

Bioökonomische Analyse von Nebenströmen aus der Kartoffelverarbeitung unter Berücksichtigung einer biotechnologischen Verwertung

Bioeconomic analysis of by-products from potato processing in consideration of a biotechnological valorisation

Tobias Jorissen^{1,*}, Miriam Meyer², Thorben Detering², Ralf Günter Berger² und Guido Recke¹

¹ Hochschule Osnabrück, Landwirtschaftliche Betriebswirtschaftslehre, Germany

² Leibniz Universität Hannover, Institut für Lebensmittelchemie, Germany

*Correspondence to: t.jorissen@hs-osnabrueck.de

Received: 13 Dezember 2017 – Revised: 4 Juni 2018 – Accepted: 12 Juli 2018 – Published: 12 Dezember 2018

Zusammenfassung

Die Verwertung von Kartoffelnebenströmen (Schale und -verschnitt) als Substrat für die biotechnologische Produktion bietet Wertschöpfungspotentiale. Im Fokus steht die Bereitstellung des Raucharomas 4-Vinylguaiacol. Bei der Fermentation von Nebenströmen können Substratkosten einen wesentlichen Anteil ausmachen. Die Kosten von Nebenströmen für die biotechnologische Verwertung sind zumeist nicht bekannt. Folglich wurde ein Modellansatz zur ökonomischen Bewertung von Kartoffelnebenströmen entwickelt. Mit dem Modell wurden die Wirtschaftlichkeit der konventionellen Verwertung von Kartoffelnebenströmen als Tierfutter sowie Biogassubstrat berechnet und, davon ausgehend, die Substratkosten für die biotechnologische Produktion abgeleitet. Die Ergebnisse ermöglichen eine Empfehlung für die wirtschaftliche Verwertung von Kartoffelnebenströmen und geben eine erste Kostenabschätzung für die biotechnologische Valorisierung.

Schlagerworte: Bioökonomie, Kartoffelnebenströme, Preiswürdigkeit, Risikomodellierung

Summary

The utilisation of by-products from potato (peel and offcut) as a substrate for biotechnology processes enable high added value. The focus is on the extraction of the smoke flavour 4-Vinylguaiacol. The costs of substrate can be of considerable significance to the fermentation process. The costs of by-products as raw materials for biotechnological processes are often unknown. Therefore, a model approach was developed for the economic evaluation of potato by-products. Firstly, the profitability of potato by-products used as fodder as well as biogas substrate was calculated. Based on that, the raw material costs for the biotechnological utilisation were derived. The results give a recommendation for the economic use of potato by-products and an initial cost estimate for the biotechnological valorisation.

Keywords: bioeconomy, potato by-products, value for money, risk modelling

1 Einleitung

Der fortschreitende Klimawandel, die wachsende Weltbevölkerung und die Verknappung fossiler Ressourcen erfordern eine effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Bioöko-

nomische Ansätze liefern den Rahmen für ein nachhaltiges Wachstum. Zwei Handlungsfelder der nationalen Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 in Deutschland liegen in der Sicherung der weltweiten Ernährung und der industriellen Verwertung nachwachsender Rohstoffe (BMBF, 2014,

2ff). Insbesondere die Verwertung von Nebenströmen aus der Lebensmittelverarbeitung bietet viel Potential (BMBF, 2014, 59). Ein potentieller Wertstoff aus den Nebenströmen der Kartoffelverarbeitung ist der Schlüsselaromastoff Holzrauch (4-Vinylguaiaicol). Dieser wird konventionell beim Räuchern von Holz durch Pyrolyse gewonnen. Bei diesem Verfahren entstehen neben dem Aromastoff 4-Vinylguaiaicol (VG) auch Kanzerogene, die schädlich für den menschlichen Organismus sind. Natürlich hergestellte Aromastoffe aus biotechnologischer Fermentation gehören zu den teuersten Ingredienzien der Lebensmittelindustrie (Korthoua und Verpoorte, 2007, 203ff). Die Bereitstellung von VG aus Kartoffelnebenströme ist Grundlagenforschung. Derzeit liegt die Produktausbeute von VG bei ca. 57 % und bietet Steigerungspotentiale (Detering und Meyer, 2018).

Der potentielle Markt für die biotechnologische Verwertung von Kartoffelnebenströmen befindet sich im Bundesland Niedersachsen in Deutschland. In Niedersachsen findet 47 % des deutschen Kartoffelanbaus und ein Großteil der Verarbeitung statt (DESTATIS, 2017a, 18). Zur Datenerhebung und nachfolgenden Analyse wurden vorab bei niedersächsischen Unternehmen der Kartoffelwertschöpfungskette 2017 Experteninterviews durchgeführt. Aufgenommen wurden quantitative und qualitative Daten zum Aufkommen und der Verwendung von Kartoffelschale und -verschnitt. Bei der Verarbeitung von Kartoffeln schwankt das Aufkommen der Schäl- und Schnittreste zwischen 10 % und 50 % und ist abhängig vom Kartoffelendprodukt (Schälkartoffel, Flocken und Pommes Frites) sowie den technischen Gegebenheiten (Vorbehandlungen und Schälverfahren) beim Prozess. Besonders bei der Veredlung von Kartoffeln zu Pommes Frites oder ähnlichen Tiefkühlprodukten fallen in großen Mengen, zentral und in vergleichsweise homogener Qualität, Schälreste an. Die Nebenströme werden zumeist als Tierfutter verkauft oder in den Unternehmen als Biogassubstrat genutzt. Nach der Verarbeitung der Kartoffeln haben Schalen und Verschnitt einen hohen Wassergehalt, sind nur bedingt lagerfähig und nicht transportwürdig. Der Wert von Kartoffelnebenströmen wird bei den befragten niedersächsischen Unternehmen als gering eingeschätzt. Deutlich wird dies an den vergleichsweise niedrigen Verkaufspreisen für Kartoffelnebenströme als Tierfutter oder Biogassubstrat. Der arithmetische Mittelwert des Verkaufspreises für Schale und Verschnitt beträgt 6 €/t FM und der Median 5 €/t FM. Einen zu vergleichenden Marktpreis für Kartoffelnebenströme, wie zum Beispiel für Futterweizen oder Sojaschrot, zu entnehmen aus diversen Statistik-Berichten oder Börsennotierungen, gibt es nicht (Jorissen et al., 2017).

In Studien zur Wirtschaftlichkeit von Nebenströmen zur biotechnologischen Verwertung und Bereitstellung von biobasierten Chemikalien werden zumeist keine Kosten für das Substrat angesetzt (Lam et al., 2014, 287; Kwan et al., 2015, 297). Substratkosten können einen Anteil von bis zu 44 % an den Gesamtkosten der Produktion von Biochemikalien haben und sind vor langfristigen Investitionen zu berücksichtigen (Cheng et al., 2017, 171ff). Im Zuge des Ausbaus der Bioökonomie und Bioraffinerien der zweiten Generation ist

mit einem Nachfrageanstieg für Nebenströme aus der Agrar- und Ernährungswirtschaft zu rechnen (BMBF, 2014, 88ff).

Die zwei wesentlichen Ziele der Forschungsarbeit sind die Formulierung einer Empfehlung zur wirtschaftlichen Verwertung von Kartoffelnebenströmen für Kartoffelverarbeiter und die Abfassung einer ersten Kostenabschätzung zur biotechnologischen Valorisierung. Dabei soll ein potentieller Marktüberblick geschaffen werden. Die aus den aufgezeigten ersten Befragungsergebnissen abgeleitete fehlende Wettbewerbssituation und Wertschätzung von Kartoffelnebenströmen soll verbessert werden. Weiterhin soll der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung das ökonomische Potential bei einer Steigerung der Produktausbeute von VG aus Kartoffelnebenströmen von derzeit 57 % auf optimale 100 % aufgezeigt werden.

Zur Erreichung der gesetzten Forschungsziele wird zunächst ein statisch-deterministisches Modell entwickelt. Mit dem Modell kann die Wirtschaftlichkeit von Kartoffelnebenströmen für den Verkauf als Tierfutter und die Verwertung als Biogassubstrat berechnet werden. Auf Basis der Wirtschaftlichkeit der konventionellen Verwertung der Kartoffelnebenströme werden zunächst Grenzpreise abgeleitet und anschließend Substratkosten für die Bereitstellung von VG kalkuliert. Für eine Risikoanalyse wird das statisch-deterministische Modell um ein stochastisches Modell erweitert. Mit der Anwendung eines Risikomodells soll die Wahrscheinlichkeit eines Preis- und Kostenspielraums aufgezeigt werden. Aufgrund unterschiedlicher Standortbedingungen in Niedersachsen (Oldenburger Münsterland oder Lüneburger Heide), der Verwertung der Nebenströme (Tierfutter oder Biogas) und den Modellannahmen (Höhe des Entgelts für Strom und Futtermittelpreise) sind unterschiedliche Gewinne, Grenzpreise und Substratkosten zu erwarten (Jorissen et al., 2017).

2 Methodik

2.1 Abschätzung der Produktausbeute von 4-Vinylguaiaicol

Anhand der Ferulasäuregehalte der Kartoffelnebenströme lässt sich die resultierende Ausbeute an 4-VG abschätzen. Die enzymatische Umsetzung der im Nebenstrom gebundenen Ferulasäure bildet die Grundlage für einen Produktionsprozess im Entwicklungsstadium. Diese erfolgt in zwei entkoppelten Prozessschritten. Im ersten Schritt wird die, im Nebenstrom gebundene, Ferulasäure durch eine Ferulasäureesterase freigesetzt. Danach katalysiert eine Ferulasäuredecarboxylase die Umsetzung zu VG. Eine Tonne Kartoffelschalen enthalten etwa 60 g Ferulasäure (Mattila und Hellström, 2007, 156). Dies entspricht einer Stoffmengenkonzentration von 0,31 mol/t FM. Vorversuche zur Bereitstellung von VG zeigen stoffmengenbezogene Produktausbeuten von ca. 57 % (Detering und Meyer, 2018). Unter Berücksichtigung der Produktausbeute entstehen 26,4 g VG/t FM. Anschließend kann die Menge der damit

Tabelle 1: Abschätzung der Produktausbeuten von 4-Vinylguaiacol und der aromatisierbaren Lebensmittelmenge

| Produkt | Trockenmasse- gehalt (%) | Ferulasäure- gehalt (g /t FM) | Produziertes 4-Vinylguaiacol (g/t FM) | Aromatisierte Lebensmittel (t/t FM) |
|---------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Kartoffelschalen | 15 | 60 | 26,4 | 264 |
| Kartoffelverschnitt | 15 | 7 | 3,1 | 31 |

Quellen: Eigene Berechnungen; Mattila und Hellström (2007, 156); Detering und Meyer (2018)

zu aromatisierenden Lebensmittel bestimmt werden. Hierbei wird eine durchschnittliche Wirkdosis von 100 µg VG/kg Lebensmittel angenommen. Dies erlaubt das Aromatisieren von 264 Tonnen Lebensmitteln mit einer Tonne frischem Nebenstrom (Tabelle 1).

Im Vergleich zu Kartoffelschalen ist die Produktausbeute von VG aus Kartoffelverschnitt gering. Dennoch wird Kartoffelverschnitt in den Analysen aus zwei Gründen berücksichtigt: (1) Die Erfüllung des Forschungsziels einer Empfehlung für die Kartoffelverarbeiter zur effizienten Verwertung der Nebenströme Schale und Verschnitt. (2) Nach dem Schälprozess ist die Kartoffelschale nicht frei vom Kartoffelbruchfleisch. Nach ersten analytischen Untersuchungen beträgt der Anteil von Bruchfleisch an der Kartoffelschale mindestens 6 % und mindert die Produktausbeute von VG aus Kartoffelschalen (Detering und Meyer, 2018).

2.2 Modell zur Analyse von Kartoffelnebenströmen

Die Berechnung der Substratkosten von Nebenströmen aus der Kartoffelverarbeitung erfolgt mit der Opportunitätskostenmethode. Opportunitätskosten sind der entgangene Gewinn einer alternativen Entscheidung (Mußhoff und Hirschauer, 2016, 40ff). Bei der Vorgehensweise wird eine Planung der Verwendung Kartoffelnebenströme auf Basis von kurzfristigen Preisrelationen analysiert. Mittelfristige Vereinbarungen von Lieferverträgen oder langfristige Investitionen in Technik und Infrastruktur werden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Als Handlungsalternativen werden der Verkauf als Tierfutter und die Verwertung als Biogassubstrat bestimmt (Jorissen et al., 2017). Der kalkulatorische Gewinn aus den zwei Handlungsalternativen wird nachfolgend als kalkulatorischer Grenzpreis interpretiert,

den ein (neuer) dritter Akteur, wie zum Beispiel die biotechnologische Industrie, mindestens zahlen muss. Anschließend ist der kalkulatorische Grenzpreis des Kartoffelnebenstroms ins Verhältnis zur Produktionsausbeute von VG zu setzen, um die kalkulatorischen Substratkosten zu berechnen:

$$\text{kalkulatorische Substratkosten (€/kg VG)} = \frac{\text{kalkulatorischer Gewinn/Grenzpreis (€/t FM)}}{\text{Produktionsausbeute Vinylguaiacol (kg VG/t FM)}}$$

Die Berechnung der kalkulatorischen Grenzpreise der Kartoffelnebenströme bei der Handlungsalternative Tierfutter erfolgt mit der Austauschmethode nach Löhr, bei der eine Verfütterung der Kartoffelnebenströme an Schweine unterstellt wird (Weiß et al., 2011, 253ff). Berechnet wird die Wirtschaftlichkeit der Kartoffelnebenströme als Futtermittel auf Basis der Vergleichsfuttermittel Weizen und Sojaschrot. Die Trockenmasse-, Energie- und Lysingehalte der Vergleichsfuttermittel sowie Nebenströme sind der DLG Futterwerttabelle entnommen (Tabelle 2) (Staudacher und Potthast, 2014, 34ff). Da die betrachteten Kartoffelnebenströme im Vergleich zu Weizen schnell verderblich sind, wird ein Preisabschlag von 20 % vorgenommen (Jorissen et al., 2017).

Die Daten zur Modellierung einer Biogasanlage bei der Handlungsalternative Biogas sind Standardwerte der Online-Anwendung „Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas“ des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL, 2017). Modelliert wurde eine Biogasanlage mit einer doppelten Überbauung in Anlehnung an die Regelungen des EEG 2017 (Inbetriebnahme = 2017 und Preisstand = 2016) (Tabelle 3). Die modellierte Anlagegröße

Tabelle 2: Trockenmasse-, Energie- und Lysingehalte der untersuchten Futtermittel

| Futtermittel | Trockenmassegehalt (%) | Energiegehalt (MJ ME/kg FM) | Lysingehalt (g/kg FM) |
|---------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Futterweizen | 88 | 13,7 | 3,4 |
| Sojaschrot | 88 | 13,9 | 29,0 |
| Kartoffelschalen | 15 | 2,1 | 0,9 |
| Kartoffelverschnitt | 15 | 2,2 | 0,8 |

Quellen: Eigene Berechnungen; Staudacher und Potthast (2014, 34ff)

Tabelle 3: Modellannahmen bei der Handlungsalternative Biogas (Inbetriebnahme = 2017 und Preisstand = 2016, exkl. MwSt.)

| Kennzahl | Wert |
|--|-------------|
| installierte Leistung / Bemessungsleistung in kW | 1.500 / 750 |
| Vollbenutzungsstunden in h/a | 4.380 |
| Eigenwärmebedarf der Anlage in % | 18 |
| Absatzmenge Wärme in % | 82 |
| Flexzuschlag je installierte Leistung in €/kW | 40 |

Quellen: DBFZ (2015, 21); KTBL (2017); Jorissen et al. (2017)

entspricht annähernd dem Mittel der Anlagengröße der befragten Kartoffelverarbeiter in Niedersachsen. Abzüglich des Eigenwärmebedarfs (18 %) der Biogasanlage beträgt die Absatzmenge an Wärme 82 % (DBFZ, 2015, 21; Jorissen et al., 2017)

In den Analysen werden die kalkulatorischen Gewinne/Grenzpreise und die kalkulatorischen Substratkosten eines jeden Kartoffelnebenstroms in Kombination mit der jeweiligen Handlungsalternative berechnet:

- Kartoffelschalen (KaSch) als Tierfutter (TierF),
- Kartoffelschalen (KaSch) als Biogassubstrat (BGas),
- Kartoffelverschnitt (KaVer) als Tierfutter (TierF) und
- Kartoffelverschnitt (KaVer) als Biogassubstrat (BGas).

2.3 Risikomodell zur Analyse von Kartoffelnebenströmen

Für die Analysen wird ein Risikomodell benötigt, da in Abhängigkeit vom Standort in Niedersachsen, der Art der Verwertung der Kartoffelnebenströme und verschiedener Annahmen, unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten sind (Jorissen et al., 2017). Das gewählte Verfahren für die Risikoanalyse ist die stochastische Simulation (Mußhoff und Hirschauer, 2016, 419ff). Durchgeführt werden die Analysen mit dem Microsoft Excel Add-In @RISK. Der Betrachtungszeitpunkt der Analysen ist das Jahr 2017. Bei der Handlungsalternative Tierfutter wurden die Preise für Futterweizen und Sojaschrot als risikobehaftete Parameter bestimmt (Tabelle 4). Mögliche Schwankungen beim Energie- und Lysingehalt werden nicht berücksichtigt.

Die Preise für die Vergleichsfuttermittel (Futterweizen, lose und Sojaschrot, lose) sind für den Zeitraum 2002 bis 2016 der AMI Markt Bilanz entnommen und exkl. Mehrwert-

steuer (AMI, 2017, 152 / 168). Die Preise der Vergleichsfuttermittel wurden mit dem Verbraucherpreisindex (Deutschland) in Höhe von 1,4 % p.a. (2002-2016) inflationsbereinigt (DESTATIS, 2017c, 4). Die gewählten Verteilungsfunktionen der zwei Vergleichsfuttermittel wurden mittels des Chi-Quadrat-, Anderson-Darling- und Kolmogorov-Smirnov-Test sowie @Risk geschätzt (Wolbert-Haverkamp, 2012, 306; Mußhoff und Hirschauer, 2016, 386). Die Korrelation zwischen den bereinigten Preisen der Vergleichsfuttermittel beträgt 0,68 und wurde im Risikomodell berücksichtigt.

Nach Abgleich von Angaben aus der Literatur und den vorab geführten Experteninterviews wurden bei der Handlungsalternative Biogas das Entgelt für Strom, die Methanerträge der Kartoffelnebenströme und der Verkaufspreis für Wärme als risikobehaftete Parameter identifiziert (Rauh et al., 2008, 514; Riessen, 2010, 112ff; Jorissen et al., 2017) (Tabelle 5). Das Vergütungsmodell für den Verkauf von Strom ist das EEG 2017. Die Höhe des Entgelts des eingespeisten Stroms wird über wettbewerbliche Ausschreibungen bestimmt. Der Zuschlagswert ist der Gebotswert. Für das Jahr 2017 wurden vier Zuschläge für Neuanlagen erteilt (Bundesnetzagentur, 2017, 7). Aufgrund der geringen Datenbasis kann keine Verteilung für den Risikoparameter Entgelt Strom geschätzt werden und eine Dreiecksverteilung unterstellt. Die Dreiecksverteilung ist eine flexible Verteilung für grundlegende Risikomodelle und findet bei Analysen von Bioenergiesystemen Anwendung (Rauh et al., 2008, 514; Riessen, 2010, 22ff; Mußhoff und Hirschauer, 2016, 378ff). Der Maximalwert ist der Förderungshöchstwert, der Minimalwert ist der niedrigste Zuschlagswert und der Modus ist der mengengewichtete Zuschlagswert für Neuanlagen (Bundesnetzagentur, 2017, 5ff).

Tabelle 4: Risikomodell der Handlungsalternative Tierfutter (exkl. MwSt.) (Betrachtungszeitraum = 2002 bis 2016)

| Risikoparameter | μ | σ | Min. | Max. | Verteilungsfunktion |
|------------------------------|-------|----------|------|------|---------------------|
| Preis Futterweizen in €/t FM | 161 | 49 | 30 | 685 | Loglogistic |
| Preis Sojaschrot in €/t FM | 349 | 75 | 129 | 713 | Gamma |

Quellen: Eigene Berechnungen; AMI (2017, 152 und 168)

Tabelle 5: Risikomodell der Handlungsalternative Biogas (exkl. MwSt.) (Betrachtungszeitraum = 2002 bis 2016)

| Risikoparameter | μ | σ | Min. | Max. | Verteilungsfunktion |
|---|-------|----------|------|-------|---------------------|
| Entgelt Strom in ct/kW | 13,20 | 1,18 | 9,88 | 14,88 | Dreiecksverteilung |
| Methanertrag Kartoffelschalen in Nm ³ CH ₄ /t TM | 287 | 23 | 230 | 344 | Dreiecksverteilung |
| Methanertrag Kartoffelverschnitt in Nm ³ CH ₄ /t TM | 319 | 26 | 256 | 383 | Dreiecksverteilung |
| Verkaufspreis Wärme in ct/kW | 3,64 | 0,70 | 0,81 | 5,78 | Weibull |

Quellen: Eigene Berechnungen; KTBL (2013); Strobl und Keymer (2016); Bundesnetzagentur (2017, 7); DESTATIS (2017b, 22)

Die Methanerträge der Kartoffelnebenströme sind der Onlinedatenbank „Biogasausbeute mobil“ der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) entnommen (Strobl und Keymer, 2016). Eine Streuung der Werte wird in der Datenbank nicht angegeben. Eine Schätzung der Streuung der Methanerträge der Kartoffelnebenströme erfolgt auf Basis der LfL-Richtwerte und Ergebnisse einer Betreiberbefragung des KTBL (KTBL, 2013, 146ff). Das KTBL schätzt, dass eine Überschreitung der eigenen Richtwerte um 10 % durchaus möglich ist. Eine Überschreitung um 20 % ist dagegen unwahrscheinlich. Auf Basis der Daten der LfL und den Schätzungen des KTBL wurden für die Methanerträge der Kartoffelnebenströme Dreiecksverteilungen bestimmt (Rauh et al., 2008, 514; Riessen, 2010, 22ff; Mußhoff und Hirschauer, 2016, 378ff). Die Modalwerte der Verteilungen basieren auf den Angaben der LfL zu den Nebenströmen. Die Grenzen der Verteilungen entsprechen einer 20-prozentigen positiven sowie negativen Abweichung dieser Werte.

Bei der Modellierung des Verkaufspreises für Wärme wurde unterstellt, dass eine erzeugte Wärmeeinheit aus der Biogasanlage eine erzeugte Wärmeeinheit aus der Ver-

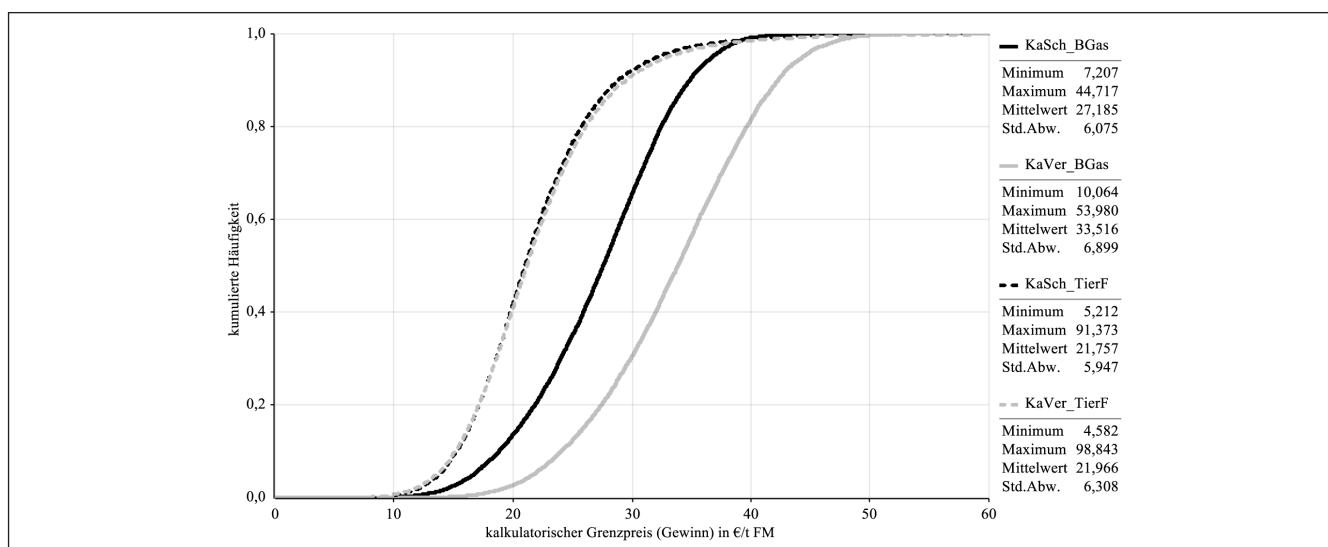
brennung von Erdgas ersetzt. Infolgedessen leitet sich der Verkaufspreis für Wärme vom Abgabepreis für Erdgas an industrielle Abnehmer ab (DESTATIS, 2017b, 22). Der Verkaufspreis für Wärme wurde mittels dem Verbraucherpreisindex (Deutschland) in Höhe von 1,4 % p.a. (2002-2016) inflationsbereinigt (DESTATIS, 2017c, 4). Unter Anwendung des Chi-Quadrat-, des Anderson-Darling- und des Kolmogorov-Smirnov-Test und @Risk wurde eine Weibull-Verteilung geschätzt (Wolbert-Haverkamp, 2012, 306; Mußhoff und Hirschauer, 2016, 386).

3 Ergebnisse

3.1 Analyse zum kalkulatorischen Grenzpreis von Nebenströmen

Die Spannweite der kalkulatorischen Grenzpreise (Gewinne) reicht von 5-95 €/t FM (Abbildung 1). Im Mittel ergeben sich die höchsten zu erwartenden Grenzpreise bei der Handlungsalternative Biogas (≈ 30 €/t FM). Niedrigere

Abbildung 1: Kumulierte Häufigkeiten der kalkulatorischen Grenzpreise (Gewinne) von Kartoffelnebenströmen in Abhängigkeit von der Handlungsalternative; 10.000 Simulationsläufe



Grenzpreise sind im Schnitt bei der Handlungsalternative Tierfutter zu erwarten (≈ 22 €/t FM). Bei dem Nebenstrom Kartoffelverschnitt werden durchschnittlich höhere Grenzpreise (≈ 28 €/t FM) erreicht als beim Nebenstrom Kartoffelschalen (≈ 24 €/t FM).

Die größten Standardabweichungen sind beim Nebenstrom Kartoffelverschnitt ($\approx 6,6$ €/t FM) und bei der Handlungsalternative Biogas ($\approx 6,5$ €/t FM) festzustellen. Geringere Streuungen treten beim Nebenstrom Kartoffelschale ($\approx 6,0$ €/t FM) und bei der Handlungsalternative Tierfutter ($\approx 6,1$ €/t FM) auf. Im Gegensatz dazu sind die Minimal- und Maximalwerte der Handlungsalternative Tierfutter niedriger bzw. höher als die Werte der Handlungsalternative Biogas. Das Szenario KaVer_BGas weist gegenüber dem Szenario KaScha_BGas eine stochastische Dominanz 1. Grades auf. Bei der Handlungsalternative Tierfutter ist ohne Kenntnis der individuellen Risikoeinstellung zwischen den zwei Nebenströmen keine Dominanz zu bestimmen. Zwischen den Handlungsalternativen Biogas und Tierfutter ist eine stochastische Dominanz 2. Grades erkennbar.

3.2 Analyse zu den kalkulatorischen Substratkosten von Nebenströmen

In Abhängigkeit vom Kartoffelnebenstrom und von der Handlungsalternative liegt der Bereich der kalkulatorischen Substratkosten zwischen 219 €/kg VG und 33.306 €/kg VG (Abbildung 2). Die niedrigsten Substratkosten entstehen im Mittel bei Kartoffelschalen (≈ 927 €/kg VG) und die höchsten Substratkosten im Durchschnitt beim Kartoffelverschnitt (≈ 9.007 €/kg VG). Die niedrigen Substratkosten für die Bereitstellung von VG aus Kartoffelschalen sind durch die hohe potentielle Ausbeute von VG zu erklären (siehe Tabelle 1). Steigt während der Kartoffelverarbeitung beim Schälvorgang der Anteil an Fruchtfleisch zur Schale von 0 %

auf 10 %, dann erhöhen sich die Erwartungswerte der Substratkosten bei der Handlungsalternative Biogas von 1.030 €/kg VG auf 2.015 €/kg VG (+ 95 %) und bei der Handlungsalternative Tierfutter von 824 €/kg VG auf 1.455 €/kg VG (+ 77 %).

Bezogen auf die Standardabweichung zeigen der Nebenstrom Kartoffelverschnitt (≈ 2.139 €/kg VG) und die Handlungsalternative Biogas (≈ 1.228 €/kg VG) die größte Streuung. Geringere Abweichungen vom Erwartungswert ergeben sich beim Nebenstrom Kartoffelschalen (≈ 228 €/kg VG) und bei der Handlungsalternative Tierfutter (≈ 1.138 €/kg VG). Im Gegensatz bei der Dominanzanalyse zum kalkulatorischen Grenzpreis sind bei der Dominanzanalyse zu den kalkulatorischen Substratkosten die Szenarien mit den geringeren Erwartungswerten vorteilhafter. Demzufolge besteht unabhängig von der Handlungsalternative eine absolute stochastische Dominanz des Nebenstroms Kartoffelschalen gegenüber dem Nebenstrom Kartoffelverschnitt. Beim Vergleich der Funktionen zwischen den zwei Handlungsalternativen der Kartoffelschale ist ohne Kenntnis der individuellen Risikoeinstellung keine Dominanz zu bestimmen.

Die Spannweite der Erwartungswerte der kalkulatorischen Substratkosten beim Szenario Kartoffelschalen als Tierfutter (KaSch_TierF), in Abhängigkeit von der potentiellen Produktausbeute von VG (15 - 100 %), reicht von 453 €/kg VG bis 3.022 €/kg VG (Abbildung 3). Im Mittel sinken die Erwartungswerte der Substratkosten für VG um 30 € je Prozentpunkt. Erreicht wird die mittlere Steigung bei einer Produktausbeute von ca. 42 %.

Beim Szenario Kartoffelschalen als Biogassubstrat liegen die Erwartungswerte der Substratkosten im ausgewählten Definitionsbereich zwischen 566 €/kg VG und 3.777 €/kg VG. Die Substratkosten für VG sinken durchschnittlich um 38 € je Prozentpunkt, bei einer Produktausbeute von ca. 41 %.

Abbildung 2: Kumulierte Häufigkeiten der kalkulatorischen Substratkosten von Kartoffelnebenströmen in Abhängigkeit von der Handlungsalternative; 10.000 Simulationsläufe

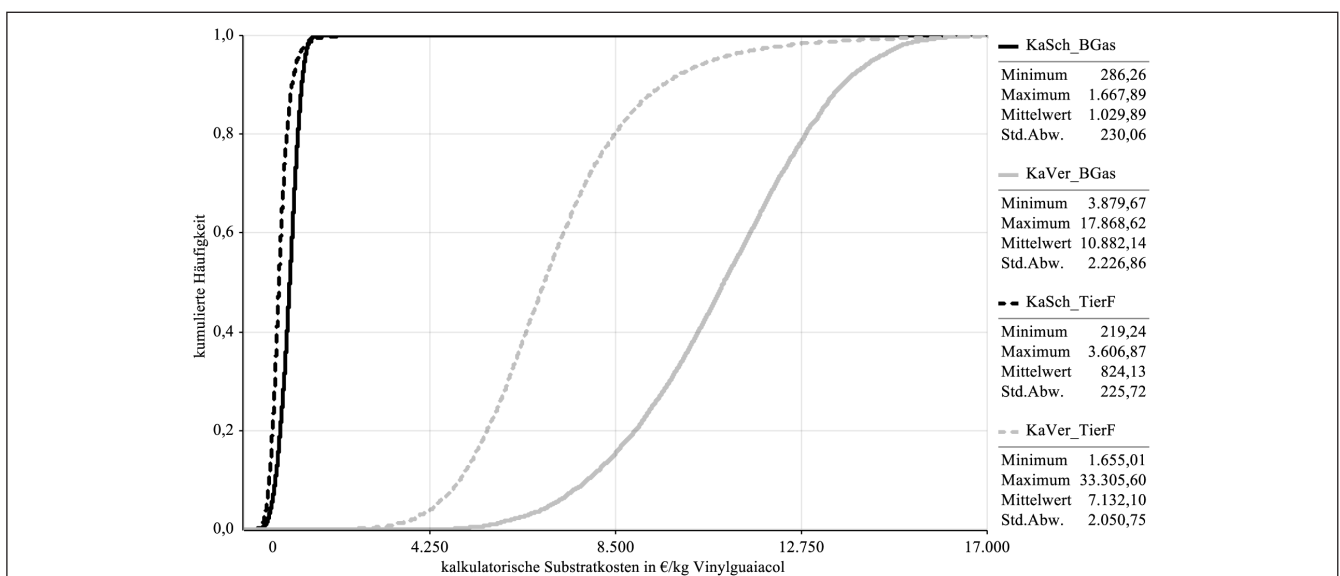
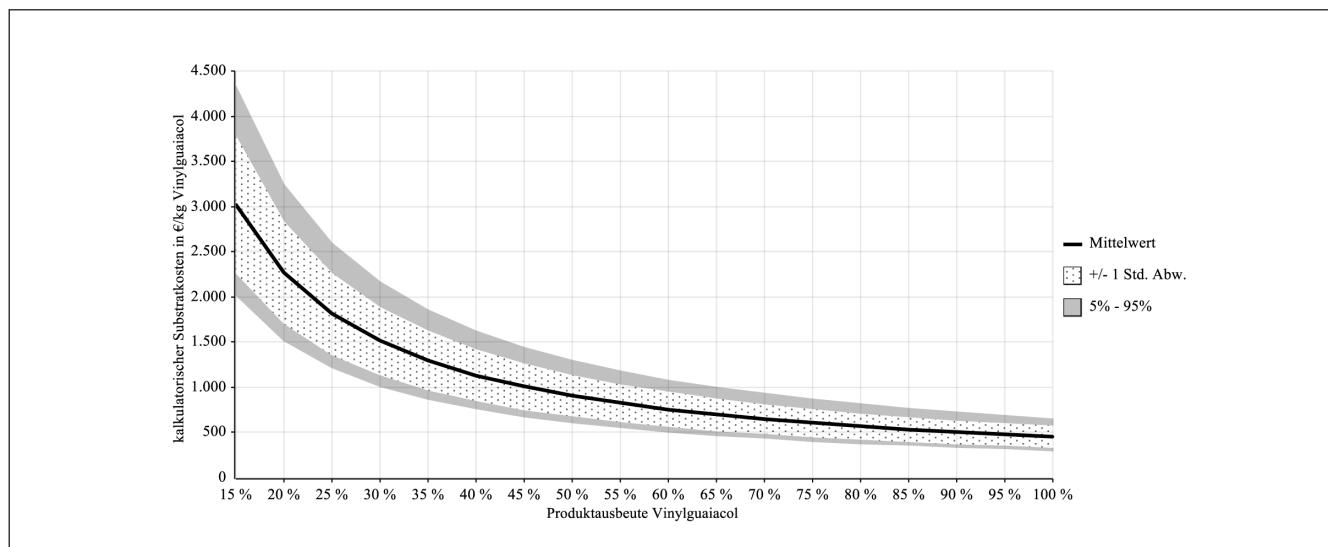


Abbildung 3: Kalkulatorische Substratkosten in Abhängigkeit der Produktausbeute von 4-Vinylguaiacol am Beispiel des Szenarios Kartoffelschalen als Tierfutter



4 Diskussion

Im Mittel der Handlungsalternativen Tierfutter und Biogas betragen die Erwartungswerte der kalkulatorischen Grenzpreise (Gewinne) von Kartoffelschalen 24 €/t FM und von Kartoffelverschnitt 28 €/t FM. Die kalkulierten Grenzpreise stehen in starkem Kontrast zu den ermittelten durchschnittlichen Verkaufspreisen für Kartoffelnebenströme in Höhe von 6 €/t FM aus den vorab geführten Experteninterviews mit niedersächsischen Kartoffelverarbeitern (Jorissen et al., 2017). Aufgrund des Ausbaus der Bioökonomie in den nächsten Jahren ist ein Nachfrageanstieg für Nebenströme aus der Agrar- und Ernährungswirtschaft zu erwarten (BMBF, 2014, 88ff). Im Zuge dessen könnten sich die Verkaufspreise für Kartoffelschalen langfristig den kalkulatorischen Grenzpreisen annähern. Auf Basis der Ergebnisse der Dominanzanalyse wird Kartoffelverarbeitern mit Risikoaversion die Verwertung der Kartoffelnebenströme als Biogassubstrat empfohlen. Höhere Gewinne können zwar mit dem Verkauf der Kartoffelnebenströme erreicht werden, sind aber sehr unwahrscheinlich. Unabhängig von ihrer Risikoeinstellung sollten Kartoffelverarbeiter den Verschnitt als Biogassubstrat verwerten und die Schalen als Tierfutter verkaufen. In Einzelfällen sind Kapazitäten von Biogasanlagen und Absatzmengen an Tierfutter in der Region zu berücksichtigen (Jorissen et al., 2017).

Die niedrigsten Substratkosten zur Bereitstellung von VG berechnen sich im Mittel für den Nebenstrom Kartoffelschalen in Höhe von 927 €/kg. Durchgeführte Sensitivitätsanalysen heben die Bedeutung der Qualität des Schälprozesses hervor. Bei einem Fruchtfleischanteil im Nebenstrom Kartoffelschalen von 10 % betragen die Substratkosten 1.735 €/kg VG. Durch gezielte Prozessoptimierung kann die VG-Produktausbeute aus Kartoffelnebenströme von derzeit 57 % auf potentielle 100 % gesteigert werden (Detering und

Meyer, 2018). Ein entsprechender Prozess wird aktuell entwickelt und könnte die kalkulatorischen Substratkosten auf ca. 510 €/kg VG senken. Die Risikoanalysen zu den kalkulatorischen Substratkosten der Kartoffelnebenströme legen die potentielle Spannbreite dar, die von den Handlungsalternativen und jeweiligen Bedingungen der Kartoffelverarbeiter am Standort bestimmt wird (Jorissen et al., 2017).

Die Empfehlung zur wirtschaftlich effizienten Verwertung von Kartoffelnebenströmen (Biogas und Tierfutter) und die Abschätzung als Substrat für die Bereitstellung von VG erfolgte auf Basis von kurzfristigen Preisrelationen. Zur Etablierung einer effizienten Verwertungsschiene von Kartoffelnebenströmen bedarf es ergänzenden Analysen zur Logistik sowie zu Investitionen in Technik und Anlagen. Es ist zu ermitteln, ob und unter welchen weiteren Bedingungen die Kartoffelverarbeiter bereit sind, neue Vermarktungsmöglichkeiten zu nutzen. Weiterhin sind Rahmenbedingungen für die biotechnologische Verwertung von Kartoffelnebenströmen zu prüfen.

Literatur

AMI (Agrarmarkt Informations-Gesellschaft mbH) (2017) Markt Bilanz. Getreide, Ölsaaten, Futtermittel 2017. Bonn.

BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2014) Bioökonomie in Deutschland. Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft. Berlin.

Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen) (2017) Hintergrundpapier. Ergebnisse der Ausschreibung für Biomasse vom 1. September 2017. Bonn.

Cheng, C., Zhou, Y., Lin, M., Wei, P. und Yang, S.-T. (2017) Polymalic acid fermentation by *Aureobasidium pul-*

- lulans for malic acid production from soybean hull and soy molasses. *Fermentation kinetics and economic analysis. Bioresource Technology*, 223, 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.042>
- DBFZ (Deutsches Biomasseforschungszentrum) (2015) Stromerzeugung aus Biomasse. (Vorhaben Iia Biomasse). Zwischenbericht Mai 2015. Leipzig.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt) (2017a) Land-, Forstwirtschaft und Fischerei. Wachstum und Ernte. Feldfrüchte. Fachserie 3. Wiesbaden.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt) (2017b) Preise. Daten zur Energiepreisentwicklung. Lange Reihen von Januar 2000 bis April 2017. Wiesbaden.
- DESTATIS (Statistisches Bundesamt) (2017c) Preise. Verbraucherpreisindizes für Deutschland. Lange Reihen ab 1948. Wiesbaden.
- Detering, T. und Meyer, M. (2018) Vorversuche zur Produktausbeuten von 4-Vinylguaiacol. Institut für Lebensmittelchemie (LCI), Leibniz Universität Hannover. Hannover. unveröffentlicht.
- Jorissen, T., Synowietz, M. und Recke, G. (2017) Erste Ergebnisse durchgeführter Experteninterviews zum Aufkommen und der Verwendung von Nebenströmen aus der Kartoffelverarbeitung. *Landwirtschaftliche Betriebswirtschaftslehre*, Hochschule Osnabrück. Osnabrück. unveröffentlicht.
- Korthoua, H. und Verpoorte, R. (2007) Vanilla. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. In: R. G. Berger. *Flavours and Fragrances. Chemistry, Bioprocessing and Sustainability*. Heidelberg, 203-218.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.) (2017) Wirtschaftlichkeitsrechner Biogas. Darmstadt. URL: <https://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do?jsessionid=DD53FBF4BB6490D7F884131BB6358746> (29.10.2017).
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) (2013) Faustzahlen Biogas. Darmstadt.
- Kwan, T. H., Pleissner, D., Lau, K. Y., Venus, J., Pommeret, A. und Lin, C. S. K. (2015) Techno-economic analysis of a food waste valorization process via microalgae cultivation and co-production of plasticizer, lactic acid and animal feed from algal biomass and food waste. *Bioresource Technology*, 198, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.003>.
- Lam, K. F., Leung, C. C. J., Lei, H. M. und Lin, C. S. K. (2014) Economic feasibility of a pilot-scale fermentative succinic acid production from bakery wastes. *Food and Bioprocess Processing*, 92, 3, 282-290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2013.09.001>.
- Mattila, P. und Hellström, J. (2007) Phenolic acids in potatoes, vegetables, and some of their products. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20, 152-160. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.05.007>.
- Mußhoff, O. und Hirschauer, N. (2016) *Modernes Agrarmanagement. Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren*. München: Verlag Franz Vahlen GmbH.
- Rauh, S., Berenz, S. und Heißenhuber, A. (2008) Abschätzung des unternehmerischen Risikos beim Betrieb einer Biogasanlage mit Hilfe der Monet-Carlo-Methode. *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaus e.V.*, 43, 507-516.
- Riessen, C. (2010) Modellgestützte Risikoanalysen einer Biogasanlageninvestition als Grundlage einer ganzheitlichen Risikobetrachtung und des strategischen Risikomanagements. Dissertation an der Universität Rostock. Rostock.
- Staudacher, W. und Potthast, V. (2014) DLG Futterwerttabellen. Schweine. Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG). Frankfurt am Main.
- Strobl, M. und Keymer, U (2016) Biogasausbeute mobil. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). München. URL: <http://www.lfl.bayern.de/appl/biogas/ausbeute/> (29.10.2017).
- Weiß, J., Papst, W. und Granz, S. (2011) *Tierproduktion*. Stuttgart: Enke Verlag.
- Wolbert-Haverkamp, M. (2012) Miscanthus und Pappelplantagen im Kurzumtrieb als Alternative zum klassischen Ackerbau – Eine Risikoanalyse mittels Monte-Carlo Simulation. *Berichte über Landwirtschaft*, 90, 2, 302-316.