

BestMasters

RESEARCH

Volker Hartmann

# Die Photosynthese als erneuerbare Energie

Zukünftige Produktion von  
Biowasserstoff aus Sonnenlicht



Springer Spektrum

---

# BestMasters

Mit „BestMasters“ zeichnet Springer die besten Masterarbeiten aus, die an renommierten Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz entstanden sind. Die mit Höchstnote ausgezeichneten Arbeiten wurden durch Gutachter zur Veröffentlichung empfohlen und behandeln aktuelle Themen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Naturwissenschaften, Psychologie, Technik und Wirtschaftswissenschaften. Die Reihe wendet sich an Praktiker und Wissenschaftler gleichermaßen und soll insbesondere auch Nachwuchswissenschaftlern Orientierung geben.

---

Volker Hartmann

# Die Photosynthese als erneuerbare Energie

Zukünftige Produktion  
von Biowasserstoff aus Sonnenlicht

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Matthias Rögner

 Springer Spektrum

Volker Hartmann  
Bochum, Deutschland

BestMasters

ISBN 978-3-658-09186-6

ISBN 978-3-658-09187-3 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-09187-3

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media ([www.springer.com](http://www.springer.com))

## Geleitwort

Ein Schwerpunkt der Forschung an meinem Lehrstuhl ist die Aufklärung von grundlegenden Vorgängen der photosynthetischen Energieumwandlung - insbesondere auch ein Verständnis des Prozesses der lichtgetriggerten Wasserspaltung auf molekularer Ebene - sowie eine Evaluierung des Anwendungspotentials solcher Systeme. Hierbei handelt es sich sowohl um semiartifizielle Minimalsysteme mit isolierten Schlüsselkomponenten wie Photosystem 1 (PS1) und Photosystem 2 (PS2), um die Kapazitätsgrenzen dieser Systeme außerhalb der Restriktionen ihrer biologischen Umgebung auszuloten, als auch um sich selbst replizierende, einfachste zelluläre Systeme (Cyanobakterien), die durch (genetische) Modifizierung für eine Photosynthese-basierte Energieerzeugung und -nutzung optimiert werden (Ausblick: Biokraftstoffe).

In seiner Masterarbeit hat sich Herr Hartmann intensiv mit der Optimierung der PS2-Photoanode innerhalb eines semiartifiziellen Minimalsystems beschäftigt, welches als Ganzes aus zwei Photoelektroden besteht und von uns knapp als "Biobatterie" bezeichnet wird. Mit diesem System sollen mittelfristig Elektronen aus der Wasserspaltung (PS2 immobilisiert an der Anode), die lichtinduziert über PS1 (immobilisiert an der Kathode) auf eine sauerstoffempfindliche Hydrogenase geleitet werden, zur Wasserstoffherzeugung verwendet werden. Der empfindlichste Teil dieses Minimalsystems ist die Anode mit immobilisiertem PS2, dessen Effizienz und Stabilität deutlich erhöht werden sollte. Herrn Hartmann kam dabei die anspruchsvolle Aufgabe zu, die biochemische Welt (bestehend aus der sehr arbeitsintensiven Isolierung hochaktiver PS2-Komplexe und deren funktioneller Charakterisierung) mit der elektrochemischen Welt (Herstellung und Optimierung der Photoelektroden nebst artifizierender Redoxpolymere) zu verbinden und fachübergreifend in zwei verschiedenen Laboratorien zu arbeiten. Diese Aufgabe hat er exzellent gelöst und durch die erfolgreiche Etablierung von Phenothiazin-modifizierten Redoxpolymeren für die Akzeptorseite von PS2 inklusive der Optimierung des Verfahrens eine deutliche Erhöhung der Effizienz der Biobatterie erreicht. Gleichzeitig konnte er die Stabilität des letztlich verwendeten Redoxpolymers auf der Elektrodenoberfläche durch Modifikationen deutlich verbessern. Die hiermit erzielte, mehr als 80-fache Steigerung der Leistung innerhalb der "Biobatterie" war so deutlich, dass einige Ergebnisse dieser Masterarbeit 2014 bereits in dem angesehenen Journal "Phys. Chem. Chem. Phys." veröffentlicht werden konnten, was für ihre hohe Qualität spricht. Die inhaltliche Abfassung der Arbeit steht der Qualität und Bedeutung der Ergebnisse in nichts nach, sodass diese sowohl von mir als Biochemiker als auch vom Zweitbetreuer aus der Elektrochemie (Prof. W. Schuhmann) ohne Einschränkung mit "sehr gut" bewertet wurde.

*Prof. Dr. Matthias Rögner*

## Institutsprofil

Der Lehrstuhl für Biochemie der Pflanzen beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Erzeugung, Umwandlung und Verwertung von (biologischer) Energie basierend auf dem Prozess der solargetriebenen pflanzlichen Photosynthese. Grundlage hierfür ist ein präzises Verständnis insbesondere folgender fundamentaler Prozesse auf molekularer Ebene:

- Der Prozess der lichtgetriggerten Wasserspaltung durch Photosystem 2 (PS2)
- Struktur, Funktion und Regulation von wasserstofferzeugenden und -verbrauchenden Hydrogenasen
- Architektur, Regulation und Dynamik des photosynthetischen Elektronentransportes
- Die Verknüpfung des photosynthetischen Elektronentransportes mit wasserstofferzeugenden Hydrogenasen und den CO<sub>2</sub>-fixierenden Reaktionen des C-Metabolismus
- Die Anpassung des Energiemetabolismus ganzer Mikroalgenzellen an die Dynamik ihrer Umgebung

Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse werden dann in anwendungsrelevante Prozesse mit hohem biotechnologischem Potential umgesetzt. Beispiele hierfür sind:

- Die Erzeugung lichtgesteuerter semiartifizierlicher Minimalsysteme aus isolierten Schlüsselkomponenten der Photosynthese (Photosystem 1 und 2), die auf Elektroden immobilisiert und über optimierte künstliche Elektronenleitsysteme u.a. mit Hydrogenasen verknüpft werden. Diese Systeme dienen zur Evaluierung und Optimierung der Energieumwandlung, z.B. zur Erzeugung von Biowasserstoff aus Wasser ("Biobatterie")
- Die Erzeugung cyanobakterieller "Designzellen" mit Mitteln der synthetischen Biologie, deren Elektronentransport beispielsweise für die Erzeugung von "Biofuels" (z.B. Biowasserstoff, Biokraftstoffe) optimiert wird - bei gleichzeitiger Minimierung des eigenen Energiestoffwechsels
- Die Entwicklung von Photobioreaktoren zur Optimierung und Automatisierung zukünftiger Massenkultivierung von Cyanobakterien unter Minimierung von Prozessabläufen und Kosten

Die geschilderten Projekte basieren auf profunder Erfahrung in analytischen und präparativen Methoden, die sich vom Bereich der Molekularbiologie über die Biochemie und Spektroskopie bis zur quantitativen Massenspektrometrie (Proteomics und Lipidomics) erstrecken. Die Kombination dieser Methoden erlaubt eine detaillierte Charakterisierung von einzelnen Proteinen und Genen bis hin zur Physiologie individueller Zellen in der Massenkultur.

Fernziel ist die Erzeugung anspruchsloser und robuster Cyanobakterienzellen für die Massenkultur in speziell entwickelten Photobioreaktoren. Diese "Designzellen" sollen mit

vorgefertigten Strukturelementen/Funktionseinheiten baukastenartig erzeugbar sein, um damit zielgerichtet Biofuels u.a. hochwertige Produkte zu erzeugen, die aufgrund der Photosynthese eine positive bzw. umweltneutrale Energiebilanz aufweisen.



## **Vorwort**

Die vorliegende Masterarbeit wurde 2014 am Lehrstuhl für Biochemie der Pflanzen der Ruhr-Universität Bochum angefertigt. Viele Personen haben mich auf diesem Weg begleitet und mir geholfen den Fokus nicht zu verlieren.

Ich möchte Prof. Dr. Matthias Rögner für die Möglichkeit danken, meine Masterarbeit an seinem Lehrstuhl zu verfassen und den stets freundlichen und konstruktiven Umgang in dieser Zeit.

Weiterhin danke ich Prof. Dr. Wolfgang Schuhmann, sowie Dr. Nicolas Plumeré, Dr. Sascha Pöller und Fangyuan Zhao (M. Sc.) für die gute fachliche, materielle und persönliche Unterstützung im Fachbereich der analytischen Chemie und darüber hinaus. Außerdem bedanke ich mich bei Dr. Marc M. Nowaczyk und Claudia König für die Betreuung während der durchgeführten Isolierung von Photosystemen und deren Bereitstellung. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei Dr. Tim Kothe für den freundschaftlichen Umgang, die direkte Betreuung meiner Arbeit, die fachlichen Diskussionen und nicht zuletzt für die viele Zeit, die er geopfert hat, um diese Arbeit in dieser Form möglich zu machen.

Ferner möchte ich meiner Familie für die tolle Unterstützung während meines Studiums danken. Ein besonderer Dank gilt meiner Frau, die mir stets den Rücken frei gehalten und somit einen großen Teil zu dieser Arbeit beigetragen hat.

Zuletzt möchte ich all denen danken, die dies verdient haben, die ich aber vergessen habe hier zu erwähnen. Meine Vergesslichkeit sucht ihresgleichen.

*Volker Hartmann*

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Geleitwort</b>	<b>V</b>
<b>Institutprofil</b>	<b>VII</b>
<b>Vorwort</b>	<b>IX</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XXIII</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Motivation</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Photosynthese</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Photosystem 2</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Photosystem 1</b>	<b>6</b>
<b>1.5 Das Z-Schema</b>	<b>8</b>
<b>1.6 Hydrogenasen</b>	<b>9</b>
<b>1.7 Redoxpolymere</b>	<b>10</b>
1.7.1 Osmium modifizierte Polymere	11
1.7.2 Os-modifizierte Redox-Hydrogele für die Anbindung von PS1 und PS2 zur bio- photovoltaischen Anwendung	12
1.7.3 Phenothiazin basierte Polymere	12
<b>1.8 Ein semiartifizielles Analogon für das Z-Schema</b>	<b>13</b>
<b>1.9 Zielsetzung</b>	<b>14</b>
<b>2. Material und Methoden</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Aufreinigung von Photosystem 2</b>	<b>15</b>
2.1.1 Chlorophyllbestimmung	17
2.1.2 Natriumdodecylsulfat-Polyacrylamid-Gelelektrophorese (SDS-PAGE)	17
2.1.3 Blau-native Polyacrylamid-Gelelektrophorese (BN-PAGE)	17
<b>2.2 Aufreinigung von Photosystem 1</b>	<b>17</b>
<b>2.3 Aktivitätsbestimmung von Photosystem 2</b>	<b>18</b>