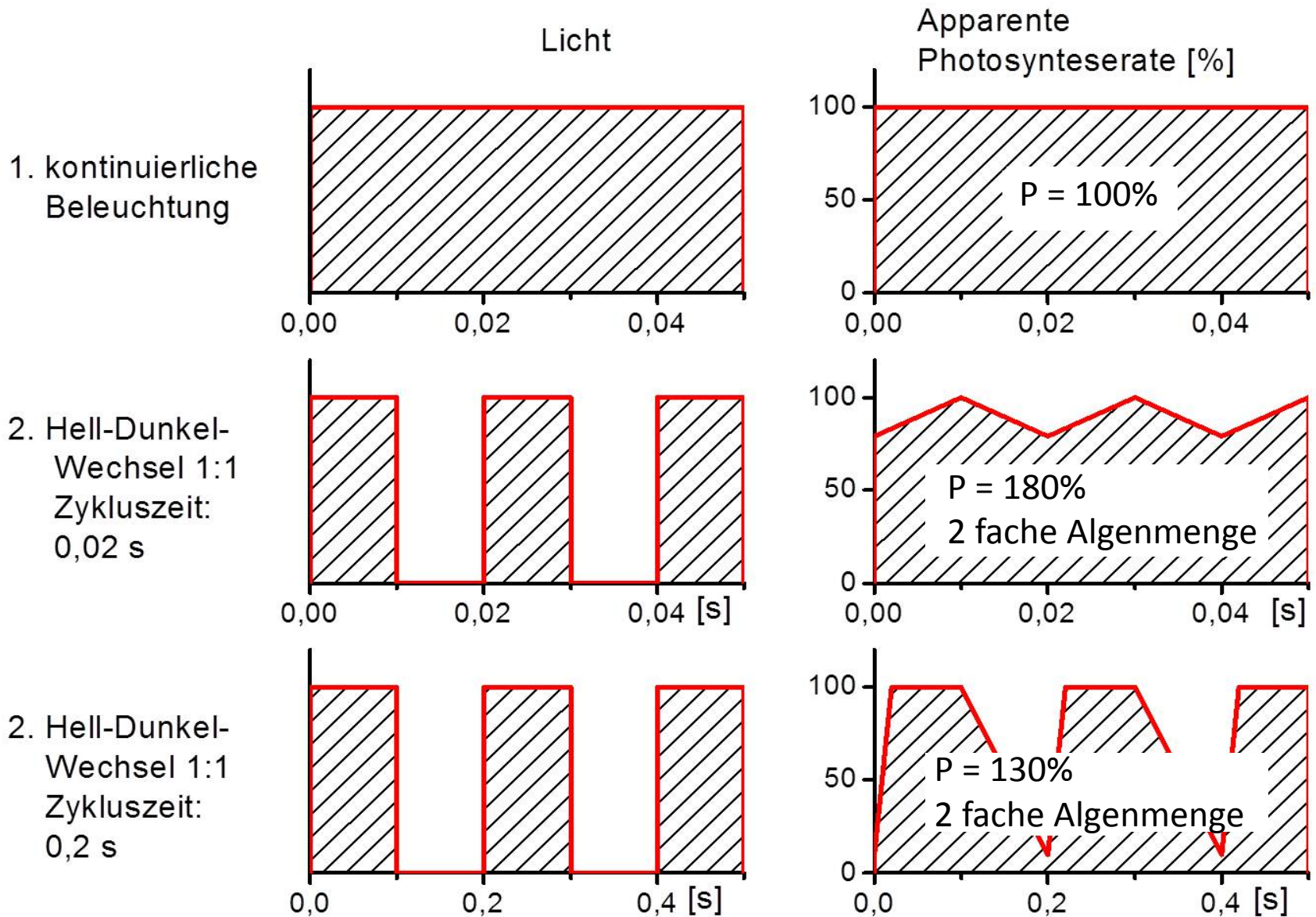
- Steigerung der Produktion um 80% durch Hell-Dunkel-Wechsel.

- Hohe Algendichten möglich. In eigenen Versuchen bis 5,3 g/L. Bei Taylorwirbel-Anordnung 50 g/L vorstellbar.

- Stabiler Betrieb auch bei extremer Einstrahlung möglich. Beispiel: Einsatz in der bemannten Raumfahrt.

- Mathematisches Modell ermöglicht genaue quantitative Voraussagen.

# Einfluss der Hell-Dunkel-Frequenz, Modellrechnung



# 5. Algen für die Entsorgung von CO<sub>2</sub> aus Verbrennungsgasen

Projekt:

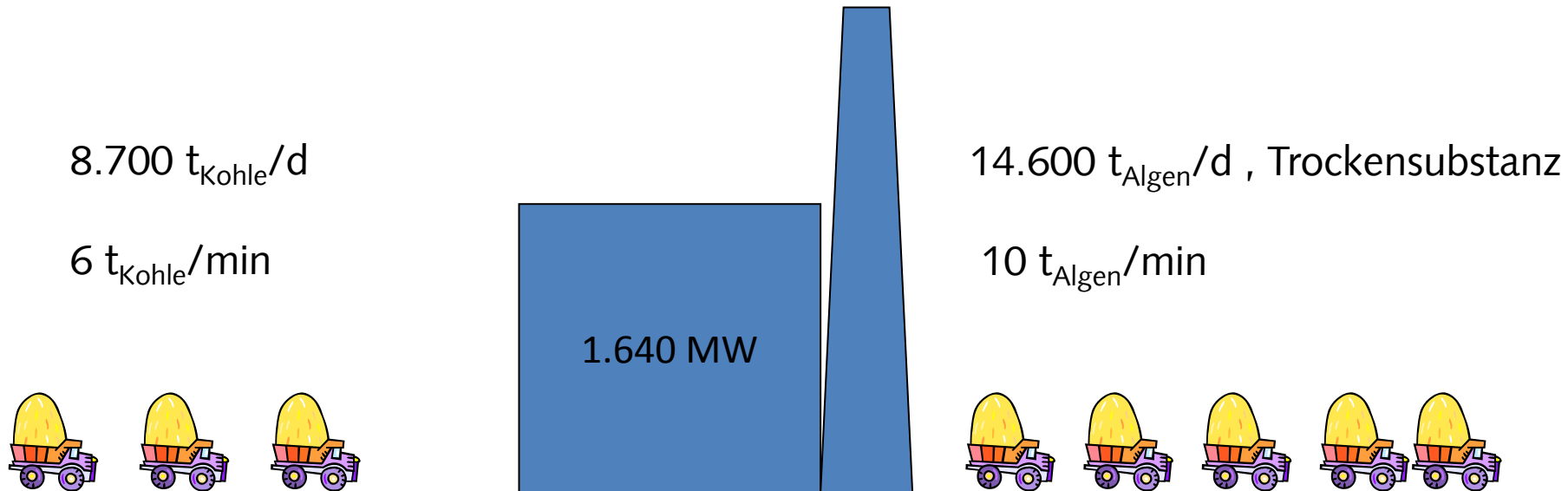
E.ON Hanse gemeinsam mit der Stadt Hamburg (500.000 Euro)

Weitere Pilotprojekte:

RWE Power, Vattenfall Lausitz



# Massenbilanz für die CO<sub>2</sub>-Elimination beim Kraftwerk Moorburg



Heizwert von aschefreier  
Steinkohle: 35 MJ/kg  
Kraftwerk Wirkungsgrad: 46,5 %

Bei Betrieb einer geschlossenen Algenanlage mit natürlichem Licht → 150 t/ha/a →  
Flächenbedarf Algenproduktion : 35.500 ha oder 355 km<sup>2</sup>

Großer CO<sub>2</sub> Speicher notwendig, da Anlage im Winter nur sehr begrenzt eingesetzt werden kann.

Wäre es eine Alternative für die Algenproduktion künstliches Licht einzusetzen?

## Energiebilanz

Energieinhalt (Heizwert) Algen, gemessen:  $\Delta_R H = 23 \text{ kJ/g}_{\text{Algen}}$   
 $\Delta_R H = 46 \text{ kJ/g}_{\text{Kohlenstoff}}$

Energieinhalt (Heizwert) Kohle:  $\Delta_R H = 35 \text{ kJ/g}_{\text{Kohle}}$   
 $\Delta_R H = 43 \text{ kJ/g}_{\text{Kohlenstoff}}$

Durch Photosynthese muss also mindestens so viel chemische Energie aufgebaut werden, wie die Kohle enthält.

Einzigste Energiequelle ist Licht!

Energieinhalt Kohle				Energieinhalt Algen				
100	x	0,465	x	0,3	x	0,1	=	1,4
		Wirkungsgrad Kraftwerk		Wirkungsgrad Lichtproduktion		Wirkungsgrad Photosynthese		

→ 70 Kraftwerke sind notwendig, um ein Kraftwerk zu entsorgen

## 6. Bewertung:

- Algen für die Entsorgung von CO<sub>2</sub> aus Verbrennungsgasen  
Problem zu groß um mit biotechnischen Verfahren gelöst zu werden.
- Algal Biofuel  
Eine endgültige Bewertung ist hier nicht ohne Weiteres möglich.  
Sicher ist: Der Preis für Treibstoffe wird auch in Zukunft steigen.

Notwendige Randbedingungen:

- Die besten Voraussetzungen zur Produktion bestehen in sonnenreichen Ländern, insbesondere in hohen Lagen.
- Produktion sollte in kontinuierlichem Modus durchgeführt werden. Optimale Algendichte über die gesamte Zeit.
- Hygieneproblem, da bei kontinuierlichem Betrieb die zyklische Reinigung entfällt. Ideal: Steril-Betrieb.
- Transparente Oberflächen müssen dauerhaft lichtdurchlässig bleiben.
- Neue innovative Ernteverfahren notwendig (Energieaufwand).
- Reaktorkonzept: Lichtverdünnung, Hell-Dunkel-Wechsel.
- Anzustreben ist hohe Algendichte → niedrige Schichtdicke → fragile, feingliedrige Konstruktion. Hohes Oberfläche/Volumen Verhältnis.
- Energieaufwand für Begasen und Mischen < 2W/m<sup>2</sup>. /C.Posten/.