

# BMBF Verbundprojekt ELaN



*Entwicklung eines integrierten **Landmanagements** durch nachhaltige Wasser- und Stoffnutzung in **Nordostdeutschland***

## Schlussbericht



Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme e.V.

Prof. Dr. Birgit Kamm

*Teltow, 03.06.2015*

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 033 L 025 D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

---

**Schlussbericht zu Nr. 3.2. BNBest-BMBF 98**  
**- Schlussbericht ELaN-BIOPOS -**

---

**Zuwendungsempfänger:**

Forschungsinstitut Bioaktive Polymersysteme (BIOPOS) 033 L 025 D  
e.V.

**Förderkennzeichen:****Vorhabenbezeichnung:**

ELaN- Entwicklung eines integrierten Landmanagements durch nachhaltige Wasser- und Stoffnutzung in Nordostdeutschland – Teilvorhaben D: Verwertung nachwachsender Rohstoffe, TP8A – Alternative Wertschöpfungsnetze

**Laufzeit des Vorhabens:**

01.01.2011 – 31.12.2014

---

## I. Kurzdarstellung

### 1. Aufgabenstellung

Innerhalb des Arbeitspaketes A im Teilprojekt 8 hatte BIOPOS die Aufgabe, die im Projekt vom Projektpartner Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde (HNEE) erhobenen Daten zur Landnutzung mit Blick auf die Verarbeitung von Biomassen in einer zukünftigen LCF-Bioraffinerie zu nutzen, um für die derzeit vorhandenen land- und forstwirtschaftlichen Verarbeitungstechnologien alternative Wertschöpfungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Die Ergebnisse sollen in das derzeit vom Teilbereich 3 im Projekt erarbeitete Strategiepapier „Gereinigtes Abwasser in der Landschaft-Potenziale erkennen, Risiken abwägen, Handlungsoptionen nutzen“ einfließen und werden auch außerhalb des Projektes in Workshops und auf Kongressen mit Beteiligung von BIOPOS dargestellt.

### 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

BIOPOS beschäftigt sich bereits seit 1997 mit dem Thema Bioraffineriesysteme und der Verarbeitung von Biomasse bis hin zur Herstellung von Grundchemikalien und besitzt alle ideellen Voraussetzungen um mit den materiellen Voraussetzungen des Zuwendungsgebers alternative Wertschöpfungsmöglichkeiten in Verbindung mit einer nachhaltigen Landnutzung aufzuzeigen.

### 3. Planung und Ablauf des Vorhabens.

#### **Geplante und durchgeführte Arbeiten 2011**

Sammlung und Auswertung der Informationen über die in den Untersuchungsgebieten vorhandenen und für die stoffliche Nutzung verfügbaren Arten und Mengen von Pflanzen-Biomasse.

Empfehlung der alternativen Wertschöpfung in der nachhaltigen Landwirtschaft durch Integration einer LCF-Bioraffinerie zur Verknüpfung von stofflicher Nutzung von Biomasse und der energetischen Verwertung der Reststoffe.



#### **Geplante und durchgeführte Arbeiten 2012**

Festlegung auf die Rohstoffe im Untersuchungsgebiet zur Betrachtung in TP8A unter Einbeziehung der Steckbriefe für das Entscheidungsunterstützungssystem TORBOS  
Holzbiomasse aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) und Schilf aus Paludikultur  
LCF-Bioraffinerie: Nutzung von Holzbiomasse aus Kurzumtriebsplantagen (KUP), Schilf und trockenen Biomassen aus der Landschaftspflege  
Grünlandnutzung hat bezogen auf die Flächenbausteine eine eher untergeordnete Bedeutung, deshalb Betrachtung der LCF (holzartigen) Biomasse

#### **Geplante und durchgeführte Arbeiten 2013**

Verknüpfung von stofflicher Nutzung und energetischer Verwertung zu einer Konzeption von innovativen Wertschöpfungsketten  
Ermittlung der Massenbilanz für die Herstellung von Furandicarbonsäure als eine Plattformchemikalie aus Cellulose  
Aufstellung der Energiebilanz für diesen Prozess

#### **Geplante und durchgeführte Arbeiten 2014**

Auswahl von Pappelholz für die beispielhafte Darstellung der stofflichen Nutzung aufgrund der breiten Datenbasis  
Ermittlung der Massen- und Energiebilanzen der Verarbeitung von Cellulose zu der Grundchemikalie 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) und den Plattformchemikalien 2,5-Furandicarbonsäure (FDCA) und 5-Hydroxymethyl-2-Furancarbonsäure als Ausgangsprodukte für die Synthese von biobasierten Polymeren  
Entwicklung eines Verfahrensfließbildes als Grundlage für ein späteres Upscaling der Prozesse am Beispiel von FDCA  
Bewertung der Herstellung im Vergleich zum erdölbasierten industriellen Prozess

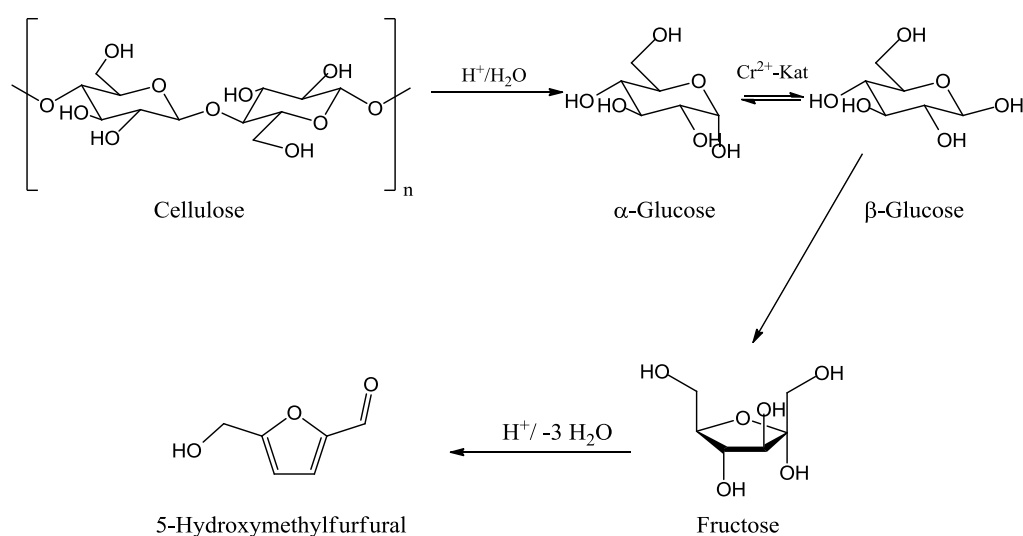
## **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Zur Nutzbarmachung von Biomasse bzw. der Konversion biobasierter Rohstoffe in Chemikalien, bedarf es neuer Technologien, die es zu entwickeln gilt. Ein solches Konzept stellt die Bioraffinerie dar. Durch die geschickte Verknüpfung chemischer und biotechnologischer Prozesse kann eine komplett auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Stoffwirtschaft aufgebaut und so äquivalent zu den petrochemischen Produktstambäumen rein auf nachwachsenden Rohstoffen basierende Produktstambäume entwickelt werden.

Durch säurekatalysierte Dehydratisierung cellulosehaltiger Rohstoffe wie z.B. Holz, Stroh oder anderer cellulosehaltiger Biomassen, kann beispielsweise die hochfunktionalisierte Plattformchemikalie 5-Hydroxymethylfurfural (abgekürzt HMF, siehe Abbildung 1), ein fünfgliedriger sauerstoffhaltiger Heterocyclus, gewonnen werden.<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup> Amiri, H., Karimi, K. & Roodpeyma, S. Production of furans from rice straw by single-phase and biphasic systems. Carbohydrate Research 345, 2133–2138 (2010).

<sup>2</sup> Dutta, S., De, S., Alam, M. I., Abu-Omar, M. M. & Saha, B. Direct conversion of cellulose and lignocellulosic biomass into chemicals and biofuel with metal chloride catalysts. Journal of Catalysis 288, 8–15 (2012).



**Abb. 1: Synthese von Hydroxymethylfurfural (HMF) aus dem nachwachsenden Rohstoff Cellulose**

Dabei sind Plattformchemikalien als Chemikalien definiert, die aufgrund ihres molekularen Aufbaus bzw. ihrer hohen Funktionalisierung (chemische Gruppen: z.B. Carboxylgruppe oder Alkoholfunktion) in eine Vielzahl weiterer Synthesebausteine umwandelt werden können. Auf Grund dessen wurde 5-Hydroxymethylfurfural vom US Department of Energy zu den Top 12 Plattformchemikalien, die aus Cellulose gewonnen werden können, gestellt<sup>5</sup>. Durch die vorhandene Alkohol- und Aldehydfunktion lässt sich 5-Hydroxymethylfurfural in eine Vielzahl von Folgeprodukten chemisch konvertieren die z.B. als wertvolle Polymerbausteine fungieren können.

<sup>3</sup> Yang, F., Liu, Q., Bai, X. & Du, Y. Conversion of biomass into 5-hydroxymethylfurfural using solid acid catalyst. *Bioresource Technology* 102, 3424–3429 (2011).

<sup>4</sup> Zhang, Z. & Zhao, Z. K. Microwave-assisted conversion of lignocellulosic biomass into furans in ionic liquid. *Bioresource Technology* 101, 1111–1114 (2010).

<sup>5</sup> Bozell, J. J. & Petersen, G. R. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy’s ‘Top 10’ revisited. *Green Chem.* 12, 539–554 (2010).

Durch formale Oxidation der Aldehyd- als auch der Alkohol-Funktion des 2,5-Hydroxymethylfurfural (HMF) gelangt man zur 2,5-Furandicarbonsäure (FDCA). Damit stellt 2,5-Furandicarbonsäure eine aus nachwachsenden Rohstoffen zugängliche Dicarbonsäure dar. Eine mögliche breitere Anwendung könnte die Substitution der Terephthalsäure im PET darstellen<sup>15</sup>.

Die Darstellung durch Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural mittels unterschiedlichster Oxidationsmittel wurde in der Vergangenheit schon vielfach untersucht. Mittels chemischer Oxidationsmittel, wie etwa konzentrierter Salpetersäure<sup>6</sup>, lässt sich 2,5-Furandicarbonsäure aber nur in geringen Ausbeuten von ca. 25% darstellen. In einem japanischen Patent konnte Miura et.al.<sup>7</sup> bei der Verwendung Alkali- und Erdalkalipermanganaten 2,5-Furandicarbonsäure in Ausbeuten von bis zu 85% erhalten. Ein großer Nachteil der chemischen Oxidation liegt allerdings in der Entstehung erheblicher Mengen an Nebenprodukten, wie z.B. Braunstein bei der Verwendung von Permanganaten oder stark saurer Lösungen bei der Verwendung von Salpetersäure, die einer großtechnische Umsetzung aus wirtschaftlichen und umweltfreundlichen Gesichtspunkten entgegen stehen. Weiterhin fällt die entstehende 2,5-Furandicarbonsäure nicht rein an, sondern enthält noch Verunreinigungen weiterer Oxidationsprodukte des 2,5-Hydroxymethylfurfural, wie etwa 5-Formyl-2-furancarbonsäure und 5-Hydroxymethyl-2-furancarbonsäure.

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von 2,5-Furandicarbonsäure stellt die Biokatalyse mittels Enzymen dar. Die enzymatische Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural mittels Chloroperoxidase/Wasserstoffperoxid wird vorteilhafterweise bei niedrigen Temperaturen und in Wasser durchführt, führt aber zu Produktgemischen von 2,5-Furandialdehyd, 5-Hydroxymethylfurancarbonsäure und 5-Formylfurancarbonsäure<sup>8</sup> und ist aufgrund der Verwendung von Wasserstoffperoxid gegenüber der Verwendung von Sauerstoff als Oxidationsmittel nicht wirtschaftlich.

Die homogen katalysierte Oxidation von 5-Hydroxymethylfurancarbonsäure mittels Metallbromide und Luftsauerstoff wurde 2001 durch Partenheimer und Grushin<sup>9</sup> untersucht. Sie konnten 2,5-Furandicarbonsäure allerdings nur in mäßiger Ausbeute von 60 % darstellen.

Auf dem Gebiet der heterogenen edelmetallkatalysierten Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural mit molekularem Sauerstoff erfolgte in den letzten beiden Jahrzehnten eine intensive Untersuchung. Dabei wurden vor allen Dingen Platinkatalysatoren eingesetzt. 1967 veröffentlichte bereits Lew et. al.<sup>10</sup> ein Patent zur platinkatalysierten (Pt(13%)/C) Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural mit molekularem Sauerstoff, wobei er 2,5-Furandicarbonsäure in 99% Ausbeute nach 5 h Reaktionszeit und einer Reaktionstemperatur von  $T = 24^{\circ}\text{C}$  erhielt. Vinke et. al.<sup>11</sup> konnte durch Verwendung eines Platinkatalysators (Pt(5%)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 2,5-Furandicarbonsäure in nahezu quantitativen Ausbeuten bei  $T = 60^{\circ}\text{C}$  und 6 Stunden Reaktionszeit erhalten. Leupold<sup>12</sup> entwickelte ebenfalls ein Verfahren zur platinkatalysierten (Pt(5%)/C) Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural mit molekularem Sauerstoff. Nach 2h Reaktionszeit und  $70^{\circ}\text{C}$  erhielt er 2,5-Furandicarbonsäure in 90% Ausbeute. Verdeguer et.

---

<sup>6</sup> T. El Hajj, A. Masroua, J. C. Martin, G. Descotes, Synthèse de l'hydroxyméthyl-5 furanne carboxaldehyde-2 de ses dérivés par traitement acide de sucres sur résine échangeuses d'ions, Bulletin de la Société Chimique de France 1987, 855 - 860.

<sup>7</sup> T. Miura, H. Kakinuma, T. Kawano, H. Matsuhisa, US Patent 2007/0232815 A1 2007.

<sup>8</sup> M. P. J. van Deurzen, F. van Rantwijk, R. A. Sheldon, Journal of Carbohydrate Chemistry 1997, 16, 299 – 309.

<sup>9</sup> W. Partenheimer, V. Grushin, Synthesis of 2,5-Diformylfuran and Furan-2,5-dicarboxylic acid by catalytic air-oxidation of 5-hydroxymethylfurfural; Advanced Synthesis & Catalysis 2001, 343, 102-111.

<sup>10</sup> B. W. Lew, US Patent 3 326 944, 1967.

<sup>11</sup> P. Vinke, H. van Dam, H. van Bekkum, Studies in Surface Science and Catalysis, 1990, 55, 147-158.

<sup>12</sup> E. I. Leupold, M. Wiessner, M. Schlingmann, K. Rapp DE Patent 3 826 073 A1, 1990.

al.<sup>13</sup> führte die Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural in stark basischem Milieu durch. Dabei verwendete er einen Platin/Blei-Katalysator (Pt(5%)/Pb(5%)/C), wobei er 2,5-Furandicarbonsäure in nahezu quantitativen Ausbeuten nach 7h Reaktionszeit und einer Reaktionstemperatur von  $T = 24^{\circ}\text{C}$  erhielt. Kröger et.al.<sup>14</sup> verwendete einen Pt/Bi/C-Katalysator zur Oxidation von HMF. Eine kontinuierliches als auch ein diskontinuierliches Verfahren zur Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural mit einem Pt/ZrO<sub>2</sub> Katalysator wurde von Lilga<sup>15</sup> 2008 in einem Patent veröffentlicht, wobei 2,5-Furandicarbonsäure in einer Ausbeute von bis zu 98% erhalten wurde. Erst kürzlich wurden Arbeiten zur goldkatalysierten Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural durchgeführt. Casanova et. al.<sup>16</sup> konnte durch die Verwendung verschiedener Goldkatalysatoren 2,5-Furandicarbonsäure in Ausbeuten von bis 99% darstellen. Gorbanev et. al.<sup>17</sup> benutzte Au(1%)/TiO<sub>2</sub>-Katalysator und erhielt 2,5-Furandicarbonsäure in Ausbeuten von bis zu 71%. Er führt die Oxidation mit hohen Basenüberschüssen (20 Äquivalente in Bezug auf HMF) durch. Aus eigenen experimentellen Untersuchungen konnte bei solch hohen Basenüberschüssen erhebliche Huminbildung durch Kondensationsreaktionen des 5-Hydroxymethylfurfurals beobachtet werden, was ein Grund für die mäßige Ausbeute sein könnte. Allgemein wird die edelmetallkatalysierte Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural in wässrigem basischem Milieu durchgeführt. Die entstehende 2,5-Furandicarbonsäure fällt so in Form ihres löslichen Di-Natriumsalzes an.

---

<sup>13</sup> P. Verdeguer, N. Merat, A. Gaset, J. Mol. Catal. 1993, 85, 327 – 344.

<sup>14</sup> M. Kröger, Herstellung von 5-Hydroxymethylfurfural aus D-Fructose und In-situ-Oxidation von 5-Hydroxymethylfurfural zu 2,5-Furandicarbonsäure ausgehend von D-Fructose; Entwicklung neuartiger Verfahren auf Basis von Membranen und immobilisierten Katalysatoren. Dissertation, Braunschweig (2004).

<sup>15</sup> M. A. Lilga, R. T. Hallen, J. Hu, J. F. White, M. J. Gray, US Patent 2008/0103318 A1, 2008.

<sup>16</sup> O. Casanova, S. Iborra, A. Corma, *ChemSusChem* **2009**, 2, 1138-1144.

<sup>17</sup> Y. Y. Gorbanev, S. Klitgaard, J. Woodley, C. H. Christensen, A. Riisager, *CemSusChem* **2009**, 2, 672-675.



## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Im Rahmen des Projektes wurden zur Erreichung der Ziele mit verschiedenen Stellen zusammengearbeitet.

- Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde, Fachbereich Wald und Umwelt  
Verbundprojekt ELaN, TP7 Energieholzanbau, Nora Koim  
Alfred-Möller-Str. 1, Haus 10, 16225 Eberswalde  
Telefon: (03334) 657-118 Fax: (03334) 657-3800-118  
Handy: 01577 83 90 126 E-Mail: [nora.koim@hnee.de](mailto:nora.koim@hnee.de)  
Webseite Hochschule: [www.hnee.de](http://www.hnee.de)  
Webseite Verbundprojekt: [www.elan-bb.de](http://www.elan-bb.de)  
Webseite Teilprojekt 7: [www.hnee.de/de/Forschung/...](http://www.hnee.de/de/Forschung/...)
  
- Zentrum Technik und Gesellschaft (ZTG) TU Berlin  
Bereichsleiter Nachhaltigkeitsforschung Dr. Benjamin Nölting, Prof. Dr. Dr. Martina Schäfer,  
Hardenbergstr. 16-18, 10623 Berlin  
Tel: +49/ 30/314-26 368  
Fax: +49/ 30/314-26 917  
E-Mail: [noelting@ztg.tu-berlin.de](mailto:noelting@ztg.tu-berlin.de)  
[www.ztg.tu-berlin.de](http://www.ztg.tu-berlin.de)
  
- Leibniz-Institute for Agricultural Engineering Potsdam-Bornim e.V.  
Technology Assessment and Substance Cycles, Dr. Philipp Grundmann,  
Dr. rer. agr. Carlotta von Bock und Polach, Oliver Maaß,  
Max-Eyth-Allee 100, Office B 203, D-14469 Potsdam  
Tel.: +49 (0)331 5699-229  
Fax: +49 (0)331 5600-849  
Email: [pgrundmann@atb-potsdam.de](mailto:pgrundmann@atb-potsdam.de)  
Homepage: [www.atb-potsdam.de](http://www.atb-potsdam.de)<<http://www.atb-potsdam.de/>>
  
- Humboldt-Universität zu Berlin  
Department for Agricultural Economics, Katrin Daedlow  
Division of Resource Economics  
Philipstraße 13, House 12/1, Office PH 1.21, 10099 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 2093 6481  
Homepage: [www.agrar.hu-berlin.de/wisola/fg/ress](http://www.agrar.hu-berlin.de/wisola/fg/ress)<<http://www.agrar.hu-berlin.de/wisola/fg/ress>>
  
- Hochschule für nachhaltige Entwicklung (FH) Eberswalde, Fachbereich Vegetationskunde und angewandte Pflanzenökologie  
Prof. Dr. Vera Luthardt, [vera.luthardt@hnee.de](mailto:vera.luthardt@hnee.de)  
Telefon: +49 (3334) 657 327  
Fax: +49 (3334) 657 282  
Fachbereich Landschaftsnutzung und Naturschutz, ELaN Teilprojekt 08C „Rentabilität integrierter Landmanagementsysteme“  
Nicole Petzke, [Nicole.Petzke@hnee.de](mailto:Nicole.Petzke@hnee.de)  
Telefon: +49 (3334) 657 431  
Fax: +49 (3334) 657 282

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### Gliederung

#### 1.1 Einleitung

#### 1.2 Rohstoffbasis und Rohstoffanalyse

#### 1.3 Polymerbausteine als Produkte der Cellulose

##### 1.3.1 Herstellung von 5-Hydroxymethylfurfural (HMF)

##### 1.3.2 Herstellung von 2,5-Furandicarbonsäure (FDCA)

##### 1.3.3 Herstellung von 5-Hydroxymethyl-2-Furancarbonsäure (HMFCFA)

##### 1.3.4 Verfahrensfliessbild am Beispiel der Herstellung von FDCA

#### 1.4 Massenbilanzen am Beispiel von FDCA

#### 1.5 Energiebilanzen am Beispiel von FDCA

#### 1.6 Bewertung der Herstellung am Beispiel von FDCA im Vergleich zum petrochemischen Prozess

#### 1.7 Abkürzungsverzeichnis

### 1.1 Einleitung

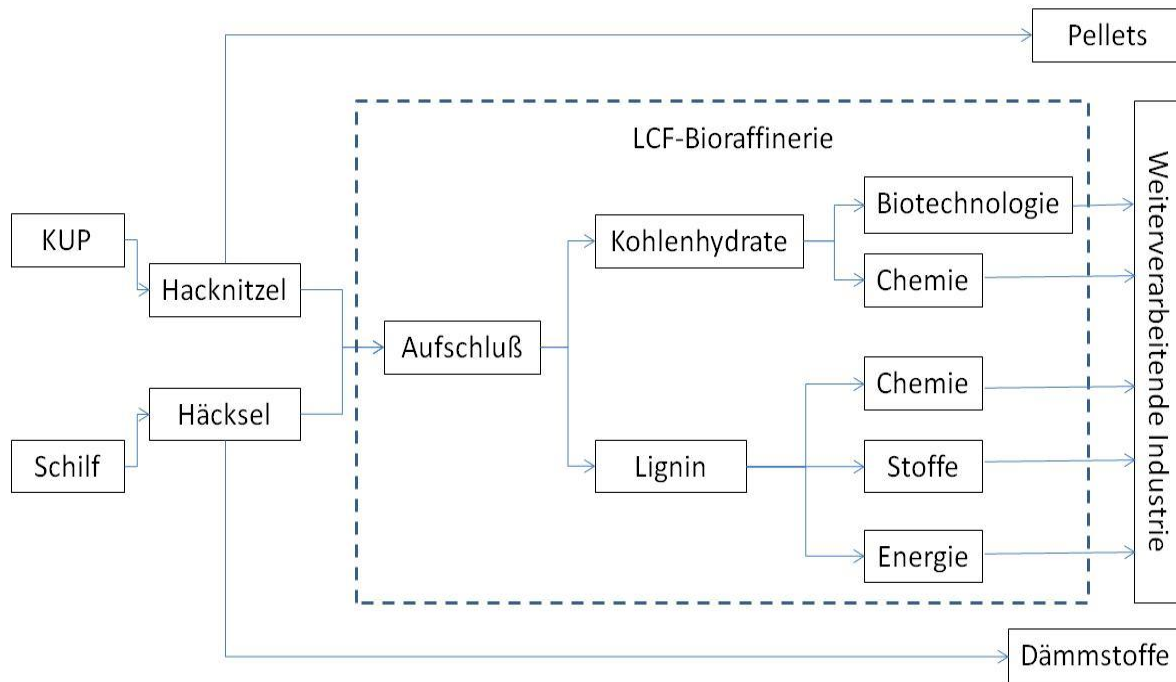
Die Entwicklung eines integrierten Landmanagements erfordert neue Ansätze in der Landnutzungskonzeption welche die Landnutzungsänderungen und den globalen Wandel (Klima und Demographie) mit einbeziehen. Landmanagement als aktives Handlungsfeld erfordert eine transdisziplinäre, integrative und regionenbezogene Forschung die sich auf eine Verbund-übergreifende Kommunikation stützt und handlungs- und umsetzungsorientierte Ergebnisse liefert. Die Notwendigkeit der Wertschöpfung im ländlichen Raum ist dabei eine große Herausforderung. Die folgenden wissenschaftlichen Projektziele des Teilprojektes 8 können dazu einen Beitrag leisten:

- Nutzung von Sonderstandorten zur Biomasse-Erzeugung
- Interdisziplinäre Integration ingenieur-, natur- und sozialwissenschaftlicher Wissensbestände zur Thematik
- Verknüpfung der Innovationen zu lokalen Modelllösungen und ihre Weiterentwicklung zu einer systemischen Gesamtlösung für die Untersuchungsregion
- Abschätzung der regionalen und überregionalen Übertragbarkeit der entwickelten Lösungen und Formulierung genereller Technologie- und Strategieelemente.

Innerhalb des Arbeitspaketes A im Teilprojekt 8 hatte BIOPOS die Aufgabe, die im Projekt von Projektpartner Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde erhobenen Daten zur



Landnutzung mit Blick auf die Verarbeitung von Biomassen in einer zukünftigen LCF-Bioraffinerie zu nutzen, um für die derzeit vorhandenen land- und forstwirtschaftlichen Verarbeitungstechnologien alternative Wertschöpfungsmöglichkeiten aufzuzeigen. In einer Bioraffinerie können die in der unterschiedlichen Landbewirtschaftung anfallenden Biomassen, die nicht für die Nahrungs- und Futtermittelherstellung geeignet sind, in innovativen Wertschöpfungsketten verarbeitet und dadurch stofflich und energetisch genutzt werden.<sup>18</sup>



**Abb. 2: Konzeption von innovativen Wertschöpfungsketten in einer LCF-Bioraffinerie**

## 1.2 Rohstoffbasis und Rohstoffanalyse

Im Rahmen des Projektes wurden vom Teilprojekt (TP) 05 für die stoffliche und energetische Verwertung von einigen Pflanzen und deren Vorkommen bzw. Anbau an verschiedenen Standorten Steckbriefe erarbeitet. Sie können den Akteuren im nachhaltigen Landmanagement als Entscheidungsunterstützung (DSS-TORBOS) dienen<sup>19</sup>. Danach sind bevorzugte lignocellulosereiche Rohstoffe vor allem Schilf und Holz von Erle, Weide und Pappel, wobei die Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen (KUP) eine ökonomische Holznutzung ermöglicht.<sup>20</sup> Die KUP-Fläche in Berlin und Brandenburg beträgt aktuell ca. 2000 Hektar<sup>21</sup>. 2011 waren es rund 1.600 ha für Brandenburg

<sup>18</sup> Kamm, B.; Gruber, P.R.; Kamm, M.; Biorefineries – Industrial Processes and Products, ULLMANN'S ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY, 7th ed. WILEY\_VCH, 2011, ISBN: 978-3-527-32943-4

<sup>19</sup> Hrsg.: Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften und Hochschule für Nachhaltige Entwicklung Eberswalde, FB Landschaftsnutzung und Naturschutz, Mai 2015, 38 Seiten [www.dss-torbos.de](http://www.dss-torbos.de)

<sup>20</sup> J. Schweier, G. Becker, Economics of poplar short rotation coppice plantations on marginal land in Germany, Biomass and Bioenergy 59 (2013) 494-502.

<sup>21</sup> Brandenburgische Energie Technologie Initiative ETI, Energieholz aus Kurzumtriebsplantagen, Leitfaden, [http://www.eti-brandenburg.de/fileadmin/user\\_upload/downloads\\_2013/KUP\\_Leitfaden\\_2013\\_lowres.pdf](http://www.eti-brandenburg.de/fileadmin/user_upload/downloads_2013/KUP_Leitfaden_2013_lowres.pdf)

deutschlandweit über 4000 Hektar<sup>22</sup>. Im Rahmen des Projektes wurden vom TP7 (HNEE, Nora Koim) Anbauversuche mit Pappelholz auf ehemaligen Rieselfeldern durchgeführt und ausgewertet. Die Ertragszahlen sind durch die örtlich sehr unterschiedliche Kontamination des Bodens stark schwankend und betragen im Durchschnitt mit 3,2 – 3,7 t/ha/a. Sie sind deutlich geringer als auf normalen Acker-Standorten wo mit Erträgen von 8 bis 10 t/ha/a gerechnet werden kann<sup>23</sup>. Die Erträge können durch Züchtung neuer Sorten noch gesteigert werden<sup>24</sup>



#### Scenario für den Rohstoff Pappelholz aus der Bewirtschaftung von KUP

Die Verwendung von Pappel als nachwachsenden Rohstoff in der Wertschöpfungskette Bioraffinerie hat mehrere Vorteile:

- Pappeln sind leicht auf Kurzumtriebsplantagen anzubauen
- Es ist keine zusätzliche Düngung notwendig
- Pappeln haben verglichen mit Miscanthus, Stroh, Kiefer und Energie-Roggen die beste Energiebilanz
- weitere Erhöhung der Biomasseerträge durch Züchtung ist möglich, ebenso wie
- die Gewinnung weiterer Inhaltsstoffe und komplexer Wirkstoffe.<sup>25</sup>

Für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind neben dem Flächenertrag sowohl die Erzeugerpreise (Herstellkosten pro Tonne Holz) als auch die am Markt zu erzielenden Hackschnitzelpreise von Bedeutung, falls das Holz nicht in einer Erzeuger-eigenen Anlage zur Energiegewinnung genutzt wird. Die Erzeugerpreise für Holz von Energieholzplantagen werden vom kommerziellen Erzeuger Lignovis<sup>26</sup> mit 90-95 €/t<sub>atro</sub> angegeben. Die zu erzielenden Hackschnitzelpreise sind regionalen Schwankungen unterworfen, der z.B. für das 1.Quartal 2012 mit 144,09 €/t<sub>atro</sub> gelistet wurde<sup>27</sup>. C.A.R.M.E.N. e.V. veröffentlicht vierteljährlich einen Preisindex, der für Berechnungen der Rentabilität zugrunde gelegt werden kann. Für das 1.Quartal 2015 ist ein mittlerer Verkaufspreis von 137,55 €/t<sub>atro</sub> errechenbar<sup>28</sup>. Kröber et. al (2013) zeigen, dass für einen landwirtschaftlichen Betrieb mit KUP-Anbau auf Ackerland beachtliche Gewinnbeiträge möglich sind<sup>29</sup>. Auf

---

<sup>22</sup> K. Strohm, J. Schweinle, M. Liesebach, B. Osterburg, A.Rödl, S. Baum, H. Nieberg, A. Bolte, K. Walter, Kurzumtriebsplantagen aus ökologischer und ökonomischer Sicht, Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie, Oktober 2012, 89 Seiten, [http://literatur.ti.bund.de/digbib\\_extern/bitv/dn050857.pdf](http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/bitv/dn050857.pdf)

<sup>23</sup> D. Gerold, M. Schneider, Erfahrungsberichte zur Vernetzung von Erzeugern und Verwertern von Dendromasse für die energetische Verwertung, [www.ifl-leipzig.de/de/publikationen/zeitschriften-und-reihen/forum-ifl.html](http://www.ifl-leipzig.de/de/publikationen/zeitschriften-und-reihen/forum-ifl.html) Leipzig 2014

<sup>24</sup> Allison G G, Robbins M P, Carli J, Clifton-Brown J C, and Donnison I S; “Designing Biomass Crops with Improved Caloric Content and Attributes for Burning: a UK Perspective” in Plant Biotechnology for Sustainable Production of Energy and Co-products, Biotechnology in Agriculture and Forestry 66, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

<sup>25</sup> Welters P; PhytoPARK – Poplar-based biorefinery in Nettetal, Vortrag zum CLIB Forum „Bioraffinerien“ 25.09.2014 Düsseldorf

<sup>26</sup> Lignovis GmbH, Herr Weitz, [www.lignovis.com](http://www.lignovis.com)

<sup>27</sup> DLG-Merkblatt 372, [www.dlg.org/fileadmin/downloads/merkblaetter/dlg-merkblatt\\_372.pdf](http://www.dlg.org/fileadmin/downloads/merkblaetter/dlg-merkblatt_372.pdf)

<sup>28</sup> <http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/kup-hackschnitzel>

<sup>29</sup> Kröber M, Heinrich J und Wagner P; Energieholz-anbau auf Ackerland, AFZ-Der Wald, 21/2013

Grenzertragsstandorten wie z.B. ehemaligen Rieselfeldern muss eine Bewirtschaftung mit Kurzumtriebsplantagen durch die geringen Ertragszahlen (siehe oben) als nicht rentabel betrachtet werden. Falls eine Nutzung dieser Standorte gesellschaftlich gewünscht ist, sollten die wirtschaftlichen Nachteile durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. durch Vergütung der Landschaftspflege auf diesen Flächen, ausgeglichen werden.



Für die beispielhafte Verwendung von Pappelholz als Lignocellulose-Rohstoff für die Herstellung von Plattformchemikalien stehen BIOPOS die Ergebnisse verschiedener Rohstoffanalysen zur Verfügung.

A) Rohstoffanalyse Pappelholz<sup>30</sup> 100% Trockensubstanz (Angaben in m%):

Extrakte	Lignin	Uronsäuren	Glucose	Xylose	Mannose	Galactose	Rhamnose	Summe
3,57	24,77	3,59	39,41	11,71	2,34	0,41	0,25	86,05

B) Rohstoffanalyse Schwarzpappel fein gemahlen, extraktfrei (eigene Analyse<sup>31</sup>)  
Durchschnittswerte in m%

Extrakte	Lignin	Asche	Glucan	Xylan	Mannan	Summe
-	32,61	0,18	39,42	13,99	4,0	90,21

C) Rohstoffanalyse Pappel „Gold Standard“ fein gemahlen, extraktfrei (Tree for Joules Projekt, chemische Analyse Projektpartner CIRAD) Durchschnittswerte in m%

Extrakte	Lignin	Asche	Cellulose	Hemicell.	Summe
-	27,41	n.b.	40,22	35,78	103,41

Im Projekt wird zunächst nur die Cellulose für die Gewinnung von Chemikalien verwendet. In Auswertung der vorliegenden Analysen ergibt sich ein Cellulosegehalt (auch als Glucan oder Glucose bezeichnet) von ca. 40%. Dieser Wert ist Grundlage für die weiteren Berechnungen.

Durch eine Vorbehandlung von Pappelholz-Hackschnitzeln wird ein Teil des Lignins und der Hemicellulosen gelöst und dadurch der Cellulosegehalt im verbleibenden Feststoff auf fast 70% erhöht, wie die folgende Rohstoffanalyse zeigt.

Rohstoffanalyse nach NREL-Standard nach einer Dampf-Vorbehandlung (Tree for Joules Projekt) des zerkleinerten Pappelholzes (Angaben in m%):

Probe Nr.	Extrakte	Lignin	Asche	Glucan	Xylan	Mannan	Summe
2.2.1	4,49	23,79	0,07	69,44	7,95	1,4	102,65
1.4.1	6,49	22,28	0,05	69,9	8,0	1,41	101,64

Für die weiteren Berechnungen wird ausschließlich die Cellulose (Glucan-gehalt 69,67%) betrachtet.

<sup>30</sup> BIOSYNERGY, EU-Projekt Nr. 038994- (SES6)

<sup>31</sup> TreeForJoules, EU-Projekt, BMBF FKZ: 0315914B

### **1.3 Grundbausteine und Plattformchemikalien als Produkte der Cellulose**



#### **1.3.1 Herstellung von 5-Hydroxymethylfurfural (HMF)**

Durch eine Dehydratisierung der Cellulose mit Hilfe zweier heterogener Katalysatoren und einer ionischen Flüssigkeit wird bei Temperaturen zw. 100 u. 120°C innerhalb von 2 Stunden HMF erzeugt. Aus dem Reaktionsgemisch wird das HMF durch eine Extraktion abgetrennt und durch Destillation mit einer Ausbeute von 32 % bezogen auf Cellulose gewonnen. Sowohl die Katalysatoren als auch die ionische Flüssigkeit können zu 100% recycelt werden.

#### **1.3.2 Herstellung von 2,5-Furandicarbonsäure (FDCA)**

Durch heterogen katalysierte Oxidation des HMF im wässrigen Milieu wird bei Temperaturen zwischen 100-150°C innerhalb von 1-2 Stunden FDCA mit einer Ausbeute von 99,5% bezogen auf HMF hergestellt. Anschließend wird das Reaktionsgemisch durch Eindampfen auf die Hälfte reduziert und die FDCA durch Zugabe einer Säure kristallin ausgefällt. Nach der Abtrennung des kristallinen Produktes wird dieses noch gewaschen und steht dann als Polymer-Baustein zur Verfügung.

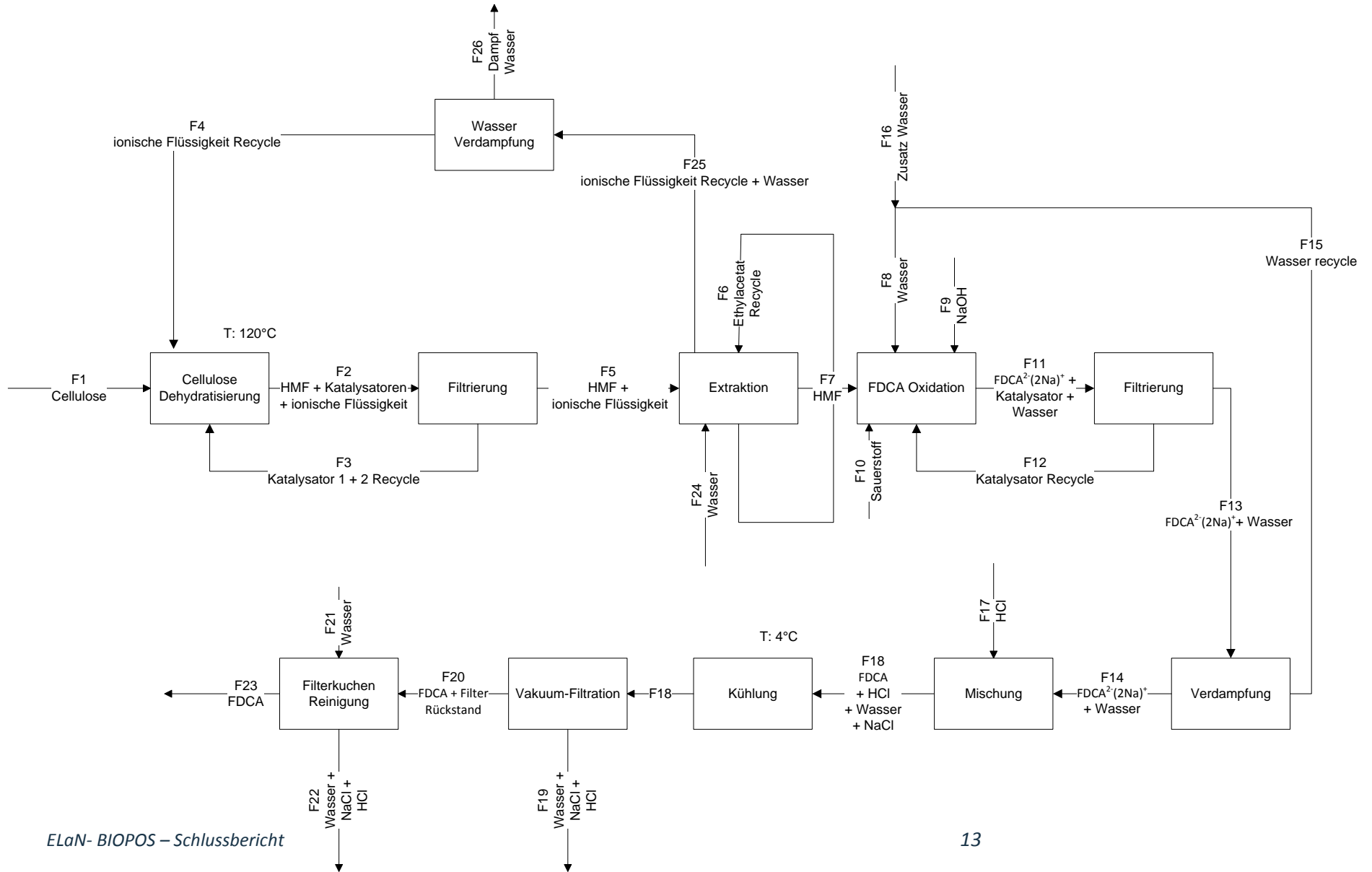
#### **1.3.3 Herstellung von 5-Hydroxymethyl-2-Furancarbonsäure (HMFCa)**

Durch heterogen katalysierte Oxidation des HMF im wässrigen Milieu wird bei einer Temperatur von 70°C innerhalb von 2 Stunden HMFCa mit einer Ausbeute von 71% bezogen auf HMF hergestellt. Anschließend wird das Reaktionsgemisch durch Eindampfen auf die Hälfte reduziert und die HMFCa durch Zugabe einer Säure kristallin ausgefällt. Der hellgelbe kristalline Niederschlag wird abgetrennt, gewaschen und getrocknet.

#### **1.3.4 Verfahrensfließbild am Beispiel der Herstellung von FDCA**

(Abbildung 3, siehe folgende Seite)

Die Abbildung 3 beschreibt die Produktstufen und die dazugehörigen Konversions- sowie Trenn- und Reinigungsschritte.



## 1.4. Massenbilanzen am Beispiel von FDCA

Die in Tab. 1 und 2 aufgeführten Stoff- und Reaktionswerte wurden als Basis für die Aufstellung der Massen- und Energiebilanzen verwendet. Die Berechnung wurde auf die Masse von 1 kg FDCA Reaktionsprodukt bezogen.

**Tabelle 1: Reaktionswerte**

<b>Daten</b>	
FDCA request [kg]	1
Ausbeute HMF/Cellulose (%w/w)	32%
Ausbeute FDCA/HMF (%w/w)	123,2%
Verhältniss Glucose/Cellulose (g/g)	1,111
CrCl <sub>2</sub> (7%mol) recycle (F3)	100%
Amberlyst 15 dry recycle (F3)	100%
Ionische Flüssigkeit recycle (F4)	100%
Wasser recycle (F15)	50%
Extraktionseffizienz von HMF	87%
Pt(5%)/C recycle (F12)	100%
FDCA Erholung (Vakuum Filtration)	99%
FDCA Erholung (Filter Torte Reinigung)	99%

**Tabelle 2: Stoff- und Reaktionswerte**

<b>Oxidation von HMF zu FDCA</b>		<b>Einheiten</b>
Wasser	56,66	kg/kg HMF
Pt(5%)/C	0,66	kg/kg HMF
NaOH	0,8	kg/kg HMF
FDCA-Ausbeute (% mol) bez. auf HMF)	99,50%	%
Sauerstoff	4000	L/h/kg HMF
37%w/w HCl	2,3	kg/kg HMF
Reaktionszeit	5	h
Reaktionstemperatur	70	°C
Waschwasser	20	L/kg HMF

Die Berechnung der Massenbilanzen erfolgte durch die Verknüpfung der Stoff- und Reaktionswerte aus den Experimenten (Tabellen 1 und 2) in der Tabelle 3.

Die Produktstufen F1-F3 aus Tabelle 3 charakterisieren die Cellulose Dehydratisierung, F5 bezieht sich auf die HMF-Filtration, F4, F6 und F7 charakterisieren die HMF Extraktion, F8-F11 und F16 die FDCA Oxidation, F12 u. F13 die FDCA Filtration, gefolgt von der Eindampfung der Lösung (F14 und F15) und der Reinigung der FDCA (F17-F23). Schlussendlich stehen F24 – F26 für das Recycling der ionischen Flüssigkeit.

**Tabelle 3: Optimierter Prozess zur Herstellung von FDCA**

Bezeichnung	Zusammensetzung	Bemerkung	Menge	Einheiten	in Cell [kg/kg Cell]	in FDCA [kg/kg FDCA]
F1	Cellulose	entspricht 4,94 mmol Glucose	0,00080	[kg]	1,0000	2,9242
F2	HMF	Produkt	0,00026	[kg]	0,3192	0,9333
	Katalysator 1	Amberlyst 15 dry (saurer ionen-tauscher)	0,00010	[kg]	0,1250	0,3655
	Katalysator 2	CrCl <sub>2</sub> (7%mol)	0,00006	[kg]	0,0750	0,2193
	ionische Flüssigkeit	1-Ethyl-3-methylimidazoliumchlorid (Medium)	0,00800	[kg]	10,0000	29,2424
	<b>Tot</b>	Produkt Mischung	0,00842	[kg]	10,5192	30,7606
F3	Katalysator 1 + 2 recycle	CrCl <sub>2</sub> (7%mol) + Amberlyst 15 dry	0,00016	[kg]	0,2000	0,5848
F4	ionische Flüssigkeit recycle	wird als reine betrachtet (idealer Zustand)	0,00800	[kg]	10,0000	29,2424
F5	HMF		0,00026	[kg]	0,3192	0,9333
	ionische Flüssigkeit		0,00800	[kg]	10,0000	29,2424
	<b>Tot</b>		0,00826	[kg]	10,3192	30,1758
F6	Ethylacetat Recycle	3 Extraktionen von 120 ml	0,36000	[L]	450,0000	1315,9102
F7	HMF		0,00022	[kg]	0,2777	0,8120
F8	Wasser	70°C	0,01259	[kg]	15,7331	46,0074
F9	NaOH	(30%) konstante Zugabe (konstantes pH)	0,00018	[kg]	0,2221	0,6496
F10	Sauerstoff	0,5 bar Überdruck	0,88856	[L/h]	1110,7021	3247,9651
F11	FDCA <sup>2-</sup> (2Na) <sup>+</sup>	Als Natrium Salz	0,00036	[kg]	0,4472	1,3077
	Katalysator	5% Platin auf Aktivkohle	0,00015	[kg]	0,1833	0,5359
	Wasser		0,01259	[kg]	15,7331	46,0074
	<b>Tot</b>		0,01309	[kg]	16,3635	47,8510
F12	Katalysator recycle		0,00015	[kg]	0,1833	0,5359
F13	FDCA <sup>2-</sup> (2Na) <sup>+</sup>		0,00036	[kg]	0,4472	1,3077
	Wasser		0,01259	[kg]	15,7331	46,0074
F14	FDCA <sup>2-</sup> (2Na) <sup>+</sup>		0,00036	[kg]	0,4472	1,3077
	Wasser		0,00629	[kg]	7,8665	23,0037
F15	Wasser recycle		0,00629	[kg]	7,8665	23,0037
F16	Wasser Zusatz		0,00629	[kg]	7,8665	23,0037
F18	HCl	37%w/w	0,00051	[kg]	0,6387	1,8676
	FDCA		0,0002791	[kg]	0,3489	1,0203
	HCl	37%w/w	0,0003805	[kg]	0,4757	1,3909
	Wasser		0,00629	[kg]	7,8665	23,0037
	<b>Tot</b>		0,0071619	[kg]	8,9524	26,1789
F19 + F22	Wasser	Abwasser	0,01074	[kg]	13,4201	39,2435
	HCl		0,0003805	[kg]	0,4757	1,3909
	NaCl		0,00021	[kg]	0,2613	0,7640
	<b>Tot</b>		0,01133	[kg]	14,1570	41,3985
F20	FDCA		0,000276338	[kg]	0,3454	1,0101
	Filter Rückstand	Anteil NaCl und HCl in Filter Kuchen	?	[kg]	-	-
F21	Wasser	zum Waschen	0,004442809	[kg]	5,5535	16,2398
F23	<b>FDCA</b>	<b>Gereinigt</b>	<b>0,0002736</b>	<b>[kg]</b>	<b>0,3420</b>	<b>1,0000</b>
F24	Wasser	für Extraktion	0,02000	[kg]	25,0000	73,1061
F25	ionische Flüssigkeit recycle		0,00800	[kg]	10,0000	29,2424
	Wasser		0,02000	[kg]	25,0000	73,1061
	<b>Total</b>		0,02800	[kg]	35,0000	102,3486
F26	Wasser	Verdampft	0,02000	[kg]	25,0000	73,1061

Für die Herstellung von 1kg gereinigter Furandicarbonsäure werden im Verfahren nach dem Stand der Technik 2,924 kg Cellulose eingesetzt.

### 1.5 Energiebilanzen am Beispiel von FDCA

Die Aufstellung der Energiebilanzen für die Herstellung der Furandicarbonsäure erfolgte auf der Basis von diskontinuierlichen Versuchen im Labormaßstab. Der Bilanzierung der einzelnen Prozessstufen lag folgende allgemeine Gleichung zugrunde:

$$\frac{dE}{dt} = E_{in} - E_{out} + E_{Reakt.}$$

Für jeden Reaktions- bzw. Verfahrensschritt wurden die Energie-Bilanzgleichungen aufgestellt. Im Einzelnen sind das folgende Verfahrensschritte:

- Cellulose Dehydratisierung
- Filtration Katalysator
- HMF Extraktion
- HMF Oxidation
- Filtration Katalysator
- Aufkonzentrierung der Lösung
- FDCA Reinigung
- Recycling der ionischen Flüssigkeit

Dabei wurden die folgenden energetischen Kennzahlen verwendet.

Kennzahlen	Wert	Einheit
Wärmekapazität ionische Flüssigkeit	1,65	KJ/kg*K
Leistung Vakuum	1,1	kW
Wärmekapazität Wasser	4,186	KJ/kg*K
Verdampfungswärme Wasser	2257,1	kJ/kg
Wärmekapazität Ethylacetat	1,917376	KJ/kg*K
Verdampfungswärme Ethylacetat	362,5	kJ/kg
Energieeintrag Rühren	0,5	kWh/m <sup>3</sup>
Energie Filtration	1	kWh/m <sup>3</sup>
Energieeintrag Extraktion	0,5	kWh/m <sup>3</sup>
Energieeintrag Eindampfung	0,04	kWh/m <sup>3</sup>
Energie Mikrofiltration	2	kWh/m <sup>3</sup>
Reaktionswärme Dehydratisierung	26,8	kJ/mol

Die Ergebnisse der Berechnungen auf Grundlage der durchgeführten Versuche sind in der Tabelle 4 aufgeführt.

**Tabelle 4: Energiebilanz zur Produktion von 1 kg FDCA aus Cellulose**

Reaktion/ Prozess	energetische Beschreibung, beteiligte Stoffe	Reaktionsvolumen bzw. -masse vor Prozess	Reaktionsvolumen bzw. -masse nach Prozess	Temp. in°C	Dichte in g/cm <sup>3</sup>	Energieeint rag in kWh	Energie- austag	Reaktio ns- wärme
<b>Cellulose Dehydratisierung</b>	10 min Aufheizen auf 100°C, 5 h rühren	2,9242kg Cellulose 0,3655 kg Kat.1 0,2193 kg Kat.2 29,2424 kg Ionische Fl.	0,9333 kg HMF 0,3655 kg Kat.1 0,2193 Kat.2 29,2424 kg Ionische Fl.	100		Wärmemenge Aufheizen+ W.verlust in kWh		
<b>F1</b>	Cellulose [kg]	2,9242						
	HMF [kg]		0,9333					0,0367
<b>F4</b>	ionische Flüssigkeit [kg]	29,2424	29,2424		1,112	1,5011		
<b>F3</b>	Katalysator 1 [kg]	0,3655	0,3655					
<b>F3</b>	Katalysator 2 [kg]	0,2193	0,2193					
<b>F2</b>	Gemisch	32,7515	30,7606	100				
<b>Filtration</b>	Zugabe kaltes Wasser ( <b>F24</b> , 20°C), Rühren, Vakuumfiltration	36,5531				Rühren + Vakuumfiltration		
<b>F5</b>	Gemisch	67,3137	66,7288	57,05	1,050	0,1001		



<b>HMF Extraktion</b>	Zugabe Ethylacetat (F6, 3x20ml) [kg]	219,3184		20	0,894			
<b>F7</b>	Gemisch [kg]	286,0472	zwei Phasen	28,64	0,9537	0,1430		
<b>Ethylacetat Recycling</b>	Lösemittelphase mit HMF, Destillation und Kondensation Ethylacetat (F6)	220,2517	219,3184	77		27,7326		
<b>HMF Oxidation</b>	5h bei 70°C, Zugabe Wasser, Sauerstoff und NaOH zum HMF/FDCA (F7/F11)	0,8120	1,3077		gerechnet mit Cp Wasser			
<b>F8</b>	Wasser	46,0074	46,0074	20				
<b>F9</b>	NaOH	0,6496	0,6496					
<b>F10</b>	L/h Sauerstoff	3247,9651	0,0000					
<b>F12</b>	Katalysator [kg]	0,5359	0,5359					
<b>F11</b>	Gemisch [kg]	48,0049	48,5006	70		4,1864		
<b>Filtration</b>	Abtrennung Kat. Vakuumfiltration	48,5006	47,9647			0,0728		
<b>Aufkonzentrierung der Lösung</b>	Verdampfung von Wasser auf die Hälfte des Volumens (F13/F15)	47,9647	24,9610	100		16,0959		
<b>FDCA Reinigung</b>	FDCA (F14)	1,3077	1,0203					
<b>Zugabe HCl (F17), Mischen</b>	1,8676	24,9610	26,8286	94,43		0,0134		
	Abkühlung	26,8286		4		0,8111	2,0100	
	Vakuumfiltration,	26,8286	25,8083			0,0537		
<b>Waschung Filterkuchen + Mikrofiltration</b>	Wasserzugabe (F21) Gemisch	42,0481	1,0000			0,1051		
<b>Ionische Flüssigkeit Recycling</b>	Verdampfung des Wasseranteils (F25-F26)	65,7955	29,2424	28,64		25,9506		
<b>Summe:</b>						76,7658	2,0100	0,0367

Prozessenergie:	74,7191	kWh
-----------------	---------	-----

Energiebilanz Cellulose: Für den Prozess zur Herstellung von 1 kg FDCA aus Cellulose werden im Labormaßstab 74,72 kWh Energie benötigt.

### 1.6 Bewertung der Herstellung am Beispiel von FDCA im Vergleich zum petrochemischen Prozess

Aus dem Vergleich der Ausbeuten ergibt sich, dass mit einem biobasierten Prozess bereits ein gleiches Niveau zum erdölbasierten industriellen Prozess erreicht wurde. Die erhöhten Werte für den Energiebedarf im Laborprozess können nicht auf einen industriellen Prozess hochgerechnet werden und relativieren sich durch weitere Optimierung und eine Prozessentwicklung hin zum technischen Maßstab. Für einen zukünftigen biobasierten Prozess sprechen die Betrachtung der Reaktionsbedingungen für Sauerstoffbedarf, Druck und Temperatur:

- Für die Oxidation im petrochemisch-basierten Prozess wird stöchiometrisch die doppelte Menge Sauerstoff gegenüber dem biobasierten Prozess benötigt.

- Im petrochemischen Prozess ist ein Druck von 25 bar und eine Temperatur von 200°C erforderlich. Im biobasierten Prozess kann mit Normaldruck bei einer Temperatur von 70°C gearbeitet werden.

Ein weiterer grundlegender Nachteil der Erdöl-basierten industriellen Herstellung ist, dass aggressive Komponenten verwendet werden und deshalb Investitionen in Spezialausrüstungen erforderlich sind<sup>32</sup>.

Die erhobenen Daten für den Laborprozess (Reaktion, Separation) sind wertvolle Hinweise für die Entwicklung von Prozessparametern, um den biobasierten Prozess zukünftig in den technischen Maßstab zu übertragen. Um eine Wirtschaftlichkeit zukünftig zu erreichen, muss der technische Prozess in ein Bioraffineriesystem eingeordnet werden. Hier werden auch die weiteren Bestandteile der Biomasse (hauptsächlich Lignin und Hemicellulose) kaskadenartig zu Produkten verarbeitet und dadurch eine Wertschöpfung in Verbindung zum ländlichen Raum ermöglicht.

## 1.6 Abkürzungsverzeichnis

Au(1%)/TiO <sub>2</sub>	Goldkatalysator auf Titaniumoxid
C.A.R.M.E.N.	Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk
DSS- TORBOS	Entscheidungsunterstützungssystem zur torfschonenden Bewirtschaftung organischer Böden
€/t <sub>atro</sub>	Euro pro Tonne, absolut trocken, also mit 100% Trockenheit
F1-F26	Stoffe bzw. Produkte auf den einzelnen Reaktionsstufen, vor und nach den Verfahrensschritten
FDCA	2,5-Furandicarbonsäure
HMF	5-Hydroxymethylfurfural
KUP	Kurzumtriebsplantagen
LCF-Bioraffinerie	Bioraffinerie, lignocellulose-reiche Rohstoffe verarbeitet
m%	Masseprozent
n.b.	nicht bestimmt
PET	Polyethylenterephthalat
Pt(13%)/C	Platinkatalysator auf Kohlenstoff
Pt(5%)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Platinkatalysator auf Aluminiumoxid
Pt/Bi/C-Katalysator	Platin-Bismut auf Kohlenstoff
Pt/ZrO <sub>2</sub>	Platinkatalysator auf Zirkoniumoxid

---

<sup>32</sup> R. A. F. Tomás, J.C.M. Bordado, J.F.P. Gomes: p-Xylene Oxidation to Terephthalic Acid: A Literature Review Oriented toward Process Optimization and Development, ACS Publications Chem. Rev. (2013) 113,7421-7469

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Kostenposition	Entstandene Ausgaben [EURO]		Gesamtfinanzierungsplan [EURO]
812	64.506,79		48.100
822	2.616,55		1.500
843	1.574,16		1.488
846	3.930,69		3.640
SUMME	72.628,19		54.728

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit war notwendig, um durch transdisziplinäre, integrative und regionenbezogene Forschung zur Landnutzung alternative Wertschöpfungsmöglichkeiten im ländlichen Raum aufzeigen zu können. BIOPOS hatte die Aufgabe, die im Projekt von Projektpartnern erhobenen Daten zur Landnutzung mit Blick auf die Verarbeitung von Biomassen in einer zukünftigen LCF-Bioraffinerie zu nutzen und am Beispiel von ausgewählten Spezialchemikalien darzustellen. Die geleistete Arbeit war dem wissenschaftlichen Projektziel entsprechend angemessen.

## 4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der wesentlichste Nutzen besteht in der Beispielhaften Darstellung der stofflichen Nutzung von pflanzlicher Biomasse, die durch ein nachhaltiges Landmanagement zur Verfügung steht. Eine zukünftige Verarbeitung solcher Nicht-Nahrungsmittel-Rohstoffe ermöglicht eine Wertschöpfung im ländlichen Raum. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind auch auf andere ländliche Gebiete Deutschlands und Europas übertragbar und dort anwendbar.

## 5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger (ZE) bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Dem ZE ist dergleichen nicht bekanntgeworden. Zur Ermittlung des wissenschaftlich-technischen Standes wurde im Internet das „Web of science“ genutzt. In verschiedenen Vorträgen wurde über den Stand der Arbeiten öffentlich berichtet und in den Fachkreisen diskutiert. Auch aus den Fachkreisen wurde nicht bekannt, dass andere Stellen an dieser Thematik arbeiten.

## 6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Es ist geplant die Ergebnisse im Zusammenhang mit dem ELAN-Gedanken in der Zeitschrift „Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie“ (<http://archiv-forstwesen-landschaftsoekologie.de/>) zu publizieren. Dort wurde bereits ein erster Artikel zum Thema Bioraffinerien im Jahre 2011 durch das ZALF veröffentlicht.