

Bioprozessautomatisierung einer Algenanlage mithilfe eines Single-Board-Computers

Moritz Heinrich, Tobias Seydewitz, Franz Xaver Wildenauer, Heike Pospisil*

Zusammenfassung

Für die effektive Haltung von Mikroorganismen, kleinen Pflanzen oder Algen in Bioreaktoren ist die Aufrechterhaltung optimaler Kultivierungsbedingungen, wie beispielsweise pH-Wert, Temperatur oder Nährstoffgehalt, notwendig. Diese Parameter können sich während der Kultivierung ändern, weshalb sie regelmäßig kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden müssen. Wir präsentieren hier den technischen Aufbau und die Softwarerealisierung eines Automatisierungssystems zur autonomen Regulierung des pH-Wertes in Bioreaktoren, in denen die grüne Mikroalge *Scenedesmus rubescens* kultiviert wird. Dazu wurde ein System mit pH-Sensoren, Signalwandlern und Magnetventilen zur kontrollierten CO₂-Begasung aufgebaut. Für die Steuerung und die Datenaufzeichnung diente ein Single-Board-Computer (Raspberry Pi) mit Webserver. Die Anlage war voll funktionsfähig und konnte über mehrere Tage fehlerlos den pH-Wert auf einen vorgegebenen Wert regeln. Das System ist leicht auch auf Großanlagen und für andere Parameter erweiterbar. Durch die Nutzung eines Single-Board-Computers erfordert die Anlage nur minimalen Platz- und Energiebedarf und ist mit geringen Anschaffungskosten verbunden.

Abstract

The maintenance of stable internal conditions such as pH, temperature, or nutrients is essential for the cultivation of microorganisms, small plants and algae in bioreactors. These parameters can significantly vary during cultivation and have to be controlled and regulated. Here we present the technical construction and software implementation of an automation system for measurement and controlling pH in bioreactors for cultivating the green micro algae *Scenedesmus rubescens*. The system was built up with pH sensors, a signal transducing unit and magnetic valves that regulate the CO₂ volume flow. A single-board-computer (Raspberry Pi) with web server was used as control unit and for data recording. The established system was stable for several days and approved for fulfilling all requirements. It is easily expandable for other parameters and can be used for larger systems. By using the Raspberry Pi as a low cost, very energy efficient credit-card sized computer with minimum space requirements the system can serve as an alternative for commercial automation systems.

1. EINLEITUNG

Es gibt schätzungsweise 400.000 verschiedene Algenarten (Norton et al. 1996). Sie besiedeln unterschiedliche (meist aquatische) Lebensräume, sind morphologisch sehr verschieden aufgebaut und lassen sich in Mikro- und Makroalgen unterscheiden. Allen Algen gemeinsam ist die Fähigkeit zum phototrophen Wachstum, d.h. sie nutzen während der Photosynthese die aus dem Sonnenlicht gewonnene Energie zur Biomasseproduktion und binden dabei CO₂. Algen werden biotechnologisch auf vielfältige Weise verwendet, wie beispielsweise als Lebensmittel (in Form von Salat oder

Gemüse), als Energielieferant (Algenkraftstoff), als Dünger, als CO₂-Verwerter, als Biomaterial (Cellulose) sowie als Quelle für Mineralstoffe, Spurenelemente, ungesättigte Fettsäuren oder Beta-Carotine (Milledge 2011, Fernández-Sevilla et al. 2010). Sie stellen eine natürliche, sehr schnell nachwachsende Rohstoffquelle dar, die einen etwa fünf- bis zehnmal höheren Ertrag als landwirtschaftlich genutzte höhere Pflanzen aufweisen. Während produktionsstarke terrestrische Pflanzen, wie z.B. Raps, etwa 4,2 Tonnen verwertbare Biomasse pro Hektar und Jahr produzieren, können 10 bis 30 Tonnen Mikroalgen-Trockenbiomasse pro Hektar und Jahr in offe-

nen Systemen und bis zu 150 Tonnen pro Hektar und Jahr in Photobioreaktoren hergestellt werden (Weyer et al. 2010, Wijffels & Barbosa 2010).

Die grüne Mikroalge *Scenedesmus rubescens* ist in der Lage, die sekundären Carotinoide Lutein und Zeaxanthin zu bilden, die als Nahrungsergänzungsmittel und Lebensmittelfarbstoffe wirtschaftliche Bedeutung haben (Fernández-Sevilla et al. 2010). Die Kultivierung von *S. rubescens* ist einfach in einem Kulturmedium bei konstanter Temperatur und einer definierten Beleuchtungsintensität möglich. *S. rubescens* besitzt ein pH-Optimum bei etwa 7 bis 7,5 (Heinrich 2014); eine Kultivierung in basischeren oder saureren

* korrespondierende Autorin

Milieu führt zu verzögertem Wachstum und verändertem Stoffwechsel der Algen. Da die für den Stoffwechsel essenziellen Nitratmoleküle aus dem Kulturmedium im Symport mit Wasserstoffionen (H^+) aufgenommen werden, führt die Protonenaufnahme durch die Zellen zu einer Anreicherung von OH^- -Ionen, also zu einem pH-Anstieg. Der pH-Wert kann leicht durch CO_2 -Zufuhr gesenkt werden, da in Wasser gelöstes CO_2 mit Hydroxidionen und Wasser Hydrogencarbonationen bildet, welche mit einem weiteren Wassermolekül zu Carbonationen und Hydroxoniumionen reagieren. Letztere dienen als Protonendonatoren, weshalb der pH-Wert sinkt.

Zur Gewährleistung einer optimalen Kultivierung ist entsprechend den vorgenannten Ausführungen eine möglichst genaue Regelung des pH-Wertes notwendig. Abbildung 1 zeigt einen solchen Regelkreis, in dem der pH-Sensor als Messglied der Messgröße pH-Wert dient und pH_{min} sowie pH_{max} die Grenzmaße darstellen. Hier ist angenommen, dass auch eine pH-Wert-Unterschreitung möglich ist, also das Milieu saurer wird. In diesem Fall muss durch Zugabe einer basischen Komponente der pH-Wert angehoben werden. Als Regler fungiert die Zugabe von CO_2 bzw. der entsprechenden Base, wobei eine parameterabhängige Fallunterscheidung durchgeführt wird. Das in Abbildung 1 gezeigte Regelschema symbolisiert eine Zweipunktregelung, also mit Minimal- und Maximalwertprüfung. Die Regelung kann als Proportional- oder On-Off-Regelung umgesetzt werden.

Für die Regelung des pH-Wertes der Algenkultur ist es erforderlich,

1. den ermittelten pH-Wert mit den Stellwerten pH_{min} und pH_{max} zu vergleichen,
2. die Weite sowie die Dauer der Ventilöffnung für die Zugabe von CO_2 (oder Base) zu ermitteln und
3. regelmäßige pH-Wert-Messungen durchzuführen.

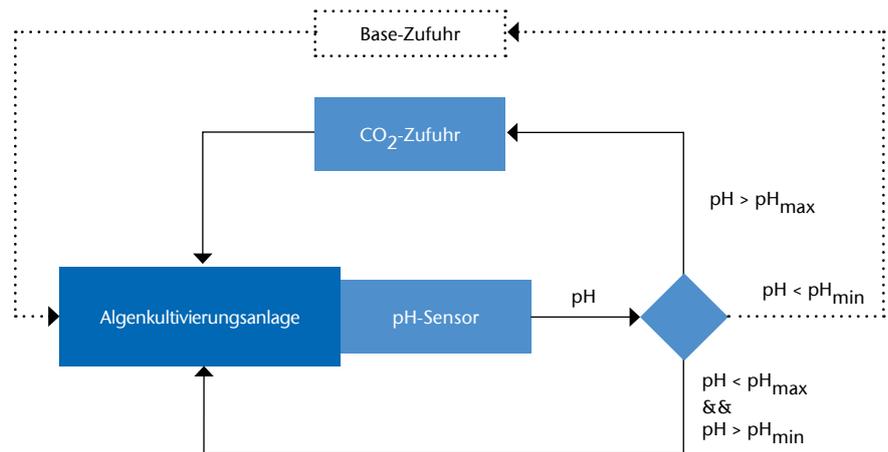


Abb. 1) Schematische Darstellung der Regelung des pH-Wertes einer Algenanlage. Der gemessene pH-Wert wird mit den Stellwerten pH_{min} und pH_{max} verglichen und eine Fallunterscheidung durchgeführt. Im hier beschriebenen Szenario spielt der Regelkreis für einen pH-Wert, der kleiner ist als pH_{min} , keine Rolle, weshalb dieser Weg gestrichelt dargestellt ist.

Die drei oben genannten Punkte können vollautomatisch realisiert werden. Wir zeigen hier ein Automatisierungssystem, mit dem es möglich ist, kostengünstig und autonom Bioprozesse, wie beispielsweise die Kultivierung von Algen zur biotechnologischen Nutzung, zu regeln.

2. MATERIAL UND METHODEN

Die Mikroalge *S. rubescens* wurde in Bold's Basal Kulturmedium bei $30^\circ C$ in 11 Schottflaschen (GLS 80) mit Schraubkappe und vier eingelassenen Ports kultiviert. Über die Ports ist die Gaszufuhr, die Probenahme sowie die Verwendung des Sensors möglich. Die Bestrahlung der Bioreaktoren mit Licht erfolgte von der Rückseite mit einer Beleuchtungsintensität von $50\mu E/m^2 s$. Dem Medium ist Stickstoff in Form von 3mM Natriumnitrat als Stickstoffquelle zugefügt. Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Begasungseinheit für drei Reaktoren. Über Magnetventile wird die Zuluft mit CO_2 geregelt. Das Abgas wird in separaten Abfallbehältern mit NaOH geleitet.

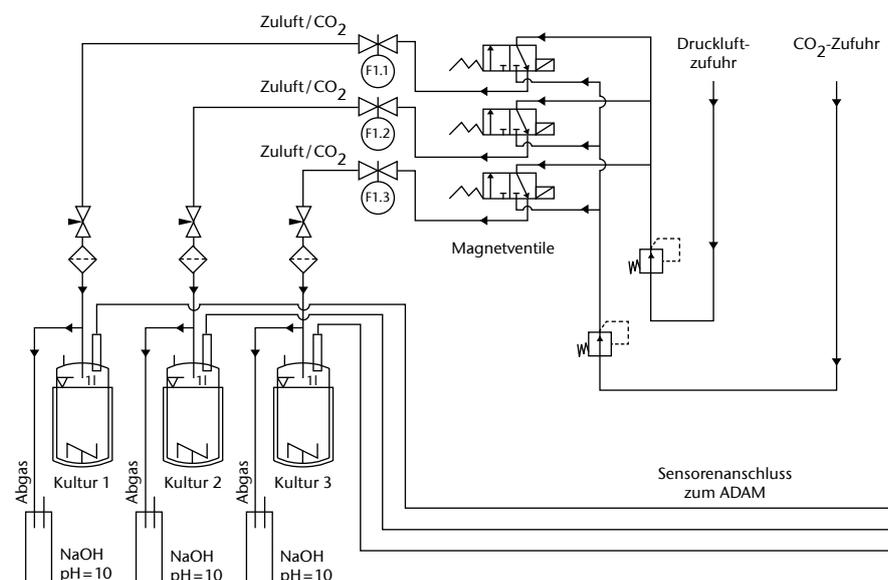


Abb. 2) Darstellung der Begasungseinheit der Algenanlage mit drei Kulturen. Über die Magnetventile wird ein Wechsel zwischen Druckluft und CO_2 -Begasung realisiert. Das Abgas wird in Behälter mit NaOH-Befüllung geleitet. Die pH-Sensoren leiten ihre Signale direkt an das ADAM-System.

Als pH-Sensoren dienen SE515 Memosens-Sensoren der Firma Knick, die über ein induktives Sensor-Stecksystem zur kontaktlosen Datenübertragung sowie einen internen Chip zur Speicherung von Kalibrierdaten verfügen. Der pH-Sensor sendet ein digitales Signal über den gemessenen pH-Wert im Messbereich von pH 0 bis 14 (siehe Abbildung 3). Mit dem SE515-Memosens-Sensor ist neben der pH-Messung auch eine Temperaturmessung über einen zweiten Messkanal möglich. Der direkt angeschlossene Messwandler (Memorail, Firma Knick) wandelt das digitale Sensor-Signal in ein analoges Signal um, welches anschließend mithilfe eines analogen Input-Moduls in ein digitales Signal von 16 Bit gewandelt wird (siehe Abbildung 3). Es handelt sich dabei um das Modul ADAM5017, welches in ein Schnittstellengerät, den ADAM-5000L/TCP (Fa. Advantech), eingebunden wurde. Dieses ist ein Basisgerät für die Wandlung von digitalen und analogen Signalen und bietet Steckplätze für verschiedene Ein- und Ausgangsmodule für unterschiedliche Aufgaben. Das Modul ADAM5017 ist ein Input-Modul mit acht Kanälen, das analoge Signale (elektrische Spannung oder die Stromstärke; hier wurde ein Stromstärkensignal im Bereich von 4 bis 20mA ausgewählt) in digitale Ausgänge zu je 16 Bit umwandelt. Dieses 16-Bit-Signal wird über die interne TCP-Schnittstelle des ADAM-5000L/TCP an einen angeschlossenen Einplatinencomputer gesendet, von welchem über dieselbe Schnittstelle Eingangssignale empfangen werden können (siehe Abbildung 3). Ein weiteres Modul, das diskrete Output-Modul ADAM5069, enthält acht Relais zur Schaltung von Gleichfeldlastkreisen (bei 30V) oder Wechsellastkreisen (bei 250V) bis zu 5A. Damit wird ein direkt gesteuertes 3/2-Wege-Magnetventil (Typ 6012, Fa. Bürkert) geschaltet. Zur Kommunikation wurde der RJ45-Bus über Ethernetverbindung und das Modbus/TCP-Protokoll genutzt. Weitere Schnittstellen sind RS485 und RS232, die hier nicht zum Einsatz kamen. Als Prozessleitsystem für die Steuerung und für die Datenerfassung wird ein kleiner Single-Board-Computer, ein Rasperry Pi (Modell B, Revision 2,

Fa. Rasperry Pi Foundation), verwendet. Dieser Computer enthält einen Broadcom-BCM2835-System-On-A-Chip mit einer 700MHz ARM11-CPU, eine Broadcom VideoCore-IV-Grafikkarte und 512MB SDRAM. Als Betriebssystem dient das Linux-Derivat Debian Wheezy (Raspian). SQLite diente als Datenbanksystem für die Speicherung von Daten und Konfigurationen, als Webserver wurde ein Apache-System verwendet, und zur Erstellung von Webanwendungen die Programmiersprache PHP. Die Signalübertragung zwischen dem Signalwandler und dem Rasperry Pi findet über Ethernet statt, was Übertragungsraten von 10 bis 1000 Megabit pro Sekunde ermöglicht. Es

wurden die Protokolle TCP (Transmission Control Protocol) und UDP (User Datagram Protocol) verwendet, die eine Verbindung zwischen Netzwerkkomponenten in Vollduplex herstellen. Als Kommunikationsprotokoll diente das Modbusprotokoll, für das frei verfügbare PHP-Bibliotheken existieren. Für die Umrechnung zwischen dem digitalen Ausgabesignal des pH-Sensors und dem 2Byte-Ausgabesignal des 5017 Moduls wurde eine Kalibrierkurve erstellt, die den Anstieg der Stromstärke bei zunehmendem pH-Wert beschreibt. Anschließend wurde der Stromstärkenbereich von 4 bis 20mA auf einen 16-Bit-Wertebereich normiert und mit dem Anstieg der Kalibrierkurve verrechnet.

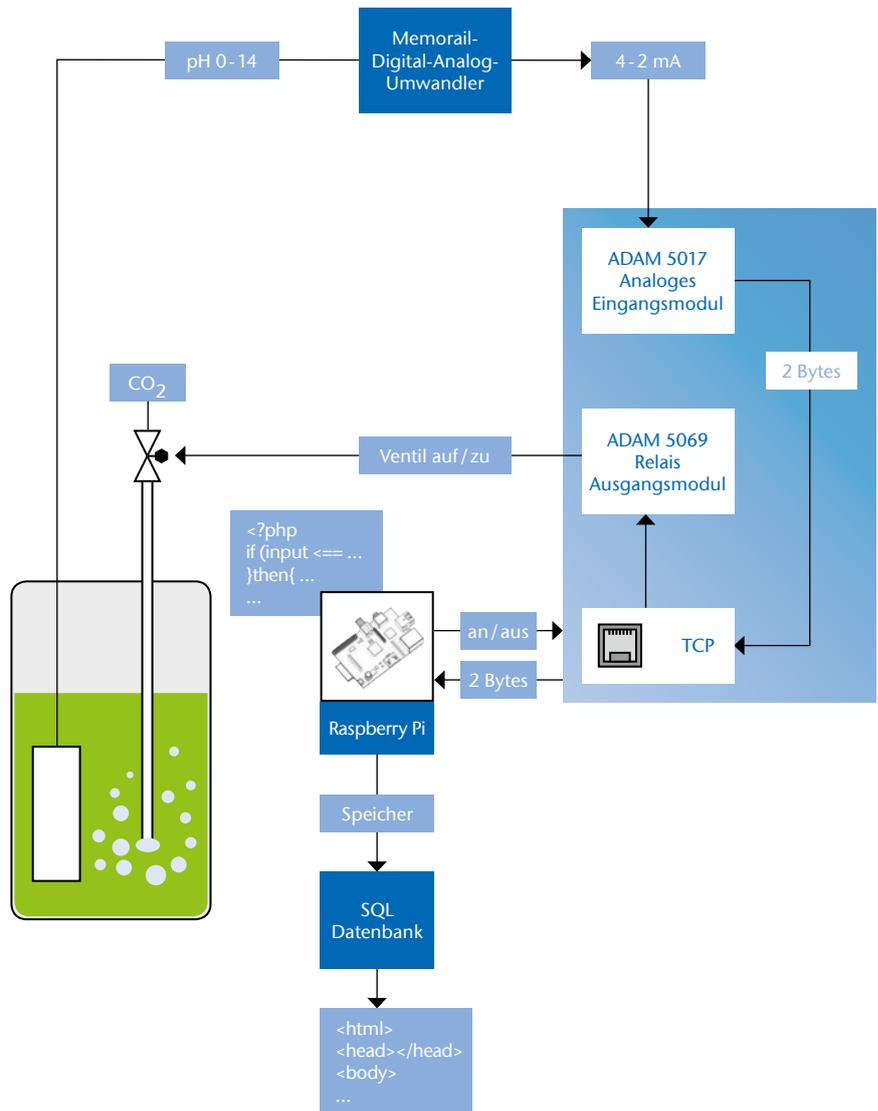


Abb. 3) Aufbau der Bioprocessautomatisierungsanlage zur Regelung des pH-Wertes einer Algenanlage mithilfe eines Prozessleitsystems.

3. ERGEBNISSE

3.1 AUFBAU DES AUTOMATISIERUNGSSYSTEMS

Das dargestellte Steuerungssystem war nach dem Aufbau voll funktionsfähig und arbeitete nach der Übergabe der Konfigurationsdaten völlig autonom. Über einen Zeitraum von zehn Tagen wurden der pH-Wert für zwei verschiedene Kulturen konstant gehalten und Temperatur und pH-Wert in diesem Zeitraum aufgezeichnet und in einer Datenbank gespeichert. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 gezeigt.

3.2 NORMIERUNG DER SIGNALWANDLUNG

Zunächst wurde die Umrechnung zwischen dem pH-Sensor-Signal in das 16-Bit-Signal (dies entspricht 2 Byte) mit einem Umrechnungsfaktor k_p bestimmt. Dazu wurde die Kalibriergerade zwischen pH-Wert-Signal (Sensor-Signal) und Stromstärke (Memorail-Ausgang) durch Zweipunktkalibrierung mit zwei Pufferlösungen bei pH 4,0 bzw. 7,0 bestimmt. Der Anstieg ergab einen Wert von $k_p = 1,1429$. Der vom Memorail ausgegebenen Wert der Stromstärke I_p , der auf das Intervall von 4 bis 20 mA normiert ist, ergibt sich somit nach Formel (1) wie folgt:

$$1 \quad I_p = pH * k_p + 4$$

Im zweiten Schritt wurde die Intervalltransformation von 4 und 20 mA auf 0 bis 16 Bit berechnet. Hierbei muss der jeweilige Dezimalwert der Binärzahl berücksichtigt werden, sodass das Intervall für das Binärsignal zwischen 0 und 65.535 liegt. Die Intervalltransformation erfolgt nach Formel (2):

$$2 \quad Dez = \frac{Dez_{max} - Dez_{min}}{I_{max} - I_{min}} * (I_p - I_{min}) + Dez_{min}$$

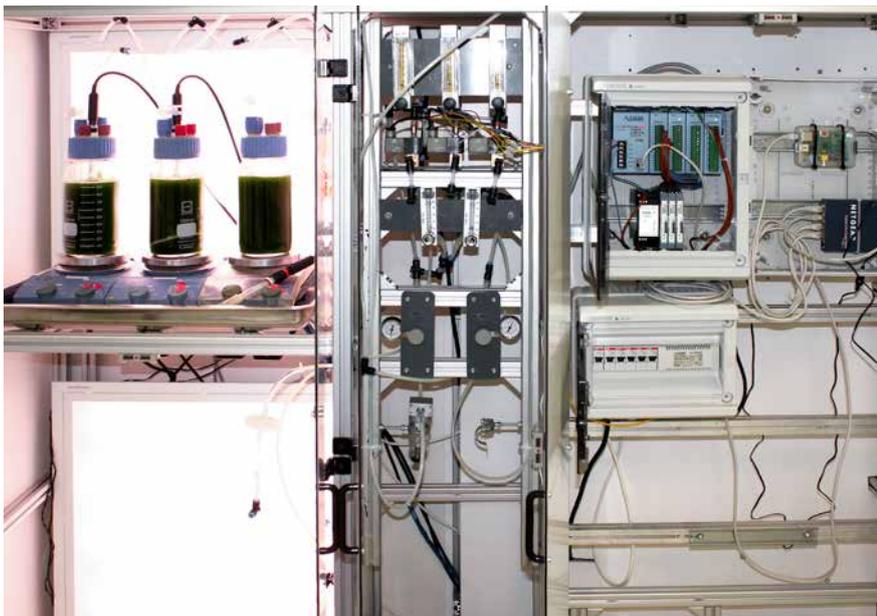


Abb. 4) Versuchsaufbau des Automatisierungssystems. Im Reaktorsystem (links) sind drei Bioreaktoren in 1l-Schottflaschen auf Heizplatten zu sehen. In den luftdicht modifizierten Deckeln befinden sich die Anschlüsse für Druckluft und CO₂ sowie die pH-Sensoren. Das Belüftungssystem (Mitte) umfasst die CO₂-Begasung mit steuerbaren Magnetventilen. Im Steuerungssystem (rechts) sind der Raspberry Pi sowie der ADAM-Messwandler mit den verbauten Modulen zu erkennen.

Die vom ADAM5017-Modul weitergegebene 2 Byte lange Binärzahl kann nach Überführung in eine Dezimalzahl durch Umstellen der Formeln (1) und (2) in den pH-Wert umgerechnet werden.

3.3 PH-WERT-VERÄNDERUNG IN UNGEREGELTEN SYSTEMEN

Für ein unreguliertes System der Algenkultur, d.h. ohne Zufuhr von CO₂, war erkennbar, dass schon nach ca. fünf Stunden pH-Werte größer als 9 erreicht wurden (siehe Abbildung 5). Ab diesem pH-Wert war eine deutliche Verringerung des pH-Anstieges zu verzeichnen, was auf die Wachstumshemmung bei einem für *Scenedesmus rubescens* nicht optimalen pH-Wert zurückzuführen ist, da bei vermindertem Wachstum die Nitrataufnahme und somit die Protonenaufnahme aus dem Medium verringert sind. Somit steigt der pH-Wert nur noch marginal an, er kann aber von der Algenkultur von alleine nicht wieder verringert werden (Lange 2014).

3.4 PH-WERT-VERLAUF IM GEREGELTEN SYSTEM

Die Algenkultur wurde über einen Zeitraum von zehn Tagen mit dem beschriebenen Steuerungssystem betrieben. Die Steuerung erfolgte autonom und war so eingestellt, dass ein pH-Wert von 7,5 nicht überschritten werden sollte. Alle Daten wurden etwa einmal pro Sekunde aufgezeichnet. In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt aus dem Verlauf des pH-Wertes gezeigt (Lange 2014). Am Ende des gezeigten Zeitraumes wurde die Regelung abgeschaltet, und ein sehr schneller Anstieg des pH-Wertes ist infolge der Abschaltung zu erkennen. Die Messwerte verdeutlichen, dass der pH-Wert mit dem Automatisierungssystem effektiv reguliert wurde.

pH-Messung in zwei verschiedenen Algenreaktoren Ungeregelttes System

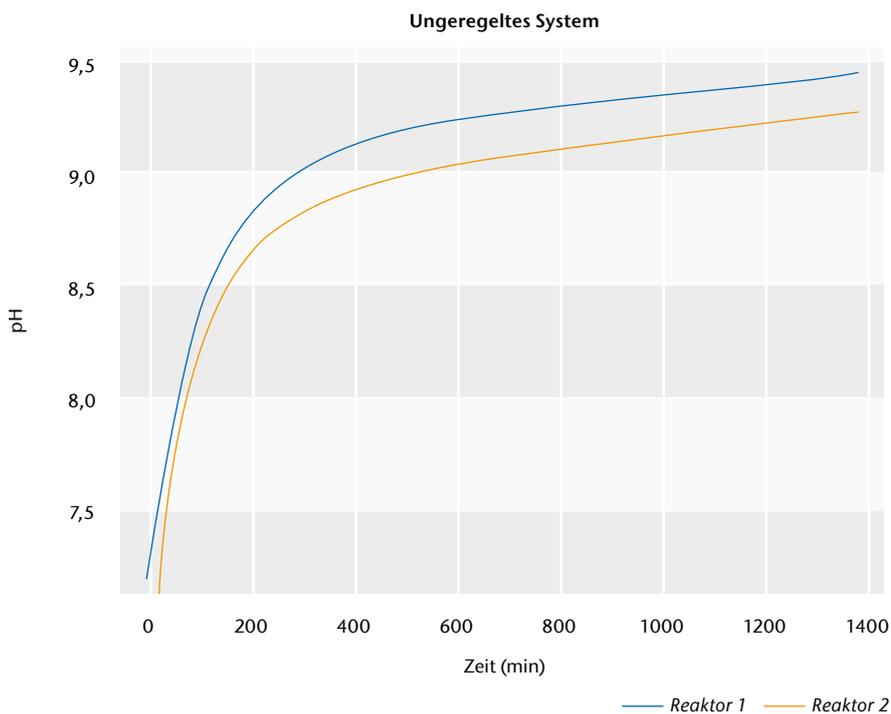


Abb. 5) Verlauf des pH-Wertes einer Algenkultur über 24 Stunden ohne pH-Wert-Regelung, also ohne Zufuhr von CO₂ in den Reaktor. Dargestellt ist eine parallele Messung in zwei verschiedenen Bioreaktoren. Die Algenkulturen befanden sich in der stationären Phase des Wachstums.

pH-Messung in einem Algenreaktor Geregelttes System

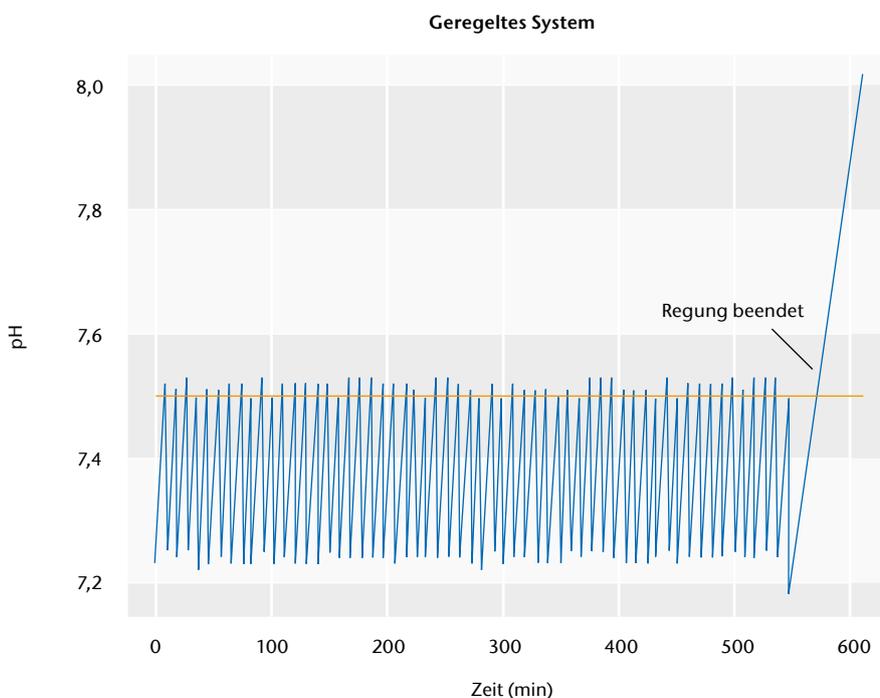


Abb. 6) Darstellung der pH-Messung für das Geregeltte System. Gezeigt ist nur ein Ausschnitt aus dem Verlauf der Messung. Gelb markiert ist hier der Maximalwert des pH-Wertes, welcher nicht überschritten werden sollte. Gekennzeichnet ist mit dem blauen Pfeil weiterhin der Zeitpunkt der Abschaltung der Regelung.

3.5 SOFTWARE

Die entwickelte Software ermöglicht online eine Steuerung des gesamten Systems, die Anpassung von Einstellungen und die Auslagerung von aktuellen Messwerten in eine Speicherdatenbank. Der Zugriff auf die Hauptdatenbank und der Signalfluss zwischen Hauptprogramm und dem Signalwandler sind in Abbildung 7 dargestellt. Vier Hauptfunktionen sind für die Steuerung der Anlage zuständig: Die Funktion 1 schaltet alle Relais aus, in Funktion 2 werden die Signale der ADAM-Module ausgelesen, umgewandelt und an Funktion 3 übergeben. Diese vergleicht die Werte mit dem vorgegebenen Maximalwert und schaltet bei Überschreitung des maximal erreichbaren Wertes die Relais für die Magnetventile zur Belüftung mit CO₂ ein. Hier ist erkennbar, dass nur eine Einpunktregelung zum Einsatz kam, also die Abfrage nach Überschreiten eines Maximalwertes. Die sich anschließende Funktion 4 koordiniert die Speicherung der Messwerte in der Datenbank (Heinrich 2014). Die Kommunikation der Webapplikation mit der Datenbank ist in der Abbildung 8 zusammenfassend dargestellt. Die Hauptdatenbank enthält folgende drei Tabellen: (1) die Messwerte mit Datum, Uhrzeit, Kanalnummer und Messwerttyp, (2) die Kerndaten mit den Device-Nummern, der IP-Adresse und dem Messzeitabstand sowie (3) die ADAM-Daten mit Kanaladresse, Art der Messung, den Umrechnungsfaktor aus der Kalibrierung, den zu verwendenden Maximalwert, die Relaisadressen sowie die Länge der Öffnungszeit der Ventile (Heinrich 2014). Die Webapplikation wurde in HTML und PHP erstellt und ermöglicht die Abfrage des aktuellen Programmstatus, die Eingabe kennzeichnender Attribute wie der Kulturbezeichnung, die Änderung ausgewählter Steuerparameter (Messzeitabstand, pH-Maximalwert, Umrechnungsfaktor, Ventilöffnungszeiten), die ADAM-Konfiguration (Zuordnung der Kanäle zu den jeweiligen Mess- und Steuersystemen) sowie die Überführung der Hauptdatenbank in eine Speicherdatenbank oder das Löschen von Daten (Heinrich 2014).

Während der Laufzeit des Programms wurden ca. 85.000 Messwerte gespeichert, wobei zu allen Zeitpunkten für jeden Bioreaktor sowohl der pH-Wert als auch die Temperatur aufgezeichnet wurden. Dies entsprach einer Datenbankgröße von

weniger als 4 MB. Im Raspberry Pi ist eine Speicherkapazität von 30 GB verfügbar, sodass das Programm in dem beschriebenen Aufbau mit zwei Reaktoren nicht an die Grenze des verfügbaren Speichers kommen wird. Werden mehr ADAM-Kanäle genutzt

oder das Messintervall verringert, wird sich die Größe der Datenbank erhöhen, doch kann abgeschätzt werden, dass die Speicherkapazität keinen limitierenden Faktor des Steuerungssystems darstellt.

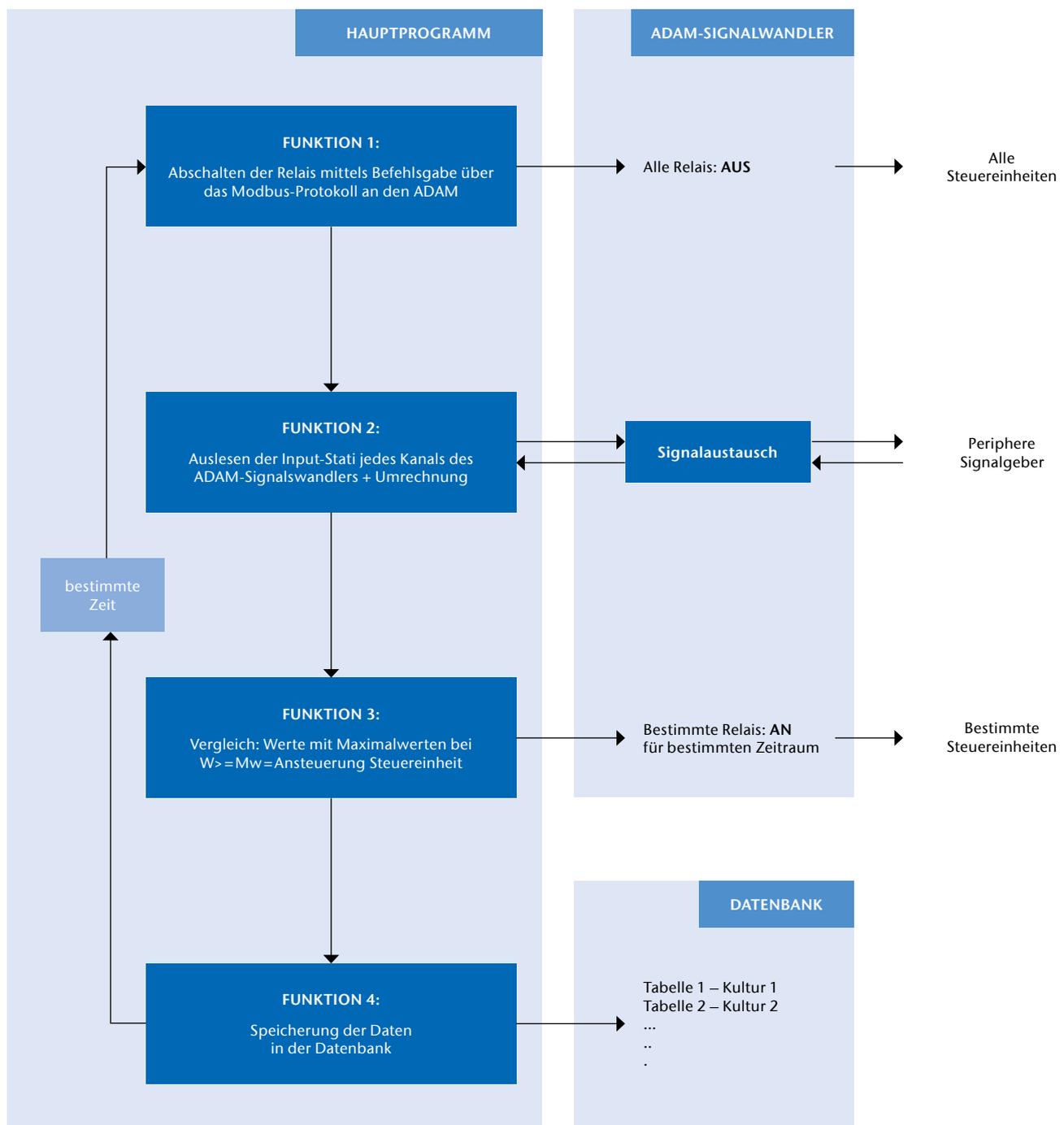


Abb. 7) Ablauf der Aufrufe der Funktionen im Hauptprogramm und deren Interaktionen mit dem ADAM-Signalwandler sowie mit der Datenbank, die über vier Funktionen des Hauptprogrammes gesteuert werden. Die genauere Beschreibung zu den Funktionen findet sich im Text.

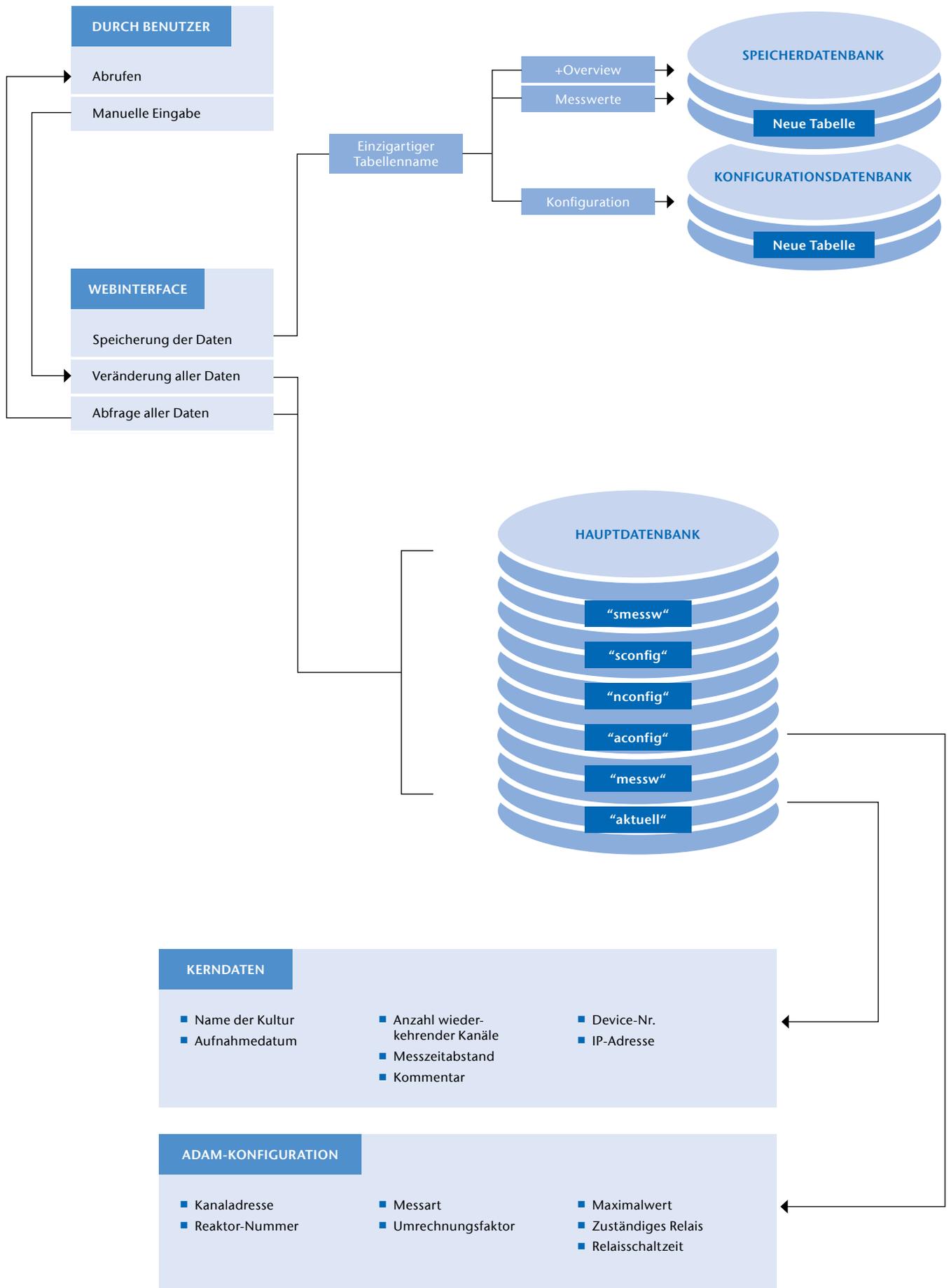


Abb. 8) Darstellung der Kommunikation des Hauptprogramms mit den drei Datenbanken der Software (Hauptdatenbank, Speicherdatenbank, Konfigurationsdatenbank). Gezeigt sind die wichtigsten Attribute der Datenbanken sowie der Zugriff aus der Webapplikation.

4 DISKUSSION

Die Massenproduktion von Algen erfolgt in großflächigen landwirtschaftlichen Anlagen von 10 bis 100 ha Fläche mit etwa 3 bis 30 Photobioreaktoreinheiten pro ha. Das Problem der Anlagen- bzw. Prozessüberwachung ist bislang ungelöst. Zwar stehen prinzipiell geeignete Mess- und Regeleinrichtungen für Bioreaktoren oder Kläranlagen zur Verfügung, doch sind diese für die zahlreichen Einzelanlagen bei Algenplantagen mit einem minimalen Stückpreis von 1.500 bis 2.000 Euro viel zu teuer. Mit dem hier vorgestellten System wurde eine kleine dezentrale Mess- und Regeleinheit entwickelt, die bei einem Einzelpreis von weniger als 300 Euro sowohl einfache pH-Regelaufgaben erfüllt als auch Daten aufzeichnen und an eine zentrale Leitwarte übermitteln kann. Damit ist eine Nutzung auch außerhalb von biologischen Laboren möglich, beispielsweise bei großtechnischen Freifeldanlagen. Durch die Realisierung der Kommunikation über eine Webapplikation ist Ortsunabhängigkeit gegeben, da lediglich ein Zugriff auf das Internet ermöglicht werden muss. Das Automatisierungssystem war voll funktionsfähig, und alle Komponenten haben bisher ihre Ausfallsicherheit bewiesen. Es konnte mit dem hier vorgestellten Aufbau autonom und zuverlässig der pH-Wert auf einem festgelegten Wert geregelt werden. Zur Verbesserung und Erweiterung des Systems sollte als nächster Schritt die Länge der Öffnungszeiten der Ventile nicht mehr fest vorgegeben sein, sondern als Proportionalregelung realisiert werden. Wird solch ein Regelungsansatz verwendet, wird die Ventilöffnungszeit von der Differenz des gemessenen pH-Wertes zum Soll-pH-Wert abhängig gemacht, wodurch weniger Schaltvorgänge in den Ventilen erforderlich sind und ein Überschwingen des Sollwertes vermieden wird. Auch eine Erweiterung der bisher vorliegenden Einpunktsteuerung auf eine Zweipunktsteuerung sollte berücksichtigt werden. Damit kann nicht nur ein Maximalwert, sondern auch ein Minimalwert vorgegeben werden, so wie dies in der Abbildung 1 gezeigt ist. Dies ermöglicht die Nutzung der Anlage für

weitere biologische Objekte und die Integration anderer Messparameter. Eine Steuerung der Temperatur war in diesem System bereits integriert. Hierzu wurde die Temperatur über den pH-Sensor ermittelt und eine elektrische Heizplatte bei Bedarf eingeschaltet. Allerdings erwies sich die Temperatursteuerung als fehleranfälliger als die pH-Steuerung, da es durch den Aufbau in Kulturschränken und die große Abwärme der Lampen bei geschlossenen Türen zu Hitzestau kam und eine Kühlung, wie z. B. durch ein Peltier-Element, in diesem Regelsystem bisher nicht integriert ist. Das System ist modular aufgebaut, und alle Geräte sind untereinander vollständig kompatibel. Durch die Integration weiterer Module kann die Anlage vielfältig eingesetzt und um zahlreiche digitale und analoge Ein- und Ausgänge erweitert werden. Bisher sind nur 6 der 24 Kanäle der Analog-Digital-Wandler-Module belegt, sodass die Möglichkeit für 18 weitere Sensoren, wie z. B. Sauerstoffelektroden oder lichtempfindliche Sensoren, besteht. Das vorgestellte System kann somit auch für die automatische Analytik verwendet werden und ist nicht nur für sensorische und regulatorische Anwendungen ausgelegt. Das Relaismodul des ADAM5000L/TCP ist mit der vorgestellten Konfiguration noch nicht vollständig belegt und wird künftig die Steuerung von Peltier-Elementen übernehmen, um für die korrekte Temperierung der Algenanlage zu sorgen. Weiterhin ist die Integration einer Pumpe denkbar, wodurch ein automatisiertes Fraktioniersystem aufgebaut und die Nutzung der Reaktoren im Fed-Batch-Prozess realisiert werden kann. Da so eine kontinuierliche Nährstoffzugabe im optimalen Konzentrationsbereich möglich wäre, sind in einem solchen Verfahren höhere Wachstumsraten erreichbar. Der Raspberry Pi ist eine weitere ausbaufähige Komponente zur Erweiterung der Anlage. So besteht die Möglichkeit, an den Displayport ein Kameramodul zur Überwachung des Wachstumsfortschrittes oder an den GPIO-Port ein Display anzuschließen.

LITERATUR

- Fernández-Sevilla JM, Ación Fernández FG, Molina Grima E (2010) Biotechnological production of lutein and its applications. *Appl Microbiol Biotechnol* 86(1):27–40. doi: 10.1007/s00253-009-2420-y
- Heinrich M (2014) Entwicklung eines Automatisierungssystems zur Messung und Auswertung von parametrischen Daten aus Bioreaktoren mittels eines Einplatinencomputers. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau
- Lange T (2014) Hardwareimplementierung eines Automatisierungssystems für Messung und Regelung des pH-Wertes mittels eines Einplatinen-Computers. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau
- Milledge JJ (2011) Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 10(1):31–41. doi: 10.1007/s11157-010-9214-7
- Norton TA, Melkonian M, Andersen RA (1996) Algal biodiversity. *Phycologia* 35(4):308–326. doi: 10.2216/i0031-8884-35-4-308.1
- Weyer KM, Bush DR, Darzins A, Willson BD (2010) Theoretical Maximum Algal Oil Production. *Bioenerg Res* 3(2):204–213. doi: 10.1007/s12155-009-9046-x
- Wijffels RH, Barbosa MJ (2010) An outlook on microalgal biofuels. *Science* 329:796–799. doi: 10.1126/science.1189003

AUTOREN

- Moritz Heinrich, B. Sc.**
Technische Hochschule Wildau
Biosystemtechnik/Bioinformatik
- Tobias Seydewitz, B. Sc.**
Technische Hochschule Wildau
Biosystemtechnik/Bioinformatik
- Prof. Dr. Franz Xaver Wildenauer**
Technische Hochschule Wildau
Institut für Angewandte Biowissenschaften
Bioprozesstechnik
franz.wildenauer@th-wildau.de
- Prof. Dr. Heike Pospisil**
Technische Hochschule Wildau
Institut für Angewandte Biowissenschaften
High Performance Computing in Life Sciences
heike.pospisil@th-wildau.de