

## **Kreislaufwirtschaft und Elektro-Bioökonomie: Neue Ansätze in der Nachhaltigkeitsforschung**

---

### **Abstract**

*In einem Gastbeitrag im Online-Seminar Bioökonomie im Juni 2020 an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg referierte Professor Sundmacher über den Beitrag der Bioökonomie, der Bio-Elektro-Ökonomie und der Kreislaufwirtschaft als sich ergänzende Säulen für ein nachhaltigeres Wirtschaften bis hin zur Vision der zirkulären Elektro-Bioökonomie und zeigte deren jeweilige Potenziale und Grenzen auf. Er erläuterte in seinem Vortrag, warum sich aus seiner Sicht die Bioökonomie wesentlich besser zur Produktion von Nahrungsmitteln, pharmazeutischen Wirkstoffen und chemischen Rohstoffen eignet als zur Erzeugung von Strom und Treibstoffen. Demgegenüber begründete Professor Sundmacher die bessere Eignung der Elektro-Ökonomie für die Strom- und Wasserstoffherzeugung durch Wind- und Solarenergie sowie der Weiterverarbeitung von Wasserstoff zu E-Fuels mit Kohlenstoff. Als Hauptvorteil der Kreislaufwirtschaft sieht Professor Sundmacher den reduzierten Rohstoffbedarf bei hoher Recyclingquote. Er erläuterte den Beitrag von biologischen Rohstoffen zur Aufrechterhaltung des Kreislaufs und differenziert zwischen technischer Rezyklierbarkeit und Bioabbaubarkeit. Der Vortrag wurde von Astrid Butt verschriftlicht und für diese Working Paper-Ausgabe aufbereitet.*

**Schlagworte: Bioökonomie, Elektro-Ökonomie, Kreislaufwirtschaft, biobasierte Produkte, Recycling**

*In his presentation as a guest speaker for the bioeconomy online seminar at the Otto-von-Guericke University Magdeburg in June 2020, Professor Sundmacher introduced the contributions of bioeconomy, electro economy and circular economy as three complimentary pillars for a more sustainable economy toward the vision of a circular electrical economy and highlighted their respective potentials as well as their limitations. Professor Sundmacher claimed that bioeconomy is better suited to produce food, pharmaceutical compounds and chemicals than electricity and fuels. In his presentation, he explained the advantages of the electrical economy for the generation of electricity and production of hydrogen through wind and solar energy and the subsequent processing to e-fuels by combining hydrogen with carbon. The principal advantage of circular economy is the reduction in the use of raw materials, but it requires high recycling rates, according to Professor Sundmacher. He explained further the contribution of bio-based resources to the continuity of the loop and differentiates between technical recyclability and biodegradability. The presentation was transcribed and edited for this Working Paper issue by Astrid Butt.*

**Keywords: bioeconomy, electrical economy, circular economy, bio-based products, recycling**

#### **Prof. Dr. Kai Sundmacher**

leitet den Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik an der OVGU und ist Leiter der Fachgruppe "Process Systems Engineering" am Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme in Magdeburg. Kontakt: [sundmacher@mpi-magdeburg.mpg.de](mailto:sundmacher@mpi-magdeburg.mpg.de)

#### **Astrid Butt**

ist Diplomökonomin, Projektleitung Mobilität in einer Regionalentwicklungsgesellschaft und infernum-Studierende im Masterstudium Umweltwissenschaften an der FernUniversität in Hagen.

Kontakt: [astridbutt@web.de](mailto:astridbutt@web.de)

## Einführung

Der Gastbeitrag von Prof. Dr.-Ing. habil. Kai Sundmacher mit dem Titel „Kreislaufwirtschaft und Elektro-Bioökonomie: Neue Ansätze in der Nachhaltigkeitsforschung“ erfolgte im Online-Seminar Bioökonomie am 29. Juni 2020 an der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg im Studiengang Sozialwissenschaften. Professor Sundmacher erläuterte und differenzierte dabei die Beiträge der Bioökonomie, der Bio-Elektro-Ökonomie und der Kreislaufwirtschaft als sich ergänzende Säulen für ein nachhaltigeres Wirtschaften und zeigte deren jeweilige Potenziale und Grenzen auf.

Professor Sundmacher arbeitet am Institut für Verfahrenstechnik (IVT) an der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik (FVST) der OVGU. Im Bereich Systemverfahrenstechnik forscht er dort zu den Themen Elektrochemische Prozesse (Brennstoffzellen, Elektrolysen), integrierte Prozesse (Reaktor-Separator-Systeme) und Partikelprozesse (Fällung, Kristallisation, Emulsionsprozesse), wobei Laborexperimente und Computersimulationen eng miteinander verknüpft werden.

Er ist außerdem für das Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme im Bereich Prozesstechnik tätig. Dort verfolgt er die Forschungsinteressen modellgestützte Analyse und Synthese komplexer verfahrenstechnischer Prozesse, integrierte chemische Prozesse, chemische Energiekonversion, Biosystemtechnik und synthetische Biosysteme.

Für mehr Informationen zu seiner Person siehe auch:

- [https://de.wikipedia.org/wiki/Kai\\_Sundmacher](https://de.wikipedia.org/wiki/Kai_Sundmacher)
- <https://www.mpi-magdeburg.mpg.de/person/24754>
- <http://www.svt.ovgu.de/Der+Lehrstuhl/Mitarbeiter/Prof.+Dr.+Ing.+habil.+Kai+Sundmacher-karte-264-p-362.html>

Dieser Beitrag wurde von Astrid Butt erstellt. Für den Beitrag wurde der Vortrag von Professor Sundmacher verschriftlicht, sprachlich aufbereitet und um einige Angaben ergänzt.

## Kreislaufwirtschaft und Elektro-Bioökonomie



### Kreislaufwirtschaft und Elektro-Bioökonomie: Neue Ansätze in der Nachhaltigkeitsforschung

Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme

<sup>2</sup> Otto-von-Guericke Universität Magdeburg,  
Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik  
E-Mail: [sundmacher@mpi-magdeburg.mpg.de](mailto:sundmacher@mpi-magdeburg.mpg.de)  
<https://twitter.com/SundmacherLab>

Gastbeitrag im Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020



Ich habe meinen Beitrag Kreislaufwirtschaft und Elektro-Bioökonomie genannt und möchte dort **Aspekte und Perspektiven** einbringen, die **die Bioökonomie in grundlegender Form bereichern können und möchte deutlich machen, dass es jetzt neue Ansätze gibt, um nachhaltiges Wirtschaften zu ermöglichen**; dass nicht alles immer „bio“ sein muss, um nachhaltig zu sein und unterwegs gibt es vielleicht einige provokante Thesen. Wenn Sie dazu dann im Nachgang Diskussionsbeiträge haben oder Fragen, würde ich mich sehr freuen, wenn Sie zum Beispiel per E-Mail auf mich zukommen. Ansonsten verweise ich auf meinen Twitter-Account <https://twitter.com/SundmacherLab>, den ich jüngst eingerichtet habe, wo auch Themen der Nachhaltigkeit stark mit vorkommen.

Discussionsbeiträge haben oder Fragen, würde ich mich sehr freuen, wenn Sie zum Beispiel per E-Mail auf mich zukommen. Ansonsten verweise ich auf meinen Twitter-Account <https://twitter.com/SundmacherLab>, den ich jüngst eingerichtet habe, wo auch Themen der Nachhaltigkeit stark mit vorkommen.

## Bioökonomie

### Ziele der Bioökonomie



- Veränderung der stofflichen Basis der Wirtschaft von fossilen Rohstoffen hin zu einer vermehrten **Nutzung von biogenen Rohstoffen**
- Vermehrter Einsatz von **bioinspirierten Prozessen**
- **Klimaschutz und Nachhaltigkeit** stärker zur Geltung bringen
- Schaffung **neuartiger Dienstleistungen, Technologien und Produkte**
- **Bioökonomie-Produkte** gibt es bereits, insbesondere bei Chemikalien und Materialien.

<https://www.bioeconomie-bw.de/bw/definition/produkte-der-bioeconomie>

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020

Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher

2

Die Ziele der Bioökonomie sind uns allen klar. **Wir wollen die stoffliche Basis der Wirtschaft verändern, weg von fossilen Rohstoffen und hin zu einer vermehrten Nutzung von biogenen Rohstoffen.** Und ein weiteres Ziel ist es, dass wir uns durch die Biologie inspirieren lassen wollen. Die Funktionsprinzipien der Natur nachzuahmen, könnte eben ein Weg sein, um tatsächlich auch ein nachhaltigeres Wirtschaften zu ermöglichen.

**Insgesamt möchte die Bioökonomie den Klimaschutz und die Nachhaltigkeit stärker zur Geltung bringen und möchte auch neuartige Dienstleistungen, Technologien und Produkte schaffen.** Was dann bedeuten würde, dass wir eine Transformation der Wirtschaft haben, nicht unbedingt mit dem Verlust von Arbeitsplätzen in alten Technologien, sondern der Schaffung von Arbeitsplätzen in zukunftsträchtigen Technologien. Bioökonomie-Produkte, das wissen wir alle, gibt es natürlich längst, insbesondere im Bereich der Chemikalien und der Materialien, denken Sie nur an Biogas.

Biobasierte Produkte

**Biobasierte Produkte**

**Europäisches Komitee für Normung (CEN):**

**Biobasiertes Produkt** = „Produkt, das ganz oder teilweise aus Biomasse gewonnen ist. Das biobasierte Produkt wird normalerweise durch den biobasierten Kohlenstoffanteil oder den biobasierten Anteil charakterisiert. Das Produkt kann ein Zwischenprodukt, materielles, halbfertiges oder endgültiges Produkt sein.“

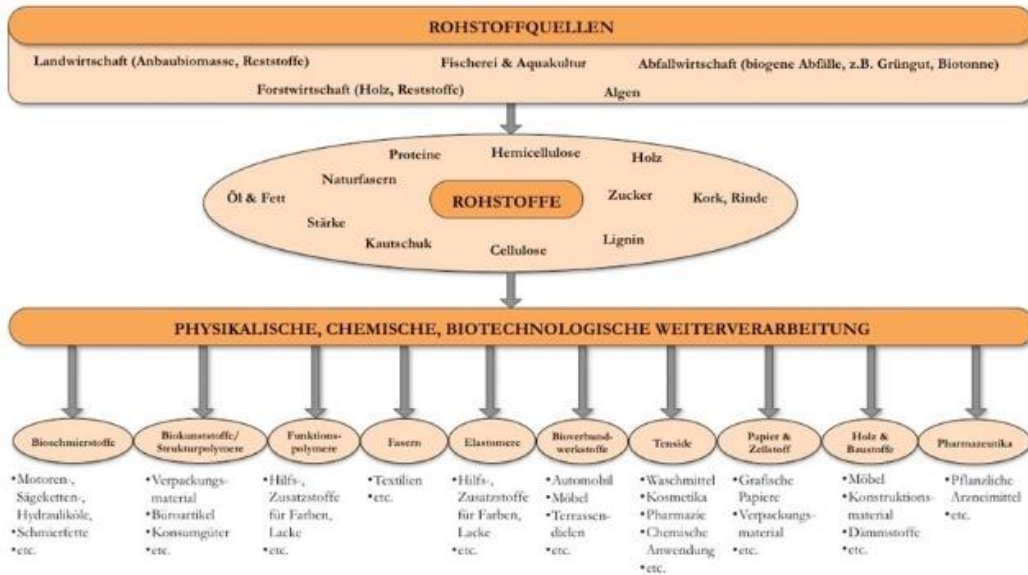
(EN 16575:2014 „Bio-based products – Vocabulary“)

Was ist jetzt ein biobasiertes Produkt? **Biobasierte Produkte sind nach der europäischen Normung Produkte, die ganz oder teilweise aus Biomasse gewonnen sind.** Das biobasierte Produkt wird dabei normalerweise durch den biobasierten Kohlenstoffanteil oder den biobasierten Anteil insgesamt charakterisiert. Das kann ein Zwischenprodukt, ein materielles, ein halbfertiges oder auch ein endgültiges Produkt sein. So viel zum Vokabular von „bio-based products“ nach der Euro-norm.

<https://www.bioeconomie-bw.de/bw/definition/produkte-der-bioeconomie>

Rohstoffquellen in der Bioökonomie

**Produkte der Bioökonomie**



<https://www.bioeconomie-bw.de/bw/definition/produkte-der-bioeconomie>

In diesem Stammbaum dargestellt sind verschiedene Rohstoffquellen. Wir müssen uns erstmal fragen: „**Woher kommen denn überhaupt die Rohstoffe, um biobasierte Produkte erzeugen zu können?**“ Sie kommen zuallererst aus der **Landwirtschaft**, aus der Anbaubiomasse aber



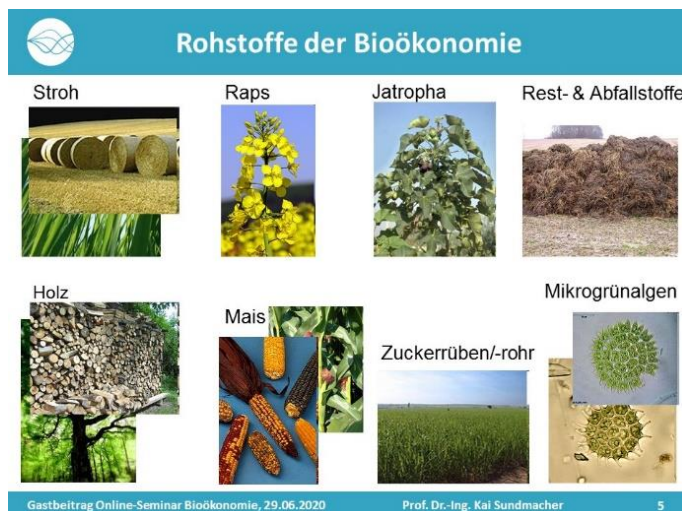
auch aus den dortigen Reststoffen, die in erheblichem Maße anfallen, denken wir nur an Stroh. Weiterhin aus der **Forstwirtschaft**, auch dort haben wir Holz und natürlich weitere Reststoffe. Aus der **Fischerei** und dem **Aquakulturwesen**. Aus der **Abfallwirtschaft**, dort gibt es jede Menge biogene Abfälle auch aus dem Siedlungsbereich, Grüngut Stichwort „Biotonne“. Das kennen wir alle. Und dann in jüngerer Zeit, eigentlich lange bekannt, aber in jüngerer Zeit heftiger diskutiert, für die Möglichkeit **Algen** zu kultivieren, Mikrogrünalgen insbesondere zu kultivieren, um aus denen dann ebenfalls Rohstoffe zu gewinnen.

Und die Rohstoffe, die wir rausziehen können aus all diesen Abfällen pflanzlicher Natur sind eben reichhaltig. Das reicht von Ölen und Fetten über Proteine, Hemicellulose, Zucker, Lignin, Kautschuk, Stärke, um nur einige zu nennen. D.h. **die Pflanzeninhaltsstoffe sind vielfältig und wir können jede Menge Endprodukte durch physikalische, chemische und biotechnologische Weiterverarbeitung daraus erzeugen.**

Hier sind Beispiele gegeben: **Schmierstoffe**, wie wir sie heute in Motoren einsetzen, können wir natürlich auch auf biologischer Basis erzeugen. **Biokunststoffe**, die Sie auch schon kennengelernt haben, im Rahmen Ihres Seminars, für Verpackungsmaterial, Büroartikel, Konsumgüter usw., selbst für Laptops gern einsetzbar und aus biologischer Provenienz herstellbar. **Funktionspolymere, Fasern**, denken wir nur an Textilien. Auch da kann man sich vorstellen, Faserwerkstoffe auch für Sportbekleidung tatsächlich aus biologischen Rohstoffen zu gewinnen.

**Elastomere, Tenside**, also Waschmittel, werden natürlich auch sehr stark diskutiert, dass man die insbesondere aus biologischer Produktion gewinnt und auch bioabbaubar macht. Dann **Papier und Zellstoffe** und **Holz, Baustoffe** insgesamt, auch da möchte man nachhaltiger werden beim Bauen. Und nicht zu vergessen: die **Pharmazeutika**, denn pharmazeutische Wirkstoffe werden nach wie vor gebraucht und können eben auch durch kluge biotechnologische Verfahren aus biologischen Rohstoffquellen erzeugt werden.

### Energiepflanzen und Abfallstoffe



Hier sind einige **Rohstoffe** dargestellt. Es gibt einmal die sogenannten **Energiepflanzen**, dazu gehört **Raps** und auch **Mais** insbesondere. Diese Rohstoffe werden auch bei uns angebaut.

Dann gibt es die **Zuckerrübe** als langjähriger Energieträger, gerade auch in Norddeutschland sehr stark angebaut, in Konkurrenz zum Zuckerrohr aus Südamerika, vor allem in Brasilien. Daraus kann man Zucker gewinnen, die man weiterverarbeiten kann, nicht nur zu Konsum-

zucker, also nicht nur für die Lebensmittelindustrie, sondern daraus könnte man auch Chemierohstoffe gewinnen.

**Jatropha** ist eine Pflanze, die in Indien wächst, auch auf relativ trockenen Böden, die ölhaltige Früchte erzeugt, die man auspressen kann. Daraus könnte man theoretisch Kraftstoffe gewinnen. Weiterhin sind hier **Mikrogrünalgen** aus mikroskopischen Bildern sichtbar gemacht, sind so 20, 40, 100 Nanometer groß und sind also letztendlich Pflanzen, die im Wasser leben und Photosynthese machen, wie auch alle anderen Stoffe, die wir dargestellt haben. Holz ist uns bekannt.

Und dann haben wir eben **Abfallstoffe**, dazu gehören **Stroh** und auch andere Rest- und Abfallstoffe, denken wir an **Gülle und Mist** aus der Tierhaltung. Das heißt, wir haben ein sehr breites Spektrum, einerseits Abfallstoffe, andererseits aber auch Pflanzen, die ganz bewusst angebaut werden, um daraus zum Beispiel Energieträger zu gewinnen.

### Effektivität der Photosynthese

Effektivität der Photosynthese	
<b>Gesamteinstrahlung</b>	<b>100,00%</b>
50% Lichtabsorption (Rest: Transmission, Reflektion)	<b>50,00%</b>
3,2% Bruttoprimärproduktion (Rest: Umwandlung in Wärme)	<b>1,6%</b>
50% Nettoprimärproduktion (Rest für Atmung verbraucht)	<b>0,8%</b>

→ Von der Pflanze wird nur ein kleiner Teil der auftreffenden Sonnenenergie genutzt, um CO<sub>2</sub> in der Nettoprimärproduktion zu Zellmaterial aufzubauen.

→ Geringe Effektivität = **hoher Flächenbedarf !**

Jetzt muss man wissen: Alle Pflanzen, die wir anbauen auf einer bestimmten gegebenen Fläche, haben eine bestimmte Effektivität der Energiewandlung in der Photosynthese. Wenn wir 100 % Lichteinstrahlung hernehmen und darauf normieren, dann ist es so, dass ungefähr nur 50 % des Lichtes absorbiert werden von den Pflanzen. Der Rest wird durchgelassen, Transmission nennt man das, oder reflektiert.

Von diesen 50 % werden dann nur 3,2 % genutzt seitens der Pflanzen

für die Bruttoprimärproduktion. Der Rest des eingestrahnten Lichtes, was bei der Pflanze angekommen ist, wird in Wärme umgewandelt. Das heißt aber, hier haben wir jetzt nur noch 1,6 % der eingestrahnten Lichtenergie für die Bruttoprimärproduktion genutzt.

Die Nettoprimärproduktion, die ist dann nur 50 % dieser Bruttoprimärproduktion, denn der Rest wird von der Pflanze für Stoffwechselprozesse verbraucht. Das heißt wir landen dann bei ungefähr einem Prozent, im günstigsten Fall. Ein Prozent der eingestreuerten Energie landet also in Stoffen, die die Pflanze aufbaut.

**Das heißt also mit anderen Worten, nur ein sehr kleiner Teil der auftreffenden Sonnenenergie wird genutzt, um Kohlendioxid per Photosynthese in der Nettoprimärproduktion zu Zellmaterial aufzubauen, das wir dann später als Biomasse nutzen können und daraus Materialien, Chemikalien usw. herstellen können. Wir müssen also ganz klar sehen, dass die Photosyntheseleistung der Pflanze zwar etwas Besonderes darstellt, dass aber die energetische Effektivität bei objektiver Betrachtung sehr gering ist und wir immer einen sehr hohen Flächenbedarf haben, wenn wir an Energieernte denken.**

Ein Photovoltaikpanel, das wir aufbauen auf der gleichen Fläche, hat eine weitaus höhere Effektivität als die Pflanze. Aber das Photovoltaikpanel macht natürlich keine Zucker, sondern produziert letztendlich nur Strom. **Wir müssen aber sehen, dass die Pflanze als Energiewandler einen schlechten Wirkungsgrad hat.**

### Biomasse und Flächennutzung

Bioenergieträger (Biofuels) in 2050	
• Landfläche insgesamt	15 200 m <sup>2</sup> /Kopf
• nutzbare Landfläche	11 068 m <sup>2</sup> /Kopf
• Erhaltung der Umwelt, 10%	-1 107 m <sup>2</sup> /Kopf
• Siedlungsfläche	-750 m <sup>2</sup> /Kopf
• Ackerfläche	-2 300 m <sup>2</sup> /Kopf
• Weide	-5 300 m <sup>2</sup> /Kopf
• Biomasse als Chemierohstoff	-400 m <sup>2</sup> /Kopf
• Rest für Energiepflanzen	1 211 m <sup>2</sup> /Kopf

→ 18% des primären Energieverbrauchs bei 4 kWh/(m<sup>2</sup> Jahr)

→ Biomassenutzbarkeit für Energiegewinnung begrenzt!  
(Flächenlimit, Überdüngungsgefahr, Wasserbedarf)

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020 Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher 7

Und diese Flächenbedarfsdiskussion ist wichtig, wenn man an die Nutzung von Biomasse denkt. Insbesondere dann, wenn man sich überlegt, dass man Bioenergie gewinnen möchte auf dem Acker, auf den Landflächen.

Wir haben weltweit, das sind Zahlenangaben, die sich auf den Welt-durchschnitt beziehen, pro Kopf eines Erdbürgers ungefähr 15.000 m<sup>2</sup> Landflächen, die zur Verfügung stehen. Nutzbar davon sind nur 11.000

m<sup>2</sup>. Dann brauchen wir zur Erhaltung der Umwelt ungefähr 10 %, diese müssen wir abziehen, wir müssen Siedlungsfläche abziehen, wir müssen Ackerfläche abziehen für die Nahrungsmittelgewinnung. Wir müssen Weidefläche abziehen für die Tierernährung.

Dann wollen wir noch ein bisschen Biomasse nutzen für Chemierohstoffe. Zum Beispiel könnte man aus Kartoffeln Stärke gewinnen, die einen wichtigen Rohstoff darstellt für Klebstoffe und ähnliches. Sodass wir zum Schluss nur noch einen sehr geringen begrenzten Anteil an Fläche pro Kopf Erdbürger zur Verfügung haben, auf dem wir Energiepflanzen anbauen würden, wenn es unser Ziel sein sollte – ich spreche bewusst im Konjunktiv – jetzt Biomasse für die Energiegewinnung zu benutzen. Und diese Fläche, das kann man ausrechnen, würde jetzt nur 18 % des primären durchschnittlichen Weltenergieverbrauchs entsprechen.

**Das heißt also: Energiepflanzen können den „Energiehunger“ des Menschen auf diesem Planeten nicht allein decken. Die Fläche, die zur Verfügung steht, ist begrenzt und deswegen ist auch die Biomasse-Nutzbarkeit für die Energiegewinnung begrenzt.** Eine Intensivierung der Landwirtschaft, um mehr Energiepflanzen zu gewinnen, würde Überdüngungsgefahr beinhalten und auch massiv den Wasserbedarf dafür steigern - beides unerwünschte Effekte.

## Grenzen der Bioökonomie



### Grenzen der Bioökonomie

- Pflanzen „leisten“ CO<sub>2</sub>-Bindung aus der Atmosphäre und schließen damit den **Kohlenstoffkreislauf**.
- Die **Fläche** zur Gewinnung von Biomasse ist begrenzt.
- **Biomasse** sollte primär für die Produktion von **Nahrungsmitteln, pharmazeutischen Wirkstoffen** und chemischen Rohstoffen eingesetzt werden.
- Nur die **Rest- und Abfallstoffe** der Landwirtschaft (Gülle, Stroh,...) sollten energetisch genutzt werden (Biogasanlagen).
- Der Anbau von **Energiepflanzen** (Mais, Raps, etc.) ist langfristig nicht sinnvoll, da die damit gewinnbare Energiemenge begrenzt ist.

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020

Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher

8

Es gibt Grenzen der Bioökonomie, die ich ganz klar adressieren möchte. Pflanzen leisten etwas Besonderes durch CO<sub>2</sub>-Bindung aus der Atmosphäre, Assimilation nennt man das, und sie schließen den **Kohlenstoffkreislauf**. All das, was wir emittieren an CO<sub>2</sub>, können Pflanzen zum Teil assimilieren und als Biomasse aufbauen. Das ist positiv zu sehen, **wir schließen also den Kohlenstoffkreislauf**.

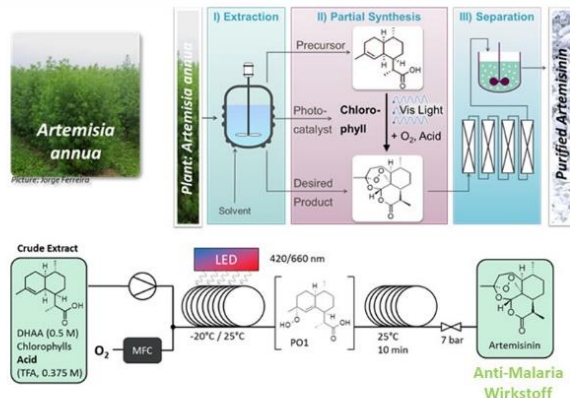
Aber die Fläche zur Gewinnung der Biomasse ist begrenzt. **Biomasse**

**sollte primär für die Produktion von Nahrungsmitteln, pharmazeutischen Wirkstoffen und chemischen Rohstoffen eingesetzt werden**, nach meiner Meinung. **Nur Rest- und Abfallstoffe der Landwirtschaft, Gülle, Stroh usw. sollten energetisch genutzt werden**, zum Beispiel zum Betrieb von Biogasanlagen. Der Anbau von Energiepflanzen, Mais und Raps, ist aus meiner Perspektive langfristig nicht sinnvoll, weil die damit gewinnbare Energiemenge von vornherein sehr begrenzt ist und den Energiehunger des Planeten nicht decken wird.

## Potenziale der Bioökonomie



### Bioökonomie: Pharmazeutische Wirkstoffe



Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020

Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher

9

Was kann aber die Bioökonomie leisten? Sie kann, ich habe es schon gesagt, zum Beispiel **durch Extraktion von Wirkstoffen aus Pflanzen dazu beitragen, wertvolle Stoffe zu gewinnen, die wir nur mit großem Aufwand chemisch-synthetisch herstellen könnten**.

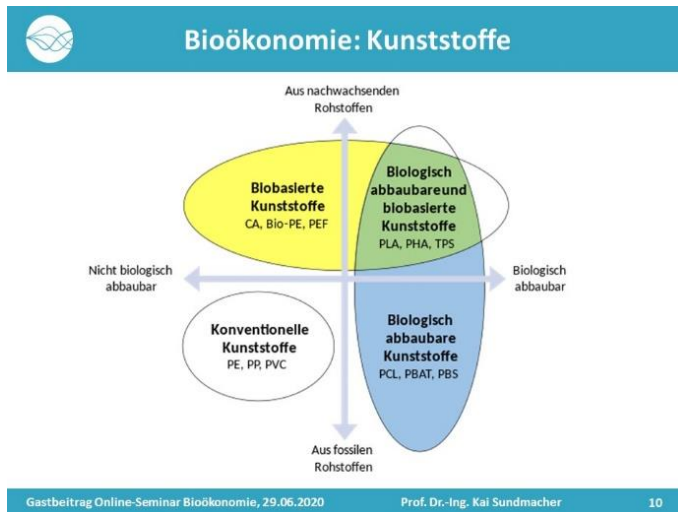
Dazu gehört zum Beispiel der Anti-Malaria-Wirkstoff Artemisinin. Artemisinin kann gewonnen werden aus der *Artemisia annua* Pflanze, die hier dargestellt ist, durch entsprechende Extraktion. Das heißt aus

den Blättern dieser Pflanze kann man durch Extraktionsschritte und durch chemisch-synthetische Schritte am Ende ein Molekül gewinnen, welches ein Anti-Malaria-Medikament darstellt und sehr erfolgreich auch dafür eingesetzt wurde. Die chinesische Wissenschaftlerin Tu Youyou isolierte erstmals Artemisinin aus der Pflanze und erhielt dafür 2015 den Nobelpreis.

Ja, wir sehen also, dass die Syntheseleistung der Pflanzen, bestimmter Pflanzen, direkt genutzt werden kann, um Wert- und Wirkstoffe für den Menschen zu gewinnen.



Biokunststoffe



Und wie sieht es nun bei den Kunststoffen aus? Nun Kunststoffe erfordern sehr viel größere Mengenströme, weil wir sehr viel davon verbrauchen. Und bei den Kunststoffen, das haben Sie vielleicht auch schon gehört, gibt es eine grobe 4-Teilung, je nachdem, ob sie aus nachwachsenden Rohstoffen oder aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden. Das wäre hier die Ordinate in diesem Diagramm. Und an der Abszisse ist aufgetragen, ob sie biologisch abbaubar sind (rechts) oder

nicht biologisch abbaubar (links). Dadurch ergeben sich hier in den vier Quadranten verschiedene Kombinationen und **besonders attraktiv erscheint natürlich die Nutzung von biologisch abbaubaren und biobasierten Kunststoffen, dazu zählt zum Beispiel PLA.**

Biokunststoff PLA

**Bioökonomie: Kunststoff PLA**

**Polylactide**  
 → umgangssprachlich auch **Polymilchsäuren** (kurz PLA, engl. *polylactic acid*) genannt  
 → synthetische Polymere, die zu den Polyestern zählen.

**Physikalische Eigenschaften**

- + geringe Feuchtigkeitsaufnahme mit hoher Kapillarkwirkung → Sport- und Funktionsbekleidung
- + geringe Flammbarkeit, hohe UV-Beständigkeit → Möbelindustrie
- + geringe Dichte → Leichtbau

**Biologische Abbaubarkeit**

- + Abbaubarkeit nur in industriellen Kompostieranlagen
- in der Natur zersetzt sich PLA langsamer
- Als Mikroplastik führt PLA bei der *Gemeinen Miesmuschel* zu einer Proteinwechselstörung – einer Veränderung des Hämolympheproteoms.

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020
Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher 11

Was ist PLA? **PLA ist Polylactid**, umgangssprachlich wird es auch Polymilchsäure genannt, obwohl dies eigentlich rein chemisch betrachtet, nicht so ganz korrekt ist. Es ist also **ein synthetisches Polymer, das zu den Polyestern zählt.** Hier ist es dargestellt.

Durch Ringschluss aus Milchsäuremolekülen, die man also aus der Milch gewinnen kann, wird ein Vorläufer gebildet, der wird dann polymerisiert, wie wir sagen, also die Kette wird verlängert. Und solche

Polymere haben sehr günstige physikalische Eigenschaften, die dieses Material geeignet machen für Sport- und Funktionsbekleidung, für die Möbelindustrie oder auch für den Leichtbau. Aufgrund der geringen Dichte und des relativ hohen Elastizitäts- und Biegemoduls können wir also diese Kunststoffe tatsächlich auch als Leichtbaumaterial einsetzen.

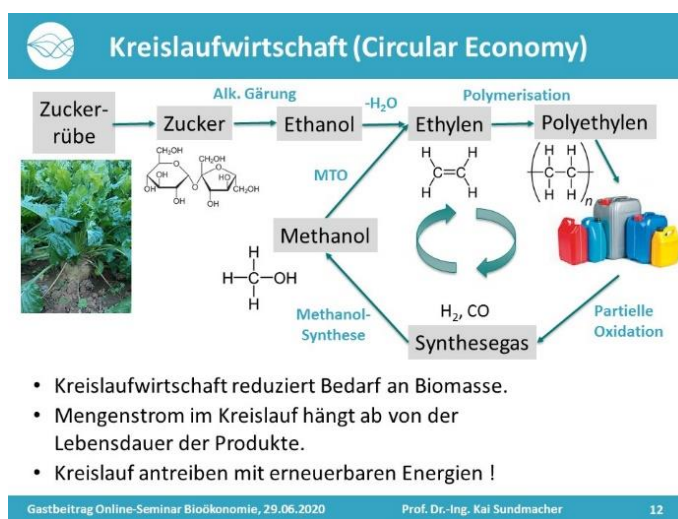
**Der Kunststoff ist biologisch abbaubar**, aber hier muss man jetzt genauer hinschauen. Er ist **nur abbaubar in industriellen Kompostieranlagen** unter den dortigen speziellen Bedingungen. In der Natur, in der freien Natur zersetzt sich PLA langsam und, was man auch sehen muss, biologische Abbaubarkeit ist nur ein Aspekt. Ein anderer Aspekt ist, **Mikroplastik von diesem Biokunststoff führt zum Beispiel bei der gemeinen Miesmuschel zu einer Proteinwechselstörung,**

**nachweislich einer Veränderung des Proteoms.** Und das ist natürlich etwas, was nicht gewollt ist.

Das heißt, Bioabbaubarkeit allein wäre nur ein Kriterium, nachdem wir die Eigenschaften von solchen künstlichen Polymeren, die aus biologischen Rohstoffen hergestellt worden sind, bewerten sollten. Das heißt also das Kriterienspektrum sollte mehrdimensional sein in der Bewertung von solchen Stoffen und da würde man dann finden, dass ein solches einfaches 4-Quadrantensystem für die Einordnung gar nicht ausreicht.

## Kreislaufwirtschaft

### Kreislaufwirtschaft (Circular Economy)



Wie können wir nun aus der Schere rauskommen? Wir haben gehört, die Flächen sind begrenzt, die Kunststoffe sind zwar bioabbaubar, teilweise sind sie auch nicht bioabbaubar, aber können aus biologischen Rohstoffen hergestellt werden und hier an dieser Stelle kommt jetzt ein neuer Aspekt hinein, der die Politik jetzt auch sehr stark beschäftigt und der sich auch in EU-Fördermaßnahmen widerspiegelt beispielsweise, nämlich die sogenannte circular economy in Neuhochdeutsch, also der Kreislaufwirtschaft.

Eigentlich etwas, was wir alle schon kannten, diese Kreislaufwirtschaft, was wir auch zum Beispiel beim Glas und beim Papier schon längst praktizieren, dass wir Recyclingsysteme aufbauen. Das ist nichts komplett Neues; aber die Kreislaufwirtschaft jetzt in allen Bereich voll auszurollen, das ist neu. Eine sogenannte **linear economy**, wie wir sie also im Moment praktizieren, das heißt **Herstellen, Nutzen und dann Deponieren von Gütern**, dass das **nicht zukunftsfähig** ist, liegt auf der Hand. Die **Ersetzung durch die circular economy kann hier kombiniert werden mit der Bioökonomie** und hier ist dies exemplarisch dargestellt.

### Polymerisation – Nutzung – Wiederauflösung - Synthese

Stellen wir uns vor, aus der Zuckerrübe würden wir Saccharose, also Zucker gewinnen, dann könnten wir ihn durch alkoholische Gärung zu Ethanol machen. Wenn wir aus dem Ethanol Wasser abspalten, bekommen wir Ethylen, das ist dieses Molekül mit diesen beiden Kohlenstoffatomen und dieser chemischen Doppelbindung. Und das kann man wunderbar polymerisieren in klassischer Art zu Polyethylen, da kann man solche Behälter draus machen, die wir alle kennen und sicherlich auch jeden Tag nutzen.

Nun wollen wir natürlich dieses Polyethylen eben nicht mehr in die Umwelt kommen lassen, sondern wir wollen über Pfandsysteme dafür sorgen, dass eine Rücknahme passiert. Und dann

ist es aber so, dass diese Behälter zum Teil wieder aufgelöst werden müssen, wir können sie nicht wieder verwenden, weil wir vielleicht Inhaltsstoffe darin hatten, die wir nicht in Kontakt kommen lassen wollen mit den neuen Inhaltsstoffen. Das heißt, wir wollen Verunreinigungen abstreifen. Und das kann man zum Beispiel dadurch tun, dass man diese Kunststoffe hier einer partiellen Oxidation unterwirft, dann gewinnt man ein wasserstoffreiches Synthesegas, aus dem kann man Methanol machen, das ist ein einfacher Alkohol. Und aus diesem Alkohol kann man mit dem sogenannten "Methanol-to-Olefins"-Prozess dann wieder Ethylen machen.

Das heißt, hier befänden wir uns dann in einem **Zyklus von Polymerisation, Nutzung des Kunststoffes in der hergestellten Form des Gutes, dann Wiederauflösung und erneuter Synthese.**

### Kreislaufwirtschaft plus Bioökonomie

Dieser Kreislauf hat nur einen bestimmten Wirkungsgrad, das heißt man wird nicht alles Polyethylen wieder komplett zurückgewinnen können, muss also einen sogenannten Make-up-Strom, wie wir in der Verfahrenstechnik sagen, hinzufügen, und der könnte eben aus der biologischen Produktion stammen.

Das heißt, die Kreislaufwirtschaft könnte hier intelligenter zukünftig kombiniert werden mit der Bioökonomie. **Kreislaufwirtschaft reduziert den Bedarf an Biomasse, weil ich nur so viel noch zuführen muss, wie ich verliere, dadurch dass ich endliche Wirkungsgrade habe bei der Rückführung in diesen Kreislauf.** Der Mengenstrom im Kreislauf hängt im Wesentlichen ab von der Lebensdauer der Produkte. Wenn diese Produkte sehr lange halten, dann muss ich natürlich wenig nachfüttern, wenn ich aber sehr oft erneuere, dann wird der Mengenstrom, der hier im Kreislauf führt, entsprechend groß sein. Und der Kreislauf muss dann natürlich angetrieben werden mit erneuerbaren Energien, das ist auch sehr wichtig. Dies ist nachhaltige Kreislaufführung, angetrieben durch erneuerbare Energien und aufrecht erhalten durch Zusp eisung von Molekülen aus Biomasse.

### Schließen von Kreisläufen

**Kreislaufwirtschaft (Circular Economy)**

**CLOSING LOOPS**  
Using resources for the longest time possible could cut some nations' emissions by up to 70%, increase their workforces by 4% and greatly lessen waste.

**USE**  
Is controlled by buyer-owner-consumers of goods, or by fleet managers who retain ownership and sell goods as services.

**DISTRIBUTION**  
Ownership transfers from manufacturer to consumer at point of sale.

**REPAIR, REPAIR/REMANUFACTURE**

**RECYCLE**

**TAKE-BACK OF GOODS**

**MANUFACTURING**  
Renewing used products lessens the need to mine originals from scratch.

**EXTRACTED RESOURCES**  
Water, energy and natural resources enter the manufacturing process.

**Resource losses** partly recoverable by industrial symbioses.

**Circular economy**  
A new relationship with our goods and materials would save resources and energy and create local jobs, explains Walter R. Stahel.

W.R. Stahel, Nature 531 (2016) 435-438.

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020 Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher 13

Das wäre eine mögliche Zukunftsvision und diese stammt natürlich nicht von mir, sondern sie wurde schon lange diskutiert. Vor vier Jahren hatte ich Walter Stahel eingeladen, in Magdeburg einen Seminarvortrag zu halten. Er hat in der bekannten Zeitschrift „Nature“ eine Stellungnahme abgegeben, die ich Ihnen zum Lesen ans Herz legen möchte, in der gezeigt wird, **was Kreislaufwirtschaft bedeutet.**<sup>13</sup>

<sup>13</sup> 2016.03.23, nature, Walter R. Stahel, The circular economy, online 2021.07.02, <https://www.nature.com/articles/531435a>

Und hier ist das in diesem englischsprachigen Cartoon einfach mal dargestellt, wie man Recyclingsysteme aufbaut, wie man Pfandsysteme aufbaut, dass man **einen paradigmatischen Shift erzeugen** muss in der Bevölkerung, bei den Konsumenten, dass eben **neuwertig nicht bedeuten muss, gerade frisch hergestellt aus Rohstoffen, sondern auch bedeuten kann, erneuert durch Reparieren eines genutzten Gutes**. Hierbei sind auch vielfältige psychologische Effekte zu berücksichtigen, sowie ganz viele politische Entscheidungsprozesse, die dazu führen müssen, dass man auch gesetzlich Dinge abgießt und Kreislaufwirtschaft im breitesten Sinn in der Gesellschaft möglich macht und auch belohnt im Wirtschaften.

## Recycling-Systeme

⦿
**Kreislaufwirtschaft: Beispiele**

<div style="background-color: #e6f2ff; padding: 5px; border: 1px solid #0072bc;"> <b>PAPIER-RECYCLING</b>                    → 18th Century             </div>	<div style="background-color: #e6f2ff; padding: 5px; border: 1px solid #0072bc;"> <b>FLASCHEN-RÜCKGABE</b>                    → 2003             </div>
<div style="background-color: #e6f2ff; padding: 5px; border: 1px solid #0072bc;"> <b>GLAS-RECYCLING</b>                    → 1974             </div>	<div style="background-color: #e6f2ff; padding: 5px; border: 1px solid #0072bc;"> <b>MATRATZEN-RECYCLING</b>                    → 2025 ?             </div>

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020
Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher
14

Und wir kennen das schon teilweise vom Papier-Recycling, das geht auf das 18. Jahrhundert zurück. Glas-Recycling wurde in den 70er Jahren praktiziert. Das Flaschen-Rückgabesystem, was wir jetzt alle schätzen, wurde mit einer Kraftanstrengung Anfang der 2000er Jahre errichtet. Heute ist es eine Selbstverständlichkeit.

Jetzt kann man sich überlegen, wie man diese Ansätze auf breiterer Basis anwendet. Könnten wir beispielsweise Mitte des Jahrzehnts nicht

auch Matratzen-Recycling zum Standard machen? Nun möchte natürlich niemand auf einer alten Matratze schlafen, in der sich vielleicht irgendwelches Ungeziefer befindet. Wir wollen eine frische Matratze haben, wollen ruhig schlafen können. **Wie können wir jetzt also Recyclingsysteme, Bioökonomie und so weiter kombinieren, um zum Beispiel eine Matratzen-Recyclingwirtschaft zu erreichen?**

## Beispiel Matratzen-Recycling

⦿
**Kreislaufwirtschaft: Matratzen**

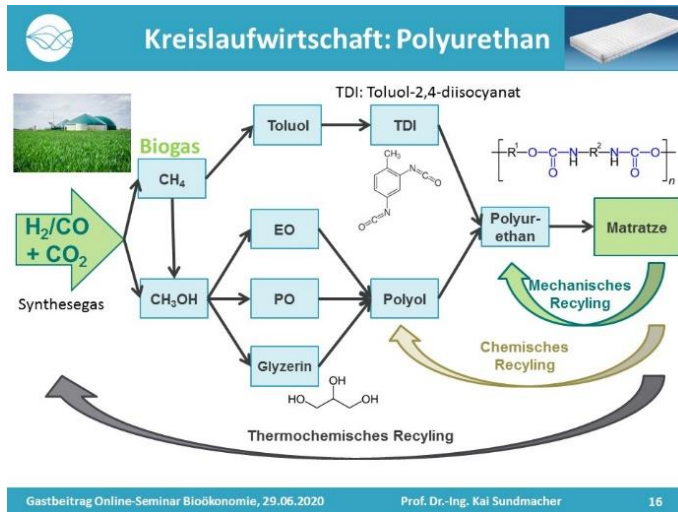


Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020
Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher
15

Das ist hier cartoonhaft dargestellt. **Matratzen, das sind Polyurethane, Schaumstoffe**, die da verarbeitet werden. Das kennen wir, sie werden produziert, sie werden vertrieben, aber in der Kreislaufwirtschaft wäre es dann notwendig, dass man sie wieder einsammelt und einem Recyclingschritt entsprechend zuführt.



## Polyurethan-Kreislauf



Und welche **Recyclingmethoden** wir dafür hätten, sehen Sie auf der nächsten Folie. Auch hier muss ich Sie leider wieder ein bisschen mit Chemie konfrontieren.

Hier hinten ist die Matratze, sie besteht aus Polyurethan, das ist ein Polymer mit diesem molekularen oder atomaren Aufbau. Sie sehen, darin enthalten sind Stickstoffatome, Wasserstoff-, Kohlenstoff-, Sauerstoffatome. Und das ist so ganz systematisch aufgebaut und dieses Polyurethan wird also hergestellt

aus diesem TDI-Molekül und einem Polyol, das wiederum kann man aus Toluol gewinnen bzw. aus Glycerin. Glycerin ist Nebenprodukt der Biodiesel-Produktion. Man könnte Polyol aber auch aus Methanol machen und das TDI-Molekül könnte man aus Biogas machen.

Das heißt, man könnte wieder aus „bio“ eine Matratze machen und jetzt muss man aber den Kreislauf schließen, denn auch diese Matratze möchte man nicht verbrennen. Nein, man möchte sie entweder **mechanisch recyceln**. Beim Polyurethan ist es tatsächlich möglich durch eine Dekomposition der Matratze den Schaumstoff zu gewinnen und durch mechanische Bearbeitungsschritte wieder ein Granulat herzustellen, aus dem man dann wiederum Schaumstoff machen kann.

Oder man könnte auch **chemisch recyceln**. Wenn man also auf jeden Fall vermeiden möchte, dass irgendwelche biologischen Verunreinigungen hier in diesem Kreislauf bleiben, dann löst man diese Matratze einfach teilweise auf und gewinnt diesen Zwischenrohstoff, den man dann wiederum verarbeitet und in der Polymerisation wieder zu einer Matratze werden lässt.

Oder man könnte auch noch einen weiteren Weg gehen. Man könnte diese Matratze einem **thermochemischen Recycling** unterwerfen, gewinnt dann ein Synthesegas, wie wir das vorhin schon gehört haben, also Wasserstoff, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und das könnte man dann wiederum verarbeiten, könnte wiederum Methan daraus machen und daraus Methanol. Und über diese ganzen Wertschöpfungsketten chemischer Art könnte man dann Polyurethan, also den Schaumstoff, wieder zurückgewinnen.

Man sieht jetzt hier: Die Wege des Recyclings sind unterschiedlich weit. Die kürzesten Wege sind in der Regel auch diejenigen, die energetisch am günstigsten sind. Daher würde man versuchen, das thermochemische Recycling zu vermeiden und stattdessen ein chemisches Recycling durchzuführen. Und dafür braucht man wiederum **die Moleküle aus der Biomasse**. Das Biogas zum Beispiel wird **zum Upgrading** des Zyklus, **immer dann, wenn man etwas verliert von diesem Polyurethan bei dem Recyclingschritt, muss man nachfüttern und das könnte man aus der biologischen Quelle tun**.

## Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie

### Kreislaufwirtschaft (KLW) und Bioökonomie

- KLW und Bioökonomie können sich **sinnvoll ergänzen**.
- **Biologische Rohstoffe** sollten nur in begrenzter Menge in die KLW eingespeist werden („Make-up“), um den Kreislauf aufrecht zu erhalten.
- Die Produkte der Kreislaufwirtschaft müssen **nicht zwingend bioabbaubar** sein.
- Die Kreislaufwirtschaft setzt aber Produkte voraus, die sich mit geringem technischem Aufwand und geringem Energieeinsatz wieder zersetzen lassen (mechanisch, thermisch, chemisch).
- **Technische Rezyklierbarkeit ≠ Bioabbaubarkeit**

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020

Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher

17

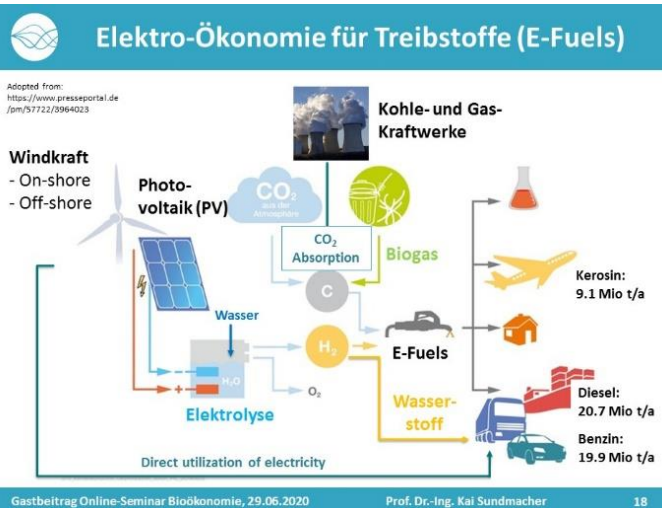
Fazit: Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie, die können sich sinnvoll ergänzen. Biologische Rohstoffe sollten nur in begrenzter Menge in die Kreislaufwirtschaft eingespeist werden, als sogenannter Make-up-Strom, nenne ich das mal, um den Kreislauf aufrecht zu erhalten. Produkte der Kreislaufwirtschaft müssen, das ist mir auch wichtig, nicht zwingend bioabbaubar sein, denn wenn ich sie im Kreislauf halte und ein Anreizsystem schaffe, dass ich zu sehr großem Anteil vom Konsumenten diese Produkte wieder zurück-

bekomme, dann ist die Bioabbaubarkeit vielleicht keine zwingend notwendige Eigenschaft.

**Kreislaufwirtschaft setzt viel mehr Produkte voraus, die sich mit geringem technischem Aufwand und geringem Energieeinsatz wieder zersetzen oder zerlegen lassen.** Denn das führt zu geringen Energieeinsätzen und damit müssen wir nur wenig erneuerbare Energien einsetzen. Das ist wichtig für die Kreislaufwirtschaft. Technische Rezyklierbarkeit bedeutet nicht automatisch Bioabbaubarkeit.

## Elektro-Ökonomie

### Elektro-Ökonomie für Treibstoffe (E-Fuels)



Am Schluss möchte ich noch einen dritten Aspekt hier hineinbringen. Sie haben in Ihrem Seminar auch sicherlich viel gesprochen über sogenannte „Biofuels“, Biotreibstoffe. **Treibstoffe, die man aus biologischen Rohstoffen herstellen kann.** Nun haben wir aber auch gehört, dass die Energieketten-Wirkungsgrade dafür sehr niedrig sind, weil die Photosyntheseleistung der Pflanze energetisch betrachtet, nicht besonders gut ist. Außerdem sind die Flächen begrenzt. Und hinzu kommt, dass wir natürlich Biodiver-

sitätsaspekte berücksichtigen müssen, weil beim Anbau von Raps und Mais Monokulturen geschaffen werden, die für die Biodiversität teilweise katastrophal sind.

Wie kann man nun dieses Problem lösen? **Nun, ich bin der Meinung, dass Bioökonomie sich wenig eignet, um Treibstoffe herzustellen für unsere Gesellschaft, für unser Transportwesen und unser Verkehrswesen, sondern hier sollte man eher den Weg gehen, wirklich die Elektro-Ökonomie zu fördern.** Das ist jetzt etwas, was im Kontext der Wasserstoffstrategie unseres Landes sehr wichtig werden wird in naher Zukunft. Dass wir nämlich **Windkraft und Photovoltaik** hernehmen und den elektrischen Strom, den wir daraus gewinnen, **die erneuerbare elektrische Energie nutzen, um Wasser zu spalten in Wasserstoff und Sauerstoff.** Und diesen Wasserstoff können wir als Treibstoff direkt benutzen, bei seiner Verbrennung wird gar kein CO<sub>2</sub> emittiert, sondern nur Wasserdampf.

Wenn wir jetzt aber trotzdem **kohlenstoffhaltige Kraftstoffe** benötigen, dann können wir diese **herstellen in Form von sogenannten E-Fuels.** Das heißt die E-Fuels sind molekular genauso aufgebaut, wie die Treibstoffe, die wir heute an der Tankstelle vertanken oder die ein Flugzeug braucht. Kerosin zum Beispiel können wir herstellen aus Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien gewonnen worden ist und Kohlenstoff, der zum Beispiel absorbiert wurde aus Gas- oder Kohlekraftwerken. Oder wenn diese Kraftwerke dann hoffentlich irgendwann nicht mehr existieren als Haupt-CO<sub>2</sub>-Emittenten, dann können wir das CO<sub>2</sub> auch aus der Atmosphäre direkt absorbieren mit sogenannten direct air capture-Verfahren (DAC).

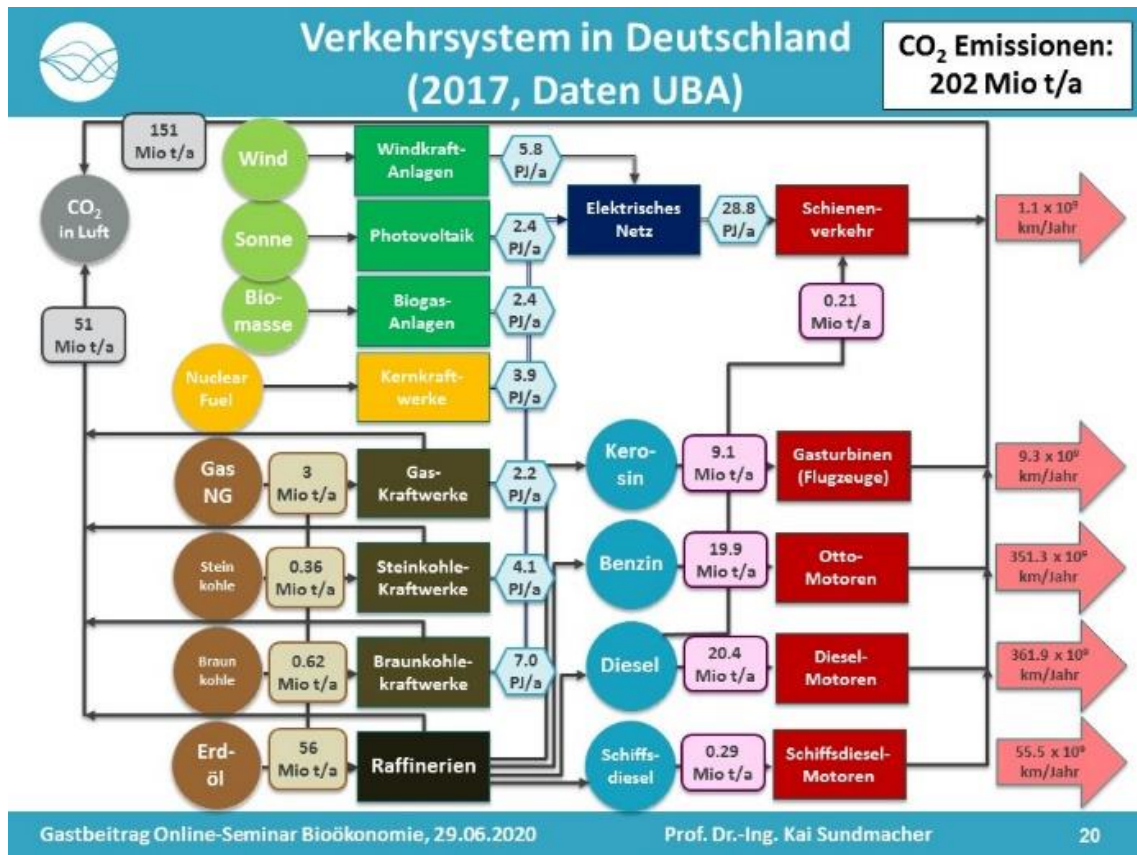
Oder wir könnten, denn es gibt immer noch die Biogasquelle, dann aus Reststoffen der landwirtschaftlichen Produktion ein Biogas gewinnen. Dieses Biogas liefert uns die Kohlenstoffbausteine, die wir benötigen, um diese sogenannten E-Fuels zu machen. Und die Mengen, die wir herstellen müssen, sind erheblich. Wir brauchen in Deutschland pro Jahr ungefähr 10 Mio. t Kerosin, um unsere Flugzeugflotte zu betreiben, wir brauchen 20 Mio. t von Diesel und ungefähr 20 Mio. t von Benzin, Superkraftstoff und Normalkraftstoff.

### Die nationale Wasserstoffstrategie



Diese Überlegungen führen uns zur nationalen **Wasserstoffstrategie 2020**, die vor wenigen Tagen bekannt gegeben wurde. Diese beruht auf der Idee, voll auf diese **Elektro-Ökonomie**, nenne ich das, zu setzen, nämlich **Wasserstoff voll auszurollen als den Hauptenergieträger**, den wir **off-shore und on-shore durch Windkraft** hauptsächlich gewinnen werden und der dann genutzt werden kann über Tankstellensysteme, um Fahrzeuge fahren zu lassen, das heißt PKWs aber auch LKWs.

Verkehrssysteme in Deutschland



Diese Folie veranschaulicht das Ergebnis einer Flussanalyse, die jetzt zeigen soll, was das eigentlich bringt, in diese Elektro-Ökonomie einzusteigen. Das was Sie jetzt hier sehen, ist die Situation gegenwärtig. Die Daten, die ich hier zugrunde gelegt habe, stammen vom Umweltbundesamt, das systematisch jedes Jahr Daten zusammenträgt und zur Verfügung stellt zur allgemeinen Benutzung. Woraus man entnehmen kann: Welche verschiedenen Verkehrsträger nutzen wir in Deutschland, wieviel Kerosin wird verbraucht für den Betrieb von Gasturbinen in Flugzeugen bzw. den Betrieb von Otto-Motoren, also wieviel Benzin, wieviel Dieselmotoren, wieviel Motorkraftstoff für Schiffsdiesel benötigen wir eigentlich in diesem Land und wie werden diese Treibstoffe hergestellt. Rechts ist die Transportleistung dieser verschiedenen Verkehrsträger angegeben. Alles was hier dargestellt ist, bezieht sich nur auf die Energiebedarfe im deutschen Verkehrssystem.

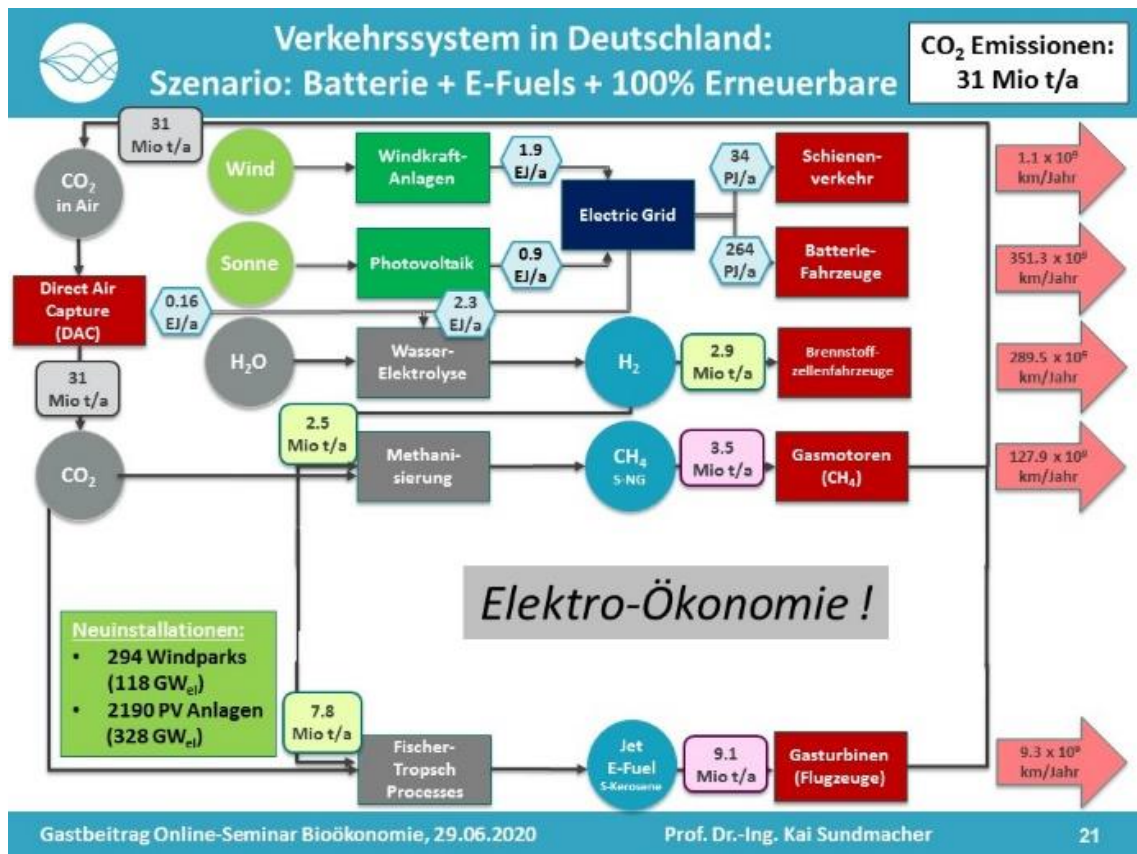
Sie sehen hier die Transportleistungen auf der Schiene, ungefähr eine Milliarde Kilometer pro Jahr. Bei den Flugzeugen sind es neun Milliarden Kilometer und bei den benzinbetriebenen PKWs und anderen Fahrzeugen bis 300 Milliarden Kilometer pro Jahr, bei Dieselmotoren 360 Milliarden Kilometer pro Jahr und die Schiffe transportieren ungefähr 55 Milliarden Kilometer pro Jahr. Diese Transportleistungen wollen wir im Grunde gerne aufrechterhalten. Natürlich können wir durch Verlagerung auf die Schiene und auf die Wasserstraße insbesondere im Bereich des Güterverkehrs teilweise einsparen. Wir können Transportleistungen einsparen. Wir können mehr auf Videokonferenzen setzen, weniger Dienstreisen machen, können diese Leistungen einsparen. Aber ich bin eher pessimistisch. **Ich würde sagen, es wäre schon gut, wenn**



unsere Transportleistungen, die erbracht werden müssen, nicht wachsen, sondern etwa konstant bleiben.

Und dann kann man sich überlegen, wie können wir diese Transportleistung erbringen mit deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen als das heute der Fall ist. Und was kann „bio“ da helfen, was kann „elektro“ dort helfen. **Die CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Verkehrswesens, das kann man sich gut merken, machen ungefähr ein Viertel unserer gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus. Sie liegen in der Größenordnung von 200 Millionen Tonnen pro Jahr und wir müssen sie drastisch reduzieren.** Woher stammen diese Emissionen? Sie stammen aus der Verbrennung dieser Kraftstoffe, Kerosin, Benzin, Diesel, Schiffsdiesel. Sie stammen aber auch aus dem Betrieb von Gas-, Steinkohle- und Braunkohlekraftwerken und Raffinerien, die diese Kraftstoffe herstellen. Sie emittieren ihrerseits auch in erheblichem Maße CO<sub>2</sub>. Ungefähr 50 Millionen Tonnen pro Jahr von diesen 200 werden von den Kraftwerken und den Raffinerien emittiert. Zusätzlich emittieren wir natürlich 150 Millionen Tonnen schlicht durch die Verbrennung dieser Kraftstoffe.

Die Elektro-Ökonomie



Wie können wir zukünftig davon wegkommen? Nun, das zeigt diese nächste Folie: durch die Elektro-Ökonomie. Die Elektro-Ökonomie würde jetzt hergehen und massiv auf Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen setzen und würde über das elektrische Netz Energie bereitstellen für die Wasserelektrolyse, bei der Wasser in Wasserstoff umgewandelt wird. Diesen Wasserstoff können wir in Brennstoffzellenfahrzeugen benutzen und könnten die gleiche Transportleistung mit Brennstoffzellenfahrzeugen erbringen und zum anderen Teil auch mit Batteriefahrzeugen.

**Wenn wir Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge massiv nutzen würden, um Ottomotoren und Dieselmotoren zu ersetzen, dann könnten wir bei gleicher Transportleistung insgesamt die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 200 auf 30 Millionen Tonnen reduzieren. Das wäre ein sehr radikaler Schritt und würde den kompletten Umbau unseres Verkehrssystems erfordern.**

Wir sind auf diesem Weg, wir haben uns auf diesen Weg gemacht. Es ist noch ein weiter Weg, aber das ist die Perspektive, die auch die Wasserstoffwirtschaft letztendlich bietet. Flüssige Energieträger, wie zum Beispiel Kerosin oder synthetisches Jet Fuel wie man sagt, würden wir dann nur noch dort einsetzen, wo Batterien oder auch Brennstoffzellen wenig Sinn machen. Das betrifft insbesondere den Flugzeugbereich, wo man bevorzugt synthetische Kraftstoffe verwenden würde aus Wasserstoff und Kohlendioxid.

Dieses Kohlendioxid könnten wir für Zwecke der Kraftstoffsynthese durch Absorption direkt aus der Luft gewinnen, ohne eine biologische Quelle, d.h. Biomasse, anzapfen zu müssen. Wir würden also praktisch mit höherer Effizienz als es die Photosynthese macht, CO<sub>2</sub> aus der Luft herausfischen und würden dieses Kohlendioxid als Rohstoff benutzen, um z.B. Kerosin herzustellen. Um das aber machen zu können, brauchen wir einen massiven Ausbau der erneuerbaren Energie, in der Größenordnung von ungefähr 300 zusätzlichen Windparks und 2000 zusätzlichen Photovoltaikanlagen in einer Größenklasse, wie sie heute existieren.

### CO<sub>2</sub> als Rohstoff

**CO<sub>2</sub> als Rohstoff**

**CO<sub>2</sub> Abscheidung aus Abgasströmen (Deutschland):**

Abgasströme	Emissionen [t/a]
Braunkohlekraftwerke	155 × 10 <sup>6</sup>
Steinkohlekraftwerke	7 × 10 <sup>6</sup>
Zementindustrie	18.7 × 10 <sup>6</sup>
Stahlindustrie	18 × 10 <sup>6</sup>
Biogasanlagen	3.24 × 10 <sup>6</sup>

CO<sub>2</sub> demand for liquid E-fuels: 180 × 10<sup>6</sup> t CO<sub>2</sub>/a

- use batteries
- use H<sub>2</sub>
- CO<sub>2</sub> from air!

Climeworks' DAC demonstrator, Switzerland

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020
Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher
22

CO<sub>2</sub> muss man als Rohstoff begreifen, um E-Fuels zu machen. In Zukunft wird es so sein, dass wir CO<sub>2</sub> nicht mehr aus den Abgasen von Braun- und Steinkohlekraftwerken ernten können, weil deren Betrieb nach aktuellem Stand der Diskussion spätestens bis 2038 eingestellt sein wird. Die Stahlindustrie hat sich auch auf den Weg gemacht, CO<sub>2</sub>-neutral zu produzieren durch Einsatz von Wasserstoff, Elektrolyse-Wasserstoff. Dann verbleiben nur noch die Zementindustrie und die Biogasanlagen, aber die Menge dieses Kohlendioxids würde dann nicht ausreichen, um daraus flüssige Kraftstoffe herzustellen, d.h. E-Fuels.

Deswegen brauchen wir die sogenannten **Direct Air Capture-Verfahren**. Hier ist dieses Verfahren schematisch und als Foto einer realen Anlage dargestellt. In der Schweiz gibt es die Firma Climeworks, die Demonstratoren gebaut hat, mit denen man **CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre herausfischen** und dann zur Verfügung stellen kann, zum Beispiel für die Herstellung von flüssigen Kraftstoffen, also insbesondere den Turbinentreibstoff für Flugzeuge.

## Schlüsselfaktoren



**Schlüsselfaktor in der Elektro-Ökonomie ist der massive Ausbau der Windparks, insbesondere auf See.** Das wird dazu führen, dass wir in der deutschen Bucht insbesondere sehr viele dieser Windparks haben müssen. Diese Menge aber wird nicht ausreichen. **Die in Deutschland produzierbare Menge an Windenergie wird nicht ausreichen, um unser gesamtes Verkehrssystem betreiben zu können.** Hochrechnungen zeigen ganz klar, dass wir ein **Energie-Importland** bleiben werden und immer auch sein werden, so wie wir es heute auch sind.

Die **Wasserelektrolyse** ist oben rechts schematisch dargestellt als Apparat, in den man Wasser einspeist und Sauerstoff- und Wasserstoff als Produkte erhält, ein elektrochemischer Wandlungsapparat. Dieser ist die **Schlüsseltechnologie schlechthin, um „grünen“ Wasserstoff zu erzeugen**, wie wir sagen. Dieser grüne Wasserstoff muss an entsprechenden Tankstellen angeboten werden, verteilt werden. Auch da brauchen wir einen massiven Ausbau der Verteilungsstruktur und dann können wir diesen Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen nutzen.

## Zirkuläre Elektro-Bioökonomie

**Vision: Zirkulare Elektro-Bioökonomie**

- **Bioökonomie:** Bereitstellung komplexerer Moleküle durch die Syntheseleistung von Pflanzen für Ernährung, pharmazeutische Wirkstoffe und Chemierohstoffe
- **Elektro-Ökonomie:** Massive Elektrifizierung für die Sektorkopplung, Wasserstoff als zentraler Energieträger, Dominanz der Elektrolyse als Kerntechnologie, C-haltige E-Fuels nur dort, wo H<sub>2</sub> nicht einsetzbar (Flugzeug-Turbinen)
- **Kreislaufwirtschaft:** Drastische Erhöhung der Recycling-Quoten bei Kunststoffen und allen Konsumgütern; Priorität auf „Alt-mach-Neu“; Voraussetzung: Bewusstseinswandel beim Konsumenten; Belohnung von Reparaturleistungen auf dem Niveau heutiger Produktionsleistungen für neuwertige Waren.

Gastbeitrag Online-Seminar Bioökonomie, 29.06.2020 Prof. Dr.-Ing. Kai Sundmacher 24

Das bringt mich zu meiner letzten Folie. **Ich hoffe, dass ich Ihnen zeigen konnte, dass wir eben neben der Bioökonomie jetzt die Entwicklung der Elektro-Ökonomie und der Kreislaufwirtschaft haben und dass sich diese drei Pfeiler in Zukunft sinnvoll ergänzen können.**

Die Bioökonomie wird dabei die Rolle spielen, komplexere Moleküle bereitzustellen durch die Syntheseleistung von Pflanzen, für Ernährung, pharmazeutische Wirkstoffe und gewisse Chemierohstoffe.

Die Elektro-Ökonomie bedeutet eine massive Elektrifizierung für die Sektorkopplung, das heißt, dass wir den Energiegewinnungssektor zum Beispiel über den Wasserstoff an den Verkehrssektor koppeln. Wasserstoff wird der zentrale Energieträger sein. Das ist zumindest heute die Prognose. Und dass die politischen Akteure in diese Richtung gehen, zeigt diese Wasserstoffstrategie,

die in 2020 bekannt gegeben wurde. Die Elektrolyse wird die dominante Schlüsseltechnologie in der Wasserwirtschaft sein. Kohlenstoffhaltige Brennstoffe werden wir nur dort einsetzen, wo Wasserstoff nicht einsetzbar ist, zum Beispiel im Bereich der Flugzeugturbinen.

Die Kreislaufwirtschaft bedeutet eine drastische Erhöhung von Recyclingquoten, insbesondere bei Kunststoffen, aber auch allen anderen Konsumgütern. In einigen Bereichen, wie bei Glas und Papier haben wir schon sehr hohe Recyclingquoten erreicht, die Vorbild für andere Stoffströme sein sollten. Die Priorität muss sein, „Aus Alt mach Neu“. Und die Voraussetzung dafür ist aber eine Akzeptanz in der Bevölkerung, beim Konsumenten. Wir brauchen einen Bewusstseinswandel, eine Belohnung von Reparaturleistungen auf dem Niveau heutiger Produktionsleistungen für neuwertige Waren. Nur dann kann das Ganze funktionieren. Aber die Kreislaufwirtschaft, wenn sie dann etabliert ist, entlastet die Bioökonomie, entlastet uns von dem Flächendruck und wird mit dazu beitragen, Zielkonflikte, Konflikte zum Beispiel zwischen Chemieproduktion auf dem Acker und Gewinnung von Lebensmitteln aufzulösen.

## Abschluss



Kreislaufwirtschaft und Elektro-Bioökonomie:  
Neue Ansätze in der Nachhaltigkeitsforschung

**Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !**

**Gerne beantworte ich Ihre Fragen !**



Ich bedanke mich recht herzlich für Ihre Aufmerksamkeit. Gerne beantworte ich Ihre Fragen. Schicken Sie mir eine E-Mail, wenn Sie eine Frage haben [oder gern auch jetzt gleich im Anschluss an den Beitrag]. Danke.



## Fazit

Professor Sundmacher zeigt in seinem Vortrag, dass die reine Bioökonomie durch zunehmende Nutzung biogener statt fossiler Rohstoffe nicht allein das Ziel des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit erreichen kann. Die Bioökonomie eignet sich sehr gut zur Produktion von Nahrungsmitteln und durch Extraktion wertvoller pflanzlicher Stoffe zur Erzeugung pharmazeutischer Wirkstoffe und chemischer Rohstoffe. Dabei werden neue Produkte, Technologien und Dienstleistungen entstehen.

Weiterhin stellt Professor Sundmacher die These auf, dass sich die Bioökonomie nur wenig zur Erzeugung von Strom und Treibstoffen eignet. Er erläutert dies anhand der niedrigen Energieketten-Wirkungsgrade bezogen auf die energetische Photosyntheseleistung von Pflanzen, des hohen Flächenverbrauchs bei geringer Flächenverfügbarkeit und negativer Effekte für die Biodiversität.

Auch die Bioabbaubarkeit, häufig nur in industriellen Kompostieranlagen erreichbar, ist für ihn kein entscheidendes Kriterium, sondern vielmehr die Rezyklierbarkeit. In

der die Bioökonomie ergänzenden Kreislaufwirtschaft sind Produkte wichtig, die sich einfach reparieren, aufbereiten oder zersetzen und mit nur geringer Biomassezufuhr und erneuerbaren Energien wieder herstellen lassen.

Professor Sundmacher führt aus, dass die Elektro-Ökonomie, also die Strom- und Wasserstoffherzeugung durch Wind- und Solarenergie sowie die teilweise Weiterverarbeitung von Wasserstoff mit Kohlenstoff zu E-Fuels, besonders geeignet sei, den hohen Energiebedarf unserer Gesellschaft im Verkehrssektor zu decken und einen Beitrag zur Nachhaltigkeit zu leisten. Bei einem vollständigen Ersatz der mit fossilen Brennstoffen betriebenen Fahrzeuge durch Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge könnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen drastisch gesenkt werden könnten.

Die Bioökonomie, Bio-Elektro-Ökonomie und die Kreislaufwirtschaft als sich ergänzende Säulen für ein nachhaltigeres Wirtschaften sind die Vision, die Professor Sundmacher unter dem Begriff „Zirkuläre Elektro-Bioökonomie“ zusammenfasst.