

DISS. ETH NO. 23986

Process Design and Sustainability Assessment for Biorefinery Technologies

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc ETH Zurich)

presented by
Merten Morales

Dipl.-Ing., Technische Universität Berlin
born on May 30th, 1987
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Konrad Hungerbühler, examiner
Prof. Dr. Alexander Wokaun, co-examiner
Prof. Dr. Stavros Papadokonstantakis, co-examiner

ETH zürich

2016

Summary

The allocation of venture capital into bio-refinery technology has peaked in the last years. The objective was to find a competitive alternative to crude oil-based fuels and chemicals used for industry and society. The huge variety of innovatively produced technologies and the fact of a missing standardized multi-criteria assessment framework often hinder industry to take advantage of innovative research and increase its technology readiness.

In this thesis, we simulated different biorefinery concepts and developed a standardized sustainability assessment to find technological disadvantages, identify environmental burdens and to predict economic feasibility.

First, the conceptual idea of biorefineries is introduced. We highlight the different trends in research and industry and show why biorefinery technology is still not widely implemented into our economy. After defining the problem statement, we present a roadmap to design smart biorefinery concepts and indicate in which way this doctoral thesis contributes to the overall discussion.

Second, the methodology to design and simulate biorefinery concepts is introduced. This includes the explanation how results from research publication and patents are used to simulate an industrial process in the early phase of process development. Afterwards we introduce the concept of Life Cycle Assessment, Economic Evaluation and Hazard Assessment to evaluate biorefinery technologies from different perspectives.

Third, we interpret four different case studies for the production of lactic acid, glucose from waste wood, succinic acid and glucose from miscanthus. We show how the methodology was used to find technological disadvantages in the early stage of process development. In the case of lactic acid, we show the importance and the impact of catalyst design on the environmental and economic impact. We demonstrate that waste glycerol can be used to produce lactic acid via the chemocatalytical pathway to produce plastic (e.g., polylactic acid), which does not accumulate in the ecosystem.

In the case of glucose from waste wood, we present an innovative pretreatment technology, that can drastically lower the enzyme costs. Furthermore, we present which technology has the biggest potential of becoming a key technology for the production of glucose from waste wood.

In a third case study, we show the production potential of the high value-added chemical succinic acid from wood residues. In doing so we show that, biorefinery technologies with an advanced process design are competitive against the conventional production from crude oil.

In a fourth case study, we present a process design that can use different ionic liquids to produce glucose from the switchgrass miscanthus. Herein we show that, a new type of ionic liquids can significantly improve the economic and environmental impact compared to conventional ionic liquids.

In summary, this thesis shows that utilizing renewable resources does not lead automatically to a green nor to a profitable industrial concept. Therefore we present advanced process designs and a standardized sustainability assessment for green process designs which have a smaller environmental impact and a higher profitability compared to conventional technologies.

Zusammenfassung

Die Investitionen in Bioraffinerie Technologien sind in den letzten Jahren stark angestiegen, mit dem Ziel wettbewerbsfähige Alternativen zu finden, welche konkurrenzfähig im Vergleich zu Treibstoffen und Chemikalien aus Rohöl sind. Die grosse Anzahl von innovativen Technologien und die Tatsache einer fehlenden Beurteilungsmethode hindert die Industrie oft daran das Potential von innovativer Forschung zu erkennen und es zur Marktreife zu führen.

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Bioraffineriekonzepte simuliert und eine standardisierte Beurteilungsmethode entwickelt, um technologisches Potential zu erkennen, Umweltbelastungen zu identifizieren und die Wirtschaftlichkeit abzuschätzen.

Im ersten Teil der Arbeit wird die konzeptuelle Idee der Bioraffinerie eingeführt. Dabei werden wichtige Trends aus Forschung und Wissenschaft beleuchtet und aufgezeigt warum Bioraffinerie Technologien noch ungenügend in unserer heutigen Wirtschaft vertreten sind. Anschliessend wird gezeigt im welchem Umfang diese wissenschaftliche Arbeit zur allgemeinen Diskussion beitragen kann.

Im zweiten Teil der Arbeit wird die Methode vorgestellt um Bioraffineriekonzepte zu entwickeln und zu simulieren. Dieses beleuchtet auch in welchem Rahmen wissenschaftliche Publikationen und Patente verwendet wurden, um industrielle Konzepte in ihrer frühen Planungsphase zu simulieren. Anschliessend werden die Konzepte wie Life Cycle Assessment, wirtschaftliche Evaluation und Risikoanalyse eingeführt, welche für die Bioraffineriebewertung aus unterschiedlichen Perspektiven dienen.

Im dritten Teil wird in unterschiedlichen Fallbeispielen anhand der Produktion von Milchsäure, von Zucker aus Holzabfällen, von Bernsteinsäure und von Zucker aus Süßgrass *Mischanthus* gezeigt, wie mit Hilfe der entwickelten Methode technologische Schwierigkeiten in der frühen Entwicklungsphase erkannt werden können. In dem Fall von Milchsäure wird die Wichtigkeit und der Einfluss von der Katalysatorbeschaffenheit anhand der Umweltbelastung und Wirtschaftlichkeit aufgezeigt. Weiterhin wird dargestellt, dass über den katalytischen Weg Abfall-Glycerin benutzt werden kann um Plastik herzustellen (z.B. Polylactide), welches sich nicht im Ökosystem akkumuliert.

Im Fall von Zucker aus Abfallholz wird gezeigt, dass innovative Vorbehandlungstechnologien zu einer signifikanten Verringerung der Enzym-Kosten führen. Weiterhin wird gezeigt, welche Technologie das grösste Potential hat, um eine Schlüsseltechnologie für die Produktion von Zucker aus Abfallholz zu werden.

Die dritte Studie beschäftigt sich mit dem Potential für die Herstellung von Bernsteinsäure aus Holzabfällen. In dieser Studie kann gezeigt werden, dass Bioraffinerietechnologien mit einem durchdachten Prozess Design wettbewerbsfähiger sind als die konventionelle Produktion aus Rohöl.

Im der vierten Fallstudie, wird ein Prozess Design vorgestellt, welches unterschiedliche ionische Flüssigkeiten einsetzt, um Zucker aus Süßgrass *Mischanthus* herzustellen. In dieser Studie zeigen wir, dass eine neue Art von ionischen Flüssigkeiten wirtschaftlicher und umweltfreundlicher als die konventionellen ionischen Flüssigkeiten ist.

Zusammenfassend zeigt diese wissenschaftliche Arbeit, dass die Verwendung von erneuerbaren Ressourcen nicht automatisch zu einem umweltfreundlicherem noch zu einem profitablerem industriellen Konzept führt.

Deshalb führen durchdachte Prozesskonzepte in Kombination mit einer standardisierten Beurteilungsmethode zu nachhaltigen Prozess Designs, welche einen geringeren Umwelteinfluss und eine höhere Wirtschaftlichkeit vorweisen im Vergleich zu den konventionellen Technologien.