



	12 Zellfabriken	36 LifeTech	54 Mensch-Maschine- Kollaboration	72 Ernährung und Versorgung
6 Prolog <b>Von Ableitungen der Natur zu bioinspirierten Technologien</b>	14 Wirtschaften im natürlichen Kreislauf	38 Gesünder durch Technologie	56 Gemeinsam unterwegs	74 Individuell versorgt
	16 <b>PhotoBionicCell</b>	40 <b>Bionic E-Trunk</b>	58 <b>BionicCobot</b>	76 <b>BionicMobileAssistant</b>
	22 <b>BionicCellFactory</b>	44 <b>SupraMotion</b>	62 <b>BionicWorkplace</b>	80 <b>3D Cocooner</b>
	28 <b>BionicHydrogenBattery</b>	48 <b>Pipettieren und Dispensieren</b>	66 <b>BionicKangaroo</b>	82 <b>BionicFlyingFox</b>
	32 <b>Forschungsbioreaktor</b>	50 <b>BionicMotionRobot</b>	68 <b>Peumatischer Cobot</b>	84 <b>TentacleGripper</b>
	34 <b>Lernreaktor</b>	52 <b>Bionischer Handling- Assistent</b>	70 <b>CogniGame</b>	



86  
Bewegte Welten

104  
Lernsphären

126  
Geregelt und organisiert

88  
Künftige Produktions-  
landschaften

106  
Wissen, Lernen und  
Berufswelten

128  
Unschätzbare Werte

142  
Epilog  
**Zukunft neu denken**

90  
**BionicWheelBot**

108  
**BionicBee**

130  
**BionicFinWave**

148  
**Bionikprojekte aus 30 Jahren**

92  
**BionicSoftHand**

112  
**Bionics4Education**

132  
**BionicSwift**

96  
**FlexShapeGripper**

116  
**Jugendbuch**

136  
**Aquajellies 2.0**

98  
**NanoForceGripper**

120  
**Poster mit Bionik App**

138  
**BionicANTs**

100  
**BionicSoftHand 3.0**

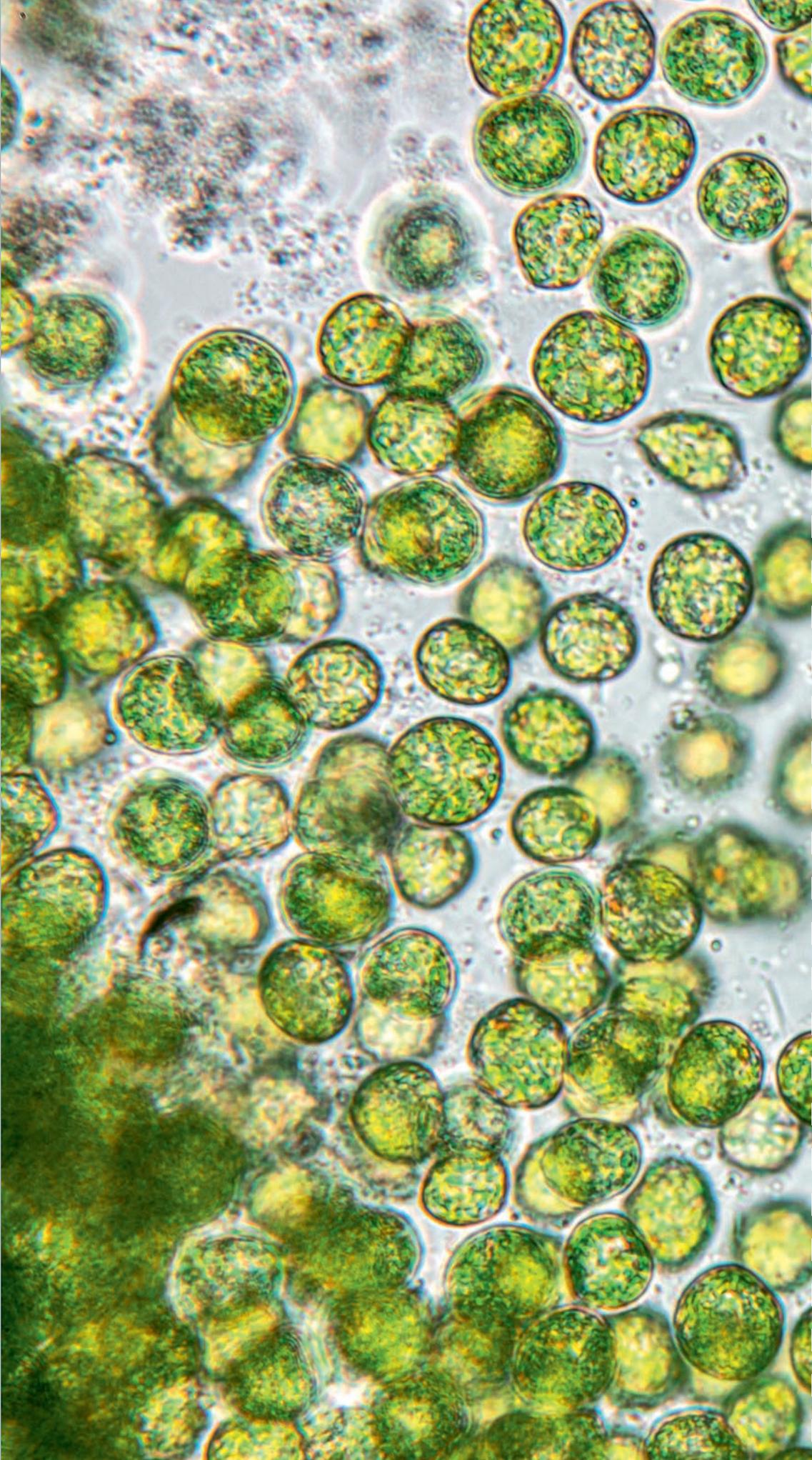
122  
**Bionic Flower**

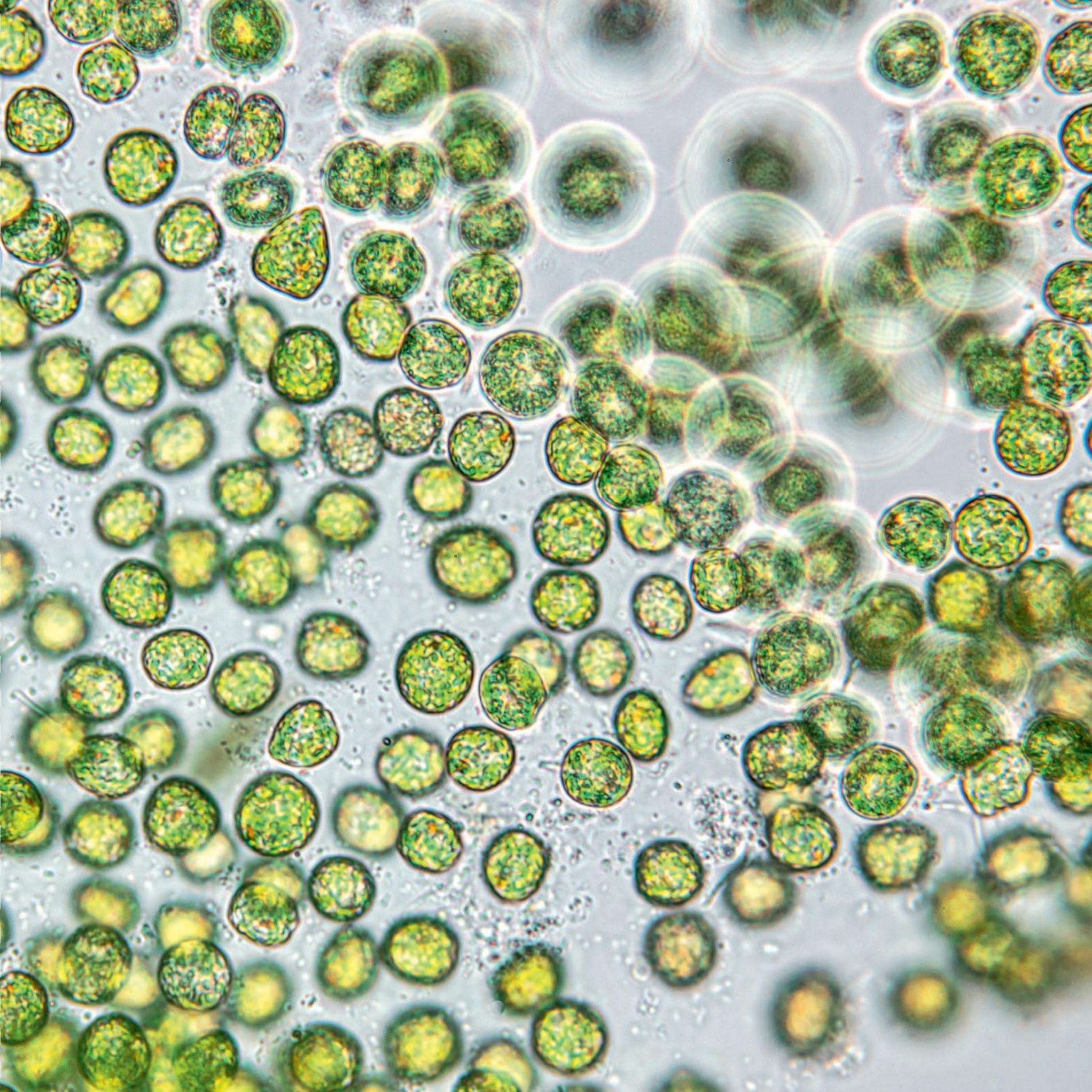
140  
**BionicOpter**

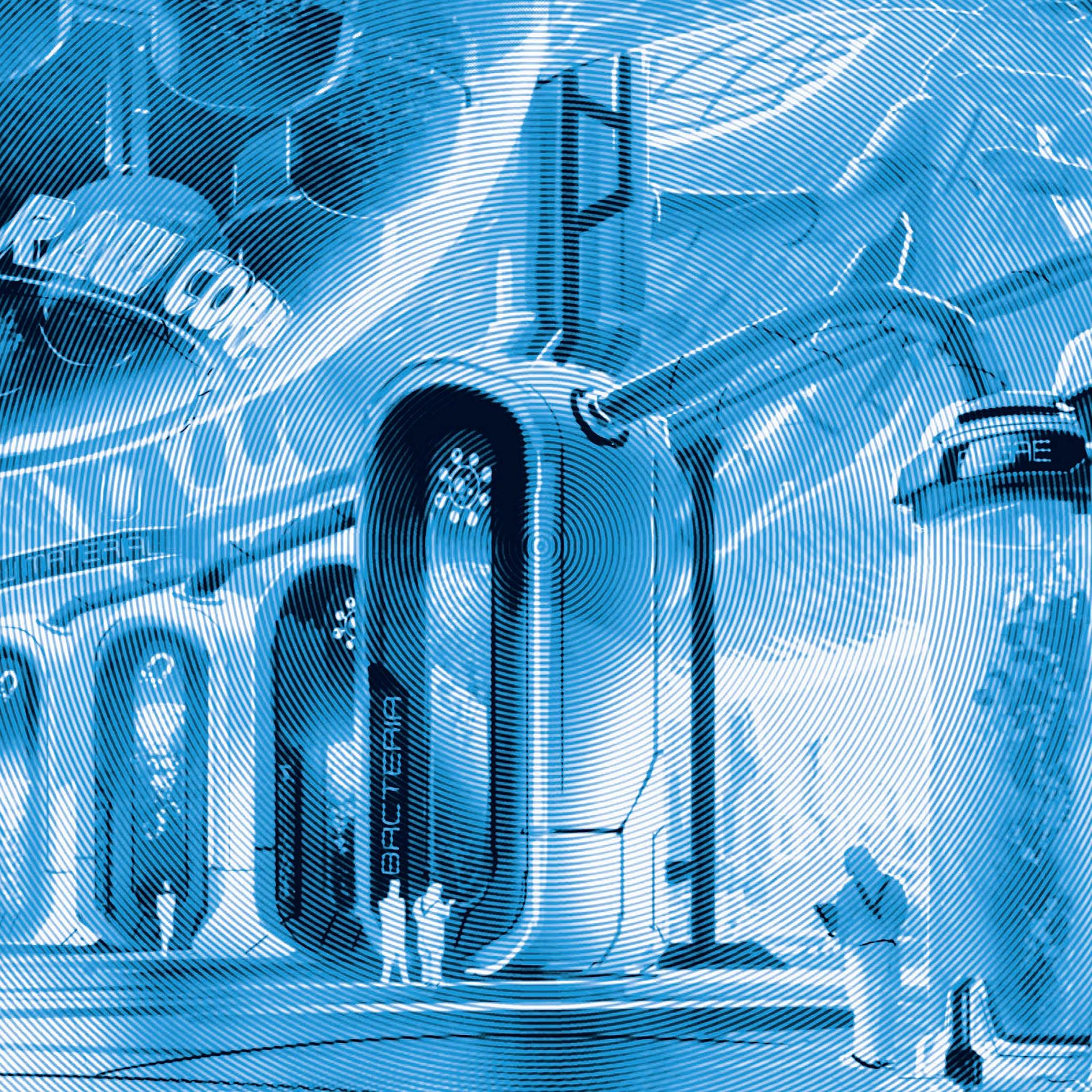
102  
**BionicSoftArm 2.0**

124  
**BionicTurtleWalker**

Zellfabriken







# Wirtschaften im natürlichen Kreislauf

Dem Klimawandel Einhalt gebieten, das ist der Leitsatz unserer Gegenwart. In diesem Sinne kann jeder Einzelne von uns ein Stück Verantwortung übernehmen. Wir können auf nachhaltige Produkte umsteigen, erneuerbare Energien nutzen, auf manches Konsumgut verzichten und unsere Mobilität einschränken. Doch Verhaltensänderungen allein werden nicht genügen, um dem Klimawandel mit der gebotenen Wirksamkeit zu begegnen. Es ist notwendig, die globale Wirtschaft in eine Bioökonomie zu transformieren.

Ist es möglich, verantwortungsvoll zu leben und klimabewusst zu wirtschaften? Der Blick in die Natur offenbart, dass es in der Biologie keine Verschwendung gibt. Die Evolution hat in Jahrmillionen „ewige“ Lebenskreisläufe hervorgebracht. Dazu zählen irdische Energie-, Stoff- und Wasserkreisläufe. Auf kleinerer Ebene erleben wir den Blutkreislauf unseres eigenen Körpers. Was können wir aus diesem evolutionären Wissen heute für die Welt von morgen lernen? In der natürlichen Umwelt werden Ressourcen bei ausgewogenem Kohlenstoffdioxidumsatz geschont und Materialflüsse in intelligente Kreisläufe eingebettet. Nach diesem Vorbild entstehen gegenwärtig immer mehr Ideen für die Praxis eines globalen industriellen Ökosystems.

Auch im Jahr 2050 wird der Mensch die für seinen Lebensbedarf benötigten Güter produzieren: Nahrungsmittel, Medikamente, Kosmetikartikel, Verpackungen, Kraftstoffe und viele mehr. Dank neuer Produktionsverfahren lassen sich rund um den Globus für den lokalen Bedarf biologisch abbaubare Produkte herstellen – etwa recycelbare Kunststoffe und kompostierbare Sensoren. Selbst ältere Materialien und längst ausgediente Erzeugnisse können auf molekularer Ebene demontiert und als sortenreine Rohstoffe weiterverarbeitet werden. Mikroorganismen, die in optimierten Bioreaktoren wachsen, zählen zu den wichtigsten Protagonisten der Industrie. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Kultivierung von Algen, da sie bei der Produktion von Biostoffen atmosphärisches Kohlenstoffdioxid binden. Alle notwendigen Industrieprozesse werden hocheffizient und automatisiert ablaufen. In der Bioökonomie der Zukunft verschmelzen technische und organische Welten.

# BionicCellFactory

## Bionik

22

### Mehr Natur in der Technik

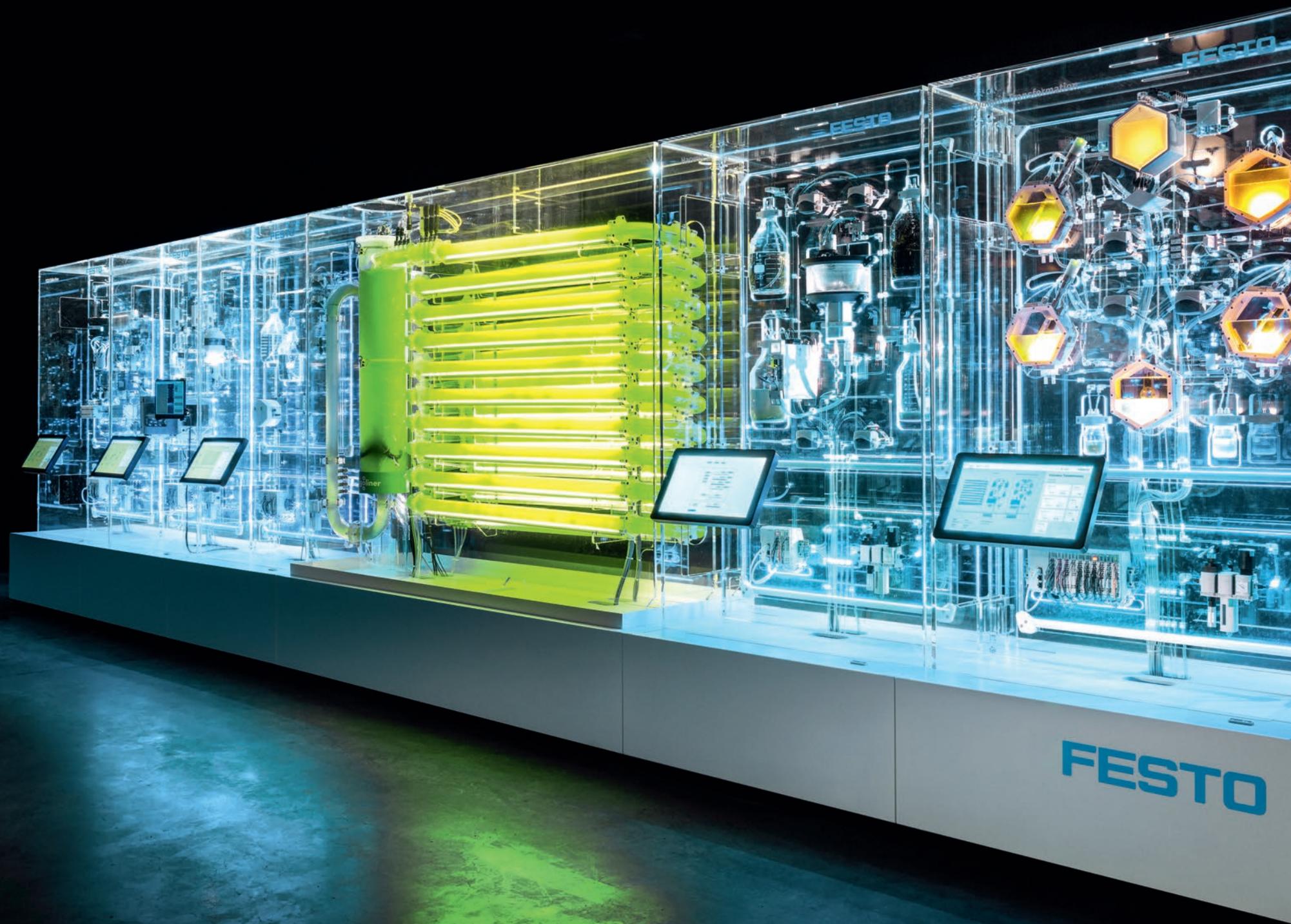
Wie lässt sich der Erdatmosphäre klimaschädliches Kohlenstoffdioxid entziehen? Und wie können gleichzeitig große Mengen alternativer Rohstoffe erschlossen werden? Im Jahr 2023 haben die Spezialisten von Festo eine universelle Modellfabrik vorgestellt, die beide Ziele miteinander verbindet. Die BionicCellFactory ist ein von den Errungenschaften der Natur inspiriertes Bioreaktorsystem, in dem Makrofluidik, Mikroautomation und Nanosensorik verschmelzen. Mit ihren fünf Modulen zeigt die ganzheitlich angelegte Fabrik, wie die biologische Transformation gelingen kann.

### Zellfabriken in der Modellfabrik

Lebende Zellen sind die kleinsten Fabriken der Welt. Mikroalgen etwa besitzen die Fähigkeit, Sonnenlicht, Kohlenstoffdioxid und Wasser mittels Photosynthese in Sauerstoff und chemische Energieträger bzw. organische Wertstoffe umzuwandeln. Im geschlossenen Kreislauf der BionicCellFactory werden die natürlichen Algenzellen kultiviert. Das Zellwachstum wird dabei kontinuierlich überwacht und die Qualität der entstehenden Algenbiomasse analysiert. Selbst die Ernte, Weiterverarbeitung und Veredelung des biologisch gewonnenen Materials erfolgen in der Modellfabrik automatisiert. Ergebnis sind maßgeschneiderte Biosubstanzen, die je nach Anwendungsbedarf in der Chemie-, Lebensmittel-, Kosmetik- oder Pharmaindustrie eingesetzt werden können.

### Kleine Klimaretter

Sämtliche Produkte, die gegenwärtig aus dem Rohstoff Erdöl hergestellt werden, können nachhaltig und ressourcenschonend aus Mikroalgen gewonnen werden. Algenzellen sind von Natur aus Klimaretter, denn sie binden zehnmal mehr Kohlenstoffdioxid als Landpflanzen. In der industriellen Praxis können sie jedoch noch weitaus mehr leisten: Ihr natürliches Potenzial lässt sich bei automatisierter Kultivierung in effizienten Bioreaktoren auf das Hundertfache steigern. Gezielt eingesetzt können Algen maßgeblich zum weltweiten Klimaschutz beitragen.



24

### Treibhausgas fixieren

Das System der BionicCellFactory ist in fünf Prozessschritte gegliedert: CO<sub>2</sub>-Bindung, Analyse, Kultivierung, Ernte und Weiterverarbeitung der Algenbiomasse. Das CO<sub>2</sub>-Collection-Modul sorgt für die lebenswichtige Gasversorgung der Mikroalgen – bei einer Kohlenstoffdioxidkonzentration von rund zwei Prozent vermehren sie sich am besten. So wird das aus der Umgebungsluft gefilterte Treibhausgas zunächst in eine Kammer mit CO<sub>2</sub>-fixierendem Polymergranulat eingeblasen und konzentriert. Bei Erhitzung des Granulats auf 90 Grad Celsius wird das Kohlenstoffdioxid wieder freigesetzt und über ein Begasungselement in den Bioreaktor geleitet.

### Überwachung und Analyse

Ein Quantensensor, ein digitales Mikroskop und modernste Softwaremethoden kontrollieren die Qualität der wachsenden Biomasse. Das Mikroskop liefert kontinuierlich Bilder der Algenzellen, die von einer künstlichen Intelligenz unmittelbar ausgewertet werden. Parallel dazu analysiert ein quantenbasierter Partikelsensor, dem verdünnte Algenflüssigkeit zugeleitet wird, in Echtzeit die Anzahl und Größe der einzelnen Mikroalgen und detektiert eventuelle Fremdkörper. Durch die Präzisionstechnologien im Analyse-Modul kann der Kultivierungsprozess vorausschauend geregelt und gesteuert werden.

### Kontrolliertes Wachstum

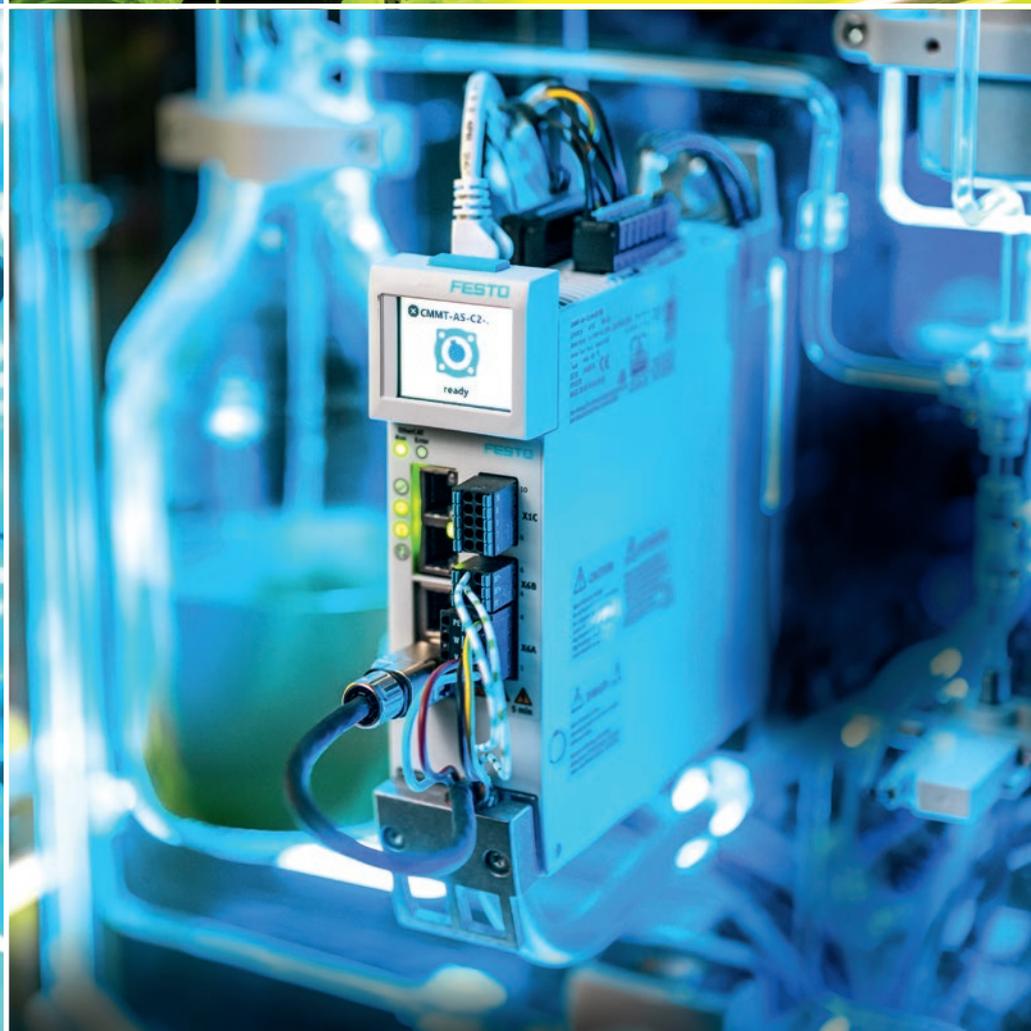
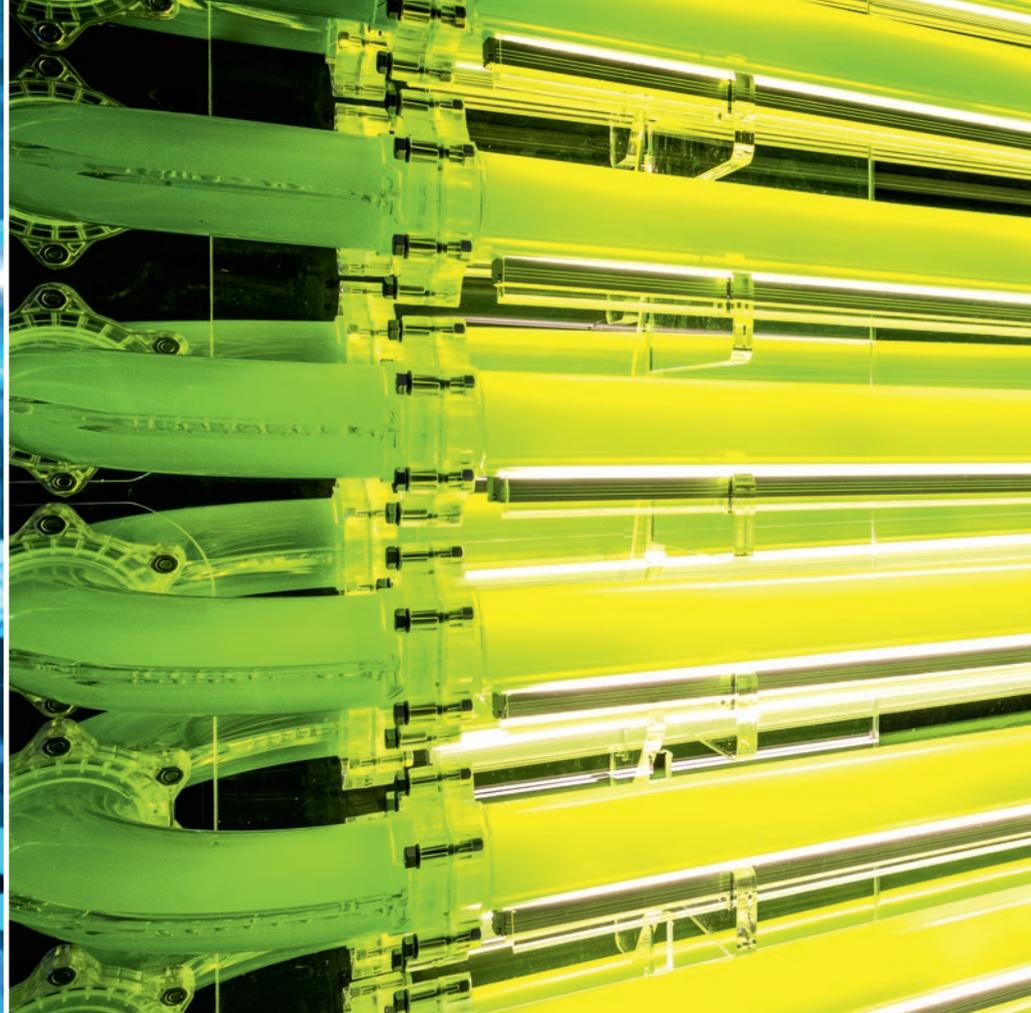
Herzstück der BionicCellFactory ist ein transparentes, 45 Meter langes Röhrensystem mit einem Fassungsvermögen von 80 Litern, worin die Algen ihre Photosynthese betreiben. Das System ist mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, die unter anderem Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidgehalt, Temperatur, Leitfähigkeit und pH-Wert kontrollieren. So ist für optimale Wachstumsbedingungen der Mikroalgen gesorgt. Je nach Bedarf werden den Zellen Nährstoffe zugeführt, etwa Kalium, Phosphor und Stickstoff.

### Ernte der Algenbiomasse

Das Harvest-Modul stellt die Schnittstelle zwischen Kultivierung und Transformation der Biomasse dar. Mit 10.000 Umdrehungen pro Minute werden die Algenzellen in einer Zentrifuge von ihrer wässrigen Umgebung getrennt. Die Algenernte wird zur Weiterverarbeitung ins nächste Modul geleitet, das Wasser ressourcenschonend in den Bioreaktor rückgeführt.

### Enzymatische Weiterverarbeitung

Die Veredelung der Algen erfolgt schrittweise in den Transformation-Cubes. Enzyme fungieren als Biokatalysatoren und schneiden die Zellwände auf: Inhaltsstoffe wie Stärke, Proteine, Farbstoffe oder Öl werden frei. Der umweltschonende Transformationsprozess läuft bei Umgebungsbedingungen von 40 Grad Celsius und einem pH-Wert von fünf ab; es kommen keine Schwermetalle zum Einsatz.



# BionicCellFactory

## Zukunft

26

### **Modular und flexibel**

Der modulare Aufbau der BionicCellFactory in fünf Prozessschritte spiegelt sich auch in der Steuerungsarchitektur wider. Jedes Modul verfügt über eine eigene Steuerung, sodass es sowohl einzeln als auch im Gesamtverbund in Betrieb genommen und gewartet werden kann. Selbst bei Produktionsänderungen ist der Austausch einzelner Anlagenmodule schnell und unkompliziert möglich. Einfache Bedienbarkeit und Flexibilität bilden wesentliche Voraussetzungen für den Aufbau und Betrieb von Produktionsanlagen, die die Kultivierung von Bio-rohstoffen und die Fixierung von Kohlenstoffdioxid kombinieren.

### **Produktionssysteme der Zukunft**

Ein erklärtes Ziel der biologischen Transformation ist es, dass nachwachsende Biostoffe künftig den Bedarf an Ausgangsstoffen in der Chemie-, Lebensmittel-, Kosmetik- und Pharmaindustrie decken. Dazu werden rund um den Globus hochskalierte Bioreaktoren mit einem Fassungsvermögen von vielen tausend Litern benötigt. Für höchste Produktivität und bestmögliche Umwelteffekte müssen sie mit modernster Prozessautomation ausgestattet werden. Dazu zählen optimierte Begasungs- und Versorgungsstrategien, intelligente Regelalgorithmen und unterschiedliche Sensortechnologien. Gleichzeitig bedarf es innovativer Konzepte für Produktionssysteme in den Industriebranchen, die die biologisch erzeugten Grundstoffe aus Bioreaktoren verarbeiten.

### **Neue Qualifikationen und Berufsfelder**

Mit der ganzheitlichen Modellfabrik BionicCellFactory hat Festo ein Werkzeug geschaffen, das dem Prinzip der Kreislaufwirtschaft gerecht wird. Die technische Umsetzung erfordert Expertise in diversen Fachbereichen, Offenheit für interdisziplinäres Arbeiten und nicht zuletzt erweitertes Grundlagenwissen für alle Partner. Durch die Verknüpfung von Biologie und Physik steigt die Komplexität in der Automation. Die Didaktikexperten arbeiten deshalb bereits heute an innovativen Ausbildungsberufen, Studiengängen und Zusatzqualifikationen in den Bereichen Biointelligenz, Nachhaltigkeit und Biomechatronik.

