

## Anpassungsstrategien für den Klimawandel

# Klimapflanzen und biologische Wege zu negativen Kohlendioxidemissionen

THOMAS DANDEKAR, ELENA BENCUROVA, ÖZGE OSMANOGLU,  
MUHAMMAD NASEEM  
LEHRSTUHL FÜR BIOINFORMATIK, UNIVERSITÄT WÜRZBURG

**Climate plants are critical to prevent global warming as all efforts to save carbon dioxide are too slow and climate disasters on the rise. For best carbon dioxide harvesting we compare algae, trees and crop plants and use metagenomic analysis of environmental samples. We compare different pathways, carbon harvesting potentials of different plants as well as synthetic modifications including carbon dioxide flux balance analysis. For implementation, agriculture and modern forestry are important.**

DOI: 10.1007/s12268-021-1677-2  
© Die Autorinnen und Autoren 2021

■ Seit Jahrzehnten wird immer zu viel Kohlendioxid von den Industriestaaten produziert und Emissionen steigen stetig. Dies liegt besonders an dem Wunsch aller Menschen nach Wohlstand und auskömmlichen Lebensverhältnissen. Eine kohlenstoffneutrale Transformation moderner Produktionsmethoden ist nötig, wird aber zeitlich nicht schnell genug gehen, sodass es dann zur globalen Erwärmung kommt.

Die Hochwasserkatastrophe Mitte Juli (25 Milliarden Euro Schaden) gibt einen Vorgeschmack davon, was noch auf uns zukommt, wenn das Klima weiter aus der Bahn geworfen wird. Die Klimaerwärmung führte gerade dieses Jahr weltweit zu riesigen Waldbränden, z. B. in Kanada, Kalifornien und Australien.

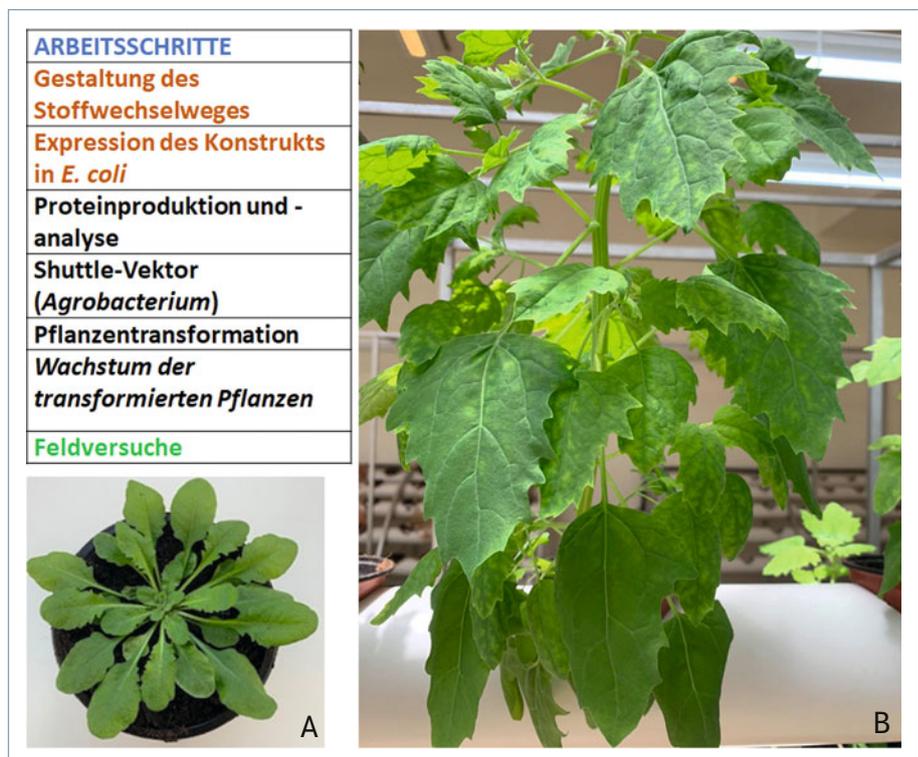
Es ist deshalb essenziell, dass wir negative CO<sub>2</sub>-Emissionen gerade durch Pflanzenwachstum voranbringen, und auf diese Weise CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre bleibend entfernen (Abb. 1). Hierzu wäre eine starke Aufforstung gut; wenn wir die Waldfläche auf das 1,5-Fache erhöhen, hätten wir Klimaneutralität erreicht [1]. Aber die für den Wald verfügbare Fläche schrumpft durch die menschliche Zivilisation stetig. Deswegen kann eine wichtige Lösung sein, besonders stark CO<sub>2</sub>-speichernde Pflanzen anzubauen, damit man trotz weltweit schrumpfender

Waldflächen dennoch die CO<sub>2</sub>-Speicherung erhöhen kann.

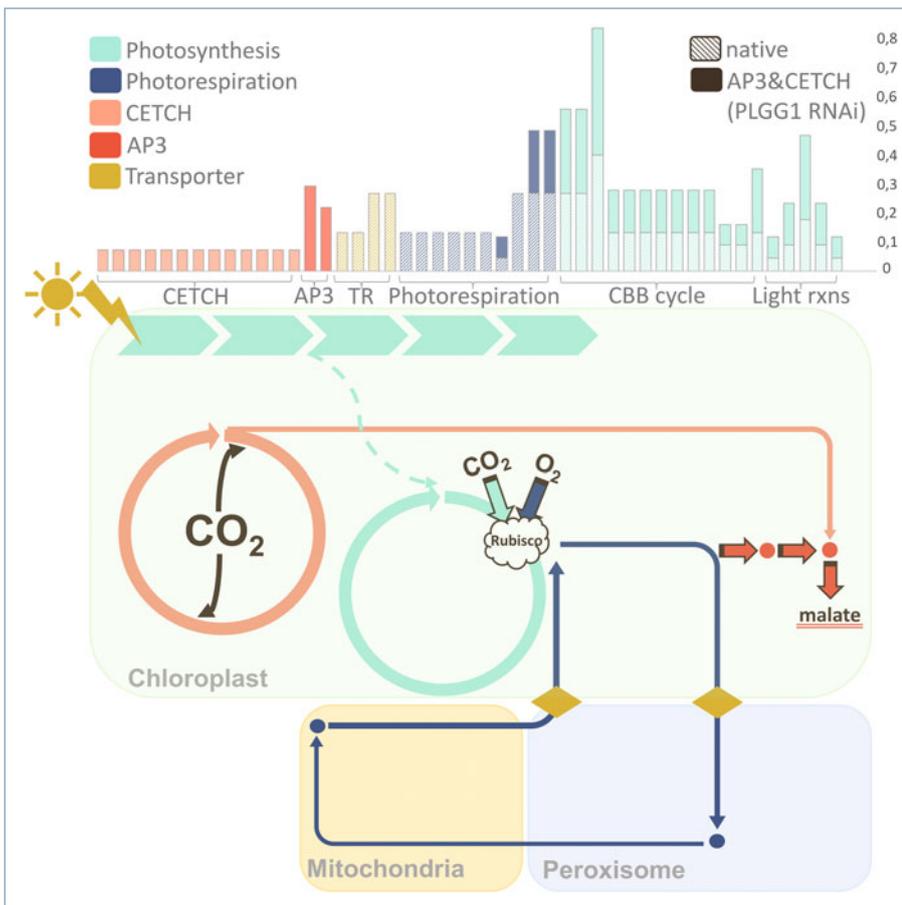
### Identifikation von stark schützenden Klimapflanzen

Algen und Blaualgen wachsen als relativ einfache Organismen besonders schnell, sind stark in der Photosynthese und können damit besonders effizient CO<sub>2</sub> aus der Luft entfernen.

In verschiedenen Programmen wird die Biodiversität der Mikroflora untersucht, um mit vollständiger Sequenzierung von Umweltproben schnell alle enthaltenen Algenspezies und andere mikrobielle Spezies zu identifizieren (Metagenomik).



▲ **Abb. 1:** Klimapflanzen. **A**, Arbeitsschritte: 1. Design des modifizierten oder zusätzlichen Stoffwechselweges und 2. Expression der Konstrukte in *Escherichia coli* (braun, z. B. gegenwärtige eigene Arbeiten). Anschließend wird 3. die Stabilität und Produktion der neuen Proteine beurteilt und 4. in einen Transportvektor für die Pflanze umkloniert (Bsp. in A: *Arabidopsis thaliana*; C3-Modellpflanze). Das Wachstum der transformierten Pflanzen wird anschließend beurteilt, dann folgen Feldversuche, danach auch in Nahrungspflanzen (grün, z. B. [5, 6] in Reis bzw. Tabak). **B**, Wir bereiten solche Untersuchungen für Quinoa in Abu Dhabi vor, denn Quinoa (Reismelde) ist eine Nahrungspflanze, die hervorragend an Trockenheit und Salzstress angepasst ist.



▲ **Abb. 2:** Übersicht über natürliche und synthetische Stoffwechselwege, die Pflanzen helfen,  $\text{CO}_2$  aus der Luft zu binden. Wichtige synthetische Wege (zusammen 5 x bessere  $\text{CO}_2$ -Speicherung): Alternativer Weg 3 (AP3 in rot; theoretisch etwa 1,5 x stärkere  $\text{CO}_2$ -Speicherung) und CETCH-Zyklus (orange [7]; theoretisch etwa 3 x stärkere  $\text{CO}_2$ -Speicherung). Natürliche Wege sind Photosynthese (grün) und Photorespiration (blau) mit Transportern zwischen Organellen (gold). Die Enzymaktivitäten wurden von uns [9] unter den nativen Bedingungen und nach der synthetischen Ergänzung (gemusterte Balken) berechnet, die die Integration von AP3, CETCH und die Hemmung des PLGG1-Transporters (oberes Feld) darstellen. Unter synthetischen Bedingungen steigen die Aktivitäten der photosynthetischen Enzyme, während die peroxisomalen photorespiratorischen Enzyme eliminiert werden. AP3 kann auch als natürliche Mutation auftreten – aber nur, wenn dann gleichzeitig das  $\text{CO}_2$  ins Gleichgewicht gebracht wird, kann sehr viel mehr (Faktor 5)  $\text{CO}_2$  tatsächlich von der Pflanze über längere Zeiten gespeichert werden. In der Pflanze gelten weitere fragile Gleichgewichte, hier nicht gezeigt, aber für erfolgreiche Klimapflanzen ebenfalls wichtig zu berücksichtigen.

Bekannte Projekte sind hier etwa das Tara-Ozeanprojekt [2] und der Planetary Zensus u. a. am EMBL in Heidelberg [3].

Darüber hinaus gibt es auch schon intensive Bestrebungen, Algen als Nahrung und Rohstoff zu nutzen, z. B. für die Textil- und Papierherstellung oder die Herstellung von Biotreibstoffen (Ölalggen).

Bei Algen ist wichtig, auf die ökologischen Konsequenzen zu achten, wenn neue Spezies (gleich ob natürlich oder künstlich verändert) ins freie Meer gelangen können, da schnell wachsende Grün- und Blaualgen auch gefährliche Algenblüten auslösen können, z. B. in Meeresregionen, in denen der Sauerstoffspiegel und das Licht in der Tiefe recht niedrig

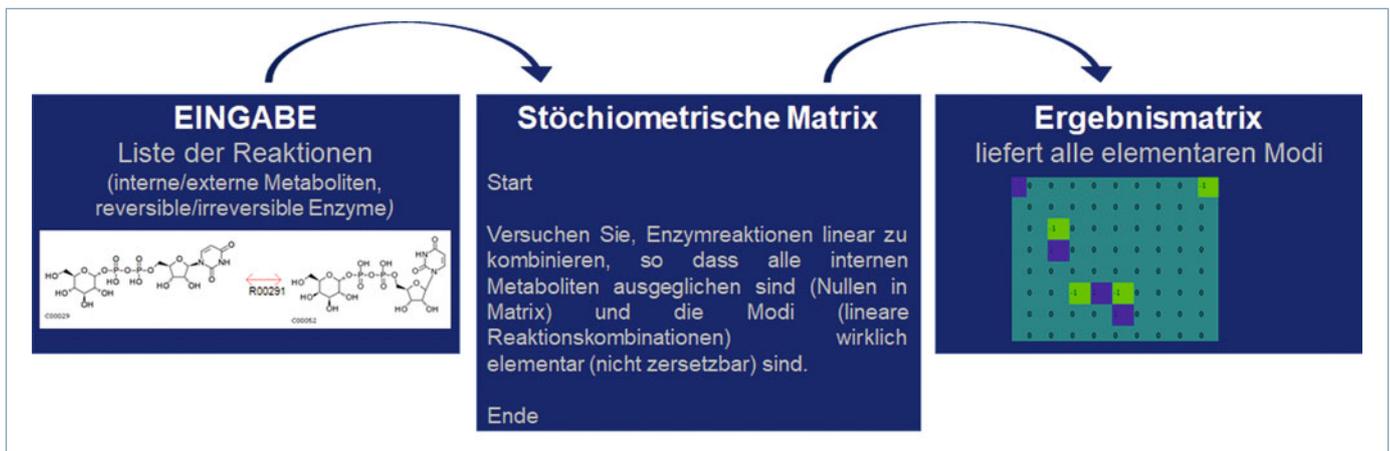
werden. Dort können die Algen zum Massensterben führen oder, noch gesteigert, Giftstoffe produzieren (Algtoxine und Microcystine). Unter geeigneten Kulturbedingungen und beim Anbau der richtigen Arten können aber Algen einen wichtigen Beitrag zur Nahrungsvorsorgung und industriellen Produktion leisten und dies, ohne unsere Landflächen zu benötigen. Wegen ihrer hohen Effizienz sind erstaunlich kleine Regionen ausreichend, beispielsweise würden 300 Quadratkilometer Anbaufläche von Ölalggen reichen, um den ganzen Treibstoffbedarf der USA zu decken. Außerdem gibt es andere Einsatzfelder, etwa Auffangen des  $\text{CO}_2$  bei der Betonherstellung. Dann könnten die Algen gleich

in den leeren Sandgruben bei der Betonproduktion kultiviert und dabei besonders hoch-effiziente oder sogar gentechnisch veränderte Arten genutzt werden, ohne negative ökologische Konsequenzen einer marinen Algenblüte befürchten zu müssen. Eine gesteigerte Effizienz ist nötig, damit Betonhersteller auf dieses Angebot auch eingehen. Klimaneutraler Beton würde sechs Prozent der weltweiten  $\text{CO}_2$ -Emissionen sparen.

Bei Landpflanzen kann man dagegen versuchen, die  $\text{CO}_2$ -Effizienz systematisch zu steigern, denn Bäume wachsen langsam und ihre Ausbreitung ist gut kontrollierbar. Besonders wichtig sind deshalb schnell wachsende Bäume, wie Pappeln oder Bambus. Leider kann man aber aus dem Stand hier nicht eine einfache Lösung vorschlagen, da es auch wichtig ist, dass die Bäume klimaresistent sind und trotz steigender Temperaturen immer noch gut wachsen, zudem sollte natürlich der Wald als ökologisches System betrachtet werden. Beispielsweise sind Mangrovenwälder hervorragend geeignet, viel  $\text{CO}_2$  zu speichern – dafür sind sie aber nur aufwendig zusätzlich künstlich zu kultivieren und kommen natürlicherweise nur an begrenzten Stellen vor, die leider durch menschliche Nutzung (z. B. Städtewachstum) sogar zurückgehen.

Andere Überlegungen gelten für Nutz- und Nahrungspflanzen, die typischerweise wegen ihres hohen Ertrags unserer ständigen Pflege bedürfen, um nicht von Unkraut überwuchert zu werden. Hier könnte eine zusätzliche  $\text{CO}_2$ -Speicherung sogar zu besseren Erträgen führen [4]. Gegenwärtig werden solche verbesserten  $\text{CO}_2$ -Speicherpathways bereits in Tabak [5] und Reis [6] in Feldversuchen getestet, es gibt also reale Pflanzen und Felder, die über solche verbesserte Speichermöglichkeiten verfügen. Es gibt dennoch starken weiteren Forschungsbedarf: Wie wirken sich die neuen Stoffwechselwege über den Lebenszyklus der Pflanze aus (insbesondere bei älteren Pflanzen), welche Kombinationen von natürlichen Pathways, natürlichen Mutationen (z. B. für den Kohlenstofftransport aus den Chloroplasten) und synthetischen Stoffwechselwege sind für die jeweilige Nutzpflanze und Nutzungsstandort optimal (**Abb. 2**)?

Wichtig ist hierbei noch zu bemerken, dass wir auch Verbraucherwünsche berücksichtigen können. Auch das natürliche Mutationspektrum erlaubt schon klare Verbesserungen (damit wären solche Pflanzen auch EU-tauglich, ohne Gentechnologie), aber mit



▲ **Abb. 3:** Stoffwechselgleichgewichtsanalysen (Flux-Balance-Analyse). Enzymkombinationen werden besonders leicht mit dem Computer in der stöchiometrischen Matrix aller vorhandenen Enzymreaktionen gefunden, um alle beteiligten internen Metaboliten innerhalb des Netzwerks auszugleichen [9]. Dies ermöglicht, alle möglichen metabolischen Pfade aufzuzählen und auch Pfadkombinationen zu identifizieren, die  $\text{CO}_2$  am effizientesten aus der Atmosphäre binden.

synthetischen Stoffwechselwegen (z. B. CETCH-Zyklus [7], Arbeitsgruppe Prof. Tobias Erb, Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie in Marburg; synthetisches C4-Shuttle [8]) sind richtig hohe Ausbeuten denkbar. Genutzt werden könnte dies etwa in den USA, Südamerika und Asien – die übrige Welt ist für gentechnologische Verfahren bei Nutzpflanzen deutlich aufgeschlossener.

Noch komplexer, aber damit nicht weniger wichtig, ist dann die integrierte Betrachtung der Landwirtschaft. Hier ist insbesondere die Berücksichtigung des Humus wichtig, denn guter Humus hilft, entscheidend viel  $\text{CO}_2$  zusätzlich zu speichern, da im Humus dann die Mikroorganismen mithelfen,  $\text{CO}_2$  zu binden – sowie der lockere und humusreiche Boden selbst. Darum sind alle Landwirtschaftsformen, die den Humus schonen (biologische Landwirtschaft, schonende Ackerbestellung etc.), einer den Boden verdichtenden industriellen Landwirtschaft vorzuziehen, weil im Nettoergebnis deutlich mehr  $\text{CO}_2$  gespeichert wird, selbst wenn die Nutzpflanzenenerträge geringer sind.

### Modellierung der Klimapflanzen und ihrer metabolischen Stoffwechselwege

Um bessere Klimapflanzen zu erzielen und überhaupt die verschiedenen Fähigkeiten von Pflanzen im Hinblick auf  $\text{CO}_2$  Speicherung zu vergleichen, einschließlich Ökosystemeffekte, ist eine Kombination von Theorie und Experiment essenziell. Die metabolische Modellierung ist die theoretische Basis für die exakte Modellierung und die Planung der Experimente.

Zunächst werden die Flussgleichgewichte entsprechend der vorhandenen Enzymreaktionen bestimmt. Damit eine stabile metabolische Versorgung der Zelle gewährleistet ist, muss für jeden Stoffwechselweg die Gleichgewichtsbedingung der internen Metabolite innerhalb des Stoffwechselnetzwerks gelten. Die damit möglichen Stoffwechselwege kann man systematisch ermitteln (**Abb. 3**).

Mit diesem Flussgleichgewicht hat man einen Überblick über alle Stoffwechselwege, die einer Pflanze bei gegebenem Enzymbestand zur Verfügung stehen. Die metabolische Flux-Balance-Analyse verfügt über verschiedene Methoden, wie die Elementarmodenanalyse (vollständiger Überblick über alle Stoffwechselwege, die für den Organismus möglich sind) und die extreme Pathwayanalyse (ein Satz von Stoffwechselwegen, die durch ihre Kombination alle Stoffwechselwege angeben). Damit kann man sowohl für natürliche Pflanzen einen Überblick über alle kohlendioxid-speichernden Stoffwechselwege finden und auch gezielt biotechnologische Veränderungen *in silico* vortesten und deren Auswirkungen auf den Stoffwechsel berechnen.

Um unter einer bestimmten Situation zu berechnen, wie stark der Fluss durch einen Stoffwechselweg ist, braucht man zusätzliche Daten. Ideal sind Metabolitmessungen über die Zeit, da dies aber sehr aufwendig ist, gibt es alternative Methoden, die schon mit weniger exakten Daten auskommen, insbesondere die Abschätzung der metabolischen Flüsse über Proteom und Transkriptomdatensätze. Einzelne Messungen erlauben nur grobe Abschätzungen, aber wenn man Netzwerkdaten zur Verfügung hat (Proteom-

oder Transkriptomdaten) wird es durch die Gleichgewichtsbedingungen der Flux-Balance-Analyse möglich, den Fehler recht klein zu halten: Bis zu fünf Prozent Änderungen im Fluss können erkannt werden, wie wir durch direkte Metabolitmessungen wieder überprüft haben.

Durch die Kombination solcher Methoden sowie weiterer bioinformatischer Methoden erhalten wir einen guten Überblick über die Effekte verschiedener kohlendioxid-speichernder Stoffwechselwege und welche Optionen für Klimapflanzen zur Verfügung stehen [9], die dann anschließend wieder im Experiment überprüft werden müssen. Wir haben unseren Fokus auf C3-Pflanzen und Grünalgen gelegt, weil hier das  $\text{CO}_2$ -bindende Enzym Rubisco im Zentrum der  $\text{CO}_2$ -Speicherung steht. Wichtig sind aber auch Blaualgen (also Bakterien); diese nutzen aber statt der Rubisco Miniorganellen, die Carboxysomen, die mit ganz ähnlichen Ansätzen helfen können,  $\text{CO}_2$  besser zu binden und negative Kohlendioxidemissionen auf biologische Weise zu erzielen [10].

### Fazit

Gerade die Klimakatastrophen dieses Jahres (Waldbrände in Kalifornien, Kanada, Australien; Überflutungen, z. B. in Deutschland) zeigen, dass die Klimakrise Fahrt aufnimmt. Strategien für negative Emissionen und die Entfernung des Kohlendioxids aus der Atmosphäre durch natürliche Pflanzen, moderne Landwirtschaft und Aufforsten werden bei nicht sinkenden Emissionen durch Industrie und Verbrauch immer dringlicher. Metabolische Modellierung, gezielte Experimente und die Kombination verschiedener natürlicher,

synthetischer und alternativer Stoffwechselwege sind wichtig, um Kohlendioxid durch Klimapflanzen besser aus der Atmosphäre zu entfernen – einschließlich Kohlendioxidspeicherung durch Algen, Wälder und Nutzpflanzen. Moderne Agrarwirtschaft sowie unterschiedene Aufforstung sind nötig, damit solche Ansätze auch wirksam werden und um zu helfen, die Klimafolgen durch bessere CO<sub>2</sub>-Speicherung zu lindern. ■

## Literatur

- [1] Bastin JF, Finegold Y, Garcia C et al. (2019) The global tree restoration potential. *Science* 365: 76–79
- [2] Sunagawa S, Acinas SG, Bork P et al. (2020) Tara Oceans: towards global ocean ecosystems biology. *Nat Rev Microbiol* 18: 428–445
- [3] Acinas SG, Sánchez P, Salazar G et al. (2021) Deep ocean metagenomes provide insight into the metabolic architecture of bathypelagic microbial communities. *Commun Biol* 4: 604
- [4] Naseem M, Osmanoglu Ö, Dandekar T (2020) Synthetic rewiring of plant CO<sub>2</sub> sequestration galvanizes plant biomass production. *Trends Biotechnol* 38: 354–359
- [5] South PF, Cavanagh AP, Liu HW, Ort DR (2019) Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity in the field. *Science* 363: eaat9077
- [6] Shen BR, Wang LM, Lin XL et al. (2019) Engineering a new chloroplastic photorespiratory bypass to increase photosynthetic efficiency and productivity in rice. *Mol Plant* 12: 199–214
- [7] Schwander T, Schada von Borzyskowski L, Burgener S et al. (2016) A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. *Science* 354: 900–904
- [8] Roell MS, Schada von Borzyskowski L, Westhoff P et al. (2021) A synthetic C4 shuttle via the  $\beta$ -hydroxyaspartate cycle in C3 plants. *Proc Natl Acad Sci USA* 118: e2022307118
- [9] Osmanoglu Ö, Alseieri MK, Alkhoori HA et al. (2021) Topological analysis of carbon-concentrating-CETCH cycle and a photorespiratory bypass reveals boosted CO<sub>2</sub>-sequestration by plants. *Front Bioeng Biotechnol*, doi: 10.3389/fbioe.2021.708417
- [10] Naduthodi MIS, Claassens NJ, D'Adamo S et al. (2021) Synthetic biology approaches to enhance microalgal productivity. *Trends Biotechnol* 39: 1019–1036

**Funding note:** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.  
**Open Access:** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel

enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Thomas Dandekar  
 Universität Würzburg  
 Lehrstuhl für Bioinformatik  
 Biozentrum  
 Am Hubland  
 D-97074 Würzburg  
 dandekar@biozentrum.uni-wuerzburg.de



Unsere Arbeitsgruppe zu Klimapflanzen: **Thomas Dandekar** (Leitung), **Elena Bencurova** (Molekularbiologie), **Özge Osmanoglu** (metabolische Modellierung), **Muhammad Naseem** (Systembiologie, Gewächshaus), v. l. n. r.