



NEUE WEGE ZUR HOLZBASIIERTEN BIORAFFINERIE

Nationales Forschungsprogramm NFP 66 **Ressource Holz**

Michael Studer und Pieter Poldervaart



SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS
ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG



Ressource Holz
Nationales Forschungsprogramm NFP 66

Die Ergebnisse und Empfehlungen des NFP 66 werden in vier Berichten zu den einzelnen Teilsynthesen veröffentlicht.

Die Leitungsgruppe des NFP 66 unterteilte das Forschungsgebiet in vier thematische Dialogfelder. Diese decken die wesentlichen Bereiche der Wald-Holz-Wertschöpfungskette ab und umfassen je 4 bis 11 der insgesamt 30 Forschungsprojekte des NFP 66. Im Rahmen des NFP 66 tauschten sich gegen 200 Vertreterinnen und Vertreter aus Wirtschaft, Verbänden und Behörden an 17 Dialogveranstaltungen mit den Forschenden aus.

Die vier Teilsynthesen berichten über die Forschungsprojekte und ihre wichtigsten Ergebnisse sowie über den Dialog mit der Praxis.

- Synthese zum Dialogfeld «Weiterentwicklungen im Holzbau»
- Synthese zum Dialogfeld «Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie»
- Synthese zum Dialogfeld «Innovative holzbasierte Materialien»
- Synthese zum Dialogfeld «Holzbeschaffung und nachhaltige Holznutzung»

Das Programmresümee baut auf den vier Teilsynthesen auf und fasst die wichtigsten Ergebnisse und Empfehlungen des NFP 66 in einer leicht lesbaren Form zusammen.

INHALT

- 5 Editorial
- 6 Einleitung
- 7 Das Konzept der Bioraffinerie
- 10 Holz als Rohstoff einer Bioraffinerie
- 12 Plattformen der Holz-Bioraffinerie
- 37 Bioökonomie im internationalen Umfeld
- 41 Situation in der Schweiz
- 46 Empfehlungen
- 48 Literatur
- 52 Das NFP 66 in Kürze

EDITORIAL



Was hat den globalen Siegeszug des Erdöls in den letzten 150 Jahren möglich gemacht? Es ist die hocheffiziente Verwertung des Rohöls in Raffinerieanlagen. Diese bringen aus dem Stoffgemisch unter Einsatz von Spitzentechnologien eine Vielzahl lukrativer Produkte für breiteste Anwendungen hervor.

Was das schwarze Gold schaffte, müsste auch Vorbild für die erneuerbare Ressource Holz sein. Als grösste Biomassequelle wird Holz heute zu wenig ressourceneffizient genutzt. Denn: Was nicht verbaut wird, landet als Energieholz oft direkt in der Verbrennung. Tendenz steigend. So klafft zwischen dem Holzbau und der Verfeuerung eine grosse Technologie- und Verwertungslücke.

Welches Ressourcenpotenzial in den Holzbestandteilen (Hemi-)Cellulose, Lignin und in den Extraktstoffen schlummert, zeigt unser NFP 66. Die komplementären Forschungsfelder «Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie» und «Innovative holzbasierte Materialien» machen deutlich: Holz hat als Rohstoff das Zeug, ölbasierte Produkte schrittweise abzulösen. Sei es in Form wertvoller grüner Chemikalien, sei es etwa als speicherbare Biotreibstoffe. Erfreulich dabei: Gerade für das unternutzte Laubholz tun Bioraffinerien neue Verwertungschancen auf.

Ob neue Aufschluss- und Umwandlungsverfahren, ob innovative Ansätze zur Gewinnung von Lignin und Chemikalien, ob neuartige Gasreinigungs- und Feuerungstechnologien – diese und andere Puzzleteile haben elf Forschungsprojekte unter dem Motto der Bioraffinerie zusammengetragen. Die neuen Erkenntnisse bringen uns weiter, geeignete Plattformen und Prozessketten für Bioraffinerien zu modellieren und Holz industriell umzuwandeln.

Für eine grosse holzbasierte Bioraffinerie mit diversen Plattformen und Endprodukten ist und bleibt der Standort Schweiz wohl ungeeignet. Intakt sind jedoch die Chancen, mit kleineren, regionalwirtschaftlich gut vernetzten «Boutique-Raffinerien» hochpreisige Spezialprodukte herzustellen – und dabei möglichst regionales Holz zu verwerten. Was braucht die Schweiz noch? Zum Beispiel eine Pilotanlage, wo sich neue Forschungsergebnisse auf industrielle Grössen hochskalieren lassen. Und ein Kompetenzzentrum Bioraffinerie, um das verstreute Know-how von Forschung und Wirtschaft wirkungsvoll zu bündeln.

Die Schweiz tut also gut daran, am Thema Bioraffinerie dranzubleiben. Nicht nur aus Gründen der nachhaltigen Holznutzung hierzulande. Sondern auch um als Exportland anderswo wettbewerbsfähige Technologien anbieten zu können. Den Bioraffineriezug unbeteiligt fahren zu lassen, wäre wenig «raffiniert».

All jenen, die an den Forschungsarbeiten, den Dialogveranstaltungen und an diesem Synthesebericht mitgewirkt haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Dr. Martin Riediker

Präsident Leitungsgruppe NFP 66 Ressource Holz

EINLEITUNG

Die Verknappung der fossilen Ressourcen und die notwendige Reduktion des Ausstosses von Treibhausgasen haben nachwachsende Rohstoffe wie das Holz in den Fokus von Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gerückt. Der Ausstieg aus der Atomenergie und die Energiestrategie 2050 des Bundes haben die Bedeutung erneuerbarer Energie- und Rohstoffquellen für die Schweiz weiter verstärkt. Biomasse ist im Gegensatz zu Erdöl zwar erneuerbar, aber ebenfalls eine Ressource mit begrenzter Verfügbarkeit. Die Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke steht dabei zunehmend in Konkurrenz mit anderen Anwendungen für Industrieerzeugnisse, Nahrungs- und Futtermittel sowie die Nutzung von Flächen für Erholung, Tourismus und Naturschutz. Es ist ein Gebot der Stunde, Biomasse einer hocheffizienten und gut durchdachten Nutzung zuzuführen, die auch dem Prinzip der Nachhaltigkeit (siehe «Nachhaltigkeitsanalyse muss Vorteile aufzeigen») Rechnung trägt.

Nachhaltigkeitsanalyse muss Vorteile aufzeigen

Eine zentrale Voraussetzung, damit Bioraffinerien politisch und gesellschaftlich akzeptiert werden, ist der Nachweis ihrer **Nachhaltigkeit**. Dafür muss eine Bioraffinerie für die gesamte Wertschöpfungskette und über den gesamten Lebenszyklus hinweg auf wirtschaftliche, ökologische und soziale Aspekte hin analysiert werden. Teil dieser Analyse sind Faktoren wie Wettbewerb um die Biomasse, Wasserbedarf, Landnutzung und Raumplanung, Kohlenstoffbilanz, Einfluss auf den Klimawandel, Folgen für die Biodiversität, Energieeffizienz, Kundenbedürfnisse und Finanzierbarkeit. Eine solche Nachhaltigkeitsanalyse muss klare Vorteile einer Bioraffinerie gegenüber Systemen aufzeigen, die dieselben Produkte und Dienstleistungen basierend auf fossilen Rohstoffen bieten. (Siehe auch NFP 66, Dialogfeld 4: «Holzbeschaffung und nachhaltige Holznutzung»)

Vielversprechend in dieser Hinsicht ist die Verarbeitung von Biomasse in einer Bioraffinerie (Jong und Jungmeier, 2015). Gemäss Definition der Internationalen Energieagentur (IEA) umfasst eine Bioraffinerie «die nachhaltige Verarbeitung von Biomasse in eine Palette von biobasierten Produkten (Nahrungsmittel, Tierfutter, Chemikali-

en und Stoffe) sowie Bioenergie (Biotreibstoffe, Strom und/oder Wärme)» (Jungmeier et al., 2015). Eine Bioraffinerie kann verschiedene Formen von Biomasse verwerten. Dazu gehören Ausgangsmaterialien aus der Landwirtschaft (Stroh), der Forstwirtschaft (Holz) oder aus Aquakulturen (Algen). Ebenso können organische Abfälle aus Industrie, Landwirtschaft oder Haushalten genutzt werden.

Das Nationale Forschungsprogramm «Ressource Holz» (NFP 66) und damit auch die hier vorliegende Teilsynthese beschränken sich auf die Biomasse Holz. Im Folgenden stellen wir zunächst das Konzept der Bioraffinerie vor und geben einen Überblick über die Charakteristiken des Rohstoffs Holz in diesem Kontext. Anschliessend erläutern wir die wichtigsten Prozesse der auf verschiedenen Plattformen – zentralen Zwischenprodukten – beruhenden Bioraffinerien und zeigen auf, was die verschiedenen Projekte im Rahmen des Dialogfelds 2 des NFP 66 zu deren Weiterentwicklung beitragen können. Kapitel «Bioökonomie im internationalen Umfeld» (Seite 37) und Kapitel «Situation in der Schweiz» (Seite 41) fassen den aktuellen Stand der industriellen Umsetzung und die heutigen Rahmenbedingungen inklusive der angebotenen Forschungsförderung im Ausland und in der Schweiz zusammen. Schliesslich geben wir Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Bioraffinerie in der Schweiz ab.

DAS KONZEPT DER BIORAFFINERIE

Eine Bioraffinerie stellt aus nachwachsenden Rohstoffen Produkte und Energie her. Angesichts der Vielfalt an möglichen Rohstoffen, Produkten und Energien kann auch eine Bioraffinerie sehr unterschiedlich ausgestaltet sein. Die Klassifizierung dieser Anlagen erfolgt aufgrund ihrer Zwischenprodukte, der sogenannten Plattform.

Eine Bioraffinerie (siehe Definition in der Einleitung) stellt kein komplett neues, erst in den letzten Jahren entworfenes Konzept dar. Vielmehr können auch Werke der Stärke-, Papier- und Zellstoffindustrie, die teils schon seit Jahrzehnten in Betrieb sind, als Bioraffinerien aufgefasst werden. So wurde etwa in der Schweiz bereits im 19. und 20. Jahrhundert aus Holz nicht nur Zellstoff, sondern auch Zucker hergestellt. In Ems wurden bis 1960 nach dem Scholler-Verfahren jährlich 35000 Tonnen Glucose aus Holz hergestellt (Kamm et al., 2000). Die 1881 im Kanton Solothurn gegründete Cellulosefabrik Attisholz AG (Sieber, 1956) verarbeitete 2008 400000 Tonnen Holz pro Jahr, was rund 15% der in der Schweiz total geernteten Holzmenge beziehungsweise rund einem Drittel der jährlich anfallenden Waldindustrieholzmenge entsprach (Holzindustrie Schweiz, 2008). 2008 allerdings wurde das Werk von der damaligen Besitzerin, der norwegischen Borregaard AG, geschlossen. «Die wirtschaftliche Lage des Unternehmens habe sich in den vergangenen Monaten stark verschlechtert. Gründe dafür seien markant gestiegene Rohstoff- und Energiepreise sowie ein starker Preis- und Absatzeinbruch in den Hauptmärkten Asiens», wurde die Firmenleitung zitiert (Holderegger, 2009). Interessant ist, dass die Attisholz AG zwar als Hauptprodukt Zellstoff produzierte, aber auch die Sulfitablauge zur Produktion von Ethanol, Hefe und Lignosulfonaten nutzte sowie Wasserstoff produzierte.

Klassifizierung von Bioraffinerien

Unter dem Begriff Bioraffinerie wird eine Vielzahl von Konzepten zur Umwandlung verschiede-

ner Arten von Biomasse in eine breite Palette von Produkten zusammengefasst. Analog zu einer herkömmlichen, auf Erdöl basierenden Raffinerie wird in einer Bioraffinerie der Rohstoff zunächst in einem oder mehreren Verfahrensschritten in verschiedene Zwischenprodukte aufgetrennt (Primärraffination). Anschliessend werden die als «Plattformen» bezeichneten Zwischenprodukte (Intermediate) in der Sekundärraffination zu einer grösseren Anzahl weiterer Produkte umgewandelt. Teilweise fallen bei dieser Verfahrenskette Koppelprodukte an, die wiederum unterschiedlich genutzt werden können.

Bis vor Kurzem bestand kein einheitliches System zur Benennung der unterschiedlichen Bioraffineriekonzepte. Im Rahmen des IEA Bioenergy Task 42 wurden erstmals Grundlagen für ein einheitliches Klassifizierungssystem für Bioraffinerien entwickelt (Cherubini et al., 2009). Dieses polyhierarchische Klassifizierungssystem stellt die Plattform einer Bioraffinerie in den Mittelpunkt. Der Plattform werden anschliessend die Produkte, der Rohstoff und die beteiligten Prozesse zugeordnet. Der Name der jeweiligen Bioraffinerie wird dann nach dem Prinzip «Anzahl Plattformen (Namen der Plattformen) – Endprodukte – Rohstoff» angegeben. Eine Bioraffinerie, in der Holz via Synthesegas zu Methan umgewandelt wird, wird demnach als «eine Plattform (Synthesegas) Bioraffinerie für Methan aus Holz» bezeichnet.

Die wichtigsten Plattformen einer Holz-Bioraffinerie sind **Lignocellulose** (Cellulose, Hemizellulose, Lignin), **Synthesegas**, **Pyrolyseöl**, **Zellstoff** sowie **Wärme und Strom**. Mit Ausnahme der Zell-

stoff-Plattform – sie ist im Rahmen des NFP 66 dem Dialogfeld 3: «Innovative holzbasierte Materialien für neue Anwendungen» zugeteilt – sind sie im Kapitel zu den Plattformen der Holz-Bioraffinerie (ab Seite 12) dieses Berichts im Detail beschrieben.

Die möglichen Produkte einer Bioraffinerie sind sehr vielfältig. Das Spektrum reicht von Nahrungs- und Futtermitteln über Chemikalien, Materialien und Energieträger bis zu Energie in Form von Wärme und Strom (Abb. 1).

Die den Plattformen vor- und nachgeschalteten Umwandlungsprozesse lassen sich in vier Kategorien einteilen.

Mechanische/physikalische Verfahren

Mit diesen Verfahren werden die Stoffeigenschaften des Rohstoffs verändert, etwa die Partikelgröße, der Wassergehalt oder die Dichte. Die chemische Struktur des Holzes hingegen ändert sich nicht. Beispiele für solche Prozesse sind Zerkleinern, Trocknen oder Pressen.

Biochemische Verfahren

Darunter werden Verfahren verstanden, welche die stofflichen Eigenschaften des Holzes unter Verwendung von Mikroorganismen oder Enzymen verändern. Diese Prozesse laufen unter milden Bedingungen praktisch bei Umgebungstemperatur in einem wässrigen Medium ab.

Chemische und katalytische Verfahren

Bei dieser Art von Stoffumwandlung kommen chemische Prozesse wie zum Beispiel Oxidation, Hydrierung, Hydrolyse oder Polymerisation zum Einsatz, wobei die Umwandlung bei moderaten Temperaturen stattfindet.

Thermochemische Verfahren

Bei diesen Prozessen werden die Ausgangsstoffe bei hohen Temperaturen (d.h. bei mehreren Hundert °C) aufgeschlossen. Die Prozesse können atmosphärisch oder bei erhöhtem Druck sowie mit oder ohne Katalysator betrieben werden. Beispiele sind die Vergasung, die Pyrolyse oder die Verbrennung.

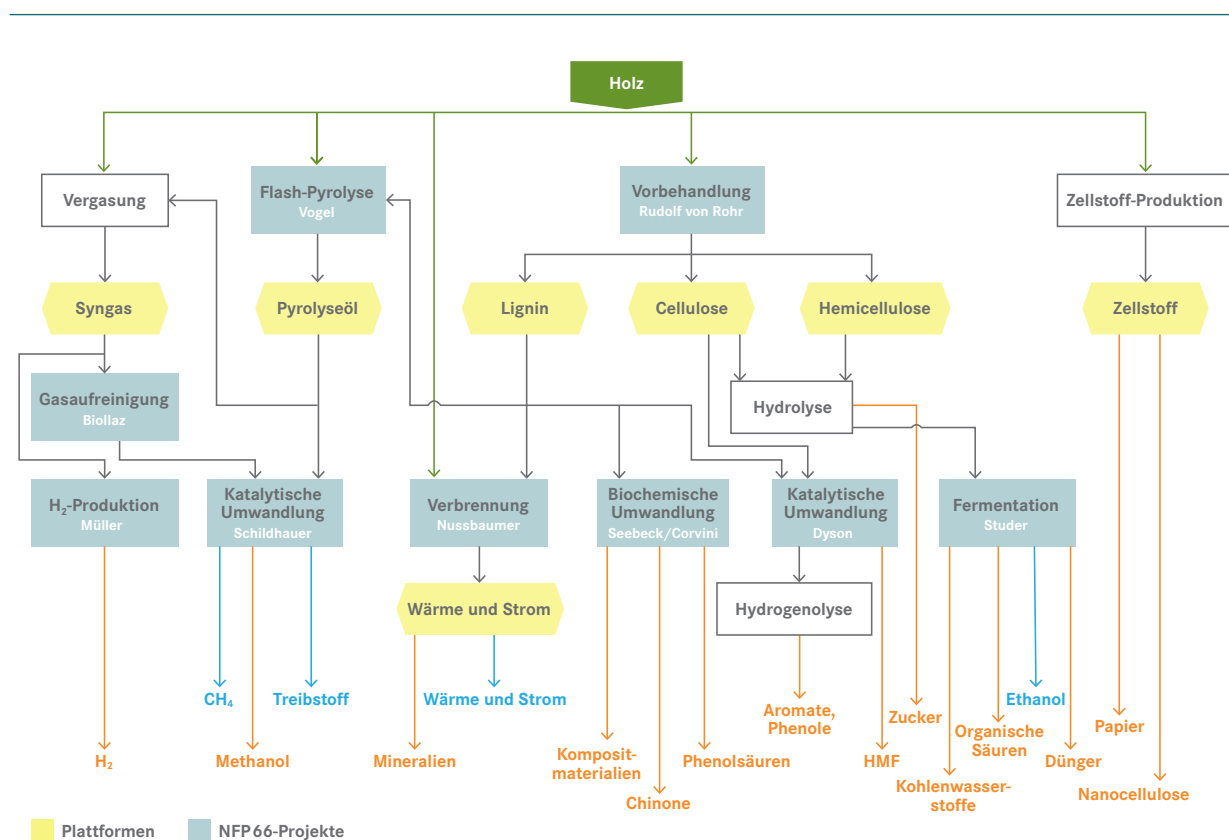


Abb. 1 Übersicht über Plattformen, Prozesse und Produkte einer holzbasierten Bioraffinerie (Cherubini et al., 2009; angepasst). Es sind hauptsächlich die Prozesse eingezeichnet, die im Rahmen des NFP 66 erforscht wurden. Die Namen der Projektleiter sind in grüner Schrift angegeben.

Konzipierung von Bioraffinerien

Wie im vorausgehenden Abschnitt illustriert, gibt es eine grosse Anzahl möglicher Konfigurationen für eine Bioraffinerie. Es stellt sich daher die Frage, nach welchen Prinzipien Bioraffinerien konzipiert werden sollten. Grundsätzlich kann zunächst zwischen energetisch und stofflich ausgerichteten Bioraffinerien unterschieden werden. In einer energetisch ausgerichteten Bioraffinerie wird Holz primär zur Herstellung von Energieträgern, die einfacher lager- und speicherbar sind, genutzt. Nur sekundär werden Nebenprodukte aufgewertet und zum Beispiel als Futtermittel verkauft. Neben den Energieformen Wärme und Strom sind heute Bioethanol, Biodiesel, synthetische Biotreibstoffe und Methan die vielversprechendsten Energieträger aus Bioraffinerien. In stofflich ausgerichteten Bioraffinerien hingegen werden nur die Prozessrückstände zu Treibstoff, Strom oder Wärme verarbeitet. In erster Linie haben diese Bioraffinerien zum Ziel, hochwertige Produkte zu erzeugen: Nahrungsmittel und Nahrungsmittelzusatzstoffe, Futtermittel, Düngemittel, Chemikalien und Biomaterialien wie Zellstoff oder Biokunststoffe. Mittelfristig sollten die Betreiber von stofflich ausgerichteten Bioraffinerien die notwendige Prozessenergie aus Abwärme oder Abfallströmen der Bioraffinerie selber bereitstellen. Beispiele dafür sind heute Zellstofffabriken oder Ethanolwerke, die Schwarzlauge beziehungsweise Lignin verbrennen und Energie in Form von Strom und Wärme für die eigenen Prozesse nutzen und teilweise auch an Dritte verkaufen.

Unabhängig von der Produktausrichtung können zwei Umsetzungskonzepte von Bioraffinerien unterschieden werden: Wird eine bestehende «Biomasseverarbeitungsanlage» zwecks Erweiterung des Produktspektrums zu einer Raffinerie weiterentwickelt, handelt es sich um einen **Bottom-up**-Ansatz. Beispielsweise werden in den skandinavischen Ländern bestehende Zellstofffabriken so differenziert, dass Abfallstoffe oder Stoffe, die bisher nur zur Energiegewinnung verwendet wurden, neu auch stofflich verwertet werden und auf diese Weise eine zusätzliche Wertschöpfung erbringen. Treiber für diese Entwicklung sind ökologische und ökonomische Faktoren, insbesondere wenn die Politik Massnahmen zum Klimaschutz finanziell honoriert (Hermann, 2016).

Wird hingegen eine Anlage, die verschiedene Biomassefraktionen nutzt und weitgehend abfallfrei in eine Vielzahl von Produkten und Energieformen umwandeln kann, komplett neu entworfen, wird

dies als **Top-down**-Ansatz bezeichnet (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2012). Typischerweise gliedert sich dieser Ansatz in verschiedene Phasen, welche die Komplexität der geplanten Anlage widerspiegeln (Kamm et al., 2000). Die Industrie strebt zunächst im Rahmen einer Bioraffinerie nur die Herstellung eines oder sehr weniger der bisher erdölbasierten Produkte an. Falls dabei Nebenprodukte anfallen, werden diese möglichst kostenneutral verwertet, also meist verbrannt. Üblicherweise beschränkt man sich auf nur einen Biorohstoff als Ausgangsmaterial. Eine solche sogenannte Phase-I-Bioraffinerie ist in Bezug auf den Produktoutput relativ gut planbar. Allerdings sind die Prozesse wenig flexibel: Kommt es beispielsweise beim Rohstoff zu einer Verknappung oder massiven Verteuerung, kann man in der Regel nicht kurzfristig auf einen anderen Rohstoff wechseln. Genauso unflexibel ist das System, wenn es darum geht, kurzfristig mit derselben Prozesslinie ein anderes Produkt herzustellen. Ein bekanntes Beispiel ist die Trockenmahlung von Getreide zur Ethanolherstellung.

In Anlagen der Phase II entsteht, basierend auf einem Rohstoff, eine breitere Palette von Zielprodukten, die abhängig von der aktuellen Nachfrage respektive vom aktuellen Marktpreis variiert werden kann. Firmen wie Iogen (Cellulose Ethanol) oder Natureworks LLC (Polymilchsäure basierend auf Zuckern) betreiben entsprechende Bioraffinerien der Phase II.

Bioraffinerien der Phase III werden bisher nur von Forschungsinitiativen konzipiert und befinden sich noch im frühen Entwicklungsstadium. Eine solche Bioraffinerie ist hoch integriert in Bezug auf Stoffströme und Wärme und kombiniert verschiedene biochemische, katalytische und thermochemische Umwandlungsverfahren zur Bereitstellung diverser Produkte unter optimaler Ausnutzung des Rohstoffs und Vermeidung von Abfallströmen.

HOLZ ALS ROHSTOFF EINER BIORAFFINERIE

Holz ist der einzige nachwachsende Rohstoff der Schweiz, der in relevanten Mengen für eine Bioraffinerie zur Verfügung steht. Holz besteht hauptsächlich aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Die Bereitstellung und Raffination von Holz ist mit erheblichen Herausforderungen verbunden.

Der Rohstoff Holz kann einen wichtigen Beitrag leisten, um die Schweiz langfristig unabhängig von fossilen Ressourcen zu machen. Holz stellt mit einem nachhaltig nutzbaren Energieholzpotenzial von 50,2 PJ/a die grösste Biomassequelle der Schweiz dar (Waldholz: 26,1 PJ/a, Flurholz: 4,8 PJ/a, Restholz: 7,6 PJ/a, Altholz: 11,7 PJ/a). Das genutzte Potenzial beläuft sich aber bereits auf 36,4 PJ/a (Waldholz: 17,1 PJ/a; Flurholz: 2,3 PJ/a; Restholz: 7,8 PJ/a und Altholz: 9,2 PJ/a). **Die zusätzlich nachhaltig nutzbare verholzte Biomasse in der Schweiz beträgt somit 13,8 PJ/a.** Damit ist das Potenzial ungefähr gleich gross wie das Potenzial der nachhaltig nutzbaren nicht verholzten Biomasse (Thees et al., 2017).

Im Gegensatz zu Erdöl, einem Gemisch aus Kohlenwasserstoffen, ist verholzte Biomasse ein komplexes Gemisch aus organischen und anorganischen Verbindungen mit einer hohen Bandbreite an Substanzklassen, die auch Heteroatome wie Stickstoff oder Schwefel enthalten. Die Hauptbestandteile der Zellwände von Holz sind die Kohlenhydrate Cellulose (50% w/w) und Hemicellulose (20% w/w) sowie Lignin (30% w/w) (siehe Abbildung 2). Holz hat damit einen relativ hohen Sauerstoffanteil von ca. 40% w/w, was ungefähr einer stöchiometrischen Formel CH_2O entspricht.

Organische Verbindungen, die sich mit heissem Wasser oder Lösungsmitteln extrahieren lassen, kommen in Holz ausserhalb der Zellwände in Anteilen von 3 bis 5% w/w vor. Diese nicht strukturellen Stoffe sind zum Beispiel Zuckeralkohole und Zuckersäuren, ferner einfache Phenole und Flavonoide wie Tannin. Tannine können als Holzklebstoff verwendet werden, werden aber auch

als Antioxidantien in Nahrungsergänzungsmitteln eingesetzt (Yazaki, 2015) (vgl. auch Synthesebericht DF3 «Innovative holzbasierte Materialien für neue Anwendungen»).

Im Vergleich zu einjähriger Biomasse wie zum Beispiel Stroh ist der Anteil der als Asche bezeichneten anorganischen Verbindungen im Holz mit meist weniger als 1% w/w relativ niedrig. Dies ist vorteilhaft, da die Asche nach heutiger Gesetzgebung kostenpflichtig entsorgt werden muss.

Insbesondere im direkten Vergleich mit Erdöl ist die Bereitstellung und Raffination von Holz, aber auch anderer lignocellulosehaltiger Biomasse wie Gras oder Stroh, zum Teil mit erheblichen Herausforderungen verbunden. Das Ernten und Zusammenführen von Holz ist relativ aufwendig, weil es über grosse Flächen verteilt ist. Daher beschränkt die Logistik die Dimensionierung einer Holzraffinerie auf eine im Vergleich zu heutigen Erdölraffinerien bescheidene Grösse im Bereich von 100000 t/a (Zwei Plattformen (Zellstoff, Wärme und Strom)-Bioraffinerie für Papier, Nanocellulose, Wärme und Strom aus Holz, Bukóza, SVK) bis 340000 t/a (Zwei Plattformen (Lignocellulose, Wärme und Strom)-Bioraffinerie für Ethanol, Strom aus Maisstroh, DuPont Danisco, USA). Positive Skaleneffekte, also die Verringerung der Produktionskosten bei grossen Anlagen, können somit nur bedingt realisiert werden. Eine mögliche Lösung dieses Nachteils könnten dezentral angelegte Vorbehandlungen sein, um die Intermediate anschliessend in einer zentralen, sekundären Bioraffination zu den Hauptprodukten zu veredeln (Kim und Dale, 2015, 2016)

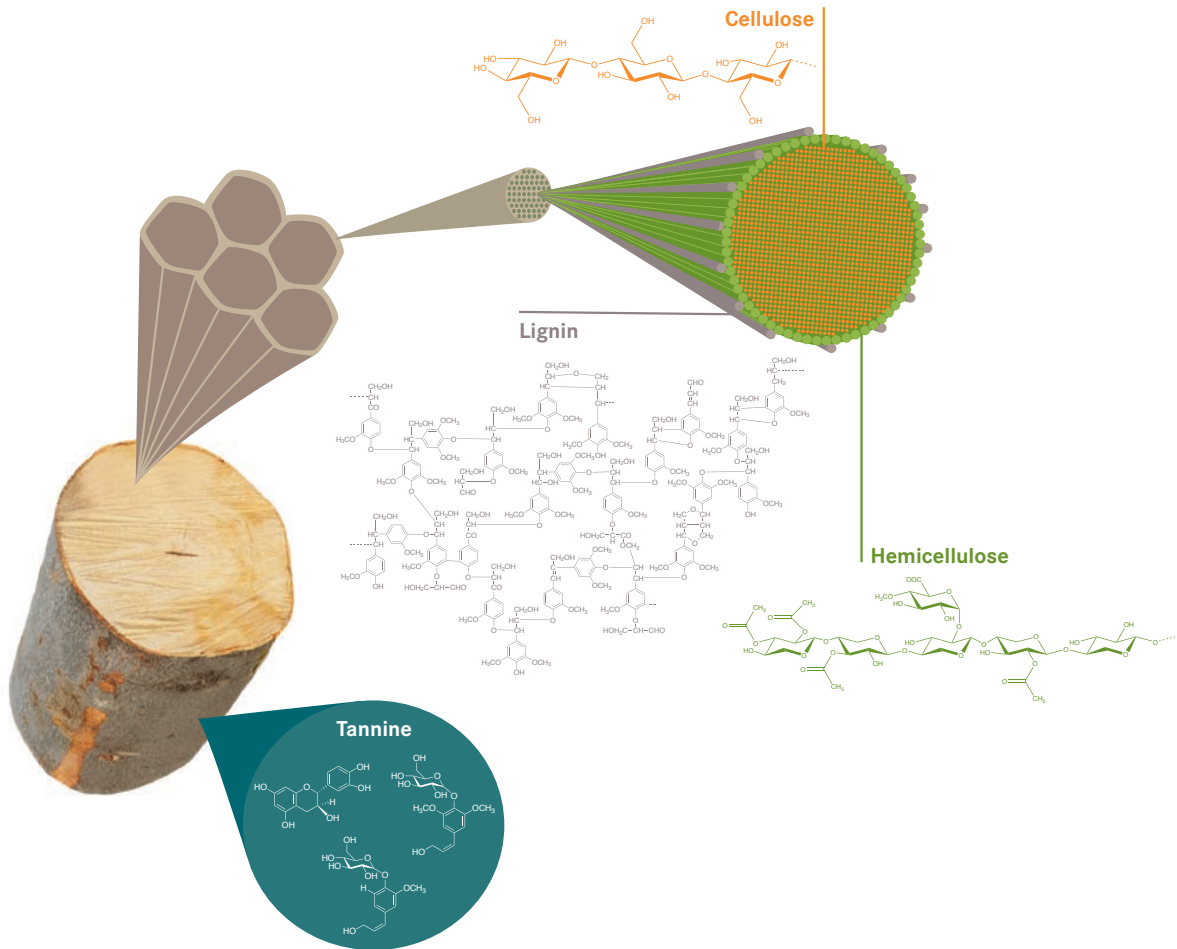


Abb. 2: Chemische Struktur von verholzter Biomasse. Die Zellwände von Holz bestehen aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Cellulose ist ein Polymer aus Glucose, in dem die C6-Zuckereinheiten über 1,4-beta-glykosidische Bindungen verbunden sind. Hemicellulose besteht je nach Holzart aus den C5-Zuckern Xylose und Arabinose und den C6-Zuckern Mannose, Galactose und Glucose. Lignin ist ein hochvernetztes, amorphes Polymer aus drei phenolischen Bausteinen. Das Verhältnis dieser drei Bausteine variiert wiederum je nach Holzart. Lineare Celluloseketten lagern sich zu sogenannten Mikrofibrillen von drei bis vier Millimeter Durchmesser aneinander, die durch eine starke Wasserstoffbrückenbindung zusammengehalten werden. Die Hemicellulose ist mit Wasserstoffbrücken an die Aussenseite dieser Mikrofibrillen und zusätzlich kovalent an Lignin gebunden. Mehrere Mikrofibrillen bilden dann Makrofibrillen aus, die den Zellwänden ihre ausserordentlich hohe Stabilität verleihen. (angepasst von Neubauer, 2008).

PLATTFORMEN DER HOLZ-BIORAFFINERIE

Die verschiedenen Forschungsbeiträge des NFP 66 im Dialogfeld 2 «Neue Wege zur Bioraffinerie» setzen an unterschiedlichen Stufen einer holzbasierten Bioraffinerie an. Sie alle helfen, einzelne Prozessschritte zu optimieren und damit die Realisierungschancen einer Bioraffinerie zu verbessern.

Die Lignocellulose-, Syngas-, Pyrolyseöl- sowie die Wärme- und Strom-Plattformen gehören zu den wichtigsten Bausteinen einer möglichen holzbasierten Bioraffinerie und werden in diesem Kapitel näher beschrieben. Abbildung 1 (Seite 8) gibt eine Übersicht über die Vielzahl von Produkten, die basierend auf diesen Plattformen hergestellt werden können. Weiter zeigt das Kapitel auf, in welchen Bereichen die im Dialogfeld 2 «Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie» geförderten NFP 66-Projekte angesiedelt sind.

Lignocellulose-Plattform

In einer Bioraffinerie basierend auf der Lignocellulose-Plattform werden in der Primärraffination in einem Aufschlussverfahren aus Holz die Zwischenprodukte Cellulose, Hemicellulose und Lignin freigesetzt. Die Lignocellulose-Plattform ist also eigentlich ein Verbund von drei verschiedenen Plattformen. Je nach Aufschlussart liegen diese Komponenten getrennt oder als nicht trennbare Mischung vor. In der Sekundärraffination werden die einzelnen Komponenten mit verschiedenen, teils mehrstufigen Verfahren in die jeweiligen Zielprodukte umgewandelt. Dabei sind lösliche Einfachzucker wie Glucose (ein C6-Zucker) und Xylose (ein C5-Zucker) zentrale Intermediate, die in der Literatur teilweise auch als eigenständige Plattformen bezeichnet werden. Für beide Schritte können sowohl biochemische und chemische als auch thermochemische Methoden angewendet werden, was dazu führt, dass es für die Lignocellulose-Plattform eine grosse Zahl an Bioraffinerie-Konzepten gibt. Im Folgenden wird zunächst eine Übersicht über die Verfahren der Primärraffi-

nation zur Vorbehandlung und Fraktionierung von Lignocellulose gegeben. Anschliessend wird eine Auswahl typischer Verfahren zur Sekundärraffination vorgestellt.

Vorbehandlung und Fraktionierung von Lignocellulose

In der Primärraffination wird der Rohstoff Holz aufgeschlossen, um die Reaktivität des Rohstoffs in den nachgeschalteten Prozessen zu erhöhen. Dazu gehört zum Beispiel die enzymatische Verzuckerung. Anschliessend wird je nach Verfahren eine Fraktionierung der drei Hauptkomponenten Hemicellulose, Cellulose und Lignin in getrennte Stoffströme vorgenommen. Dafür wurde eine Vielzahl verschiedener Verfahren entwickelt; eine Auswahl der gängigsten Methoden ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

Typischerweise findet die Vorbehandlung im wässrigen Milieu bei Temperaturen zwischen 140 und 230 Grad und bei Drücken bis zu 30 bar statt, wobei optional Säure oder Base hinzugegeben werden kann. Bei tiefen pH-Werten wird die Solubilisierung der Hemicellulose begünstigt, die somit also von der verbleibenden Cellulose- und Ligninfraktion separiert werden kann. Ein hoher pH-Wert hingegen erhöht die Löslichkeit von Lignin und ermöglicht dessen separate Weiterverarbeitung. Die Zugabe von Lösungsmitteln oder anderen Chemikalien ist ebenfalls möglich. Zum Beispiel wurde der Effekt einer Zugabe von 2-Naphtol im NFP 66-Projekt *Rudolf von Rohr* untersucht (siehe «Der Einsatz von Scavengern in der Vorbehandlung von Fichte», Seite 14).

Tab. 1 Vor- und Nachteile der bekanntesten Vorbehandlungsmethoden von Lignocellulose (angepasst von Alvira et al. 2010).

Vorbehandlungsmethode	Mechanismus und Vorteile	Nachteile	Forschungsbeitrag im Rahmen des NFP 66
Biologisch	Schliesst Lignin auf; tiefer Energieeinsatz	Hemicellulose und Cellulose werden abgebaut; sehr langsamer Prozess	Projekt Studer, BFH
Dampfexplosion	Reduziert Partikelgrösse; solubilisiert Hemicellulose (geht in Lösung); günstig, da keine Chemikalien benötigt werden	Verändert Lignin-Struktur; Produktion von Inhibitoren; teilweise Zersetzung von Hemicellulose	Projekt Studer, BFH Projekt Rudolf von Rohr, ETHZ
Ammonia Fiber Expansion (AFEX)	Vergrössert die spezifische Oberfläche;Umlagerung von Lignin;praktisch keine Produktion von Inhibitoren	Hohe Kosten für Ammoniak; ineffizient für Biomasse mit einem hohen Ligninanteil wie Holz	nicht zutreffend
Organosolv	Fraktionierung in drei Stoffströme;Gewinnung von reinem Lignin	Hohe Kosten; Rezyklierung des Lösungsmittels	nicht zutreffend
Konzentrierte Säure	Direkte Gewinnung von Glucose;Prozess läuft bei Umgebungstemperatur ab	Hohe Kosten; Rezyklierung der Säure; Korrosion des Reaktors; Bildung von Inhibitoren	nicht zutreffend
Verdünnte Säure	Solubilisierung von Hemicellulose; niedrigere Temperatur als bei Verfahren nur mit Wasser	Bildung von Inhibitoren; niedrige Zuckerkonzentrationen	nicht zutreffend
Ionische Flüssigkeiten	Praktisch keine Bildung von Inhibitoren; sehr hohe und schnelle Hydrolysierbarkeit (Spaltung in Einfachzucker)	Hohe Kosten der ionischen Flüssigkeiten; Rezyklierung der ionischen Flüssigkeit	Projekt Dyson, EPFL

Der Einsatz von Scavengern in der Vorbehandlung von Fichte – Erkenntnisse aus dem NFP 66-Projekt Rudolf von Rohr (ETHZ)

Fichte – ein Nadelholz – zeichnet sich durch eine im Vergleich zu Laubholz höhere Rekalzitranz aus. Es ist bekannt, dass durch die Dampfvorbehandlung von Nadelholz in der anschliessenden enzymatischen Hydrolyse nur eine Zuckerausbeute von maximal 30 Prozent erreicht werden kann. Daher wurde untersucht, ob dieses Rohmaterial besser aufgeschlossen werden kann, wenn während der Vorbehandlung 2-Naphtol zugegeben wird. Diese Chemikalie wirkt als «Ionenfänger»

und unterbindet bei hohen Temperaturen die Repolymerisierung von Ligninbruchstücken (Abb. 3). Diese Art von kondensiertem Lignin wirkt sich besonders hinderlich auf die enzymatische Hydrolyse aus, da es die cellulolytischen Enzyme bindet und damit ihre Funktion ausschaltet (Pielhop et al., 2015). Tatsächlich konnte im Projekt gezeigt werden, dass durch Zugabe von 2-Naphtol während der Vorbehandlung in der anschliessenden enzymatischen Hydrolyse die Ausbeute um mehr als 60 Prozent auf einen beinahe stöchiometrischen Umsatz erhöht werden kann (Abb. 4).

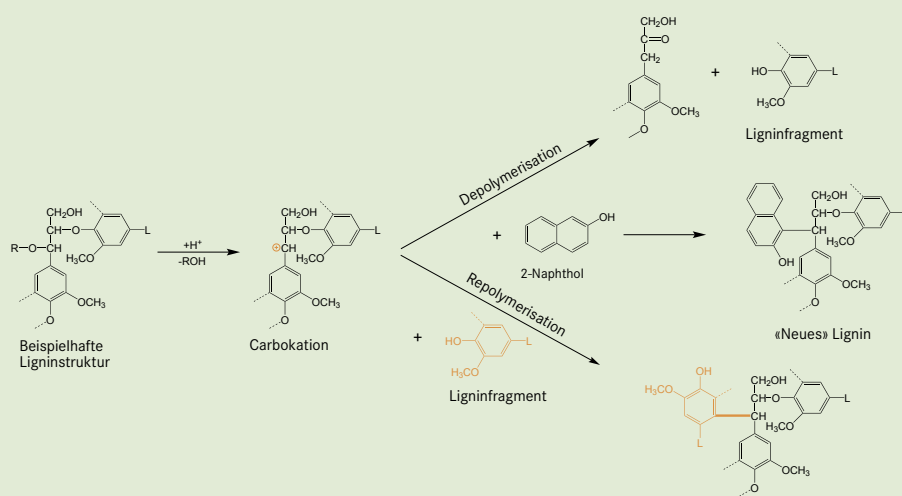


Abb. 3 Die Repolymerisierung von Lignin-Bruchstücken, welche die nachfolgende enzymatische Spaltung der Cellulose in Glucose negativ beeinflusst, kann durch die Zugabe von 2-Naphtol verhindert werden – Rudolf von Rohr ETHZ.

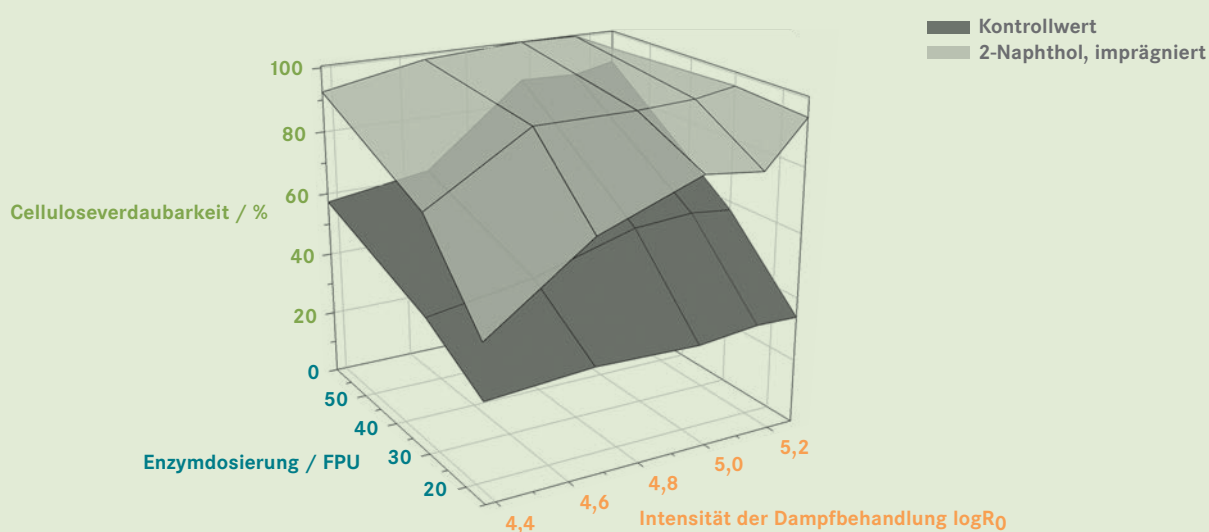


Abb. 4 Die Zugabe von 2-Naphtol zu Fichte während der Dampfvorbehandlung erhöht die folgende enzymatische Spaltung der Cellulose in Glucose um mehr als 60% auf beinahe stöchiometrischen Umsatz – Rudolf von Rohr, ETHZ.

Eine der gebräuchlichsten Vorbehandlungsmethoden in kommerziellen Bioraffinerien, die auch in zwei Projekten des NFP 66 untersucht wurde (siehe Kasten «Einfluss der explosionsartigen Druckabsenkung während der Dampfvorbehandlung von Fichte» und «Optimierung der Reaktionsbedingungen für die Dampfexplosions-Vorbehandlung»), ist die sogenannte Dampfexplosion. Diese Methode ist bereits aus der Papier- und Zellstoffindustrie bekannt und hat den Vorteil, dass keine teuren

Chemikalien zum Einsatz kommen. Zudem erlaubt die Dampfexplosion eine effiziente Zerkleinerung von Holz-Hackschnitzeln, sodass keine weiteren vorgeschalteten Mahlschritte nötig sind. Die Zerkleinerung der Holzpartikel wirkt sich günstig auf die Ausbeute aus der enzymatischen Hydrolyse aus, wie im NFP 66-Projekt *Rudolf von Rohr/Studer* gezeigt werden konnte (siehe Kasten «Einfluss der explosionsartigen Druckabsenkung während der Dampfvorbehandlung von Fichte»).

Einfluss der explosionsartigen Druckabsenkung während der Dampfvorbehandlung von Fichte – Erkenntnisse aus den NFP 66-Projekten *Rudolf von Rohr* (ETHZ) und *Studer* (BFH)

Eine der gebräuchlichsten Vorbehandlungsmethoden in kommerziellen Bioraffinerien ist die sogenannte Dampfexplosion. Dabei wird das Ausgangsmaterial durch Dampfzugabe aufgeheizt und unter Druck gesetzt. Nach einer definierten Zeit wird der Druck schlagartig auf Umgebungsdruck gesenkt. Bis vor Kurzem war allerdings nicht klar, welchen Effekt die explosionsartige Entspannung

hat und ob sie überhaupt relevant ist. In einem Teilprojekt des NFP 66 konnte nun die Bedeutung dieser Verfahrensweise nachgewiesen werden. Im Fall von Fichtenholz wurde die Zuckerausbeute in der enzymatischen Hydrolyse im Vergleich zu einer entsprechenden Vorbehandlung ohne Dampfexplosion fast verdoppelt (Abb. 5). Dies kann durch die effiziente Verkleinerung der Holzpartikel durch die explosionsartige Entspannung erklärt werden, die mit dem angelegten Differenzdruck positiv korreliert (Pielhop et al., 2016).

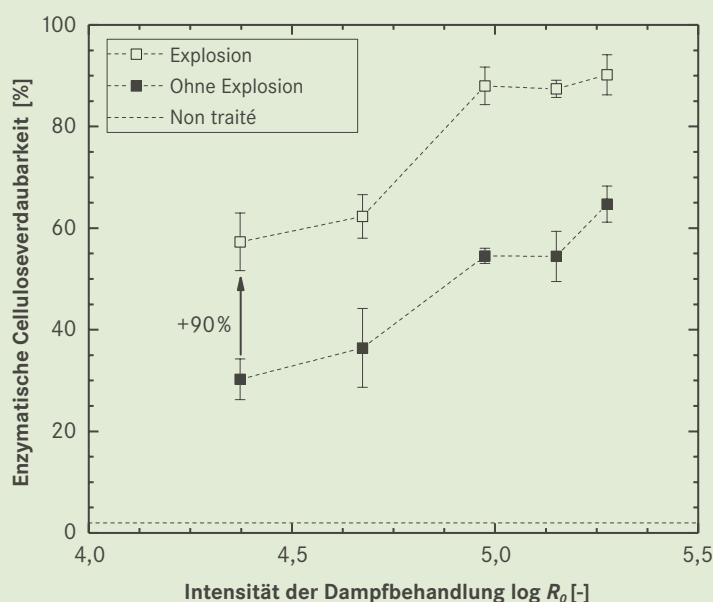


Abb. 5 Die explosionsartige Entspannung nach der Dampfvorbehandlung verdoppelt die Zuckerausbeute in der folgenden enzymatischen Hydrolyse im Vergleich zu einer entsprechenden Vorbehandlung ohne Dampfexplosion – *Rudolf von Rohr*, ETHZ, und *Studer*, BFH.

Die Ausbeute in der enzymatischen Hydrolyse, die nach der Vorbehandlung des Holzes folgt, ist stark davon abhängig, wie lange und bei welcher Temperatur das Ausgangsmaterial behandelt wird. Diese zwei Faktoren werden im sogenannten «Severity Factor» zusammengefasst, der angibt, wie intensiv die Biomasse vorbehandelt wurde (Overend et al., 1987). Generell braucht es bei der Dampfvorbehandlung von Holz höhere Temperaturen und ei-

nen höheren «Severity Factor» als bei Biomasse aus einjährigen Pflanzen, da Holz deutlich mehr Lignin enthält. Entsprechend ist die Verarbeitung von Holz energieintensiver und benötigt druckfestere und damit teurere Reaktoren. Zudem zerfällt die Hemicellulose bei zu harschen Vorbehandlungsbedingungen und es bilden sich vermehrt Nebenprodukte, die sich ungünstig auf die anschliessenden biochemischen Umwandlungsprozesse auswirken.

Optimierung der Reaktionsbedingungen für die Dampfexplosionsvorbehandlung von Buchenholz – Erkenntnisse aus dem NFP 66-Projekt Studer (BFH)

Buchenholz ist in der Schweiz reichlich vorhanden und wird für Bauzwecke zurzeit noch kaum verwendet. Es ist daher ein interessantes Ausgangsmaterial für eine Bioraffinerie. Allerdings gibt es für diese Holzart praktisch keine Literatur zur Vorbehandlung und anschliessenden enzymatischen Verzuckerung. Deshalb wurden im ersten Teil des Projekts die Bedingungen der Dampfvorbehandlung optimiert (Balan et al., 2017b, 2017a). Es zeigte sich, dass für die optimale enzymatische Verzuckerung des Celluloseanteils eine Vorbehandlungstemperatur von 230 °C bei einer Verweilzeit von 15 Min. notwendig ist (entspricht einer severity $\log R_o$ von 5,0), um bei der enzymatischen Verzuckerung eine Ausbeute von 90% zu erreichen. Bei diesen Bedingungen zerfällt allerdings die Hemicellulose praktisch komplett (<10% Ausbeute), sodass bei einer einstufigen Vorbehandlung die Gesamtzuckerausbeute mit 60% relativ tief ist (Abb. 6). In Zukunft wird daher die zweistufige Vorbehandlung untersucht. Dabei werden unter moderaten Bedingungen (180 °C, 44 Min.) zunächst die Hemicellulosen solubiliert und separiert (Ausbeute von 80%) und anschliessend nur die verbleibenden Feststoffe der hohen Temperatur ausgesetzt.

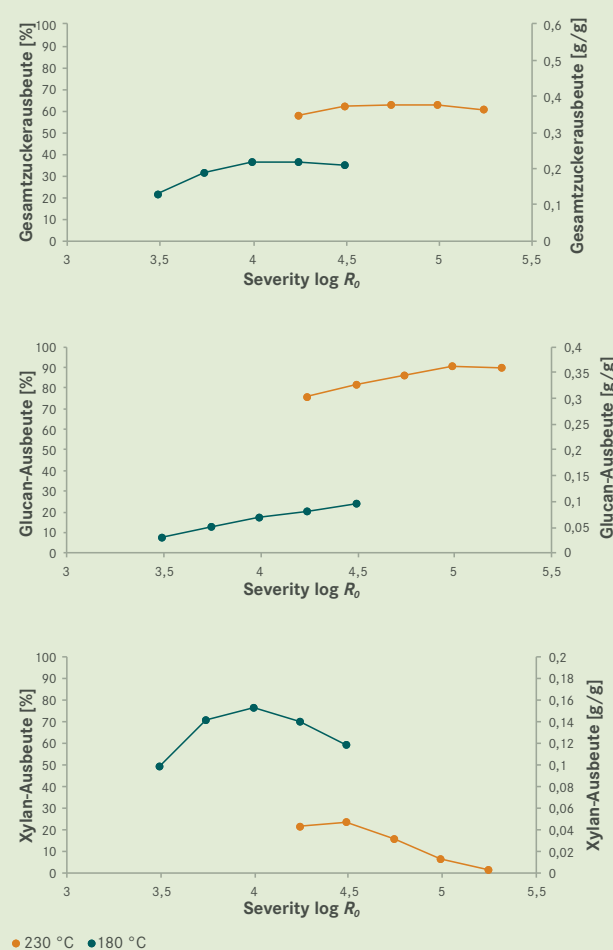


Abb. 6 Die optimale Vorbehandlungstemperatur für die Hemicellulose in Buchenholz beträgt 180 °C, während für eine optimale enzymatische Zerlegung des Celluloseanteils eine Vorbehandlungstemperatur von 230 °C notwendig ist. In Zukunft wird eine zweistufige Vorbehandlung untersucht, um die Gesamtzuckerausbeute zu maximieren – Studer, BFH.

Enzymatische Verzuckerung von Hemicellulose und Cellulose sowie anschliessende Fermentation

Ein intensiv untersuchtes Verfahren, das bereits für die Ethanolherstellung aus Lignocellulose im Industriemasstab umgesetzt ist (siehe Abbildung 7), besteht aus zwei Stufen: Zuerst wird die Biomasse mit einem physikochemischen Prozess aufgeschlossen (siehe oben), anschliessend werden aus der so vorbehandelten Biomasse mittels enzymatischer Hydrolyse die fermentierbaren Zucker freigesetzt. Bei den Enzymen handelt es sich um sogenannte Cellulasen, eine Mischung von verschiedenen Enzymen, die Endo- und Exoglucanasen, sowie Beta-Glucosidasen umfasst. Cellulasen werden industriell von Firmen wie Novozymes und Dupont durch Fermentation der Pilzstämme *Trichoderma* und *Aspergillus* hergestellt. Im Vergleich zu den Enzymen zur Stärkeverzuckerung sind Cellulasen noch sehr teuer, auch wenn ihre Herstellungskosten in den letzten Jahren stetig gesunken sind (McMillan et al., 2011). Bei der Produktion von Bioethanol aus Lignocellulose belaufen sich die Kosten allein schon für die Enzyme auf ungefähr 0,27 Dollar pro Liter Treibstoff, was zirka einem Drittel der gesamten Produktionskosten entspricht (Wyman und Dale, 2015). Die Kosten sind auch deshalb so hoch, weil Holz aufgrund seiner chemischen Struktur gegenüber einem enzymatischen Aufschluss sehr widerstandsfähig ist (Rekalzitranz). Dementsprechend benötigt man eine grosse Menge an Enzymen zur Verzuckerung von vorbehandeltem Holz.

Die aus der enzymatischen Hydrolyse gewonnenen Zucker werden anschliessend von Mikroorganismen zu den gewünschten Produkten umgewandelt. Die Produktpalette, die mittels Fermentation erzeugt werden kann, ist sehr vielfältig und reicht von Massenprodukten wie Ethanol über Chemikalien wie Milchsäure bis hin zu Aminosäuren oder Antibiotika. Das mengenmässig wichtigste Fermentationsprodukt aus Lignocellulose ist aktuell Ethanol – ein Biotreibstoff, der herkömmlichem Benzin beigemischt werden kann. In dem Herstellungsverfahren der sogenannten Biotreibstoffe der 1. Generation wird dabei allerdings auf Zucker zurückgegriffen, die aus Mais, Getreide, Zuckerrüben oder Zuckerrohr gewonnen wurden, was technisch deutlich einfacher ist als die Herstellung aus Holz.

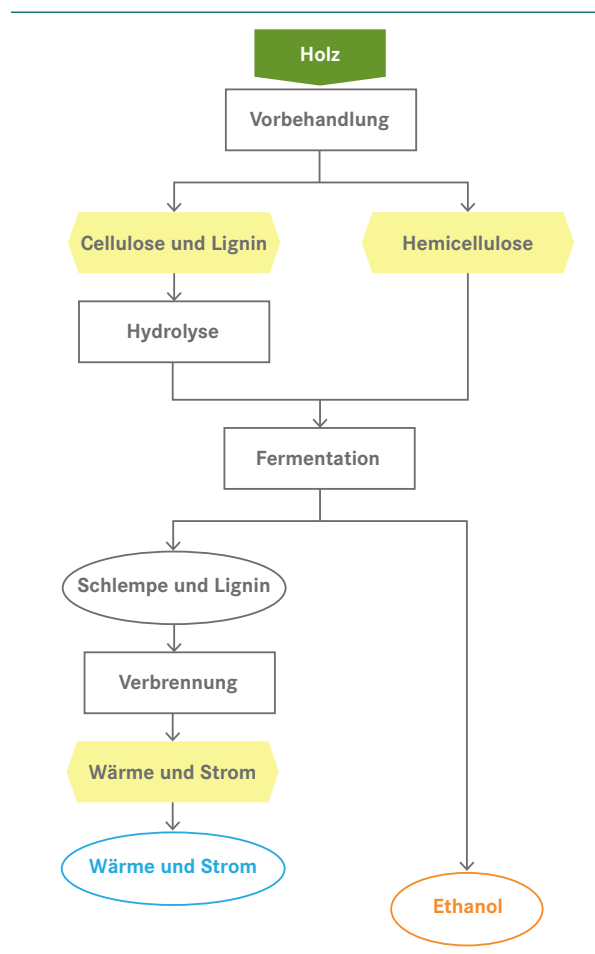


Abb. 7 Die Lignocellulose-Bioraffinerie am Beispiel der Cellulose-Ethanolproduktion.

Die Herausforderungen in der Fermentation der 2. Generation, die Zucker aus Lignocellulose verwendet, sind vielfältig:

- Während der Biomasse-Vorbehandlung werden Substanzen wie Furfural oder Phenole freigesetzt, die toxisch für die beteiligten Mikroorganismen sind.
- Es müssen mehrere Arten von Zuckern fermentiert werden anstatt nur Glucose. Insbesondere C5-Zucker wie Xylose sind für viele Mikroorganismen wie zum Beispiel die Bäckerhefe nicht verwertbar.
- Die Konzentration der Zuckerlösung aus der enzymatischen Hydrolyse ist mit zirka 100 g/l deutlich tiefer als zum Beispiel im Presssaft von Zuckerrohr (200 g/l).

Die Herstellung von Ethanol als Biotreibstoff der 2. Generation wurde im NFP 66-Projekt *Studer* untersucht (siehe «Gleichzeitige mikrobielle Delignifizierung und Fermentation von vorbehandeltem Buchenholz zu Ethanol», Seite 18).

Gleichzeitige mikrobielle Delignifizierung und Fermentation von vorbehandeltem Buchenholz zu Ethanol – Erkenntnisse aus dem NFP 66-Projekt Studer (BFH)

Buchenholz enthält relativ viel Lignin und muss daher unter intensiven Bedingungen vorbehandelt werden, um mit Enzymen verzuckert und anschliessend zu Ethanol fermentiert werden zu können. Es wurde untersucht, ob die Anwendung eines Pilzes, der die Fähigkeit hat, Lignin abzubauen, die Ethanolausbeuten verbessern kann.

Wird Holz mit solchen Pilzen in einem separaten Schritt vorbehandelt, werden neben Lignin immer auch Cellulose und Hemicellulose abgebaut. Um dies zu verhindern, wurde die Pilzbehandlung mit *Irpex lacteus*, die enzymatische Hydrolyse und die Fermentation gleichzeitig in einem einzigen, speziell dafür designten Reaktor (Abb. 8) durchgeführt. Mithilfe des Pilzes kann die Ethanolausbeute um rund 20% erhöht werden (Abb. 9) (Bretthauer et al., 2017).

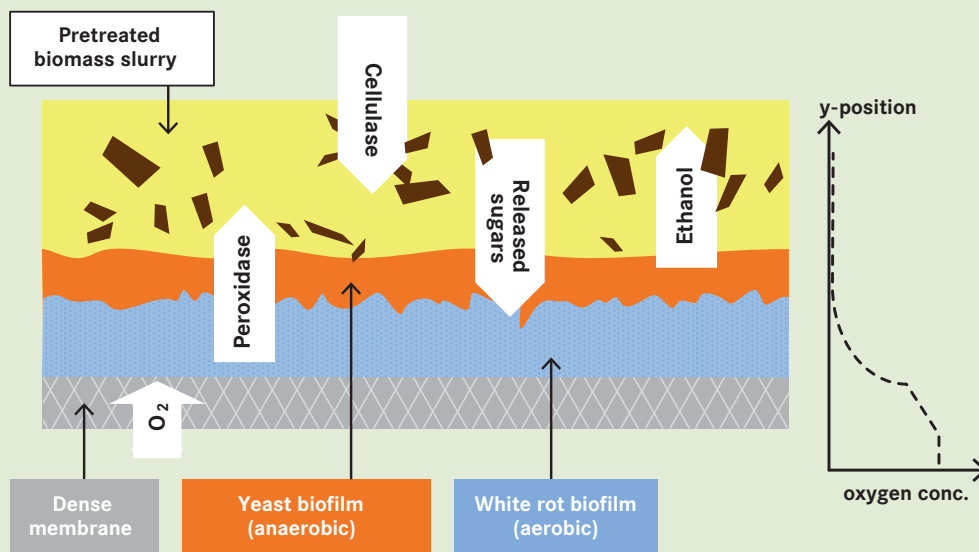


Abb. 8 Schematische Darstellung des aerob-anaeroben Reaktors, der die simultane Kultivierung des Weissfäulepilzes *Irpex lacteus* und der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* ermöglicht. Der Sauerstoff wird durch eine dichte Membran in den anaeroben Reaktor gebracht – Studer, BFH.

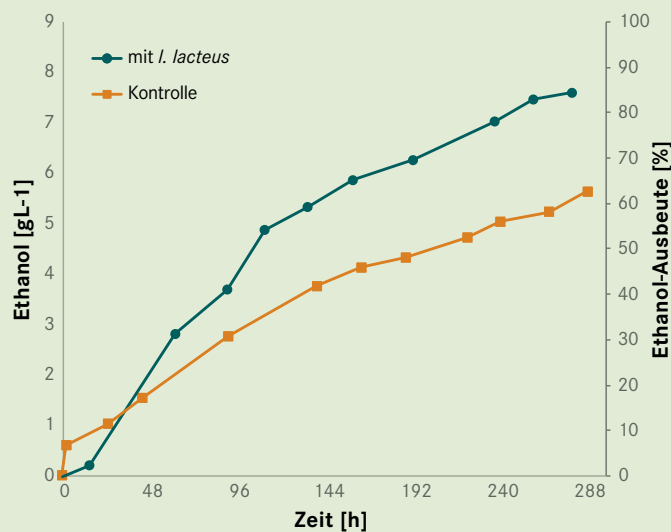


Abb. 9 Mithilfe des Pilzes kann die Ethanolausbeute um rund 20% erhöht werden.

Umsetzung und Valorisierung von Lignin

In den derzeit geplanten oder umgesetzten Produktionsanlagen von Ethanol aus Lignocellulose werden die nach der Fermentation zurückbleibenden Feststoffe, die fast ausschliesslich aus Lignin bestehen, abgetrennt und in einem Kessel zur Strom- und Wärmeproduktion verbrannt (Abb. 7). Dadurch ist der Produktionsprozess energieautark, es kann sogar meist noch Strom an Dritte verkauft werden. Allerdings ist der Ligninkessel die teuerste Komponente der Anlage und die Verbrennung von feuchtem Lignin ist energetisch

Die Kombination von enzymatischen und chemischen Methoden zur Oxidation von Lignin – Erkenntnisse aus dem NFP 66-Projekt *Corvini* (FHNW)

Um Lignin als Rohstoff für wertvolle aromatische Chemikalien nutzbar zu machen, wurde die Kombination von enzymatischen und chemischen Behandlungen zur Oxidation von Lignin getestet (Gasser et al., 2012; Gasser et al., 2013) (Abb. 10).

Lignin wurde zunächst mit einer Laccase (ein Enzym, das phenolische Substanzen mithilfe von Sauerstoff oxidiert) behandelt, die dafür auf magnetischen Nanopartikeln immobilisiert wurde (Arca-Ramos et al., 2016; Gasser et al., 2016). Dies erlaubt die einfache Abtrennung des wertvollen Biokatalysators von dem verbleibenden Lignin durch Anlegen eines Magnetfeldes und dessen anschliessende Wiederverwertung. Mittels dieser enzymatischen Behandlung konnte als monomeres Produkt 2,6-dimethoxy benzochinon gewonnen werden (11 kg/t), das als Ausgangsstoff für Pharmazeutika und Pestizide verwendet werden kann. Ein zusätzlicher Schutz des immobilisierten Enzyms durch die Einbettung in einer dünnen Organosilan-Schicht hat gezeigt, dass der unlösliche Anteil von Lignin nach der enzymatischen Behandlung in Anwesenheit von einem Redox-Mediator um 12% reduziert werden kann (Gasser et al., 2016). Vereinfacht gesagt, wird die enzymatische Depolymerisierung von Lignin verbessert, vermutlich indem kovalente Bindungen von oxidierten Ligninresten mit der Laccase verhindert werden (Abb. 10). Im zweiten Schritt wurden die verbleibenden Feststoffe mit Ameisensäure behandelt und mit Ethylacetat extrahiert. Dabei wurden neben wenigen monomeren

ungünstig. Daher werden alternative Konzepte zur Nutzung von Lignin mit geringeren Kosten und höherer Wertschöpfung gesucht. Dafür kommen sowohl biotechnologische, katalytische und thermochemische Methoden oder eine Kombination davon infrage. Vier Projekte des NFP 66 untersuchten verschiedene Aspekte dazu (siehe Kasten «Die Kombination von enzymatischen und chemischen Methoden zur Oxidation von Lignin», «Grundlagen des enzymatischen Ligninabbaus», «Katalytische Umwandlung von Lignin», «Untersuchungen zur Schnellpyrolyse von Lignin» und «Untersuchungen zur oxidativen Depolymerisation von Lignin»).

Ligninderivaten wie Vanillinsäure vor allem oligomere Ligninbruchstücke mit einer Ausbeute von bis zu knapp 30% gewonnen, die zum Beispiel in der chemischen Industrie zur Produktion von Epoxidharzen eingesetzt werden könnten (Gasser et al., 2017).

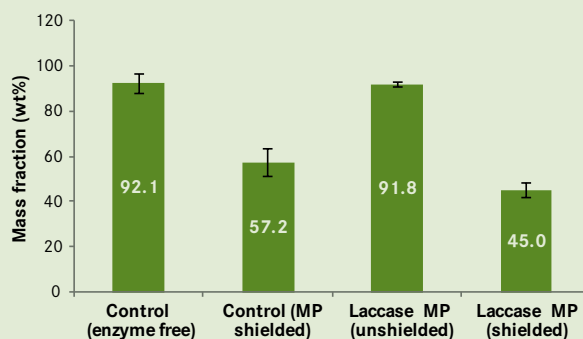


Abb. 10 Die Grafik zeigt die unlösliche Fraktion des Lignins nach biokatalytischer Behandlung mit 100 U L-1 Laccase und 7 mM HBT für 24 Stunden bei pH 6. Wenn die immobilisierten Enzyme mit einer zusätzlichen Organosilan-Schicht geschützt werden, kann 12% mehr Lignin solubilisiert werden – *Corvini, FHNW*.

Grundlagen des enzymatischen Lignin- abbaus – Erkenntnisse des NFP 66-Projekts Seebeck (Universität Basel)

Die biologische Zersetzung von Holz durch Pilze und Bakterien ist eine der kompliziertesten und diversesten chemischen Reaktionen, die bekannt sind. Um ein besseres Verständnis dieses Reaktionsnetzwerkes zu erreichen und damit langfristig neue biotechnologische Konzepte zur Umsetzung von Holz in Chemikalien zu ermöglichen, fokussierte das Projekt auf die Erforschung von sauerstoffabhängigen Enzymreaktionen. Dabei wurde ein neuer Enzymtypus entdeckt, der mithilfe von

Kupfer Sauerstoff aktivieren und stabile C-H-Bindungen brechen kann (Abb. 11) (Knop et al., 2015; Knop et al., 2017). Die Effizienz des untersuchten Enzyms konnte aufgrund mechanistischer Untersuchungen und durch den gezielten Umbau um einen Faktor 20 erhöht werden. Das verbesserte Enzym erwies sich als praktisches Werkzeug zur Produktion von modifizierten Proteinen. Die Modifikation ermöglicht die gezielte Verankerung der Proteine an Cellulosekristalle, um Kompositmaterialien zu erzeugen, die in Zukunft erdölbasierte Kunststoffe ersetzen könnten (Abb. 12).

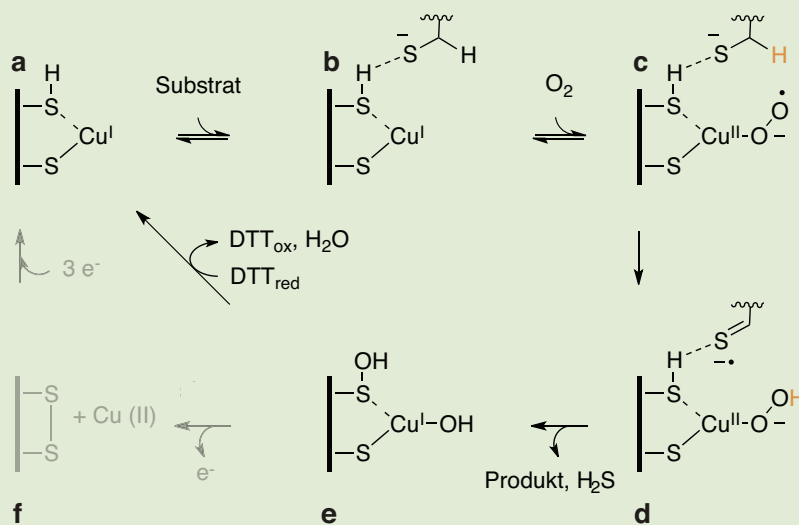


Abb. 11 Der katalytische Mechanismus des Formylglycin-generierenden Enzyms (FGE). Dieser einzigartige Katalysator benutzt ein Kupferkation (a), um Substrat (b) und Sauerstoff zu binden (c). Durch die Bindung zu Kupfer wird molekularer Sauerstoff aktiviert und zur Reaktion mit dem Substrat gebracht (d). Zur Regeneration des reagierten Katalysators (e) werden zusätzliche Reduktionsäquivalente in Form von Thiolen benötigt. Diese Reaktivität macht FGE zum vielfältig einsetzbaren Werkzeug für die chemische Modifikation von Proteinen.

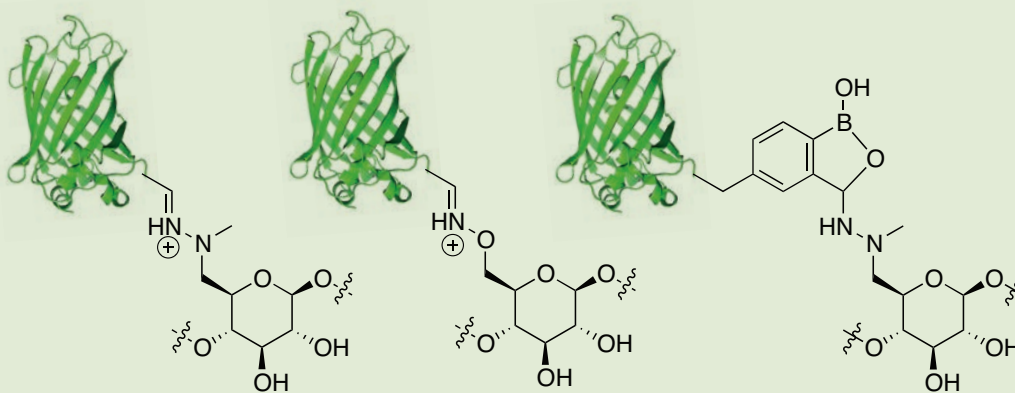


Abb. 12 FGE-modifizierte Proteine, wie zum Beispiel das «green fluorescent protein» (grün) können mit hoher Präzision mit chemisch modifizierter Zellulose verknüpft werden. Durch diesen Ansatz lassen sich verschiedene kovalente Verknüpfungsstrategien realisieren.

Katalytische Umwandlung von Lignin – Erkenntnisse des NFP 66-Projekts Dyson (EPFL)

Um aus Lignin wertvolle Chemikalien zu gewinnen, müssen stabile aromatische C-O-Bindungen selektiv gespalten werden. Für die Spaltung dieser Bindungen über die Addition von H₂ (eine Hydrogenolyse) wurden metallische Nanopartikel als Katalysatoren hergestellt und ihre Eignung mithilfe von Lignin-Modellsubstanzen (verschiedene aromatische Ether, siehe Abb. 13) getestet. Rhodium- und Ruthenium-Katalysatoren erwiesen sich als sehr effizient, allerdings sind diese

Metalle sehr teuer. Daher wurden auch bimetallische Katalysatoren untersucht, die zusätzlich unterschiedliche Anteile an Nickel enthielten (Bulut et al., 2015; Bulut et al., 2017). Mit Ru₆₀Ni₄₀- und Rh₆₀Ni₄₀-Katalysatoren konnten die besten Ergebnisse erzielt werden: Die Modellsubstrate wurden vollständig in Monomere gespalten. Die Hydrierung – das heisst die Addition von Wasserstoff an C-C-Doppelbindungen als unerwünschte Nebenreaktion – trat dabei nur in sehr geringem Mass auf. Die erzielten Ergebnisse sind somit sehr vielversprechend und die Katalysatoren werden im nächsten Schritt mit Lignin als Substrat getestet.

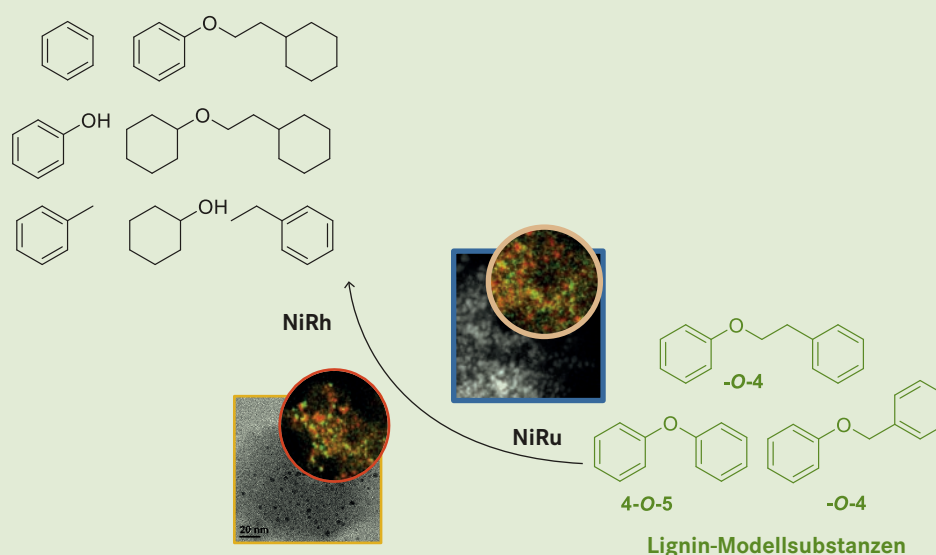


Abb. 13 Mithilfe von Rhodium- und Ruthenium-Katalysatoren konnten unter Anbindung von Wasserstoff stabile C-O-Bindungen selektiv gespalten und wertvolle Chemikalien aus Lignin-Modellsubstanzen gewonnen werden – Dyson, EPFL.

Chemische Methoden zur Umwandlung von Cellulose und Hemicellulose

Als Alternative zur oben beschriebenen biotechnologischen Lignocellulose-Plattform wurden im Rahmen des NFP 66 auch rein chemische Methoden zur Umwandlung von Holz untersucht. Es ist schon lange bekannt, dass konzentrierte Mineralsäuren wie Schwefel- oder Salzsäure Cellulose und Hemicellulose direkt in Einfachzucker umwandeln können. Dabei werden zwar hohe Ausbeuten erreicht, allerdings sind auch die Kosten sehr hoch, weil korrosionsresistente Reaktoren nötig werden

und die Säuren recycelt werden müssen. Modernere chemische Verfahren basieren auf Metallkatalysatoren und massgeschneiderten Lösungsmitteln. Sie erlauben sowohl die Produktion von Zuckern als Intermediate für die Sekundärraffination als auch die direkte Herstellung verschiedener Endprodukte. Sogenannte ionische Flüssigkeiten – Salze, die schon bei Raumtemperatur schmelzen und deshalb flüssig sind – können Cellulose auflösen, was zur Glucoseproduktion genutzt werden kann (Socha et al., 2014). Ein NFP 66-Projekt fokussierte auf die Entwicklung von neuartigen Katalysatoren und ionischen Flüssigkeiten, um Cellulose

und Lignin in wertvolle Chemikalien umzuwandeln, wie zum Beispiel 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF) (siehe «Direkte katalytische Umsetzung von Cellulose zu HMF»), das wiederum als Plattformchemikalie für eine Vielzahl weiterer Stoffe genutzt werden kann (Abb. 14). Die untersuchten Verfahren werden nun im Rahmen des Start-ups Embion Technologies weiterentwickelt, um in Zukunft die Verarbeitung von Holz und landwirtschaftlichen Nebenströmen zu ermöglichen.

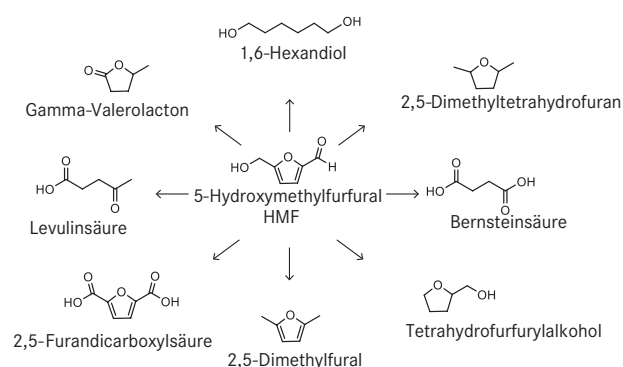


Abb. 14 Beispiele von wichtigen Grundchemikalien, die auf Basis von 5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF) hergestellt werden können (Siankevich et al., 2015).

Direkte katalytische Umsetzung von Cellulose zu HMF – Erkenntnisse des NFP 66-Projekts Dyson (EPFL)

5-Hydroxymethylfurfural (5-HMF) ist eine wichtige Plattformchemikalie, die in eine Vielzahl weiterer Stoffe wie 2,5-Furandicarbonsäure oder 2,5-Dimethylfuran umgewandelt werden kann (Siankevich et al., 2014a; Siankevich et al., 2017). Dieses Projekt fokussierte auf die Entwicklung einer neuen Technologie, um 5-HMF direkt aus Cellulose herstellen zu können (Abb. 15). Es wurde eine Serie von 16 verschiedenen sogenannten ionischen Flüssigkeiten – das sind Salze, welche

schon bei Raumtemperatur flüssig sind – synthetisiert und als Reaktionsmedium zunächst für die Umwandlung von Glucose zu 5-HMF in Gegenwart von CrCl_2 als Vorkatalysator getestet (Siankevich et al., 2014b; Siankevich et al., 2015). Mit einer Kombination von zwei verschiedenen ionischen Flüssigkeiten konnte innerhalb von zwei Stunden eine 5-HMF-Ausbeute von 92% erzielt werden (Siankevich et al., 2016). Anschliessend konnten die Reaktionsbedingungen auch für Cellulose als Ausgangsstoff so weit optimiert werden, dass eine Ausbeute von 62% 5-HMF erzielt wurde.

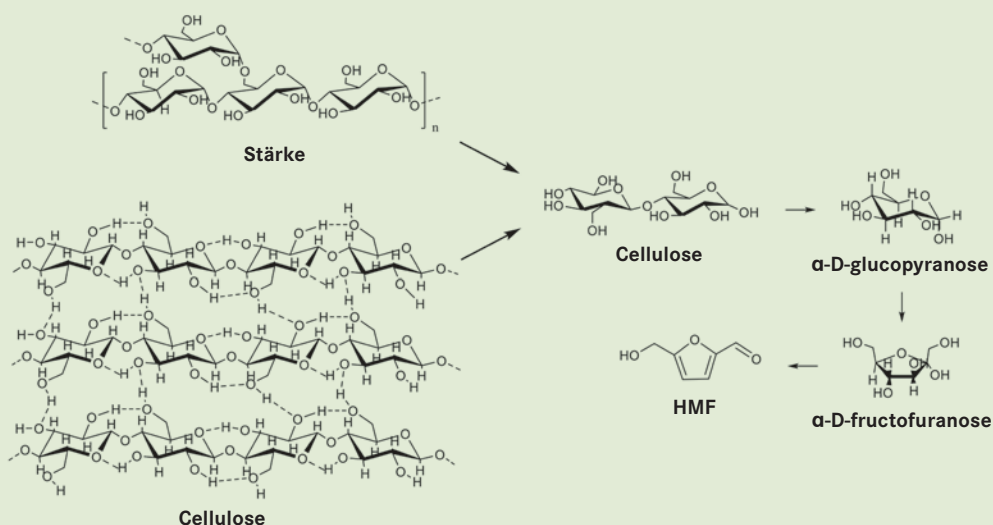


Abb. 15 Mithilfe von Rhodium- und Ruthenium-Katalysatoren konnten unter Anbindung von Wasserstoff stabile C-O-Bindungen selektiv gespalten und wertvolle Chemikalien aus Lignin-Modellsubstanzen gewonnen werden – Dyson, EPFL.

Synthesegas-Plattform

Das Herzstück dieser Plattform ist die thermochemische Vergasung von Holz und anderer lignocellulosehaltiger Biomasse zu Synthesegas, einer Mischung von hauptsächlich CO und H_2 . In der Sekundärraffination kann aus Synthesegas eine Vielzahl von Produkten hergestellt werden. Dazu gehören Methan, oft auch als «Synthetic Natural Gas» (SNG) bezeichnet, Wasserstoff, Alkohole und Fischer-Tropsch-Treibstoffe. Wenn das Sekundärprodukt ein flüssiger Treibstoff ist, wird diese Technologie auch als «Biomass to Liquid» (BtL) bezeichnet. Diese Namensgebung macht die Verwandtschaft zu den auf fossilen Ausgangsstoffen beruhenden und bereits kommerzialisierten Verfahren «Coal to Liquid» und «Natural Gas to Liquid» deutlich, in denen Kohle beziehungsweise Erdgas ebenfalls zunächst zu Synthesegas als zentralem Intermediat umgesetzt werden.

Generell umfasst die Synthesegas-Plattform drei Verfahrensschritte: die Vergasung des Holzes, die Aufreinigung des Synthesegases und die katalytische Umsetzung zum Zielprodukt (Abb. 16), die nachfolgend näher beschrieben werden.

Erzeugung von Synthesegas aus Biomasse

Bei der Vergasung findet in Gegenwart von Luft, Wasserdampf oder reinem Sauerstoff eine partielle Oxidation aller Biomassekomponenten zu den Hauptprodukten CO , H_2 und CH_4 mit CO_2 und Wasserdampf als Nebenprodukten statt. Die Vergasung ermöglicht damit, beliebige organische Ausgangsstoffe zu einem einheitlichen Zwischenprodukt umzuwandeln, das dann weiterverarbeitet wird. Die Reaktion läuft bei einer Temperatur von 750 bis 1250 °C ab. Die dazu erforderliche Wärme kann durch Teilverbrennung im Vergasungsreaktor erzeugt (autotherme Prozessführung) oder von aussen zugeführt werden (allotherme Prozessführung). Um eine Vergasung mit Wasserdampf zu ermöglichen, kommen allotherme Verfahren zum Einsatz, während mit Luft betriebene Vergaser in der Regel autotherm betrieben werden.

Reinigung des Synthesegases

Der zweite Verfahrensschritt ist die Reinigung des Synthesegases, das Verunreinigungen wie Teer- und Aschepartikel, höhere Kohlenwasserstoffe, schwefel- und chlorhaltige Verbindungen sowie Spurenelemente enthält. Teer ist vor allem ein Problem für die technischen Installationen der weiteren Synthesegas-Umsetzung. Bei tiefen Tem-

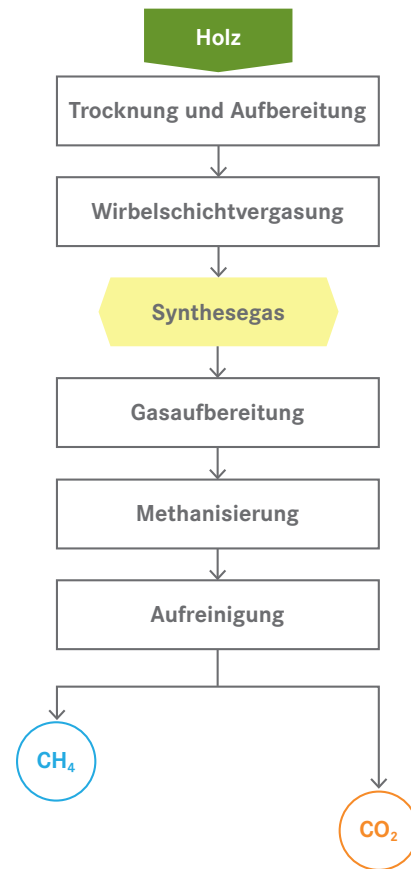


Abb. 16 Die Synthesegas-Bioraffinerie am Beispiel der Methanproduktion.

peraturen kondensiert Teer und verstopft Ventile, Rohrleitungen und Wärmeüberträger. Bei hohen Temperaturen polymerisiert Teer zu komplexen Strukturen. Die Schwefelverbindungen und Spurenelemente wiederum deaktivieren selbst in kleinsten Konzentrationen im ppm-Bereich die Katalysatoren der nachfolgenden Syntheseschritte.

Die heute bekannten Gasreinigungstechnologien beruhen auf mehrstufigen Prozessen, bei jeweils unterschiedlichen Temperaturen der Teilprozesse. Feststoffpartikel werden zum Beispiel in Gewebefiltern bis zu 200 °C oder in Keramik- oder Sandbettfiltern auch bei höheren Temperaturen abgeschieden. Anschliessend wird das Synthesegas weiter abgekühlt, um bei Raumtemperatur zum Beispiel mit einem Biodiesel-Wäscher Stoffe wie Teer, Wasser und organische Schwefelverbindungen zu entfernen. Die verbleibenden Verunreinigungen können unter anderem mit einem Sorptionsmittel bei 350 °C gebunden werden. Die Gasreinigung in einem Fischer-Tropsch-Prozess

ist selbst bei Verwendung von Erdgas als Ausgangsstoff einer der teuersten Verfahrensschritte. Bei Verwendung von Biomasse ist mit einer Verdoppelung der Gasreinigungskosten gegenüber der Verwendung von fossilem Erdgas zu rechnen (Zhang, 2010). Die Verbesserung der Gasreinigung

ist dementsprechend ein aktuelles Thema, das auch im Rahmen des NFP 66 behandelt wurde (siehe «Entwicklung einer Hochtemperatur-Gasreinigung» und «Weiterentwicklung von schnellen und hochempfindlichen Analyseverfahren von Verunreinigungen im Syngas»).

Entwicklung einer Hochtemperatur-Gasreinigung – Erkenntnisse aus dem NFP66-Projekt Biollaz (PSI)

Um die oben beschriebenen wiederholten Abkühl- und Aufheizschritte in der derzeitigen Gasreinigungstechnologie zu vermeiden, wurde in diesem Projekt die Hochtemperatur-Gasreinigung weiterentwickelt (Rhyner, 2013; Heidenreich et al., 2016). Dafür ist eine Aufreinigungssequenz bestehend aus einem keramischen Hochtemperatur-Filter, einem Reformer zur Teerzerstörung und einer Hochtemperatur-Adsorption vorgesehen, bei der alle Prozesse bei Vergasertemperatur stattfinden.

Im Rahmen der Aktivitäten zur Heissgasreinigung konnte gezeigt werden, dass für den Abbau aller kritischen Störstoffe für den vielversprechendsten Reformierungskatalysator die optimale Betriebstemperatur 850 °C beträgt. Dies setzt voraus, dass eine entsprechend geeignete Heissgasfiltration kommerziell verfügbar ist. Bisher sind Filtrationstemperaturen bis 600 °C gut möglich. Die Optimierung der einzelnen Prozessschritte muss somit von Fall zu Fall durchgeführt werden.

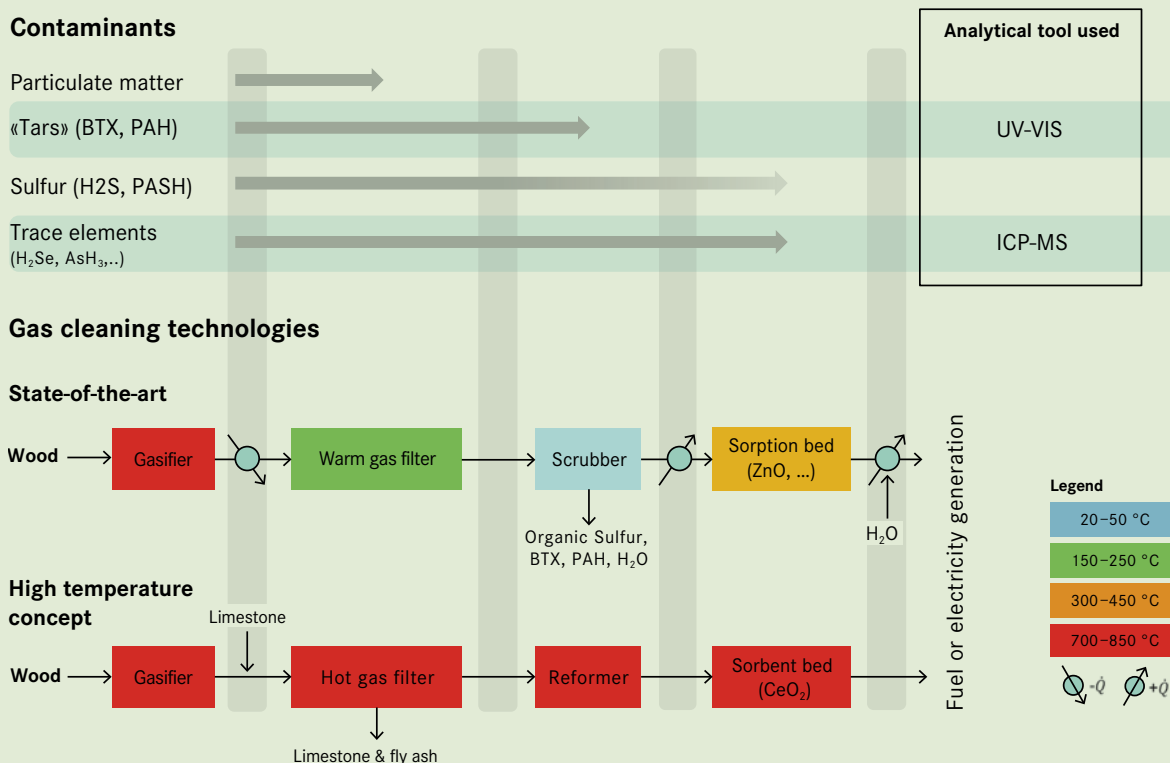


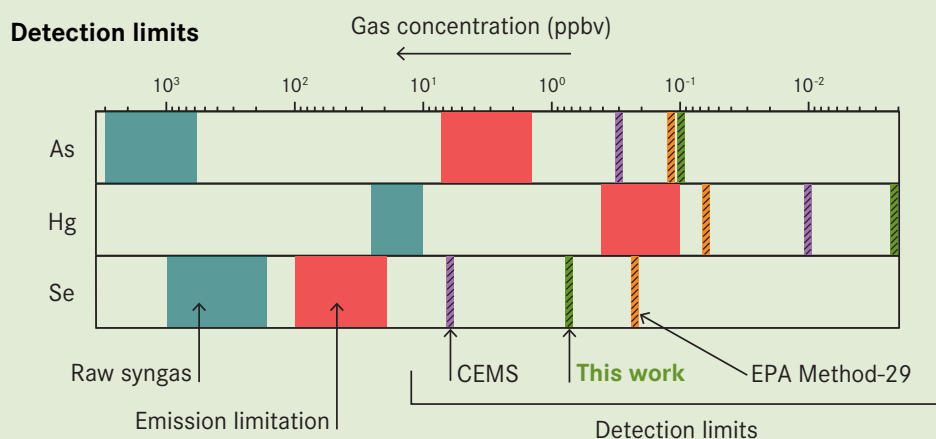
Abb. 17 Mit der Entwicklung einer Hochtemperatur-Syngasreinigung lassen sich die verschiedenen Klassen an Verunreinigungen ohne Abkühl- und Aufheizschritte bei der Vergasertemperatur abtrennen – Biollaz, PSI.

Weiterentwicklung von schnellen und hochempfindlichen Analyseverfahren von Verunreinigungen im Syngas – Erkenntnisse aus dem NFP66-Projekt *Biollaz* (PSI)

Für die Entwicklung und Beurteilung dieser Reinigungsstufen sind schnelle und hochempfindliche Analyseverfahren zur Messung der Verunreinigungen weiterentwickelt worden (ICP-MS, UV-VIS) (Edinger et al., 2016a; Edinger et al., 2016b). Insbesondere die deutlich gesteigerten Möglichkeiten mit dem ICP-MS erlauben die Beurteilung des gereinigten Synthesegases für verschiedene Anwendungen (hocheffiziente Stromerzeugung, Synthese von CH_4 , flüssige Treibstoffe). Dies ist von Bedeutung für verschiedene Holzsortimen-

te u.a. Altholz und naturbelassenes Holz. Zurzeit werden neue analytische Online-Verfahren zur Partikelgrößen-aufgelösten Elementaranalyse von Aerosolen entwickelt (SMPS-ICPMS) (Hess et al., 2015). Erst kürzlich wurde gezeigt, dass diese Methode zur Analyse von Holz-Verbrennungsgasen eingesetzt werden kann (Hess et al., 2016).

Diese verbesserten Messverfahren erlauben u.a. die zielgerichtete Charakterisierung verschiedener Sorptionsmittel bei unterschiedlichen Bedingungen, u.a. hohen Temperaturen, um eine optimale Prozessauslegung zu erreichen.



Calibration curves

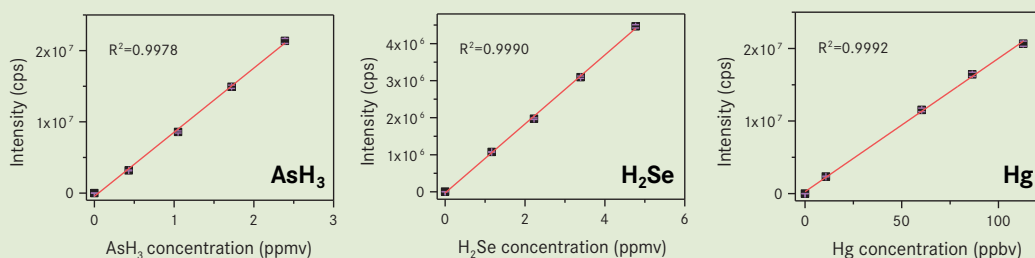


Abb. 18 Die Weiterentwicklung von schnellen Analyseverfahren erlaubt die Beurteilung des gereinigten Syngases für den katalysierten Down-stream-Prozess wie zum Beispiel die Methanisierung – *Biollaz*, *PSI*.

Umwandlung des Synthesegases in die Zielprodukte

Der dritte Prozessblock der Synthesegas-Plattform ist die Umwandlung des Synthesegases in die verschiedenen Zielprodukte. Abbildung 19 gibt eine Übersicht über die häufigsten Produkte dieser Plattform. Die entsprechenden Technologien wurden schon seit den 1920er-Jahren entwickelt, damals ausgehend von Kohlevergasung. Durch geeignete Auswahl von Katalysatoren, Temperatur-/Druckbereich und Reaktorbauform kann der Umsatz auf das gewünschte Produkt gelenkt werden. Während Fischer-Tropsch-Verfahren (Eisen- oder Kobalt-Katalysatoren) und die Methanol-Synthese (Kupfer-Zinkoxid-Katalysatoren) bei Temperaturen unter 250 °C und hohen Drücken die beste Performance haben, erlauben Nickelkatalysatoren auch bei höheren Temperaturen und tieferen Drücken die Erzeugung von Methan (auch als «Bio Synthetic Natural Gas» oder bioSNG bezeichnet).

Die zugehörigen Prozesse basieren auf verschiedenen Katalysatoren und sind mit Blick auf die dabei ablaufenden chemischen Reaktionen gut untersucht. Das Aufskalieren der Prozesse auf In-

dustriemasstab stellt allerdings immer noch eine Herausforderung dar, insbesondere bei der Verwendung von biobasiertem Synthesegas. Im Rahmen des NFP 66 beschäftigten sich zwei Projekte mit der Sekundärbioraffination von Synthesegas (siehe «Methanisierung von Synthesegas in einem Wirbelschichtreaktor» und «Herstellung von ultra-reinem Wasserstoff»).

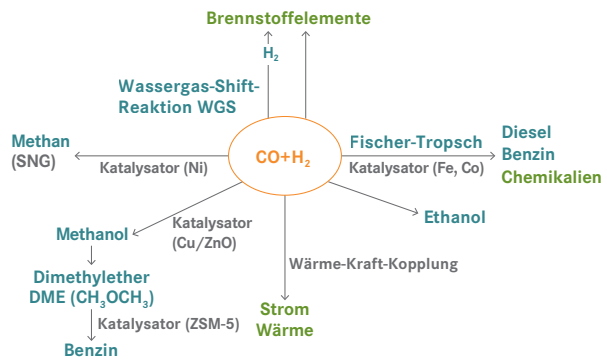


Abb. 19 Die bekanntesten Produkte einer Synthesegas-Bioraffinerie (angepasst von Zhang, 2010).

Methanisierung von Synthesegas in einem Wirbelschichtreaktor – Erkenntnisse aus dem NFP 66-Projekt Schildhauer (PSI)

Bio-Methan ist ein vielversprechender erneuerbarer Energieträger, da es im Erdgasnetz gespeichert werden kann und damit einer breiten Verwendung offen steht. Dieses Projekt untersuchte die Reaktionen der Erzeugung von Methan aus Holz und die Fluidynamik im eingesetzten Wirbelschichtreaktor im Detail (Abb. 20), sodass genaue Computermodelle zur realitätsnahen Reaktorsimulation geschrieben werden können. Diese sind sehr wertvoll für die Optimierung und Aufskalierung des Prozesses auf einen kommerziellen Masstab. Es konnte zudem gezeigt werden, dass die Wirbelschichtmethanisierung sehr viel toleranter gegenüber ungesättigten Kohlenwasserstoffen ist als klassische Festbettreaktoren. Diese ungesättigten Kohlenwasserstoffe, insbesondere Ethylen, Acetylen und Benzol, sind Bestandteile jedes Synthesegases aus allothermen Holzvergäsern. In bisherigen Prozessketten müssen sie sehr aufwendig entfernt werden; ein Wirbelschichtreaktor hingegen kann sie zu einem wertvollen Pro-

dukt umwandeln (Tschedanoff, 2013). Dies wiederum vereinfacht die Gasreinigung und erlaubt es, Investitionskosten einzusparen.

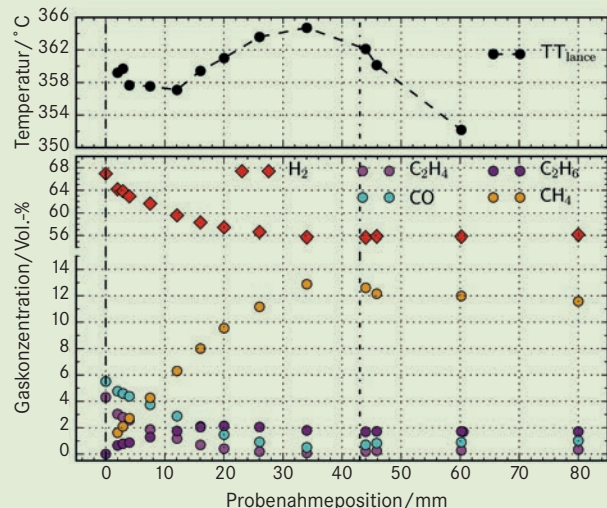


Abb. 20 Das Projekt untersuchte die Reaktionen der Erzeugung von Methan aus Holz in einem Wirbelschichtreaktor. Die Grafik zeigt Messdaten zur Ethen-Hydrierung unter Anwendung von Kohlenmonoxid – Schildhauer, PSI.

Herstellung von ultrareinem Wasserstoff – Erkenntnisse aus dem NFP 66-Projekt Müller (ETHZ)

Der Fokus dieses Projekts lag auf der Herstellung von ultrareinem Wasserstoff aus Holz. Damit dieser in Brennstoffzellen zur Stromproduktion verwendet werden kann, muss die Verunreinigung durch Kohlenstoffmonoxid geringer als 50 ppm sein. Heutzutage wird Wasserstoff vornehmlich durch Dampfreformierung von Methan hergestellt, was nur in sehr grossen Anlagen möglich ist. Daher eignet sich dieser Prozess nicht, um den Rohstoff Holz, der dezentral anfällt, in Wasserstoff zu verwandeln. Das Team von Müller schlägt daher einen modifizierten Prozess vor, bei dem die Biomasse zuerst vergast wird. Das Synthesegas reduziert anschliessend Eisenoxid (Fe_2O_3) zu Eisen (Fe), das mit Dampf und, im letzten Schritt mit Luft, unter der Produktion von Wasserstoff zurück zu Fe_2O_3 oxidiert wird. Das wiederholte Durchführen dieses Kreislaufs erfordert Eisenoxid-Materialien mit einer hohen Redox-Stabilität, was eine der Herausforderungen dieses Prozesses ist. Es gelang den Forschern, ein Material

herzustellen, welches über 15 Redoxzyklen eine hohe Reaktivität gegenüber CO und CH_4 aufwies (Imtiaz et al., 2015). Die Untersuchungen haben auch gezeigt, dass für Materialien, welche mit Kupferoxid modifiziert wurden, Kohlenstoffablagerungen auf der Oberfläche der Materialien fast vollständig vermieden werden konnten (Imtiaz et al., 2014; Imtiaz et al., 2016). Im Gegensatz zu konventionellen Eisenoxid-Materialien wurde der im nachfolgenden Prozessschritt produzierte Wasserstoff nicht übermässig durch Oxidationsprodukte wie z.B. CO verunreinigt (Abb. 21). In weiteren Untersuchungen enthielt das Synthesegas die schwefelhaltigen Substanzen H_2S , COS und $\text{C}_4\text{H}_4\text{S}$. Üblicherweise wird im Lauf der Reduktion von Fe_2O_3 zu Fe Eisensulfid (FeS) gebildet, das bei der Oxidation mit Wasser zu H_2S und SO_2 oxidiert wird und dadurch den produzierten Wasserstoff verunreinigt. Mit den mit CuO modifizierten Eisenoxid-Materialien wurde die Bildung von H_2S und SO_2 erheblich verzögert und fand erst statt, als die Wasserstoffproduktion bereits nahezu abgeschlossen war.

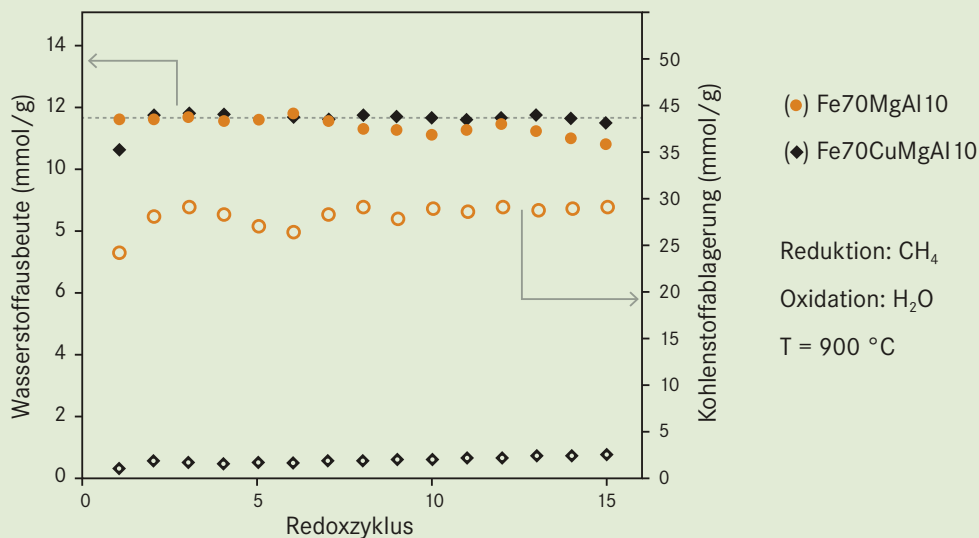


Abb. 21 In einem Kreisprozess wird aus Holz, bzw. Synthesegas, Wasserstoff gewonnen, indem Eisenoxid (Fe_2O_3) mit Synthesegas zu Eisen (Fe) reduziert wird, das mit Dampf und Luft unter Produktion von Wasserstoff zurück zu Fe_2O_3 oxidiert wird. Über 15 Redoxzyklen konnte mit CO (●) eine hohe Wasserstoffausbeute erzielt werden, während mit CH_4 (◆) aufgrund von fester Kohlenstoffabscheidung auf dem Eisenoxid die Ausbeuten mit zunehmender Zyklusnummer sanken. Offene Symbole geben die Kohlenstoffablagerung an und die gefüllten Symbole die Wasserstoffausbeute. Die Promotion von Fe_2O_3 mit CuO reduziert die Kohlenstoffablagerung erheblich – Müller, ETHZ.

Pyrolyseöl-Plattform

Als Pyrolyse bezeichnet man die thermische Zersetzung von Biomasse unter Luftabschluss bei Temperaturen von 450 bis 600 °C. Läuft die Pyrolyse bei sehr kurzen Aufheiz- und Abkühlzeiten sowie Reaktionszeiten im Bereich von Sekunden ab, handelt es sich um eine Schnellpyrolyse, die als Hauptprodukt Pyrolyseöl liefert. Bei diesen hohen Temperaturen reagieren die Gasprodukte und kondensieren beim Abkühlen zu Pyrolyseöl, einer Mischung aus über 350 verschiedenen Verbindungen wie Säuren, Aldehyden, Ketonen und aromatischen Molekülen. Der Rest der Biomasse wird zu ungefähr gleichen Teilen in Gase und Feststoffe, dem Pyrolysekoks, zersetzt (Hofbauer et al., 2016). Pyrolyseöl ist das zentrale Intermediat dieser Plattform. Dieses Bio-Öl ist eine Emulsion von öligen, organischen Substanzen in einer wässrigen Phase, die auch wasserlösliche, organische Substanzen enthält.

Dieses Bio-Öl muss erst weiterbehandelt werden, bevor es als Treibstoff verwendet werden kann. Die wichtigsten Gründe, die einen direkten Einsatz als Treibstoff verhindern, sind die hohe Azidität und ein hoher Sauerstoffgehalt, die korrosive Eigenschaften sowie einen tiefen Heizwert zur Folge haben. Ausserdem enthält das Öl viele reaktive Komponenten, sodass die Polymerisationsreaktionen bereits während der Lagerung oder im Verlauf der weiteren thermischen Prozesse einsetzen, was die Viskosität und Instabilität der Emulsion erhöht.

Die klassische Schnellpyrolyse wurde weiterentwickelt zur katalytischen Schnellpyrolyse, um die Qualität des Bio-Öls zu verbessern (Lin und Huber, 2009). Die katalytische Schnellpyrolyse eignet sich auch zur Produktion von aromatischen Verbindungen, wenn als Ausgangsstoff Lignin eingesetzt wird (Alonso et al., 2010). Lignin ist allerdings noch schwieriger katalytisch in Zielprodukte umwandelbar als Hemicellulose und Cellulose. Dementsprechend bleiben noch mehr Reststoffe zurück, die nicht in die gewünschte Flüssigkeit umgewandelt werden können. Lignin macht aber als eine der drei wichtigsten Substanzen im Holz rund 40 Gewichtsprozent des Energiegehalts aus und sollte daher kosteneffizient valorisiert werden. Bei der katalytischen Schnellpyrolyse wird das Lignin über säurekatalysierte Reaktionen und unter Abspaltung sauerstoffhaltiger Gruppen (Dealkoxylierung) in Aromaten und Phenole umgewandelt. Die Wirksamkeit des Verfahrens wächst entsprechend der Anzahl Säuregruppen auf dem Katalysator und

erlaubt Ausbeuten von über 70% w/w bezogen auf das Lignin (Ma et al., 2012). Die katalytische Pyrolyse ermöglicht also die gezielte Herstellung von phenolischen und aromatischen Stoffen in hohen Ausbeuten, allerdings ist der wirtschaftliche Wert dieser Produkte eher gering (Vispute et al., 2010). Um wertvollere substituierte Phenole wie Vanillin, Syringaldehyd oder p-Hydroxybenzaldehyd, die wichtige Aroma- beziehungsweise Zwischenprodukte für die Synthese von Chemikalien sind, aus Lignin herstellen zu können, müssen ausgewählte chemische Bindungen im Lignin selektiv gespalten werden. Zudem muss bei der Wahl der Reaktionsbedingungen der höheren Reaktivität respektive geringeren Stabilität dieser Moleküle Rechnung getragen werden.

Untersuchungen zur katalytischen Schnellpyrolyse von Lignin – Erkenntnisse des NFP 66-Projekts Vogel (PSI, FHNW)

In diesem Projekt wurden die komplexen Vorgänge während der katalytischen Schnellpyrolyse untersucht, um Kenntnisse über die chemische Reaktivität verschiedener Lignine zu erhalten (Ma et al., 2015). Dazu wurden die Lignine von Buche, Fichte, Pappel und Kiefer, die mit drei verschiedenen Extraktionsmethoden (Säure-Hydrolyse, Ether-Extraktion und Organosolv-Verfahren) gewonnen wurden, mit verschiedenen Methoden auf ihre Struktur und Reaktivität hin untersucht (Abb. 22). Es zeigte sich, dass vor allem die Extraktionsmethode und die Pyrolysetemperatur einen grossen Einfluss auf die Radikalbildung und -konzentration sowie auf die Produktaus-

beute und das -spektrum haben. Die botanische Herkunft des Lignins hingegen spielt eine untergeordnete Rolle (Bahrle et al., 2015). Lignine, die unter harschen Bedingungen wie im Organosolv-Verfahren gewonnen wurden, eignen sich am wenigsten für die Produktion von wertvollen Phenolen. Solche Lignine weisen typischerweise tiefere Molekulargewichte und stabilere Bindungen (C-C) auf. Demgegenüber verfügen Lignine, die unter milden Bedingungen extrahiert wurden, tendenziell über grössere Molekulargewichte und labilere Bindungen (C-O-C) (Custodis et al., 2015). Die Ergebnisse zeigten aber, dass die chemischen Bindungen noch nicht systematisch selektiv gespalten werden können, sodass zusätzliche Forschung nötig ist.

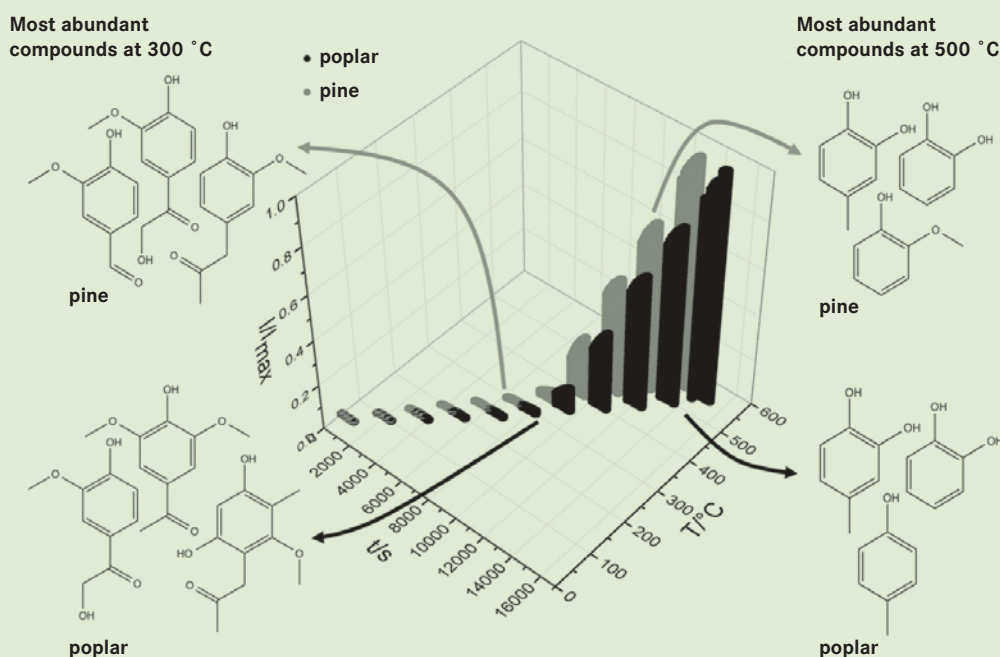


Abb. 22 Normalisierte Radikalkonzentrationen von Pappel- und Kieferholz während der Schnellpyrolyse sowie die am häufigsten vorhandenen Verbindungen, welche die Probe bei 300 und 500 °C verlassen (Bahrle et al., 2014) – Vogel, PSI, FHNW.

Durch die Depolymerisation des Lignins in einer wässrigen Umgebung bei mildereren Temperaturen als bei der Schnellpyrolyse können die chemisch wertvolleren Produkte wie Vanillin mit einer höheren Ausbeute gewonnen werden. Ein solches Verfahren wird seit Langem kommerziell eingesetzt,

um aus der Sulfitablaue der Zellstoffherstellung Vanillin herzustellen. Im Rahmen des NFP 66 wurde untersucht, ob sich dieses Verfahren in der wässrigen Phase auch auf andere Lignine anwenden lässt und ob noch andere wertvolle Produkte in ähnlicher Ausbeute gewonnen werden können.

Untersuchungen zur oxidativen Depolymerisation von Lignin – Erkenntnisse des NFP 66-Projekts Vogel (PSI, FHNW)

In diesem Projekt wurde untersucht, ob sich reaktive und instabile Zwischen- und Endprodukte aus der oxidativen Depolymerisation des Lignins während der Depolymerisation abtrennen und stabilisieren lassen. Dazu wurde mit einem zweiphasigen Reaktionsmedium experimentiert, das aus einer wässrigen und einer organischen Phase bestand. Unterschiedliche Lignine wurden in der wässrigen Phase gelöst beziehungsweise

suspendiert und mit einer organischen, wasserunlöslichen Phase gemischt. Sauerstoff unter Druck und im Wasser gelöste Kupferionen führten zu einer oxidativen Depolymerisation der Lignine. Die organischen Produkte (wie das Vanillin) wurden dabei direkt während der Reaktion in die organische Phase extrahiert. So konnte eine Vanillinausbeute von bis zu 1,4% des Lignins erreicht werden, was einer 14-fachen Steigerung gegenüber einem Versuch ohne zweite organische Phase entspricht.

Wärme- und Stromplattform

Die Wärme- und Stromplattform kann ein zentraler Teil einer Bioraffinerie sein, da der Betrieb einer Bioraffinerie einen erheblichen Bedarf an Elektrizität für den Antrieb von Hilfsaggregaten und an Prozesswärme für thermische Verfahrensschritte aufweist. Die Bereitstellung von Wärme und Strom erfolgt in Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung aus rohem Holz, aus einem Intermediat (zum Beispiel Synthesegas) oder aus Rückständen der Bioraffinerie. In grösseren Anlagen wird dazu zum Beispiel Dampf erzeugt, der vorab für Hochtemperatur-Prozesswärme oder zum Antrieb einer Dampfturbine zur Stromerzeugung genutzt wird, während die Wärme auf tieferem Temperaturniveau zu Heizzwecken dient. Durch Wärme-Kraft-Kopplung wird der Brennstoff deshalb effizienter genutzt als durch alleinige Stromproduktion, bei der die Abwärme über Kühltürme an die Umgebung abgegeben wird. Wichtigste Anwendung von Energieholz ist heute noch die Versorgung von Gebäuden mit Raumwärme und Warmwasser. Holz ergänzt als speicherbarer Energieträger auch die Nutzung von Solarwärme, die auf eine Zusatzheizung zur Produktion von «Heat on Demand» angewiesen ist. Da solche Niedertemperaturanwendungen jedoch auch mit Wärmepumpen aus Umgebungswärme bereitgestellt werden können, wird Holz in Zukunft zunehmend für die Bereitstellung von Prozesswärme von über 200 °C entscheidend, da diese Anwendungen heute vorwiegend mit fossilen Energieträgern gedeckt werden und Wärmepumpen dafür ungeeignet sind.

Für die Wärme- und Stromplattform kommt heute die Verbrennung in Kombination mit Dampfturbinen (ab 5 MWe) sowie ORC-Anlagen (ab 500 kWe) zum Einsatz. In Zukunft könnte auch vermehrt die Holzvergasung genutzt und in grösseren Anlagen als Kombikraftwerk höhere elektrische Wirkungsgrade ermöglichen. Die wichtigsten Herausforderungen der heutigen Verbrennungstechniken sind die Schadstoffemissionen an Feinstaub, organischen Verbindungen und Stickoxiden (NO_x) (Nussbaumer, 2013), weshalb im Rahmen eines NFP 66-Projekts Konzepte zur Optimierung von Rostfeuerungen entwickelt werden (siehe «Optimierung der Rostfeuerung»).

Optimierung der Rostfeuerung – Erkenntnisse aus dem NFP 66-Projekt *Nussbaumer* (HSLU)

Holzsortimente von niedriger Qualität weisen oft einen hohen Aschegehalt sowie einen schwankenden Wassergehalt auf. Heutige Rostfeuerungen erzielen für diese Sortimente bei stationärem Nennlastbetrieb eine hohe Ausbrandqualität, weisen aber nur eine begrenzte Teillastfähigkeit auf und verursachen hohe Stickoxidemissionen aus dem im Holz gebundenen Stickstoff. Gründe sind Hotspots an Orten der Lufterindüsung sowie eine inhomogene Luftverteilung über die Rostlänge und an den Brennkammerwänden (Martinez-Garcia und Nussbaumer, 2015). Um die Teillastfähigkeit und die Luftverteilung zu verbessern, wurde in diesem Projekt eine Vorschubrostfeuerung entwickelt, die über vier Rostzonen verfügt, deren Be-

wegung und Luftversorgung separat geregelt und optional mit Abgasrezirkulation ergänzt werden kann. Im Weiteren wurden die Wandeffekte durch eine Anpassung der wandnahen Rostelemente reduziert. Die optimierte Feuerung kann damit auch im Teillastbetrieb ab rund 30% Nennlast und bei erhöhtem Aschegehalt einen vollständigen Ausbrand mit homogenem Brennstoffbett erzielen. Der stabilere Betrieb bei Teillast ermöglicht auch den Einsatz der Feinstaubabscheidung mit hoher Verfügbarkeit. Dank Betrieb mit tiefem Luftüberschuss im Rostbereich und dadurch unterstützter Luftstufung können zudem die Stickoxidemissionen um 25% gesenkt werden (Abb. 23). Die neue Technologie erlaubt damit, auch Holzsortimente von minderwertiger Qualität ohne erhöhte Schadstoffemissionen zu nutzen und dadurch den Beitrag von Holz zur Energieversorgung zu erhöhen.

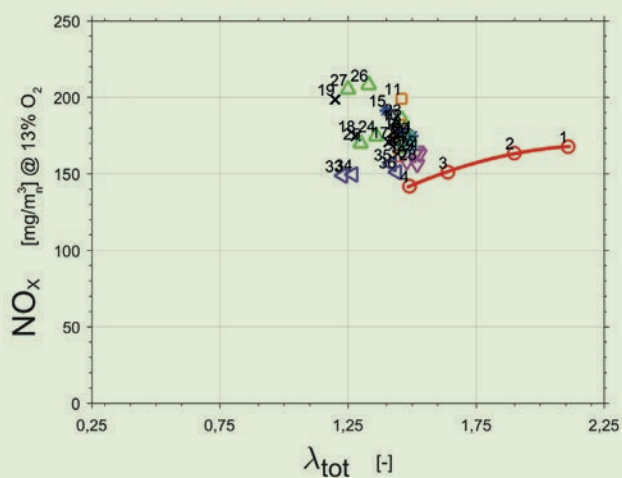
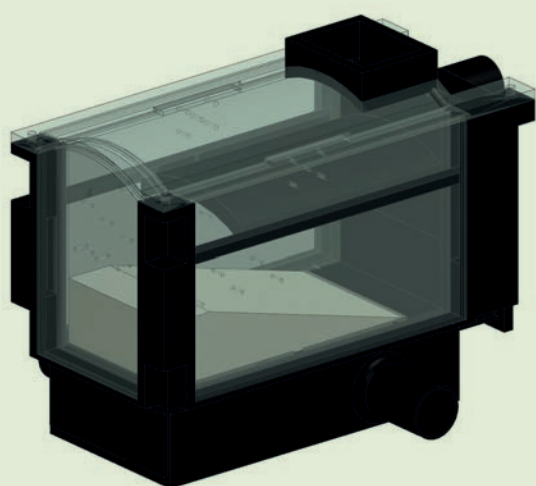


Abb. 23 Durch die Entwicklung einer Vorschubrostfeuerung für Holzsortimente minderer Qualität wurde ein stabilerer Betrieb bei Teillast ermöglicht und die Stickoxidemissionen um 25% gesenkt. Bild links: Modell des Feuerraums für Strömungsmessungen. Grafik rechts: Stickoxidemissionen in Funktion der Gesamtluftüberschusszahl für verschiedene Lufteinstellungen. Die Einstellungen 1 bis 4 (rote Linie) zeigen den Einfluss einer sukzessiven Absenkung des Luftüberschusses in der Primärzone von 1,3 auf 0,7. Optimale Bedingungen mit gestufter Verbrennung werden am Punkt 4 bei einem Primärluftüberschuss von 0,7 mit Stickoxidemissionen von 142 mg/m³ erzielt. Die CO-Emissionen liegen dabei mit 14 mg/m³ mehr als eine Größenordnung unter dem Emissionsgrenzwert und der Gesamtluftüberschuss von 1,5 ermöglicht gleichzeitig einen Wirkungsgrad von deutlich über 90%. (Die weiteren nicht diskutierten Messpunkte resultierten aus anderen Prozesskonfigurationen.) – Nussbaumer, HSLU.

Bewertung und Vergleich der Plattformen

Die möglichen Prozesse zur Verarbeitung von Holz zu verschiedenen Produkten sind sehr vielfältig, wie in diesem Kapitel aufgezeigt wurde. Die Projekte des NFP 66 verteilen sich über das gesamte mögliche Spektrum. Ein systematischer Vergleich und damit eine Bewertung der oben vorgestellten innovativen Umsetzungsverfahren von Holz, die Teil einer optimalen Bioraffinerie sein können, stellt eine grosse Herausforderung dar. Ein zentraler Unsicherheitsfaktor ist das frühe Entwicklungsstadium, in dem viele der Technologien und Verfahren noch stehen. Die Daten, die für den Vergleich verwendet werden, basieren daher meist auf Experimenten im kleinen Massstab und sind noch nicht im industriellen Einsatz validiert. Trotzdem kann eine vergleichende Analyse, wie sie unter Leitung von François Maréchal im Rahmen des NFP 66 durchgeführt wurde, bereits in diesem frühen Stadium wertvolle Hinweise für die Entwicklung der Prozesse liefern. Von diesen Hinweisen können Forschung, Industrie und Politik profitieren (siehe «Entwicklung einer Informatikplattform zur Bewertung von Umwandlungsoptionen von Holz zu Chemikalien», «Fallstudie: Vergleich

der Herstellung von verschiedenen Produkten in einer Schweizer holzbasierten Bioraffinerie nach ökonomischen und ökologischen Kriterien» und «Fallstudie: Vergleich der Ressourceneffizienz verschiedener holzbasierter Produkte»).

Welche der Prozesse schliesslich industriell erfolgreich implementiert und miteinander kombiniert werden, lässt sich zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorhersagen. Wie im Kapitel zur «Bioökonomie im internationalen Umfeld» und im Kapitel zur «Situation in der Schweiz» dargestellt, gibt es sowohl Demonstrationsanlagen, die auf biochemischen als auch thermochemischen Umwandlungsprozessen beruhen und in welchen die industrielle Eignung der Prozesse untersucht wird. Für alle Plattformen ist weitergehende Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig, insbesondere, um eine Bioraffinerie kostengünstig und robust gestalten zu können. Nur so kann sie mit den herkömmlichen, auf fossilen Rohstoffen beruhenden Prozessen konkurrieren. Offene Punkte betreffen zum Beispiel den Einfluss der Rohstoffqualität und der schwankenden Verfügbarkeit auf den Output des Prozesses.

Entwicklung einer Informatikplattform zur Bewertung von Umwandlungsoptionen von Holz zu Chemikalien – Erkenntnisse aus dem NFP 66-Projekt Maréchal (EPFL/ETHZ)

Im Rahmen des NFP 66-Projekts «Wood2Chem» wurde unter Leitung von François Maréchal an der EPFL eine Informatikplattform zur Entscheidungshilfe für die Konzeption einer Bioraffinerie entwickelt. Diese erlaubt es, Bioraffinerie-Systeme zu entwerfen und die energetische, wirtschaftliche und ökologische Performance der betrachteten Prozesse unter Nutzung von Synergieeffekten an einem Produktionsstandort zu prognostizieren. «Wood2Chem» stellt die Technologien und Umwandlungsprozesse von Holz in Produkte einer übergeordneten Struktur – einer sogenannten Superstructure (Abb. 24) – dar. Die Verwendung von der Struktur hinterlegten thermodynamischen Modellen, die in Zusammenarbeit mit der Gruppe von Konrad Hungerbühler (ETHZ) entwickelt wurden, erlaubt es, die Gesamtheit der möglichen Wechselwirkungen im System in Abhängigkeit der gewählten Technologien zu modellieren (Mo-

rales et al., 2016). Abbildung 24 zeigt den Aufbau einer solchen übergeordneten Struktur am Beispiel der Verknüpfung der Lignocellulose- und Syngas-Plattform. Die Software ist modular aufgebaut und nutzt Prozessmodelle, die laufend aktualisiert werden oder gänzlich neu hinzugefügt werden können.

Die Informatikplattform verwendet eine innovative Berechnungsmethode, die auf der multikriteriellen Optimierung basiert (Maronese et al., 2015) und die systematische Konfigurierung möglicher Bioraffinerien und die Klassierung der Konzepte in Bezug auf thermodynamische (Aufwertung der Ressource), ökonomische (Investitions- und Betriebskosten, aktueller Marktwert und Amortisierung) und ökologische (Emissionen von Treibhausgasen und Frischwasserverbrauch) Indikatoren erlaubt. Sie stellt daher ein potenziell sehr wertvolles Instrument zur Entscheidungshilfe für zukünftige Bioraffinerie-Konzepte dar, wie in der Fallstudie zu einer holzbasierten Schweizer Bioraffinerie verdeutlicht (siehe nächste Seite).

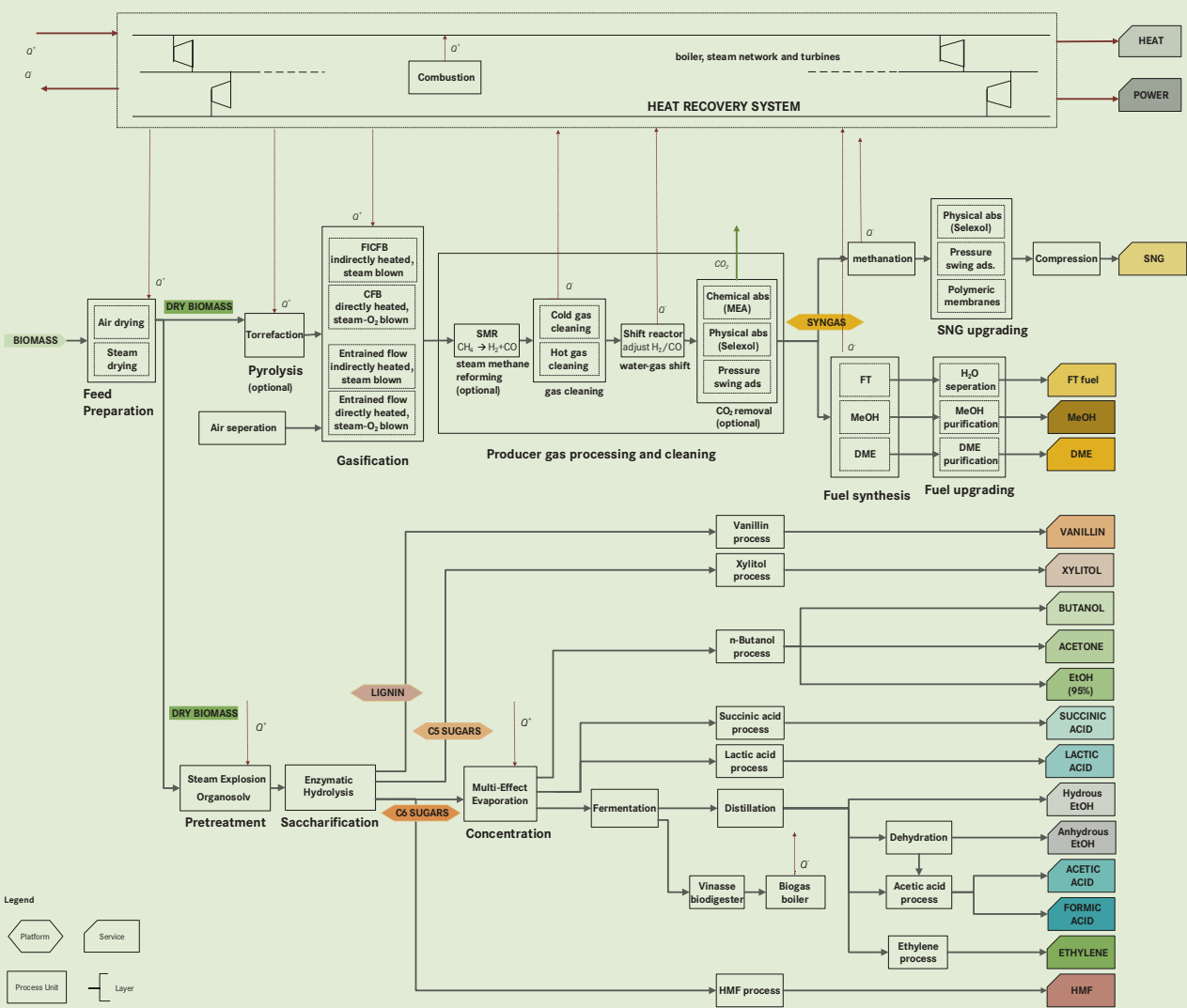


Abb. 24 Superstruktur einer integrierten Zwei-Plattformen (Lignocellulose und Synthesegas)-Bioraffinerie – Maréchal, EPFL (angepasst von Celebi et al., 2017).

Fallstudie: Vergleich der Herstellung von verschiedenen Produkten in einer Schweizer holzbasierten Bio Raffinerie nach ökonomischen und ökologischen Kriterien – Erkenntnisse des NFP66-Projekts *Maréchal* (EPFL)

Eine Fallstudie, die mithilfe von «Wood2Chem» durchgeführt wird (Celebi et al., 2017), bewertet die Herstellung von verschiedenen Produkten in einer auf Schweizer Holz basierten Bio Raffinerie, in welcher die Lignocellulose-Plattform und die Synthesegas-Plattform integriert sind. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine kombinierte Herstellung von Bernsteinsäure (succinic acid) über die Lignocellulose-Plattform und DME, Methanol oder SNG (Synthetic Natural Gas), über die Synthesegas-Plattform wirtschaftlich am besten abschneidet (Abb. 25). In Bezug auf den Frischwasserverbrauch schneiden Bioethanol und dessen

Derivate am besten ab. Betrachtet man hingegen das Einsparpotenzial von Treibhausgasen, dann führen SNG, Fischer-Tropsch-Diesel, Methanol und Dimethylether aufgrund des Substitutionspotenzials von fossilen Treibstoffen die Rangliste an (Abb. 26). Durch den Integrationsansatz werden die Rückstände der Lignocellulose-Plattform als Rohstoff für die Synthesegas-Plattform verwendet, während die Restwärme den thermischen Bedarf der Lignocellulose-Plattform deckt. Diese Lösungen maximieren die Menge an biogenem Kohlenstoff, der sich in den Produkten befindet. Dies erlaubt es, die Produktionskosten der Produkte durch den Verkauf von Biotreibstoff oder durch die Koproduktion von Strom zu senken. Diese Lösungen sind nicht nur die profitabelsten, sondern auch die klimafreundlichsten.

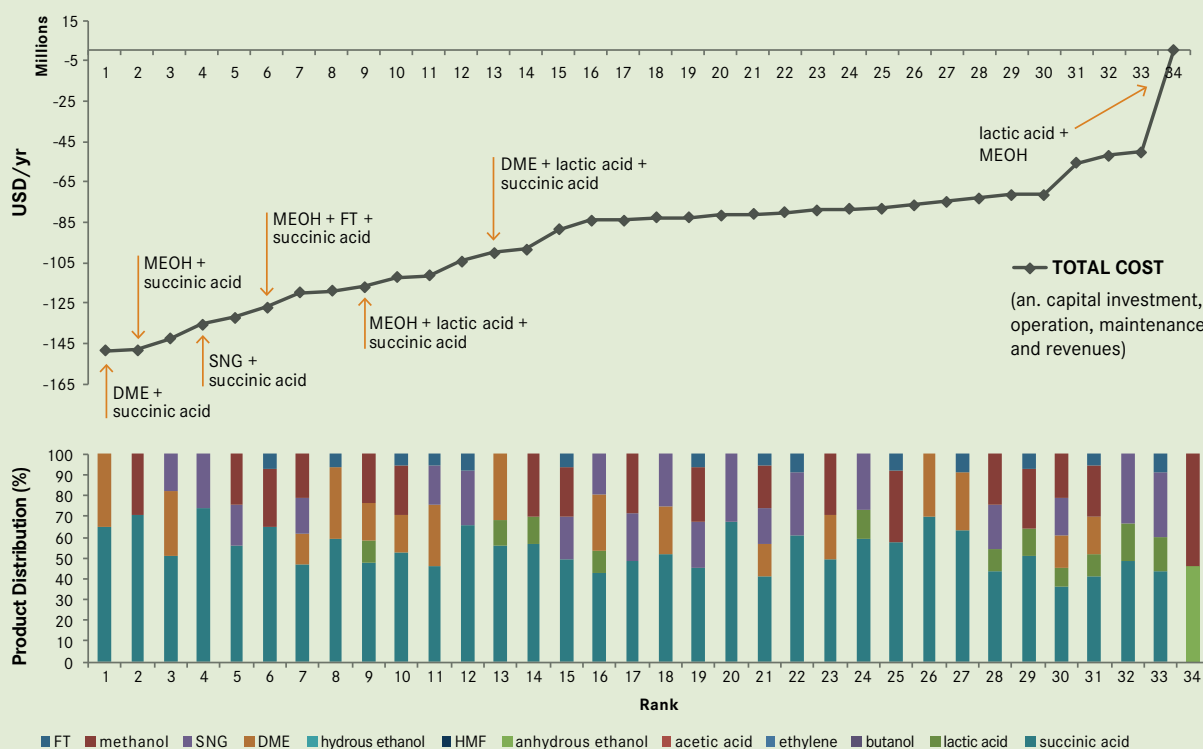


Abb. 25 Optimierung des Produktspektrums einer integrierten Zwei-Plattformen (Lignocellulose und Syngas)-Bio Raffinerie nach ökonomischen Kriterien mithilfe von Wood2Chem – *Maréchal*, EPFL (Celebi et al., 2017).

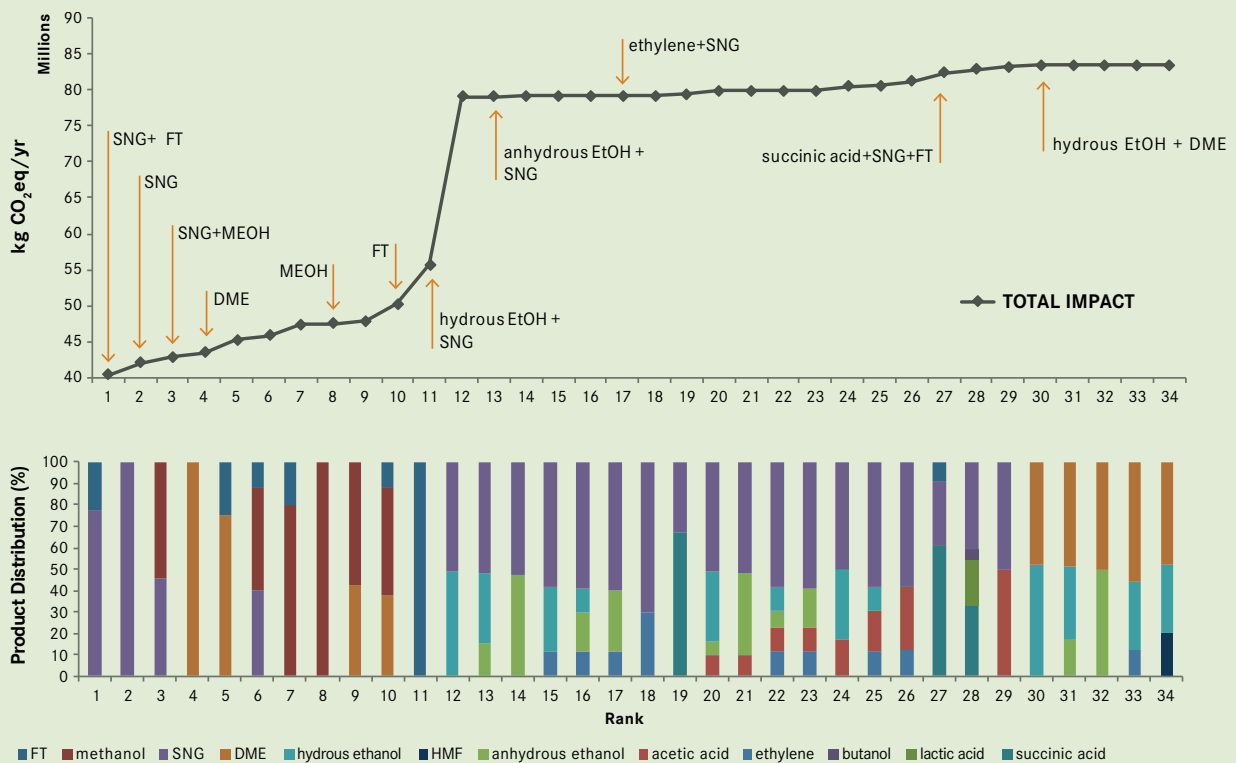


Abb. 26 Optimierung des Produktspektrums einer integrierten Zwei-Plattformen (Lignocellulose und Syngas)-Bioraffinerie nach ökonomischen Kriterien mithilfe von Wood2Chem – Maréchal, EPFL (Celebi et al., 2017).

Fallstudie: Vergleich der Ressourceneffizienz verschiedener holzbasierter Produkte – Erkenntnisse des NFP 66-Projekts Maréchal (EPFL)

Mit steigender Verknappung der Ressource Holz und zunehmendem Klimawandel stellt sich die Frage, welche Umwandlungsverfahren aufgrund des grössten Gesamtwirkungsgrads zu favorisieren sind, oder spezifischer, ob Holz aufgrund des Wirkungsgrads besser verbrannt oder in einer bioraffinerie als Rohstoff genutzt werden soll.

Der grosse Vorteil bei der Nutzung von biogenen Chemikalien sowie Treib- und Brennstoffen ist, dass der Kohlenstoffkreislauf geschlossen wird und damit fossile Kohlenstoffemissionen verhindert werden können. Da die Pflanze beim Wachstum CO₂ aus der Atmosphäre aufgenommen hat, kann der Wirkungsgrad eines Umwandlungsverfahrens an den verhinderten fossilen CO₂-Emissionen im Verhältnis zu dem aus der Atmosphäre durch Photosynthese aufgenommenen CO₂ gemessen werden. Unter Berücksichtigung der Daten zum

Lebenszyklus können die ersetzten fossilen Kohlenstoffemissionen pro Einheit Kohlenstoff im biogenen Produkt berechnet werden (vgl. Tabelle 2). Biogene Produkte haben tendenziell eine höhere Substitutionsrate als biogene Energieträger.

Tab. 2 Verhinderte fossile CO₂-Emissionen pro Einheit Kohlenstoff im biogenen Produkt (Wernet et al., 2016).

	$C_{\text{fossilavoided}} / C_{\text{biogen}}$
Bioprodukte	
Butanol	1,89
Aceton	1,98
Bernsteinsäure	2,30
Milchsäure	3,60
Ethylen	1,45
HMF	1,40
Essigsäure	2,27
Ameisensäure	2,30
Bioenergieträger	
SNG	1,24
DME	1,21
Fischer-Tropsch-Treibstoffe	1,20
Anhydrides Ethanol	1,37
Ethanol (95%)	1,35
Methanol	1,54

Für einen korrekten Vergleich der Ressourceneffizienz der verschiedenen Umwandlungsverfahren muss allerdings der Wirkungsgrad der Kohlenstoffnutzung berücksichtigt werden, da nicht immer die gesamte Biomasse ins jeweilige Produkt umgewandelt werden kann. Als Beispiel wird eine Modell-Bioraffinerie untersucht, die neben der biochemischen Produktion von Milchsäure aus den Reststoffen auch thermochemisch Syngas herstellt (Abb. 27). Die Abwärme der Vergasung sowie ein Teil des Produktgases werden zur Deckung des Wärme- und Strombedarfs der Modell-Bioraffinerie genutzt. Der ersetzte fossile Kohlenstoff kann somit summiert werden. Pro Einheit biogenen Kohlenstoffs werden in der Modell-Bioraffinerie 0,99 Einheiten fossilen Kohlenstoffs ersetzt. Diese Bilanz kann mit derjenigen beim Verbrennen von Holz zur Wärmeversorgung verglichen werden. Unter der Annahme, dass ein Holzkessel (Wirkungsgrad von 85%) einen Erdgaskessel (Wirkungsgrad von 90%) ersetzt, werden pro Einheit biogenen Kohlenstoffs 0,65 Einheiten fossilen Kohlenstoffs ersetzt. Basierend auf dem durch die Photosynthese gebundenen CO₂, ersetzt die Modell-Bioraffinerie also 52% mehr fossilen Kohlenstoff als die entsprechende Verbrennung.

In einer Erweiterung des Modells wird zusätzlich angenommen, dass das in der Bioraffinerie hergestellte Syngas in einem Blockheizkraftwerk in Strom und Wärme umgewandelt wird (Wirkungsgrad von 60%) und der Strom für eine Wärmepumpe mit der Leistungszahl 4 zum Heizen von Wohnraum genutzt wird, um den oben genannten fossilen Gasbrenner zu ersetzen. In diesem Fall können pro Einheit biogenen Kohlenstoffs, die in der Bioraffinerie als Ausgangsstoff eingesetzt wurde, zusätzlich 0,38 Einheiten fossilen Kohlenstoffs ersetzt werden. Insgesamt würde Holz, das in dieser Bioraffinerie verwendet wird, somit 2,1-mal mehr fossiles CO₂ ersetzen als das Holz, das in einem Kessel zum Heizen verbrannt wird.

Der kumulierte Substitutionsfaktor hängt stark von den gewählten Haupt- und Nebenprodukten sowie von den angewandten Umwandlungsverfahren ab. Dennoch zeigen diese Berechnungen, dass eine Modell-Bioraffinerie, die in Bezug auf die Kohlenstoffeffizienz integriert ist und in der Holz zur Herstellung von biogenen Produkten und biogenen Treib- und Brennstoffen genutzt wird, der alleinigen Verbrennung zur Wärmebereitstellung für Heizzwecke in Bezug auf die Ressourceneffizienz überlegen ist.

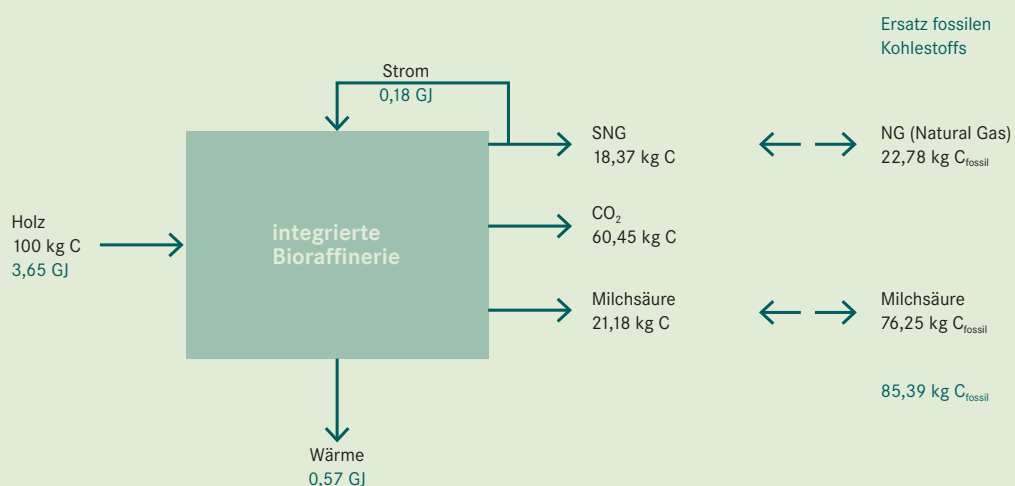


Abb. 27 Fallstudie zur integrierten Milchsäure- und Syngas-Produktion (Celebi et al., 2017).

BIOÖKONOMIE IM INTERNATIONALEN UMFELD

Im Ausland wird teils intensiv die Etablierung einer Bioökonomie und damit auch von Bioraffinerien vorangetrieben. Je nach Umfeld sind die politischen Instrumente unterschiedlich, wobei die Basis häufig eine Bioökonomiestrategie ist.

Internationale Strategien zur Entwicklung einer Bioökonomie

Die Bioökonomie ist ein Wirtschaftssystem, welches im Gegensatz zur erdölbasierten Wirtschaft auf der Erzeugung und Nutzung biogener Ressourcen beruht. Die Notwendigkeit und die potenziellen Vorteile einer Bioökonomie für Wirtschaft und Gesellschaft sind weltweit anerkannt. Sie spiegeln sich auch in der Formulierung entsprechender Entwicklungsstrategien in derzeit 45 Ländern inklusive aller G7-Staaten. Eine Zusammenstellung und ein Vergleich dieser Strategien wurde 2015 vom deutschen Bioökonomierat publiziert (German Bioeconomy Council, 2015a, 2015b).

Länder wie die USA, Deutschland, Finnland, Schweden und Japan haben in einem Top-down-Ansatz umfassende, von den Regierungen koordinierte Bioökonomiestrategien mit ambitionierten Zielen formuliert. Deutschland nimmt bei der Bioökonomie eine internationale Spitzenstellung ein. Als eines der ersten Länder veröffentlichte Deutschland Ende 2010 eine auf sechs Jahre angelegte, ressortübergreifende «Nationale Forschungsstrategie Bioökonomie 2030» (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2010). Darauf folgte die 2013 vom Bundeskabinett beschlossene «Nationale Politikstrategie Bioökonomie» (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2014). Bei der Ausgestaltung der Nationalen Forschungsstrategie

sowie der Politikstrategie wurde die Bundesregierung durch den Bioökonomierat beraten. Das 2009 eingesetzte Gremium ist mit Experten aus verschiedenen Fachdisziplinen aus Wissenschaft und Wirtschaft besetzt, erarbeitet Empfehlungen zur Weiterentwicklung künftiger Forschungsschwerpunkte und setzt sich für den zivilgesellschaftlichen Dialog mit allen gesellschaftlichen Gruppen ein (www.Biooekonomie.de, www.biooekonomierat.de).

Im Gegensatz dazu stützen sich andere Staaten wie Frankreich, Grossbritannien, Italien und Kanada auf einen Bottom-up-Ansatz und damit auf die Initiative der Privatindustrie; sie beschränken sich auf die Schaffung günstiger Rahmenbedingungen. Dabei wird die Bioökonomie zum Beispiel durch Forschungsförderung oder regulative Interventionen auf der Verbrauchsseite wie die Beimischungspflicht von Biotreibstoffen unterstützt.

Generell gibt es in den einzelnen Ländern eine grosse Variation von politischen Zielen und Massnahmen, unter anderem auch deshalb, weil sie sich in Bezug auf den Stand der Industrialisierung und der zur Verfügung stehenden Ressourcen stark unterscheiden. Daher werden in den betroffenen Politikbereichen Energie, Forschung, Bildung, Technologietransfer und Kommerzialisierung unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt. Rohstoffreiche Länder wie die USA und Kanada streben mit der Entwicklung einer Bioökonomie die weitere

Stärkung der traditionell wichtigen Land- und Forstwirtschaftssektoren an und unterstützen damit die ländliche Entwicklung und die Unabhängigkeit von Rohölimporten. Die rohstoffarmen, hoch industrialisierten Länder wie Deutschland oder Japan hingegen sehen die Bioökonomie als Chance für Innovationen und eine industrielle Renaissance, wobei die Bioökonomie auch stark von der EU-Kommission gefördert wird.

Als gemeinsame Ziele der verschiedenen Strategien lassen sich die Reduktion des Treibhausgasausstosses, der Übergang zu einer erneuerbaren Ressourcenbasis, der Erhalt von Ökosystem-Dienstleistungen, erhöhte Innovationskraft und die Schaffung von Arbeitsplätzen nennen. Welche Ansätze und Strategien schliesslich erfolgreich sein werden, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch offen. Im kürzlich abgeschlossenen EU-Projekt «S2Biom» wurde aber bereits jetzt nach besonders erfolgversprechenden europäischen Politikmodellen gesucht. Im Rahmen des Projekts wurde eine Datenbank mit den politischen Massnahmen der europäischen Länder erstellt und anhand von verschiedenen Indikatoren erfolgreiche Massnahmen entlang der Wertschöpfungskette identifiziert. Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis nachwachsender Rohstoffe werden demnach in Deutschland, Österreich und Grossbritannien beispielhaft gefördert, Biotreibstoffe in Dänemark, Grossbritannien und Finnland. Die Identifizierung von nachahmungswürdigen Good-Practice-Beispielen würde erleichtert, wenn verschiedene Länder oder Regionen mit ähnlichen Voraussetzungen gebündelt würden, für die ähnliche Massnahmen sinnvoll sind (Van Dael et al., 2014).

Forschungsförderung mit Bezug zu Bioraffinerien

Die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit Bezug zu Bioraffinerien ist international seit etwa zehn Jahren hoch dotiert. Die USA nehmen international eine Vorreiterstellung ein, seit Präsident George W. Bush 2006 in einer Rede zur Lage der Nation die vermehrte Nutzung von Cellulose-Ethanol forderte. Mittlerweile sind in den USA mehrere Hundert Millionen Dollar an öffentlichen Fördergeldern in die Erforschung, Entwicklung und Demonstration von Bioraffinerie-Konzepten geflossen. Unter anderem fördert das amerikanische Energieministerium drei grosse «Bioenergy Research Centers» über eine Laufzeit von zehn Jahren und schuf ein Kreditbürgschaftsprogramm, bei dem sich Betreiber von Bioraffinerien bewerben können, wenn sie als

Vorreiter die Tauglichkeit noch nicht etablierter Bioraffinerie-Technologien für den industriellen Einsatz demonstrieren möchten.

Auch in der EU kam die Förderung von Bioraffinerie-Projekten in den letzten zehn Jahren in Fahrt. Zum Beispiel wurden im 7. EU-Forschungsrahmenprogramm (2007 bis 2013) Bioraffinerie-Projekte mit einem Gesamtvolumen von 70 Millionen Euro gefördert. Auch im Nachfolgeprogramm Horizon 2020 haben Bioökonomie und Bioraffinerien einen hohen Stellenwert. Zahlreiche Forschungsprogramme sind operativ, darunter das auf zwei Jahre angelegte EU-Programm ERIFORE zur Vernetzung der verschiedenen Forschungsprojekte. Aktuell arbeiten europaweit über 100 Universitäten an Projekten, die sich mit der Verfügbarkeit und der Bereitstellung holzbasierter Biomasse auseinandersetzen. Mit der Vorbehandlung von Holz beschäftigen sich aktuell europaweit 103 FuE-Projekte, wobei erwartungsgemäss in waldreichen Ländern wie Norwegen, Deutschland, Frankreich, Österreich und Spanien am meisten Projekte angesiedelt sind.

Zu den gesamteuropäischen Programmen gesellen sich noch die regionalen Förderstrategien der einzelnen Mitgliedstaaten. Hier ist zum Beispiel Deutschland sehr aktiv, wo der Staat im Rahmen der «Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030» ab 2010 für eine Laufzeit von sechs Jahren Mittel in der Höhe von insgesamt 2,4 Milliarden Euro bereitgestellt hat. Mit dem Biocampus Straubing existiert zum Beispiel ein Forschungscluster, an dem zur Nutzung und Vermarktung nachwachsender Rohstoffe geforscht und gelehrt wird.

Kommerzialisierung von Bioraffinerie-Konzepten

In den letzten Jahren sind einige Umwandlungstechnologien von Lignocellulose bis zum «Technology Readiness Level» 7 bis 9 entwickelt worden, das heisst, sie sind in grosstechnischem Massstab implementiert. Unter diesen Anlagen finden sich sowohl Beispiele für die thermochemische Plattform (Tabelle 3) als auch für die Lignocellulose-Plattform (Tabelle 4). Die erste Anlage (Ineos Bio) wurde erst 2013 in den USA eröffnet, was zeigt, wie jung der Markt noch ist.

Tab. 3 Grosstechnische Umwandlung von Lignocellulose basierend auf thermochemischen Plattformen (nach Brown, 2015)

Firma	Rohstoff	Technologie	Kapazität (Mio. l/Jahr)	Kosten (Mio. US\$)
Ineos Bio (USA)	Holz, organische Abfälle	Vergasung, Fermentation zu Ethanol	30	130
Enerkem (Kanada)	Siedlungsabfall	Vergasung, Synthese von Methanol und Ethanol	38	75
Lanzatech (USA)	Holz, Miscanthus	Vergasung, Fermentation zu Ethanol	38	Keine Angaben
Cool Planet (USA)	Gelbkiefer	Katalytische Pyrolyse	38	56
Fulcum Sierra Biofuels (USA)	Siedlungsabfall	Vergasung, Synthese von Ethanol	42	266
GoBiGas	Holz	Vergasung, Methanisierung	15 Mio. Nm ³ /Jahr	222

Tab. 4 Grosstechnische Umwandlung von Lignocellulose basierend auf der biotechnologischen Lignocellulose-Plattform (nach Brown, 2015)

Firma	Rohstoff	Technologie	Kapazität (Mio. l/Jahr)	Kosten (Mio. US\$)
Beta Renewables (Italien)	Weizenstroh, Holz	Dampfvorbehandlung, enzymatische Hydrolyse, Fermentation zu Ethanol	76	150
Abengoa Bioenergy (USA)	Maisstroh, Weizenstroh	Dampfvorbehandlung mit Säurezugabe, enzymatische Hydrolyse, Fermentation zu Ethanol	95	231
Poet DSM (USA)	Maisstroh, Maisspindeln	2-stufige Dampfvorbehandlung, enzymatische Hydrolyse, Fermentation zu Ethanol	76	250
GranBio (Brasilien)	Bagasse	Dampfvorbehandlung, enzymatische Hydrolyse, Fermentation zu Ethanol	83	195
DuPont Danisco (USA)	Maisstroh	Ammoniakvorbehandlung, enzymatische Hydrolyse, Fermentation zu Ethanol	95	276

Während die Basisdaten der Demonstrationsanlagen bekannt sind, ist unklar, wie gut die in Betrieb genommenen Anlagen tatsächlich funktionieren und welche Aspekte problematisch sind. Denn die genauen Daten sind Betriebsgeheimnis. Brian Foody, CEO der Iogen Corporation, einer Pionierfirma für die Produktion von Cellulose-Ethanol aus Stroh, liess aber auf einer Konferenz in den USA erkennen, dass die Startphase der meisten Produktionsanlagen schwieriger verlief als erwartet. Er verglich dafür die in den USA mithilfe der sogenannten Renewable Identification Number (RIN) bei der Umweltbehörde registrierten Mengen an Cellulose-Ethanol mit der theoretischen Gesamtkapazität der US-Anlagen. Die registrierte Menge an Cellulose-Ethanol betrug dabei bis Ende 2015 in der monatlich durchgeführten Analyse maximal zehn Prozent des theoretischen Maximalwerts, was auf substantielle Probleme mit der Anlagenführung hindeutet. Iogen selber produziert derzeit in Brasilien basierend auf Zuckerrohr-Bagasse Ethanol und hat in einer Anlage mit der sogenannten «Generation-8-Technologie» nach eigenen Angaben zehn Monate nach Start eine Auslastung von über 80% erreicht.

Die gegenwärtig publik werdenden Stilllegungen einiger Anlagen zur Produktion von Biotreibstoff der zweiten Generation wie zum Beispiel Kior (Columbus, MI, US; katalytische Pyrolyse), Ineos Bio (Vero Beach, FL, US; thermochemische Vergasung und Fermentation zu Ethanol) und Abengoa (Hugoton, KS, US; Ethanol biotechnologisch via Lignocellulose-Plattform) zeigen ebenfalls, dass das kommerzielle Aufskalieren von Prozessen, die im FuE-Massstab funktionierten, sehr anspruchsvoll ist. Während diese Beispiele keinesfalls die Technologien als solche infrage stellen sollen, so zeigen sie doch, dass weiterhin noch viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit geleistet werden muss.

Neben den oben aufgeführten Anlagen, in denen hauptsächlich Ethanol aus Lignocellulose produziert wird, gibt es auch Projekte, in denen zum Beispiel aus öl- oder stärkehaltigen Rohstoffen Chemikalien und Treibstoffe hergestellt werden. Eine umfassende Datenbank darüber findet sich unter <http://demoplants.bioenergy2020.eu>.

Insgesamt hat die kommerzielle Herstellung von Chemikalien aus erneuerbaren Rohstoffen langsamer an Fahrt aufgenommen, als von der Politik erhofft wurde, und der Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie gestaltet sich oft schwierig. In einer Umfrage des European Joint Research

Center nannten die Unternehmen der Branche folgende Hürden für eine höhere Produktion von biobasierten Chemikalien:

- Die mit Unsicherheiten behaftete konstante Verfügbarkeit des Rohstoffes zu konkurrenzfähigen Preisen
- Limitiertes Funding für Forschungs-, Entwicklungs- und Scale-up-Projekte
- Limitiertes Funding für Spin-offs und Start-ups

Als Treiber für die Erforschung und Herstellung von biobasierten Produkten wurden ihre Wettbewerbsfähigkeit und Profitabilität und ihre ökologische Performance genannt (Natrass Lucy et al., 2016).

Zusammenfassung

Es ist weltweit anerkannt, dass der Übergang zu einer Bioökonomie sehr gute Chancen bietet, den Treibhausgasausstoss zu reduzieren, Ökosystem-Dienstleistungen zu erhalten, die Innovationskraft zu erhöhen und die Wirtschaft zu stärken. Daher haben alle G7-Staaten und über weitere 35 Länder weltweit Strategien entwickelt, welche die Entstehung einer Bioökonomie fördern sollen. Dementsprechend ist die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit Bezug zu Bioraffinerien, die ein wichtiger Teil einer Bioökonomie sind, seit etwa zehn Jahren hoch dotiert. Die erfolgreiche Überführung von Forschungsergebnissen in marktfähige Anwendungen ist eine Herausforderung, wo noch viel Verbesserungspotenzial besteht. Sowohl thermochemische als auch biochemische Umwandlungsprozesse sind in aktuellen Demonstrationsprojekten auf grosstechnischem Massstab implementiert. Aufgrund des niedrigen Produktoutputs lassen sich technische Schwierigkeiten vermuten, die erst in solch einem grossen Massstab überhaupt zum Tragen kommen.

In zukünftigen Strategien zur Bioökonomie sollten daher genügend Massnahmen entwickelt werden, die den Technologietransfer wirksam fördern und helfen, die Hürde einer «First-of-its-kind»-Anlage zu überwinden, ohne dabei aber einseitige Anreize in Richtung einer bestimmten Technologie zu setzen.

SITUATION IN DER SCHWEIZ

Verschiedene politische Strategien verpflichten die Schweiz dazu, eine nachhaltige Entwicklung, die Auflösung der Erdölabhängigkeit und die verbesserte Verwertung von Holz voranzutreiben. Allerdings fehlt bisher eine eigentliche Bioökonomiestrategie.

Stossrichtungen der Schweizer Energie-, Umwelt- und Wirtschaftspolitik

Um die aktuellen gesellschaftlichen Herausforderungen im Hinblick auf den Ausstieg aus der Energieerzeugung aus den endlichen fossilen Ressourcen, die notwendige Eindämmung der Klimaerwärmung durch einen verminderten Treibhausgasausstoss und die Ernährungssicherheit zu meistern, beschäftigt sich die Schweizer Politik bereits seit Längerem mit der Entwicklung von geeigneten Strategien und Massnahmen. Im Folgenden werden die im Zusammenhang mit der optimalen Nutzung der Ressource Holz relevanten Visionen und Strategien der Schweiz vorgestellt sowie die heute gültigen Prinzipien und Ziele der Nutzung von Biomasse.

Strategien für eine nachhaltige Klima-, Energie- und Wirtschaftspolitik

Die Verpflichtung zu einer Politik der nachhaltigen Entwicklung ist in der Schweiz in der Bundesverfassung verankert (Artikel 2, Schweizerische Eidgenossenschaft, 1999). Die «Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung» der UNO stellt dafür einen wichtigen Orientierungsrahmen dar (Organisation der Vereinten Nationen, 2015). Drei der insgesamt 17 darin formulierten «Sustainable Development Goals» (SDG) betreffen die Energie-, Klima-, und Wirtschaftspolitik:

SDG 7: Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern

SDG 12: Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen

SDG 13: Umgehend Massnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkung ergreifen

Vor diesem Hintergrund wurde für verschiedene Handlungsfelder eine Vision mit einer langfristigen Perspektive formuliert. Diese stellt einen anzustrebenden Idealzustand dar. Sie enthält zwar keinen definierten Zeithorizont, bildet aber eine wesentliche Grundlage für eine kohärente Politik.

Langfristige Vision – Konsum und Produktion

«Das Vorsorge- und Verursacherprinzip wird von Staat und Unternehmen national wie international konsequent angewendet. Bei der Produktion und der Erstellung von Dienstleistungen nehmen die Unternehmen ihre gesellschaftliche Verantwortung im In- und Ausland wahr, einschliesslich der Achtung der Menschenrechte und der Einhaltung von Sozialstandards. Entlang der gesamten Wertschöpfungsketten werden ökologische Belastungen gering gehalten und die natürlichen Ressourcen schonend genutzt.

Die Grundversorgung mit lebensnotwendigen Gütern und Dienstleistungen ist für die gesamte Bevölkerung langfristig gewährleistet. Konsum- und Produktionsgüter werden ressourceneffizient, gesundheitlich unbedenklich und sozial- und umweltverträglich hergestellt. Gebrauchsgüter sind verbrauchsarm, langlebig, leicht reparierbar und gut wiederverwertbar konzipiert und gestaltet. Der Einsatz der Güter erfolgt haushälterisch und nach ihrem Gebrauch werden sie soweit sinnvoll wiederverwertet. Über ihre Eigenschaften und externen Effekte ist entlang der Wertschöpfungsketten und über den gesamten Lebenszyklus hinweg Transparenz geschaffen.» (Schweizerischer Bundesrat, 2016)

Langfristige Vision – Energie und Klima

«Der Energiebedarf wird ohne klimarelevante CO₂-Emissionen und aus erneuerbaren, sicheren Quellen gedeckt. Es besteht ein effizientes länderübergreifendes und stabiles System für Erzeugung, Speicherung und Verteilung erneuerbarer Energien zugunsten einer hohen Versorgungssicherheit. Das inländische wirtschaftlich nutzbare Potenzial zur Erzeugung von Strom und Wärme aus erneuerbarer Energie ist bei systematischer und transparenter Interessenabwägung betreffend anderen Nutzungen und unter Wahrung der biologischen und landschaftlichen Vielfalt ausgeschöpft. Der Primärenergiebedarf ist auf 2000 Watt pro Person stabilisiert.

Die Treibhausgasemissionen sind so weit reduziert, dass sie dem angemessenen Beitrag der Schweiz am Ziel entsprechen, die globale Klimaerwärmung auf weniger als 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten zu beschränken. Für die Anpassung an den Klimawandel und den Schutz vor Naturgefahren weisen Gesellschaft, Wirtschaft und Ökosysteme eine ausreichende Kapazität, Widerstandsfähigkeit und Flexibilität gegenüber sich verändernden Lebens- und Umweltbedingungen auf.» (Schweizerischer Bundesrat, 2016)

Strategien des Bundesrats

Der Bund hat verschiedene Strategien und Masterpläne entwickelt, die den Weg in eine nachhaltige Zukunft ebnen sollen. Dazu gehören:

- **Der Masterplan Cleantech – Eine Strategie des Bundes für Ressourceneffizienz und erneuerbare Energien (Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD und Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2011).** Das Ziel ist, die Schweizer Wirtschaft im globalen Wachstumsmarkt der ressourceneffizienten Technologien, Produkte und Dienstleistungen sowie erneuerbaren Energien bis ins Jahr 2020 optimal zu positionieren. Demnach soll die Schweiz führend sowohl in der Cleantech-Forschung als auch in der Produktion von Cleantech sein, wobei der Bereich beispielhaft für Schweizer Qualität wahrgenommen wird. Die zugehörige Cleantech-Strategie des Bundes strebt die Bündelung von Wissen aus Wissenschaft, Wirtschaft, Verwaltung und Politik an, um ein übergeordnetes Politikinstrument zur Abstimmung der verschiedenen Aktivitäten der öffentlichen Hand zu schaffen.

- **Der Aktionsplan Grüne Wirtschaft (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2013b, 2016).** Dieser fördert «eine Wirtschafts- und Konsumweise, welche die Knappheit begrenzter Ressourcen und die Regenerationsfähigkeit erneuerbarer Ressourcen berücksichtigt, die Ressourceneffizienz verbessert und damit die Leistungsfähigkeit der Wirtschaft und die Wohlfahrt insgesamt stärkt». Es wurden insgesamt 27 Massnahmen formuliert, die den drei Bereichen «Konsum und Produktion», «Abfälle und Rohstoffe» und «übergreifende Instrumente» zugeordnet werden können.
- **Die Energiestrategie 2050.** Darin wird ein schrittweiser Umbau der schweizerischen Energieversorgung beschrieben. Die drei Stossrichtungen des vom Parlament beschlossenen ersten Massnahmenpakets sind Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, Massnahmen zum Ausbau der erneuerbaren Energien und der Atomausstieg.
- **Die Waldpolitik 2020 (Bundesamt für Umwelt BAFU, 2013a).** Das Ziel der strategischen Ausrichtung der Waldpolitik des Bundes ist es, die ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Ansprüche an den Wald optimal aufeinander abzustimmen und damit eine nachhaltige Waldbewirtschaftung zu ermöglichen. Zudem soll durch die Schaffung günstiger Rahmenbedingungen eine effiziente und innovative Wald- und Holzwirtschaft ermöglicht werden.

Nutzung von Holz und anderer Biomasse: Prinzipien und Ziele

Die teils gemeinsam, teils einzeln von den Bundesämtern BFE, BLW, ARE und BAFU entwickelten Politikinstrumente «**Biomassestrategie Schweiz**» (Bundesamt für Energie BFE et al., 2009), «**Biomasse-Energiestrategie**» (Bundesamt für Energie BFE, 2010), «**Ressourcenpolitik Holz**» und das Umsetzungsinstrument «**Aktionsplan Holz**» (Bundesamt für Umwelt BAFU et al., 2014) geben die aus ihrer Sicht geltenden Prinzipien zu einer optimalen Nutzung von Holz und anderer Biomasse vor und formulieren Ziele zur verstärkten Nutzung dieser Ressourcen. Demnach sollte Biomasse und Holz bezüglich der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (Ökologie, Ökonomie, Gesellschaft) optimal produziert, verarbeitet und genutzt werden. Zudem lassen sich als gemeinsamer Nenner der Dokumente die folgenden Ziele ableiten:

- Das nachhaltige inländische Biomasse-Energiepotenzial wird vollständig und wenn möglich im Inland genutzt.

- Die Kaskadennutzung (eine mehrfache Nutzung des Rohstoffs entlang einer fallenden Wertschöpfungskette) der Biomasse generiert eine hohe Wertschöpfung und erlaubt eine hohe Ressourceneffizienz (das Verhältnis zwischen Wertschöpfung und dem zu seiner Erzeugung notwendigen Ressourceneinsatz, Bundesamt für Umwelt BAFU et al., 2014).
- Die Biomasse wird nach dem Kreislaufprinzip genutzt.
- Die nachhaltige Nutzung der Biomasse reduziert den Ausstoss von Treibhausgasen und mindert den Klimawandel.

Im Zusammenhang mit holzbasierten Bioraffinerien ist wichtig, dass in der Schweiz eine erhöhte Verwertung von Laubholz angestrebt wird. Der Vergrösserung des Laubholzbestandes, als Folge des walddpolitisch gewünschten naturnahen Waldbaus, stehen fehlende Absatz- und Einsatzmöglichkeiten des Laubholzes, insbesondere der Buche, gegenüber. Daher soll neben den traditionellen stofflichen und energetischen Nutzungen explizit auch eine chemische Verwertung von Laubholz in Betracht gezogen werden (Bundesamt für Umwelt BAFU et al., 2014). Dafür sind entsprechende Massnahmen bei der Förderung von Forschung, Entwicklung und Innovation nötig. Die Lancierung des NFP 66 ist Teil dieser Bemühungen.

Wirtschaftliches Umfeld der Schweiz

Die Schweiz ist eines der wohlhabendsten Länder Europas mit einer prosperierenden Wirtschaft. Zu den traditionellen, bis heute bestehenden Erfolgsfaktoren der Schweiz gehören unter anderem die politische Stabilität, die liberale Ausrichtung der Verfassung und der Gesetze, der Arbeitsfrieden und eine Geschäftskultur, die auf Verlässlichkeit beruht.

Die Schweizer Wirtschaft ist stark mit dem Ausland verbunden und die Aussenhandelsquote (die Summe der Importe und Exporte von Waren und Dienstleistungen) ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. Heute sind chemische und pharmazeutische Produkte mit einem Anteil von rund einem Drittel des gesamten Aussenhandels der Schweiz die wichtigste Warengruppe. Der hohe Anteil an Exporten spiegelt die Stärke des Standorts Schweiz für diese Industrien wider. Generell richtet sich die Schweizer Exportindustrie mehr und mehr auf wissensintensive Produkte mit einer hohen Wertschöpfung aus oder es werden spezifische Nischen besetzt (Dümmler und Kienast, 2016). Dementsprechend zeichnet sich die Schweiz durch eine aussergewöhnlich hohe Innovationsstärke aus,

wie die regelmässigen Spitzenplätze in verschiedenen Innovationsrankings zeigen (Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD und Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2011).

Die Erforschung und Entwicklung von neuen Technologien zur Umwandlung von Holz und anderer Biomasse stellt somit eine Chance für die Schweizer Wirtschaft dar, um sich auch zukünftig eine Technologieführerschaft im Bereich der relativ jungen Cleantech-Märkte zu sichern.

Forschungsförderung

Die Förderung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten von den Grundlagen bis hin zu Pilot- und Demonstrationsprojekten ist in der Schweiz auf mehrere Geldgeber verteilt.

Der Schweizerische Nationalfonds (SNF) hat eine Reihe von Instrumenten eingeführt, um spezifische Forschung zur Energiewende zu finanzieren. Nach dem NFP 66 wurde das NFP 70 «Energiewende» lanciert, das anwendungsorientierte Grundlagenforschung zur Energiewende im Allgemeinen im Umfang von 37 Millionen Franken fördert und seit 2015 operativ ist. Für den Kompetenzaufbau im Inland hat der SNF zudem zwei energiespezifische Programme zur Förderung von Fachleuten geschaffen: «Ambizione Energy» und «Assistant Professor Energy».

Die Kommission für Technologie und Innovation (KTI) hat im Rahmen der Energiestrategie 2050 das Biomass for Swiss Energy Future (BIOSWEET) als eines von insgesamt acht «Swiss Competence Centers for Energy Research» (SCCER) lanciert, das den Kompetenzaufbau im Bereich der energetischen Valorisierung von Biomasse ermöglicht und eine Brücke schlagen will zwischen der universitären Forschung und der Industrie. Die erste Phase von BIOSWEET lief von 2014 bis 2017 und war mit 7,9 Millionen Franken dotiert, die zweite Phase läuft von 2017 bis 2020 und wird mit 11,6 Millionen Franken gefördert. Zudem stellte die KTI für Innovationsförderung im Energiebereich für 2013 bis 2016 zusätzliche Mittel in Höhe von 46 Millionen Franken zur Verfügung.

Pilot- und Demonstrationsprojekte werden im Bereich der Umwelttechnologien vom BAFU gefördert und im Energiebereich vom BFE. Zudem unterstützt das BFE sogenannte Leuchtturmprojekte, welche die Ausstrahlung der Schweizer Cleantech-Innovationen auch über die Landesgrenzen

hinaus verstärken sollen. Die geplante Investitionssumme des BFE für 2015 bis 2020 beträgt jährlich rund 35 Millionen Franken.

Thematische Empfehlungen für eine geeignete Verwendung der Forschungsmittel gibt die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE in dem jeweils alle vier Jahre erscheinenden Konzept der Energieforschung des Bundes. Im aktuellen Konzept 2017–2020 (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2016) werden im Themenbereich Energiesysteme der Zukunft auch Forschungsthemen zur energetischen Nutzung von Biomasse empfohlen. Die vorgeschlagenen Themen umfassen unter anderem die Entwicklung von Fermentationstechnologien zur direkten Produktion von Treibstoffen oder zur Erhöhung des Biogasertrags, verbesserte Vergasungstechnologien für nasse und trockene Biomasse, optimierte Strombereitstellung aus Biomasse und gestufte Biomasseverbrennungsverfahren mit Emissionsminderung.

Pilot- und Demonstrationsprojekte

Kommerzielle Demonstrationsanlagen oder gar kommerzielle Bioraffinerien gibt es in der Schweiz noch nicht, beziehungsweise nicht mehr, und sind auch in näherer Zukunft nicht zu erwarten. Allerdings besitzt und betreibt die Schweizer Firma Clariant durch den Kauf des Unternehmens Südchemie eine Pilotanlage zur Umwandlung von Stroh zu Bioethanol im bayrischen Straubing. Mithilfe des sogenannten «SunLiquid»-Prozesses werden jährlich 4500 Tonnen Stroh zu Bioethanol umgewandelt. Die Technologie entspricht im Wesentlichen dem in Abbildung 3 (siehe Lignocellulose-Plattform) dargestellten Umwandlungspfad. Dieser beschreibt die Vorbehandlung der Biomasse, die enzymatische Hydrolyse und die Fermentation von C5- und C6-Zucker zu Ethanol.

Die AVA Biochem in Muttenz betreibt eine Bioraffinerie-Pilotanlage, die seit 2012 aus Zucker 5-HMF produziert. Grundsätzlich könnte die Anlage auch direkt aus Buchenholz 5-HMF herstellen, die Ausbeute ist aber noch zu gering.

Zur Vergasung von Holz und zur anschliessenden Methanisierung existierte ein Projekt im waadtländischen Mont-la-Ville. Hier führte die CTU AG im Rahmen des Projekts Lignogaz eine Machbarkeitsstudie für eine Anlage durch, die bei Vollast eine Leistung von 2,7 MW SNG gehabt hätte. Dafür wären jährlich rund 12 500 Tonnen Holz notwendig gewesen (Bundesamt für Energie, 2014a).

Im kleineren Massstab wird hingegen bereits heute auf der Syngas-Plattform Strom und Wärme produziert. Zum Beispiel produziert die Josef Bucher AG in Escholzmatt 135 kW Strom und 240 kW Wärme, dies bei einem Verbrauch von rund 15 Kubikmeter Hackschnitzel pro Tag, und verwertet die Koppelprodukte Holzkohle und Teer stofflich als Zusatz in der Produktion von Blumenerde (Terra Preta) beziehungsweise als Rohstoff für die Kosmetikindustrie.

Zusammenfassung und Bewertung

Die Schweizer Politik hat sich, wie in den oben genannten Visionen und Strategien abzulesen ist, hohe Ziele für eine nachhaltige Entwicklung von Gesellschaft und Wirtschaft gesetzt. Als eines der wohlhabendsten Länder Europas mit einer prosperierenden Wirtschaft und einer aussergewöhnlich hohen Innovationsstärke hat sie gute Chancen, diese Ziele zu erreichen, wenn entsprechende Massnahmen weiter ausgebaut werden.

Den Möglichkeiten einer Bioökonomie, das heisst einer Wirtschaft basierend auf nachhaltigen Rohstoffen, wird bisher wenig Beachtung geschenkt, obwohl die Technologien klar den Bereichen Cleantech und Grüne Wirtschaft zugeordnet werden können, für die schon Aktionspläne verabschiedet wurden. Eine Ausnahme bildet die Erwähnung der möglichen chemischen Nutzung von Laubholz in der «Ressourcenpolitik Holz». Ansonsten wird Energieholz nur als Energie- und nicht als Rohstoffquelle angesehen, obwohl besonders Energieholz ein potenziell wichtiges Substrat für eine Bioraffinerie sein könnte.

Es ist wichtig und richtig, die nur begrenzte Verfügbarkeit der biogenen Ressourcen in der Schweiz anzuerkennen, um deren sinnvolle Verwertung zu unterstützen. Dafür werden allerdings teilweise widersprüchliche Ziele für die optimale Nutzung von Biomasse formuliert: Einerseits wird die Verbrennung zur Wärmeproduktion gefördert, um damit einen maximalen Ersatz nicht erneuerbarer Energieträger zu erreichen (Bundesamt für Energie BFE, 2002; Bundesamt für Umwelt BAFU et al., 2014). Andererseits soll hochwertige Energie bereitgestellt und eine hohe Wertschöpfung generiert werden (Bundesamt für Energie BFE et al., 2009; Bundesamt für Energie BFE, 2010), was beides für die Produktion von Wärme allein nicht zutrifft. Eine möglichst hohe Umwandlungseffizienz wie bei der Verbrennung von Holz erlaubt eine hohe Substitutionswirkung von fossilen Rohstoffen und somit auch hohe CO₂-Einsparungen und trägt da-

her massgeblich zur kurzfristigen Erreichung von CO₂-Reduktionspotenzialen bei. Allerdings lassen sich zur Erzeugung von Strom und Wärme auch andere erneuerbare Energien wie Wasser, Wind, Sonne und Geothermie nutzen. Letztere sind aber, im Gegensatz zu Holz, weniger geeignet, um den auch mittelfristig auf einen flüssigen Treibstoffe angewiesenen Flug- und Schwerlastverkehr zu versorgen (Steubing et al., 2015). Der systematische Ansatz zeigt, dass wenn die erneuerbaren Ressourcen in Konkurrenz gesetzt werden, die Produktion von speicherbarer Energie aus Biomasse der direkten Verbrennung vorgezogen wird (Moret et al., 2016). Die von den Bundesämtern für Energie und Umwelt angeführte zu geringe Ressourcenökonomie (Gesamtwirkungsgrad) als alleiniges Argument gegen die Umwandlung von Holz zu flüssigen Biotreibstoffen (Bundesamt für Energie BFE, 2008; Bundesamt für Umwelt BAFU et al., 2014; Bundesamt für Energie BFE, 2014b) greift daher zu kurz. Eine Umwandlung von Holz in einer Bioraffinerie in verschiedene Produkte, darunter neben Treibstoffen auch solche mit einem hohen Wert wie z.B. Chemikalien, bietet ausserdem die Möglichkeit, eine hohe Wertschöpfung aus dem Rohstoff zu erzielen. Weiter hat der integrierte Ansatz, in welchem Biomasse zur gleichzeitigen Bereitstellung von biobasierten Produkten und speicherbaren Energieträgern (flüssige Treibstoffe und/oder Erdgas) genutzt wird, ein grösseres Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen als die alleinige thermische Umwandlung.

Exkurs

Die holzbasierte Bioraffinerie im Schweizer Kontext: Resultate aus einem Stakeholder-Workshop

Eine Umfeldanalyse im Rahmen eines Workshops der Dialogplattform (DP) 2 «Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie» zeigte, wo die Treiber und wo die Hemmnisse der weiteren Entwicklung von Bioraffinerien in der Schweiz liegen. Die Ergebnisse für das politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Umfeld der Schweiz wurden in Form einer SWOT-Matrix (Strengths/Stärken, Weaknesses/Schwächen, Opportunities/Chancen, Threats/Risiken) zusammengestellt. In dieser Analyse beziehen sich die aufgelisteten Stärken und Schwächen auf den jeweiligen Stakeholder. Die Chancen und Risiken geben wieder, wie der Stakeholder eine holzbasierte Bioraffinerie aus seiner Sicht bewertet.

Aus Gründen der Kohärenz wurde die SWOT-Matrix auf der Webseite des NFP 66 hinterlegt: www.nfp66.ch

EMPFEHLUNGEN

Die Empfehlungen, die sich aus den Diskussionen mit den Stakeholdern und aus den Forschungsergebnissen des NFP 66 ableiten lassen, richten sich an Politik und Forschung.

Handlungsempfehlungen an die Politik

Verabschiedung einer Schweizer Bioökonomiestrategie: Die Überführung der bisherigen erdölbasierten Wirtschaft in eine Wirtschaft auf der Grundlage nachwachsender Rohstoffe kann der Schweizer Wirtschafts- und Forschungslandschaft wichtige Impulse verleihen. Der Bundesrat soll daher eine Bioökonomiestrategie ausarbeiten, welche die folgenden Punkte umfasst.

- **Nutzung von Holz als Rohstoff:** Biomasse ist ein limitiertes Gut, das sorgfältig und zielgerichtet mit einem hohen Gesamtwirkungsgrad und einer hohen Wertschöpfung genutzt werden muss. Energieholz sollte daher langfristig primär zunächst als Rohstoff für Bioraffinerien dienen, wo Chemikalien oder hochwertige Energieträger wie zum Beispiel Biotreibstoffe für den Luft- und Schwerverkehr als Hauptprodukte hergestellt werden, da andere erneuerbare Energiequellen wie Sonne, Wind oder Erdwärme für diese Sektoren nicht geeignet sind. Die Reststoffe der Bioraffinerie (inkl. CO₂) sollten mittels der Synthesegas-Plattform zu Methan umgewandelt werden, das im Erdgasnetz gespeichert werden kann. Die Umwandlungsenergie der Synthesegas-Plattform sollte ausserdem zur Deckung des Hochtemperatur-Wärmebedarfs der Industrie benutzt werden.
- **Erzeugung einer hohen inländischen Wertschöpfung mit Holz:** Die Schweizer Wirtschaft hat den Ruf, innovativ und nachhaltig zu sein. Um diesem Ruf auch in Zukunft gerecht zu werden, soll das Holz in der Schweiz eine möglichst hohe Wertschöpfung generieren. Dafür sollten die Rahmenbedingungen in der Schweiz entsprechend attraktiv gestaltet werden, dass Schweizer Holz im Inland veredelt werden kann und nicht mehr nur als Rohstoff exportiert wird. Zusätzlich sollte die Inwertsetzung von Holz über die Technologieentwicklung und deren Export im Ausland geschehen.
- **Gewährleistung von langfristig stabilen politischen Rahmenbedingungen:** Die politischen Rahmenbedingungen, die zur Verwirklichung einer Bioökonomie in der Schweiz beitragen sollen, sollten zielgerichtet und langfristig stabil sein, damit sich die Industrie darauf einstellen und die entsprechend notwendigen Investitionen zum Aufbau neuer Forschungs-, Entwicklungs- und Produktionsanlagen tätigen kann.

Umsetzungsmassnahmen zur Bioökonomiestrategie:

- **Eidgenössische Bioökonomieforschungskommission:** Ähnlich der Eidgenössische Energieforschungskommission (CORE) sollte ein beratendes Organ zuhanden des Bundesrats und der betroffenen Departemente WBF und UVEK geschaffen werden. Die Kommission erarbeitet eine detaillierte und umsetzbare Bioökonomieforschungsstrategie und kontrolliert und überarbeitet zudem auch die Umsetzungsmassnahmen.
- **Kompetenzzentrum für Bioraffinerie:** Eine Bioökonomie kann, entsprechend den in der Bioökonomiestrategie gesetzten Forschungsschwerpunkten, nur umgesetzt werden, wenn Forschungsinstitutionen und Industrie eng kooperieren, um fokussiert Strategien zur Herstellung von attraktiven Produkten auf der Basis von Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen zu entwickeln, die eine hohe Wertschöpfung erwarten lassen. Diese Zusammenarbeit sollte durch die Schaffung eines Kompetenzzentrums für Bioraffinerie gefördert werden, ähnlich den Swiss Competence Centers for Energy Research (SCCER). Im Unterschied zu den SCCER sollte das Bioraffinerie-Kompetenzzentrum aber mit zusätzlichen finanziellen Mitteln für Forschung, Entwicklung und Aufskalierung ausgestattet werden.
- **Bioraffinerie-Demonstrator:** Um vielversprechende Forschungsergebnisse möglichst rasch aufskalieren zu können, werden Pilot- und Demonstrationsanlagen benötigt. Die Kosten für solche Anlagen sind gerade für risiko-, aber aussichtsreiche Projekte oft unüberwindbar,

da neben dem bereits kostenintensiven Hauptumwandlungsprozess auch die vor- und nachgelagerte Prozesskette in einer Bioraffinerie aufgebaut werden muss. Die öffentliche Hand sollte daher eine modular aufgebaute, flexible Pilot-Bioraffinerie finanzieren und erstellen. In diesem Bioraffinerie-Demonstrator können sich die Forschenden einerseits auf die Entwicklung ihrer Technologie konzentrieren. Andererseits können sie ihren Schlüsselprozess auf eine Integration in die Bioraffinerie abstimmen, um aus dem Holz eine möglichst hohe Wertschöpfung bei minimalen Umwelteinflüssen zu generieren.

- **Öffentliches Beschaffungsprogramm für biobasierte nachhaltige Produkte:** Der Aufbau einer Bioökonomie kann durch eine zumindest in den ersten Jahren gesicherte Abnahme der biogenen Güter gefördert werden. Die öffentliche Hand und ihre Vertragsnehmer sollen daher verpflichtet werden, in bestimmten Bereichen, wo Alternativen zu den fossilen Pendanten existieren, zwingend biobasierte Produkte (z.B. Reinigungsmittel, Farben, Bioplastik, etc.) zu beschaffen und zu verwenden. Die Massnahme müsste auch ein Zertifizierungsprogramm umfassen, um die Nachhaltigkeit dieser Produkte zu gewährleisten.

Empfehlungen an Forschung und Ausbildung

Aufspaltung in Wertstoffe: Holz ist aus einer Vielzahl von wertvollen, komplexen, molekularen Strukturen aufgebaut. Um die Kapitalkosten bei der Produktion von chemischen Verbindungen stark zu senken, sollten wenn immer möglich die benötigten molekularen Strukturen direkt aus der Biomasse gewonnen werden. Dieser direkte Weg ist der Synthese vorzuziehen, die bei einem einfachen Grundbaustein wie zum Beispiel dem petrochemisch hergestellten Ethen beginnt.

Neue Umwandlungsverfahren: Es werden neue, erweiterte und zum Teil kombinierte thermochemische, katalytische und biochemische Umwandlungsverfahren benötigt: einerseits für die Fraktionierung und Aufspaltung der komplexen Biomassestruktur zu höherwertigen Zwischenprodukten (z.B. Gewinnung von nativem Lignin, Fasern/Zucker), andererseits für die Synthese der Zielprodukte, und zwar ausgehend von diesen komplexeren Zwischenprodukten. Diese Prozesse sollten hoch integriert sein, um auch in kleinem Massstab realisierbar zu sein und damit einen wirtschaftlichen Betrieb in der Schweiz zu ermöglichen.

Beratungstool für die Industrie: Basierend auf

dem Projekt *Maréchal* zum Vergleich, der Integration und der Bewertung der Umwandlungsverfahren sollte ein Beratungsinstrument auf der Basis einer Datenbank für die Industrie geschaffen werden. Ziel ist, die Verbindung zwischen neuen Technologien, Firmen und Holzindustrie zu etablieren und zu stärken.

Lehrgang Bioraffinerie: Die an den Schweizer ETHs/Unis/FHs vorhandenen Kompetenzen im Bereich der einzelnen Bioraffinerie-Plattformen und deren Erforschung und Umsetzung sollten gebündelt werden und zur Schaffung eines zentralen Ausbildungslehrgangs in Bioraffinerie genutzt werden.

LITERATUR

- Alonso, D.M., Bond, J.Q., Dumesic, J.A., 2010. Catalytic conversion of biomass to biofuels. *Green Chem.* 12 (9), 1493.
- Alvira, P., Tomas-Pejo, E., Ballesteros, M., Negro, M.J., 2010. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource technology* 101 (13), 4851–4861.
- Arca-Ramos, A., Ammann, E.M., Gasser, C.A., Nastold, P., Eibes, G., Feijoo, G., Lema, J.M., Moreira, M.T., Corvini, P.F.-X., 2016. Assessing the use of nanoimmobilized laccases to remove micropollutants from wastewater. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 23 (4), 3217–3228.
- Bahrle, C., Custodis, V., Jeschke, G., van Bokhoven, J.A., Vogel, F., 2014. In situ observation of radicals and molecular products during lignin pyrolysis. *ChemSusChem.* 7 (7), 2022–2029.
- Bahrle, C., Nick, T.U., Bennati, M., Jeschke, G., Vogel, F., 2015. High-field electron paramagnetic resonance and density functional theory study of stable organic radicals in lignin: influence of the extraction process, botanical origin, and protonation reactions on the radical g tensor. *J. Phys. Chem. A* 119 (24), 6475–6482.
- Balan, R., Brethauer, S., Studer, M.H.-P., 2017a. Steam explosion pretreatment of beech wood. Part 1: comparison of the enzymatic hydrolysis of washed solids and whole pretreatment slurry at different solid loadings. *Biotechnol. Biofuels* submitted.
- Balan, R., Brethauer, S., Studer, M.H.-P., 2017b. Steam explosion pretreatment of beech wood. Part 2: quantification of cellulase inhibitors and their effect on Avicel hydrolysis. *Biotechnol. Biofuels* submitted.
- BETARENEWABLES: Crescentino/The project. <http://www.betarenewables.com/en/crescentino/the-project>.
- Brethauer, S., Shahab, R. L., Studer, M.H.-P., 2017. Enhanced simultaneous saccharification and fermentation of pretreated beech wood by in situ treatment with the white rot fungus *Irpex lacteus* in a membrane aerated biofilm reactor. *Bioresource technology* 237, 135–138.
- Brethauer, S., Studer, M.H., 2015. Biochemical conversion processes of lignocellulosic biomass to fuels and chemicals – a review. *Chimia* 69 (10), 572–581.
- Brown, T.R., Brown, R., Vonnice, E., 2015. Commercial-scale production of lignocellulosic biofuels. *CEP Magazine*.
- Bulut, S., Fei, Z., Siankevich, S., Zhang, J., Yan, N., Dyson, P.J., 2015. Aqueous-phase hydrogenation of alkenes and arenes: The growing role of nanoscale catalysts. *Catal. Today* 247, 96–103.
- Bulut, S., Siankevich, S., Savoglidis, G., Alexander, D.T., Hatzimanikatis, V., Yan, N., Dyson, P.J., Zhang, J., 2017. Efficient bimetallic nanoparticle water-based catalysts for the cleavage of aryl ether C–O linkages. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* accepted.
- Bundesamt für Energie BFE, 2002. Positionspapier Holzenergie: Ziele und Prioritäten zur Nutzung des Energieträgers Holz für Forschung, Demonstration und Marktbearbeitung in der Schweiz.
- Bundesamt für Energie BFE, 2008. Positionspapier biogene Treibstoffe. Bundesamt für Energie BFE, 2010. Biomasse-Energiestrategie Schweiz: Strategie für die energetische Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Bern.
- Bundesamt für Energie BFE, 2014a. Machbarkeitsstudie und Businessplan Lignogaz: Methan aus Holz, Projektierung einer 2.67-MW-Anlage für den Standort Mont-La-Ville (VD), Ittigen.
- Bundesamt für Energie BFE, 2014b. Strategie des Bundes zur Holzenergie im Rahmen der Energiestrategie 2050: 13.074 n Energiestrategie 2050, erstes Massnahmenpaket, Ittigen.
- Bundesamt für Energie BFE, Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bundesamt für Umwelt BAFU, 2009. Biomassestrategie: Strategie für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Bern.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2013a. Waldpolitik 2020: Visionen, Ziele und Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung des Schweizer Waldes, Bern.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2013b. Grüne Wirtschaft: Bericht-erstattung und Aktionsplan: Bericht an den Bundesrat, Bern.

- Bundesamt für Umwelt BAFU, 2016. Grüne Wirtschaft: Massnahmen des Bundes für eine ressourcenschonende, zukunftsfähige Schweiz: Bericht an den Bundesrat, Bern.
- Bundesamt für Umwelt BAFU, Bundesamt für Energie BFE, Staatssekretariat für Wirtschaft SECO, 2014. Ressourcenpolitik Holz: Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz, Bern.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2010. Nationale Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030: Unser Weg zu einer bio-basierten Wirtschaft, Berlin.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), 2014. Nationale Politikstrategie Bioökonomie – Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie, Berlin.
- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bundesministerium für Umwelt (BMU), Bundesministerium für Umwelt und Technologie (BMWi), 2012. Roadmap Bioraffinerien: im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Berlin.
- Celebi, A.D., Ensinas, A.V., Sharma, S., Maréchal, F., 2017. Early-stage decision making approach for the selection of optimally integrated biorefinery processes. *Energy*. In press.
- Cherubini, F., Jungmeier, G., Wellisch, M., Willke, T., Skiadas, I., van Ree, R., Jong, E. de, 2009. Toward a common classification approach for biorefinery systems. *Biofuel. Bioprod. Bioref.* 3 (5), 534–546.
- Custodis, V.B., Bährle, C., Vogel, F., van Bokhoven, J.A., 2015. Phenols and aromatics from fast pyrolysis of variously prepared lignins from hard- and softwoods. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 115, 214–223.
- Dümmler, P., Kienast, K., 2016. Handel statt Heimatschutz: Eine 3-Säulen-Strategie für die Aussenwirtschaft der Schweiz. Avenir Suisse, Zürich.
- Edinger, P., Schneebeli, J., Struis, R.P., Biollaz, S.M., Ludwig, C., 2016a. On-line liquid quench sampling and UV-Vis spectroscopy for tar measurements in wood gasification process gases. *Fuel* 184, 59–68.
- Edinger, P., Tarik, M., Hess, A., Testino, A., Ludwig, C., 2016b. Online detection of selenium and its retention in reducing gasification atmosphere. *Energy & Fuels*, 30 (2) 1237–1247.
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2016. Konzept der Energieforschung des Bundes 2017–2020: Ausgearbeitet durch die Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, Bern.
- Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2011. Masterplan Cleantech: Eine Strategie des Bundes für Ressourceneffizienz und erneuerbare Energien, Bern.
- Gasser, C., Mucha, M., Wintgens, T., Corvini, P.F.-X., 2013. Nanobiocatalytic depolymerization of lignin for the production of platform phenolic chemicals. *Chimia* 67 (9), 648–657.
- Gasser, C.A., Ammann, E.M., Schaffer, A., Shahgaldian, P., Corvini, P.F.-X., 2016. Production of superparamagnetic nanobiocatalysts for green chemistry applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100 (16), 7281–7296.
- Gasser, C.A., Cvancarova, M., Ammann, E.M., Schaffer, A., Shahgaldian, P., Corvini, P.F.-X., 2017. Sequential lignin depolymerization by combination of biocatalytic and formic acid/formate treatment steps. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 101 (6), 2575–2588.
- Gasser, C.A., Hommes, G., Schaffer, A., Corvini, P.F.-X., 2012. Multicatalysis reactions: new prospects and challenges of biotechnology to valorize lignin. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 95 (5), 1115–1134.
- German Bioeconomy Council, 2015a. Bioeconomy Policy – Synopsis and Analysis of Strategies in the G7, Berlin.
- German Bioeconomy Council, 2015b. Bioeconomy Policy (Part II) – Synopsis of National Strategies around the World, Berlin.
- Heidenreich, S., Müller, M., Foscolo, P.U., 2016. Advanced biomass gasification: New concepts for efficiency increase and product flexibility. Academic Press.
- Hermann, R., 2016. Innovationen aus dem Wald – Finnlands Forstindustrie erfindet sich neu. *NZZ*, 25.5.2016.
- Hess, A., Tarik, M., Foppiano, D., Edinger, P., Ludwig, C., 2016. Online size and element analysis of aerosol particles released from thermal treatment of wood samples impregnated with different salts. *Energy Fuels* 30 (5), 4072–4084.
- Hess, A., Tarik, M., Ludwig, C., 2015. A hyphenated SMPS-ICPMS coupling setup: Size-resolved element specific analysis of airborne nanoparticles. *J. Aerosol Sci.* 88, 109–118.
- Hofbauer, H., Kaltschmitt, M., Keil, F., Meier, D., Welling, J., 2016. Pyrolyse, in: Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (Eds.), *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 3rd ed. Springer Berlin Heidelberg, 1183–1265.
- Holderegger, U., 2009. Schlussstrich unter Atisholz: Borregaard will unrentable Zellstofffabrik schliessen – 440 Stellen gehen verloren. *NZZ*, 29.08.2009.
- Holzindustrie Schweiz, 2008. Jahresbericht 2008: Holzindustrie Schweiz, Bern.

- Imtiaz, Q., Broda, M., Müller, C.R., 2014. Structure–property relationship of co-precipitated Cu-rich, Al₂O₃- or MgAl₂O₄-stabilized oxygen carriers for chemical looping with oxygen uncoupling (CLOU). *Appl. Energ.* 119, 557–565.
- Imtiaz, Q., Kurlov, A., Rupp, J.L.M., Müller, C.R., 2015. Highly efficient oxygen-storage material with intrinsic coke resistance for chemical looping combustion-based CO₂ capture. *ChemSusChem.* 8 (12), 2055–2065.
- Imtiaz, Q., Yüzbaşı, N.S., Abdala, P.M., Kierzkowska, A.M., van Beek, W., Broda, M., Müller, C.R., 2016. Development of MgAl₂O₄-stabilized, Cu-doped, Fe₂O₃-based oxygen carriers for thermochemical water-splitting. *J. Mater. Chem.* 4 (1), 113–123.
- Jong, E. de, Jungmeier, G. Biorefinery concepts in comparison to petrochemical refineries, in: Pandey, A., Höfer, R., Taherzadeh, M. (Eds.), *Industrial biorefineries and white biotechnology*, Elsevier Amsterdam, 3–33.
- Jungmeier, G., Van Ree, R., de Jong, E., Stichnothe, I., de Bari, I., Jørgensen, H., Wellisch, M., Bell, G., Spaeth, J., Torr, K., Kimura, S., 2015. The «Biorefinery Fact Sheet» and its application to wood based biorefining – case studies of IEA Bioenergy Task 42 «Biorefining».
- Kamm, B., Gruber, P.R., Kamm, M., 2000. Biorefineries–industrial processes and products, in: Elvers, B. (Eds.), *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*. Wiley-VCH, Weinheim, 1–38.
- Kim, S., Dale, B.E., 2015. Comparing alternative cellulosic biomass biorefining systems: Centralized versus distributed processing systems. *Biomass Bioenerg.* 74, 135–147.
- Kim, S., Dale, B.E., 2016. A distributed cellulosic biorefinery system in the US midwest based on corn stover. *Biofuel. Bioprod. Bioref.* 10 (6), 819–832.
- Knop, M., Dang, T.Q., Jeschke, G., Seebeck, F.P., 2017. Copper is a cofactor of the formylglycine-generating enzyme. *ChemBioChem.* 18 (2), 161–165.
- Knop, M., Engi, P., Lemnaru, R., Seebeck, F.P., 2015. In vitro reconstitution of formylglycine-generating enzymes requires copper(I). *ChemBioChem.* 16 (15), 2147–2150.
- Lin, Y.-C., Huber, G.W., 2009. The critical role of heterogeneous catalysis in lignocellulosic biomass conversion. *Energy Environ. Sci.* 2 (1), 68–80.
- Ma, Z., Custodis, V., Hemberger, P., Bahrle, C., Vogel, F., Jeschke, G., van Bokhoven, J.A., 2015. Chemicals from lignin by catalytic fast pyrolysis, from product control to reaction mechanism. *Chimia* 69 (10), 597–602.
- Ma, Z., Troussard, E., van Bokhoven, J.A., 2012. Controlling the selectivity to chemicals from lignin via catalytic fast pyrolysis. *Appl. Catal. A-Gen.* 423–424, 130–136.
- Maronese, S., Ensinas, A.V., Mian, A., Lazzaretto, A., Maréchal, F., 2015. Optimum biorefinery pathways selection using the integer-cuts constraint method applied to a MILP problem. *Ind. Eng. Chem. Res.* 54 (28), 7038–7046.
- Martinez-Garcia, J., Nussbaumer, T., 2015. A one-dimensional transient solid fuel conversion model for grate combustion optimization. *Combust. Sci. Technol.* 187 (8), 1208–1228.
- McMillan, J.D., Jennings, E.W., Mohagheghi, A., Zuccarello, M., 2011. Comparative performance of precommercial cellulases hydrolyzing pretreated corn stover. *Biotechnol. Biofuels* 4, 29.
- Morales, M., Ataman, M., Badr, S., Linster, S., Kourlimpinis, I., Papadokonstantakis, S., Hatzimanikatis, V., Hungerbühler, K., 2016. Sustainability assessment of succinic acid production technologies from biomass using metabolic engineering. *Energy Environ. Sci.* 9 (9), 2794–2805.
- Moret, S., Peduzzi, E., Gerber, L., Maréchal, F., 2016. Integration of deep geothermal energy and woody biomass conversion pathways in urban systems. *Energy Conversion and Management* 129, 305–318.
- Natrass, L., Biggs, C., Bauen, A., Parisi, C., Rodriguez Cerezo, E., Gomez Barbero, M., 2016. The EU bio-based industry: Results from a survey EUR 27736 OP LF-NA-27736-EN-N. Publications Office of the European Union.
- Neubauer, Y., 2008. Online-Analyse von Teer aus der Biomassevergasung mit Lasermassenspektrometrie. Diss., TUB, Berlin.
- Nussbaumer, T., 2013. Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050. *Schweiz. Z. Forstwes.* 164 (12), 389–397.
- Organisation der Vereinten Nationen, 2015. Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung: Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015 A/RES/70/1*.
- Overend, R.P., Chornet, E., Gascoigne, J.A., 1987. Fractionation of lignocellulosics by steam-aqueous pretreatments. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 321 (1561), 523–536.
- Pielhop, T., Amgarten, J., Rohr, P.R., von Studer, M.H., 2016. Steam explosion pretreatment of softwood: the effect of the explosive decompression on enzymatic digestibility. *Biotechnol. Biofuels* 9, 152.
- Pielhop, T., Larrazábal, G.O., Rudolf von Rohr, P., 2016. Autohydrolysis pretreatment of softwood – enhancement by phenolic additives and the effects of other compounds. *Green Chem.* 18 (19), 5239–5247.
- Pielhop, T., Larrazábal, G.O., Studer, M.H., Brethauer, S., Seidel, C.-M., Rudolf von Rohr, P., 2015. Lignin repolymerisation in spruce autohydrolysis pretreatment increases cellulase deactivation. *Green Chem.* 17 (6), 3521–3532.
- Rhyner, U., 2013. Reactive hot gas filter for biomass gasification. Diss. ETH No. 21102. ETH, Zürich.
- Schweizerische Eidgenossenschaft, 1999. Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft 101. <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19995395/201405180000/101.pdf>.

- Schweizerischer Bundesrat, 2016. Strategie Nachhaltige Entwicklung 2016–2019, 76 pp. Accessed 29 March 2017.
- Siankevich, S., Fei, Z., Scopelliti, R., Jessop, P.G., Zhang, J., Yan, N., Dyson, P.J., 2016. Direct conversion of mono- and polysaccharides into 5-hydroxymethylfurfural using ionic-liquid mixtures. *ChemSusChem*. 9 (16), 2089–2096.
- Siankevich, S., Fei, Z., Scopelliti, R., Laurenczy, G., Katsyuba, S., Yan, N., Dyson, P.J., 2014b. Enhanced conversion of carbohydrates to the platform chemical 5-hydroxymethylfurfural using designer ionic liquids. *ChemSusChem*. 7 (6), 1647–1654.
- Siankevich, S., Fei, Z., Yan, N., Dyson, P.J., 2015. Application of ionic liquids in the downstream processing of lignocellulosic biomass. *Chimia* 69 (10), 592–596.
- Siankevich, S., Mozzettini, S., Bobbink, F., Yan, N., Fei, Z., Dyson, P.J., 2017. Influence of the anion on the oxidation of 5-hydroxymethylfurfural using platinum nanoparticle-ionic polymer supported catalysts. *ChemCatChem*. (accepted).
- Siankevich, S., Savoglidis, G., Fei, Z., Laurenczy, G., Alexander, D.T., Yan, N., Dyson, P.J., 2014a. A novel platinum nanocatalyst for the oxidation of 5-hydroxymethylfurfural into 2,5-furandicarboxylic acid under mild conditions. *J. Catal.* 315, 67–74.
- Sieber, B., 1956. 75 Jahre Cellulosefabrik Attisholz AG.
- Socha, A.M., Parthasarathi, R., Shi, J., Pattathil, S., Whyte, D., Bergeron, M., George, A., Tran, K., Stavila, V., Venkatachalam, S., Hahn, M.G., Simmons, B.A., Singh, S., 2014. Efficient biomass pretreatment using ionic liquids derived from lignin and hemicellulose. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111 (35), E3587–95.
- Steubing, B., Suter, F., Heeren, N., Chaudhary, A., Ostermeyer, Y., Hellweg, S., 2015. Welches sind die ökologischsten Holzverwendungen? *Schweiz. Z. Forstwes.* 166 (5), 335–338.
- Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., Lemm, R., 2017. Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Schlussbericht SCCER Biosweet.
- Tschedanoff, V., 2013. Reactive hot gas filter for biomass gasification. Diss. ETH No. 21102. ETH, Zürich.
- Van Dael, M., Pelkmans, L., Devriendt, N., Guisson, R., 2014. D6.2 Report on benchmarking of country policy approaches: S2Biom Project Grant Agreement No. 608622, 155 pp. http://www.s2biom.eu/images/Publications/S2Biom_Report_D6.2_20161223.pdf. Aufgerufen am 22.3.2017.
- Vispute, T.P., Zhang, H., Sanna, A., Xiao, R., Huber, G.W., 2010. Renewable chemical commodity feedstocks from integrated catalytic processing of pyrolysis oils. *Science* 330 (6008), 1222–1227.
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): Overview and methodology. *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), 1218–1230.
- Wyman, C.E., Dale, B.E., 2015. Producing biofuels via the sugar platform. *Chem. Eng. Prog.* 111 (3), 45–57.
- Yazaki, Y., 2015. Utilization of flavonoid compounds from bark and wood: a review. *Nat. Prod. Commun.* 10 (3), 513–520.
- Zhang, W., 2010. Automotive fuels from biomass via gasification. *Fuel Process. Technol.* 91 (8), 866–876.

DAS NFP 66 IN KÜRZE

Die Nationalen Forschungsprogramme (NFP) leisten wissenschaftlich fundierte Beiträge zur Lösung dringender Probleme von nationaler Bedeutung. Sie erfolgen im Auftrag des Bundesrates und werden vom Schweizerischen Nationalfonds durchgeführt. Die NFP sind in der Abteilung IV «Programme» angesiedelt (www.snf.ch).

Nationales Forschungsprogramm «Ressource Holz»

Im Dialog mit der Wirtschaft und den Behörden liess das Nationale Forschungsprogramm «Ressource Holz» (NFP 66) wissenschaftliche Grundlagen und Lösungsansätze erarbeiten, um die Verfügbarkeit und Nutzung von Holz in der Schweiz zu optimieren. Das mit der Kommission für Technologie und Innovation (KTI) koordinierte Programm hatte einen Finanzrahmen von 18 Millionen Schweizer Franken, die Forschung dauerte von 2012 bis Ende 2016. Beteiligt waren 30 Forschungsteams aus der Schweiz.

Die **30 Forschungsprojekte** des NFP 66 widerspiegeln das breite Spektrum neuer Ansätze der Holznutzung und zeigen Lösungswege für eine bessere Ressourcenverfügbarkeit und ein nachhaltiges Management des Stoffkreislaufs. Ende 2013 definierte die Leitungsgruppe vier thematische Dialogfelder. Diese decken die wesentlichen Bereiche der Wald-Holz-Wertschöpfungskette ab und wurden im Austausch mit Wirtschaft, Verbänden und Behörden im Rahmen der Dialogplattformen weiterentwickelt. Die Ergebnisse aus Forschung und Dialog münden in die vier vorliegenden Teilsynthesen.

Weitere Informationen: www.nfp66.ch



Dialogfeld und Synthese 1: Weiterentwicklungen im Holzbau

Neuartige, zuverlässige Tragwerke aus Buchenholz

Frangi Andrea, ETH Zürich

Robotergestützte Assemblierung komplexer Holztragwerke

Kohler Matthias, ETH Zürich

Akustisch optimierte Deckenkonstruktion aus Hartholz

Krajčiči Lubos, Soundtherm GmbH

Kleberverbindungen in Tragwerkselementen aus Laubholz

Niemz Peter, ETH Zürich

Erdbebengerechtes Holztragwerk für mehrgeschossige Bauwerke

Steiger René, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)

Bemessung geklebter Verbindungen im Holzbau

Vasilopoulos Anastasios, EPF Lausanne

Holz und Holz-Leichtbeton als Baustoffe der Zukunft?

Zwicky Daia, Hochschule für Technik und Architektur, Freiburg



Dialogfeld und Synthese 2: Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie

Heissgasreinigung macht die Umwandlung von Holz in Gas wirtschaftlicher
Biollaz Serge, Paul Scherrer Institut (PSI)

Aufspaltung von Lignin zur Herstellung aromatischer Verbindungen
Corvini Philippe, Fachhochschule Nordwestschweiz, Muttenz

Simultane Umwandlung von Holz in chemische Grundprodukte
Dyson Paul, EPF Lausanne

Wood2Chem: Eine Informatikplattform für die Entwicklung der Bioraffinerie
Maréchal François, EPF Lausanne

Herstellung von hochreinem Wasserstoff aus Holz
Müller Christoph, ETH Zürich

Optimierte Rostfeuerungen für Holzbrennstoffe
Nussbaumer Thomas, Hochschule Luzern

Kombinierte Herstellung von Treibstoffen und Chemikalien aus Holz
Rudolf von Rohr Philipp, ETH Zürich

Prozessoptimierung für synthetisches Erdgas aus Holz
Schildhauer Tilman, Paul Scherrer Institut (PSI)

Entwicklung künstlicher Proteine für eine bessere chemische Nutzung von Holz
Seebeck Florian, Universität Basel

Ethanol als Benzinersatz: Wie Treibstoff effizient aus Holz gewonnen werden kann
Studer Michael, Berner Fachhochschule, Zollikofen

Freie Radikale im Lignin als Schlüssel zur Herstellung «grüner» Chemikalien
Vogel Frédéric, Paul Scherrer Institut (PSI)



Dialogfeld und Synthese 3: Innovative holzbasierte Materialien

Holz und Holzwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaftsprofilen für den Holzbau
Burgert Ingo, ETH Zürich

Nanotechnologie im Dienste der Holzkonservierung
Fink-Petri Alke Susanne, Universität Freiburg

Behandlung von Holzoberflächen mit Hilfe von Photoinitiatoren
Grützmaker Hansjörg, ETH Zürich

Extraktion von Tanninen aus Rinden heimischer Nadelhölzer
Pichelin Frédéric, Berner Fachhochschule, Biel

Ultraleichte bio-basierte Holzwerkstoffplatte mit Schaumkern
Thoemen Heiko, Berner Fachhochschule, Biel

UV-Selbstschutz von Holzoberflächen durch Cellulosefasern
Volkmer Thomas, Berner Fachhochschule, Biel

Neue Verarbeitungsmethoden für Cellulose-Nanokomposite
Weder Christoph, Universität Freiburg

Nanofibrillierte Zellulose (NFC) in Holzbeschichtungen
Zimmermann Tanja, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)



Dialogfeld und Synthese 4: Holzbeschaffung und nachhaltige Holznutzung

MOBSTRAT: Strategien zur Holzmobilisierung aus Schweizer Wäldern
Brang Peter, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Ökologische Nutzung der Holzressourcen in der Schweiz
Hellweg Stefanie, ETH Zürich

Ökonomische Analyse Schweizer Holzmärkte
Olschewski Roland, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)

Den Holzmarkt verstehen: zwischen Versorgung und Multifunktionalität
Zarin-Nejadan Milad, Universität Neuenburg

IMPRESSUM

Autorenteam:

Prof. Michael Hans-Peter Studer, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Berner Fachhochschule, Zollikofen
Pieter Poldervaart, Pressebüro Kohlenberg, Basel

Empfohlene Zitierweise:

Michael Studer, Pieter Poldervaart (2017): Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie, Thematische Synthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 66 «Ressource Holz», Schweizerischer Nationalfonds, Bern.

Erarbeitet und publiziert mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 66 «Ressource Holz».



Ressource Holz
Nationales Forschungsprogramm NFP 66



SCHWEIZERISCHER NATIONALFONDS
ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTLICHEN FORSCHUNG

Leitungsgruppe:

Dr. Martin Riediker (Präsident); Prof. Charlotte Bengtsson, Skogforsk (the Forestry Research Institute of Sweden), Uppsala, Schweden; Prof. Alain Dufresne, École d'ingénieurs en sciences du papier, de la communication imprimée et des biomatériaux, PAGORA, Institut Polytechnique de Grenoble, Frankreich; Prof. Birgit Kamm, Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme, Teltow, Deutschland; Prof. Jakob Rhyner, Universität der Vereinten Nationen (UNU), Bonn, Deutschland; Prof. Liselotte Schebek, Institut IWAR, Technische Universität Darmstadt, Deutschland; Prof. Alfred Teischinger, Institut für Holzforschung, Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Österreich; Prof. Philippe Thalmann, Lehrstuhl für Städte- und Umweltökonomie, EPF Lausanne.

Koordinator der Synthese und des Dialogfeldes

Bioraffinerie:

Enrico Bellini, IC Infraconsult, Bern

Mitglieder Begleitgruppe und Sounding Board

dieser Teilsynthese:

François Maréchal (EPFL); Oliver Thees (WSL); Frédéric Vogel (PSI); Pascal Favre (Cosvegaz); Thomas Kläusli (AVA Biochem); Oliver Kröcher (SCCER BIOSWEET); Ludwig Lehner (bwc); Jan Lucht (scienceindustries); Urs Rhyner (AGRO Energie SZ); Achim Schafer (BAFU); Martin Spitzer (SI Group); Christian Suter (SATW).

Delegierte der Abteilung IV des Nationalen Forschungsrats:

Prof. Nina Buchmann, ETHZ (bis Ende 2015);
Prof. Claudia Binder, EPF Lausanne (ab 2016)

Bundesvertreter:

Rolf Manser, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern

Programmkordinatorin:

Dr. Barbara Flückiger Schwarzenbach, Schweizerischer Nationalfonds (SNF), Bern

Leiter Wissens- und Technologietransfer:

Thomas Bernhard, IC Infraconsult, Bern; Dr. Krisztina Beer-Toth, IC Infraconsult, Bern (Mai 2015 bis Februar 2017)

Layout und Grafik:

cR Kommunikation, Zürich;
Alber Visuelle Kommunikation, Zürich

Übersetzung: Trad8, Delémont

Bilder: Bioraffinerieanlage. Quelle: biochemtex, Italien (Titelbild)

Für die erwähnten Forschungsergebnisse sind die jeweiligen Forschungsteams verantwortlich, für die Synthesen und die Empfehlungen die Autorenteam, deren Auffassung nicht notwendigerweise mit derjenigen des Schweizerischen Nationalfonds, der Mitglieder der Leitungsgruppe oder der Begleitgruppen übereinstimmen muss.

Die Mehrheit aller chemischen Produkte basiert heute auf Erdöl. Die holzbasierte Bioraffinerie könnte es möglich machen, aus Holz chemische Stoffe zu erzeugen. So würde Erdöl durch einen einheimischen Rohstoff ersetzt und technisches Know-how aufgebaut werden. Die Teilsynthese des Dialogfelds «Auf dem Weg zur holzbasierten Bioraffinerie» zeigt, welche Fortschritte im Rahmen des NFP 66 gemacht wurden und welche Anstrengungen es noch braucht, um diese Technologie in der Schweiz zur Marktreife zu bringen.