



UNIVERSITÄT
HOHENHEIM

Die Pflanze als Teil einer Bioraffinerie



Aktuelle und zukünftige Arbeiten des Fachgebietes:

Konversionstechnologien nachwachsender Rohstoffe

Prof. Dr. Andrea Kruse

Universität Hohenheim

Institut für Agrartechnik (440)

Konversionstechnologien
nachwachsender
Rohstoffe (440f)





Impressum

Autoren

Prof. Dr. Andrea Kruse

Dr. Catalina Rodriguez Correa

Manuel Bauer

David Steinbach

Gero Becker

Fotos/Abbildungen

Fg. Konversionstechnologien nachwachsender Rohstoffe, Uni Hohenheim

Deutscher Akademischer Austauschdienst DAAD / Focke Strangmann

Wikipedia

HTCycle

Erschienen im April 2019



Inhalt

1.	Die Konversionstechnologien im Institut für Agrartechnik.....	2
2.	Der Leitgedanke im Fachgebiet.....	4
3.	Die Methode	6
4.	Die Hauptarbeitsgebiete	9
4.1	Plattformchemikalien aus Biomasse: „Plastik vom Acker“	10
4.2	Kohlenstoffmaterialien mit Nährstoffrückgewinnung	13
4.3	Neue Trennverfahren	17
5.	Die Menschen im Fachgebiet	18
6.	Lehre	19
7.	Ausstattung.....	19
8.	Kooperationen	20
9.	Geldgeber.....	20
10.	Ausgewählte Literaturstellen.....	21

1. Die Konversionstechnologien im Institut für Agrartechnik

Das Leitbild: Naturangepasste Technik

Angebundene Tiere in kleinen Ställen, umweltschädigende Landwirtschaft in eintöniger Landschaft und kontinuierlich voranschreitendes Artensterben. Das sind die Folgen einer Techniknutzung, bei der die Natur der Technik angepasst wird. Das Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim geht einen anderen Weg: Hier wird Technik der Natur angepasst (Abbildung 1). Wir wollen von der Natur lernen und folgen damit dem Prinzip der „Biologisierung der Technik“.

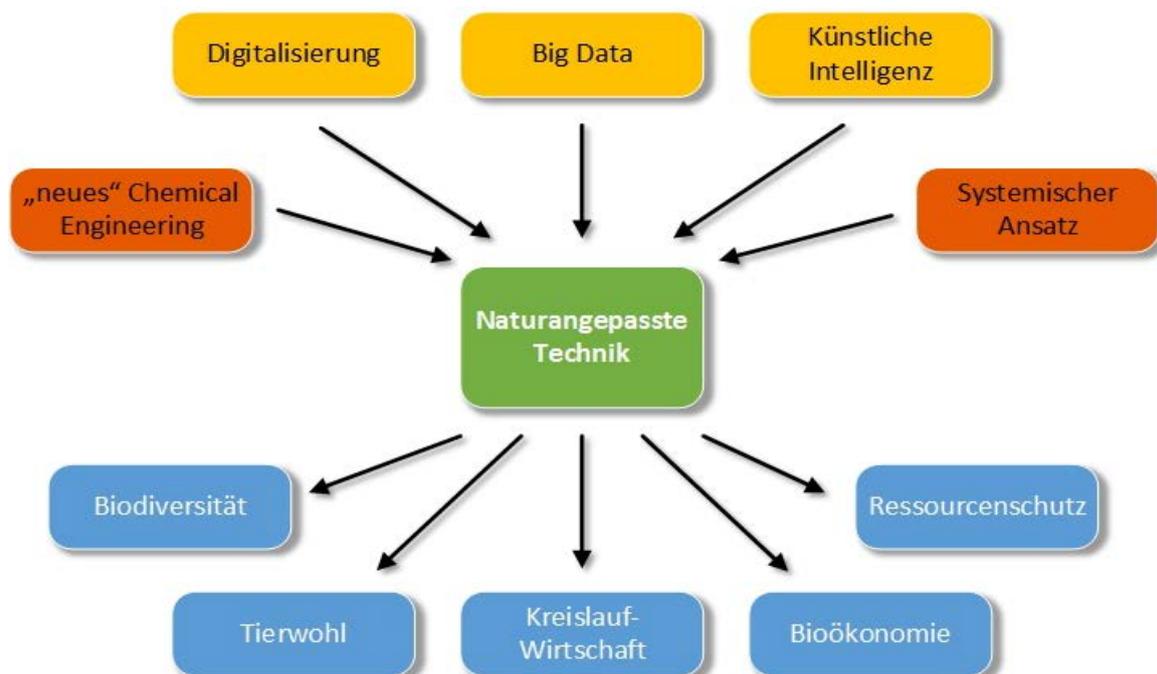


Abbildung 1: Naturangepasste Technik unter Nutzung von bspw. Digitalisierung und künstlicher Intelligenz als Basis für Ressourcenschutz und Lebensmittelsicherheit.

Bodenschonende Landtechnik schützt die Ressource Boden und sichert die Ernährung zukünftiger Generationen. Tiergerechte Ställe mit gesäuberter Abluft garantieren nicht nur das Tierwohl, sondern gewährleisten auch höchste Qualität sicherer Lebensmittel. Kleine landwirtschaftliche Roboter wenden Dünger und Insektizide punktgenau dort an, wo sie benötigt werden. Hecken bleiben erhalten und ermöglichen eine Artenvielfalt, die im Ein-



klung mit der Landwirtschaft bestehen kann. Die wichtigste Ressource überhaupt, Wasser, wird von innovativen Bewässerungsmethoden geschützt. Zusätzlich sorgen Phosphat- und Stickstoff-Rückgewinnung, z. B. aus Gülle und Klärschlamm, kombiniert mit einer präzisen Anwendung von Düngern, dafür, dass Pflanzen die benötigten Nährstoffe bekommen, ohne das Grundwasser oder Flüsse zu verschmutzen. Reststoffe der Nahrungsmittelproduktion werden zu neuen Materialien, z. B. für die Elektromobilität, verarbeitet und erhöhen so die Wertschöpfung in der Landwirtschaft (Bioökonomie). Dies sind nur einige Beispiele der Technologieentwicklungen in der Agrartechnik der Universität Hohenheim. Es ergeben sich komplexe Systeme mit großen Datenmengen (Big Data). Sie werden durch Digitalisierung handhabbar und mit sich entwickelnder künstlicher Intelligenz effizient regelbar (Abbildung 1).

Das Fachgebiet „Konversionstechnologien nachwachsender Rohstoffe“ trägt mit seinen Aktivitäten zum Leitbild bei. Wir passen unsere Technologien den Pflanzen und in einem zweiten Schritt den landwirtschaftlichen Strukturen an. Das Grundprinzip und die Basis unserer Aktivitäten ist die Nutzung von Molekülen und funktionellen Strukturen, die von den Pflanzen selbst gebildet werden. Außerdem arbeitet das Fachgebiet intensiv im Bereich der Nährstoffrückgewinnung und -nutzung.

2. Der Leitgedanke im Fachgebiet

Pflanzen bauen chemische Strukturen auf, die Menschen als Ersatz für erdölbasierte Produkte nutzen können. Nährstoffe und der für die Humusbildung notwendige Anteil des Kohlenstoffs werden auf das Feld zurückgeführt bzw. verbleiben dort. Dieser als Bioökonomie oder Kreislaufwirtschaft bezeichnete Ansatz wird in landwirtschaftsnahen Bioraffinerien umgesetzt.

Unsere Schwerpunkte liegen in der Herstellung von Plattformchemikalien, die beispielsweise zur Produktion von biogenen Kunststoffen oder Kohlenstoffmaterialien eingesetzt werden können. Auf diese Weise erzeugte Kohlenstoffmaterialien können als Energiespeicher im Kontext der Elektromobilität, Wasserstoffspeicher für Brennstoffzellen oder Elektrodenmaterial für Brennstoffzellen und Batterien Verwendung finden.

Um die Nachhaltigkeit der Prozesse gewährleisten zu können wird die ganze Wertschöpfungskette berücksichtigt: „Vom Feld zum Produkt“ und auch vom Produkt, nach Ende der Lebenszeit, wieder zum Feld (z.B. in Form von Nährstoffen, die während der Produktion freigesetzt werden).

In der Bioökonomie besteht jedoch ein grundlegendes Dilemma: Die „Economy of Scale“ und die erforderliche Infrastruktur legen sehr große Konversionsanlagen nahe. Man spricht in diesem Zusammenhang oft von der „Bio-BASF“. Aufgrund des flächigen Aufkommens müssen Biomassen in einer derartigen Verfahrensstruktur über sehr lange Strecken transportiert werden, was die Nachhaltigkeit eines solchen Ansatzes in Frage stellt. Die Lösung sind modulare, dezentrale Bioraffinerien, die als zusätzliche Infrastruktur nur eine (existierende) Biogasanlage benötigen. Die Module werden in größeren Stückzahlen gefertigt, was die Kosten pro Modul senkt. In dezentralen Kleinanlagen werden Zwischenprodukte hergestellt, die im Folgenden zu einer zentralen Anlage transportiert werden. Dort findet die Fertigung von marktfähigen Produkten, wie z.B. Autositzen, Bekleidung oder Batterien statt. Dieser Ansatz vermindert den Transportaufwand und führt Zwischenprodukte zusammen, die aus unterschiedlichen Bioraffinerien mit verschiedenen Ausgangsmaterialien stammen. Gleichzeitig können so aus einem Zwischenprodukt unterschiedliche Endprodukte gefertigt werden, was das System flexibel macht und eine schnelle Reaktion auf Veränderungen am Markt ermöglicht.

Bevorzugte Ausgangsmaterialien sind Biomasse-Restströme und Koppelprodukte zur Nahrungsmittelproduktion, da auf diese Weise die Konkurrenz zu Nahrungsmitteln vermieden wird. Im Gegenteil: Je mehr Nahrungsmittel produziert werden, desto mehr Reststoffe wie Chicorée-Rüben oder Stroh stehen für die stoffliche Umwandlung zur

Verfügung. Ein Beispiel zeigt Abbildung 2 für die Herstellung von Superkondensatoren und Batterien aus Maiskolben-Rückständen, die als Koppelprodukte der Maisproduktion für Nahrungsmittel anfallen.

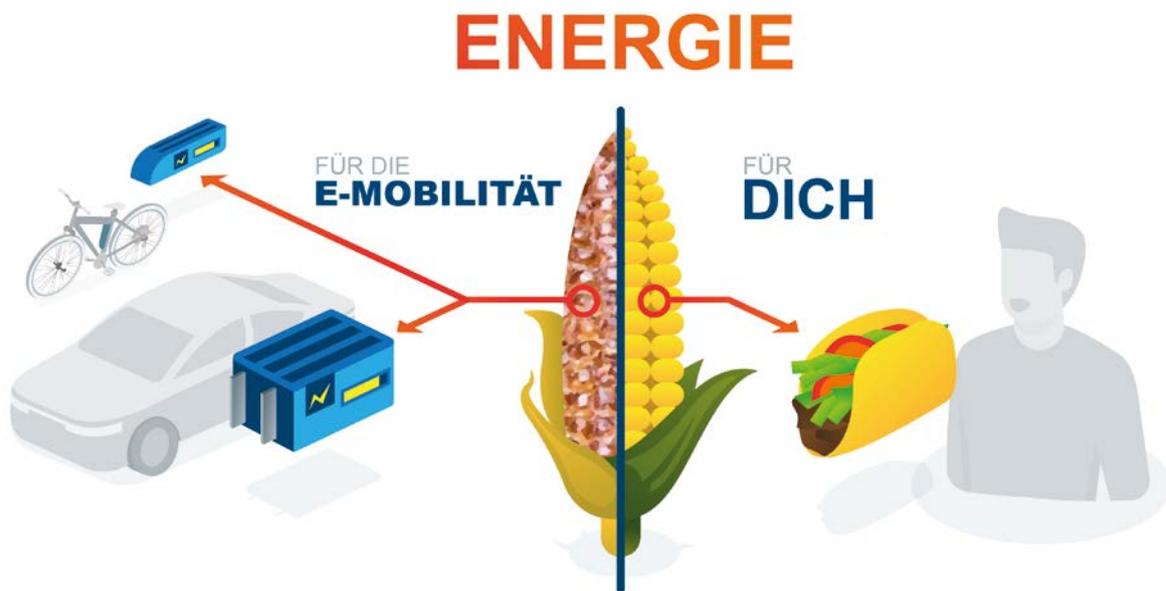


Abbildung 2: Herstellung von Kohlenstoffmaterialien aus dem Maiskolben, nachdem die Maiskörner für die Nutzung als Nahrungsmittel entfernt wurden. Diese Kohlenstoffmaterialien können für die Herstellung von Superkondensatoren und Batterie-Elektroden genutzt werden.

3. Die Methode

Die Methode folgt den klassischen Regeln der Maßstabsvergrößerung, oder Scale-up, zur Entwicklung eines technischen Verfahrens (Abbildung 3).

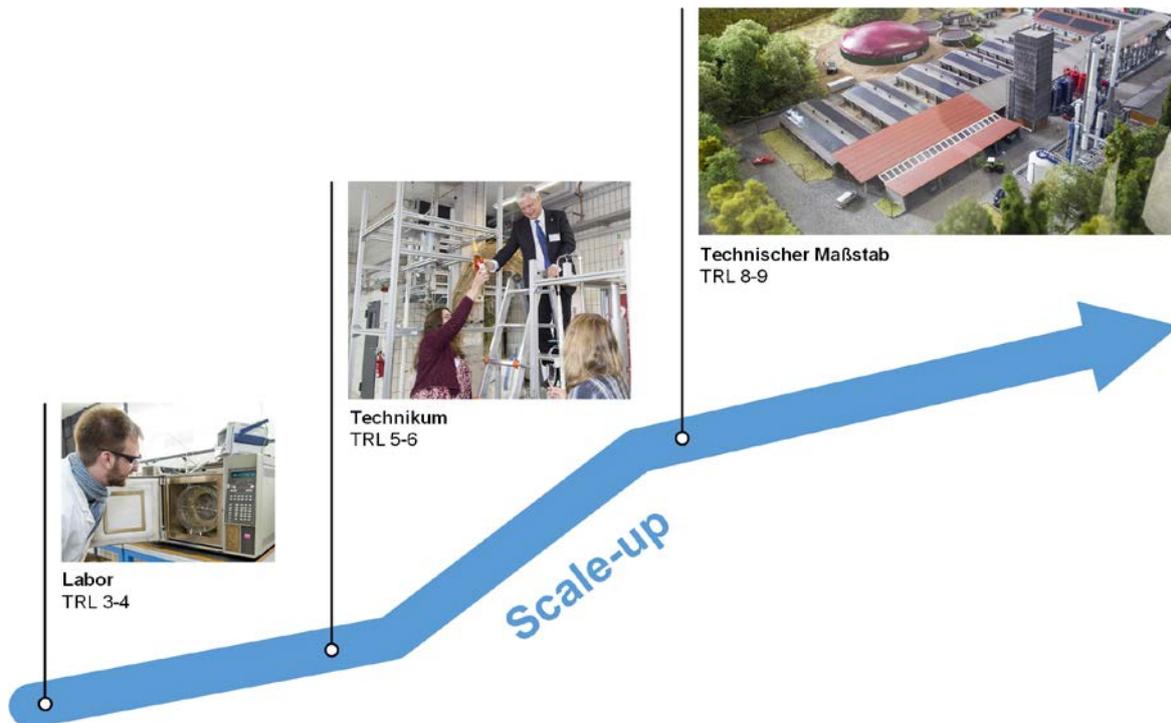


Abbildung 3: Visualisierung der Maßstabsvergrößerung (jeweils ein Faktor von ca. 100).

Die Herstellung bestimmter Materialien oder Plattformchemikalien wird zunächst im Labor untersucht. Danach werden die relevanten chemischen Reaktionen „vermessen“ und beispielsweise die Kinetik der chemischen Reaktionen modelliert (Jung et al. 2018; Steinbach et al. 2018). Auf dieser Basis erfolgt die reaktionstechnische Auslegung, ebenfalls mittels mathematischer Modelle oder in einfacheren Fällen „klassisch“ mit dimensionslosen Kennzahlen. Parallel dazu werden Trennoptionen ausgelegt. Eine Plattformchemikalie, wie z. B. 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) aus Chicorée-Wurzeln fällt zunächst in wässriger Lösung an und muss daraus isoliert werden. Dazu müssen entsprechende Fraktionierungsmethoden identifiziert (z.B. Destillation, Extraktion, Adsorption, etc.) und Basisdaten bestimmt werden. So ergeben sich schließlich die Fließschemata eines Verfahrens (Schwidorski and Kruse 2016). Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 4.

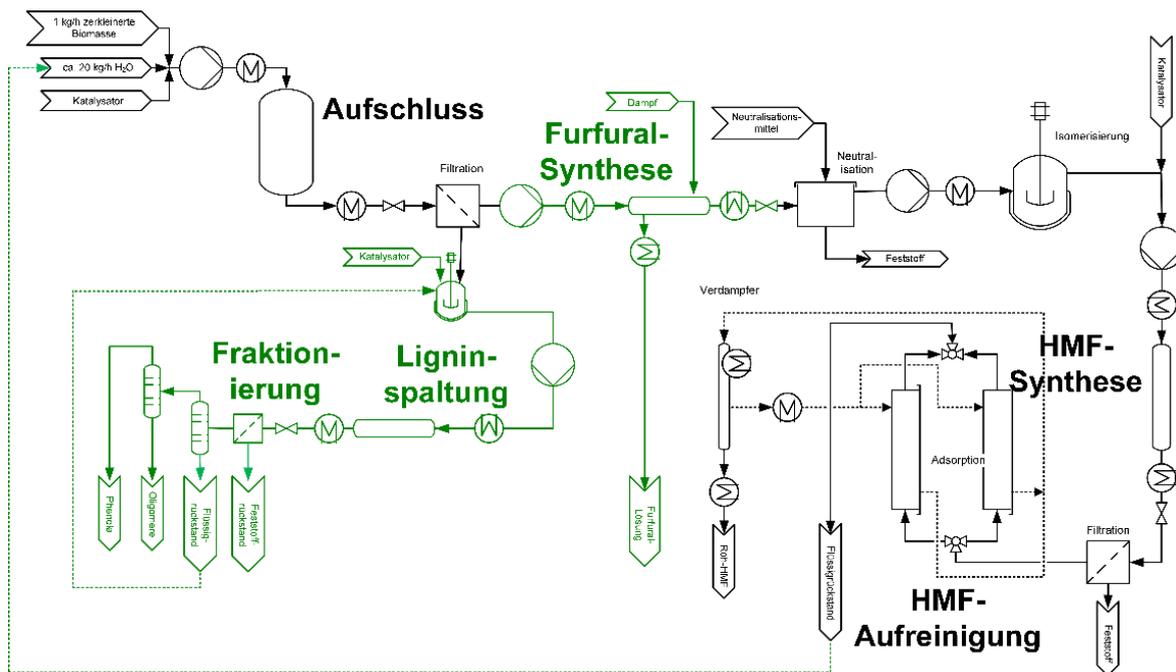


Abbildung 4: Fließschema zum Projekt B4B (Biorefinery for Baden-Württemberg). Erweiterung der Anlage im Biorefinerie-Technikum um die Herstellung von Phenolen und Furfural als weitere Plattformchemikalien neben Hydroxymethylfurfural.

Anschließend folgt die Auslegung der Apparate, d.h. es werden das Material, die Größe, die Art der Heizung, der Temperaturbereich, die Art der Befestigung etc. festgelegt. Sind die Anlagenteile für ein Verfahren gemäß der Auslegung konstruiert und gefertigt, wird der gesamte Prozess als Technikumsanlage oder Miniplant, i.d.R. im Biorefinerie-Technikum, aufgebaut. Das bedeutet, dass die Grundoperationen, die einzeln entwickelt wurden, zu einem Verfahren kombiniert werden. Eine beispielhafte Verschaltung verschiedener Grundoperationen ist in Abbildung 5 visualisiert.

Der Fortschritt eines Verfahrens drückt sich in einem höheren Technologie-Reifegrad (TRL; Technology Readiness Level) aus. Technikumsanlagen können nur kampagnienweise und im Schichtbetrieb betrieben werden. Sie liefern die notwendige Datenbasis für das Scale-up in den technischen Maßstab. Außerdem können Produkt-Muster hergestellt werden, die beispielsweise nützlich für eine spätere Markteinführung sind. Häufig dienen Technikumsanlagen vor allem der Überzeugung von Investoren, denn der notwendige letzte Schritt ist die technische Umsetzung und der Bau einer industriellen Anlage.

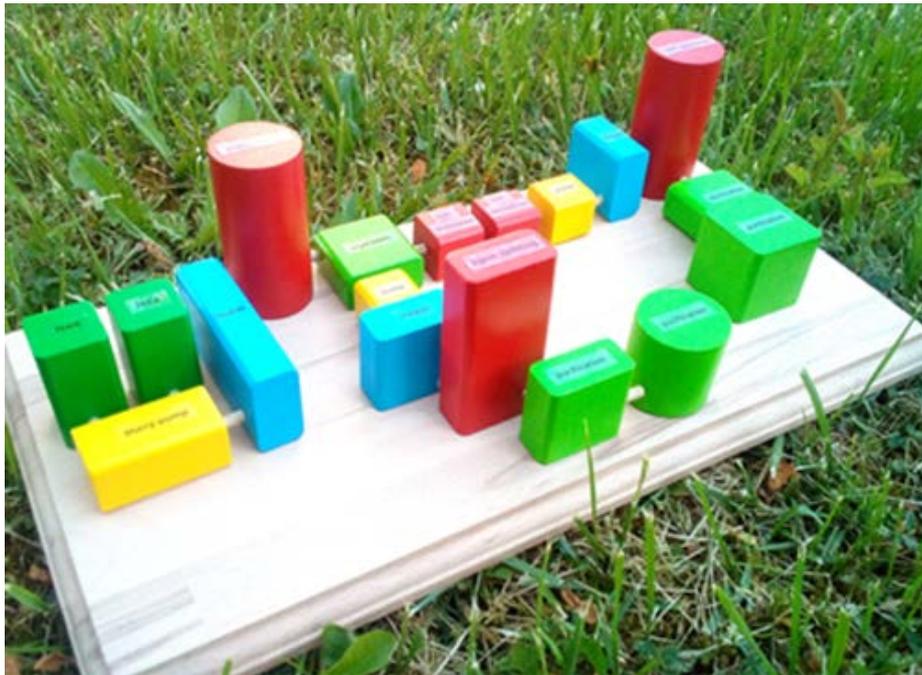


Abbildung 5: Modell der Anlage zur Gewinnung von HMF und Phenolen aus Lignocellulose. Jeder Bauklotz entspricht einer Grundoperation.

4. Die Hauptarbeitsgebiete

Die Hauptaktivitäten des Fachgebiets liegen in der Entwicklung von Trennoperationen, von Verfahren zur Gewinnung von Plattformchemikalien und von neuen Kohlenstoffmaterialien sowie deren Herstellungsverfahren. Diese Gebiete lassen sich jedoch nicht vollständig voneinander abgrenzen, da beispielsweise bei der Entwicklung von Herstellungsverfahren für Plattformchemikalien auch immer Trennverfahren beteiligt sind.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Arbeitsschwerpunkte und den jeweiligen Entwicklungsstand eingegangen (Abbildung 6). Bis TRL 3 werden die Laboraufbauten in der Technikumhalle des Institutes für Agrartechnik eingesetzt. Ein typisches Beispiel ist in Abbildung 3 im unteren Bildteil dargestellt. Hier werden einzelne Grundoperationen entwickelt und kleine Anlagen realisiert. Für die Erreichung von TRL 5 bzw. 6 wird eine Anlage im Bioraffinerie-Technikum aufgebaut, bei der mehrere Grundoperationen zu einem Verfahren zusammengeschaltet werden. Die Erreichung höherer TRL sollte in der Industrie, bzw. in enger Kooperation mit der Industrie erfolgen.

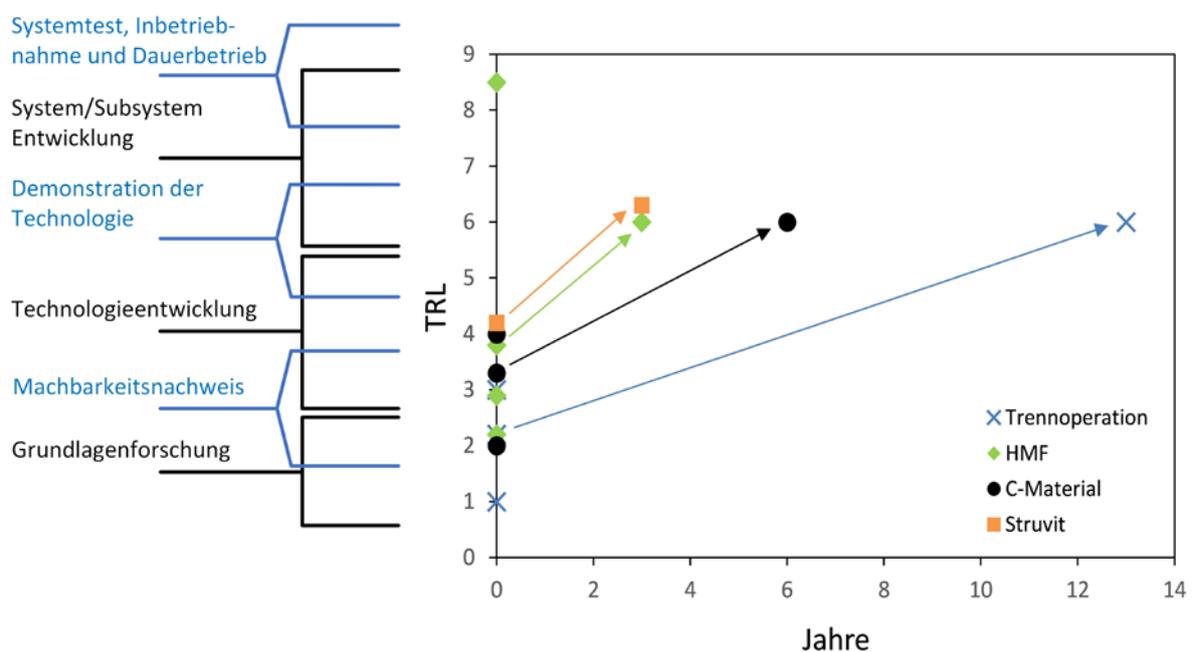


Abbildung 6: Technology Readiness Level (TRL) unterschiedlicher Arbeitsgebiete. Verfahrensentwicklung in den Bereichen Plattformchemikalien („HMF“), Kohlenstoffmaterialien („C-Material“), Phosphat-Rückgewinnung durch Karbonisierung („Struvit“) und Trennoperationen.

4.1 Plattformchemikalien aus Biomasse: „Plastik vom Acker“

Cellulose, Inulin und andere aus C6-Zuckern aufgebaute Kohlehydrate können zu 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) umgewandelt werden (Abbildung 7). HMF gilt als eine der wichtigsten Plattformchemikalien der Bioökonomie. Es kann durch weitere chemische Umwandlungen zur Herstellung von Getränkeflaschen (PEF), Lebensmittelverpackungen, Fasern für Autositze, als Nylon für Strümpfe, Sportbekleidung, Autoteile, etc. genutzt werden. Derzeit laufen Arbeiten mit Chicorée-Wurzeln, Altbackwaren und Miscanthus als Ausgangsmaterialien. Die Nährstoffrückgewinnung erfolgt durch die Kopplung mit einer Biogasanlage. Die Umsetzung von Miscanthus wird zurzeit im Technikumsmaßstab aufgebaut.

Speziell beim Einsatz von Chicorée-Wurzeln zeigt sich ein besonderes Konzept: Der erste Reaktionsschritt findet in der Rübe selbst statt! Beim Treiben zur Salatproduktion werden in den Rüben Enzyme freigesetzt, die langkettiges Inulin spalten. Auf diese Weise kann es besser in Wasser gelöst und zu HMF umgewandelt werden. Die erste verfahrenstechnische Grundoperation findet demnach in der Treiberei statt, nicht in einem Reaktor aus Metall. Aus diesem Grund ist das Verfahren für diese Biomasse relativ einfach und besteht aus einer geringen Anzahl von Modulen (

Abbildung 7 sowie Abbildung 8, Variante A).

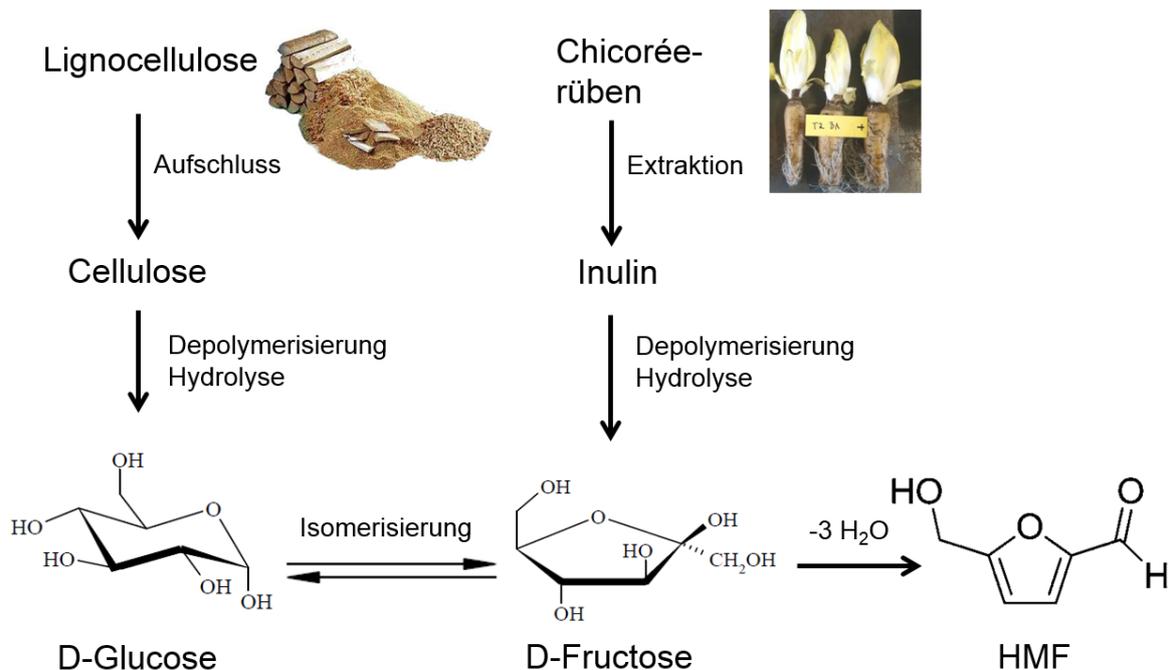


Abbildung 7: Herstellung von HMF aus Lignocellulosen (Holz) und Inulin (Chicorée-Wurzelrüben).

Die Technikumsanlage im Bioraffinerie-Technikum ist, wie eine spätere dezentrale Bioraffinerie, modular aufgebaut.

Im Vergleich zu Chicorée-Rüben besitzt eine Anlage zur Umwandlung von Altbackwaren zu HMF ein zusätzliches Modul, welches für die Isomerisierung von Glucose zu Fructose sorgt (siehe

Abbildung 7, sowie Variante B in Abbildung 8). Die Auslegung der Anlagenteile für Chicorée und Altbackwaren wird derzeit begonnen, bzw. ist in Vorbereitung (Abschnitt A und B, Abbildung 8). Die Anlage zur Umwandlung von Miscanthus zu HMF besteht aus einem Modul zur Aufspaltung von Lignocellulosen, einer Isomerisierung, und den eigentlichen HMF Modulen. Letztere bestehen aus dem Reaktor zur Umwandlung in HMF und einer Einheit zur Abtrennung von HMF aus Wasser (Abschnitt C, Abbildung 8).

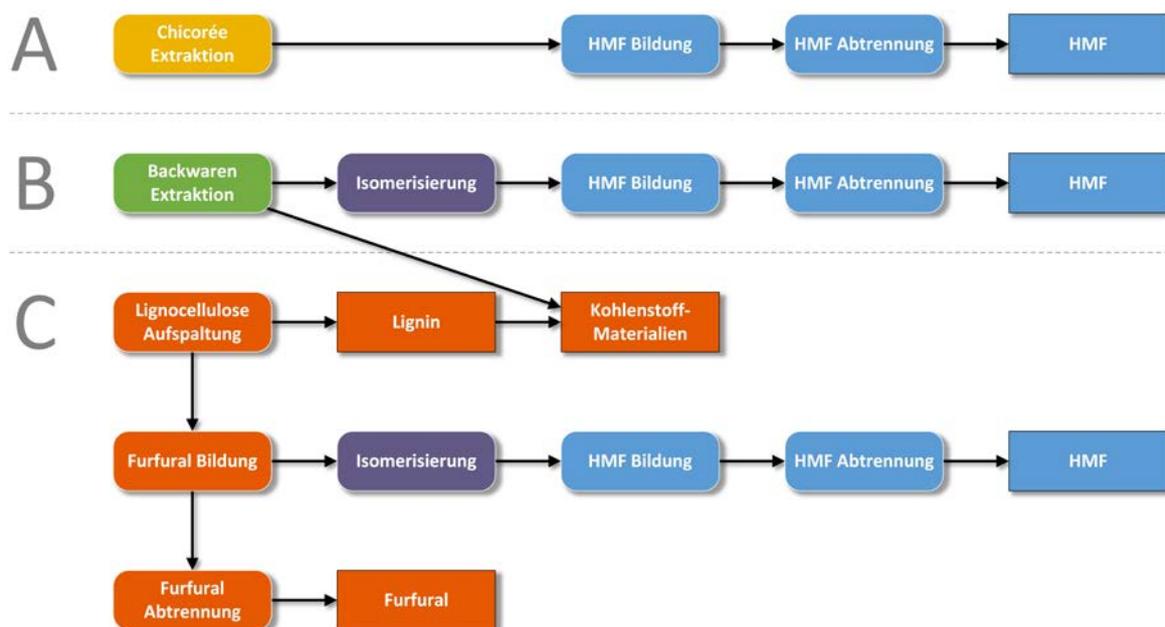


Abbildung 8: Module einer Bioraffinerie zur Herstellung von Plattformchemikalien. A: Gewinnung von HMF aus Chicorée; B: Alte Backwaren zu HMF und als Nebenprodukt Kohlenstoffmaterialien; C: Gras oder Holz zu HMF, Furfural und Kohlenstoffmaterialien.

Die Gewinnung von Furfural und Phenolen, beides Ausgangsmaterialien für Kunstharz, wird im Rahmen des Projekts B4B (Biorefinery for Baden-Württemberg) (Abschnitt C, Abbildung 8 sowie Abbildungen 4 und 9) umgesetzt. Dabei handelt es sich erneut um einzelne Module, die kombiniert werden können. Auf diese Weise wird die Herstellung biogener Spanplatten und Sperrholz ermöglicht. Alternativ können aus dem Lignin Kohlenstoffmaterialien gewonnen werden (siehe Abbildung 8).

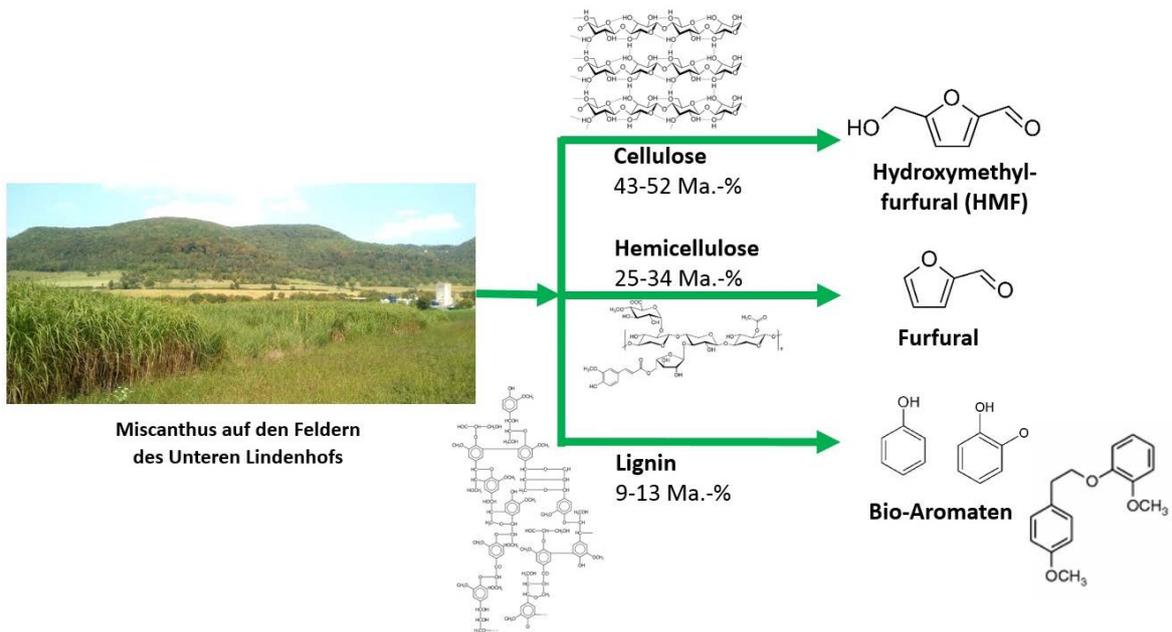


Abbildung 9: Herstellung unterschiedlicher Plattformchemikalien (hier HMF, Furfural und Phenole) aus Lignocellulosen im Rahmen des vom Land Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojektes „B4B“.

Aus Basisarbeiten am KIT entstammt eine Entwicklung mit der Firma AVA-Biochem zur Herstellung von HMF aus Fructose, die jetzt kommerziell umgesetzt ist, und daher mit TRL 9 in Abbildung 6 aufgenommen wurde. Diese Aktivitäten zur Gewinnung von HMF sind vollständig vom KIT nach Hohenheim verschoben worden. Die Existenz der Firma AVA-Biochem, welche sich ausschließlich auf die HMF-Produktion und deren Weiterverarbeitung fokussiert, zeigt die prinzipielle Machbarkeit und das Vorhandensein eines, wenn auch bisher kleinen, Marktes für HMF. Das apparativ aufwändige Extraktions-Verfahren in Abbildung 10 lässt allerdings auch erahnen, dass die Trennoperationen meist die größte Herausforderung in Hinblick auf die Kosten eines Verfahrens sind.



Abbildung 10: Gegenstrom-Extraktion der Firma AVA Biochem zur Gewinnung von HMF aus der wässrigen Produktlösung. (Bild: AVA Biochem)

Zukünftige Aktivitäten

Geplant sind die Erweiterung der Bioraffinerie durch neue Module im Technikum. Mit der Technikumsanlage können Muster, d.h. Mengen von wenigen Kilo, hergestellt werden. Diese können zu den entsprechenden Produkten verarbeitet werden. Auf diese Weise wird die Markteinführung erleichtert, denn Endprodukte wie eine Flasche oder Strümpfe aus Chicorée sind das, was Firmen sehen möchten. In ca. 3-4 Jahren sollte die technische Umsetzung mit einem Industriepartner möglich sein. Optimierungen würden dann noch weitere ca. 3-4 Jahre in Anspruch nehmen.

4.2 Kohlenstoffmaterialien mit Nährstoffrückgewinnung

Unterschiedlichste Biomassen können durch Karbonisierungsprozesse zu Kohlenstoffmaterialien umgewandelt werden (Rodriguez Correa und Kruse 2018; Rodriguez Correa et al. 2018; Abbildung 11). Bei trockenen Biomassen erfolgt dies unter Einsatz der sogenannten langsamen Pyrolyse. Bei nassen Substraten wird die hydrothermale

Karbonisierung bevorzugt. In beiden Fällen werden die erhaltenen Kohlen im Anschluss aktiviert, wobei verschiedene Methoden zur Anwendung kommen können.

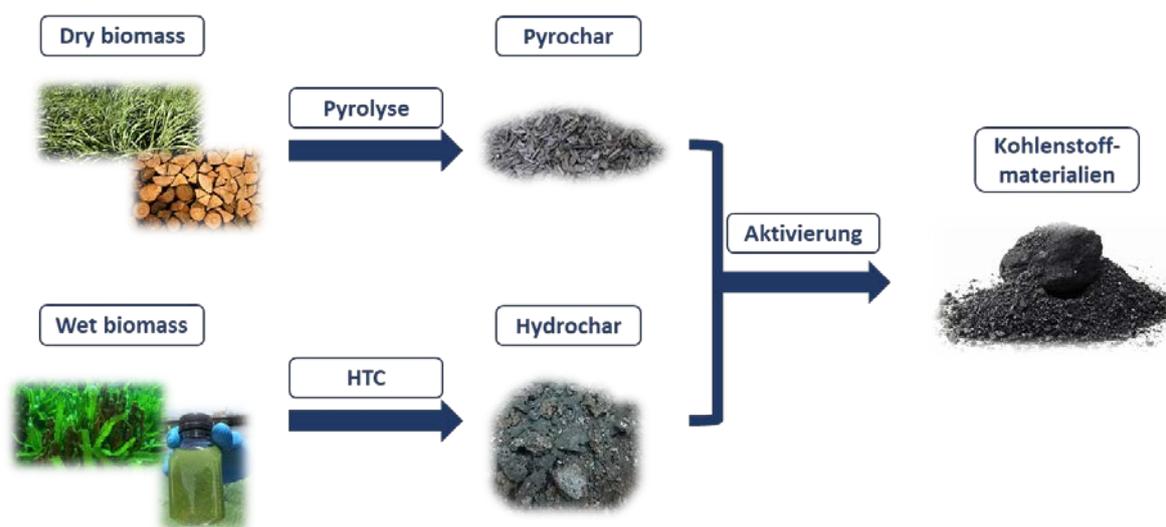


Abbildung 11: Aktivkohle-Herstellung aus trockenen und nassen Biomassen

Die so erzeugten Kohlenstoff-Materialien werden charakterisiert und danach in Hinblick auf ihre Qualität und auf das jeweilige Einsatzgebiet hin untersucht. Mögliche Anwendungen sind Aktivkohlen zur Reinigung von Luft oder Wasser, Speichermedien für Wasserstoff, Elektrodenmaterialien für Batterien und Brennstoffzellen, Superkondensatoren und in Adsorptionskolonnen, z.B. zur Trennung von Methan und CO₂. Auch hier zeigt sich die enge Verbindung zu Biogasanlagen, denn aus Gärresten sind Materialien herstellbar, die ihrerseits Biogas durch Abtrennung von Kohlendioxid aufwerten.

Im Allgemeinen sind die elektrochemischen Anwendungen, Superkondensatoren und Elektroden für Batterien bzw. Brennstoffzellen, von besonderem Interesse. Aufgrund der Nutzung von Biomasse als Ausgangsstoff entstehen hier Materialien, die besser sind, als die auf dem Markt befindlichen. Ursache ist die Integration von Stickstoff aus der Biomasse und die Ausbildung spezieller Strukturen, dem sogenannten „hard carbon“. Superkondensatoren und Natrium-Batterien, die Elektroden aus „hard carbon“ erfordern, sind besonders interessant im Kontext der e-Mobilität (siehe auch Abbildung 2).

Eine ebenfalls zukunftsreiche Anwendung der Kohlenstoffmaterialien ist als Elektrode für mikrobielle Brennstoffzellen (MBZ; Abbildung 12), die zusammen mit der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie, sowie der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Julia Fritz-Steuber

entwickelt werden. Hierbei werden organische Substanzen aus Schmutzwasser mit Hilfe von Bakterien aus der Biogasanlage abgebaut, wobei Strom erzeugt wird. Eine Kopplung von MBZ und Biogasanlagen kann vorteilhaft sein, da sich einige Stoffwechselprozesse bei beiden Verfahren überschneiden.



Abbildung 12: Präsentation des Modells einer mikrobiellen Brennstoffzelle beim Tag der offenen Tür 2018. Im rechten Gefäß ist die Elektrode aus einem karbonisierten Maiskolben zu erkennen.

Im Moment liegt der Schwerpunkt im Bereich der Materialentwicklung in der angewandten Grundlagenforschung, also auf einem relativ geringen TRL. Diese Entwicklungen werden auch noch einige Jahre benötigen.

Eine Ausnahme ist die hydrothermale Karbonisierung mit Abtrennung des Phosphates als Struvit. Es gibt andere Verfahren zu Gewinnung von Struvit, allerdings dann immer aus der flüssigen Phase. Das Hohenheimer Verfahren ist eines der Wenigen, welches aus der festen Phase von Klärschlamm oder Gärresten Phosphat zu ca. 80 % als Struvit gewinnen kann (Abbildung 13). Hierzu gibt es bereits eine größere Laboranlage für die Karbonisierung und eine Auslegung einer Anlage für die Struvit-Abtrennung. Derzeit gibt

es verstärkte Anstrengungen, um Drittmittel für den Bau einer Technikumsanlage im Bioraffinerie-Technikum einzuwerben. Dies ist auch notwendig, um die benötigten Mengen an Struvit-Dünger für Feldversuche bereitstellen zu können, wie sie in einem großen Graduiertenprogramm mit der China Agricultural University geplant sind.

Im Falle vom Einsatzmaterial Klärschlamm wäre eine Scale-up auf die technische Umsetzung, zusammen mit dem Industrie-Partner HTCycle, schon heute möglich. Hier könnte die so gewonnene Aktivkohle auch zur Reinigung des Abwassers genutzt werden (Benstoem et al. 2018).

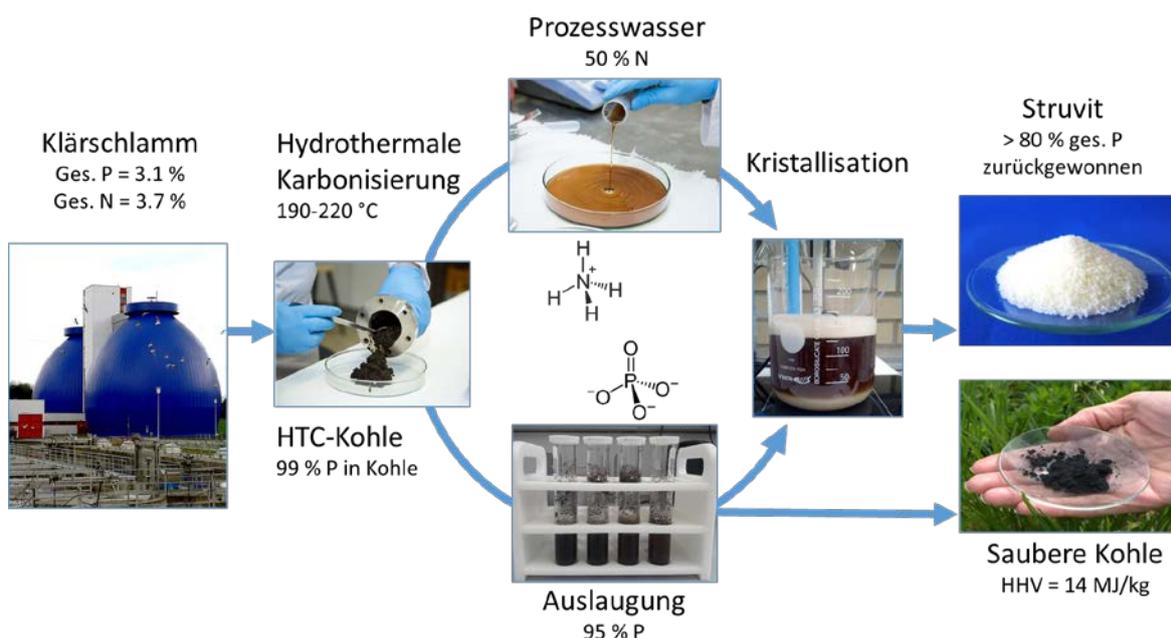


Abbildung 13: Nährstoff-Bilanz bei der Phosphat-Rückgewinnung aus Klärschlamm nach dem Hohenheimer Verfahren (Becker et al. 2019).

Zukünftige Aktivitäten

Geplant ist die verfahrenstechnische Weiterentwicklung, sodass auch die Herstellung von Kohlenstoffmaterialien im Technikum demonstriert werden kann. Zukünftig lassen sich hier weitere Synergien nutzen, da bei der bereits in der Entwicklung befindlichen Herstellung von Plattformchemikalien häufig ein Lignin-reicher Reststoff anfällt, welcher ein sehr interessantes Ausgangsmaterial für Kohlenstoffmaterialien darstellt.

Außerdem wird die Entwicklung in Richtung Anwendung verstärkt weitergeführt, z.B. in Hinblick auf Batterieelektroden. Neue Einsatzmöglichkeiten, wie als Trägermaterial für Dünger, Direkt-Kohlenstoff-Brennstoffzellen, als Ersatz für Industrieruß und als Ausgangsstoff für Grundchemikalien sollen zukünftig erschlossen werden.



Im Rahmen der Gründungsaktivitäten eines Laubholztechnikums für Baden-Württemberg haben die Arbeiten für die Herstellung von biogenen Elektroden unter der Bezeichnung „Holzbatterie“ große Beachtung gefunden. Das Laubholztechnikum würde die Möglichkeit eröffnen gleich mehrere Kohlenstoffmaterialien bis zur industriellen Umsetzung weiter zu entwickeln.

4.3 Neue Trennverfahren

Eine dezentrale Bioraffinerie benötigt Trennoperationen, die im kleinen Maßstab wirtschaftlich sind und ohne giftige Chemikalien auskommen, welche das Produkt verunreinigen können und zu großem technischen Aufwand hinsichtlich der Anlagensicherheit führen. Derzeitige Aktivitäten sind die Abtrennung von Proteinen und Fetten aus Algen. Hierbei kommen im ersten Fall Wasser (unter- und überkritisch) und im zweiten Fall Dimethylether zum Einsatz. Beide hinterlassen keine schädlichen Rückstände im Abwasser oder im Produkt.

Weiterhin werden Verfahren entwickelt, um Plattformchemikalien wie HMF und Furfural aus wässrigen Lösungen abzutrennen (siehe Abbildung 8). Hierbei besteht die Herausforderung darin, die Wertprodukte mit vertretbarem technischem Aufwand aus komplexen Biomasse-basierten Stoffgemischen abzutrennen.

Zukünftige Aktivitäten

Abtrennverfahren von Wertstoffen werden zukünftig stärker ausgebaut, insbesondere in Hinblick auf die Kombination mit den genannten Bioraffineriekonzepten. So wäre z.B. eine Proteinabtrennung aus Weidelgras sinnvoll, bevor daraus HMF und andere Plattformchemikalien gewonnen werden (ein entsprechender Projektantrag ist gestellt). Als neuer Ansatz wurde mit der Entwicklung von innovativen Trennverfahren begonnen, die

- auch im kleinem Maßstab rentabel und
- auf einer landwirtschaftlichen Bioraffinerie einsetzbar sind, oder
- eine kostengünstige Abtrennung von biochemisch oder mikrobiologisch hergestellten Plattformchemikalien ermöglichen.

Konkret ist die Abtrennung von Milchsäure durch Reaktivextraktion eines der anvisierten Themen, die in Zukunft bearbeitet werden sollen.

5. Die Menschen im Fachgebiet

Derzeit (März 2019) besteht das Fachgebiet „Konversionstechnologien nachwachsender Rohstoffe“ aus 20 Doktorandinnen und Doktoranden, einer Postdoc-Wissenschaftlerin, zwei leitenden Ingenieuren, einem Techniker und einer Sekretärin. Geleitet wird die Gruppe von Frau Prof. Dr. Andrea Kruse (Abbildung 14).

Die Ausbildung der jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ist breit gefächert: Sechs haben ein Studium im Bereich Chemical Engineering, vier in „Nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie“, zwei in Chemie (organische und physikalische Chemie), zwei in Agrartechnik und zwei in Umwelttechnik absolviert. Die anderen stammen aus unterschiedlichen Bereichen der Agrarwissenschaften sowie Mikrobiologie, Risk Management und Materialwissenschaft.

Die beiden leitenden Ingenieure sind für die Technika auf dem Campus Hohenheim und dem Bioraffinerie-Technikum verantwortlich. Die promovierte Wissenschaftlerin arbeitet im Bereich Kohlenstoffmaterialien.

Im Jahr 2018 sind 18 Publikationen (peer-reviewed, Scopus) erschienen. Die Summe der im selben Jahr erhaltenen, *neuen* Zuwendungsbescheide für Drittmittel belief sich auf ca. 1,5 Mio. € (Anteil des Fachgebietes).



Abbildung 14: Mitarbeiter des Fachgebiets 440F (Oktober 2018, zwei Mitarbeiter fehlen).

6. Lehre

Die Vision der dezentralen landwirtschaftlichen Bioraffinerie spiegelt sich auch in der Lehre wider. In den Studiengängen „Nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie“ (Bachelor und Master) wird den Studierenden Grundwissen im Bereich Ökonomie, Landwirtschaft und Verfahrenstechnik vermittelt. Diejenigen, die sich im Schwerpunkt „Technik“ spezialisieren, haben de facto eine ingenieurwissenschaftliche Ausbildung. Heute finden diese Studierenden meist schnell eine Stelle in der Industrie, bei der sie mit anderen Ingenieuren zusammenarbeiten und Nachhaltigkeitsprojekte betreuen.

Für die Zukunft ergeben sich neue Möglichkeiten für die Absolventinnen und Absolventen: Im Masterstudiengang „Nachwachsende Rohstoffe und Bioenergie“ lernen die Studierenden schon heute die Grundoperationen einer Bioraffinerie und simulieren solche Bioraffinerien. Dabei werden auch Massen- und Energieflüsse ermittelt. Als Werkzeug dient u.A. das in der chemischen Industrie übliche Computerprogramm „AspenPlus“. Zusammen mit der verfahrenstechnischen Ausbildung sind die Absolventinnen/en in der Lage eine dezentrale Bioraffinerie zu planen und zu betreiben. Zur Veranschaulichung wird das Bioraffinerie-Technikum in die Lehre einbezogen.

7. Ausstattung

Das Fachgebiet nutzt auf dem Universitätscampus ein Labor und eine Versuchshalle im Institut für Agrartechnik. Weiterhin wird das Bioraffinerie-Technikum auf der Versuchsstation „Unterer Lindenhof“ bei Eningen betrieben. Die Verfahrensentwicklung startet im Labor, darauf aufbauend werden kleinere Versuchsstände in der Versuchshalle aufgebaut. Der Technikums-Maßstab wird im Bioraffinerie-Technikum realisiert.

Zur Charakterisierung von festen, flüssigen und gasförmigen Proben arbeitet das Fachgebiet eng mit der Core Facility Hohenheim und dem Institut für Katalysatorforschung und -technologie am KIT zusammen. Außerdem stehen vor Ort u.A. die nachfolgenden Analysengeräte zur Verfügung.

Strukturanalyse von Feststoffen:

Oberflächenbestimmung (BET), Thermogravimetrie (TGA), Thermogravimetrie gekoppelt mit Chromatographie (TGA-GC-MS)

Spektroskopie:

Atomspektrometrie (ICP-OES), Infrarotspektroskopie (FTIR), UV-Vis-Spektroskopie

Chromatographie:

Elementaranalysator (CHNOS), Flüssigchromatographie (HPLC), Gaschromatographie (GC), Ionenchromatographie (IC)

8. Kooperationen

Das Fachgebiet arbeitet entlang der Wertschöpfungskette „Vom Feld zum Produkt“ interdisziplinär mit verschiedenen Partnern aus Akademia und Wirtschaft zusammen, von denen einige nachfolgend exemplarisch aufgelistet sind.

- Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie (740): Fermentation von Prozesswässern, Vorbehandlungen für Biogas-Prozesse, Mikrobielle Brennstoffzelle
- Institut für Kulturpflanzenwissenschaften (340): Miscanthus für die Lignocellulose-Bioraffinerie, LCA von biobasierten Prozessketten
- Karlsruher Institut für Technologie: Lignocellulose-Bioraffinerie, Techno-ökonomische Prozesskettenbewertung, Oxidation von HMF
- AVA-biochem: HMF-Herstellung
- HTCycle: Hydrothermale Karbonisierung
- Carbonauten: trockene Verkohlung und Herstellung von Kompositmaterialien

9. Geldgeber



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT,
FORSCHUNG UND KUNST



DFG Deutsche
Forschungsgemeinschaft



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



DBU



Horizon 2020
European Union Funding
for Research & Innovation



BIO-BASED
INDUSTRIES
Public-Private Partnership



Bio-based Industries
Consortium



VolkswagenStiftung

10. Ausgewählte Literaturstellen

Becker, G., Wüst, D., Köhler, H., Lautenbach, A. & Kruse, A. 2019. Novel approach of phosphate-reclamation as struvite from sewage sludge by utilising hydrothermal carbonization. *Journal of Environmental Management*, **238**, 119-125

Benstoem, F., Becker, G., Firk, J., Kaless, M., Wuest, D., Pinnekamp, J., & Kruse, A. 2018. Elimination of micropollutants by activated carbon produced from fibers taken from wastewater screenings using hydrothermal carbonization. *Journal of Environmental Management*, **211**, 278-286

Rodriguez Correa, C. & Kruse, A. 2018. Biobased functional carbon materials: Production, characterization, and applications-A Review. *Materials*, **11**, (9)

Jung, D., Zimmermann, M., & Kruse, A. 2018. Hydrothermal Carbonization of Fructose: Growth Mechanism and Kinetic Model. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering* **6**, (11) 13877-13887

Rodríguez Correa, C., Ngamyang, C., Klank, D., & Kruse, A. 2018. Investigation of the textural and adsorption properties of activated carbon from HTC and pyrolysis carbonizates. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **8**, (2) 317-328

Schwiderski, M. & Kruse, A. 2016. Process design and economics of an aluminium chloride catalysed organosolv process. *Biomass Conversion and Biorefinery*, **6**, (3) 335-345

Steinbach, D., Kruse, A., Sauer, J., & Vetter, P. 2018. Sucrose is a promising feedstock for the synthesis of the platform chemical hydroxymethylfurfural. *Energies*, **11**, (3)

Eine vollständige Publikationsliste ist unter der Orchid und Scopus-Identifikationsnummer von **Andrea Kruse** verfügbar.

Scopus Author ID: 16316292300

ORCHID: <https://orcid.org/0000-0002-8156-139X>



UNIVERSITÄT HOHENHEIM

Institut für Agrartechnik

Fg. Konversionstechnologien nachwachsender Rohstoffe (440f)

Garbenstrasse 9

70599 Stuttgart

T: +49 711 459 247-01

F: +49 711 459 247-02

M: bioraffinerie@uni-hohenheim.de