

Parabelflugexperiment zum Photobioreaktor-System für bemannte Raumfahrtmissionen

von Emil Nathanson und Jens Bretschneider

1. Motivation – Warum forschen wir an Lebenserhaltungssystemen?

Bemannte Explorationsmissionen führen zu immer weiter entfernten Zielen wie Mond, Asteroiden, und dem Mars. Da solche Missionen viele Monate dauern und eine Heimkehr zur Erde oft nicht schnell durchführbar ist, müssen zukünftige Raumfahrzeuge noch sicherer und autonomer sein. Wegen der großen Entfernungen und langen Reisezeiten wird die Versorgung mit Nachschüben wie Wasser und Nahrung zudem immer schwieriger. Insbesondere Nahrung muss in großen Mengen vorrätig sein, was dazu führt, dass Raumfahrzeuge sehr groß und teuer werden.

Lebenserhaltungssysteme sichern den Astronauten im Weltall eine bewohnbare Umgebung und versorgen sie mit den Stoffen, die sie zum Leben brauchen. Luft und Wasser können bereits heutzutage mit Maschinen gut wiederaufbereitet werden. Fortschrittliche Lebenserhaltungssysteme sollen darüber hinaus zukünftig auch Nahrung produzieren, um die o.g. Nahrungsvorräte zu reduzieren. Da Maschinen keine Nahrung produzieren können, muss man auf biologische Prozesse zurückgreifen, d.h. es müssen Pflanzen kultiviert werden. Mikroalgen (10 µm große, oft kugelförmige Einzeller) sind ausgezeichnete Kandidaten, da sie relativ leicht in einem geschlossenen System kultivierbar sind. Zudem kann man sie fast vollständig nutzen, im Gegensatz zu höheren Pflanzen wie beispielsweise Kartoffeln, deren Wurzeln, Stiele und Blätter für den Menschen ungenießbar sind. Die Maschinen, in denen Mikroalgen kultiviert werden, nennt man Photobioreaktoren (PBR). Am Institut für Raumfahrtsysteme (IRS) der Universität Stuttgart wird seit 2007 an Photobioreaktoren geforscht. Im Vordergrund steht dabei die Anpassung des Systems an die Schwerelosigkeit im Weltall.

2. Zielsetzung – Wozu brauchen wir Photobioreaktoren?

Mikroalgen betreiben Photosynthese, d.h. sie wandeln mit Hilfe von Lichtenergie CO₂ und Wasser in Biomasse und Sauerstoff um. All das sind Stoffe, die in Lebenserhaltungssystemen vorkommen bzw. gebraucht werden. Der PBR wird aber nicht so entwickelt, dass er den gesamten Sauerstoff für die Astronauten produziert oder das gesamte ausgeatmete CO₂ abbaut. Er soll Mikroalgen bzw. Biomasse, die zu einer ausgewogenen Nahrungsversorgung der Astronauten beiträgt, produzieren. Wie alles in der Raumfahrt, muss der PBR dabei sehr effizient arbeiten. Dazu muss man sich das Wachstum der Mikroalgen genauer anschauen. Abbildung 1 zeigt das Wachstum von Mikroalgen durch Auftragen der Biomasse über der Zeit. In der Natur vermehren sich die Mikroalgen anfangs sehr schnell, bis der Mangel an Platz und Ressourcen dazu führt, dass irgendwann ein Maximum erreicht wird und sogar wieder mehr Mikroalgen absterben als hinzukommen. Ziel der kontinuierlichen Kultivierung in einem PBR ist, dass die Dichte der Algenkultur in einem Bereich gehalten wird, in dem die

IRS Professors and Associate Professors:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Managing Director) · Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Roeser (Deputy Director)
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Ernst Messerschmid · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem · PD Dr.-Ing. Ralf Srama



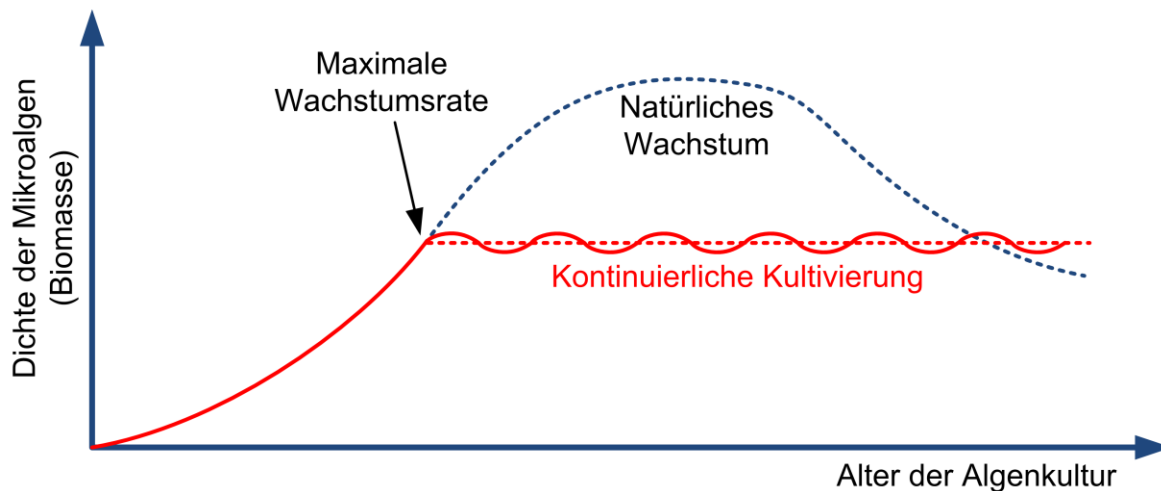
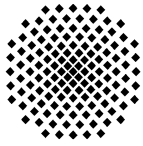


Abbildung 1: Natürliches Wachstum einer Algenkultur im Vergleich zur kontinuierlichen Kultivierung und regelmäßigen Ernte in einem Photobioreaktor

Wachstumsrate der Mikroalgen maximal ist. Dies lässt sich durch regelmäßiges Abernten der Mikroalgen und Zuführen von Nährstoffen realisieren.

Um des PBR-System an die Schwerelosigkeit anzupassen, müssen alle Elemente in Schwerelosigkeit funktionieren. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die transparente Kultivierungskammer gelegt, in der die Algen belichtet werden. Im IRS-Labor werden hier "Flat Panel Airlift" (FPA) Photobioreaktoren (siehe Abb. 2 links) der Firma Subitec eingesetzt. Darin wird das wässrige Medium, in dem die Algen kultiviert werden, durch aufsteigende Gasblasen durchmischt und in Rotation versetzt. Da dieses Prinzip in Schwerelosigkeit nicht funktioniert, muss das Medium aktiv umgewälzt werden. Ein Schwerpunkt der Forschung am IRS ist daher die Entwicklung einer geeigneten Reaktorgeometrie, in der das wässrige Medium ebenfalls gut durchmischt und in Rotation versetzt wird. Rechts in Abbildung 3 ist ein CAD-Modell eines s.g. Kármán-Reaktors abgebildet. Die Strömung in dessen Inneren ähnelt einer Kármánsche Wirbelstraße, in der sich gegenläufige Strömungswirbel hinter einem umströmten Körper bilden.

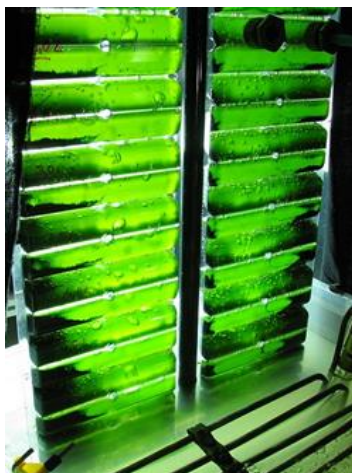


Abbildung 2:
"Flat Panel Airlift"
Photobioreaktoren

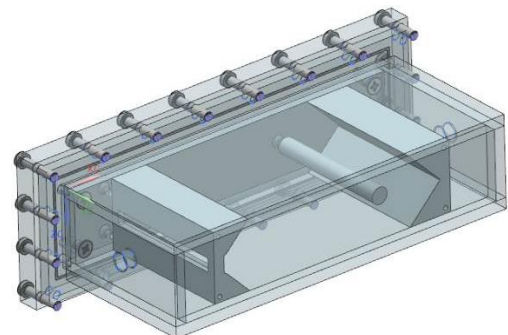
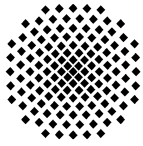


Abbildung 3:
Kármán-
Photobioreaktor

IRS Professors and Associate Professors:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Managing Director) · Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Roeser (Deputy Director)
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Ernst Messerschmid · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem · PD Dr.-Ing. Ralf Srama



3. Parabelflüge – Warum machen wir Parabelflugexperimente?

Neu entwickelte Maschinen müssen in relevanter Umgebung getestet werden. Im Schwerfeld der Erde lässt sich Schwerelosigkeit nur durch den freien Fall simulieren. Dieser kann entweder mit Falltürmen (2 Sekunden), mit Parabelflügen (20 Sekunden), mit Höhenforschungsraketen (einige Minuten) oder in einem Orbit (endlos) um die Erde realisiert werden. Die Dauer der Schwerelosigkeit ist bei Parabelflügen zwar relativ gering, dafür können jedoch viele Parabeln hintereinander geflogen werden und die Kosten sind verglichen mit einem Weltraumexperiment relativ gering. Im Februar 2014 wurde ein Prototyp des PBR-Systems im "A300 Zero-G" der Firma Novespace im Rahmen der 24. DLR Parabelflugkampagne in Schwerelosigkeit getestet. Ziel war es, die wichtigsten Funktionen des Systems sowie unterschiedliche Reaktortypen zu testen. Im Folgenden wird das Parabelflugexperiment vorgestellt und eine Auswahl der Messdaten präsentiert.

4. Das Parabelflugexperiment – Was steckt drin?

Das Parabelflugexperiment besteht aus einer wasserdichten Box, in der sich das PBR-System befindet, einer Stromversorgungseinheit und einer Steuerungs- & Datenerfassungseinheit. Zusammen mit vier Laptops wird alles in einem Profilsystem verbaut (siehe Abbildung 4). Das PBR-System enthält einen geschlossenen Kreislauf, in dem das wässrige Medium im Kreis gepumpt wird. Bei der Wahl der Pumpe ist insbesondere darauf zu achten, dass diese die Mikroalgen nicht beschädigt. Das wichtigste Element im Kreislauf ist, neben der Pumpe, die transparente Kultivierungskammer (oben in Abbildung 5), in der die Mikroalgen Lichtenergie aufnehmen. Andere Elemente sorgen dafür, dass Nährstoffe und Kohlendioxid dem Kreislauf hinzugefügt sowie Sauerstoff und Medium entnommen werden können. Hinzu kommen Sensoren, die Parameter wie Druck, Temperatur, Volumenstrom, pH-Wert und CO₂-Konzentration erfassen.

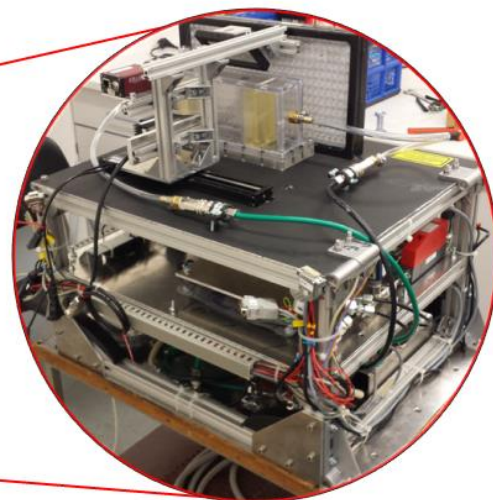
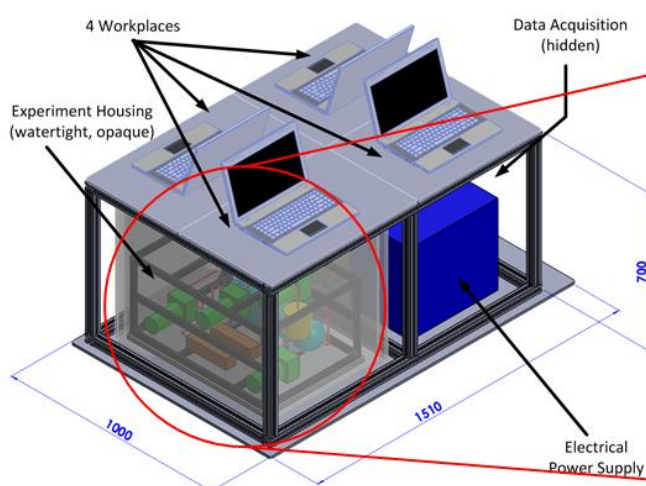


Abbildung 4: CAD-Design Experiment

Abbildung 5: innerer Experimententeil

IRS Professors and Associate Professors:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Managing Director) · Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Roeser (Deputy Director)
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Ernst Messerschmid · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem · PD Dr.-Ing. Ralf Srama

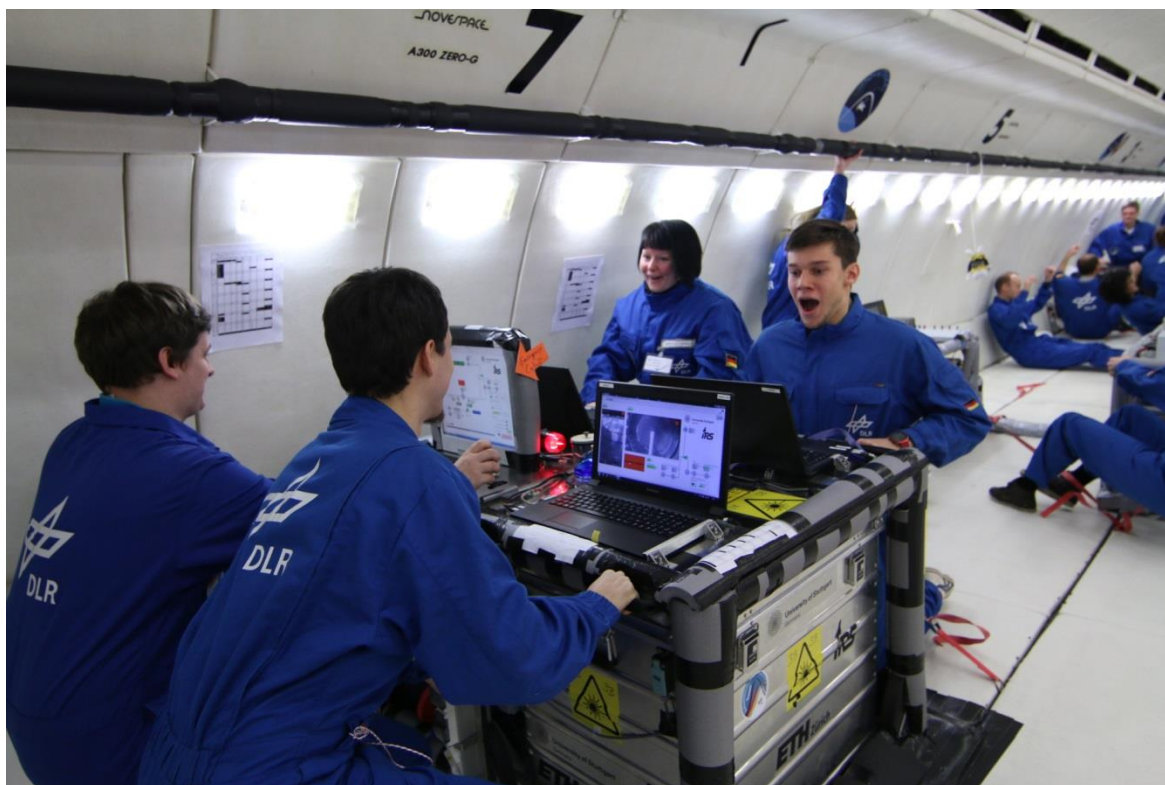
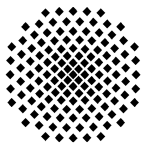
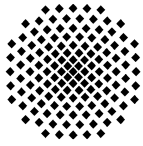


Abbildung 6: Impressionen aus Bordeaux

IRS Professors and Associate Professors:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Managing Director) v · Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Roeser (Deputy Director)
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Ernst Messerschmid · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schleichriem · PD Dr.-Ing. Ralf Srama





5. Das Parabelflugexperiment – erste wissenschaftliche Erkenntnisse

Wichtigstes Fazit aus dem Parabelflug ist das alle Systeme problemlos gearbeitet haben und alle Experimente wie geplant durchgeführt wurden. Lediglich eine kleine Leckage während des letzten Fluges kam unerwartet, wurde jedoch durch die vorgesehenen Sicherheitsmaßnahmen eingedämmt und beeinflusste die Messwerterfassung nicht merklich. Alle verwendeten Kultivierungskammern funktionieren im Prinzip, wobei eine detaillierte Auswertung der visuellen Strömungsanalytik noch bis Mitte Mai in Anspruch nehmen wird. Für die vom IRS betreuten Systeme lassen sich erste Aussagen über Funktionsfähigkeit und Tauglichkeit für Mikrogravitation (μg) bereits treffen. Das eingesetzte Pumpsystem (geschlossener Kreislauf mit Peristaltikpumpe) arbeitet problemlos, allerdings zeigen sich zwei funktionsbedingte Probleme die unter μg -Bedingungen scheinbar verstärkt werden. Zum einen pulsiert die erzeugte Strömung deutlich, was insbesondere im Gasseparator dazu führt das sich keine quasistatische Strömung ausbilden kann. Dies hat keinen Einfluss auf die generelle Funktion des Gasseparators hat, verschiebt aber die minimale Flussgeschwindigkeit die zum Betrieb nötig ist nach oben (siehe Abbildung 10). Zum anderen erweist sich die Druckabhängigkeit des Systems als kritisch. Im Zusammenspiel zwischen dem komplett gefüllten Flüssigkeitskreislauf, der sowohl saugend als auch drückend arbeitenden Pumpe, der Möglichkeit Gas in den Kreislauf einzubringen und zu entfernen, sowie dem schwankenden Druck in der Flugzeugkabine können Zustände entstehen, in denen die Pumpe nicht mehr in der Lage ist ausreichend Medium zu transportieren. Wie in Abbildung 8 dargestellt, kann die Hauptpumpe bei Absolutdrücken unter 0,6 bar keinen ausreichenden Fluss mehr gewährleisten.

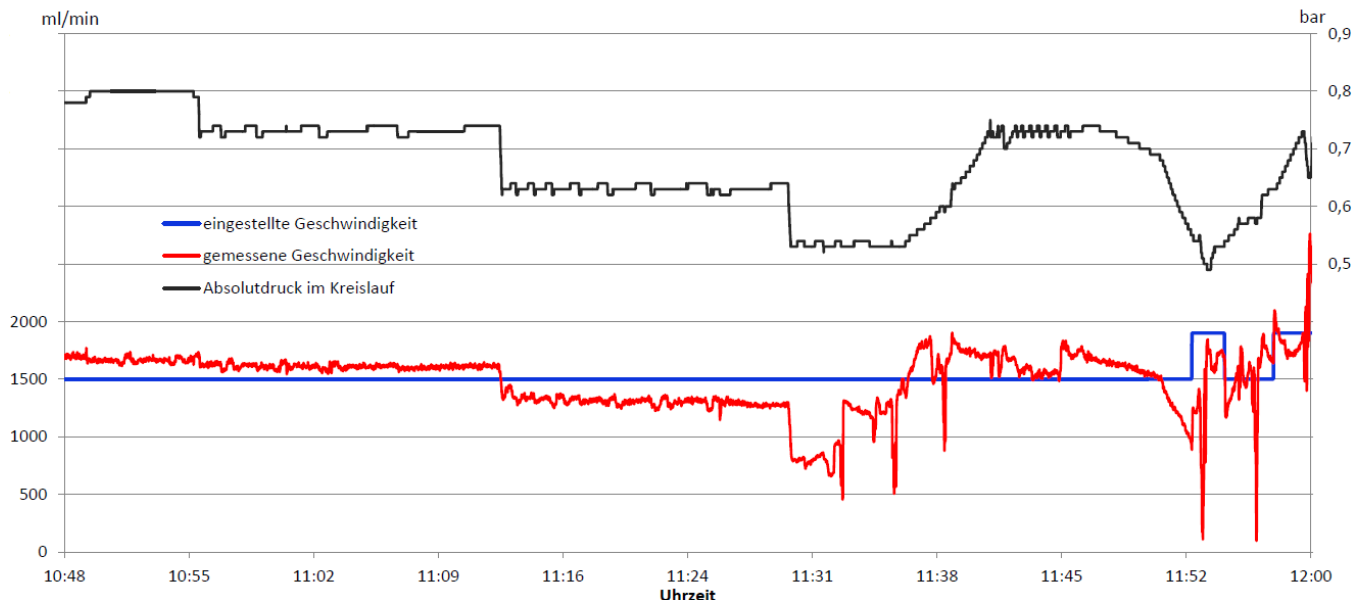
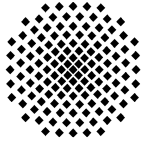


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Pumpgeschwindigkeiten (blau: SOLL, rot: IST) und Absolutdruck im Kreislauf

IRS Professors and Associate Professors:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Managing Director) · Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Roeser (Deputy Director)
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Ernst Messerschmid · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem · PD Dr.-Ing. Ralf Srama





Die im Parabelflug eingesetzte Sensorik hat ihre Funktionsfähigkeit bewiesen, wobei im Falle des gelöst-CO₂-Sensors sowie des auf einem ähnlichen Messprinzip beruhenden pH Sensors unerwartete Schwankungen im Messsignal zu erkennen sind. Wie in Abbildung 8 dargestellt, schwankt das Messsignal um etwa ± 50 mg/l mit einer gleichbleibenden Periodendauer von ca. 3 min. Obwohl dies mit dem Abstand zwischen zwei Parabeln übereinstimmt, ist ein Zusammenhang zur μg und hyper-g Belastung des Sensors hier unwahrscheinlich, da die Schwankungen auch in längeren Phasen ohne Parabel festgestellt werden können (siehe Abbildung 8, Zeitraum vor der ersten Parabel). Hier müssen weitere Bodentests Aufschluss geben, ob dieses Verhalten reproduziert werden kann, oder ob andere Faktoren während des Fluges hier einen Einfluss hatten (bspw. eine schwankende Spannung in der Stromversorgung, die im Flugzeug bereitgestellt werden kann).

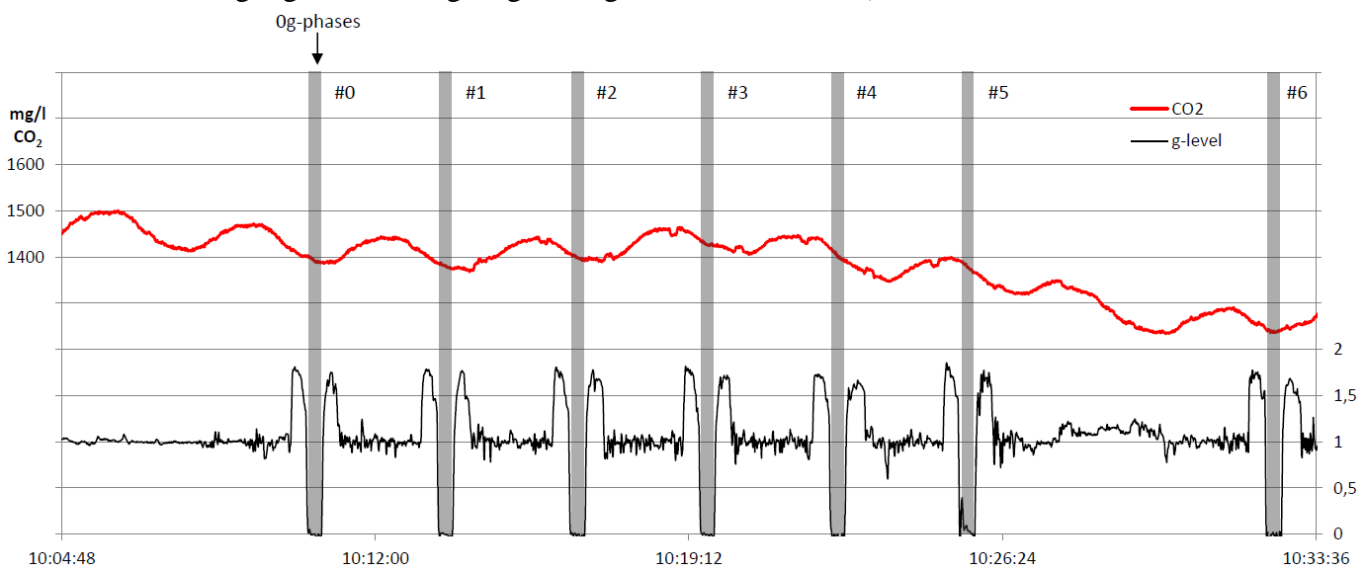


Abbildung 8: g-Level(schw.) und gemessene CO₂ Konzentration (rot) während Parabeln 0-5

Die größte unbekanntes im System war vor dem Flug der Vortex, der erstmalig zur Gasseparation eingebaut wurde. Während des Fluges hat sich der Vortex-Separator als gut zu kontrollierendes und funktionelles System erwiesen. Abbildung 9 zeigt wie nach Aktivierung des Vortex deutlich CO₂ aus dem System entfernt wird. Eine genaue Auswertung des Leistungsvermögens des Vortex während einzelnen Parabeln steht noch aus, allerdings zeigte sich bereits, dass der Vortex stark von der Pumpgeschwindigkeit abhängig ist. Wie in Abbildung 10 dargestellt bildet sich der Vortex bei Pumpraten unter 1300 ml/min (Wert durch weitere Experimente bestimmt) nicht komplett aus und es besteht die Gefahr, dass Flüssigkeit durch den Gasauslass austritt oder große Gasblasen zurück in den Kreislauf gespült werden. Sobald diese Grenzgeschwindigkeit allerdings überschritten wird, baut sich zuverlässig ein sehr stabiler Vortex aus.

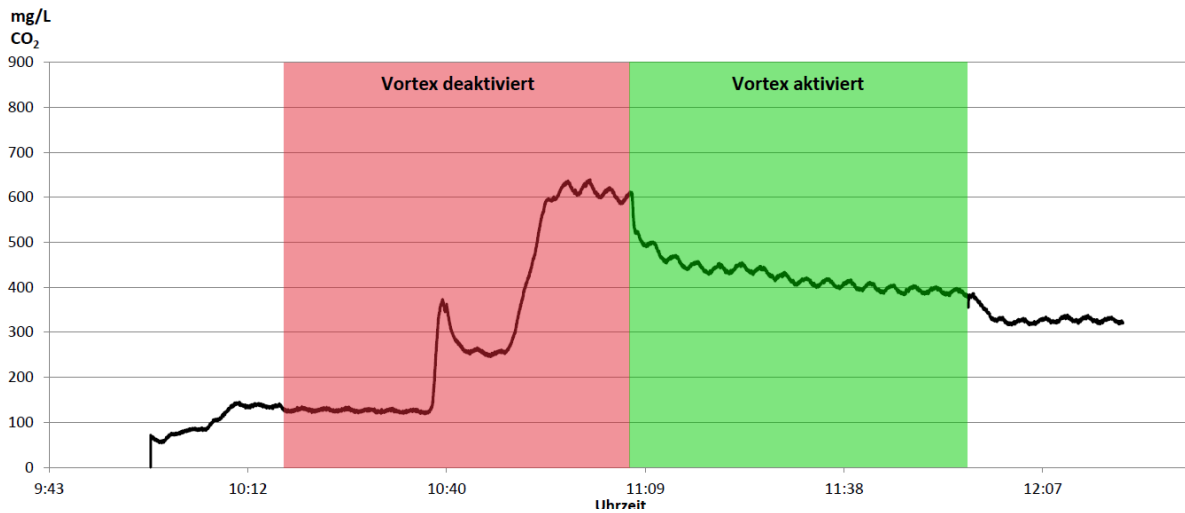
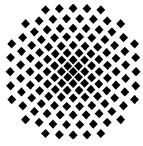


Abbildung 9: CO₂ Konzentration im Kreislauf vor und nach Einschalten des Vortex-Separator

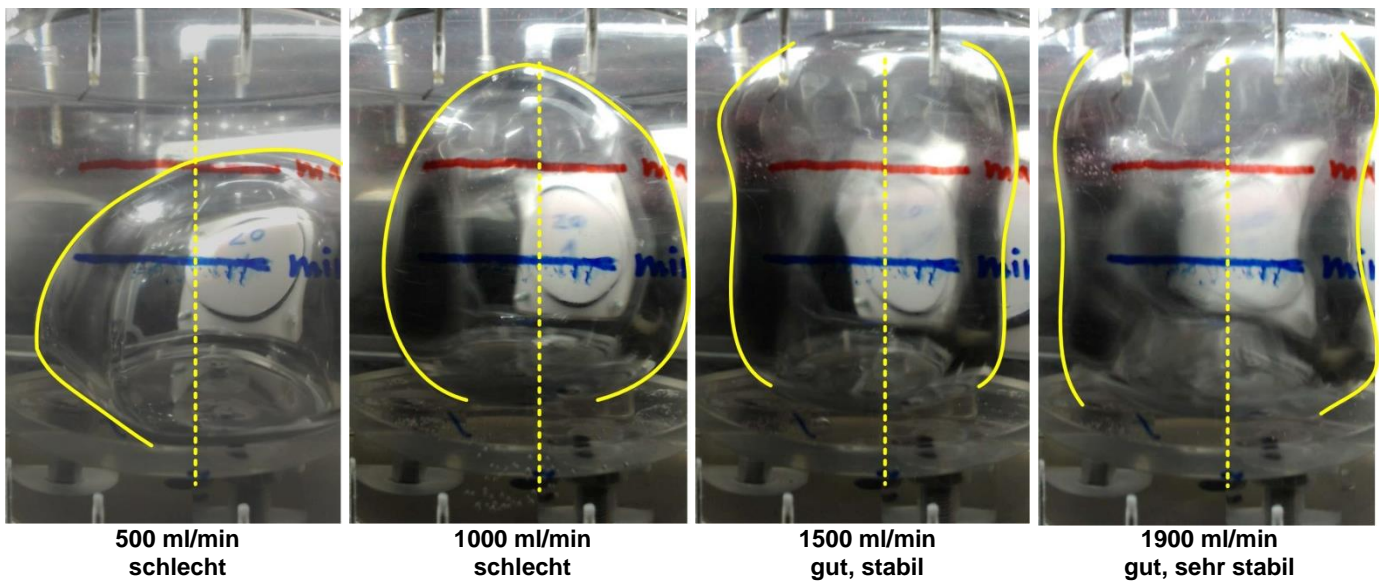
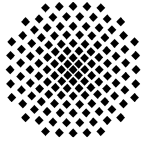


Abbildung 10: Ausbildung Vortex im Separator, Gasauslass oben, Flüssigkeitsauslass unten

IRS Professors and Associate Professors:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Managing Director) · Prof. Dr. rer. nat. Hans-Peter Roeser (Deputy Director)
Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig
Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. E. h. Ernst Messerschmid · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schleichriem · PD Dr.-Ing. Ralf Srama





6. Bodentest – Wie geht es weiter

Um aus den Ergebnisse, die während des Fluges gewonnen werden konnten den maximalen Gewinn zu ziehen, ist es notwendig komplementäre Bodentests durchzuführen. In diesen Test kann keine μg genutzt werden, es können aber längere und komplexere Prozeduren ausgetestet werden. Üblicherweise wird in der Raumfahrt das Bodenexperiments mindestens einmal komplett analog zum Flug durchgeführt. Dieser Schritt ist nicht beim Parabelflug nicht zwingend notwendig, da während des Fluges problemlos die Möglichkeit besteht in exakt denselben Umgebungsbedingungen Referenztest in normaler Gravitation durchzuführen. Daher werden die Bodentests hauptsächlich dazu genutzt sich auf einzelne, spezielle Problematiken zu fokussieren. Die Bodentests für dieses Experiment stehen noch aus, die Hauptproblematiken, die untersucht werden sollen, stehen aber fest.

Wie bereits beschrieben ist das niederfrequente Schwanken einiger Sensoren noch ungeklärt. Hier gilt es herauszufinden ob die Effekte reproduziert werden können, ob äußere Einflussfaktoren ausgeschlossen werden können oder ob gar systemeigene Parameter wie das Volumen der Kultivierkammer einen Einfluss haben. Sollte das schwingende Verhalten nicht abgestellt werden können, muss betrachtet werden ob dieses Verhalten für einen dauerhaften Einsatz akzeptabel wäre und durch softwareseitige Mechanismen abgefangen werden kann. Des Weiteren ist ein kontinuierlicher Langzeittest über mehrere Tage eingeplant, der zeigen soll das das System auch ohne dauerhaften, aktiven eingriff stabil läuft.

Die wichtigsten Bodentests erfolgen dann nicht mehr mit einem „leeren“ System, sondern werden mit Algenkulturen durchgeführt. Neben Problemen der Biokompatibilität, richtiger Beleuchtung, Temperatur und Nährstoffversorgung zeigen sich besonders beim Vortex-Separator spannende Fragen. Es gilt zu zeigen, dass die hohe Strömungsgeschwindigkeit im Vortex den Algen keinen mechanischen Schaden zufügt, sprich, das Zellwände und eventuell gebildete Zellverbände nicht zerrissen werden. Auch die Pumpe darf keine bleibenden Schäden an den Zellen hinterlassen, wobei hier aus Vorgängerprojekten ausreichend Erfahrung zeigt das dies kein Problem darstellen sollte.

Sollten die Algen wachsen, müssen sie CO_2 in O_2 umsetzen. Hier muss sich der Vortex in Kombination mit der Gasversorgung und der Sensorik beweisen. Der produzierte O_2 , in hohen Konzentrationen ein Zellgift, muss aus dem System entfernt und mit CO_2 Nachschub ersetzt werden. Am Ende der Untersuchungen sollte gezeigt werden, dass das System in der Lage ist Biomasse in einer ähnlichen Geschwindigkeit wie die terrestrischen Systeme zu produzieren. Ein Ende der Tests ist für August 2014 zu erwarten, wobei das Experiment-Setup anschließend für Bachelor- und Masterarbeiten weiter verwendet werden soll, um neue Ideen und Technologien zu testen.