



Biomassepotenziale Rheinisches Revier

Potenziale für eine nachhaltige stoffliche Nutzung von Biomasse aus der Land- und Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier

[LANUV-Fachbericht 160](#)

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Einleitung	7
2.1	Politische Ausgangslage	7
2.2	Chancen und Risiken der stofflichen Biomassenutzung	7
2.3	Zielsetzung und Aufbau der Studie	9
3	Methodisches Vorgehen und Definitionen	10
3.1	Verwendete Datenquellen und Workshops.....	10
3.2	Untersuchungsgebiet Rheinisches Revier	10
3.3	Untersuchte Biomassen	11
3.3.1	Exkurs: Stoffliche Nutzung tierischer Wirtschaftsdünger	12
3.4	Definition Nachhaltigkeit.....	12
3.4.1	Ausdifferenzierung von Nachhaltigkeit in konkreten Untersuchungsrahmen	13
3.4.2	Nachhaltigkeit für die Bioökonomie im Rheinischen Revier	14
4	Überblick und Einordnung der Nutzungsverfahren	15
4.1	Einleitung und Methodik.....	15
4.2	Stoffliche Nutzung von Biomasse	16
4.3	Überblick der Nutzungsverfahren	19
4.3.1	Biomasseproduktion.....	19
4.3.2	Mechanische und physikalische Aufbereitung der Biomasse.....	20
4.3.3	Chemische und thermochemische Verarbeitung von Biomasse	21
4.3.4	Biotechnologische Verarbeitung von Biomasse	21
4.3.5	Bioraffinerien und Kombination von Biomasseverwertungs-technologien.....	22
4.4	Einordnung der Nutzungsverfahren	27
4.4.1	Bewertung der Relevanz für das Rheinische Revier	27
4.4.2	Bewertung der Nachhaltigkeit von Nutzungsverfahren.....	28
4.4.3	Steckbriefe ausgewählter Nutzungsverfahren	29
4.5	Prognose: Zukünftige Relevanz von Technologien im Rheinischen Revier	45
4.6	Zusammenfassung und Fazit.....	46
5	Derzeitige Biomasseproduktion im Rheinischen Revier	48
5.1	Methodik/Datengrundlage	48
5.2	Ergebnisse	49
5.2.1	Haupternteprodukte – Anbaufläche und Erträge	49
5.2.2	Aufteilung der Haupternteprodukte in ihre Hauptbestandteile	50
5.2.3	Verwendung der Haupternteprodukte sowie deren Hauptbestandteile	50
5.2.4	Nebenernteprodukte im Rheinischen Revier	52
5.2.5	Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier	53
5.3	Biomassepotenziale für eine stoffliche Nutzung	60
5.4	Zusammenfassung und Fazit.....	62
6	Zukünftige Biomasseproduktion im Rheinischen Revier	63
6.1	Aufgabenstellung und Methodik.....	63

6.1.1	Begriffsbestimmung Biomasseproduktion/Biomasseangebot	63
6.1.2	Exkurs: Das Modell CAPRI	63
6.1.3	Beschreibung der Szenarien.....	64
6.2	Ergebnisse	68
6.2.1	Biomasseangebot im Referenzjahr 2020 – Vergleich des Modell CAPRI mit der Agrarstatistik NRW	68
6.2.2	Biomasseangebot im Szenario business as usual: Vergleich des Referenzjahres 2020 mit den Jahren 2035 und 2045	68
6.2.3	Modellierte Ertragsentwicklung in den Szenarien.....	68
6.2.4	Biomasseangebot und –nachfrage in den Szenarien	70
6.3	Zusammenfassung und Fazit.....	71
7	Ökonomische Analyse	72
7.1	Zielsetzung und Methodik	72
7.2	Ergebnisse	73
7.2.1	Modellierte Produzentenpreise in den verschiedenen Szenarien.....	73
7.2.2	Modellierte Produzentenpreise bei verstärkter Biomassenachfrage	74
7.3	Zusammenfassung und Fazit.....	74
8	Vorschlag für ein Bewertungsschema	76
8.1	Standards und Regelwerke im Bereich Biomasse.....	76
8.2	Konzeptionierung des Bewertungsschemas.....	78
9	Monitoring von stofflicher Biomassenutzung	79
9.1	Zielsetzung und methodische Herausforderungen	79
9.2	Indikatoren für ein Monitoring der stofflichen Biomassenutzung	82
10	Herausforderungen und Empfehlungen.....	83
	Abkürzungsverzeichnis	84
	Glossar	86
	Literatur	89
	Abbildungsverzeichnis	102
	Tabellenverzeichnis	103
	Anhang	104

1 Zusammenfassung

Im Zuge des Kohleausstiegs soll das Rheinische Revier zu einer „Modellregion Bioökonomie“ entwickelt werden. Ziel ist es, durch verstärkte stoffliche Nutzung von Biomasse eine nachhaltige Bioökonomie in der Region zu etablieren. Dies kann ökologische, ökonomische und soziale Auswirkungen haben, die es fachlich zu bewerten und gegebenenfalls politisch zu steuern gilt.

Aus diesem Grund hat das LANUV mit dem zweijährigen Projekt „Biomassepotenziale Rheinisches Revier“ Grundlagen und Instrumente geschaffen, um zu einer nachhaltigen Nutzung von Biomasse aus der Land- und Ernährungswirtschaft in der Region beizutragen. Das Projekt wurde im Auftrag des MUNV und mit Fördermitteln des BMWK sowie des Landes NRW durchgeführt.

Zunächst wird ein Überblick über die aktuell und voraussichtlich zukünftig verfügbaren Technologien für eine stoffliche Verwendung von Biomasse gegeben und ausgewählte Verfahren anhand ihrer Relevanz für das Rheinische Revier und in Bezug auf Nachhaltigkeit bewertet. Grundsätzlich sind Produkte, die heute aus fossilem Kohlenstoff produziert werden, auch biobasiert herstellbar. Eine Vielzahl von Technologien, die dies ermöglichen, existiert bereits und viele weitere sind in der Entwicklung.

Im nächsten Schritt wird die derzeitige Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier ermittelt und modelliert, wie sich diese in den Jahren 2035 und 2045 in verschiedenen Szenarien entwickeln würde. Eine Auswertung aktueller Agrarstatistiken und Studien ergab, dass jährlich circa 1,76 Mio. t Biomasse (TM) im Rheinischen Revier geerntet werden. Davon werden derzeit 47 % als Futtermittel und 38 % für die menschliche Ernährung verwendet. Knapp 2,25 % werden bisher stofflich genutzt. Mit dem agrarökonomischen Modell CAPRI wurden vier Szenarien für die Zukunft entwickelt. Demnach würde die Umsetzung der Ziele aus der Farm-to-Fork-Strategie im Szenario „Umwelt“ (reduzierter Pestizid- und Düngereinsatz, Steigerung der Ökolandbau-Fläche, etc.) im Vergleich zum Szenario „Business as usual“ zu einem Rückgang der Erntemengen führen. Die in diesem Szenario ebenfalls getroffenen Annahmen „Rückgang Energiepflanzenanbau“, „geringere Fleischproduktion“ sowie „Reduzierung Lebensmittelverluste“ können diesen Rückgang nicht ausgleichen. Für ein Wachstum der Produktionsmengen, wie sie sich aus dem Szenario „Technologie“ ergeben, wären starke Züchtungserfolge und disruptive Innovationen notwendig, da die angenommenen Ertragssteigerungen sehr hoch sind. Aber auch verstärkte Kaskadennutzung sowie die Nutzung von Erntenebenprodukten und Reststoffen führen zu einem gesteigerten Biomasseangebot in diesem Szenario.

Darüber hinaus wird eine ökonomische Analyse durchgeführt, um abzuschätzen, wie sich die landwirtschaftlichen Rohstoffpreise in den jeweiligen Szenarien und darüber hinaus bei einer verstärkten Biomassenachfrage entwickeln können. Die geringeren Erträge im Szenario „Umwelt“ würden zu steigenden Raps- und Weizenpreisen führen (8,4 % bzw. 6,4 % im Vergleich zum Szenario „Business as usual“). Dementgegen sinken die Preise im Szenario „Technologie“ um 3 % bzw. 5 %, die Zuckerrübenpreise würden sich zwischen 0,7 % und 1,5 % auf und ab bewegen. Steigt die Nachfrage nach Zuckerrübe, Weizen und Raps (z. B. durch Errichtung industrieller biobasierter Produktionsanlagen im Rheinischen Revier) würden die Produzentenpreise um 0,03 % bis 0,65 % steigen. Zu berücksichtigen ist, dass das Modell davon ausgeht, dass der zusätzliche Biomassebedarf nicht zwangsläufig aus der Region, sondern auch durch überregionalen Handel gedeckt wird. Zudem untersucht das Modell die Auswirkungen

auf die nationalen Preise. Für Rohstoffe, die keinem Weltmarktpreis unterliegen, wie z. B. Getreidestroh, könnte eine veränderte Nachfrage auch Effekte auf Preise innerhalb kleinerer Regionen haben.

Auf Basis der Ergebnisse wurde ein Bewertungsschema für Bewilligungsbehörden entwickelt, mit dem die Auswirkungen der stofflichen Nutzung von Biomasse im Rheinischen Revier auf die Nachhaltigkeit im Rahmen des Auswahl- und Bewilligungsprozess bewertet werden kann. In die Bewertung fließen objektiv prüfbare Kriterien für die Biomasseproduktion sowie für die gesamte Wertschöpfungskette ein. Diese basieren auf international anerkannten Systemen und rechtlich verbindlichen Rahmenbedingungen wie der Erneuerbare-Energien-Richtlinie und der EU-Taxonomie. Um zu gewährleisten, dass durch die Nachhaltigkeitsbewertung der Antragsprozess nicht verzögert wird, soll das Bewertungsschema in das derzeitige Förderverfahren integriert werden. Zudem wird die Bewertung modular gestuft, sodass die Förderung auch für kleinere Pilotprojekte mit geringem Projektvolumen zugänglich ist.

Abschließend werden aus den Ergebnissen die wesentlichen Herausforderungen für eine stoffliche Biomassenutzung im Rheinischen Revier abgeleitet und Empfehlungen für Politik und Verwaltung formuliert, die als Basis für die Beratung relevanter Akteurinnen und Akteure im Rheinischen Revier dienen sollen.

2 Einleitung

Das Projekt „Biomassepotenziale Rheinisches Revier“ wurde vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) im Zeitraum vom 01.03.2023 bis 28.02.2025 im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNV) und mit Fördermitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland (BMWK) sowie des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) durchgeführt.

2.1 Politische Ausgangslage

Mit dem Zukunftsvertrag für Nordrhein-Westfalen¹ hat die Landesregierung im Juni 2022 vereinbart, dass NRW „zum führenden Standort einer nachhaltigen Bioökonomie werden“ soll. Dieses Ziel wird flankiert durch die Entwicklung einer Bioökonomie-Strategie für NRW; zudem soll „mit einem Zukunftsprogramm die Bioökonomie, die mit nachwachsenden Rohstoffen aus naturverträglichem Anbau eine zukunftsfähige Alternative zu fossilen Grundstoffen für die Chemieindustrie bildet“, gestärkt werden.

Im Dezember 2023 wurden von der Landesregierung Eckpunkte veröffentlicht, die den Rahmen für eine zukünftige Bioökonomie-Strategie in NRW legen, den Strategieprozess skizzieren als auch kurzfristige Handlungsoptionen benennen (LANDESREGIERUNG NORDRHEIN-WESTFALEN 2023). Zeitgleich wurde der Bioökonomie-Rat NRW mit Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und zivilgesellschaftlichen Organisationen eingerichtet, um die Landesregierung bei der Erarbeitung der Strategie zu unterstützen. Mit der Strategie soll ein konkreter Maßnahmenplan entwickelt werden, um notwendige Rahmenbedingungen zu schaffen, die Potenziale der Bioökonomie in NRW auszuschöpfen.

Derzeit wird der Begriff der Bioökonomie in NRW häufig mit dem anstehenden Strukturwandel im Rheinischen Braunkohlerevier in Verbindung gebracht. So sieht das Strukturstärkungsgesetz Kohleregionen eine „Erweiterung der Infrastrukturmaßnahmen mit zusätzlichen Fördermöglichkeiten im Rahmen der Entwicklung einer „Modellregion Bioökonomie“ im Rheinischen Revier“ vor (§ 17 Nr. 12). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF 2024) schreibt dazu in einer Pressemitteilung: „So lässt das Vorhaben Modellregion Bioökonomie aus vorheriger Förderung im Rheinischen Revier bis 2031 eine europaweite Modellregion für biobasiertes Wirtschaften entstehen. [...] Durch das Zusammenwirken von Forschung mit Industrie, Landwirtschaft, Kommunen und Zivilgesellschaft werden die Stärken der gesamten Region genutzt, um Forschungsvorhaben mit wirtschaftlichem Potenzial in den Bereichen der Chemie- und Biotechnologie bis hin zur Land- und Lebensmittelwirtschaft zu ermöglichen. [...]

2.2 Chancen und Risiken der stofflichen Biomassenutzung

Mit der Entwicklung einer Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier wird auch eine zunehmende stoffliche Nutzung von Biomasse verbunden sein und zwangsläufig wird sich die

¹ Koalitionsvertrag abrufbar unter: https://www.cdu-nrw.de/sites/www.neu.cdu-nrw.de/files/zukunftsvertrag_cdu-grune.pdf

Frage stellen, wie diese vermehrte Nachfrage nach Biomasse bedient werden soll. Für die Landwirtschaft kann die Bereitstellung entsprechender Agrarrohstoffe weitere Einkommensquellen generieren. Zudem kann der Anbau von nachwachsenden Rohstoffen die Möglichkeit zur Diversifizierung von Fruchtfolgen bieten, was z. B. den Krankheitsdruck auf Pflanzen minimieren würde.

Für die Region kann die stoffliche Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse ein Startpunkt von neuen Wertschöpfungsketten sein. Branchen, die heute häufig noch auf fossile Rohstoffe angewiesen sind, z. B. die chemische Industrie oder die Baustoffindustrie, können mit biogenen Rohstoffen langfristig Wertschöpfung und Arbeitsplätze in der Region sichern; Unternehmen können neue Produkte auf Basis biogener Rohstoffe entwickeln.

Auf der anderen Seite kann ein Mehrbedarf an biogenen Ressourcen auch kritisch zu bewertende ökologische, ökonomische und soziale Folgen haben, nicht nur für das Rheinische Revier oder NRW, sondern auch global. Schon heute werden in Deutschland zwei Drittel aller stofflich genutzten nachwachsenden Rohstoffe importiert (v. a. Palm-, Soja- und Kokosöl, Naturkautschuk, Naturfasern, Chemiezellstoff, Maisstärke, Kork und Arzneipflanzen). Dabei ist der internationale Handel mit Agrarrohstoffen häufig mit ökologischen und sozialen Problemen in den Anbauländern verbunden (UBA 2014, UBA 2018). Es ist nicht unwahrscheinlich, dass eine Ausweitung der Importe diese Probleme verschärfen würde. Zudem ist zu bedenken, dass der Umbau der Wirtschaft zu einer „biobasierten Ökonomie“ eine weltweite Herausforderung ist und auch andernorts die Nachfrage nach biogenen Rohstoffen steigt.

Der inländische Anbau von nachwachsenden Rohstoffen zur stofflichen Nutzung beschränkt sich derzeit auf ca. 2 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche (FNR 2021). Da landwirtschaftliche Flächen eine begrenzte Ressource darstellen, kann es durch eine zunehmende stoffliche Verwendung von Biomasse zu Nutzungskonkurrenzen kommen, die zu Verdrängungseffekten führen können: Werden z. B. Futtermittel für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen verdrängt, müssen diese Mengen an Futter auf einer anderen Fläche produziert werden. Dies kann beispielsweise zu Landnutzungsänderungen (Grünlandumbruch, Waldrodung, etc.) oder zur Verdrängung von Nahrungsmittelanbau in einem Drittland führen (MAJER et al. 2013, LANUV 2014). Dasselbe gilt auch für Erntenebenprodukte oder Reststoffe aus der Ernährungs- wirtschaft. Denn auch diese werden – häufig innerhalb der Landwirtschaft – bereits genutzt, z. B. aussortierte Kartoffeln als Tierfutter, Stroh zur Einstreu oder als Substrat für die Pilzzucht. Auf dem Acker verbleibendes Stroh erfüllt durch den Beitrag zur Humusreproduktion wichtige ökologische und pflanzenbauliche Funktionen. Ertragssteigerungen könnten zwar eine höhere Nachfrage nach biogenen Ausgangsstoffen in gewissem Umfang bedienen. Eine weitere Intensivierung der Landwirtschaft ist jedoch nur begrenzt möglich und kann mit negativen Folgen für Umwelt, Natur und Klima verbunden sein.

2.3 Zielsetzung und Aufbau der Studie

Ziel des Projekts ist die Sicherstellung der nachhaltigen Biomassenutzung bei der Förderung von Forschungs- und Industrievorhaben im Rahmen des Strukturwandels im Rheinischen Revier sowie die Vermeidung von Fehlanreizen. Im Wesentlichen liegen der Studie die folgenden Forschungsfragen zugrunde:

- Welche Verfahren der stofflichen Biomassenutzung gibt es bzw. sind auf das Rheinische Revier übertragbar und wie nachhaltig sind diese Verfahren?
- Wie viel Biomasse aus der Land- und Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier steht derzeit sowie in den Jahren 2035 und 2045 in verschiedenen Szenarien für eine stoffliche Nutzung zur Verfügung?
- Welche Auswirkungen haben veränderte ökonomische Rahmenbedingungen auf die Land- und Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier?
- Wie sollten Förderprogramme für eine nachhaltige stoffliche Biomassenutzung zur Vermeidung von Fehlanreizen ausgestaltet sein?

Zunächst wird ein Überblick über die aktuell und zukünftig verfügbaren Technologien für eine stoffliche Verwendung von Biomasse gegeben und ausgewählte Verfahren anhand ihrer Relevanz für das Rheinische Revier und Nachhaltigkeit bewertet. Im nächsten Schritt wird die derzeitige Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier ermittelt und modelliert, wie sich diese in den Jahren 2035 und 2045 in verschiedenen Szenarien entwickeln würde. Zudem wird eine ökonomische Analyse durchgeführt, um abzuschätzen, wie sich die landwirtschaftlichen Rohstoffpreise in den jeweiligen Szenarien und darüber hinaus bei einer verstärkten Biomassenachfrage entwickeln können. Auf Basis der Ergebnisse wird ein Bewertungsschema konzipiert, mit dem Projektvorhaben auf Nachhaltigkeit geprüft werden können. Ordnungspolitische Maßnahmen zur Förderung der Bioökonomie werden nicht betrachtet. Ebenfalls Inhalt der Studie ist die Erarbeitung von Indikatoren für ein Monitoring zu den Auswirkungen der stofflichen Biomassenutzung im Rheinischen Revier. Abschließend werden aus den Ergebnissen die wesentlichen Herausforderungen für eine stoffliche Biomassenutzung im Rheinischen Revier abgeleitet und Empfehlungen für Politik und Verwaltung formuliert, die als Basis für die Beratung relevanter Akteurinnen und Akteure im Rheinischen Revier dienen sollen.

3 Methodisches Vorgehen und Definitionen

3.1 Verwendete Datenquellen und Workshops

Die Studie ist zu großen Teilen literaturbasiert und wurde ergänzt durch Interviews mit Expertinnen und Experten. Zudem fanden fünf projektbegleitende Workshops statt. In diesen wurden gemeinsam mit Vertreterinnen und Vertretern aus der Land- und Ernährungswirtschaft, weiterer Wirtschaftsbranchen sowie dem Natur- und Umweltschutz als auch der Wissenschaft, Politik und Verwaltung Projektinhalte diskutiert und erarbeitet. Übergeordnetes Ziel der Workshops war es, Fachwissen zu nutzen und verschiedene technologie-, markt- und wissensbasierten Fakten, Positionen und Sichtweisen im Verlauf des Vorhabens zu berücksichtigen. Insgesamt nahmen mehr als 60 verschiedene Personen an den Workshops teil. Einige von ihnen kamen mehrfach, sodass jeder Workshop 15 bis 30 Teilnehmende zu verzeichnen hatte. Die detaillierten Methodenbeschreibungen zum Überblick und zur Einordnung der Nutzungsverfahren, zur Potenzialberechnung als auch zur ökonomischen Analyse finden sich am Anfang der jeweiligen Kapitel.

3.2 Untersuchungsgebiet Rheinisches Revier

Das Rheinische Revier umfasst die Kreise Düren, Euskirchen und Heinsberg, den Rhein-Erft-Kreis und den Rhein-Kreis Neuss sowie die Städtereion Aachen und die Stadt Mönchengladbach. Diese Region bietet eine gute Ausgangslage für die stoffliche Nutzung von Biomasse aus der Land- und Ernährungswirtschaft: Es gibt sehr gute landwirtschaftliche Standorte, eine lange Tradition von intensivem Pflanzenbau und entsprechend großes Knowhow. Auch Sonderkulturen und Vertragsanbau haben in der Region Tradition, z. B. bei Zuckerrüben, Kartoffeln oder Gemüse. In Betrieben für die Aufbereitung (z. B. Kartoffeln) und Verarbeitung (z. B. Zuckerrüben) gibt es erhebliche Mengen an Nebenprodukten, die für eine stoffliche Nutzung geeignet sein können. Die Tierhaltung, die ebenfalls eine Option für die Nutzung von Nebenprodukten darstellt, ist im Rheinischen Revier schwächer vertreten als in anderen Regionen NRWs. In Teilbereichen der Region spielt die Rinderhaltung, inklusive Milchviehhaltung eine Rolle; es gibt Molkereien und Schlachthöfe. Ebenfalls gibt es im und angrenzend an das Rheinische Revier (Regierungsbezirke Köln und Düsseldorf) eine starke Chemieindustrie mit mehr als 260 Unternehmen und 70.000 Beschäftigten, die Biomasse stofflich nutzen könnte (CHEM-COLOGNE 2024).



Abbildung 1: Rheinisches Revier: Anrainerkommunen (hellgrau) und umliegende Kreise (dunkelgrau) (LANUV, 2023)

3.3 Untersuchte Biomassen

In der vorliegenden Studie wurden die Potenziale von Biomasse aus den Sektoren Landwirtschaft und Ernährungswirtschaft analysiert. Dazu zählen im Einzelnen:

Sektor Landwirtschaft:

- Haupternteprodukte (z. B. Getreidekorn)
- Nebenernteprodukte (z. B. Getreidestroh)
- Dauergrünland

Sektor Ernährungswirtschaft

- pflanzliche und tierische Reststoffe, die in der ersten Verarbeitungsstufe anfallen (z. B. Getreidekleie)

Weitere Biomassepotenziale z. B. aus der Forst- oder Abfallwirtschaft (auch Biotonne) wurden nicht untersucht. Ebenfalls wurden keine Potenziale berücksichtigt, die sich ggf. aus der stofflichen Nutzung von tierischen Wirtschaftsdüngern ergeben.

Auch Potenziale durch den Biomasseanbau auf Rekultivierungsstandorten der ehemaligen Tagebauflächen wurden nicht gesondert untersucht, da die zukünftig freiwerdenden Tagebauflächen weitestgehend geflutet werden sollen.

3.3.1 Exkurs: Stoffliche Nutzung tierischer Wirtschaftsdünger

Wirtschaftsdünger, die in der landwirtschaftlichen Tierproduktion anfallen (Gülle, Mist, Jauche, etc.) weisen in der Regel einen hohen Wasseranteil auf, was die stoffliche Nutzung abseits der Verwendung als Düngemittel erschwert. Laut Angaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR 2024) fallen in Deutschland jährlich etwa 150 bis 190 Mio. t tierische Exkremente als Wirtschaftsdünger an. Etwa ein Drittel dieser Mengen, etwa 60 Mio. t, werden aktuell als Biogassubstrat energetisch in Biogasanlagen genutzt (FNR 2024). Die energetische Nutzung von Wirtschaftsdüngern wird von der FNR als derzeit einzige technische und wirtschaftlich etablierte Lösung bezeichnet, ihr Zukunftspotenzial als Energieträger sowie zur THG-Minderung wird als hoch eingeschätzt (FNR 2024).

Das in Biogasanlagen entstehende Gas kann nach einer Aufreinigung zu Biomethan auch stofflich verwendet werden und hier vor allem die Nutzung von fossilem Erdgas substituieren, das in zahlreichen Prozessen der chemischen Industrie eine zentrale Bedeutung hat.

Zudem gibt bzw. gab es vereinzelt Projekte zur Extraktion der Phosphoranteile aus Gülle und Mist und ihrer Aufbereitung für Mineraldünger wie auch für andere Phosphorderivate, die jedoch nach aktuellem Stand nur begrenzt wirtschaftlich sind (GREAVES et al. 2010; KAHILUOTO et al. 2015; McDOWELL et al. 2024; SCHOUMANS et al. 2010).

Denkbar ist auch die Nutzung von Gülle als Substrat bzw. Co-Substrat für die Fermentation zu Milchsäure und anderen organischen Säuren. Diese wurde vereinzelt in Projekten, vor allem in China und den USA, untersucht, eine kommerzielle Umsetzung gibt es bislang nicht (KIM et al. 2022; LEE et al. 2021; LIAN et al. 2024).

Die genannten Prozesse der stofflichen Nutzung von Wirtschaftsdünger sind bisher weder etabliert noch wirtschaftlich und spielen daher in der Betrachtung der Biomassepotenziale für stoffliche Nutzungen nur eine sehr geringe Rolle.

3.4 Definition Nachhaltigkeit

Das vorliegende Projekt untersucht „nachhaltige“ Biomassepotenziale für eine stoffliche Nutzung. Um diese zu identifizieren und zu beschreiben, wird der folgende Nachhaltigkeitsbegriff verwendet:

Entsprechend der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung, ist „Nachhaltigkeit“ das Leitprinzip für eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen sowie künftiger Generationen gerecht wird – in Deutschland sowie in allen Teilen der Welt – und ihnen ein Leben in voller Entfaltung ihrer Würde ermöglicht. Dafür bedarf es einer wirtschaftlich leistungsfähigen, sozial ausgewogenen und ökologisch verträglichen Entwicklung, wobei die planetaren Grenzen zusammen mit der Orientierung an einem Leben in Würde für alle die absolute äußere Beschränkung vorgeben (BUNDESREGIERUNG 2021).

Die Grundlage für diese Definition ist der Bericht der Brundtland-Kommission „Unsere gemeinsame Zukunft“ von 1987, in dem ebenfalls hervorgehoben wird, dass die Befriedigung der Bedürfnisse der Generation von heute nicht die Möglichkeiten künftiger Generationen gefährden darf, ebenfalls ihre Bedürfnisse zu befriedigen. Der Nachhaltigkeitsgedanke wird weiterhin grundsätzlich in die drei Dimensionen Ökologie/Ökonomie/Soziales strukturiert, wie es auch die Bundesregierung tut.

Dies ist eine sehr breit gefasste Definition, die je nach Anwendungsrahmen unterschiedlich ausdifferenziert und appliziert wird. Im Kontext der globalen Entwicklung wurden von den Vereinten Nationen 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDGs) definiert, die für die Mitgliedsstaaten leitend sein sollen für ihr politisches Handeln. Hier werden die drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales auf 17 Unterthemen aufgeteilt, wie Armuts- und Hungerbekämpfung, Schutz der Umwelt, nachhaltiger Konsum usw. (VEREINTE NATIONEN 2015).

3.4.1 Ausdifferenzierung von Nachhaltigkeit in konkreten Untersuchungsrahmen

Auch diese bereits weiter ausdifferenzierte Betrachtung von Nachhaltigkeit in Form der SDGs ist nicht ausreichend, um einzelne Projekte, die Entwicklung bestimmter Regionen, ökonomische Aktivitäten von Unternehmen oder andere Betrachtungseinheiten – die deutlich kleiner sind als globale Entwicklungen – auf Nachhaltigkeit hin zu untersuchen und zu bewerten. Dies geschieht je nach Untersuchungsrahmen unterschiedlich.

Für die Untersuchung von Produkten und ihren Lebenszyklen hat sich die Lebenszyklusanalyse (LCA) als Methode herauskristallisiert, die in mehreren international anerkannten Dokumenten standardisiert ist (Ökobilanz - DIN EN ISO 14040/44). Hier werden ökologische Effekte untersucht.

Für die Ausgestaltung des nachhaltigen Finanzsektors, der politisches Ziel des europäischen Green Deals ist, musste ebenfalls ein System geschaffen werden, das ökonomische Aktivitäten auf ihre Nachhaltigkeit hin untersucht. Dies ist geschehen in der EU Taxonomie (EUROPÄISCHE UNION 2020). Auch diese bezieht sich ausschließlich auf ökologische Effekte. Sie gibt sechs umweltrelevante Handlungsfelder vor (wie Abschwächung des Klimawandels, Kreislaufwirtschaft, etc.) und definiert dann erstens Kriterien und Indikatoren, anhand derer Unternehmen nachweisen können, dass sie zu einem der sechs Handlungsfelder positiv beitragen; und zweitens definiert sie Kriterien und Indikatoren, anhand derer Unternehmen nachweisen müssen, dass sie zu den anderen fünf Handlungsfeldern nicht signifikant negativ beitragen; zusätzlich gibt es soziale Mindeststandards.

Im Bereich der Biomassenachhaltigkeit setzt bisher die Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (RED, EUROPÄISCHE UNION 2023) die Standards. Dort ist definiert, welche Kriterien Biomasse erfüllen muss, damit sie für Biokraftstoffe und Bioenergie verwendet werden darf, die auf die Biokraftstoff- und Bioenergiequoten angerechnet werden können. Diese Kriterien konzentrieren sich auf den Anbau der Biomasse und schließen bestimmte ökologisch wertvolle Flächen vom Anbau aus, zum Beispiel Flächen mit hohem Kohlenstoffgehalt, hoher Biodiversität, etc.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Ausgestaltungen des Nachhaltigkeitsbegriffs fallen zwei Dinge besonders auf: Erstens ist die Definition von Kriterien und Indikatoren zentral, um den großen Begriff der Nachhaltigkeit greifbar und auf kleinere Untersuchungsrahmen anwendbar zu machen. Zweitens fokussieren sich die bisher existierenden verbindlichen Richtlinien/Vorgaben nur auf den Aspekt der ökologischen Nachhaltigkeit. Die Analyse der sozialen und ökonomischen Effekte ist bisher nicht standardisiert, geschweige denn politisch verbindlich irgendwo festgehalten.

3.4.2 Nachhaltigkeit für die Bioökonomie im Rheinischen Revier

Für das vorliegende Projekt sind zwei Betrachtungsrahmen von Relevanz: Erstens die gesamte Entwicklung im Rheinischen Revier und zweitens konkrete Projekte zur stofflichen Nutzung von Biomasse.

Nachhaltigkeit im Rheinischen Revier wird im Rahmen dieser Studie auch primär über die ökologischen Auswirkungen von verschiedenen Aktivitäten definiert. Es geht um Treibhausgasemissionen, Landnutzung, die Nutzung von Düngemitteln usw. So wird bspw. als grundlegende Annahme festgelegt, dass keine weiteren Flächen – die ggf. ökologisch eine wichtige Rolle spielen – in landwirtschaftliche Flächen umgewandelt werden, wenn die nachhaltigen technischen Potenziale für die stoffliche Nutzung analysiert werden. Auch die bisherige Nutzung für Nahrungsmittel wird nicht für das stoffliche Biomassepotenzial mit einbezogen, entsprechend des „food first“ Prinzips.

Zusätzlich werden im Szenario Umwelt wichtige Kernpunkte der Farm-to-Fork Strategie zugrunde gelegt, die die landwirtschaftliche Praxis insgesamt umweltfreundlicher machen sollen. Das Szenario Technologie zielt auch auf Umweltschutz ab, da hier vor allem angenommen wird, dass der Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln durch innovative Technologien stark beschränkt werden kann, und Biodiversität und Gewässer so unter anderem geschützt werden. Soziale Aspekte werden für heimische Biomasse als durch die Gesetzeslage in der EU als ausreichend berücksichtigt betrachtet und nicht mit eigenen Kriterien belegt. Die ökonomische Nachhaltigkeit ist methodisch sehr schwer zu quantifizieren. Für einzelne Produkte oder Unternehmen mag es möglich sein, z.B. über die sog. Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC), für den gesamten landwirtschaftlichen Sektor in einer Region aber kaum. Hier sei jedoch angemerkt, dass der Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen wie Lebensräume für den Sektor der Landwirtschaft auch ein zentrales ökonomisches Anliegen für die Zukunftssicherung ist.

Für die Betrachtung der konkreten Wertschöpfungsketten bzw. der Bioökonomieprojekte bedient sich die Studie der Ausgestaltung des Nachhaltigkeitsbegriffs durch Standards wie LCAs, der EU Taxonomie und der RED.

4 Überblick und Einordnung der Nutzungsverfahren

4.1 Einleitung und Methodik

Die Betrachtung der aktuell und zukünftig verfügbaren Technologien für die Umwandlung von Biomasse und ihrer Entwicklungen und Potenziale ist für die Etablierung einer nachhaltigen und wirtschaftlich tragfähigen Bioökonomie von zentraler Bedeutung. Daher wird im Rahmen dieser Studie in einem ersten Schritt ein Überblick über die technologischen Verfahren der stofflichen Biomassenutzung, die es derzeit gibt und die ggf. im Rheinischen Revier zur Anwendung kommen können, gegeben. Das Spektrum umfasst dabei Technologien, die sowohl mechanisch wie auch chemisch (chemo-katalytisch, thermo- oder elektrochemisch) oder biotechnologisch sein können.

Im Fokus dieser Studie stehen gemäß des Untersuchungsrahmens Technologien, mit denen sich biogene Rohstoffe aus der Land- und Ernährungswirtschaft sowie deren Nebenprodukte, im Bereich der stofflichen Nutzung verwenden lassen.

Diese bestehenden und in der Entwicklung befindlichen Technologien werden hier skizziert und dahingehend betrachtet, welche Nutzungen von Biomasse sie ermöglichen. In den beigefügten tabellarischen Kurzdarstellungen wird angegeben, für welche Biomasse- und Reststoffströme diese Technologien eingesetzt werden können, welche technologische Reife sie haben (Technological Readiness Level, TRL) und welche Zielprodukte mit diesen hergestellt werden können. Die Technologische Reife ist dabei eine standardisierte Skala mit Werten von 1 bis 9, die ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt wurde (ISO 16290:2013 bzw. DIN EN 16603-11:2020-02) und den jeweiligen Entwicklungsstand einer Technologie kennzeichnet. Die Skala wurde in der Folge auf weitere Technologien angewendet, u. a. für nationale und internationale Forschungsprojekte, allerdings nicht über einen ISO-Standard standardisiert (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2014). Technologieentwicklungen werden entsprechend nach der folgenden Skala eingeordnet:

- TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips
- TRL 2: Beschreibung der Anwendung einer Technologie
- TRL 3: Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie
- TRL 4: Versuchsaufbau im Labor
- TRL 5: Versuchsaufbau in Einsatzumgebung
- TRL 6: Prototyp in Einsatzumgebung
- TRL 7: Prototyp im Einsatz (1–5 Jahre)
- TRL 8: Qualifiziertes System mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit im Einsatzbereich
- TRL 9: Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes

Die identifizierten Nutzungsverfahren werden anschließend in Form von kurzen Steckbriefen exemplarisch dargestellt und eine Einordnung hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit sowie Relevanz für das Rheinische Revier basierend auf unterschiedlichen Kriterien wird gegeben. Zudem wird am Ende des Kapitels eine Prognose gegeben, welche Nutzungsverfahren zukünftig weitere Bedeutung erlangen können.

4.2 Stoffliche Nutzung von Biomasse

„Biomasse“ ist ein Sammelbegriff, der für sämtliche Arten von pflanzlichem und tierischem Rohstoff genutzt wird (FNR 2024). Biomasse kann ganz unterschiedliche Herkunft haben – entweder frisch geerntet aus Land- und Forstwirtschaft bzw. Aquakultur, oder anfallend als Reststoff in verschiedenen Verarbeitungsstufen und sogar als Abfall. Pflanzen und Tiere sind – wie Menschen – komplexe natürliche Gebilde. Wenn sie wirtschaftlich genutzt werden, gibt es viele unterschiedliche Möglichkeiten der Verwendung. Dies liegt zum einen an der Vielzahl menschlicher ökonomischer Aktivitäten und Produkte, die wir produzieren. Zum anderen liegt es aber auch an der Komplexität von Biomasse. Sie besteht aus vielen unterschiedlichen Komponenten, die vielfältige Nutzungsmöglichkeiten bieten – man unterscheidet insbesondere zwischen Kohlehydraten (Stärke und Zucker), Lignocellulose (die wiederum in Lignin und Cellulose aufgespalten werden kann) sowie Fetten und Proteinen. Dies sind die größten Bausteine in Bezug auf Volumenströme, aber auch in Bezug auf die Molekülgrößen. Zusätzlich gibt es auch noch eine Vielzahl von kleinervolumigen und spezielleren Molekülen wie Aromen, Farbstoffe, Antioxidantien oder medizinisch nutzbaren Inhaltsstoffen, die ebenfalls in Pflanzen vorkommen, und die z. B. extrahiert werden können (IMA AGRAR 2024, RASCHKA 2024).

Für stoffliche Nutzungen kommen alle diese Inhaltsstoffe von Pflanzen und Tieren in Frage. Je nach Zielprodukt sind unterschiedliche Technologien für die Konversion und Verwertung notwendig. Der folgende Teil gibt einen grundlegenden Überblick darüber, welche Arten landwirtschaftlicher Biomasse für welche stofflichen Nutzungen in Frage kommen.

- Stärke und Zucker (in Europa primär aus Zuckerrübe, Weizen, Kartoffeln und Mais), können in der chemischen Industrie und in der Biotechnologie, aber auch im Bereich der Papierindustrie (Papierstärke), der Textilindustrie (Textilstärke) oder auch in der Bauindustrie eingesetzt werden.
- Fette und Pflanzenöle (in Europa primär aus Raps, weniger aus Sonnenblume und Lein; in Zukunft vielleicht auch Algen (ARAÚJO et al. 2021; KUMAR et al. 2020; SACHIN POWAR et al. 2022) oder Fette aus der Nutzung von Insekten (LORRETTE AND SANCHEZ 2022; VAN HUIS 2017; VAN ZANTEN et al. 2015), werden aktuell vor allem in den Bereichen der Oleochemie eingesetzt. Aus diesen werden vor allem Schmierstoffe, Waschmittel (Tenside) und Seifen hergestellt, jedoch auch Farben und Lacke oder – gemeinsam mit importiertem Kork – das vor allem historisch bedeutsame Linoleum. Pflanzenöle finden zudem Verwendung als Additive, vor allem Weichmacher, für Kunststoffe und Elastomere, sowie als Basis für die Herstellung von Biodiesel als Kraftstoff für Diesel-Verbrennungsmotoren. Das als Nebenprodukt bei der Herstellung von Biodiesel anfallende Glyzerin findet ebenfalls Verwendung als Weichmacher für Kunststoffe, es wird jedoch auch als Ausgangsstoff für die Produktion von Epichlorhydrin zur Herstellung von Epoxidharzen etwa für die Herstellung von Windkraftanlagen oder den Bootsbau verwendet.
- Cellulose: Da in dieser Studie keine forst-basierten Rohstoffe untersucht werden, stehen hier nur Agrar-Naturfasern (vor allem Hanf, Nessel und Lein) im Fokus. Diese spielen in Europa und vor allem in Deutschland nur noch eine untergeordnete Rolle, da sie in den letzten Jahrzehnten sehr stark von synthetischen Fasern verdrängt wurden. Sie finden Verwendung in der Textilindustrie (Bekleidung, Heimtextilien) oder als technische Textilien in Form von Vliesen als Dämmstoffmaterialien im Hausbau, als Agro- und Geotextilien oder zur Herstellung von naturfaserverstärkten Kompositen, etwa im

Fahrzeugbau. Lignocellulose ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil von Erntenebenprodukten wie Stroh oder Zuckerrübenblättern.

- Proteine (unter anderem Lupine, Erbsen; in Zukunft vielleicht auch Algen und/oder Insekten) werden in der deutschen Landwirtschaft aktuell nur in vergleichsweise geringen Mengen angebaut (Nischenkulturen), die jedoch aufgrund der Änderung der Ernährungsgewohnheiten und einer Zunahme an veganen und vegetarischen Produkten in Zukunft wahrscheinlich größere Relevanz haben werden. Im stofflichen Bereich werden Proteine nur in geringen Mengen eingesetzt, etwa als Klebstoffe, als Farbaditive oder für Papierbeschichtungen. Ebenfalls zu den Proteinen gehören hier tierische Produkte wie Wolle, Felle und Leder, die in der Bekleidungsindustrie oder der Automobilindustrie etwa für Lederbezüge Verwendung finden, sowie Proteine aus Schlachtabfällen.
- Weitere Anbaupflanzen mit kleineren Anbauflächen und Einsatzmengen werden in der Regel als „Nischenkulturen“ betrachtet. Die darin enthaltenen Medizinpflanzen beinhalten Wirkstoffe, die in der Pharmazie sowie im Bereich der Kosmetik und auch der Ernährungsindustrie (Nutraceuticals) verwendet werden. Weitere Nischenkulturen sind etwa Färberpflanzen oder auch der als Kautschukpflanze eingesetzte Löwenzahn, die jedoch derzeit in Deutschland keine Rolle spielen (RASCHKA 2024).

Neben den genannten Biomassen aus der Landwirtschaft sind auch weitere Biomassen stofflich nutzbar, die jedoch nicht im Fokus der Studie standen, wie z. B. aus der Forst- und Abfallwirtschaft oder Biomassen, die bei der Bewirtschaftung und Pflege von Grünanlagen, Gärten und anderen Grünflächen anfallen.

Die folgende Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Vielzahl an stofflichen Nutzungsmöglichkeiten für die verschiedenen Biomassearten.

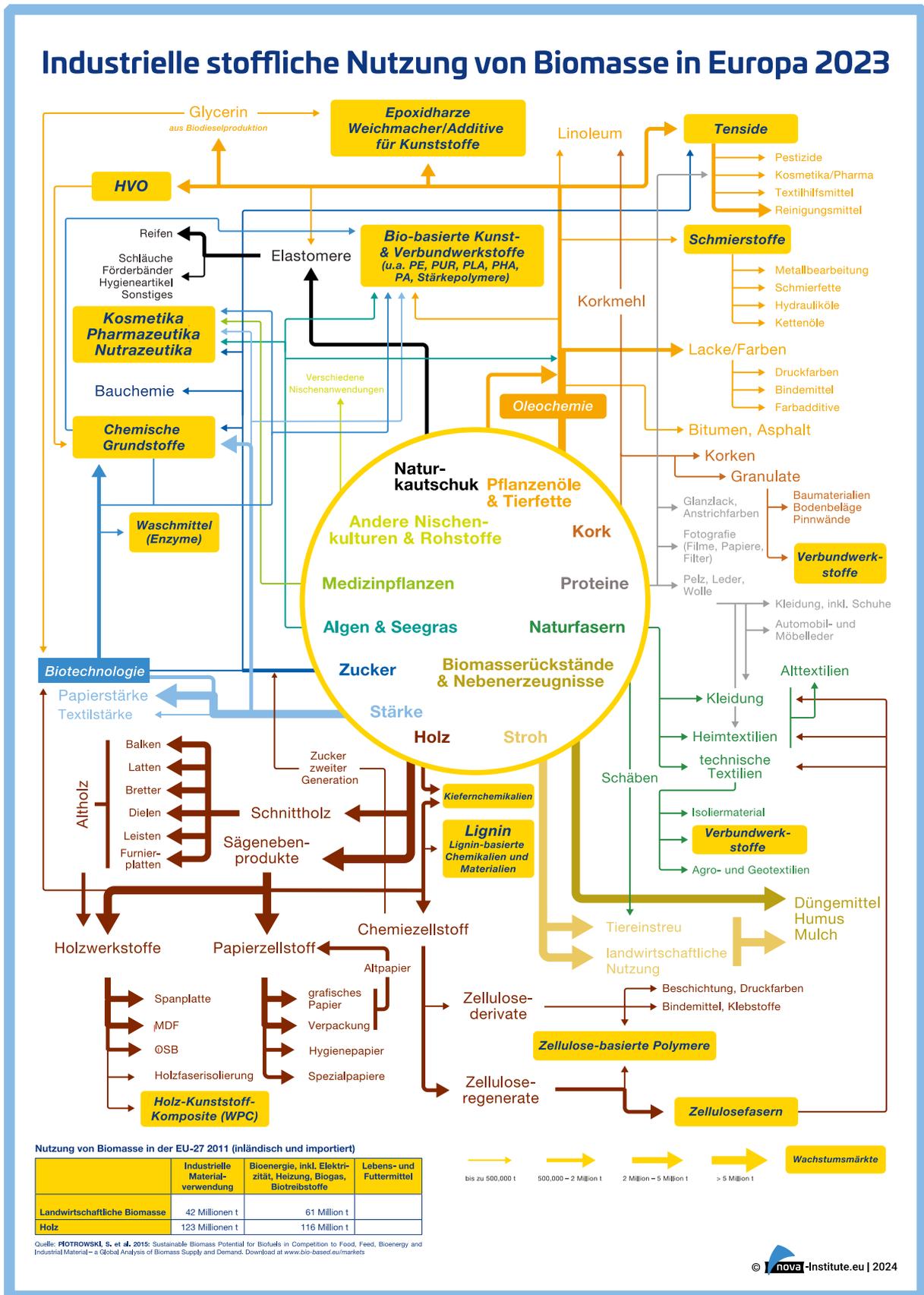


Abbildung 2: Stoffliche Nutzungen von Biomasse in Europa (nova-Institut 2024)

4.3 Überblick der Nutzungsverfahren

4.3.1 Biomasseproduktion

Im Folgenden werden zunächst einige Technologien betrachtet, die vor allem für den landwirtschaftlichen Biomasseanbau Einfluss auf die Mengen, Qualitäten und Arten der Biomasse haben können (Tabelle 1). Hier werden nur in der Forschung und Entwicklung befindliche Technologien betrachtet, da eine Darstellung aller in der Landwirtschaft genutzten Techniken den Rahmen dieser Betrachtung sprengen würden.

Ebenfalls nicht betrachtet werden hier Technologien, die die Logistik zur Biomasseerfassung und -verteilung betreffen. Diese umfassen unter anderem Entwicklungen der Digitalisierung, Datenbankentwicklung sowie den Aufbau von Logistikstrukturen von Sammel- und Verteilzentren über den Ausbau von Transport- und Pipelinesystemen, die für die Nutzung von Biomasseströmen zwar von zentraler Bedeutung sind, jedoch die Konversion der biogenen Rohstoffe nicht betreffen.

Tabelle 1: Technologien für den Anbau von Biomasse (nova-Institut 2024)

Prozess / Technologie	Beschreibung
Einsatz von Digitalisierung, Präzisionslandwirtschaft, Drohnen, Robotik etc. (Smart Farming)	Neuartige Anbautechnologien in der Landwirtschaft können die Primärproduktion steigern, bzw. bereits hoch entwickelte Erträge konstant halten bei reduziertem Einsatz von Betriebsmitteln. Diese Technologien setzen u. a. auf die Digitalisierung und die Präzisionslandwirtschaft (precision farming), etwa bei der Düngung und Schädlingsbekämpfung (BALAFOUTIS et al. 2017; BELLON MAUREL AND HUYGHE 2017; BOVENSIEPEN et al. 2016; FINCH et al. 2014; KLIEM et al. 2023).
Hybride Landwirtschaft, Mehrfachnutzung	Kombination von konventionellem und ökologischem Anbau, um jeweilige Vorteile zu nutzen und Nachteile zu vermeiden (z. B. die Erfahrungen mit der erweiterten Fruchtfolge aus dem Ökolandbau in die konventionelle Landwirtschaft integrieren, s. BESTE 2020). Zudem kann Landwirtschaft mit anderen Technologien wie Solarenergie etc. kombiniert werden, wodurch auf landwirtschaftlichen Flächen neben Biomasse auch Energie, Wasserstoff etc. gewonnen werden können (RAVILLA et al. 2024).
Neue Agrarsysteme (Algenanbausysteme, Vertical Farming, Urban Farming)	Neuartige Agrarsysteme ermöglichen eine flächenunabhängige Agrarproduktion und die Biomasseproduktion auf Standorten abseits der klassischen landwirtschaftlichen Flächen (Ruderalflächen, Industrieflächen etc.) (BENKE AND TOMKINS 2017; PINSTRUP-ANDERSEN 2018; SARKAR AND MAJUMDER 2015; VAN HOREN 2018).
Etablierung von mehr Anbaudiversität durch Proteinpflanzen, Non-food-Kulturen, u. a.	Gerade im Kontext der Ernährungsumstellung werden in Zukunft weitere Pflanzen eine Rolle spielen, die aktuell noch nicht oder nicht mehr im Fokus stehen, vor allem Proteinpflanzen (Lupine, Erbsen, Ackerbohne). Auch durch Non-food- bzw. Industripflanzen wie Faser- und Ölpflanzen etc. könnte die Anbaudiversität erhöht werden.

Tabelle 1 enthält einige Technologien, durch die Erträge und damit das Biomasseangebot gesteigert werden könnten und die aktuell in Entwicklung oder einem frühen Stand der kommerziellen Einführung sind. Sie bilden teilweise aktuelle bioökonomische Trends vor allem in der Ernährung ab, etwa der zunehmenden Substitution von Fleisch und anderen tierischen Produkten durch pflanzliche Alternativen. Diese wurden basierend auf Vorarbeiten des Auftragnehmers und Literaturrecherchen zusammengestellt.

4.3.2 Mechanische und physikalische Aufbereitung der Biomasse

Die mechanische und physikalische Aufbereitung von Biomasse (siehe Tabelle 2) umfasst alle traditionellen Behandlungsmöglichkeiten von Biomasse ohne den Einsatz chemischer, thermochemischer und biotechnologischer Konversion. Dazu gehören auch Trennverfahren wie Filtration, Destillation und Extraktion. Zusätzlich sind die mechanische Fragmentierung und Kristallisation (inkl. Gefrieren) in diesen Technologien enthalten.

Die meisten der mechanischen Verfahren werden bei der Vorbehandlung von Biomasse eingesetzt, um sie für weitere technologische Schritte verfügbar zu machen (Upstream) oder bei der Trennung von Produkten nach einem chemischen oder biotechnologischen Produktionsteil (Downstream). Vor allem im Forstbereich und der Holzverarbeitenden Industrie sind darüber hinaus konventionelle mechanische Technologien wie Sägen, Zerspanen, Schälen, Pressen, Verleimen etc. etabliert.

Tabelle 2: Mechanische und physikalische Aufbereitung von Biomasse (nova-Institut 2024)

Prozess / Technologie	Beschreibung	Produkte
Trocknung	Wasserentzug durch Erhitzung	Trockenbiomasse enthält im ggs. zu Frischbiomasse kein Wasser.
Zerkleinerung	Schneiden, Mahlen und andere mechanische Verfahren	Mehle, Späne, u.a.
Pelletierung, Brikettierung	Pressung von Mehlen, Spänen und anderen kleinen Partikeln zu Pellets oder Briketts	Pellets oder Briketts
Extraktion	Destillation, Zentrifugierung, etc. zur Gewinnung spezifischer Moleküle	Spezifische Moleküle, Ätherische Öle, Proteine u.a.
Pressung	Verfahren, mit dem durch Druck bestimmte Anteile aus der Biomasse separiert werden	Öle

4.3.3 Chemische und thermochemische Verarbeitung von Biomasse

Die chemische Verarbeitung von Biomasse umfasst vor allem den Einsatz konventioneller chemischer Reaktionssysteme mit Hilfe von Katalysatoren zur Umwandlung von Biomasse in verschiedene Produkte wie z. B. Basischemikalien, Gase, Polymere oder synthetische Kraftstoffe. Typische chemische Prozesse nutzen neben den Ausgangsstoffen auch Hilfschemikalien zusammen mit Katalysatoren für die Umwandlungsprozesse, dies kann durch hohe Temperaturen und Druck unterstützt werden. Die spezifischen thermochemischen Prozesse nutzen hohe Temperaturen als Energiequelle für die Umwandlungsprozesse. Die elektrochemische Konversion ist eine spezielle chemische Umwandlung, die elektrische Energie zur Reduktion biogener Ressourcen nutzt.

Tabelle 3 gibt einen Überblick über verschiedene chemische Umsetzungen, die für Biomasse genutzt werden können. Viele der Technologien sind vor allem auch im Bereich der Petrochemie etabliert und können auch für andere alternative Rohstoffe genutzt bzw. angepasst werden. Da die Technologien zu größeren Gruppen zusammengefasst werden, kann die angegebene technologische Reife (TRL) eine größere Spannweite umfassen und ist nicht immer genau auf eine Zahl festzulegen.

Thermochemische Nutzungsverfahren umfassen die Prozesse, bei denen Wärmeenergie zur Umwandlung von Biomasse in verschiedene Produkte wie z. B. Basischemikalien, Gase, Polymere oder synthetische Kraftstoffe genutzt wird. Die Umwandlung kann durch den Einsatz von Katalysatoren sowie durch Druck unterstützt werden. Vor allem für Rest- und Abfallstoffe aus der landwirtschaftlichen Produktion sowie aus der Lebensmittelindustrie, für gemischte Reststoffströme wie etwa gemischten Bioabfall, Haushaltsabfälle mit biogenen Anteilen sowie auch für gemischte Kunststoffabfälle mit biogenen Anteilen gelten thermochemische Verfahren als Option zur Nutzung bisher wenig oder gar nicht genutzter Rohstoffe. In Tabelle 4 sind typische thermochemische Verfahren dargestellt. Bei der Pyrolyse gibt es zudem weitere Optionen, die zu unterschiedlichen Produkten führen können. Sie unterscheiden sich in den Temperaturen, die eingesetzt werden, sowie durch die Anwesenheit und Nutzung von Katalysatoren und / oder Wasserstoff.

4.3.4 Biotechnologische Verarbeitung von Biomasse

Als Biotechnologie werden grundsätzlich alle Technologien betrachtet, bei denen lebende Organismen oder deren Produkte und Bestandteile (v. a. Enzyme oder Einzelzellen) durch den Menschen genutzt werden. Im weitesten Sinne würde dies auch die traditionelle Nutztierhaltung und die Landwirtschaft beinhalten, die hier jedoch nicht eingeschlossen werden. Modernere Formen der Biotechnologie, die auch heute noch optimiert werden, haben jedoch historisch ebenfalls eine lange Tradition, etwa in der Herstellung von Lebensmitteln (Brot, Käse, Bier und Wein) oder im Bereich der Pharmazie und Medizin. Die alkoholische Gärung zur Herstellung von Ethanol, die anaerobe Gärung zur Herstellung von Biogas und Biomethan oder auch die Milchsäuregärung für die Herstellung von Milchsäure und darauf aufbauende bio-basierte Kunststoffe (Polymilchsäure, PLA) sind bis heute wichtige und auch moderne Produktionsverfahren zur Nutzung von Biomasse und Restströmen. Diese als Fermentation zusammengefassten Technologien bilden eine Grundlage der modernen industriellen Biotechnologie.

In der Folge fokussiert sich die Darstellung auf die verschiedenen für die Biomasseumwandlung genutzten Technologien und behandelt diese primär im Überblick in verschiedenen Technologiegruppen. Im Kontext der biotechnologischen Verarbeitung von Biomasse stehen vor allem die Nutzung von verschiedenen Typen von Biokatalysatoren im Fokus. Dabei handelt es sich entweder um lebende Organismen, in der Regel Mikroorganismen wie Pilze, Bakterien, Cyanobakterien oder Archaea, oder um spezifische Enzyme. Diese werden genutzt, um die vorhandene Biomasse in unterschiedliche Produkte zu konvertieren, etwa in Gase (Wasserstoff, Methan), Basischemikalien (z. B. Ethanol, Ethylen, Butanol) und auch Polymere wie Polyethylen, Polymilchsäure (PLA) oder Polyhydroxyalkanoate (PHA).

Tabelle 5 gibt einen Überblick über grundsätzliche Typen der biotechnologischen Umsetzung von Biomasse und biogenen Reststoffen durch verschiedene Organismen.

Biotechnologische Prozesse sind in der Regel dadurch gekennzeichnet, dass die Rohstoffe zu einem hohen Grad zu definierten Zielprodukten umgebaut werden (hohe Selektivität), vergleichsweise hohe Umsetzungsraten bzw. Wirkungsgrade haben und durch stabile Prozesse die Reproduzierbarkeit der Prozesse zum technischen/kommerziellen Einsatz gewährleistet sind. Umwelt- und humantoxische Chemikalien werden bei der biotechnologischen Produktion nicht eingesetzt, können aber im Nachgang bei der Weiterverarbeitung der Produkte zum Einsatz kommen. Biomasserohstoffe sind dabei generell aufgrund ihrer Zusammensetzung mit einem hohen Anteil an für die Umsetzungsorganismen nutzbaren Kohlenhydraten wie Zuckern und Cellulose sowie Fetten und Ölen für biotechnologische Umsetzungen prinzipiell gut geeignet, es können jedoch auch biogene Gase, Abwässer oder Nebenprodukte wie Glycerin aus der Biodieselproduktion eingesetzt werden.

4.3.5 Bioraffinerien und Kombination von Biomasseverwertungstechnologien

Technisch können verschiedene Prozesse und Technologien zur Biomasseumwandlung und -verwertung kombiniert werden und so zur Nutzung von verschiedenen Rohstoffen verfügbar gemacht werden. Ein klassisches Beispiel hierfür ist die vorgeschaltete Extraktion von nutzbaren Biomolekülen oder auch anorganischen Anteilen aus einem Reststoffstrom vor einem Fermentationsprozess sowie die Nutzung der nach einer Fermentation verbleibenden Vinasse für die Biogas- und Düngerproduktion.

Auch Konzepte für Technologiekaskaden mit einer Kombination von biotechnologischen Prozessen und chemisch-technischen Ansätzen befinden sich in der Forschung, Entwicklung und teilweise auch bereits in der Anwendung. Ein Beispiel wäre hierfür die Nutzung von biotechnologisch hergestelltem Ethanol, das nachfolgend zur Herstellung von Kunststoffen (Polyethylen (PE), Polypropylen (PP)) polymerisiert wird. Vor allem dieser kombinierte Einsatz verschiedener Technologien ermöglicht es, Bioraffinerien zur Nutzung von Biomasse und zugleich von biogenen Restströmen zu konzipieren. Zudem können hierbei erneut anfallende Nebenströme jeweils durch weitere Technologien verwendet werden (Kaskaden- und Koppelnutzung) (BMELV 2012; KAMM et al. 2011).

Bei der Fermentation von gasförmigen Rohstoffen werden etwa optimierte Fermentationssysteme eingesetzt, etwa eine Fermentation unter Druck (Druckfermentation) (VAN HECKE et al. 2019) oder die Nutzung von elektrischem Strom (Elektrofermentation) (SCHIEVANO et al. 2016)

als Energiequelle. Hinzu kommt die Flexibilität in der Wahl der für die Fermentation genutzten Organismen, die teilweise mit Hilfe gentechnischer Methoden oder über Mutationsselektion und andere Verfahren für die Nutzung verschiedener Rohstoffe und zur Herstellung verschiedener Produkte im Rahmen der gelten Gesetze wie in Deutschland das Gentechnikgesetz (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ 2021) optimiert werden können. Ebenfalls nutzbar sind Mischkulturen verschiedener Produktionsorganismen oder der gezielte Einsatz von Enzymen für die schrittweise Umsetzung der Rohstoffe (Enzymtechnologien).

Eine weitere wichtige Option ist die Integration von Biomasseumsetzungstechnologien in bestehende Produktionsverfahren, etwa in bestehende Raffinerieanlagen, die es auch im Rheinischen Revier bereits gibt.

Tabelle 3: Chemische Verarbeitung von Biomasse (nova-Institut 2024)

Prozess / Technologie	Biomasse / Ausgangsmaterial	Beschreibung	TRL	Produkte
Pulping / Zellstoffherstellung	Zellstoffreiche Biomasse, hauptsächlich Holz, auch Stroh, Grasschnitt (CREAPAPER 2023), Bambus, Bagasse	Pulping ist die chemische Zersetzung von pflanzlichem Material (Lignocellulose) zu Cellulosefasern für Papier und Zellstoff (HOLIK AND TSCHUDIN 2011; PATT et al. 2011).	kommerziell; etablierter Prozess	Chemiezellstoff, Papierzellstoff, Schwarzlauge, Lignin, Lignosulfonate und weitere Produkte, u. a. Vanillin
Oxidation, Reduktion	Biomoleküle (u. a. Zucker, Lignin, Pflanzenöle)	Umwandlung von Biomolekülen durch chemische Oxidations- oder Reduktionsprozesse, insbesondere Zucker oder Lignin (Alkohol → Aldehyd → organische Säuren) (TOKAY 2011).	6-9 (abhängig von der eingesetzten Biomasse und den Zielprodukten)	Chemikalien (Aldehyde, organische Säuren)
Hydrierung, Hydrolyse, Umesterung, Verseifung, u. a.	Biomoleküle (u. a. Zucker, Lignin, Pflanzenöle)	Umwandlung von Biomasse durch verschiedene chemisch-technische Prozesse, die im Bereich der Petrochemie weitgehend für fossile Rohstoffe etabliert sind (TOKAY 2011).	Kommerziell u. a. für Fette und Pflanzenöle	Bio-Naphtha, Chemikalien, Seifen, Polymere, synthetische Treibstoffe
Polymerisation	Biomoleküle (u. a. Zucker, Lignin, Pflanzenöle)	Polymerisation von biogenen Bausteinen zu biobasierten Oligomeren, Polymeren und Copolymeren (IFBB 2023; MITTAL 2012; SKOCZINSKI et al. 2023).	6-9, auch kommerziell (abhängig von den Zielprodukten)	Chemikalien, Polymere, Fasern, Plastik
Elektrochemie	Biomoleküle (u.a. Zucker, Lignin, Pflanzenöle)	Reduktion mit Hilfe von elektrischem Strom zu Zwischen- oder Endprodukten (BIDDINGER et al. 2021; CARNEIRO AND NIKOLLA 2019; PRABHU et al. 2020).	4	Chemikalien, Synthetische Treibstoffe

Tabelle 4: Thermochemische Verarbeitung von Biomasse (nova-Institut, 2024)

Prozess / Technologie	Biomasse / Ausgangsmaterial	Beschreibung	TRL	Produkte
Pyrolyse	Biomasse, auch gemischte Fraktionen, biogene Abfälle, Mischabfälle mit Kunststoffanteilen	In Abwesenheit von Sauerstoff werden die Kohlenwasserstoffe thermochemisch in Kohlenwasserstoffe und Gase mit niedrigerem Molekulargewicht umgewandelt (JHA et al. 2022; UBANDO et al. 2021; VAKALIS et al. 2017).	7	Kohle, Pyrolyseöl, Chemikalien, synthetische Kraftstoffe (Gas, Öl)
Biomassevergasung	Biomasse, auch gemischte Fraktionen, biogene Abfälle, Mischabfälle mit Kunststoffanteilen	Biomasse wird zur Erzeugung von Synthesegas in ein Gas umgewandelt.	9	Chemikalien, Naphtha, Energiespeicher, Polymere, synthetische Kraftstoffe
Verbrennung	Biomasse, auch gemischte Fraktionen, biogene Abfälle, Mischabfälle mit Kunststoffanteilen	Verbrennung von Kohlenwasserstoffen und Erzeugung von Energie in Form von Wärme.	kommerziell	Energie (thermische oder elektrische), Asche und CO ₂ , Feststoffe (z.B. Metalle)

Tabelle 5: Biotechnologische Verarbeitung von Biomasse (nova-Institut 2024)

Prozess / Technologie	Biomasse / Ausgangsmaterial	Beschreibung	TRL	Produkte
Anaerobe Fermentation, Biogasproduktion	Energiepflanzen (Ganzpflanzensubstrat), biogene Abfälle, Reststoffströme	Biomasse wird über anaerobe Gärung zu Gasen, vor allem Biogas und CO ₂ konvertiert. Die Technologie ist etabliert und wird sowohl für Anbaubiomasse (Mais und andere stärkehaltige Pflanzen) wie auch für biogene Reststoffe genutzt.	kommerziell	Biogas, Biomethan (nach Aufreinigung), CO ₂ , Synthesegas (nach Reformierung), Wasserstoff, Gärreste
Zuckerfermentation	Zucker, zuckerhaltige Fraktionen wie Melasse und Dicksaft, Stärkehydrolysate, tlw. auch Glycerin	Konversion von zucker- und stärkehaltiger Biomasse und biogenen Reststoffströmen zu verschiedenen Chemikalien mit Hilfe von Bakterien und Pilzen (Hefen) (DOELLE et al. 2009; TOKAY 2011). Präzisionsfermentation z. B. für Milchproteine und Eiersatz (LOHMANN & GRAF 2024; STARZ 2023).	kommerziell 4-9*	Chemikalien und Biokraftstoffe, u.a. Ethanol, Butanol, Aceton, Milchsäure, Bernsteinsäure, Proteine (Einzelzellproteine, Präzisionsfermentation), Aminosäuren und andere Feinchemikalien
Gasfermentation	Kohlenstoff-haltige Gase (biogene Gase wie Methan, CO ₂ , CO)	Konversion von CO- und CO ₂ -reichen (biogenen) Abgasen zu verschiedenen Chemikalien mit Hilfe von acetogenen Bakterien und anderen Mikroorganismen. (BACHLEITNER et al. 2023; RUIZ et al. 2023)	6-9*	Chemikalien und Biokraftstoffe, u.a. Ethanol, Butanol, Aceton, Milchsäure, Bernsteinsäure, Proteine (Einzelzellproteine)
Enzymtechnologien	Biomoleküle (u. a. Zucker, Lignin, Pflanzenöle)	Nutzung von Enzymen zur zielgerichteten Konversion von Biomasse und anderen Ausgangsstoffen, in der Regel von spezifischen Molekülen	6-9*	Chemikalien, häufig Spezialchemie und Pharmazeutika
Insektenbiotechnologie	biogene Abfälle, Reststoffströme	Nutzung von Insekten (und teilweise anderen Tieren) zur Konversion von Biomasse und vor allem biogenen Reststoffen.	6-9*	Insektenbiomasse – diese enthält Polymere (Chitin, Chitosan), Proteine und Fette (für Tierfutter und Nahrungsergänzung), spezifische Biomoleküle. Substrate (z. B. für Düngemittel)
Stammzellen	Biomoleküle (u.a. Zucker, Aminosäuren)	Konversion von Zucker und Aminosäuren aus Biomasse zur Herstellung höherwertiger Biomasse und zur Produktion von Proteinen, Chemikalien.	4	Künstliches Fleisch, Proteine, künstliche Gewebe im Medizinbereich Feinchemikalien, Pharmazeutika

*abhängig von den Zielprodukten

4.4 Einordnung der Nutzungsverfahren

Im Folgenden werden Technologien zur Nutzung und Umwandlung von Biomasse aus der Land- und Ernährungswirtschaft hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit und Relevanz für das Rheinische Revier bewertet. Im Anschluss erfolgt die Darstellung ausgewählter Technologien in Form von Steckbriefen.

4.4.1 Bewertung der Relevanz für das Rheinische Revier

Um die Relevanz einzelner Nutzungsverfahren für das Rheinische Revier bewerten zu können, wurden aufbauend auf Literaturrecherchen und Ergebnissen der projektbegleitenden Workshops spezifische Bedingungen und Besonderheiten dieser Region herausgearbeitet. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die Relevanz einer Technologie auch immer in den jeweiligen Kontext zu setzen ist; jede Technologie hat Vor- und Nachteile und ihre Anwendbarkeit hängt von vielen Faktoren ab. Zudem wurde in den Workshops betont, dass Technologieoffenheit für die Entwicklung einer Modellregion Bioökonomie im Rheinischen Revier von zentraler Bedeutung sei. Dennoch können speziell für das Rheinische Revier einige Relevanzen für Nutzungsverfahren abgeleitet werden:

Herstellung hochwertiger Produkte

Die Produktion von Biomasse ist im Rheinischen Revier sehr kostenintensiv, was insbesondere durch hohe Pachtpreise für landwirtschaftliche Flächen bedingt ist. Im bundesweiten Durchschnitt lagen die Pachtpreise für Ackerland im Jahr 2023 bei 407 €/ha². In NRW lagen sie bei 659 €/ha, im Regierungsbezirk Düsseldorf bei 720 und im Regierungsbezirk Köln bei 541 €/ha (IT.NRW 2024a).

Daraus lässt sich ableiten, dass eine Technologie dann als relevant für das Rheinische Revier bewertet werden kann, wenn mit ihr hochpreisige Produkte und Materialien hergestellt werden, die als Ergänzung zur bisherigen Produktion und als wirtschaftlich attraktiv verstanden werden. Für die Bewertung wurden die Preise der Zielprodukte zugrunde gelegt³.

Anknüpfung an bestehende Industrien

Als weiteres Kriterium für die Relevanz von Nutzungsverfahren wurde die Möglichkeit zur Anknüpfung an bereits bestehende Industrien im Rheinischen Revier und angrenzenden Regionen definiert. Dazu zählen vor allem die Energie-, Zucker-, Zellstoff- und Papier- sowie Chemieindustrie. Es gibt im und angrenzend an das Rheinische Revier (Regierungsbezirke Köln und Düsseldorf) eine starke Chemieindustrie mit mehr als 260 Unternehmen und 70.000 Beschäftigten (CHEMCOLOGNE 2024). Viele Unternehmen suchen momentan nach Alternativen für ihre Rohstoffversorgung; oft ist dies motiviert durch die Suche nach klimafreundlicherer / nachhaltigerer Produktion oder aufgrund der langfristigen Verknappung von fossilen Rohstof-

² <https://www.praxis-agrar.de/service/infografiken/pachtpreise>

³ fastmarkets.com, chemanalyst.com, pro-curementresource.com, sciencedirect.com, ifpenergiesnouvelles.com, spglobal.com, farmersjournal.ie, intratec.us, neste.com

fen und einer gewünschten Diversifizierung des Rohstoffportfolios (u. a. VCI 2023). Die Bewertung erfolgt anhand der im Rheinischen Revier vorhandenen Unternehmen, die zu der jeweiligen oder zu einer ähnlichen Technologie arbeiten (RASCHKA 2020, NOVA-INSTITUT 2020).

Wissen und Know-how in der Region

Die Relevanz von Technologien ergibt sich auch aus der Intensität von bekannten Forschungsaktivitäten abgeschätzt durch Expertinnen und Experten des nova-Instituts.

Im Rheinischen Revier gibt es zahlreiche Wissenszentren und Universitäten, die mit verschiedenen Instituten mit Bioökonomiebezug und enger Bindung an Industrieunternehmen an innovativen Technologien arbeiten (ZUKUNFTSAGENTUR RHEINISCHES REVIER 2021). Durch die industrielle Nutzung der hier entwickelten Technologien innerhalb der Region oder durch die Verwertung des durch die Innovation entstandenen geistigen Eigentums, beispielsweise durch die Lizenzierung von Technologien, können wirtschaftliche sowie imagesteigernde Vorteile für diese Einrichtungen und auch für die Region entstehen, die die kompetitive Situation verbessern. In regionalen Vorzeigeprojekte (Flagships) kann die Machbarkeit von innovativen Technologien demonstriert werden, auch wenn sie später möglicherweise an anderen Orten eingesetzt werden. Aus Diskussionen und auch anhand von laufenden Forschungs- und Entwicklungsprojekten in der Region (z. B. BioökonomieREVIER, Bio4MatPro) ist ersichtlich, dass es einen hohen Forschungsbedarf und ein entsprechendes Angebot mit dem Fokus Bioökonomie im Rheinischen Revier gibt (ZUKUNFTSAGENTUR RHEINISCHES REVIER 2021).

Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier

Weiterhin wurde festgelegt, dass Nutzungsverfahren umso relevanter für das Rheinische Revier sind, je mehr ihr Biomassebedarf aus der Region gedeckt werden kann. Daher wurde für die Bewertung die jährliche Produktionsmenge (t TM) im Rheinischen Revier zugrunde gelegt.

4.4.2 Bewertung der Nachhaltigkeit von Nutzungsverfahren

Die Nachhaltigkeit der Nutzungsverfahren wurde in dieser Studie anhand der Umsetzungseffizienz sowie des benötigten Energieeinsatzes und der daraus resultierenden THG-Emissionen bewertet.

Umsetzungseffizienz

Die Umsetzungseffizienz wurde berechnet anhand der Biomasseeinsatzmenge pro Tonne (t) Endprodukt (IFFLAND et al. 2015, IFBB 2023, THRÄN et al. 2015).

Energieeinsatz und Treibhausgas (THG)-Emissionen

Die Bewertung des Energieeinsatzes wurde basierend auf der typischen Anzahl von Prozessschritten (von der Verarbeitung der Rohstoffe bis hin zum Endprodukt) vorgenommen und insbesondere energieintensive Schritte mit hohem Temperatur- oder Druckaufwand (z. B. Trocknen, Pumpen, Erhitzen) berücksichtigt. Diese Methode wurde gewählt, da eine Betrachtung unabhängig von einer konkreten Wertschöpfungskette recht allgemein gehalten werden muss und keine spezifischen Einheiten (z. B. kWh oder MWh) angegeben werden können (NOVA-INSTITUT 2024). Die Bewertungskriterien Energieeinsatz und THG-Emissionen werden in dieser Studie zusammengefasst, da diese Kennzahlen in ökobilanziellen Studien zur Bioökono-

mie stark korrelieren (vgl. HUIJBREGTS et al. 2006 sowie BROEREN et al. 2017). Die THG-Emissionen der Elektrizitäts- und Wärmenutzung werden mittel- und langfristig durch den Ausbau erneuerbarer Energiesysteme sinken, trotzdem bleiben erneuerbare Energien absehbar eine begrenzte Ressource und die Energieversorgung wird weiterhin mit THG-Emissionen verbunden sein (NOVA-INSTITUT 2024).

4.4.3 Steckbriefe ausgewählter Nutzungsverfahren

Die in den Kapiteln 4.4.1 sowie 4.4.2 genannten Kriterien zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Technologien und deren Relevanz für das Rheinische Revier wurden auf ausgewählte Nutzungsverfahren angewendet. Diese werden im Folgenden in Form von Steckbriefen dargestellt und bewertet. Zusätzlich wird jede Technologie kurz beschrieben sowie Angaben zu den einsetzbaren Rohstoffen, zu den hergestellten Produkten und Nebenprodukten und zum TRL gemacht.

Die Auswahl der Nutzungsverfahren basiert auf den dargestellten chemischen und thermochemischen (Kap. 4.3.3) sowie den biotechnologischen Nutzungsverfahren (Kap. 4.3.4). Um eine Bewertung durchführen zu können, wurden aus den dargestellten Technologien teilweise Beispiele ausgewählt. Insgesamt wurden für 13 Technologien Steckbriefe erstellt (Übersicht siehe Tabelle 6). Nicht skizziert wurden Technologien, die eher im energetischen Bereich eine Rolle spielen. Die Auswahl und Bewertung der folgenden Technologien erfolgt auf der Basis von Expertenabschätzungen des nova-Instituts sowie verschiedener Literaturquellen (z. B. ETIP BIOENERGY 2024; IFBB 2023; IFFLAND et al. 2015; THRAÑ et al. 2015)

Die Bewertung erfolgt anhand einer fünfstufigen Kategorisierung. Dieser Weg wurde genutzt, um eine übersichtliche Darstellung zu ermöglichen, die für eine Betrachtung auf solch einer hoch aggregierten Ebene mit absoluten Zahlen nicht umsetzbar ist (NOVA-INSTITUT 2024). Durch die Einordnung in ein fünfstufiges System können die verschiedenen Technologien dagegen annäherungsweise verglichen werden. Tabelle 7 bietet einen Überblick über die Zuordnung der Kreise zu den verschiedenen Kriterien sowie die Begründungen.

Tabelle 6: Übersicht über die in den Steckbriefen dargestellten Technologien und Nutzungsverfahren

Prozess/Technologie	Beispielverfahren/ Steckbrief (Nr.)
Pulping / Zellstoffherstellung	Pulping / Papierzellstoffherstellung (1) Pulping / Herstellung von Chemiezellstoff & Zellstofffasern (2)
Oxidation / Reduktion	---
Hydrierung, Hydrolyse, Umesterung, Verseifung, u.a.	Chemisch-katalytische Verfahren – HVO / Bionaphtha (3) Oleochemie (4)
Polymerisation	Fermentation und Polymerisation – Milchsäure – Biokunststoffe (PLA) (5)
Elektrochemie	Elektrochemische Verfahren (6)
Pyrolyse	Thermochemische Verfahren – Pyrolyse (7)
Biomassevergasung	Thermochemische Verfahren – Biomassevergasung (8)
Verbrennung	---
Anaerobe Fermentation, Biogasproduktion	---
Zuckerfermentation	Fermentation – Ethanol (9) Fermentation und Polymerisation – Milchsäure – Biokunststoffe (PLA) (5) Fermentation – Polyhydroxyalkanoate (10) Präzisionsfermentation (Proteine) (11)
Gasfermentation	---
Enzymtechnologien	Enzymtechnologien (12)
Insektenbiotechnologie	Insektenbiotechnologie (13)
Stammzellen	---

Tabelle 7: Einteilung der Kriterien „Nachhaltigkeit“ und „Relevanz“ für die Bewertung der Nutzungsverfahren (nova-Institut 2024)

		Einteilung				
Kriterium	Einheit ¹					
Umsetzungseffizienz	Biomasseeinsatzmenge/t Endprodukt	0-20%	20-40%	40-60%	60-80%	>80%
Energieeffizienz, THG-Emissionen	Anzahl energieintensiver Prozessschritte (Abschätzung NOVA-INSTITUT 2024)	Energieintensiver Prozess, mehr als zwei Verarbeitungsschritte mit hoher Temperatur oder Druck etc.	hoher Energiebedarf, mindestens zwei Verarbeitungsschritte mit hoher Temperatur oder Druck etc.	moderater Energiebedarf, mindestens ein Verarbeitungsschritt mit hoher Temperatur oder Druck etc.	Verhältnismäßig geringer Energiebedarf, wenige Verarbeitungsschritte	Kein Einsatz von Energie notwendig
Biomasseverfügbarkeit	Jährliche Produktionsmenge im Rheinischen Revier (IT.NRW 2023)	<10.000 t TM	10.000–50.000 t TM	50.000 – 250.000 t TM	250.000 – 500.000 t TM	>500.000 t TM
Anknüpfung an bestehende Industrien	Anzahl Unternehmen im Rheinischen Revier (RASCHKA et al. 2020, NOVA-INSTITUT 2020)	Keine Unternehmen	Mindestens 1 KMU	2–10 KMU ²	>10 KMU oder 1 großes Unternehmen	>1 großes Unternehmen
Know-how in der Region	Intensität der bekannten Forschungsaktivitäten (NOVA-INSTITUT 2024).	Keine bis sehr geringe Forschungsaktivitäten	Wenige Forschungsaktivitäten	Moderate Forschungsaktivitäten	Starke Forschungsaktivitäten	Forschungsschwerpunkt
Hochwertige / hochpreisige Produkte	Preise der Zielprodukte	0–500 €/t	500–1.000 €/t	1.000–2.000 €/t	2.000–3.000 €/t	>3.000 €/t

¹ genauere Beschreibung sowie Quellenangaben siehe Kap. 4.4.1 sowie Kap. 4.4.2

² oder es gibt zwar eine große Firma, die nah am Thema dran ist, aber es sind noch Zwischenschritte zur bio-basierten Produktion notwendig (z. B. viel Wissen zu Zuckerfermentation bei Pfeifer & Langen, aber keine Ethanolproduktion)

1) Pulping / Papierzellstoffherstellung

Technologiebeschreibung:		
<p>Chemisch-technischer Prozess: Papierzellstoff wird über ein Zellstoffproduktionsverfahren (Pulping) aus cellulosereicher Biomasse gewonnen, indem die Lignin- und Hemicellulosebestandteile entfernt werden. Je nach Verfahren werden verschiedene Lösungsmittel für den Prozess genutzt: In den Kraft- oder Sulfatverfahren wird die Biomasse mit Natronlauge und Natriumsulfid (Kochlauge) behandelt, wodurch sich Lignin und Hemicellulosen von der Cellulose lösen und entfernt werden. Im Fall des Papierzellstoffs wird die verbleibende Cellulose mit etwa 2% Restlignin gebleicht und zu Papier verarbeitet.</p> <p>Im OrganoSolv-Verfahren können statt der Kochlauge organische Lösungsmittel wie Ameisensäure, Essigsäure, Ethanol zur Anwendung kommen.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe:</p> <p>Lignocellulosereiche Rohstoffe, vor allem Holz, Stroh, Gräser, etc.</p> <p>Zusätzlich kann Altpapier eingesetzt werden.</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte:</p> <p>Papierzellstoff → Papier</p> <p>Schwarzlauge (Reststofffraktion mit Lignin und Lauge; bei OrganoSolv-Prozessen kann Lignin als Produkt gewonnen werden)</p>		
<p>Technologische Reife:</p> <p>Kommerziell (in Anwendung)</p>		
Nachhaltigkeitsaspekte:		
Umsetzungseffizienz		Hohe Umsetzungseffizienz der Cellulose von 40% (Stroh) bis 50% (Holz); Biomasseumsetzungseffizienz (BUE) ⁴ ausgehend von Cellulose bei ca. 100% (IFFLAND et al. 2015)
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Hoher Energieaufwand im Pulping durch das Kochen (Erhitzen und Druck) und in den Aufbereitungs- und Trocknungsschritten, damit auch hohe THG-Emissionen
Relevanz für das Rheinische Revier:		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Stroh  ; Gräser 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		historisch gewachsene große Dichte an Papier- und Zellstofffabriken (Papiermühlen), u.a. in Mönchengladbach (Stora Enso), Düren, Hürth (UPM), Jülich, Zül-pich
Know-how in der Region		Know-how ist sowohl in den industriellen Anlagen vorhanden wie auch in den ansässigen Hochschulen, vor allem RWTH Aachen.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

⁴ Biomasseumsetzungseffizienz nach (IFFLAND et al. 2015)

2) Pulping / Herstellung von Chemiezellstoff & Zellstofffasern

<p>Technologiebeschreibung:</p> <p>Chemisch-technischer Prozess: Chemiezellstoff wird wie Papierzellstoff über eine Zellstoffproduktionsverfahren (Pulping) aus zellulosereicher Biomasse gewonnen, indem die Lignin- und Hemicellulosebestandteile entfernt werden. Für Chemiezellstoff wird die Cellulose weiter aufgereinigt und dann für spezifische Anwendungen (Herstellung bspw. von Celluloseethern, -estern wie Celluloseacetat und -regeneraten für die Herstellung von Viscose u.a.) chemisch modifiziert. Um hieraus Fasern herzustellen, wird aus dem Zellstoff mit wässriger Natronlauge eine Spinnlösung hergestellt, in der sich Alkalicellulose bildet. In den nächsten Schritten wird diese zerfasert, gereift und schließlich mit Schwefelkohlenstoff behandelt, um Xanthat zu erhalten. Nach einer Reinigung und einer Nachreife bildet sich eine Viskoselösung als fertige Spinnlösung, aus der die Fasern über Spinn Düsen in einem Schwefelsäurebad zu regenerierter Cellulose ausgefällt, gereinigt und schließlich verspinn werden.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe:</p> <p>Lignocellulosereiche Rohstoffe, vor allem Holz, Stroh und auch Gräser.</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte:</p> <p>Chemiezellstoff Regeneratfasern (Viscose)</p>		
<p>Technologische Reife:</p> <p>Kommerziell (in Anwendung)</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		BUE ausgehend von Cellulose bei ca. 100% (IFFLAND et al. 2015)
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Wie 1), zusätzlicher Energieaufwand in der Weiterverarbeitung
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Stroh  ; Gräser 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Historisch gewachsene Textilindustrie ist vorhanden, allerdings mit Schwerpunkt auf Weiterverarbeitung.
Know-how in der Region		Vor allem in Unternehmen Wissen über die Verarbeitung von Textilien – Viscose und andere Fasern werden jedoch im Rheinischen Revier aktuell nicht produziert. An der RWTH Aachen und anderen Hochschulen gibt es akademisches Know-How im Bereich der Textilien – auch zur Nutzung von Cellulosefasern, bspw. ITA an der RWTH Aachen.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

3) Chemisch-katalytische Verfahren – HVO / Bionaphtha

<p>Technologiebeschreibung: Chemisch-technischer Prozess: Pflanzenöle oder auch Reststoffe (Used Cooking Oils) werden katalytisch in einer Reaktion mit Wasserstoff (Hydrierung) zu Kohlenwasserstoffen umgesetzt und können danach in einem konventionellen Raffinerieprozess eingesetzt werden.</p>	
<p>Einsetzbare Rohstoffe: Pflanzenöle und öl-/fettreiche Rohstoffe, teilweise Reststoffe (Used Cooking Oils)</p>	
<p>Produkte und Nebenprodukte: HVO-Diesel Bionaphtha</p>	
<p>Technologische Reife: Kommerziell (in Anwendung)</p>	
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>	
Umsetzungseffizienz	 <p>Als Gruppe verschiedener Umsetzungstechnologien nicht direkt mit BUE bestimmbar; je nach konkretem Prozess und Zielprodukten können die Umsetzungseffizienzen sehr unterschiedlich sein.</p>
Energieeffizienz, Treibhausgasemission	 <p>Hoher Energieaufwand durch hohe Temperaturen und Drücke, damit auch hohe THG-Emissionen</p>
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>	
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Pflanzliche Öle  ; tierische Fette (Kat.3) 
Anknüpfung an bestehende Industrie	 <p>Vor allem relevant für die chemische Industrie bis Großindustrie, vor allem im Randbereich (Wesseling, Knapsack, Dormagen, Leverkusen).</p>
Know-how in der Region	 <p>Know-how in der chemischen Industrie und akademisch an der RWTH Aachen vorhanden.</p>
Hochwertige / hochpreisige Produkte	HVO-Diesel  ; Bionaphtha 

4) Oleochemie

Technologiebeschreibung: Die Oleochemie fasst zahlreiche Technologien zusammen, bei denen Pflanzenöle und auch tierische Fette über chemische Reaktionen verändert und genutzt werden. Hierzu gehören etwa die Verseifung mit Basen zu Metallsalzen, die Hydrierung zu Fettalkoholen, die Umesterung etwa zur Herstellung von Biodiesel oder die Hydrolyse zu Fettsäuren und Glycerin. Auf der Basis der Produkte aus diesen Reaktionen wird ein vielfältiges Spektrum an Endprodukten gewonnen.	
Einsetzbare Rohstoffe: Pflanzenöle und öl-/fettreiche Rohstoffe, teilweise Reststoffe (Used Cooking Oils, Schlachtabfälle)	
Produkte und Nebenprodukte: u.a. Seifen, Fettsäuren, Glycerin, Fettalkohole, Biodiesel	
Technologische Reife: Kommerziell (in Anwendung)	
Nachhaltigkeitsaspekte:	
Umsetzungseffizienz	 Umsetzungseffizienzen der eingesetzten Rohstoffe in der Oleochemie in der Regel sehr hoch
Energieeffizienz, Treibhausgasemission	 Relativ hoher Energieaufwand durch hohe Temperaturen und Drücke für oleochemische Prozesse, damit auch hohe THG-Emissionen
Relevanz für das Rheinische Revier:	
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Pflanzliche Öle  ; tierische Fette (Kat.3) 
Anknüpfung an bestehende Industrie	 Sowohl Ölmühlen wie auch Unternehmen der oleochemischen Industrie sind im Rheinischen Revier und Umland ansässig, u.a. Peter Greven GmbH & Co.KG und Schneider Chemie GmbH in Euskirchen sowie Henkel in Leverkusen.
Know-how in der Region	 Know-how zu oleochemischen Prozessen existiert sowohl in den Unternehmen der chemischen / oleochemischen Industrie wie auch in den Forschungsinstituten der Region.
Hochwertige / hochpreisige Produkte	Fettsäuren  ; Glycerin  ; Fettalkohole  ; Biodiesel 

5) Fermentation und Polymerisation – Milchsäure – Biokunststoffe (PLA)

<p>Technologiebeschreibung: Biotechnologischer Prozess, anschließende Polymerisation; zuckerhaltige Rohstoffe werden mit Hilfe von spezifischen Mikroorganismen (Bakterien) zu Biomasse und Milchsäure umgewandelt (fermentiert). Für die Umsetzung wird Wasser benötigt, in dem die Organismen leben und die Rohstoffe als Substrat gelöst werden. Aus der entstehenden Fermentationsbrühe wird die entstehende Milchsäure gewonnen (Destillation), die dann über einen mehrstufigen chemischen Prozess zu Poly-Milchsäure (PLA) verkettet wird.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe: In der Regel Zucker (Saccharose) bzw. hydrolysierte Stärke (Glucose) oder zuckerhaltige Substrate (Zuckerdicksaft, Melasse). Alternative Substrate können Cellulosehydrolysate aus cellulosereicher Biomasse (Gras, Stroh) sein.</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte: Milchsäure und Derivate (Bakterien-)Biomasse und Vinasse Polymilchsäure</p>		
<p>Technologische Reife: Kommerziell (in Anwendung)</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		BUE für Milchsäure aus Zucker oder Glucose bei >90% , für PLA bei ~80% (IFFLAND et al. 2015)
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Fermentationsprozess bei geringer Hitze und Druck, Energieaufwand im Downstream hoch (Destillation)
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Zucker & Stärke  ; Melasse  ; Stroh  ; Gräser 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Mit Pfeifer & Langen eine starke Zuckerindustrie, Landwirtschaft ist auf Zuckerrüben ausgerichtet; bislang gibt es keine Milchsäure-/ PLA-Anlage im Rheinischen Revier und es sind auch keine geplant.
Know-how in der Region		Know-how zu Fermentationsprozessen ist sowohl bei Pfeifer & Langen wie auch im akademischen Umfeld vorhanden. Es gibt keinen Forschungsschwerpunkt im Bereich PLA.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

6) Elektrochemische Verfahren

<p>Technologiebeschreibung: Die Elektrochemie fasst mehrere Technologien zusammen, bei denen u.a. Biomasse mit Hilfe von elektrischer Energie in chemischen Reaktionen verändert und genutzt wird. Zu den bekanntesten elektrochemischen Prozessen gehört die Elektrolyse von Wasser, daneben gibt es zahlreiche weitere Redoxreaktionen zur Umsetzung von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen wie Biomasse.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe: Verschiedene Biomoleküle, u.a. biogene Gase, Zucker</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte: Zielprodukte abhängig vom spezifischen Einsatz</p>		
<p>Technologische Reife: 6-9 (je nach Anwendungsbereich)</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		Umsetzungseffizienzen von elektrochemischen Prozessen werden in der Regel als vergleichsweise hoch eingeschätzt. Biomasse wird dabei gezielt reduziert.
Energieeffizienz, Treibhausgasemission	 	Effizienter Einsatz von Elektrizität zur Biomassekonversion, damit effizienter als klassische chemisch-katalytische Umsetzung. Durch den Einsatz erneuerbarer Energie kann die THG-Emission bei der Stromproduktion gesenkt werden.
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Zucker & Stärke 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Elektrochemische Verfahren zur Umsetzung von Biomasse befinden sich noch in der Entwicklung und sind bislang nicht umgesetzt. Unternehmen der chemischen Industrie wie auch Start-ups arbeiten jedoch an den Technologien.
Know-how in der Region		Know-how zu elektrochemischen Prozessen ist vor allem in den Forschungsinstituten teilweise vorhanden, allerdings nicht als Forschungsschwerpunkt.
Hochwertige / hochpreisige Produkte	 	für Basis- und Grundchemikalien, für Spezialanwendungen und Feinchemie

7) Thermochemische Verfahren – Pyrolyse

<p>Technologiebeschreibung: Thermochemischer Prozess: Organische Verbindungen werden bei hohen Temperaturen bis etwa 700 °C und unter Ausschluss von Sauerstoff aufgespalten, eine Verbrennung wird dabei verhindert. Über die Pyrolyse können je nach Prozessbedingungen feste Produkte (Holzkohle, Biokohle) oder flüssige Produkte (Pyrolyseöl) entstehen.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe: Grundsätzlich alle Biomassetypen, auch gemischte Neben- und Abfallströme</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte: Biokohle Pyrolyseöl (Ölgemisch)</p>		
<p>Technologische Reife: Kommerziell (in Anwendung)</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		Umsetzung abhängig vom Typ der Biomasse zu Bioöl ca. 50 bis 70%. (CARPENTER et al. 2014; KAN et al. 2020; WANG et al. 2020), zu Folgeprodukten entsprechend geringer.
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Hoher Energieaufwand durch hohe Temperaturen und Drücke zur Pyrolyse, damit auch hohe THG-Emissionen
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Landwirtschaftliche Biomasse  ; Biogene Reststoffe Ernährungswirtschaft 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Derzeit keine Anbindung; vor allem relevant für die chemische Industrie bis Großindustrie, vor allem im Randbereich (Wesseling, Knapsack, Dormagen, Leverkusen).
Know-how in der Region		Kein aktueller Forschungsschwerpunkt im Bereich Biomasse, akut von Interesse vor allem beim Recycling von Plastikabfällen.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

8) Thermochemische Verfahren – Biomassevergasung

<p>Technologiebeschreibung:</p> <p>Thermochemischer Prozess: Organische Verbindungen werden bei sehr hohen Temperaturen und unter Ausschluss von Sauerstoff aufgespalten, eine Verbrennung wird dabei verhindert. Dabei entsteht ein Gasgemisch aus CO, CO₂ und Wasserstoff (Synthesegas).</p> <p>Das entstehende Gas kann energetisch genutzt werden oder über eine Fischer-Tropsch-Synthese zur Herstellung von Flugtreibstoffen (Sustainable Aviation Fuels, SAF) und Basischemikalien genutzt werden.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe:</p> <p>Grundsätzlich alle Biomassetypen, auch gemischte Neben- und Abfallströme</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte:</p> <p>Synthesegas (CO, H₂ und CO₂)</p>		
<p>Technologische Reife:</p> <p>Kommerziell (in Anwendung)</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		Umsetzung von Biomasse zu Synthesegasen ist im Vergleich zur Pyrolyse geringer, dabei stark abhängig von der Zusammensetzung der Biomasse und der konkreten Vergasungstechnologie.
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Hoher Energieaufwand durch hohe Temperaturen und Drücke zur Biomassevergasung, damit auch hohe THG-Emissionen
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	<p>Landwirtschaftliche Biomasse  ;</p> <p>Biogene Reststoffe Ernährungswirtschaft </p>	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Derzeit keine Anbindung; vor allem relevant für die chemische Industrie bis Großindustrie, vor allem im Randbereich (Wesseling, Knapsack, Dormagen, Leverkusen).
Know-how in der Region		Kein aktueller Forschungsschwerpunkt im Bereich Biomasse, aktuell von Interesse vor allem beim Recycling von Plastikabfällen und gemischten Abfällen.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

9) Fermentation – Ethanol

<p>Technologiebeschreibung: Biotechnologischer Prozess durch Fermentation von zuckerhaltigen Substraten zu Bioethanol. Eingesetzt werden Mikroorganismen (Pilze oder Bakterien), die die kohlenstoffhaltigen Rohstoffe zu Biomasse und Bioethanol umsetzen. Für die Umsetzung wird Wasser benötigt, in dem die Organismen leben und die Rohstoffe als Substrat gelöst werden.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe: In der Regel Zucker (Saccharose) bzw. hydrolysierte Stärke (Glucose) oder zuckerhaltige Substrate (Zuckerdicksaft, Melasse). Alternative Substrate können Cellulosehydrolysate aus cellulosereicher Biomasse (Gras, Stroh) oder andere kohlenstoffhaltige Substrate wie Glycerin (Nebenprodukt aus der Biodieselproduktion) oder Synthesegase (Gasfermentation) sein.</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte: Ethanol Biomasse und Vinasse CO₂ (kann als biogenes CO₂ abgeschieden werden)</p>		
<p>Technologische Reife: Kommerziell (in Anwendung)</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		BUE bei ca. 50% (IFFLAND et al. 2015)
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Fermentationsprozess bei geringer Hitze und Druck, Energieaufwand im Downstream hoch (Destillation)
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Zucker & Stärke  ; Melasse  ; Stroh  ; Gräser 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Mit Pfeifer & Langen eine starke Zuckerindustrie, Landwirtschaft ist auf Zuckerrüben ausgerichtet; bislang gibt es keine Bioethanolanlagen im Rheinischen Revier und es sind auch keine geplant.
Know-how in der Region		Know-how zu Fermentationsprozessen ist sowohl bei Pfeifer & Langen wie auch im akademischen Umfeld (RWTH Aachen, DWI) vorhanden.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

10) Fermentation – Polyhydroxyalkanoate

<p>Technologiebeschreibung: Biotechnologischer Prozess mit intrazellulärer Polymerisation; zuckerhaltige Substrate werden mit spezifischen Mikroorganismen (Bakterien) zu Biomasse umgewandelt. Die Bakterien produzieren dabei in ihren Zellen Polyhydroxyalkanoate (PHAs) als Speichermoleküle. Nach einer Filtration der Fermentationsbrühe werden die Zellen mit spezifischen Lösungsmittel, etwa Hexan, aufgebrochen und die Biopolymere werden extrahiert. Die gewonnenen Polymere sind Thermoplaste und können entsprechend verarbeitet werden.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe: In der Regel Zucker (Saccharose) bzw. hydrolysierte Stärke (Glucose) oder zuckerhaltige Substrate (Zuckerdicksaft, Melasse). Alternative Substrate können Cellulosehydrolysate aus cellulosereicher Biomasse (Gras, Stroh) sein. Auch kohlenstoffreiche Gase (Methan, Syngas), Glycerin und andere Substrate können verwendet werden.</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte: Polyhydroxyalkanoate Biomasse und Vinasse</p>		
<p>Technologische Reife: Kommerziell (in Anwendung) Technische Umsetzungen tlw. noch in der Entwicklung</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		BUE bei ca. 40% (IFFLAND et al. 2015)
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Fermentationsprozess bei geringer Hitze und Druck, Energieaufwand im Downstream hoch (Destillation)
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Zucker & Stärke  ; Melasse  ; Stroh  ; Gräser 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Mit Pfeifer & Langen eine starke Zuckerindustrie, Landwirtschaft ist auf Zuckerrüben ausgerichtet; bislang gibt es keine PHA-Anlage im Rheinischen Revier und es sind auch keine geplant.
Know-how in der Region		Know-how zu Fermentationsprozessen ist sowohl bei Pfeifer & Langen wie auch im akademischen Umfeld vorhanden. Es gibt keinen Forschungsschwerpunkt im Bereich PHA.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

11) Präzisionsfermentation (Proteine)

<p>Technologiebeschreibung:</p> <p>Biotechnologischer Prozess: Zuckerhaltige Substrate werden mit spezifischen Mikroorganismen (Cyanobakterien, Bakterien, Pilze) zu Biomasse umgewandelt. Diese Biomasse kann durch Filtration geerntet und getrocknet werden. Die Zellen können vollständig genutzt werden (Einzelzellproteine / Single Cell Proteins als Futtermittel) oder die gewünschten Inhaltsstoffe können extrahiert werden. Je nach eingesetzten Organismen können Proteine oder auch Fettsäuren in unterschiedlicher Zusammensetzung enthalten sein; auf diese Weise können sie unter anderem für künstliche Milch, Eier oder Gelatine sowie für technische Anwendungen genutzt werden.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe:</p> <p>Zucker (Saccharose) bzw. hydrolysierte Stärke (Glucose) oder zuckerhaltige Substrate (Zuckerdicksaft, Melasse). Alternative Substrate können Cellulosehydrolysate aus Biomasse (Gras, Stroh) sein. Auch kohlenstoffreiche Gase (Methan, Syngas), Glycerin können verwendet werden.</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte:</p> <p>Biomasse (Single Cell Proteins) Vinasse</p>		
<p>Technologische Reife:</p> <p>4-9 (je nach Anwendung) Für Einzelzellproteine teilweise in Umsetzung</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		Als Proteine nicht beim BUE erfasst. IdR geht man bei der Biomasseproduktion (single cells) von einer hohen Effizienz aus. Wie die Effizienz nach der Aufreinigung bzw. Extraktion von spezifischen Molekülen aussieht, ist unklar (niedriges TRL)
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Meist kleinvolumige Anwendungen, im Vergleich zu chemisch-technischen Prozessen geringer Energiebedarf. Als Fermentationsprozess geringe Temperaturen + Drücke, Downstream produktabhängig
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	<p>Zucker & Stärke  ; Melasse  ; Stroh  ; Gräser </p>	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Bisher kaum bzw. keine Aktivitäten im Rheinischen Revier, Umsetzung möglich und andockbar an Lebensmittelindustrie (Proteine) und Oleochemie / Feinchemie (v.a. Fette) + Biotechbereiche
Know-how in der Region		Starkes Know-how vor allem im Bereich der Universitäten, DWI sowie bei CLIB und Biotech-Unternehmen.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

12) Enzymtechnologien

<p>Technologiebeschreibung: Biotechnologischer Prozess: Mit Hilfe von Enzymen als Biokatalysatoren werden spezifische Reaktionen an Rohstoffen oder anderen Chemikalien ausgelöst. Dies kann sowohl in wässriger Lösung wie auch in anderen Prozessumgebungen, etwa an der Oberfläche von Polymermatten, geschehen. Ergebnis sind spezifische Moleküle vor allem für die Feinchemie und Pharmazie.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe: Verschiedene Biomoleküle, u.a. Zucker</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte: Zielprodukte abhängig vom spezifischen Einsatz</p>		
<p>Technologische Reife: 6-9 (je nach Anwendungsbereich) In einigen Bereichen auch kommerziell, etwa bei Waschmitteln</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		Als Konversionstechnologie nicht direkt mit BUE bestimmbar; je nach Zielprodukt können jedoch hohe Effizienzen erreicht werden.
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Meist kleinvolumige Anwendungen, im Vergleich zu chemisch-technischen Prozessen geringer Energiebedarf
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Zucker & Stärke 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		In der Region und im Umland gibt es zahlreiche KMU und auch Großunternehmen wie Henkel und Covestro, die Enzymtechnologien vor allem im Bereich Feinchemie einsetzen.
Know-how in der Region		Starkes Know-how in Unternehmen und den wissenschaftlichen Instituten, vor allem RWTH Aachen.
Hochwertige / hochpreisige Produkte		Abhängig von den Zielprodukten. In der Regel werden Enzymtechnologien für Pharmazie und Feinchemie eingesetzt.

13) Insektenbiotechnologie

<p>Technologiebeschreibung: Biomasse, vor allem biogene Rest- und Abfallstoffe, werden an die Larven von spezifischen Insekten verfüttert, die dadurch Biomasse aufbauen. Die Biomasse in Form der Insekten kann geerntet werden – dabei werden die Insekten(larven) getötet und in der Regel getrocknet und vermahlen. Als Produkte können proteinreiche Insektenmehle, Fette und Chitin als Ausgangsstoff für das Biopolymer Chitosan gewonnen werden. Das genutzte Kultivierungssubstrat (Frass) enthält neben Restsubstraten vor allem Kot und Insektenteile und kann als Düngemittel genutzt werden.</p>		
<p>Einsetzbare Rohstoffe: Rest- und Abfallströme, kontaminierte Biomasse u.ä.</p>		
<p>Produkte und Nebenprodukte: Proteine Fette Chitin Frass</p>		
<p>Technologische Reife: 6-9 Kommerziell nur für einzelne Insekten und Anwendungen</p>		
<p>Nachhaltigkeitsaspekte:</p>		
Umsetzungseffizienz		Mit BUE nicht direkt bestimmbar. Insekten verarbeiten Biomasse sehr effizient und nutzen sie für den eigenen Stoffwechsel und Biomasseaufbau.
Energieeffizienz, Treibhausgasemission		Insektenfarmen haben einen vergleichsweise hohen Energieaufwand für die Insektenkultivierung und die Aufarbeitung der Produkte
<p>Relevanz für das Rheinische Revier:</p>		
Biomasseverfügbarkeit im Rheinischen Revier	Reststoffe Ernährungswirtschaft 	
Anknüpfung an bestehende Industrie		Bisher kaum bzw. keine Aktivitäten im Rheinischen Revier, Umsetzung möglich und andockbar an Lebensmittelindustrie (Proteine) und Oleochemie / Feinchemie (v.a. Fette)
Know-how in der Region		Bislang kaum akademische Forschung im Rheinischen Revier, kein Industrieschwerpunkt
Hochwertige / hochpreisige Produkte		

4.5 Prognose: Zukünftige Relevanz von Technologien im Rheinischen Revier

Eine Prognose, welche Technologien zur Umwandlung von Biomasse in Zukunft besondere Bedeutung und entsprechende Zuwächse erlangen werden, ist schwer abzugeben. Über den Zeitraum der nächsten Jahrzehnte ist anzunehmen, dass vor allem solche Technologien Marktreife erlangen, die bereits jetzt ein hohes TRL aufweisen und für die sowohl die ökonomische Machbarkeit wie auch ökologische Vorteile darstellbar sind. Diese Prognosen lassen sich zudem schwer bzw. gar nicht auf Regionen herunterbrechen.

Unterschiedliche Technologien bieten aufgrund der verschiedenen Reifegrade Transformationspotenziale in unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Für die kurzfristigen Potenziale, die sich an existierende Industrien ankoppeln, ist es wahrscheinlich, dass geplante Entwicklungsprojekte auf relativ hohem TRL starten, wohingegen völlig innovative Projekte auf niedrigem TRL starten und eine deutlich längere Zeit bis zur Marktreife haben. Ein relevantes Kriterium für die Ansiedlung von innovativen Technologien für die Bioökonomie im Rheinischen Revier kann daher das TRL sein, um schnelle Kommerzialisierung und signifikante sozioökonomische Effekte wie Beschäftigung und Umsatz zu erzielen.

Bei der Betrachtung der (weltweiten) Kapazitätsentwicklung bio-basierter Polymere und ihrer Bausteine über die nächsten Jahre wird vor allem ein Zuwachs an Bionaphtha und Ethylen als Grundbausteine für zahlreiche Prozesse angenommen (SKOCZINSKI et al. 2024). Dabei geht man entsprechend vor allem davon aus, dass heute bestehende Prozesse und Technologien weiter genutzt und entsprechend an neue Rohstoffe biogener Natur angepasst werden, so dass vor allem so genannte Drop-In-Lösungen zum Tragen kommen. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen weiterer Studien, bei denen ein Wandel vor allem in der Rohstoffbasis gesehen wird und weniger in den genutzten Technologien – chemische Prozesse, die bereits jetzt in der Raffinerie und im Cracker eingesetzt werden, werden entsprechend auch in der näheren Zukunft eine zentrale Rolle spielen und an neuartige Rohstoffe bzw. Plattformchemikalien wie HVO, Bionaphtha und biogenem Ethanol / Ethylen angepasst (KÄHLER et al. 2023; MATERIAL ECONOMICS 2019, VOGT AND WECKHUYSEN 2024).

Die Substitution von derzeit im Großmaßstab produzierten Chemikalien und Polymeren durch neuartige Moleküle und Grundchemikalien wird dagegen in den meisten Prognosen nur stückweise voranschreiten. Die mengenmäßig bereits heute mit den größten Kapazitäten biotechnologisch hergestellten Produkte, Biogas und Bioethanol, werden auch in Zukunft eine große Rolle spielen und dabei und auch größere Anteile in der stofflichen Nutzung bekommen. Biomethan auf der Basis von Biogas stellt dabei eine wichtige Alternative für fossiles Erdgas dar und Bioethanol kann als Grundlage für Ethylen eine der zentralen Basischemikalien werden (KÄHLER et al. 2019). Biotechnologische Prozesse für Milchsäure und andere organische Säuren, Butanol und einige andere biogene Produkte werden wahrscheinlich ebenfalls weiterwachsen, die Substitutionsanteile vor allem in den volumenstarken Märkten wie dem Polymer- bzw. Kunststoffmarkt etwa durch PLA, PHAs und PEF bleiben jedoch auch weiterhin moderat (SKOCZINSKI et al. 2024).

Im Bereich der hochpreisigen Produkte im Bereich der Feinchemie und Pharmazie ist dagegen ein weiterer stetiger Anstieg biotechnologisch und oleochemisch produzierter Chemikalien etwa in den Bereichen der Biotenside, der Farbstoffe und Klebstoffe oder auch der Inhalts-

stoffe für Pharmazeutika und Nahrungsmittel zu erwarten (BIO-TIC CONSORTIUM 2015; TICKNER et al. 2022) und auch im Bereich der Präzisionsfermentation und auch der Insektennutzung zur Produktion spezifischer Proteine für den Futtermittel- und Ernährungsbereich als Alternativen von Fleisch, Milch- und Eiprodukten ist ein Wachstum bereits in den nächsten Jahren zu erwarten (AUGUSTIN et al. 2023; TENG et al. 2021; TEREFE 2022). Als Moleküle mit besonders hohem Potenzial, als Plattformchemikalien genutzt zu werden, sind neben Ethanol und Milchsäure auch Bernsteinsäure, Lävulinsäure, Sorbitol, Xylitol, Isopren und Glycerin (NOVA-INSTITUT 2024)

Für die Zukunft wird – je nach Szenario zwischen 2050 und 2100 – prognostiziert, dass Biomasse einen Anteil von bis zu 20 % an der Gesamtrohstoffmenge ausmachen kann und ergänzt wird durch CO₂ aus CCU-Prozessen und vor allem durch recycelte Rohstoffe aus der Kreislaufwirtschaft mit zunehmenden biogenen Anteilen. Mit der nach heutigen Annahmen massiv zunehmenden Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff und grüner Elektrizität, die neben der energetischen Versorgung auch in der Industrie verfügbar sein sollen, soll vor allem die CO₂-Nutzung zunehmen. Auch die Elektrochemie, teilweise kombiniert mit der industriellen Biotechnologie, kann als Technologie einen größeren Stellenwert bekommen (KÄHLER et al. 2023; MATERIAL ECONOMICS 2019; VOGT AND WECKHUYSEN 2024), und die Bioökonomie ergänzen.

4.6 Zusammenfassung und Fazit

Grundsätzlich sind Produkte, die heute aus fossilem Kohlenstoff produziert werden, auch mit biogenen Rohstoffen herstellbar. Basierend auf dem Überblick und der Einordnung der Nutzungsverfahren ergeben sich viele Möglichkeiten zur stofflichen Biomassennutzung im Rheinischen Revier. Die Technologien für die Herstellung von Papier- und Chemiezellstoff, Enzymtechnologien, die Oleochemie aber auch chemisch-katalytische Verfahren hin zu Bionaphtha schneiden hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit und Relevanz für das Rheinische Revier am besten ab.

Aber auch andere Nutzungsverfahren und Produkte können Chancen für eine Entwicklung hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie im Rheinischen Revier bieten. So wurde z. B. aufgrund der hohen Pachtpreise in der Region eine Technologie als besonders relevant für das Rheinische Revier definiert, wenn mit ihr hochpreisige Produkte hergestellt werden können. Es ist aber auch denkbar, dass niedrigpreisige Anwendungen im Rheinischen Revier bio-basiert produziert werden können, wenn beispielsweise langfristige Abnahmegarantien auch für Ernten mit geringer Qualität (z. B. Weizen mit niedrigem Proteingehalt) gegeben sind oder die Gesamtnutzung des Rohstoffs stark optimiert wird (integrierte Produktion, Koppelnutzungen) oder die entsprechenden Infrastrukturen bereits vorhanden sind. Die in den vorangegangenen Absätzen vorgenommene Bewertung der Technologien ist daher zunächst als Orientierung zu verstehen und nicht als abschließende Grundlage, über die (Nicht-)Förderung von Bioökonomie-Projekte zu entscheiden. Daher wurde in diesem Projekt ebenfalls ein Bewertungsschema speziell für Bioökonomie-Projekte entwickelt (vgl. Kapitel 8), welches die gesamte Wertschöpfungskette vom Rohstoff bis zum fertigen Produkt hinsichtlich seiner ökologischen und ökonomischen Effekte abdeckt (z. B. im Rahmen einer LCA-Analyse oder ökonomischen Machbarkeitsbetrachtungen).

Das umfangreiche Know-how im Rheinischen Revier als auch bereits ansässige Industrien bieten beste Voraussetzungen zur Entwicklung und Umsetzung einer Vielzahl von Technologien. Darüber hinaus sollte die Förderlandschaft auch offen sein für die Unterstützung und Entwicklung innovativer Prozesse und Produkte, um neue Arten von Industrien zu etablieren, beispielsweise zur Herstellung von neuen, hochwertigen Produkten. Dies könnte auch ein stärkeres und disruptiveres Transformationspotenzial haben, als die reine Konzentration auf bereits etablierte Verfahren und Prozesse.

5 Derzeitige Biomasseproduktion im Rheinischen Revier

In diesem Kapitel wird das derzeitige Biomassepotenzial aus der Land- und Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier analysiert. Dazu wird im ersten Schritt berechnet, wie viel Biomasse jährlich in der Landwirtschaft produziert wird bzw. in der Ernährungswirtschaft anfällt. Betrachtet werden dabei Haupternteprodukte (z. B. Getreidekorn) als auch Nebenernteprodukte (z. B. Getreidestroh) sowie Reststoffe, die im ersten Verarbeitungsschritt der Ernährungswirtschaft anfallen (z. B. Getreidekleie). Dabei gingen in die Berechnung die landwirtschaftlichen Kulturen ein, die als Rohstoff für eine stoffliche Nutzung geeignet sind (z. B. Weizen, Kartoffeln, Mais, Raps). Gemüse und Obst sowie Sonderkulturen wurden nicht berücksichtigt. Es wurden verschiedene Statistiken ausgewertet als auch Interviews geführt, die detaillierte Methodik wird im Folgenden erläutert. Das somit berechnete Biomassegesamtaufkommen stellt dabei ein theoretische Potenzial dar. Inwieweit sich daraus Potenziale für eine stoffliche Nutzung ergeben, wird im Anschluss in Kap. 5.3 dargestellt und diskutiert.

5.1 Methodik/Datengrundlage

Haupternteprodukte - Anbauflächen und Erträge

Die Anbauflächen und Erntemengen im Rheinischen Revier wurden anhand der Agrarstatistik (IT.NRW 2023c) für das Jahr 2020 berechnet. Für Dauergrünland wurde ein durchschnittlicher Ertrag von 4 t Trockenmasse (TM) pro Hektar (ha) eingesetzt (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2017). Sofern nötig, wurden die Angaben von Frischmasse (FM) in TM umgerechnet (nach FAO 2013, PIOTROWSKI et al. 2015, siehe Anhang 1)

Aufteilung der Haupternteprodukte in ihre Hauptbestandteile

Für die verschiedenen Nutzungsverfahren spielen vor allem die unterschiedlichen Hauptbestandteile der Biomasse, wie z. B. Cellulose, Proteine oder Fette, eine wesentliche Rolle (siehe auch Kap. 4 Überblick und Einordnung der Nutzungsverfahren). Daher wurden die ermittelten Erntehauptprodukte auch in ihre jeweiligen Hauptbestandteile eingeteilt. Diese Einteilung basierte im Wesentlichen auf Daten der FAO, die die Zusammensetzung aller für die menschliche Ernährung nutzbaren Nutzpflanzen auflistet (FAO 2013, siehe Anhang 1).

Verwendung der Haupternteprodukte

Um abzuschätzen, zu welchen Anteilen die landwirtschaftlichen Ernteprodukte als Futtermittel, Lebensmittel, energetisch oder stofflich genutzt werden, wurden hierzu auf Bundesebene vorhandene Daten (BLE 2023 a-d; FNR 2023a-d) auf das Rheinische Revier übertragen. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da es auf Landesebene keine detaillierten Daten über die Verwendung der Haupternteprodukte gibt. In den Landes-Agrarstatistiken werden lediglich Angaben zur „Verwendung der Anbaukulturen beim Anbau auf dem Ackerland“ durch die Unterscheidung zwischen Getreide zur Körnergewinnung und Pflanzen zur Grünernte gemacht. Eine weiterführende Differenzierung der späteren Verwendung bzw. Verwertung der Feldfrucht ist auf dieser Basis nicht möglich (DESTATIS 2017). Zudem wird über die Verwendung der Ernte häufig erst nach dem Erntezeitpunkt marktbedingt entschieden (vgl. FNR 2020).

Nebenernteprodukte

Die jährlichen Mengen an Erntenebenprodukten wurden anhand des Verhältnis von Haupternteprodukt zu Erntenebenprodukt (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2012) berechnet (siehe Anhang 2). Demnach liefern z. B. 10 t Weizenkorn gleichzeitig 8 t Stroh.

Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft

Die Methodik zur Ermittlung der Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft wird gemeinsam mit den Ergebnissen in Kapitel 5.2.5 erläutert.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Haupternteprodukte – Anbaufläche und Erträge

In Tabelle 8 sind Anbaufläche und Erntemengen der Haupternteprodukte im Rheinischen Revier im Jahr 2020 dargestellt. Insgesamt wurde eine Erntemenge von 1.757.513 t TM berechnet. Mehr als 35 % davon entfallen auf die Getreideerntemenge und ca. 26 % auf die Zuckerrübenenernte.

Tabelle 8: Anbaufläche und Erntemenge der Haupternteprodukte im Rheinischen Revier im Jahr 2020 (berechnet durch nova-Institut)

Haupternteprodukt	Anbaufläche (ha)	Erntemenge (t)	
		Frischmasse	Trockenmasse
Getreide (ohne Mais)	81.872	707.324	622.445
<i>davon Weizen</i>	54.729	512.721	451.194
<i>davon Gerste</i>	23.231	184.430	162.298
Zuckerrüben	24.932	2.007.083	461.629
Silomais/Grünmais	16.832	782.402	312.961
Kartoffeln	12.579	568.150	121.016
Ölfrüchte	7.843	29.314	26.967
<i>davon Raps</i>	7.651	29.163	26.830
Körnermais	2.029	8.485	7.467
Dauergrünland	51.257	820.112	205.028
Gesamt	197.344	4.922.870	1.757.513

Quellen: IT.NRW 2023c, LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2017, FAO 2013, PIOTROWSKI et al. 2015

5.2.2 Aufteilung der Haupternteprodukte in ihre Hauptbestandteile

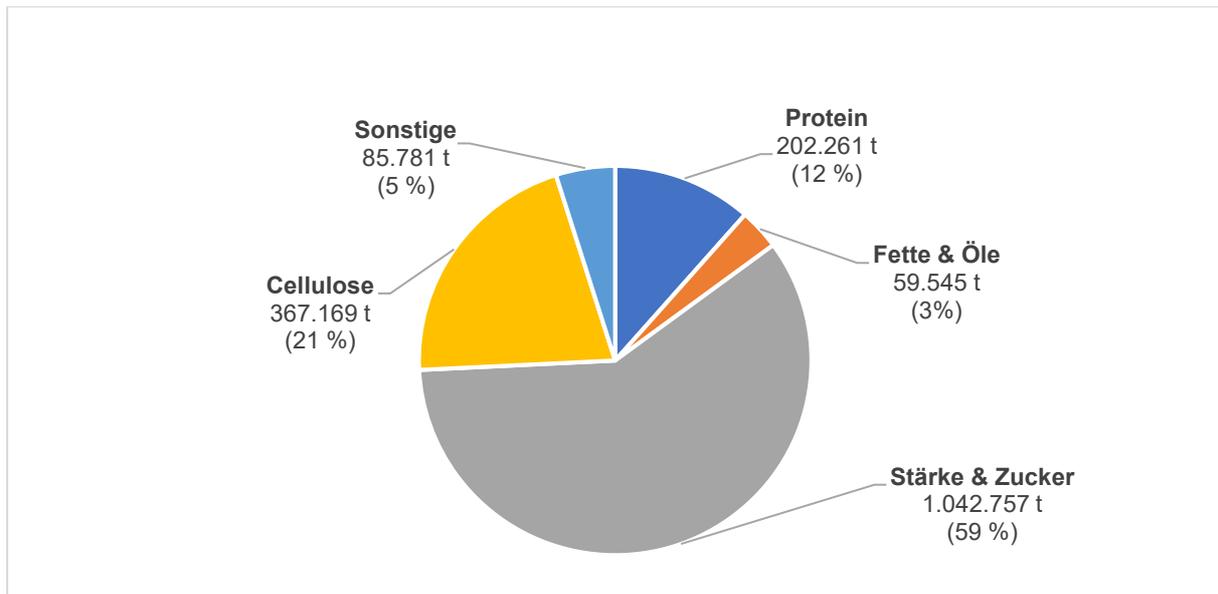


Abbildung 3: Aufteilung der Haupternteprodukte im Rheinischen Revier (Betrachtungsjahr 2020) in ihre Hauptbestandteile, in t TM (Sonstige: Asche, Lignin, etc.), berechnet durch nova-Institut (Quellen: IT.NRW 2023, FAO 2013, PIOTROWSKI et al. 2015)

In Hinblick auf die für eine stoffliche Nutzung relevanten Hauptbestandteile der Biomasse (siehe auch Kap. 4 Überblick und Einordnung der Nutzungsverfahren) zeigt sich, dass Stärke und Zucker aus landwirtschaftlicher Produktion im Rheinischen Revier mit insgesamt 1.042.757 t TM den größten Anteil an diesen haben. Es folgen Cellulose mit 367.169 t TM und Proteine mit 202.261 t TM. Im Vergleich dazu ist die Menge an Fetten und ölen mit nur 59.545 t eher gering (siehe Abbildung 3).

5.2.3 Verwendung der Haupternteprodukte sowie deren Hauptbestandteile

Tabelle 9 zeigt die anteilige Verwendung der Haupternteprodukte im Rheinischen Revier. Diese werden zu 47 % als Futtermittel und zu 38,2 % als Lebensmittel genutzt. Auf die energetische Verwendung entfallen 12,6 %, stofflich werden 2,2 % genutzt. Fast zwei Drittel der Getreideernte werden als Futtermittel verwendet. Stofflich genutzt werden insbesondere Kartoffeln (15,8 % der Erntemenge) bzw. die Kartoffelstärke. An der Gesamtmenge der produzierten Lebensmittel von 671.486 t TM haben Zuckerrüben mit fast 69 % den größten Anteil (Abbildung 4).

Analog dazu wurde berechnet, wie die Hauptbestandteile der jeweiligen Haupternteprodukte derzeit verwendet werden (Abbildung 5). Daraus geht hervor, dass Cellulose, Proteine als auch Fette und Öle überwiegend als Futtermittel genutzt werden. Stärke und Zucker werden zu einem großen Teil als Lebensmittel verwendet, was insbesondere mit dem stark ausgeprägten Zuckerrübenanbau im Rheinischen Revier zusammenhängt. Energetisch und stofflich werden vor allem Stärke und Zucker mit jeweils 118.887 t TM und 26.036 t TM genutzt.

Tabelle 9: Verwendung der Haupternteerzeugnisse im Rheinischen Revier (%), berechnet durch nova-Institut (Quellen: IT.NRW 2023, BLE 2023, FNR 2023)

Kulturen	Erntemenge (t TM) ¹	Verwendung (%)			
		Futtermittel	Ernährung	Energetisch	Stofflich
Getreide	622.445	64,7	24,2	9,9	1,2
Zuckerrüben	461.629	0,7	90,5	6,9	1,9
Ölfrüchte	26.967	8,9	34,5	48,5	8,0
Körnermais	7.467	5,7	79,9	5,6	8,8
Kartoffel	121.016	7,2	77,1	0,0	15,8
Silo-/Grünmais	312.961	66,7	0,0	33,3	0,0
Dauergrünland	205.028	95,0	0,0	5,0	0,0
Gesamt	1.757.513	47,0	38,2	12,6	2,2

¹ im Rheinischen Revier im Jahr 2020

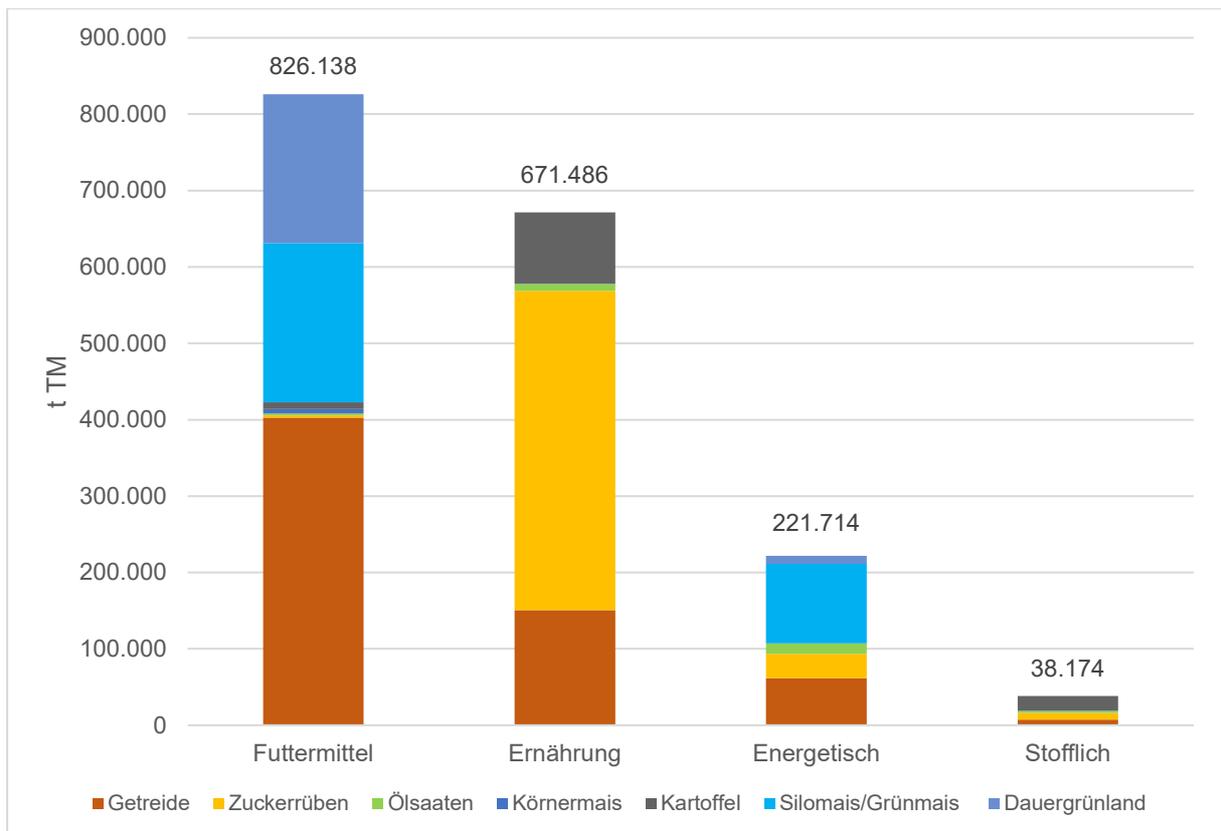


Abbildung 4: Verwendung der Haupternteerzeugnisse im Rheinischen Revier (t TM), berechnet durch nova-Institut (Quellen: IT.NRW 2023, BLE 2023, FNR 2023)

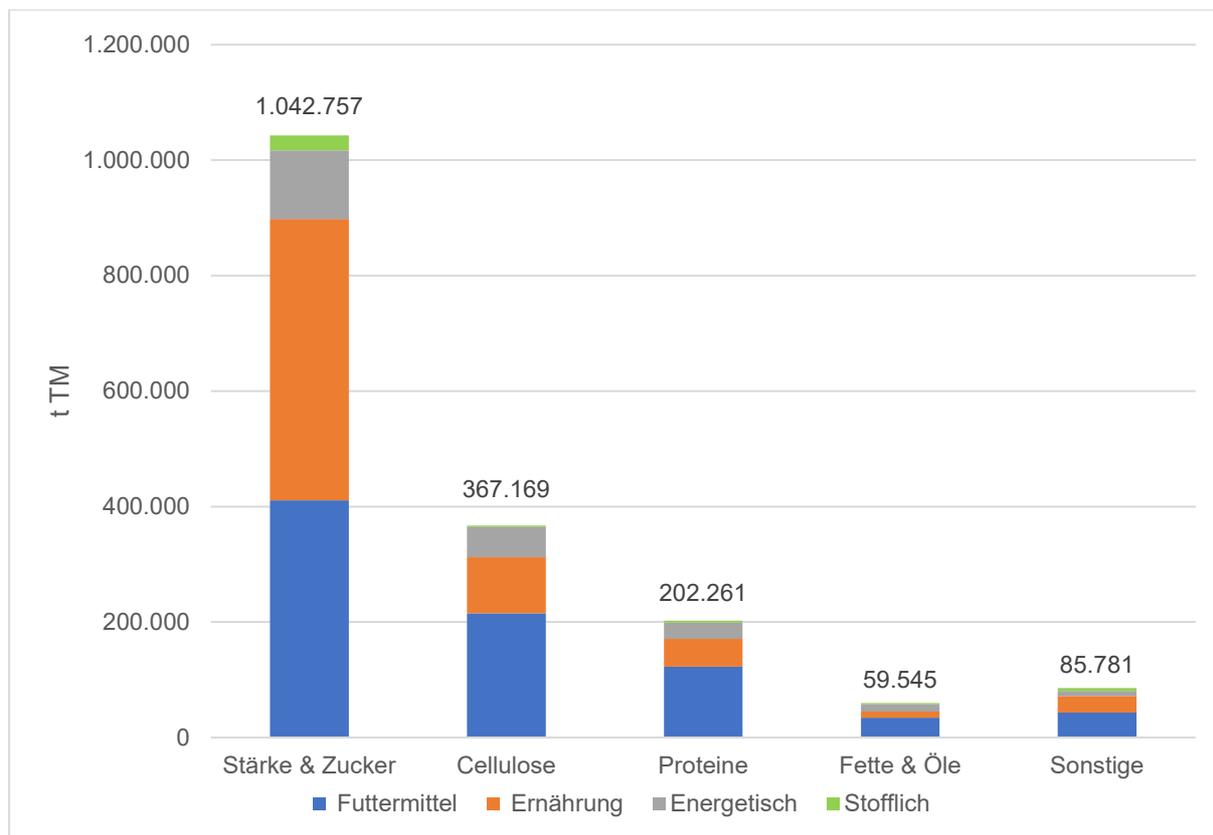


Abbildung 5: Verwendung der Hauptbestandteile im Rheinischen Revier (t TM), berechnet durch nova-Institut (Quellen: IT.NRW 2023, BLE 2023, FNR 2023, FAO 2013, PIOTROWSKI et al. 2015)

5.2.4 Nebenernteprodukte im Rheinischen Revier

Aus den Berechnungen ergibt sich eine Gesamtmenge von 2.143.953 t FM Nebenernteprodukte im Rheinischen Revier (siehe Abbildung 6). Davon entfallen mehr als die Hälfte auf Zuckerrübenblätter (1.404.958 t FM), was auch mit dem hohen Wasseranteil zusammenhängt. Aber auch Getreidestroh hat mit 567.303 t FM einen großen Anteil an der Gesamtmenge. Das Potenzial von Nebenernteprodukten für eine stoffliche Nutzung wird in Kap. 5.3 näher beleuchtet.

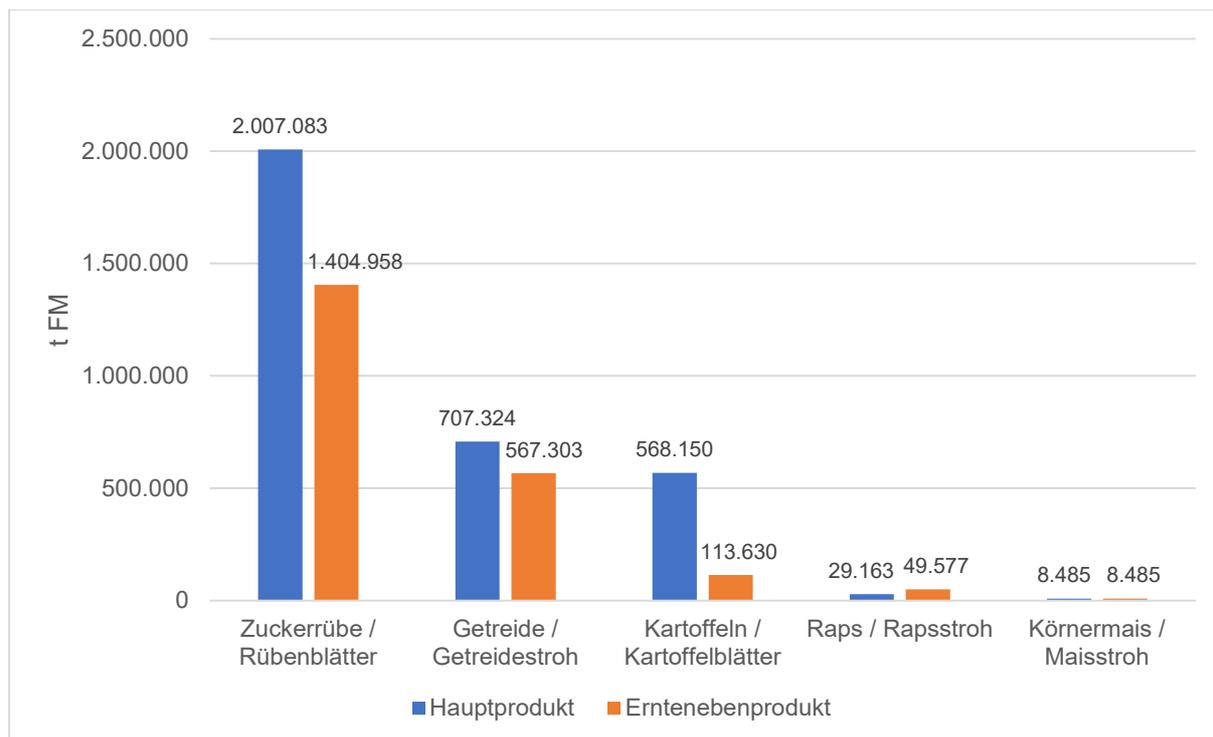


Abbildung 6: Haupternte- und Nebenernteprodukte im Rheinischen Revier (t FM), berechnet durch nova-Institut (Quellen: IT.NRW 2023, LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2012)

5.2.5 Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier

Vorab muss erwähnt werden, dass keine ausreichenden Datengrundlagen zu Mengen und Verwendung von Reststoffen aus der Ernährungswirtschaft existieren, um im Rahmen dieser Studie konkrete Aussagen für das Rheinische Revier zu treffen. Dies liegt insbesondere daran, dass Reststoffe, die einer weiteren Verwendung z. B. als Futtermittel zugeführt werden, nicht in Statistiken erfasst werden (vgl. auch UBA 2019). Für die Berechnung der Reststoffmengen aus der Ernährungswirtschaft konnten daher nicht die tatsächlichen Produktionsmengen zugrunde gelegt. Es wurde die Annahme getroffen, dass ausschließlich die im Rheinischen Revier geernteten Mengen an Haupternteprodukten auch nur dort industriell verarbeitet werden und es weder Importe noch Exporte gibt. Es handelt sich daher um eine grobe Abschätzung der Reststoffmengen aus der Ernährungswirtschaft. Die in dieser Studie untersuchten Sektoren der Ernährungswirtschaft sowie die dort anfallenden Reststoffe sind in Tabelle 10 dargestellt. Die ermittelten Reststoffmengen wurden anschließend in TM umgerechnet (nach GAIDA et al. 2012; PHYLLIS 2024, siehe Anhang 3).

Mit Hilfe des „Pollutant Release and Transfer Register“ des BMUV (2023) und weiteren Desktop-Recherchen wurden wichtige Verarbeitungsbetriebe in der Region identifiziert und zu Produktionsmengen und anfallenden Reststoffen befragt, wobei häufig auf die Vertraulichkeit firmeninterner Informationen verwiesen wurde. Dort jedoch, wo Betriebsdaten erhoben werden konnten, werden diese gesondert dargestellt.

Tabelle 10: Untersuchte Sektoren der Ernährungswirtschaft und entsprechende Reststoffe (Tabelle verändert nach KALTSCHMITT et al. 2016 in UBA 2019)

Untersuchter Sektor	Reststoff	Menge (Frischmasse)
Getreideverarbeitung	Kleie, Spelzen, Teigreste, Retourware	0,2 - 0,3 kg/kg Getreide
Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung	Schäl- und Putzreste	0,1 - 0,35 kg/kg
Zuckerherstellung	Rübenschnitzel	1,5 kg/kg Zucker
Zuckerherstellung	Melasse	0,25 kg/kg Zucker
Pflanzenölproduktion (Raps)	Rapspresskuchen, Extraktionsschrot	1,4 kg/Liter
Bierherstellung	Treber, Hefe	0,25 kg/Liter
Käseproduktion	Molke	1 Liter/Liter Milch
Schlacht- und Fleischwarenindustrie	Panseninhalt, Tiermehl, Tierfett	15-60 kg/Tier

5.2.5.1 Getreideverarbeitung

Bei der Getreideverarbeitung fallen verschiedene Reststoffe wie Kleie, Spelzen und Reinigungsstäube an. Kleie macht dabei über 90 % der Reststoffe aus und wird hauptsächlich als Futtermittel vermarktet (UBA 2019). Überschüssige Spelzen werden entweder stofflich oder energetisch verwertet, z. B. durch Kompostierung oder in Biogasanlagen (UBA 2019).

Berechnung nach Erntemenge

Tabelle 9 verdeutlicht, dass etwas mehr als 24 % des geernteten Getreides im Rheinischen Revier als Nahrungsmittel verwendet werden, was einer Menge von 171.115 t FM (150.581 t TM) entspricht. Unter der Annahme, dass diese Menge komplett vermahlen wird und dabei pro kg Getreide 0,25 kg Kleie anfallen, ergäbe sich eine Gesamtmenge von 42.779 t FM (15.191 t TM) Kleie (Tabelle 11 und Abbildung 7).

Verarbeitungsbetriebe in der Region

In den Jahren 2022/23 gab es 18 meldepflichtige Mühlen in Nordrhein-Westfalen (BLE 2023). Dazu gehört beispielsweise die Plangemühle (Plange GmbH) in Neuss, die laut Angaben auf ihrer Internetseite jährlich 450.000 t Getreide vermahlt.

5.2.5.2 Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung

Berechnung nach Erntemenge

Nach Angaben und Ernteberichten des Statistischen Landesamtes wurden im Jahr 2020 über 1,2 Mio. t FM Gemüse, Baumobst, Strauchbeerenobst und Kartoffeln im Rheinischen Revier erzeugt (IT.NRW 2023a, c, d). Legt man die Angaben der Studie BioRest zugrunde, wonach pro kg FM 0,1-0,35 kg Schäl- und Putzreste anfallen, ergibt sich daraus eine Menge von 303.760 t FM (44.370 t TM) an Reststoffen aus der Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung

(Tabelle 11 und Abbildung 7). Die derzeitige Nutzung dieser Reststoffe liegt hauptsächlich im Bereich Biogas oder Tierfutter (UBA 2019).

Verarbeitungsbetriebe in der Region

Im Rheinischen Revier sind mehrere Unternehmen dieser Branche angesiedelt. Der Getränkehersteller Refresco unterhält zwei Werke in Erftstadt und Herrath (Mönchengladbach), der Konfitürenhersteller Zentis ist in Aachen ansässig. Ebenso ist der Chipshersteller Intersnack in Grevenbroich im Rheinischen Revier vertreten.

5.2.5.3 Zuckerherstellung

Berechnung nach Erntemenge

Bei der Zuckerproduktion fallen unter anderem Melasse und Zuckerrübenschnitzel als Reststoffe an. Für die Zuckererzeugung wurden Abschätzungen auf Basis der geernteten Zuckerrübenenerträge vorgenommen. So wurden im Rheinischen Revier 2.007.083 t FM Zuckerrüben (461.629 t TM) geerntet, aus denen 341.204 t Zucker gewonnen werden können (Zuckergehalt von Zuckerrübe: 17 %). Daraus können wiederum 85.302 t FM Melasse (64.402 t TM) und 511.806 t FM Zuckerrübenschnitzel (85.472 t TM) gewonnen werden (Tabelle 11 und Abbildung 7), die überwiegend in der Futtermittelproduktion eingesetzt werden (GAIDA et al. 2013 in UBA 2019).

Verarbeitungsbetriebe in der Region

Die Zuckerproduktion spielt im Rheinischen Revier eine bedeutende Rolle, insbesondere durch die Pfeifer & Langen GmbH & Co. KG, einem maßgeblichen deutschen Zuckerproduzenten mit Fabriken in Euskirchen und Jülich. Ein Austausch mit Pfeifer & Langen (2023) bestätigte, dass das errechnete Reststoff-Aufkommen sehr nahe an der Realität liegt. Neben der Futternutzung geht ein Teil der Rüben in die Biogasanlagen der Landwirte. Dieser Anteil ist im Vergleich allerdings vernachlässigbar (Pfeifer & Langen 2023).

Neben Pfeifer & Langen gibt es im Rheinischen Revier noch einen weiteren Zuckerproduzenten, die Firma Grafschafter. Sie verarbeitet jährlich rund 41.000 t Rüben (Pfeifer & Langen 2023).

5.2.5.4 Rapsölproduktion

Bei der Herstellung von einem Liter Rapsöl fallen ca. 1,4 kg Rapspresskuchen oder Extraktionsschrot an. Diese werden fast ausschließlich als Futtermittel in der Tierhaltung genutzt (UBA 2019).

Berechnung nach Erntemenge

Im Rheinischen Revier wurden im Jahr 2020 29.163 t FM (26.830 t TM) Raps geerntet, woraus ca. 13.123 t Rapsöl (45 % Ölgehalt in FM) hergestellt werden können. Daraus ergibt sich eine Menge von 18.373 t FM (16.756 t TM) Rapspresskuchen oder Extraktionsschrot (Tabelle 11 und Abbildung 7).

Verarbeitungsbetriebe in der Region

Im Rheinischen Revier sind mehrere Unternehmen in der Pflanzenölproduktion tätig, darunter das Protein- und Ölwerk Neuss GmbH & Co. KG und die SELS Öl + Fett GmbH in Neuss.

5.2.5.5 Bierherstellung

Bei der Bierherstellung fällt als Reststoff Treber an (in geringen Mengen auch Hefe), der bevorzugt zur Tierernährung eingesetzt wird (UBA 2019).

Berechnung nach Erntemenge

Bier wird hauptsächlich aus Gerste hergestellt. Nach Angaben der SAATEN-UNION (2024) werden für die Herstellung von 1 l Bier ca. 200 g Braugerste benötigt. Für die Berechnung der Reststoffmengen aus der Bierherstellung wurde vereinfachend angenommen, dass 24,2 % der geernteten Gerste im Rheinischen Revier als Nahrungsmittel verwendet wird (vgl. Tabelle 9) und diese ausschließlich zur Produktion von Bier genutzt wird. Bei einer Gesamterntemenge von 184.430 t FM Gerste würden demnach 44.627 t FM für die Produktion von ca. 223.085.112 l Bier genutzt werden. Bei der Herstellung von einem Liter Bier fallen ca. 0,25 kg Treber und Hefe an (UBA 2019), sodass eine Gesamtmenge von 55.771 t FM (13.299 t TM) Treber und Hefe für das Rheinische Revier berechnet wurde (Tabelle 11 und Abbildung 7).

Verarbeitungsbetriebe in der Region

Bedeutende Standorte der Bierproduktion in der Region sind die Kölsch-Brauereien (in Köln und Umgebung) sowie die Oettinger-Brauerei in Mönchengladbach, die zusammen mehr als 380 Mio. l Bier pro Jahr produzieren (EXPRESS.DE 2020; GETRÄNKE-NEWS.DE 2020).

5.2.5.6 Milchverarbeitung

Bei der Ermittlung der Reststoffmengen aus der Milchverarbeitung wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass die gesamte im Rheinischen Revier produzierte Milch zu Käse verarbeitet wird. Aus 10 l Milch können ein kg Käse produziert werden, dabei fallen 10 l Molke an; bezogen auf das Volumen fällt demnach genauso viel Molke an wie Milch verarbeitet wird. Die Reststoffe mit einem Trockensubstanzgehalt von 6 bis 6,5 % werden einer weiteren Verwertung zugeführt. Dies kann die Verfütterung an Schweine, die Produktion von Molkepulver oder die Herstellung von Getränken sein (UBA 2019).

Im Rheinischen Revier gibt es laut Statistischem Landesamt NRW (IT.NRW 2024b) etwas mehr als 40.500 Milchkühe. Jede Kuh produziert durchschnittlich 9.583 l Milch pro Jahr, basierend auf der durchschnittlichen Milchleistung von 342.690 Milchkühen in NRW (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2021). Daraus ergibt sich eine jährliche Produktionsmenge von insgesamt 389.041.051 l bzw. 400.712 t FM Milch (1,03 kg/l Milch). Würde diese Milchmenge zur Käseherstellung verwendet, ergäbe sich ein Aufkommen an Molke von 389.041 t FM bzw. 23.343 t TM (Tabelle 11 und Abbildung 7).

5.2.5.7 Schlacht- und Fleischwarenindustrie

Die folgende Berechnung konzentriert sich auf tierische Fette der Kategorie 3 tierischer Nebenprodukte. Diese Kategorie beinhaltet tierische Nebenprodukte, die ein geringes Risiko für die Gesundheit von Menschen und Tier darstellen. Dazu gehören Schlachtkörperteile und gennusstaugliche Teile von Tieren, die aus wirtschaftlichen Gründen nicht für den menschlichen Verzehr verwendet werden, sowie Material, das gemäß den Gemeinschaftsvorschriften als untauglich abgelehnt wurde, jedoch keine Anzeichen einer auf Menschen oder Tier übertragbaren Krankheit aufweist (BLE 2019).

Laut Daten der Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH und Verband der Verarbeitungsbetriebe Tierischer Nebenprodukte (STN-VVTN 2023) sind deutschlandweit im Jahr 2022 insgesamt 281.683 t Tierfette der Kategorie 3 als tierische Nebenprodukte angefallen. Davon wurden knapp 50 %, etwa 138.814 t, für Oleochemie und technische Anwendungen genutzt. Die Verwendung als Futtermittel oder zur Herstellung von Biodiesel ist ebenfalls üblich (UBA 2019).

Die Schlachtmenge von Rindern, Schweinen und Geflügel betrug im Jahr 2022 in den Regierungsbezirken Düsseldorf und Köln nach vorläufigen Ergebnissen 157.769 t (IT.NRW 2023b). Als Reststoffe und Nebenprodukte der Produktion fallen in der Schlacht- und Fleischwarenindustrie rund 20 % der eingesetzten Rohstoffmenge an, die aus tierischen Proteinen und Fetten bestehen (DBFZ 2022). Aus den Beschreibungen und Daten der STN-VVTN wurde die Annahme abgeleitet, dass in etwa 27 % der Reststoffe tierische Fette der Kategorie 3 ausmachen, was 8.519 t FM (8.417 t TM) ergibt. Knapp 50 % der tierischen Fette (Kategorie 3) werden für die Oleochemie eingesetzt, dies entspricht 4.198 t FM bzw. 4.148 t TM (Tabelle 11 und Abbildung 7).

5.2.5.8 Zusammenfassung - Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft

Unter der Annahme, dass ausschließlich die im Rheinischen Revier produzierten Agrar-Rohstoffe (Haupternteerzeugnisse, Milch und Fleisch) dort verarbeitet werden, beläuft sich die Gesamtmenge an Reststoffen aus der Ernährungswirtschaft auf 257.951 t TM (1.359.579 t FM). Tabelle 11 und Abbildung 7 stellen Mengen sowie die überwiegende Verwendung der jeweiligen Reststoffe zusammenfassend dar. Rübenschnitzel aus der Zuckerproduktion weisen mit 85.472 t TM das höchste Aufkommen auf, werden aber überwiegend als Futtermittel verwendet (UBA 2019). Schäl- und Putzrückstände aus der Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung haben mit 44.369 t TM ebenfalls ein bedeutendes Gesamtaufkommen. Tierische Fette (Kategorie 3) sind derzeit die einzigen Reststoffe, die stofflich verwertet werden (4.148 t TM in der Oleochemie).

Tabelle 11: Übersicht über die in der Ernährungswirtschaft eingesetzten Rohstoffe (bezogen auf die im Rheinischen Revier produzierten Mengen) und die aus der Verarbeitung resultierenden Reststoffe, berechnet durch nova-Institut (Quellen: IT.NRW 2023, GAIDA et al.)

Prozess	Rohstoff	Verarbeitungsmenge (t FM)	Reststoff	Reststoffmenge		Hauptsächliche Verwendung
				FM	TM	
Getreideverarbeitung	Getreide	171.115	Kleie	42.779	15.191	Futtermittel
Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung	Obst, Gemüse, Kartoffeln	1.215.041	Schäl- und Putzreste	303.760	44.370	Futtermittel, Biogasanlage
Zuckerproduktion	Zuckerrübe	2.007.083	Melasse	85.301	64.402	Futtermittel
			Rübenschnitzel	511.806	85.472	Futtermittel
Rapsölproduktion	Raps	29.163	Rapspresskuchen/ Extraktionsschrot	18.373	16.756	Futtermittel
Bierproduktion	Gerste	(44.627)*	Treber, Hefe	(55.711)*	(13.299)*	Futtermittel
Käseproduktion	Kuhmilch	400.712	Molke	389.041	23.343	Nahrungs-/Futtermittel
Fleischverarbeitung	Fleisch aus Schlachtung	157.769	Tierfette Kategorie 3	8.519	8.417	Oleochemie, Biodieselproduktion, Futtermittel
Gesamt		3.980.883		1.359.579	257.951	

* Da der Anteil der Gerste, die als Nahrungsmittel verwendet wird, bereits im Prozess „Getreideverarbeitung“ enthalten ist, wurden die Werte aus dem Prozess „Bierproduktion“ nicht erneut der Gesamtmenge zugerechnet.

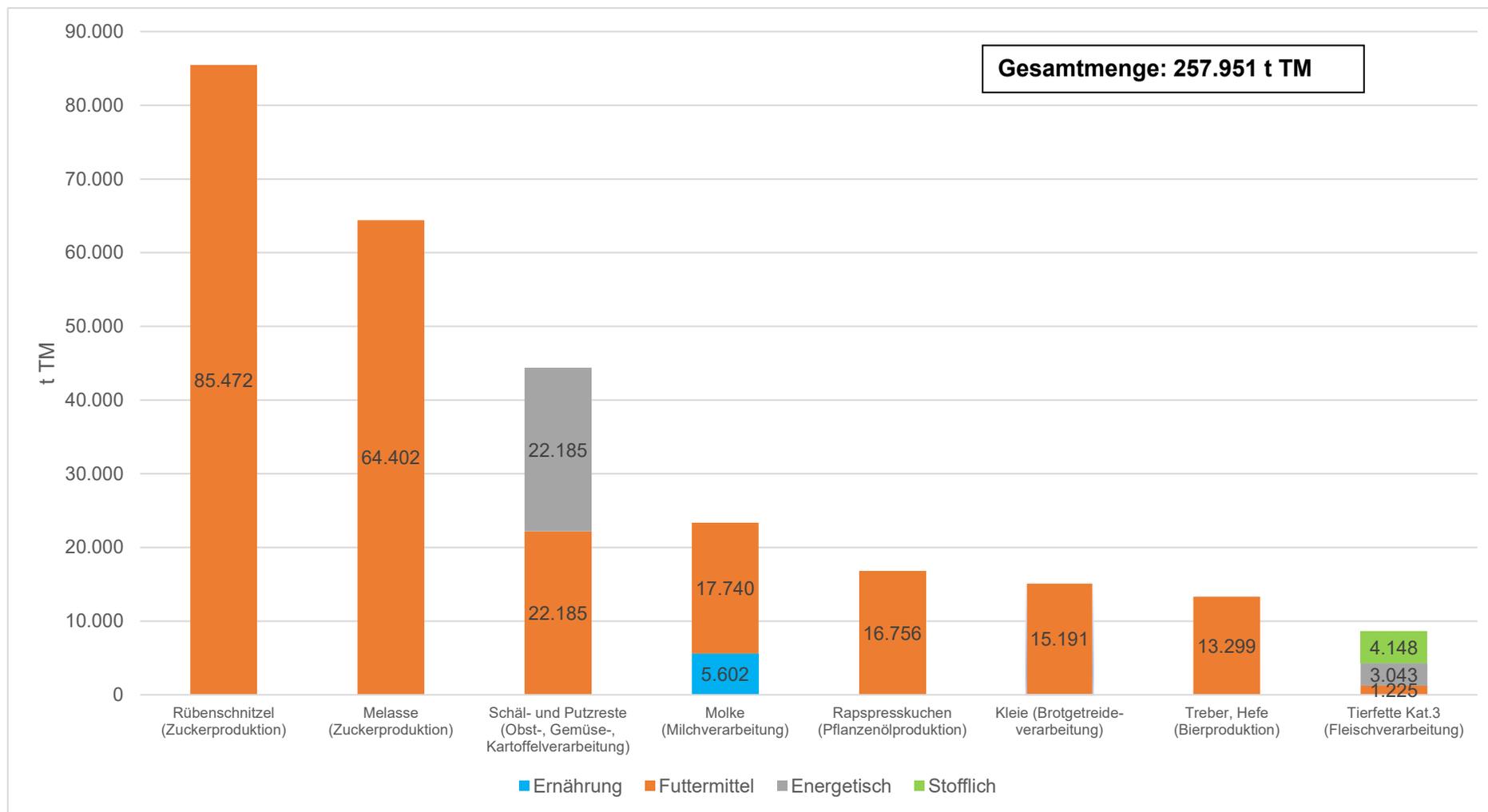


Abbildung 7: Menge und hauptsächliche Verwendung der Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier in t TM (bezogen auf die Erntemenge im Jahr 2020, bzw. Milch- und Schlachtmenge), berechnet durch nova-Institut (Quellen: IT.NRW 2023, GAIDA et al. 2012; PHYLLIS 2024, UBA 2019, u. a.)
 Da der Anteil der Gerste, die als Nahrungsmittel verwendet wird, bereits im Prozess Getreideverarbeitung (Kleie) enthalten ist, wurden die Mengen an Treber und Hefe (Bierproduktion) nicht der Gesamtmenge zugerechnet.

5.3 Biomassepotenziale für eine stoffliche Nutzung

Die vorhergegangene Analyse zeigt, dass große Biomasseaufkommen im Rheinischen Revier vorhanden sind. Jedoch gibt es bereits stark etablierte Nutzungen als Nahrungsmittel, Futtermittel, und Energieträger – und nur einen kleinen Teil im stofflichen Sektor. Dieses Kapitel diskutiert, welche Potenziale für zusätzliche stoffliche Nutzungen im Rheinischen Revier erkennbar sind. Diese werden in Kapitel 6 (Zukünftige Biomassepotenziale) bei der Gestaltung der Zukunftsszenarien berücksichtigt und ihr Effekt auf die Biomasseproduktion modelliert.

Potenziale durch Reduktion des Fleischkonsums

Die Verwendung der Haupternteprodukte aus der Landwirtschaft ist stark vom Lebens- und Futtermittelsektor geprägt. Je nach Kultur rangieren die Anteile dieser Nutzungen zwischen 70 und 90 %. Obwohl die menschliche Ernährung selbstverständlich Priorität hat, ist hier ein Potenzial für eine stoffliche Nutzung von Biomasse zu erkennen: Die Ernährung mit Fleisch ist eine relativ ineffiziente Nutzung von Energie, die durch die Biomasse zur Verfügung gestellt wird (mit Ausnahme der Biomasse von Grünland), da im Durchschnitt für die Herstellung von einer tierischen Kalorie sieben pflanzliche Kalorien benötigt werden (BROT FÜR DIE WELT 2009). Ein verringerter Konsum von Fleisch könnte Flächen frei werden lassen, die für stoffliche Nutzungen verwendet werden könnten. Momentan sind im Rheinischen Revier mehr als 115.000 ha der landwirtschaftlichen Fläche für die Produktion von Futtermitteln belegt. Der Effekt einer Ernährungsveränderung der regionalen Bevölkerung kann jedoch begrenzt sein, da reduzierter lokaler Fleischkonsum durch Exporte ausgeglichen werden kann und nicht notwendigerweise zu einer verringerten Fleischproduktion führt.

Potenziale durch Verringerung des Energiepflanzenanbaus

Insbesondere bei Silomais (aber auch bei Ölpflanzen) ist, bedingt durch politische Anreize, eine sehr starke energetische Nutzung seit einigen Jahren verbreitet. Langsam findet ein Umdenken in der Politik statt (z. B. erkennbar in den Revisionen der europäischen Erneuerbaren Energien-Richtlinie (RED, EU 2023) der letzten Jahre und in den Eckpunkten, die 2022 zur Nationalen Biomassestrategie (NABIS) vom BMEL, BMUV und BMWK veröffentlicht wurden, insbesondere was die Nutzung von Primärbiomasse für Verbrennung und Vergasung angeht. Die Förderungen für diese Arten von Bioenergie und -kraftstoffe werden langsam zurückgenommen, sodass auch hier potenziell der Anbau von Biomasse für stoffliche Nutzungen möglich wird. Gleichzeitig kann insbesondere die Landwirtschaft aufgrund der aktuellen Agrardiskussion zukünftig einen erhöhten Bedarf an Biokraftstoffen haben, so dass es hier zu Nutzungskonkurrenzen der Bereitstellung kommen kann. Abzuwarten bleibt noch, wie sich die NABIS zur stofflichen und energetischen Nutzung positioniert und welche Auswirkungen die Empfehlungen des Bundes auf die Entwicklungen im Rheinischen Revier haben werden.

Potenziale durch die stoffliche Nutzung von Nebenernteprodukten

Die stoffliche Nutzung von Erntenebenprodukten wird oft als große Chance für nachhaltiges Wirtschaften gesehen und insbesondere von der Politik auch immer stärker hervorgehoben.

Für die stoffliche Nutzung von Nebenernteprodukten bestehen jedoch folgende Herausforderungen: Zum einen handelt es sich bei den Nebenernteprodukten zumeist um stark lignocellulosehaltigen Bestandteile, die vor einer stofflich-chemischen Nutzung aufgespalten, verzuckert oder anderweitig vorbereitet werden müsste, was sehr aufwendig ist (NOVA-INSTITUT 2024). Der Gehalt von nutzbaren Komponenten wie Stärke und Zucker ist oft deutlich geringer

als im Haupternteprodukt, was die notwendige Gesamtmenge stark erhöht. Zudem ist die Logistik für die Einsammlung von solch großen Mengen aufwendig und teuer. Damit sind Nebenernteerzeugnisse für die chemische Industrie derzeit ökonomisch nicht sehr attraktiv. Zur Illustration dient das Werk der Firma Clariant, die in Rumänien große Pläne hatte, aus Getreidestroh Ethanol herzustellen. Im Jahr 2022 startete die Produktion, doch bereits 2023 wurde diese eingestellt, da sie ökonomisch zu verlustreich war (CLARIANT 2022, KRETSCHMER 2023) – und das trotz hoher Förderungen für Biokraftstoffe aus Rohstoffen der zweiten Generation. Andere Beispiele für erfolgreiche Nutzungen von Reststoffen für Kraftstoffe oder andere Chemikalien im kommerziellen Stil sind ebenfalls nicht bekannt (NOVA-INSTITUT 2024).

Die bisher vorherrschenden Nutzungen der Erntenebenprodukte z. B. als Dünger (zum Humusaufbau und zur Pflanzenernährung) oder Einstreu und Futter für Tiere sind deutlich einfacher in der Umsetzung und bieten ebenfalls wichtige ökologische wie ökonomische Nutzen. In den projektbegleitenden Workshops sowie auf anderen Fachveranstaltungen wurde mehrfach bestätigt, dass die Landwirtschaft bereits so gut wie alle Biomassekomponenten in Wert setzt und dass die Etablierung von konkurrierenden Nutzungen deutlich erhöhte ökonomische Anreize setzen müsste. Dies würde in der momentanen Lage starke ordnungspolitische Unterstützung erfordern – diese ist aber für stoffliche Nutzungen von Biomasse nicht absehbar.

Potenziale durch die stoffliche Nutzung von Reststoffen aus der Ernährungswirtschaft

Das Aufkommen von Reststoffen aus der Ernährungswirtschaft basierend auf der landwirtschaftlichen Produktion sowie den Milch- und Schlachtmengen beläuft sich insgesamt auf etwa 257.951 t TM (Tabelle 11 und Abbildung 7). Die Möglichkeiten für die stoffliche Nutzung sind unter den momentanen Bedingungen eingeschränkt. Faktisch werden fast alle Reststoffe als Futtermittel oder teilweise energetisch genutzt. Eine Ausnahme bilden Tierfette der Kategorie 3, die zu knapp 50 % in der Oleochemie stofflich genutzt werden. Auch hier müsste die Industrie signifikant höhere Preise für die Rohstoffe zahlen, um sie in eine stoffliche Nutzung umzulenken.

Potenziale durch Steigerung der Biomasseerträge

Für weitere Potenziale der stofflichen Nutzungen regionaler Biomasse muss berücksichtigt werden, dass landwirtschaftliche Erträge in Zukunft durch technologische Fortschritte – bei gleichzeitigem Umweltschutz, verringertem Dünger- und Pestizideinsatz, etc. – noch signifikant steigen können. Hierzu zählen insbesondere Fortschritte bei Züchtung sowie gezielter Pflanzenschutz mit Hilfe von Technik wie Drohnen und anderen Präzisionswerkzeugen (STRASSEN et al. 2020).

5.4 Zusammenfassung und Fazit

Die Auswertung aktueller Agrarstatistiken ergab, dass im Jahr 2020 ca. 1,76 Mio. t Biomasse (TM) im Rheinischen Revier geerntet wurden. Davon werden ca. 47 % als Futtermittel und 38 % für die menschliche Ernährung verwendet. 2,2 % werden bisher stofflich genutzt⁵. Die Berechnung der jeweiligen Hauptbestandteile der Erntemengen zeigte, dass vor allem Stärke und Zucker produziert werden (insgesamt 1.042.757 t TM), was insbesondere auf den weit verbreiteten Anbau von Zuckerrüben im Rheinischen Revier zurückzuführen ist. Aber auch Stärke aus Getreide und Silomais wird in großen Mengen produziert.

Derzeit werden ca. 1,9 % der Zuckerrüben und 1,2 % des Getreides stofflich genutzt. Nach Expertenschätzungen des nova-Instituts und Angaben des Instituts für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe (IFBB 2023) müssen für eine PLA-Anlage mit einer jährlichen Produktionskapazität von 75.000 t ca. 700.000 t Zuckerrüben oder aber mehr als 270.000 t Weizen eingesetzt werden. Um solch einen Bedarf zu decken, müssten etwa 35 % der gesamten Zuckerrübenernte oder über 50 % der Weizenernte zur Verfügung gestellt werden. Das Rheinische Revier wäre somit kaum in der Lage, eine solche Anlage autark zu versorgen und wäre auf den Import biogener Rohstoffe angewiesen. Zwar findet ein Import von Agrarrohstoffen in das Rheinische Revier statt (was sich z. B. an den Produktionszahlen der Plange Mühle Neuss ableiten lässt), welche Rohstoffe und in welchen Mengen dies konkret sind, lässt sich allerdings aufgrund unzureichender Datengrundlagen nicht ermitteln.

Nebenernteprodukte wie Zuckerrübenblätter (1.404.958 t FM) und Getreidestroh (567.304 t FM) könnten potenziell zur Deckung des Rohstoffbedarfs einer biobasierten Industrie beitragen. Die Möglichkeiten für ihre stoffliche Nutzung sind jedoch begrenzt, da sie entweder als Einstreu eingesetzt werden oder als Dünger auf den Feldern verbleiben, und ihre Nutzung (Bergung, Transport, Lagerung, Aufbereitung) außerdem technisch und ökonomisch relativ kompliziert ist (siehe auch Kap. 5.3).

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei den biogenen Rohstoffen aus der Nahrungsmittelindustrie. Hier fallen zwar große Mengen an Reststoffen an, wie z. B. Rübenschnitzel (85.3472 t TM) und Melasse (64.402 t TM) aus der Zuckerherstellung sowie Schäl- und Putzreste (44.370 t TM) aus der Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung. Die Recherchen zeigen jedoch, dass Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft überwiegend als Futtermittel oder in Biogasanlagen eingesetzt werden. Eine Ausnahme hiervon stellen tierische Fette der Kategorie 3 aus der Fleischverarbeitung dar, von denen derzeit ca. 4.148 t TM in der Oleochemie eingesetzt werden.

Anhand von Produktionszahlen einiger Betriebe der Ernährungswirtschaft (insbesondere der Pflanzenölproduktion und Getreideverarbeitung) ist ersichtlich, dass Biomasse zur Verarbeitung in das Rheinische Revier importiert wird. Umgekehrt wird auch Biomasse aus dem Rheinischen Revier exportiert. Inwieweit der lokale Biomassebedarf aus der heimischen Produktion gedeckt wird, konnte aufgrund fehlender Statistiken nicht genauer ermittelt werden. An dieser Stelle ist es wichtig zu erwähnen, dass in der folgenden Modellierung verschiedener Szenarien stets der überregionale Handel mit Agrargütern von dem Modell CAPRI mit einberechnet wird.

⁵ Berechnet anhand des bundesweiten Durchschnitts (siehe hierzu auch Kap 5.1)

6 Zukünftige Biomasseproduktion im Rheinischen Revier

6.1 Aufgabenstellung und Methodik

In Kapitel 5 wurde die derzeitige Biomasseproduktion in der Land- und Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier analysiert und mögliche Potenziale für eine stoffliche Nutzung abgeleitet. Aufgabenstellung dieses Kapitels ist es nun, zu analysieren, welchen Effekt bestimmte Entwicklungen, wie z. B. die Umsetzung umweltpolitischer Maßnahmen oder ein Rückgang der Fleischerzeugung auf die Biomasseproduktion in den Jahren 2035 und 2045 haben könnten. Dazu wurden vier verschiedene Szenarien mit dem agrarökonomischen Modell CAPRI berechnet. Da das Modell CAPRI die Ergebnisse auf Ebene der Regierungsbezirke ausgibt, wurden die Werte für die Regierungsbezirke Köln und Düsseldorf anhand der Landes-Agrarstatistik und Bevölkerungszahlen weiter auf die Kreise des Rheinischen Reviers heruntergerechnet. Neben dem Biomasseangebot berechnet das Modell CAPRI auch die Nachfrage nach Biomasse.

6.1.1 Begriffsbestimmung Biomasseproduktion/Biomasseangebot

Im Folgenden wird der Begriff Biomasseangebot anstatt Biomasseproduktion verwendet. Dies liegt daran, dass manche Parameter in den Szenarien (wie z. B. Kaskadennutzung, Reduktion von Lebensmittelabfällen) zwar Effekte auf das Biomasseangebot haben, jedoch nicht auf die Biomasseproduktion an sich. Unter Biomasse sind alle Haupternteprodukte inkl. Dauergrünland zusammengefasst, Nebenernteprodukte werden hier nicht dargestellt.

6.1.2 Exkurs: Das Modell CAPRI

Das Modell CAPRI unterstützt den politischen Entscheidungsprozess mittels quantitativer Analysen zur Gemeinsamen Agrarpolitik der EU (BRITZ UND WITZKE 2014). Ziel ist es, den Einfluss von agrarpolitischen Entscheidungen auf die Produktion, das Einkommen, den Markt, den Handel und die Umwelt global und regional abzuschätzen. Dies wird durch eine Kopplung regionaler oder betriebstypenspezifischer Angebotsmodelle mit einem globalen Marktmodell erreicht. Die Angebotsmodelle dienen der detaillierten Abbildung des europäischen Agrarsektors. Es kann zwischen zwei Aggregationsebenen ausgewählt werden. Die höhere Ebene umfasst ca. 280 Regionalmodelle auf NUTS-2-Regionen (= Regierungsbezirke), die tiefere Ebene ca. 2.500 Betriebsgruppenmodelle (GOCHT UND BRITZ 2011).

In den Angebotsmodellen sind die Umfänge der Produktionsverfahren sowie der Ertrag beinhaltet und können in der Intensität variiert werden. Die zur Verfügung stehende landwirtschaftliche Fläche wird in Abhängigkeit der Bodenrenten im Modell ermittelt. Zusätzlich kann Grün- und Ackerland substituiert werden. Das Marktmodell bildet den Agrarhandel ab und unterstellt Profitmaximierung für Produzenten und Nutzenmaximierung für Konsumenten. Beide Modellkomponenten sind inhaltlich und technisch eng verknüpft. Durch die Übergabe von Preisen aus dem Marktmodell in die Angebotsmodelle und durch die Rückgabe von Produktionseffekten an das Marktmodell finden beide Teile nach mehrmaliger Iteration einen Gleichgewichtspreis.

Das CAPRI-Modell beinhaltet historische Werte zu Agrarproduktion, die in Zeitreihen aus den offiziellen Statistiken der EU übernommen werden. Produktionszahlen sind z.B. auf NUTS-2-Regionen oder Betriebsgruppenebene vorhanden und durchschnittliche Erträge für die nationale Ebene.

Ein internationales Netzwerk ist für die Weiterentwicklung und Anwendung des Modells verantwortlich. Eine weiterführende Beschreibung des Modells in englischer Sprache ist unter www.capri-model.org verfügbar.

6.1.3 Beschreibung der Szenarien

Folgende vier Szenarien wurden im Rahmen dieser Studie mit dem Modell CAPRI modelliert:

1. **Szenario Business as usual (BAU)**
Trends der letzten Jahre setzen sich fort, Thünen-Baseline als Referenz
2. **Szenario Umwelt**
Ziele der EU-Farm to Fork Strategie werden erreicht und teilweise überschritten
3. **Szenario Technologie**
Etablierung landwirtschaftlicher Innovationen, Ausbau von Solar- und Windenergie
4. **Szenario Kombination Umwelt und Technologie (Kombi)**
Es werden die jeweils „höheren“ Werte eingesetzt

Um die Szenarien quantitativ unterscheiden zu können, wurden verschiedene Parameter, die Einfluss auf das Biomasseangebot haben können (z. B. die Entwicklung der Ackerflächen, der Anteil an ökologisch bewirtschafteten Flächen, Ertragsentwicklungen) definiert und mit entsprechenden Werten hinterlegt (siehe Tabelle 12). Die Szenarien und deren zugrundeliegenden Parameterwerte wurden u. a. mit Fachleuten in den projektbegleitenden Workshops erarbeitet. Im Folgenden werden die Szenarien näher erläutert. Rekultivierungsflächen wurden in den Szenarien nicht berücksichtigt.

6.1.3.1 Szenario Business as usual (BAU)

Das Szenario Business as usual (BAU) setzt die Trends der letzten Jahre fort, es stellt somit in dieser Studie das Referenzszenario dar. Die Werte für die jeweiligen Parameter wurden für das Jahr 2035 bis auf wenige Ausnahmen (s. u.) der Thünen-Baseline 2022-2032 (HAB et al. 2022) entnommen, sodass das in dem Modell CAPRI kalibrierte BAU-Szenario beinahe kongruent mit der Thünen-Baseline ist. Für das Jahr 2045 wurden die Werte bei einer Trendfortschreibung durch das nova-Institut errechnet.

Die Verpflichtung zur Stilllegung von 4 % der betrieblichen Ackerflächen wurde auch für die Jahre 2035 und 2045 angenommen. Diese Verpflichtung wurde im Jahr 2024 ausgesetzt. So ist auch der Anbau von Leguminosen oder Zwischenfrüchten nach einer Hauptkultur (kein Einsatz von Pflanzenschutzmitteln erlaubt) möglich, um die Anforderung zu erfüllen (BMEL 2024). Diese Ausnahmeregelung konnte im Projektverlauf nicht mehr berücksichtigt werden, was jedoch keinen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse haben dürfte.

Die in der Thünen-Baseline angenommenen Ertragssteigerungen wurden von verschiedenen Fachleuten als zu optimistisch angesehen und daher für die unterschiedlichen Kulturgruppen nach unten angepasst (basierend auf OECD/FAO 2023).

Auch für die Entwicklung des Ökolandbaus wurden in Absprache mit Fachexperten die Werte für das Rheinische Revier angepasst (8 % bis 2035).

6.1.3.2 Szenario Umwelt

Das Szenario Umwelt modelliert die Umsetzung der Ziele der europäischen Farm to Fork Strategie (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2020) im Rheinischen Revier, die Einfluss auf das Biomasseangebot haben können. Die Strategie legt fest, dass bis zum Jahr 2030 u. a. folgende Ziele erreicht sein sollen:

- 50 % weniger Pflanzenschutzmitteleinsatz
- 20 % weniger Düngemittleinsatz bzw. 50 % weniger Nährstoffverluste bei gleichbleibender Bodenfruchtbarkeit
- 25 % der landwirtschaftlichen Fläche (LF) werden ökologisch bewirtschaftet
- Auf mindestens 10 % der LF Landschaftselemente
- 50 % weniger Lebensmittelabfälle

Es wurde angenommen, dass diese Ziele bis 2035 erreicht und bis 2045 um weitere 50 % überschritten werden. Da die entsprechenden Zielwerte nicht 1:1 in das Modell CAPRI übertragen werden konnten, ergaben sich für die Modellierung ein paar Besonderheiten, die im Folgenden erläutert werden:

Ziele 1-3: In Abstimmung mit Fachleuten (MLV, LWK NRW) wurden begründete Annahmen getroffen, wie sich die jeweilige Umsetzung der Ziele auf die Biomasseproduktion auswirken können und diese dann in die Ertragsfunktion des Modells integriert. So wurde z. B. ein leichter Rückgang des Pflanzenschutz- und Düngemittleinsatzes als wirkungsneutral angenommen (je nach Szenario 20% und 30%), danach sinkt der Ertrag linear mit jedem weiter reduzierten Prozent an Einsatzstoffen. Auch für den Ökolandbau wurden für verschiedene Kulturen die Erträge in Absprache mit Expertinnen und Experten reduziert sowie der Zielwert „25 % Ökolandbau“ für die Region angepasst.

Ziel 4: Der Anteil der LF mit Landschaftselementen (10 %) wird modellbedingt als Stilllegungsfläche ausgewiesen.

Ziel 5: Die Reduktion von Lebensmittelabfällen wurde in dem Modell CAPRI mit einer entsprechenden Reduktion der Nachfrage nach frischer Nahrung abgebildet.

Des Weiteren wurde in diesem Szenario davon ausgegangen, dass verstärktes Umweltbewusstsein zu einem geringeren Fleischkonsum in der Bevölkerung führt, weshalb die Fleischproduktion in diesem Szenario reduziert wurde. Dabei bleibt der Zuwachs an Geflügelkonsum in dem vorliegenden Szenario bis 2035 gleich und schwächt sich erst danach ab, da Geflügel eine deutlich effizientere Futtermittelverwertung hat und somit ressourcenschonender ist (STADLER 2010). Dennoch wurden die aus der Thünen-Baseline stammenden Werte zur Reduktion von Ackerflächen beibehalten, um den Einfluss der genannten Parameter deutlicher darstellen zu können.

6.1.3.3 Szenario Technologie

Mit dem Szenario Technologie soll modelliert werden, inwieweit die Etablierung landwirtschaftlicher Innovationen als auch ein Ausbau von Solar- und Windenergie Effekte auf das Biomasseangebot haben können. Dem Szenario liegen folgende Annahmen zugrunde:

- Aufgrund eines starken Ausbaus von Wind- und Solarenergie sowie durch Elektrifizierung von immer mehr Prozessen findet ein Rückgang des Energiepflanzenanbaus statt.
- Durch Precision farming und erhebliche Züchtungsfortschritte können die Biomasseerträge bei gleichbleibendem Betriebsmitteleinsatz deutlich gesteigert werden.

Wichtig ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die hier angenommenen Werte weder als realistisch noch als Vorhersage interpretiert werden sollten. Vielmehr handelt es sich um explorative Annahmen, um zu überprüfen, wie sich die Biomasseproduktion entwickeln würde, falls ein derartiger technologischer (Züchtungs-)Fortschritt stattfinden könnte. Die Annahmen wurden von Fachleuten in den projektbegleitenden Workshop sowie in weiteren Fachgesprächen dennoch als möglich bestätigt (KEMPEN 2024).

- Technologischer Fortschritt ermöglicht eine vermehrte Nutzung von Nebenernteprodukten und steigert die kaskadische Nutzung von Biomasse.

Analog zu dem Parameter „Lebensmittelabfälle“ im Szenario Umwelt lassen sich auch die Parameter „Nutzung Nebenernteprodukte“ sowie „Kaskadennutzung“ in dem Modell CAPRI nicht direkt abbilden. So wie die Reduzierung von Lebensmittelabfällen in der Modelllogik zu einer Entspannung auf der Nachfrageseite führt, so ist bei diesen beiden Parametern die Annahme getroffen worden, dass sie zu einer Erhöhung des Biomasseangebots führen. Bezogen auf den Parameter „Kaskadennutzung“ bedeutet ein Wert von 5 beispielsweise, dass 5 % der industriell genutzten Biomasse erneut verwendet werden.

- Technologische Fortschritte in der Erzeugung synthetischer tierischer Produkte führen zu einem Rückgang der Fleischproduktion und des Futteranbaus.

6.1.3.4 Szenario Kombi Umwelt und Technologie

Dieses Szenario kombiniert die Szenarien Umwelt und Technologie. Dabei wurden die jeweils höheren Werte eingesetzt, d. h. es kombiniert zum Beispiel den reduzierten Düngemiteleinsatz des Szenario Umwelt mit den durch technologischen Fortschritt erreichten Ertragssteigerungen.

Tabelle 12: Überblick über die Parameter aller vier Szenarien (alle +/- %-Werte in Bezug auf Referenzjahr 2020)

		Szenario:	BAU		Umwelt		Technologie		Kombi Umwelt/ Technologie*	
		Jahr:	2035	2045	2035	2045	2035	2045	2035	2045
Landwirtschaftliche Flächen	Ackerflächen		-1,4%	-2,8%	-1,4%	-2,8%	-1,4%	-2,8%	-1,4%	-2,8%
	Ackerflächen für Silomais (Futter und Energie)		-35%	-35%	-35%	-40%	-35%	-50%	-35%	-50%
	Ackerflächen für Futterbau		-3%	-6%	-3%	-6%	-3%	-20%	-3%	-20%
	Ackerflächen für Getreideanbau		+2%	+4%	+2%	+4%	+2%	+4%	+2%	+4%
	Ackerflächen für Ölsaatenanbau		+5%	+10%	+5%	+10%	+5%	+10%	+5%	+10%
	Stilllegungsfläche (inkl. Landschaftselemente)		4%	4%	10%	15%	4%	4%	10%	15%
Erträge	Anteil Ökolandbau an der LF		8%	8%	8%	30%	8%	20%	8%	30%
	Pestizideinsatz		n/a	n/a	-50%	-75%	n/a	n/a	-50%	-75%
	Düngemitelesinsatz		n/a	n/a	-20%	-30%	n/a	n/a	-20%	-30%
	Ertragsentwicklung Getreide		+1,4%	+3,6%	+1,4%	+3,6%	+7%	+35%	+7%	+35%
	Ertragsentwicklung Zuckerrübe		+ 0,2%	+0,6%	+0,2%	+0,6%	+1%	+10%	+1%	+10%
	Ertragsentwicklung Ölsaaten		+9,7%	+25,4%	+9,7%	+25,4%	+22%	+40%	+22%	+40%
Neben- produkte	Nutzung Nebenprodukte & Reststoffe		n/a	n/a	n/a	n/a	10%	30%	10%	30%
	Lebensmittelabfälle		n/a	n/a	-50%	-75%	n/a	n/a	-50%	-75%
	Kaskadennutzung		n/a	n/a	n/a	n/a	5%	20%	5%	20%
Fleisch- produk- tion	Rindfleischerzeugung (D)		-4%	-10%	-8%	-25%	-8%	-40%	-8%	-40%
	Schweinefleischerzeugung (D)		-18%	-25%	-18%	-40%	-18%	-60%	-18%	-60%
	Geflügelfleischerzeugung (D)		+7%	+10%	+7%	+5%	+7%	+2%	+7%	+2%

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Biomasseangebot im Referenzjahr 2020 – Vergleich des Modell CAPRI mit der Agrarstatistik NRW

Mit dem Modell CAPRI wurde für das Jahr 2020 eine Gesamtmenge von ca. 2,26 Mio. t TM Biomasse berechnet. In dem vorherigen Kapitel wurde jedoch anhand der Landesagrarstatistiken lediglich eine Menge von ca. 1,76 Mio. t TM ermittelt (vgl. Kap. 5.2). Diese ca. 0,5 Mio. t Unterschied basieren auf mehreren Gründen, die hier kurz erläutert werden sollen: Zum einen nutzt das Modell CAPRI disaggregierte Werte auf Ebene von NUTS-2-Regionen auf der Grundlage deutscher Daten, die den Regierungsbezirken entsprechen. Hier wurden, wie bereits eingangs erwähnt, die Werte für die Regierungsbezirke Köln und Düsseldorf anhand der Landes-Agrarstatistik und Bevölkerungszahlen weiter auf die Kreise des Rheinischen Reviers heruntergerechnet. Des Weiteren verwendet das Modell CAPRI, vor allem bei Zuckerrüben, einen höheren TM-Gehalt, wodurch höhere Erträge berechnet werden. Auch für die Futterbauerträge (Silomais, Grünland) berechnet das Modell CAPRI höhere Erträge als die Landesstatistik. Weiterhin wurde in Kapitel 5 Biomasse aus Obst und Gemüse nicht in die Rechnung einbezogen, das Modell CAPRI beinhaltet aber diese Biomasse.

6.2.2 Biomasseangebot im Szenario business as usual: Vergleich des Referenzjahres 2020 mit den Jahren 2035 und 2045

Der Vergleich zwischen dem Referenzjahr 2020 und den Jahren 2035 und 2045 im Szenario business as usual (BAU) zeigt, dass sich bei einer Trendfortschreibung die Gesamtmenge an Biomasse von ungefähr 2,26 Mio. t TM im Jahr 2020 auf ca. 2,43 bzw. 2,48 Mio. t TM in den Jahren 2035 und 2045 leicht erhöhen wird, trotz eines Rückgangs der landwirtschaftlichen Flächen. Dieser Flächenrückgang wird zum einen durch die Steigerung der Erträge ausgeglichen. Zum anderen wird bereits im Szenario BAU ein deutlicher Rückgang des Maisanbaus angenommen bei gleichzeitiger Zunahme des Rapsanbaus. Gerade für Raps (und andere Ölpflanzen) werden in den nächsten Jahren noch starke Ertragssteigerungen angenommen.

6.2.3 Modellierte Ertragsentwicklung in den Szenarien

Die getroffenen Annahmen in den vier verschiedenen Szenarien führen grundsätzlich zu unterschiedlichen modellierten Ertragsentwicklungen. Beispielhaft werden diese für die Kulturen Raps, Weizen und Zuckerrübe modelliert (Abbildungen 8, 9, 10).

Zunächst kann festgehalten werden, dass die vier Szenarien hinsichtlich der modellierten Ertragsentwicklungen bis zum Jahr 2035 noch relativ nah beieinanderliegen und die Unterschiede in den Erträgen besonders deutlich im Jahr 2045 sind.

Das Szenario Technologie geht von den höchsten Ertragsentwicklungen aus, was in den Annahmen zu züchterischem Fortschritt und Präzisionslandwirtschaft begründet ist. Das Szenario Umwelt projiziert hingegen die niedrigsten Erträge, insbesondere aufgrund der Reduktion von Pflanzenschutz- und Düngemittelsinsatz sowie der Erhöhung der ökologisch bewirtschafteten Fläche. Das Szenario BAU verdeutlicht, dass die Ertragsannahmen sich in den vorherrschenden Studien (OECD/FAO 2023, EU 2022) für die jeweiligen Kulturen sehr unterscheiden.

Während man bei Ölpflanzen von großen potenziellen Ertragssteigerungen ausgeht (12 bis 44 %), sind Zuckerrübe und insbesondere Weizen mit klassischen Züchtungstechnologien bereits jetzt weitestgehend ausoptimiert. Das Szenario Kombi Umwelt und Technologie (Kombi U&T) liegt zwischen dem Technologie- und dem Umweltszenario und bleibt von den Ertrags-effekten her meist leicht unter dem Szenario BAU.

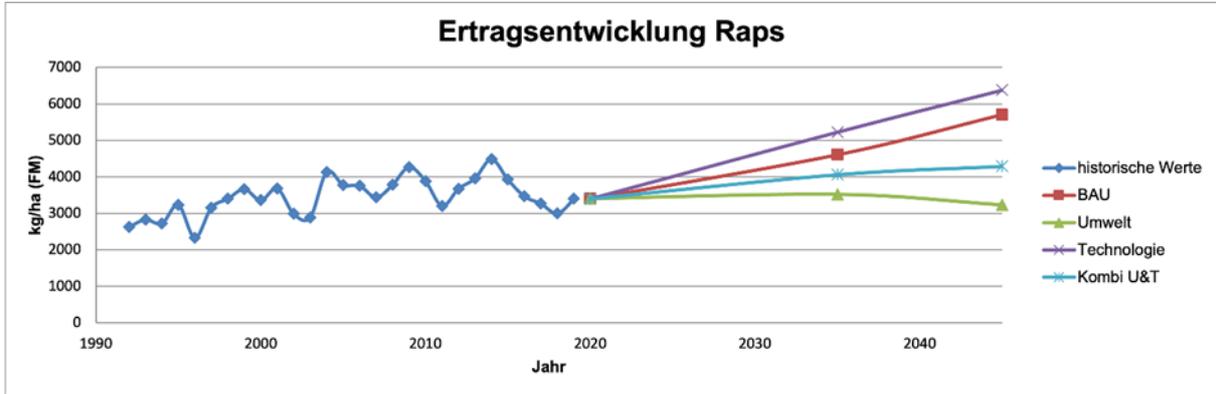


Abbildung 8: Modellierte Ertragsentwicklung von Raps (nova-Institut 2024, CAPRI)

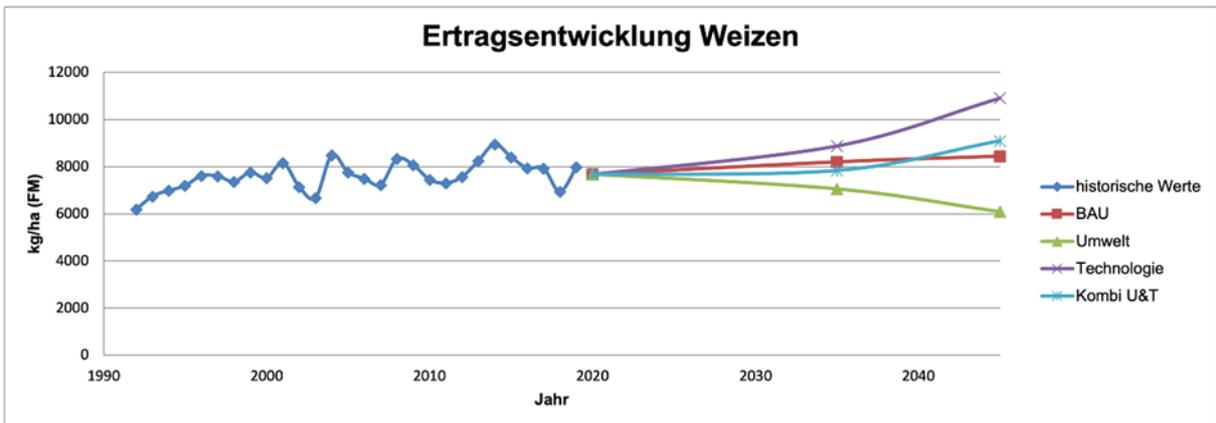


Abbildung 9: Modellierte Ertragsentwicklung von Weizen (nova-Institut 2024, CAPRI)

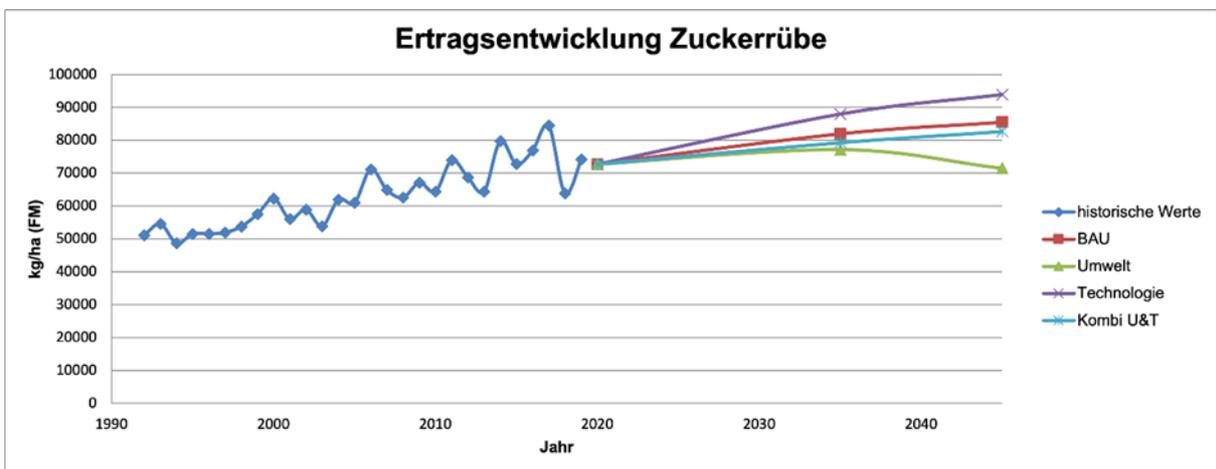


Abbildung 10: Modellierte Ertragsentwicklung von Zuckerrübe (nova-Institut 2024, CAPRI)

6.2.4 Biomasseangebot und -nachfrage in den Szenarien

Die Berechnung des Angebots und der Nachfrage nach Biomasse im Rheinischen Revier bis 2035 bzw. 2045 zeigt, dass in fast allen Szenarien das Angebot die Nachfrage übersteigen würde. Nur im Szenario Umwelt wäre im Jahr 2045 die Bilanz ausgeglichen (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12).

Die Analyse der Szenarien zeigt, dass die getroffenen Annahmen zum Biomasseangebot insbesondere bis 2045 starke Effekte zeigen können. Bis 2035 liegen die vier Szenarien noch recht nah aneinander, aber bis 2045 ginge das Biomasseangebot im Szenario Umwelt merklich zurück, wohingegen es im Szenario Technologie deutlich steigen würde. Letzteres liegt an den hohen angenommenen Erträgen und ist somit schlüssig. Aber auch die Annahmen zu Kaskadennutzung und der erhöhten Verwendung von Reststoffen können dazu beitragen, dass das Delta zwischen Angebot und Nachfrage in den Szenarien Technologie und Kombi Umwelt & Technologie so groß ist.

Die Biomassenachfrage steigt von 2035 bis 2045 im Szenario BAU am stärksten, in zwei Szenarien nur leicht und im Umweltszenario sinkt sie sogar. Im Rheinischen Revier wird kein starkes Bevölkerungswachstum angenommen. Das Modell geht außerdem automatisch von einer leichten Effizienzsteigerung im Bereich Lebensmittelverluste aus, trotzdem steigt der Bedarf im Szenario BAU von 2035 bis 2045 wieder an. Die getroffenen Annahmen zu Reduktion von Fleischproduktion, Vermeidung von Lebensmittelverlusten und verstärkter Reduktion der Biogasproduktion können also zu einem Rückgang der Nachfrage im Vergleich zwischen dem Szenario BAU und den anderen drei Szenarien führen – auch hier sind die Effekte vor allem bis 2045 gut sichtbar.

Die hoch angesetzten Erträge im Szenario Technologie haben die stärksten Effekte auf das Delta zwischen Biomasseangebot und -nachfrage. Die Annahmen im Szenario Umwelt führen im Jahr 2045 zu deutlichen Rückgängen des Biomasseangebots.

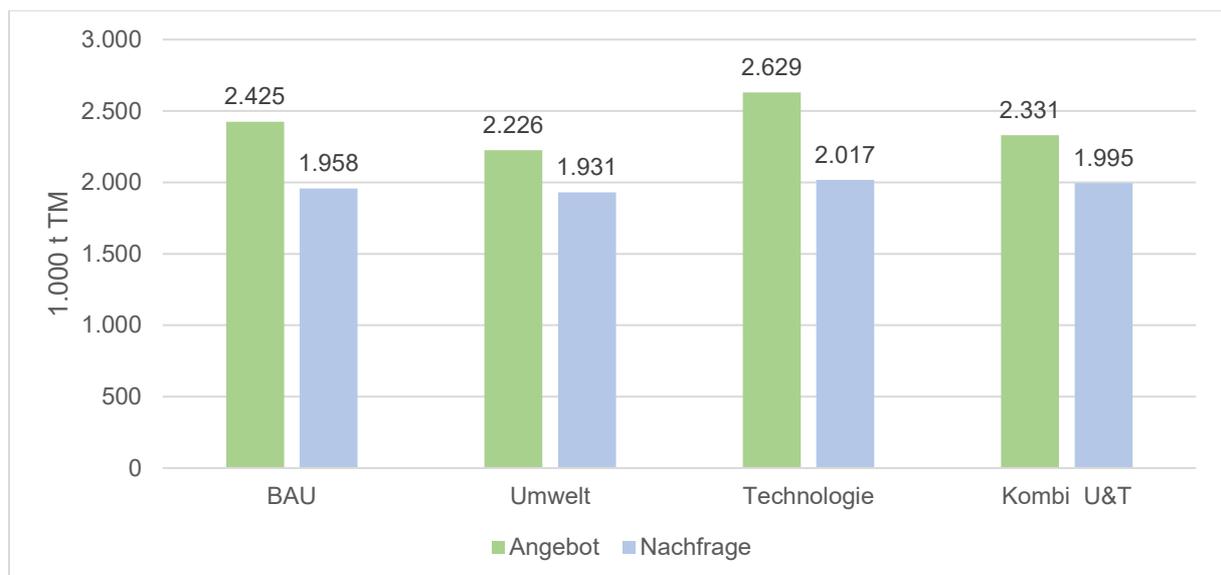


Abbildung 11: Biomasseangebot und -nachfrage in den Szenarien im Jahr 2035 im Rheinischen Revier (nova-Institut 2024, CAPRI)

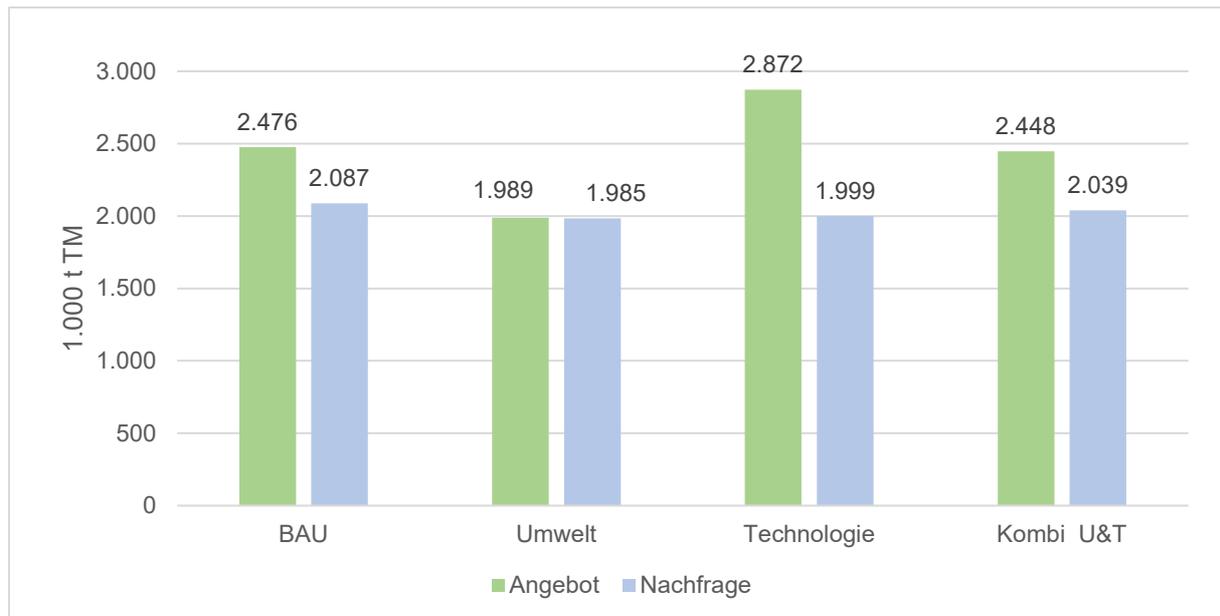


Abbildung 12: Biomasseangebot und -nachfrage in den Szenarien im Jahr 2045 im Rheinischen Revier (nova-Institut 2024, CAPRI)

6.3 Zusammenfassung und Fazit

Mit dem agrarökonomischen Modell CAPRI wurden vier verschiedene Szenarien berechnet, um abzuschätzen, welche Effekte bestimmte Entwicklungen auf das Biomasseangebot in den Jahren 2035 und 2045 haben können.

Im Szenario Umwelt, in dem davon ausgegangen wird, dass die Ziele der EU-Farm to fork Strategie erreicht werden (z. B. verringerter Pestizid- und Düngemittleinsatz) reduziert sich das Biomasseangebot bis zu den Jahren 2035 und 2045. Dahingegen erhöht sich das Angebot an Biomasse in Zukunft durch die Etablierung von Technologien im Bereich precision farming oder auch aufgrund einer kaskadischen Nutzung von Biomasse (Szenario Technologie). Auch in dem Szenario BAU, in dem eine Trendfortschreibung der Entwicklung der letzten Jahre modelliert wurde, steigen die Erträge im Vergleich zum Referenzjahr 2020, was insbesondere mit den zu erwartenden Ertragsteigerungen im Anbau von Ölfrüchten zusammenhängen kann.

In drei Szenarien (Ausnahme Szenario Umwelt), und besonders deutlich im Szenario Technologie, würde das Angebot an Biomasse dessen Nachfrage übersteigen. Wie in Kapitel 5.2 aufgezeigt werden konnte, wird die Biomasse im Rheinischen Revier jedoch stark von allen Sektoren nachgefragt, insbesondere für die Verwendung als Futter- und Nahrungsmittel, so dass hier nicht von einem Überschuss bzw. Potenzial ausgegangen werden kann. Vielmehr lässt sich daraus schließen, dass das Rheinische Revier ein wichtiger Nahrungs- und Futtermittellieferant für die umliegenden Kreise und Metropolregionen ist. Welche Mengen an Biomasse importiert oder exportiert werden, lässt sich aufgrund fehlender Statistiken nicht für das Rheinische Revier herleiten, könnte aber gegebenenfalls Gegenstand weiterer Untersuchungen werden.

7 Ökonomische Analyse

7.1 Zielsetzung und Methodik

In diesem Kapitel wird mit dem Modell CAPRI analysiert, ob und wie sich die Produzentenpreise⁶ verschiedener Kulturen in den vier Szenarien BAU, Umwelt, Technologie und Kombi verändern können. Zum besseren Verständnis sind die Szenarien hier noch einmal kurz erläutert, eine umfangreiche Beschreibung dieser findet sich in Kap 6.1.3.

1. **Szenario Business as usual (BAU)**
Trends der letzten Jahre setzen sich fort, Thünen-Baseline als Referenz
2. **Szenario Umwelt**
Ziele der EU-Farm to Fork Strategie werden erreicht und teilweise überschritten
3. **Szenario Technologie**
Etablierung landwirtschaftlicher Innovationen, Ausbau von Solar- und Windenergie
4. **Szenario Kombination Umwelt und Technologie (Kombi)**
Es werden die jeweils „höheren“ Werte eingesetzt

Darüber hinaus wird zusätzlich modelliert, welche Auswirkung die Inbetriebnahme verschiedener kommerzieller Anlagen im Rheinischen Revier, die auf Basis biogener Rohstoffe produzieren, auf die Produzentenpreise haben können. Insgesamt wurden drei verschiedene Anlagen konzipiert (Eckdaten siehe Tabelle 13) und ihr entsprechender Rohstoffbedarf als sogenannter „Nachfrageschock“ in das Modell eingebaut. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass das Modell CAPRI den überregionalen Handel mit Biomasse berücksichtigt (also nicht davon ausgeht, dass der Rohstoffbedarf der Anlagen zwangsläufig aus der Region gedeckt wird) und zudem die Preise auf nationaler Ebene berechnet.

Die drei konzipierten Anlagen decken zwei unterschiedliche Technologietypen (Fermentation und Oleochemie) sowie drei Rohstoffe ab, die im Rheinischen Revier vorkommen. Die Größenmaßstäbe variieren stark, um diesen Effekt betrachten zu können. Mit PLA- und Tensidproduktion wurden zwei Prozesse betrachtet, die bereits jetzt kommerziell etabliert sind. Die Maßstäbe der Anlagen wurden so angelegt, dass sie auf Basis der globalen Marktlage kommerziell konkurrenzfähig sein könnten. Für alle Anlagen wurde der Rohstoffbedarf mithilfe der einschlägigen Literatur berechnet.

Die Modellierungen wurden für die Kulturen Weizen, Zuckerrübe und Raps durchgeführt, da sie, außer Mais und Kartoffeln, die mengenmäßigen wichtigsten Anbaukulturen im Rheinischen Revier sind und die letzteren keine große Rolle für die stoffliche Nutzung spielen, mit Ausnahme der klassischen Nutzung der Kartoffelstärke für Papier. Für die Entwicklung innovativer Technologien bei Firmen stehen Weizen und Zuckerrüben deutlich stärker im Zentrum der Aufmerksamkeit (NOVA-INSTITUT 2024).

⁶ Produzentenpreis = Variabler Produzentenpreis im Modell CAPRI entspricht dem Erzeugerpreis für landwirtschaftliche Produkte

Tabelle 13: Eckdaten der Anlagen, deren Rohstoffbedarf als Nachfrageschock in das Modell CAPRI eingebaut wurden

Hergestelltes Produkt	Produktionsmaßstab (t/Jahr)	Rohstoffbedarf (t FM)
Polymilchsäure (PLA)	75.000	690.000 Zuckerrüben
Polymilchsäure (PLA)	75.000	272.000 Weizen
Tensid (Palmitinsäure)	5.000	125.000 Rapsöl

Quelle: NOVA-INSTITUT 2024, nach: IFBB 2023, TWEDDLE 2023, DGF 2008, VOLLMANN & RAJCAN 2009, MATTHAUS et al. 2016, BETTENHAUSEN 2022, MACLEMAN 2022,

7.2 Ergebnisse

7.2.1 Modellierte Produzentenpreise in den verschiedenen Szenarien

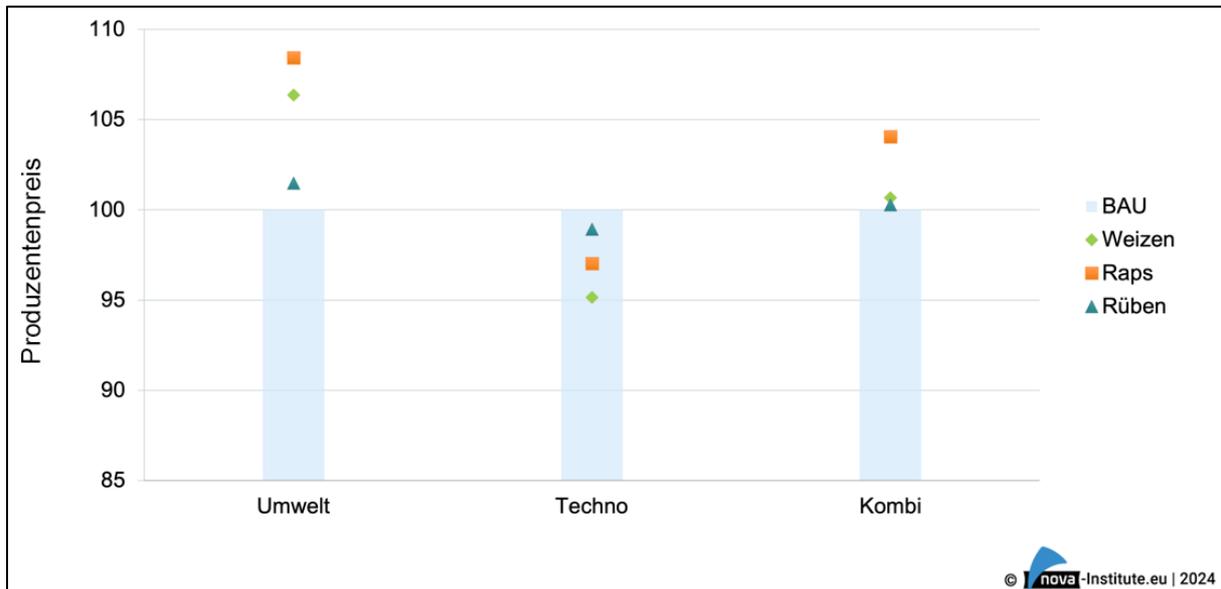


Abbildung 13: Produzentenpreis in den Szenarien Umwelt, Technologie und Kombi im Jahr 2045, Referenz = Szenario BAU (nova-Institut 2024, CAPRI)

Abbildung 13 stellt die Veränderung der modellierten Produzentenpreise für Weizen, Raps und Zuckerrüben in den verschiedenen Szenarien Umwelt, Technologie und Kombi Umwelt & Technologie im Vergleich zum Szenario BAU im Jahr 2045 dar. Demnach steigen die Preise im Szenario Umwelt für Raps um 8,4 % und für Weizen 6,4 %. Im Szenario Technologie fallen die Preise bis zu knapp 5 % für Weizen und 3 % für Raps. Das Szenario Kombi liegt in der Mitte. Die Zuckerrübenpreise sind die stabilsten und bewegen sich zwischen 0,7 % und 1,5 % auf und ab.

Die Konsumentenpreise wurden ebenfalls vom Modell ermittelt. Da die Produzentenpreise allerdings nur einen kleinen Teil der finalen Konsumentenpreise⁷ ausmachen (beispielsweise

⁷ Im Gegensatz zum Produzentenpreis bezeichnen die Konsumentenpreise die Preise für die fertig verarbeitete Biomasse (zum Beispiel Produzentenpreise für Weizen, Konsumentenpreise für Brötchen).

hat der Weizenpreis nur einen geringen Einfluss auf den Brötchenpreis), sind die Auswirkungen der Szenarien hier vernachlässigbar und bewegen sich zwischen 0,01% und 0,15%. Einen Überblick über alle Preisentwicklungen im Vergleich zum BAU-Szenario als Index bietet Anhang IV.

7.2.2 Modellierte Produzentenpreise bei verstärkter Biomassenachfrage

Abbildung 14 zeigt die Preisveränderungen im Szenario Kombi unter Annahme der jeweiligen Nachfrageschocks im Vergleich zum Szenario BAU im Jahr 2035. Die Preissteigerungen bedingt durch Nachfrageschocks liegen zwischen 0,03 % und 0,08 % bei Weizen und Raps, bei einer verstärkten Nachfrage nach Zuckerrübe steigt der Produzentenpreis um 0,65 %. Die Effekte für das Jahr 2045 sind ähnlich (hier nicht dargestellt).

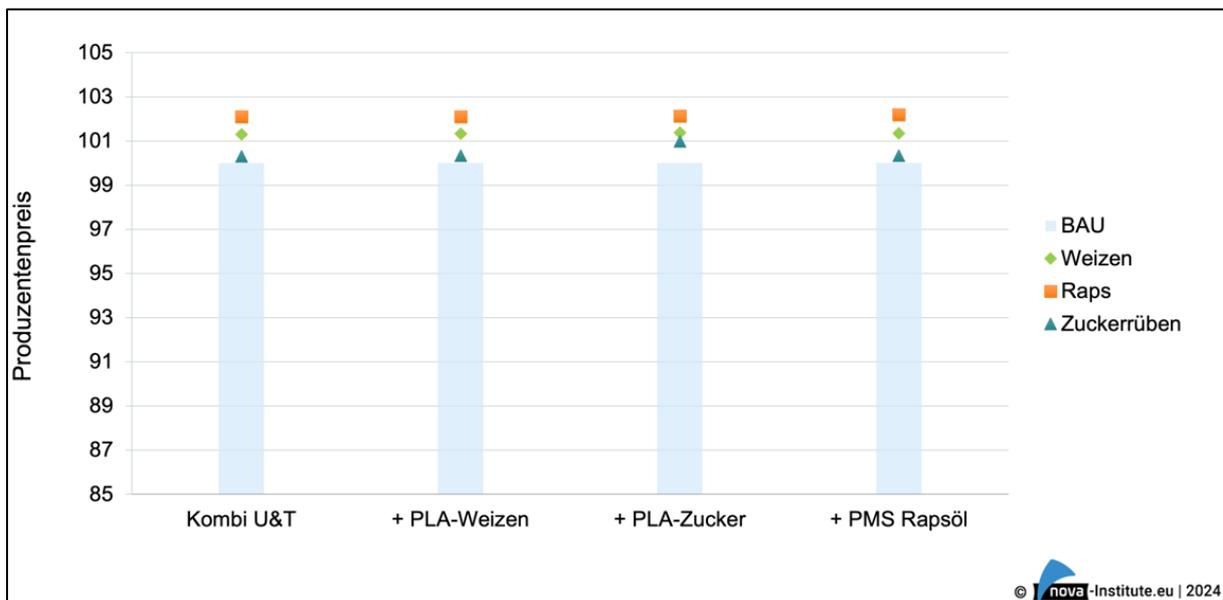


Abbildung 14: Produzentenpreise im Szenario Kombi bei verstärkter Nachfrage nach Weizen, Raps und Zuckerrüben im Jahr 2035, Referenz = Szenario BAU (nova-Institut 2024, CAPRI)

7.3 Zusammenfassung und Fazit

Die Berechnung der Produzentenpreise von Raps, Weizen und Zuckerrüben mit CAPRI hat zunächst gezeigt, dass diese sich in den Szenarien unterscheiden. Im Szenario Umwelt würde der Produzentenpreis um bis zu 8,4 % (Raps) steigen im Vergleich zum Szenario BAU (im Jahr 2045), analog sinkt er im Szenario Technologie bis zu 5 % (Weizen).

Im Vergleich zu den Veränderungen der Produzentenpreise zwischen den jeweiligen verschiedenen Szenarien hat die Modellierung zusätzlicher „Nachfrageschocks“ einen geringeren Effekt. Hier steigt am stärksten der Produzentenpreis für Zuckerrüben (um 0,65 %), wenn diese vermehrt nachgefragt werden, was gegebenenfalls daran liegen könnte, dass Zuckerrüben wenig transportwürdig sind. Bei einer steigenden Nachfrage nach Weizen und Raps würde der Produzentenpreis um 0,03 % bzw. 0,08 % steigen. Diese relativ geringen Preissteigerungen könnten durch zwei modellinhärente Annahmen erklärt werden: Zum einen berücksichtigt das Modell CAPRI auch Importe und Exporte von Biomasse und geht nicht davon aus, dass der

Rohstoffbedarf einer Anlage im Rheinischen Revier zwangsläufig aus der Region gedeckt wird, zum anderen berechnet das Modell die Preise auf nationaler Ebene. Daher wurde mit dem Modell CAPRI vielmehr berechnet, welchen Effekt die Errichtung einer Anlage im Rheinischen Revier auf die Produzentenpreise in Deutschland haben könnte. Berücksichtigt man diese beiden Aspekte, relativieren sich die auf den ersten Blick geringen Preissteigerungen. Bei der Errichtung mehrerer Anlagen würden sich die Effekte wahrscheinlich kumulieren. Für Rohstoffe, die keinem Weltmarktpreis unterliegen, wie z. B. Getreidestroh, könnte eine veränderte Nachfrage auch Effekte auf Preise innerhalb kleinerer Regionen haben.

Betrachtet man die Preisentwicklung von fossilen und biotischen Rohstoffen über mehrere Jahre, sieht man vor allem eine signifikante Korrelation zwischen Ölpreisen und Biomassepreisen, da die Landwirtschaft stark von fossilen Energiequellen abhängig ist. Andere Effekte sind vergleichsweise gering (PORC & CARUS 2022, basierend auf IMF, World Bank und ANRPC). Welche Effekte Preissteigerungen durch eine höhere Nachfrage nach Biomasse haben könnten z. B. auf die Transportwürdigkeit und damit verbunden vermehrter Lieferverkehr und steigende CO₂-Emissionen wäre für Folgestudien ein interessanter Untersuchungsansatz.

8 Vorschlag für ein Bewertungsschema

Um Förderanträge für Bioökonomieprojekte (im Folgenden werden hierunter Forschungs- und Industrievorhaben verstanden, die eine stoffliche Nutzung von Biomasse aus der Land- und Ernährungswirtschaft vorsehen) nach festgelegten Nachhaltigkeitskriterien bewerten und priorisieren zu können, wurde in diesem Projekt ein entsprechender Vorschlag für ein Bewertungsschema konzipiert. Dieses soll den Bewilligungs- und Genehmigungsbehörden bei der objektiven Auswahl und der Priorisierung geeigneter Projekte dienen. Weiterhin unterstützt es Antragstellende dabei, sich mit den Auswirkungen der stofflichen Nutzung von Biomasse im Rheinischen Revier auf die Nachhaltigkeit auseinanderzusetzen und ggf. entsprechende Verbesserungen in der Projektplanung und den Anträgen vorzunehmen.

Der entwickelte Vorschlag für das Bewertungsschema wird in diesem Bericht nicht veröffentlicht, da er für den internen Gebrauch bestimmt ist. Im Folgenden wird aber dargestellt, wie das Bewertungsschema aufgebaut ist und wie bei dessen Konzeptionierung wichtige Anforderungen an die Anwendbarkeit in der Förderpraxis berücksichtigt wurden.

Das Regelfördervorhaben (Projektauftrag REVIER.GESTALTEN) sieht vor, dass in der ersten Phase (Dialogphase) eine Kurz-Skizze des Antragstellers einer Vorprüfung durch Projektträger Jülich (PtJ) und den bewilligenden Stellen des Landes unterzogen wird. Hier wird auch geprüft, anhand der Handreichung Nachhaltigkeit, ob das Projekt „im Einklang mit den Nachhaltigkeitszielen im Rahmen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie steht“. Dies bedeutet konkret, dass das Projekt einen positiven Beitrag zur Erreichung mindestens eines der Nachhaltigkeitsziele (SDG) leisten muss, als auch, dass es keine signifikanten negativen Auswirkungen auf die Nachhaltigkeitsziele hat (Do no significant harm). Die Handreichung wird von den Antragstellern ausgefüllt und durch PtJ geprüft und bewertet.

8.1 Standards und Regelwerke im Bereich Biomasse

Als Basis für das Bewertungsschema wurden folgende Regelwerke genutzt:

- EU-Taxonomie Verordnung
- RED III (Erneuerbare-Energien Richtlinie der EU)
- Diverse Nachhaltigkeitszertifikate für Biomassennutzungen
 - ISCC+ (International Sustainability & Carbon Certification)
 - RSB (Roundtable on Sustainable Biomaterials)
 - REDcert
 - Better Biomass
 - FSC (Forest Stewardship Council)
 - RSPO (Roundtable on sustainable palm oil)
- Internationale Standards:
 - ISO 13065 (Nachhaltigkeitskriterien für Bioenergie)
 - EN 16214 (Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von Biokraftstoffen und flüssigen Biobrennstoffen für Energieanwendungen)
 - EN 16751 (Biobasierte Produkte – Nachhaltigkeitskriterien)

Einen Überblick über deren Anforderungen an Biomasse gibt Tabelle 14.

Tabelle 14: Anforderungen an Biomasse verschiedener Regelwerke (Übersicht erstellt durch nova-Institut, 2024)

	Anforderung ⁸	EU-Taxonomie	REDIII	ISCC +	RSB	Better Biomass	REDcert	FSC	RSPO	Intern. Stds. ⁹
KLIMA SCHÜTZEN	Keine Produktion auf Boden mit hohem Kohlenstoffgehalt	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
	Kohlenstoffgehalt im Boden wird erhöht		✓							
	THG-Emissionen verringern	✓	✓	✓	✓	✓				✓
	Dünger effizient nutzen	✓								
	Waldmanagementplan	✓	✓					✓	✓	
	Begrenzte Nutzung von Rohstoff mit hohem iLUC-Risiko	✓	✓							
	Ausschließliche Nutzung von Rohstoff mit niedrigem iLUC-Risiko			✓	✓	✓	✓			
BIODIVERSITÄT SCHÜTZEN	Keine Produktion auf Flächen mit hoher Biodiversität		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
	Biodiversität schützen und steigern	✓		✓	✓	✓		✓		
	Negative Ernteeffekte auf Biodiversität minimieren		✓	✓	✓	✓		✓	✓	
	Gute Praktiken in der Schädlingsbekämpfung	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Keine Einfuhr invasiver Arten	✓		✓	✓	✓				
WASSER-RESSOURCEN SCHÜTZEN	Vermeidung der Erschöpfung von Oberflächen- oder Grundwasserressourcen über die Wiederauffüllungskapazitäten hinaus			✓	✓	✓		✓	✓	✓
	Vermeidung gefährlicher Chemikalien	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Gute Praktiken für Nutzung, Aufbewahrung, Handhabung, Entsorgung von (Agrar-) Chemikalien	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Maßnahmen, um Wasserverschmutzung zu verhindern	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Reinigungsmaßnahmen im Fall von Verschmutzung	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
BODEN SCHÜTZEN	Gute landwirtschaftliche Praktiken, um Bodenqualität & -produktivität zu schützen		✓							
LUFTQUALITÄT SCHÜTZEN	Offene Verbrennung vermeiden	✓	✓	✓	✓	✓				✓
	Die Nutzung von gefährlichen Chemikalien und Pestiziden kontrollieren oder abschaffen	✓								
SOZIALE STANDARDS	Menschen- Arbeits- und Landrechte einhalten	✓	✓					✓	✓	

⁸ Die Einhaltung der Anforderung wird häufig anhand sogenannter „Managementpläne“ geprüft.

⁹ Internationale Standards: ISO 13065, EN 16214, EN 16751

8.2 Konzeptionierung des Bewertungsschemas

Die genannten Regelwerke sowie auch andere Bewertungsverfahren von Förderprogrammen, insbesondere des EU Innovation Fund, wurden als Grundlage für das Bewertungsschema genutzt; ebenfalls wie die Ergebnisse eines projektbegleitenden Workshops u. a. mit Vertreterinnen und Vertretern von Projektträgern und Bewilligungsbehörden (z. B. MUNV, MLV, BAFA, PtJ, LANUV), in dem Anforderungen an das Bewertungsschema, vor allem hinsichtlich der Anwendbarkeit in der Praxis, erarbeitet und diskutiert wurden. Dabei ergaben sich im Wesentlichen folgende Anforderungen an das Bewertungsschema:

Abgestufte Anwendung

Die Anwendung des Bewertungsschemas sollte nicht dazu führen, dass weniger oder keine Anträge mehr gestellt werden, da der Arbeitsaufwand zu hoch erscheint. Dies wurde bei der Konzeptionierung insofern berücksichtigt, als dass das Bewertungsschema in Abstufungen für Projekte unterschiedlicher „Größe“ angewendet werden soll.

Die im Bewertungsschema definierten Anforderungen an die Biomasse müssen von allen Bioökonomieprojekten erfüllt werden, sofern die Biomasse außerhalb der EU produziert wird. Wird die Biomasse innerhalb der EU produziert, gelten die Anforderungen aufgrund gängiger EU-Vorgaben (z. B. EU-Düngeverordnung) als erfüllt. Die weitere Einteilung der Projekte wird anhand des TRL und/oder des Projektvolumens vorgenommen. So müssten bei der Förderung von Pilotanlagen ab TRL 6 zusätzlich die THG-Emissionen sowie der Energieverbrauch der zu entwickelnden Wertschöpfungskette berichtet werden. Für (nahezu) kommerzielle Anlagen mit einem TRL 8 und 9 gelten die höchsten Anforderungen und es muss anhand eines standardisierten Berichts (ISO 14067) nachgewiesen werden, dass die THG-Emissionen des neuen Produkts geringer sind als die des fossilen Benchmarks.

Analog zum TRL können die Projekte ebenfalls anhand der Fördersumme eingestuft werden. Da die Zuwendung mit zunehmendem Gesamtvolumen relativ geringer wird, empfiehlt es sich, das Projekt anhand des Gesamtvolumens einzustufen.

Sind alle Anforderungen erfüllt, ist das Projekt prinzipiell förderfähig. Stehen Projekte in Konkurrenz zueinander, können durch das Erfüllen optionaler Anforderungen zusätzlich Punkte gesammelt werden und somit zu einer Priorisierung führen.

Objektiv prüfbare Angaben

Die Angaben im Bewertungsschema sollten objektiv prüfbar sein. Die Bewertung soll damit zum einen für die Bewilligungsbehörden möglichst einfach gehalten werden zum anderen aber auch die Entscheidung zur Priorisierung objektivieren und nachvollziehbar dokumentieren. Daher werden mit dem Bewertungsschema Anforderungen geprüft, die anhand von Zertifikaten oder extern validierten Berichten nachgewiesen werden können. Dabei wurde darauf geachtet, dass mehrere Anforderungen mit nur einem Zertifikat erfüllt werden können, damit Antragstellende nicht mehrere Zertifizierungen durchlaufen müssen.

Weitere Anforderungen, die sich aus dem Workshop ergeben haben, waren: Eine klare Kommunikation mit den Antragstellenden (hierzu wurde ein entsprechendes Beiblatt entwickelt), sowie eine Evaluierung der Anwendung des Schemas. Zudem sollte das Bewertungsschema in das derzeitige Förderverfahren integriert werden, um den Antragsprozess nicht zu verzögern.

9 Monitoring von stofflicher Biomassenutzung

9.1 Zielsetzung und methodische Herausforderungen

Um zukünftig die stoffliche Biomassenutzung und deren Auswirkungen im Rheinischen Revier messbar zu machen, sollte anhand ausgewählter Indikatoren ein dauerhaftes Monitoring durchgeführt werden. Die enthaltenen Indikatoren sind Kenngrößen, die komplexe Zusammenhänge in politisch relevanten Themenfeldern auf anschauliche Weise zusammenfassen. Hierfür zeigen sie thematisch geeignete Datenreihen zu unterschiedlichen Aspekten der stofflichen Biomassennutzung im Rheinischen Revier auf. Das Monitoring und die Indikatoren sollen der Politikberatung und Erfolgskontrolle bereits umgesetzter Maßnahmen im Strukturwandel des Rheinischen Reviers dienen. Darüber hinaus können sie die interessierte Öffentlichkeit in allgemein verständlicher Weise über wichtige Entwicklungen informieren.

Auf der europäischen und der nationalen Ebene gibt es bereits Bestrebungen, die Entwicklung der Bioökonomie und ihren Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung mit einem „Monitoring“ messbar zu machen. In Übereinstimmung mit dem zugrundeliegenden Verständnis von Nachhaltigkeit in den drei Dimensionen Ökologie / Ökonomie / Soziales, soll das Monitoring sowohl sozio-ökonomische Aspekte wie Beschäftigung und Umsatz, als auch ökologische Aspekte wie Treibhausgas-Emissionen und Flächenverbrauch beinhalten. Diese Aspekte sind ebenfalls in die Entwicklung des Nachhaltigkeits-Bewertungsschemas eingeflossen (siehe Kap. 8), aber ihre genaue Ausformulierung und Messung muss in Bezug auf eine ganze Region anders gestaltet werden, als in Bezug auf einzelne Projekte und Wertschöpfungsketten.

Es gibt bereits fundierte Arbeiten zu einem Monitoring der Bioökonomie in Europa (KARDUNG et al., 2019, PIOTROWSKI et al. 2019), in Deutschland (BRINGEZU et al. 2020) und für ein Monitoring verknüpft mit der Ressourcenwende im Rheinischen Revier (WILTS et al. 2022). Diese Analysen zeigen mögliche Kriterien und Indikatoren, anhand derer die Entwicklung der Bioökonomie messbar gemacht werden kann. Grundsätzlich sind in der Betrachtung der stofflichen Biomassenutzung sowohl die Primärproduktion der Biomasse wie auch die weiterverarbeitenden Prozessschritte in der Industrie mit ihren jeweiligen Effekten von Interesse. Für alle Stufen der Wertschöpfungskette können die sozio-ökonomischen Kennzahlen wie Beschäftigung und Umsatz sowie ökologische Kennzahlen wie THG-Emissionen oder Wassernutzung erhoben werden. Für den landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen¹⁰ Sektor kommen noch weitere ökologische Faktoren hinzu wie Flächenverbrauch, Eutrophierung, etc.

Die vorgeschlagenen Indikatoren sollen praxisgerecht und anwendbar sowie aussagefähig und relevant sein. In Anlehnung an die Vorgaben der Länderinitiative Kernindikatoren (LIKI https://www.liki.nrw.de/fileadmin/liki/Dokumente/Literatur/Indikatorbegriff_LiKi_endg.pdf) muss das Indikatorenset daher die folgende Eigenschaften aufweisen:

- **Aussagefähigkeit:** Indikatoren basieren auf einer eindeutigen Verknüpfung eines Handlungsfelds mit einer bestimmten Messgröße

¹⁰ Forstwirtschaftliche Biomasse liegt nicht im Fokus dieser Studie. Sie sollte aber im Sinne der Vollständigkeit genannt werden, da ein Monitoring der Bioökonomie oder der stofflichen Biomassenutzung diese Ressourcenquelle nicht unbeachtet lassen sollte.

- **Zielbezug:** Indikatoren können mit einem bestimmten normativen Ziel im Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung verbunden werden. Damit zeigen sie Erfolge und Misserfolge bei der Erreichung dieses Ziels auf.
- **Steuerbarkeit:** Indikatoren bilden Themen ab, die grundsätzlich steuerbar sind.
- **Verständlichkeit:** Indikatoren bereiten komplexe Inhalte in anschaulicher Weise für die Politikberatung und Öffentlichkeitsarbeit auf.
- **Vergleichbarkeit:** Indikatoren adressieren die räumliche Bezugsebene und sollen durch geeignete Normierung der Messgrößen Vergleiche ermöglichen.
- **Datenverfügbarkeit:** Indikatoren greifen i. d. R. auf bereits vorhandene Daten zurück, die es ermöglichen, längerfristige Entwicklungen darzustellen

Bei der Entwicklung des Monitorings wurde im Vorfeld geprüft, inwieweit bereits in anderen Kontexten entwickelte Indikatoren genutzt werden können. Zu nennen ist hier die Studie „Methodische Konzeption einer regionalen Ressourcenwende im Rheinischen Revier“ (WILTS et al. 2022), die von der Zukunftsagentur Rheinisches Revier in Auftrag gegeben wurde. In dieser Studie wurde unter anderem ein Indikatorenset konzipiert, mit dem sich die Transformation des Rheinischen Reviers in der Ressourcenwende messen und der Fortschritt darstellen lässt. Dieses Indikatorenset wurde mittlerweile von der Zukunftsagentur Rheinisches Revier erweitert¹¹. Auch das Wirtschafts- und Strukturprogramm 1.1 (ZUKUNFTSAGENTUR RHEINISCHES REVIER, 2021) beinhaltet eine Indikatorik (welche laut Landesregierung noch um weitere Indikatoren ergänzt werden muss), um die mittel- bis langfristigen Auswirkungen der mit dem Programm umzusetzenden Maßnahmen zu messen. Zwar verfolgen die jeweils genannten Monitoringansätze verschiedene Ziele; ihnen gemein ist jedoch der regionale Fokus auf das Rheinische Revier. Je kleinräumiger die Bezugsebene (Land, Kreis, Gemeinde, etc.) eines Indikators, umso schwieriger ist es, ihn mit soliden Daten zu untermauern. Daher liegt es manchmal nahe, Indikatoren zu nutzen, die es bereits gibt, auch wenn sie nicht immer passend für die Zielsetzung sind. Die Entwicklung neuer Indikatoren erfordert gleichzeitig die Schaffung neuer Datengrundlagen, was häufig erheblichen Zeit- und Arbeitsaufwand erfordert. Bei der Entwicklung eines neuen Indikators muss darauf geachtet werden, dass dieser mit einer einheitlichen Methode erhoben bzw. berechnet wird, insbesondere, wenn er vergleichbar sein soll, z. B. mit anderen Bundesländern.

Es wird empfohlen, eine zentrale Stelle für das Rheinische Revier zu beauftragen, die die verschiedenen Monitoringansätze zusammenführt, die Indikatoren pflegt und weiterentwickelt. So könnten aus einem Pool an Indikatoren für das jeweilige Ziel die entsprechenden Indikatoren zusammengestellt und Datenlücken identifiziert werden. Parallelprozesse würden so vermieden und Synergieeffekte geschaffen werden. WILTS et al. (2022) schreiben dazu sehr treffend:

„Die Umsetzung des hier beschriebenen Monitoringkonzepts und insbesondere die Durchführung der Datenbeschaffung, Berechnung und Aufbereitung muss im Verantwortungsbereich eines zentralen Akteurs (Organisation) im Rheinischen Revier liegen. Die dortige Institutionalisierung muss so erfolgen, dass die Erhebung und Auswertung parallel zum Kerngeschäft oder in etwaigen Aufträgen umgesetzt wird. Dies hat zur Folge, dass sich der Erhebungs- und Aufwertungsaufwand über die Gesamtzahl der

¹¹ mündliche Mitteilung von Nicole Krüttgen (Zukunftsagentur Rheinisches Revier) am 05.07.24

Indikatoren hinweg in Grenzen halten muss, um eine fortlaufende Auswertung überhaupt durchführen zu können.“

Nach WILTS et al. (2022) bietet die Entwicklung des Monitoringsystems für das Rheinische Revier Aufgrund der Regionalität weitere Herausforderungen:

„Indikatoren stellen immer nur einen Proxy (eine „Annäherung“) an den Gesamtsachverhalt dar. Daher kann es nicht Ziel des Monitoringkonzepts sein, das System als Ganzes (und alle seine Einzelaspekte) in das Monitoringsystem überführen zu wollen. Im Idealfall würde ein solches Monitoring einen „digitalen Zwilling“ des Rheinischen Reviers darstellen, in dem in Fast-Echtzeit regionale Stoffströme in einer Input-Output-Systematik regionalisiert vorliegen würden. Der Erhebungs- und Implementationsaufwand für ein solches Unterfangen ist jedoch illusorisch, weshalb innerhalb des Konzeptes auf die wesentlichsten Aspekte der Ressourcenwende Bezug genommen werden muss.

Das Monitoringkonzept muss eine praktische Relevanz besitzen und sinnvolle Aussagen generieren können, um so auch Vergleiche mit anderen Regionen oder einem Durchschnitt zuzulassen. „Neue“ bzw. innovative Arten der Auswertung (die meist mit einem erhöhten Erhebungs- bzw. sogar Forschungsaufwand verbunden sind) sollten nicht den Kern des Konzepts ausmachen, können für einzelne Aspekte aber durchaus interessante Erkenntnisse erzielen.

Zudem muss ein erfolgreiches und in der Praxis akzeptiertes Monitoringkonzept einen Bezug zu den ermittelten bzw. sich selbst gestellten Zielen der Ressourcenwende im Rheinischen Revier besitzen. Erst dann können aus den Auswertungen sinnvolle Aussagen und Rückschlüsse auf Hindernisse oder weitere Handlungsbedarfe im Kontext der Ressourcenwende gezogen werden.

Insbesondere die Verfügbarkeit und Nutzung bereits bestehender Daten und Statistiken ist elementar, da eine flächendeckende eigenständige Erhebung spezifischer Daten höchst aufwändig und aus Aufwands- und Akzeptanzgründen nicht zielführend ist.“

Im Folgenden und in der Auswahl der Indikatoren beziehen sich WILTS et al. (2022) schwerpunktmäßig nicht auf die Bioökonomie, sondern auf eine regionale Kreislaufwirtschaft. Insofern sind die identifizierten Indikatoren nur bedingt für das Monitoring der stofflichen Biomassenutzung nutzbar. Hier wird allerdings darauf hingewiesen, dass eine Priorisierung der identifizierten Indikatoren in weiteren Schritten notwendig sein wird, um eine Anwendung praktisch möglich zu machen, was auch für das Monitoring der Bioökonomie zutreffend ist. Eine Priorisierung kann mithilfe einer klassischen Kosten-Nutzen-Maximierung geschehen, um zuerst diejenigen Indikatoren in einem Monitoring zu implementieren, die den wenigsten Aufwand bedeuten. Eine Priorisierung kann jedoch auch normativ stattfinden, um politische Prioritäten abzubilden.

9.2 Indikatoren für ein Monitoring der stofflichen Biomassenutzung

Im Folgenden werden mögliche Indikatoren für das Monitoring der stofflichen Biomassenutzung im Rheinischen Revier benannt. Da forstwirtschaftliche Biomasse nicht im Fokus der Studie steht, findet sie hier keine Erwähnung. Für ein adäquates Monitoring der Bioökonomie im Rheinischen Revier sollte sie aber nicht unbeachtet bleiben.

Tabelle 15: Vorschlag zu möglichen Indikatoren für ein Monitoring der stofflichen Biomassenutzung im Rheinischen Revier (RR)

Indikator	Daten verfügbar für RR	Daten verfügbar für NRW	Quelle	Kommentar
Primärsektor (Produktion von Biomasse)				
Produktionsmenge landwirtschaftliche Erzeugnisse	✓	✓	IT.NRW Agrarstatistik	Kann nach unterschiedlichen Kulturen differenziert werden
Landwirtschaftliche Fläche	✓	✓	IT.NRW Agrarstatistik	
Beschäftigung in landwirtschaftlichen Betrieben	X	✓	IT.NRW Agrarstatistik	
Wertschöpfung in landwirtschaftlichen Betrieben	X	X	IT.NRW	
Stickstoffüberschuss der landwirtschaftlich genutzten Fläche	X	✓	Umweltindikatoren NRW, Nachhaltigkeitsindikatoren NRW	
Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft	X	✓	Umweltindikatoren NRW	
Sekundärsektor (Stoffliche Nutzung von Biomasse)				
<i>Umsatz in der bio-basierten Industrie</i>	/	/	<i>Wirtschaftsstatistik NRW, eigene Rechnung</i>	<i>Datenlage unzureichend, benötigt einiges an weiterer methodischer Arbeit</i>
<i>Beschäftigung in der bio-basierten Industrie</i>	/	/	<i>Wirtschaftsstatistik NRW, eigene Rechnung</i>	<i>Datenlage unzureichend, benötigt einiges an weiterer methodischer Arbeit</i>
<i>Treibhausgasemissionen der bio-basierten Industrie</i>	/	/	<i>Treibhausgasinventar NRW</i>	<i>Datenlage unzureichend, benötigt einiges an weiterer methodischer Arbeit</i>

10 Herausforderungen und Empfehlungen

Basierend auf den Ergebnissen der Studie werden an dieser Stelle die wesentlichen Herausforderungen und Empfehlungen abgeleitet, die bei der stofflichen Nutzung von Biomasse berücksichtigt werden sollten. Diese wurden in einem projektbegleitenden Workshop mit Fachleuten diskutiert und ergänzt.

- **Begrenzte Potenziale und Nutzungskonkurrenzen:** Die Biomasse aus der Land- und Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier wird überwiegend als Nahrungs- und Futtermittel verwendet. Eine verstärkte stoffliche Nutzung von Biomassen kann zu Verdrängung von Lebensmitteln führen. Um die Ernährungssicherheit zu gewährleisten, sollten Nutzungsprioritäten sowie vorsorgende Rahmenbedingungen politisch festgelegt werden. Potenziale für zusätzliche stoffliche Nutzungen könnten z. B. durch eine verbindliche Implementierung der Kaskadennutzung, einer Reduktion der Tierhaltung und des Energiepflanzenanbaus oder durch Ertragssteigerungen erhöht werden.
- **Marktbedingungen und überregionaler Handel:** Landwirtschaftliche Biomasse wird heutzutage generell weltweit gehandelt, sodass eine verstärkte Biomassenachfrage im Rheinischen Revier nicht unbedingt aus dieser Region bedient werden muss. Die Industrie wird regionale Biomasse nur einsetzen, wenn die Preise mit denen alternativer Rohstoffe wettbewerbsfähig sind oder höhere Preise für ihre Produkte erzielt werden könnten.
- **Logistische und wirtschaftliche Hürden:** Eine verstärkte Nachfrage nach Erntenebenprodukten und Reststoffen aus der Ernährungsindustrie könnte insofern Auswirkungen auf die Region haben, da diese keinem Weltmarkt unterliegen. Jedoch sind diese häufig wenig transportwürdig und fallen dezentral an, sodass die Logistik aufwendig und deren Nutzung daher trotz Förderung unrentabel sein kann.
- **Förderpolitik:** Das Bewertungsschema bietet eine Grundlage für Förderentscheidungen für nachhaltige Bioökonomieprojekte im Rheinischen Revier. Die Anforderungen an stoffliche Nutzungen von Biomasse sollten jedoch nicht höher sein als die an Biokraftstoffe und Bioenergie, und auch nicht höher als die an fossil-basierte Projekte. Daher sollte das Bewertungsschema bei allen Strukturwandelprojekte angewendet werden, ohne den Antragsprozess deutlich zu verlängern. Die Anwendung des Bewertungsschemas sollte evaluiert werden.
- **Zukünftige Forschungen:** Um die Attraktivität der Region für bio-basierte Prozesse zu erhöhen, sollten weitere Analysen zur Standortattraktivität und den spezifischen Rahmenbedingungen im Rheinischen Revier durchgeführt werden. Ebenso ist eine Verbesserung der Datenlage notwendig, z. B. durch genauere Untersuchung der Preiselastizitäten und des Break-Even-Punkts für bio-basierte Industrien.
- **Kontinuierliches Monitoring:** Um zukünftig die stoffliche Biomassenutzung und deren Auswirkungen im Rheinischen Revier messbar zu machen, sollte anhand ausgewählter Indikatoren ein entsprechendes Monitoring durchgeführt werden. Dabei ist im Vorfeld zu prüfen, inwieweit bereits in anderen Kontexten entwickelte Indikatoren genutzt werden können. Mit dem Monitoring sollte eine zentrale Stelle beauftragt werden, die die Indikatoren pflegt und weiterentwickelt.

Abkürzungsverzeichnis

AKE	Arbeitskräfte-Einheit
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAU	Business-as-Usual; Basisszenario
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz
BUE	Biomass Utilisation Efficiency / Biomassenutzungseffizienz
CAPRI-Modell	Common Agricultural Policy Regionalised Impact Modelling System
CLIB	Cluster Industrieller Biotechnologie e.V.
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂eq	CO ₂ -Äquivalente
DIN / DIN EN	Norm des Deutschen Instituts für Normung (DIN); beim Zusatz EN handelt es sich um eine Übernahme einer Europäischen Norm
DWI	Leibniz-Institut für Interaktive Materialien e.V. (ehemals Deutsches Wollforschungsinstitut)
EPD	Environmental Product Declaration; ökologische Bewertungs-/Kommunikationsmethode
EU	Europäische Union
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations; Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FSC	Forest Stewardship Council
FTE	Full Time Equivalent (Vollzeitäquivalent)
H₂	Wasserstoff
ha	Hektar
HVO	Hydrotreated Vegetable Oils, hydrierte Pflanzenöle
iLUC	Indirect Land Use Change
IME	Fraunhofer Institute for Molecular Biology and Applied Ecology, Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und angewandte Ökologie
IPT	Fraunhofer Institute for Production Technology, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie
ISCC	International Sustainability & Carbon Certification
ISO	Norm der International Organization for Standardization
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

LCA	Life Cycle Assessment, Lebenszyklusanalyse
LCC	Life Cycle Costing
LF	Landwirtschaftliche Fläche
LWK NRW	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen
Mio.	Million
MLV	Ministerium für Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MUNV	Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen
MWh	Megawattstunde
NABIS	Nationale Biomassestrategie
NRW	Nordrhein-Westfalen
NUTS	Nomenclature des Unités territoriales statistiques / Klassifikation der Gebietseinheiten für die Statistik
PE	Polyethylen, ein Polymer
PEF (a)	Polyethylen-Furanoat, ein Polymer
PEF (b)	Product Environmental Footprint; ökologische Bewertungsmethode der EU
PET	Polyethylen-Terephthalat, ein Polymer
PHAs / PHB / PH2H4	Polyhydroxyalkanoate, eine Gruppe von Polymeren u.a. mit Polyhydroxybutyrat (PHB) und verschiedenen Co-Polymeren wie PH2H4
PLA	Polylactic acid, Polymilchsäure, ein Polymer
PP	Polypropylen, ein Polymer
PTJ	Projektträger Jülich
RED	Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU
RSB	Roundable on Sustainable Biomaterials
RSPO	Roundable on sustainable palm oil
SAF	Sustainable Aviation Fuels
SCP	Single Cell Protein, Einzelzellproteine
SDG	Sustainable Development Goal
SETAC	The Society of Environmental Toxicology and Chemistry
t	Tonnen
TEE	Techno-economic evaluation; techno-ökonomische Evaluation
THG	Treibhausgase
TM	Trockenmasse
TRL	Technology Readiness Level; Technologiereifegrad
UBA	Umweltbundesamt
UCO	Used Cooking Oil, Gebrauchte Kochöle
UNEP	United Nations Environment Programme / Umweltprogramm der Vereinten Nationen

Glossar

Acetogene Bakterien: Bakterien, die über einen speziellen Stoffwechselweg in der Lage sind, CO₂ als Kohlenstoffquelle zu nutzen

Aerob: Ein Prozess, der im Beisein von Sauerstoff stattfindet

Anaerob: Ein Prozess, der unter Ausschluss von Sauerstoff stattfindet

Antioxidantien: Stoffe, die eine Oxidation anderer Stoffe verlangsamen oder verhindern, u.a. genutzt als Additive in Kunststoffen oder Kosmetika

Archaea / Archaeen: Eine Gruppe einzelliger Organismen, die häufig in Extremlebensräumen vorkommen und für biotechnologische Prozesse eingesetzt werden können

Bio-basiert: Auf Biomasse als Rohstoff basierend

Biomasse: Sammelbegriff, der für sämtliche Arten von pflanzlichem und tierischem Material genutzt wird

Bionaphtha: Naphtha, das auf der Basis von Biomasse hergestellt wird und als Raffinerierohstoff genutzt werden kann

Bioökonomie: Umfasst in der Definition der Bundesregierung die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen (BMBF & BMEL, 2020).

Bioraffinerie: Eine Raffinerie, in der aus Biomasse unter möglichst vollständiger Verwertung aller Rohstoffströme verschiedene Produkte hergestellt werden

Biotechnologie: Ein Nutzungsverfahren, bei dem biologische Prozesse und Organismen (z. B. Bakterien, Enzyme) in technischer Form genutzt werden, u. a. zur Umsetzung von Biomasse in verschiedene Produkte

Break-Even-Punkt: Der Break-Even-Punkt ist der Managementbegriff für ein bestimmtes Maß an Geschäftsaktivität, bei dem die Gesamtkosten den Gesamteinnahmen entsprechen und kein Verlust entsteht.

Chemo-katalytisch: Chemische Nutzungsverfahren, in denen ein Katalysator eingesetzt wird

Cellulose: Ein natürlich vorkommendes Biopolymer aus einzelnen Zuckerbausteinen, neben Lignin Grundbaustein von pflanzlicher Biomasse

Cyanobakterien: Eine Gruppe einzelliger autotropher Organismen, die wie Pflanzen in der Lage sind, CO₂ mit Hilfe von Sonnenenergie zu nutzen

Downstream: Bezeichnung der Verfahrensschritte, die später in der Wertschöpfungskette oder später in einem Prozess auftreten; z.B. um Zielprodukte aufzureinigen, etwa Destillation oder Filterung

Elektrochemie / elektrochemisch: Eine technisches Nutzungsverfahren, in dem eine Umwandlung unter Einsatz von elektrischem Strom stattfindet

Energetische Nutzung: Die Nutzung von Rohstoffen zur Energiegewinnung, u.a. zur Herstellung von Kraftstoffen oder für Verbrennung

Enzym: Ein Protein, das in der Lage ist, biologische bzw. biotechnologische Prozesse durchzuführen

Epichlorhydrin: Ein chemischer Grundstoff u.a. zur Herstellung von Epoxidharzen

Extraktion: Ein Verfahren, bei dem mit Einsatz von Hilfsstoffen spezifische Moleküle aus einem Gemisch isoliert werden können

Fermentation: Ein biotechnologischer Prozess, in dem kohlenstoffhaltige Rohstoffe (Zucker, Stärke etc.) durch Organismen umgesetzt werden, u.a. zu Biogas oder Chemikalien

Glycerin: Eine Chemikalie, die u.a. bei der Biodieselherstellung als Nebenprodukt anfällt und als Rohstoff genutzt werden kann

Hydrierung: Ein chemischer Prozess, bei dem Wasserstoff an andere Moleküle addiert wird

Hydrolyse: Ein chemischer Prozess, bei dem eine Verbindung durch eine Reaktion mit Wasser gespalten wird

Katalysator: Ein Stoff oder Material, das die benötigte Energie einer chemischen Reaktion reduziert und somit die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht

Kohlehydrate: Eine Stoffklasse aufbauend auf Zuckermolekülen, darin enthalten auch Stärke und Cellulose

Lignin: Ein natürlich vorkommendes Biopolymer, neben Cellulose Grundbaustein von pflanzlicher Biomasse

Lignocellulose: Ein natürlich vorkommendes Kompositmaterial aus Lignin und Cellulose, unter anderem Hauptbestandteil von Holz, Stroh und andere Biomassen

Nachhaltige Biomassenutzung: Eine nachhaltige Biomassenutzung wird den Ansprüchen der Gegenwart gerecht, ohne die Fähigkeit zukünftiger Generationen zu beeinträchtigen, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen. Dabei berücksichtigt sie alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, die ökologische Verantwortung, die soziale Gerechtigkeit und die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit.

Nachwachsende Rohstoffe: Land- und forstwirtschaftlich erzeugte organische Rohstoffe pflanzlichen, tierischen oder mikrobiellen Ursprungs, die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel Verwendung finden, sondern stofflich zur Herstellung von Chemikalien, Werkstoffen und anderen biobasierten Produkten oder energetisch zur Erzeugung von Wärme, Strom oder Kraftstoffen genutzt werden (FNR, 2020).

Naphtha: Eine Stoffmischung, die als Basisrohstoff für eine Raffinerie genutzt wird

Nebenprodukt: Ein Produkt, das neben dem Hauptprodukt in einem Prozess anfällt, ohne dass der Prozess dafür gezielt modifiziert wurde, und das ohne weitere Modifikationen weiter eingesetzt werden kann

Nischenkultur: Landwirtschaftliche Kultur, die im Gegensatz zu Hauptkulturen (Getreide, Mais, Raps) nur in vergleichsweise geringen Mengen und auf wenigen Flächen angebaut wird

Oleochemie: Eine Gruppe von chemischen Nutzungsverfahren, die auf der Nutzung von Ölen und Fetten basieren

OrganoSolv-Prozess: Ein Auftrennungsverfahren für Lignocellulose auf der Basis organischer Lösungsmittel

Oxidation: Ein chemischer Prozess, in dem ein Stoff ein oder mehrere Ionen abgibt, u.a. in der Reaktion mit Sauerstoff

Polymerisierung: Ein chemischer Prozess, in dem aus mehreren Einzelmolekülen eine Molekülkette, ein Polymer, entsteht

Precision Farming: Landwirtschaftliche Arbeit, für die Technologien des präzisen Einsatzes von Düngemitteln, Pestiziden und anderen Stoffen zum Einsatz kommen

Präzisionsfermentation: Fermentationsverfahren, in denen konkrete Proteine hergestellt werden können, die bspw. der Proteinzusammensetzung von Milch oder Eiern entsprechen

Pulping: Ein Prozess, in dem aus Holz und anderer Lignocellulose Zellstoff hergestellt wird

Pyrolyse: Ein thermochemischer Prozess, in dem Rohstoffe durch Erhitzung aufgebrochen und zu Ölgemischen oder -gasen verarbeitet werden.

Reduktion: Ein chemischer Prozess, in dem ein Stoff ein oder mehrere Ionen aufnimmt

Single Cell Proteins: Einzellproteine; einzelne Zellen, die in einem biotechnologischen Prozess hergestellt werden und einen hohen Proteingehalt besitzen

Stoffliche Nutzung: Die Nutzung von Rohstoffen, um daraus Chemikalien und Materialien herzustellen

Thermochemie / thermochemisch: Ein Prozess, in dem thermische Energie zur Umsetzung von Biomasse in verschiedene Produkte genutzt wird

Thünen-Baseline: Die Thünen-Baseline wird alle zwei Jahre vom Thünen-Modellverbund erstellt und beschreibt für die nächsten zehn Jahre erwartete Entwicklungen für den deutschen Agrarsektor unter gegebenen (agrar-) politischen Rahmenbedingungen und Annahmen zur Entwicklung exogener Einflussfaktoren. Die Thünen-Baseline stellt keine Prognose der Zukunft, sondern ein Referenzszenario für die Analyse der Auswirkungen alternativer Politiken und Entwicklungen dar.

Upstream: Bezeichnung der Verfahrensschritte, die am Anfang in der Wertschöpfungskette oder in einem Prozess auftreten

Urban Farming: Überbegriff zu verschiedenen Arten der landwirtschaftlichen Produktion in urbanen, städtischen Gebieten

Vergasung: Ein thermochemischer Prozess, in dem Rohstoffe durch starke Erhitzung aufgebrochen und zu Synthesegasen verarbeitet werden

Vertical Farming: Überbegriff zu verschiedenen Arten der landwirtschaftlichen Produktion in mehrstöckigen / vertikalen Anbausystemen

Vinasse: Flüssiger Reststoff bei der Fermentation, vor allem bei der Ethanolproduktion

Wirtschaftsdünger: Als Wirtschaftsdünger werden organische Substanzen bezeichnet, die in der Landwirtschaft anfallen und zur Düngung eingesetzt werden (insbesondere Gülle, Mist, Gärreste).

Literatur

- ARAÚJO, R., VÁZQUEZ CALDERÓN, F., SÁNCHEZ LÓPEZ, J., AZEVEDO, I. C., BRUHN, A., FLUCH, S., GARCIA TASENDE, M., GHADERIARDAKANI, F., ILMJÄRV, T., LAURANS, M., MAC MONAGAIL, M., MANGINI, S., PETEIRO, C., REBOURS, C., STEFANSSON, T. AND ULLMANN, J. 2021: Current Status of the Algae Production Industry in Europe: An Emerging Sector of the Blue Bioeconomy. *Frontiers in Marine Science*, Vol. 7 10.3389/fmars.2020.626389. (letzter Zugriff 03.06.2024).
- AUGUSTIN, M. A., HARTLEY, C. J., MALONEY, G. AND TYNDALL, S. 2023: Innovation in precision fermentation for food ingredients. *Crit Rev Food Sci Nutr*, Vol. 1-21. doi: 10.1080/10408398.2023.2166014
- BACHLEITNER, S., ATA, O. AND MATTANOVICH, D. 2023: The potential of CO₂-based production cycles in biotechnology to fight the climate crisis. *Nat Commun*, Vol. 14 (1), 6978. doi: 10.1038/s41467-023-42790-6
- BALAFOUTIS, A., BECK, B., FOUNTAS, S., VANGEYTE, J., WAL, T., SOTO, I., GÓMEZ-BARBERO, M., BARNES, A. AND EORY, V. 2017: Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics. *Sustainability*, Vol. 9 (8), 10.3390/su9081339
- BELLON MAUREL, V. AND HUYGHE, C. 2017: Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *Ocl*, Vol. 24 (3), 10.1051/ocl/2017028
- BENKE, K. AND TOMKINS, B. 2017: Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, Vol. 13 (1), 13-26. doi: 10.1080/15487733.2017.1394054
- BESTE, A. 2020: Hybridlandwirtschaft als Alternative? Pro und Contra, in: *Ökologie und Landbau* 03/2020. <https://orgprints.org/id/eprint/39229/1/contrahybrid%20oel.pdf> (letzter Zugriff 03.06.2024)
- BETTENHAUSEN, C. 2022: Evonik invests in rhamnolipid biosurfactants. New capacity in Slovakia bolsters partnership with Unilever, in: *Chemical & Engineering News*, 19.01.2022. <https://cen.acs.org/business/specialty-chemicals/Evonik-invests-rhamnolipid-biosurfactants/100/i3> (letzter Zugriff 22.04.2024)
- BETTER BIOMASS 2024: Sustainability & Chain of Custody Requirements. <https://betterbiomass.nl/en/certification-documents/current-certification-documents/> (letzter Zugriff 25.04.2024).
- BIDDINGER, E. J., GUTIERREZ, O. Y. AND HOLLADAY, J. 2021: Electrochemical routes for biomass conversion. *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 51 (1), 1-3. doi: 10.1007/s10800-020-01525-x
- BIOTIC CONSORTIUM 2015: Overcoming hurdles for innovation in industrial biotechnology - Market Roadmap. (Ed.), Vantaa, 2015.
- (BLE) BUNDEANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG 2019: Kategorisierung von tierischen Nebenprodukten. <https://www.bmel.de/DE/themen/tiere/tiergesundheit/tierische-nebenprodukte/tierische-nebenprodukte-kategorie.html> (letzter Zugriff 08.05.2024).

- (BLE) BUNDEANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG 2023: Struktur der Mühlenwirtschaft 2022/2023. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Getreide_Getreideerzeugnisse/Struktur_der_Muehlenwirtschaft_2023.html (letzter Zugriff 08.06.2024)
- (BLE) BUNDEANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG 2023a: Bericht zur Markt- und Versorgungslage Zucker 2023. <https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Zucker/2023BerichtZucker.html> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (BLE) BUNDEANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG 2023b: Bericht zur Markt- und Versorgungslage Ölsaaten, Öle und Fette – 2023. https://www.ble.de/Shared-Docs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/OeleFette/Versorgung/2023BerichtOele.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (BLE) BUNDEANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG 2023c: Bericht zur Markt- und Versorgungslage Kartoffeln 2023. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Kartoffeln/2023BerichtKartoffeln.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (BLE) BUNDEANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG 2023d: Bericht zur Markt- und Versorgungslage Getreide 2022. (Ed.), https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Getreide_Getreideerzeugnisse/2022BerichtGetreide.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (BMBF) BUNDEMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG 2024: Stark-Watzinger: Wir stärken die Innovationskraft des Rheinischen Reviers. Pressemitteilung Nr. 6 vom 08.02.2024. <https://www.bmbf.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/02/080224-StStG.html?view=renderNewsletterHtml> (letzter Zugriff 03.06.2024).
- (BMELV) BUNDEMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2012: Roadmap Bioraffinerien (im Rahmen der Aktionspläne der Bundesregierung zur stofflichen und energetischen Nutzung nachwachsender Rohstoffe). (Ed.), Berlin, 2012
- (BMEL) BUNDEMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT 2024: Ausnahmen beim Mindestanteil nichtproduktiver Flächen (GLÖZ 8) treten in Kürze in Kraft. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Meldungen/DE/Presse/2024/240419-gloez.html> (letzter Zugriff 09.06.2024)
- (BMEL, BMUV, BMWK) BUNDEMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT, BUNDEMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, BUNDEMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ 2022: Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS). Berlin 2022. <https://www.bmuv.de/download/eckpunkte-fuer-eine-nationale-biomassestrategie-nabis> (letzter Zugriff 09.06.2024)
- (BMJ) BUNDEMINISTERIUM DER JUSTIZ 2021: Gesetz zur Regelung der Gentechnik (Gentechnikgesetz - GenTG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 16. Dezember 1993 (BGBl. I S. 2066), zuletzt geändert am 27. September 2021 (BGBl. I S. 4530). <https://www.gesetze-im-internet.de/gentg/index.html> (letzter Zugriff 05.03.2024)

- (BMUV) BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2023: Pollutant Release and Transfer Register (Schadstoffregister). <https://www.bmu.de/themen/umweltinformation/schadstoffregister> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- BOVENSIEPEN, G., HOMBACH, R. AND RAIMUND, S. 2016: Quo vadis, agriculture? Smart Farming: Nachhaltigkeit und Effizienz durch den Einsatz digitaler Technologien. (Ed.), 2016
- BRINGEZU, S., BANSE, M., AHMANN, L., BEZAMA, N.A., BILLIG, E., BISCHOF, R., BLANKE, C., BROSOWSKI, A., BRÜNING, S., BORCHERS, M., BUDZINSKI, M., CYFFKA, K-F., DISTELKAMP, M., EGENOLF, V., FLAUTE, M., GENG, N., GIESEKING, L., GRAß, R., HENNENBERG, K., HERRING, T., IOST, S., JOCHEM, D., KRAUSE, T., LUTZ, C., MACHMÜLLER, A., MAHRO, B., MAJER, S., MANTAU, U., MEISEL, K., MOESENFECHTEL, U., NOKE, A., RAUSSEN, T., RICHTER, F., SCHALDACH, R., SCHWEINLE, J., THRÄN, D., UGLIK, M., WEIMAR, H., WIMMER, F., WYDRA, S., ZEUG, W. 2020: Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie. Ed. vom Center for Environmental Systems Research (CESR), Universität Kassel, Kassel, doi:10.17170/kobra-202005131255
- BRITZ, W. UND WITZKE, P. 2014: CAPRI model documentation 2014. http://www.capri-model.org/docs/capri_documentation.pdf (letzter Zugriff 03.06.2024).
- BROEREN, M. L. M., ZIJP, M. C., WAAIJERS-VAN DER LOOP, S. L., HEUGENS, E. H. W., POSTHUMA, L., WORRELL, E. AND SHEN, L. 2017: Environmental assessment of bio-based chemicals in early-stage development: a review of methods and indicators. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Vol. 11 (4), 701-718. doi: 10.1002/bbb.1772
- BROT FÜR DIE WELT 2009: Kampagnenblatt „Fleischkonsum“ (Ed.). https://www.brot-fuer-die-welt.de/fileadmin/mediapool/2_Downloads/NIFSA/NIFSA_Kampagnenblatt_Fleischkonsum.pdf (letzter Zugriff 03.06.2024).
- BUNDESREGIERUNG 2021: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1873516/9d73d857a3f7f0f8df5ac1b4c349fa07/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-barrierefrei-data.pdf?download=1> (letzter Zugriff 10.06.2024)
- CARNEIRO, J. AND NIKOLLA, E. 2019: Electrochemical Conversion of Biomass-Based Oxygenated Compounds. *Annual Review of Chemical and Biomolecular*
- CARPENTER, D., WESTOVER, T. L., CZERNIK, S. AND JABLONSKI, W. 2014: Biomass feedstocks for renewable fuel production: a review of the impacts of feedstock and pretreatment on the yield and product distribution of fast pyrolysis bio-oils and vapors. *Green Chem.*, Vol. 16 (2), 384-406. doi: 10.1039/c3gc41631c
- CHEMCOLOGNE 2024: Die leistungsstärkste Chemieregion im Herzen Europas. <https://www.chemcologne.de/investitionen/die-chemie-region> (letzter Zugriff 26.04.2024)
- CLARIANT 2022: Clariant produziert das erste kommerzielle sunliquid®-Zellulose-Ethanol in der neuen Anlage in Podari, Rumänien. 14.06.2022. <https://www.clariant.com/de/Corporate/News/2022/06/Clariant-produces-first-commercial-sunliquid-cellulosic-ethanol-at-new-plant-in-Podari-Romania> (letzter Zugriff 22.04.2024)

- CREAPAPER 2023: Was ist Graspapier? (Ed.) <https://www.creapaper.de/graspapier/> (letzter Zugriff 08.05.2024)
- (DBFZ) DEUTSCHES BIOMASSEFORSCHUNGSZENTRUM GEMEINNÜTZIGE GMBH 2022: Ernährungswirtschaft im Mitteldeutschen Revier und im Lausitzer Revier. (Ed.) https://www.dbfz.de/fileadmin/Projektseiten/morebio/Download-Tabellen/2022_Sektorstudie_Ernaehrungswirtschaft_Mitteldeutsches___Lausitzer_Revier.pdf (letzter Zugriff 08.05.2024)
- DESTATIS (2017): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Methodische Grundlagen der Agrarstrukturserhebung 2016. Fachserie 3 Reihe 2. S. 5. Statistisches Bundesamt https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftliche-Betriebe/Publikationen/Downloads-Landwirtschaftliche-Betriebe/grundlagen-strukturserhebung-2032605169004.pdf?__blob=publicationFile (letzter Zugriff 08.05.2024)
- DGF (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR FETTWISSENSCHAFT) 2008: Fettsäurezusammensetzung wichtiger pflanzlicher und tierischer Speisefette und -öle (Memento vom 22. Dezember 2008 im Internet Archive). <https://web.archive.org/web/20081222233514/http://www.dgfett.de/material/fszus.htm> (letzter Zugriff 15.03.2024)
- DOELLE, H. W., FIECHTER, A., SCHLEGEL, G., SELL, D., SHIMIZU, S., ULBER, R. AND YAMADA, H. 2009: Biotechnology, 1. General. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry Engineering, Vol. 10 85–104. doi: 10.1146/annurev-chembioeng-060718-030148
- ETIP BIOENERGY 2024: European Technology and Innovation Platform - Fact Sheets. (Ed.) <https://www.etipbioenergy.eu/publications-and-reports/> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- EUROPÄISCHE KOMMISSION 2014: Horizon 2020 Work Programme 2014–2015, 19. General Annexes Revised; European Commission Decision C (2014)4995 of 22 July 2014. European Commission (Ed.), Brüssel, 22.07.2014
- EUROPÄISCHE KOMMISSION 2020: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: „Vom Hof auf den Tisch“ – eine Strategie für ein faires, gesundes und umweltfreundliches Lebensmittelsystem. Brüssel 20.05.2020. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ea0f9f73-9ab2-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0003.02/DOC_1&format=PDF (letzter Zugriff 18.03.2024).
- EUROPÄISCHE KOMMISSION 2024: Innovation Fund. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund_en (letzter Zugriff 10.06.2024).
- EUROPÄISCHE NORM (EN 16214) 2020: Nachhaltigkeitskriterien für die Herstellung von Biokraftstoffen und flüssigen Biobrennstoffen für Energieanwendungen – Grundsätze, Kriterien, Indikatoren und Prüfer. EN 16214-1:2020.
- EUROPÄISCHE NORM (EN 16751) 2016: Biobasierte Produkte – Nachhaltigkeitskriterien. EN 16751:2016.

- EUROPÄISCHE UNION 2023: Richtlinie 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung, konsolidierter Text). Brüssel, 20.11.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A02018L2001-20231120> (letzter Zugriff 25.04.2024).
- EUROPÄISCHE UNION 2022: EU Agricultural Outlook. For Markets, Income and Environment. 2022–2032. https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2023-04/agricultural-outlook-2022-report_en_0.pdf (letzter Zugriff 22.04.2024).
- EUROPÄISCHE UNION 2020: Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088. Brüssel, 18.06.2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32020R0852> (letzter Zugriff 25.04.2024).
- EXPRESS.DE 2020: Über 35 Millionen Liter Kölsch weniger - Kölner Brauereien ziehen düstere Bilanz. (Ed.), <https://www.express.de/koeln/koeln-brauereien-produzieren-35-millionen-liter-weniger-koelsch-53037> (letzter Zugriff 08.05.2024)
- (FNR) FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE 2021: Basisdaten biobasierte Produkte. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Ed.), Gülzow, 2021.
- (FNR) FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE 2020: Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Stand März 2020. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow-Prüzen. <http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22004416.xlsx> (letzter Zugriff 08.05.2024)
- (FNR) FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) 2023a: Mais. (Ed.), Gülzow-Prüzen. <https://pflanzen.fnr.de/energiepflanzen/pflanzen/mais> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (FNR) FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) 2023b: Energiepflanzen. (Ed.), Gülzow-Prüzen. <https://www.fnr.de/nachwachsende-rohstoffe/bioenergie/energiepflanzen> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (FNR) FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) 2023c: Grünland. (Ed.), Gülzow-Prüzen. <https://pflanzen.fnr.de/energiepflanzen/pflanzen/gruenland> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (FNR) FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) 2023d: Anbauflächen nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. (Ed.), Gülzow-Prüzen. <https://statistik.fnr.de/anbauflaechen.php> (letzter Zugriff 08.05.2024)
- (FNR) FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) 2024: Wirtschaftsdüngervergärung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Ed.), Download at <https://biogas.fnr.de/wirtschaftsduenger/wirtschaftsduengervergaerung> (letzter Zugriff 10.06.2024).
- (FAO) FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS 2013: Nutritive Factors. (Ed.)

- (FSC) FOREST STEWARDSHIP COUNCIL 2018: FSC Prinzipien und Kriterien. <https://www.fsc-deutschland.de/wp-content/uploads/fsc-pinzipien-und-kriterien.pdf> (letzter Zugriff 25.04.2024).
- FINCH, H. J. S., SAMUEL, A. M. AND LANE, G. P. F. 2014: Precision farming. Lockhart & Wiseman's Crop Husbandry Including Grassland.
- GAIDA, B., SCHÜTTMANN, I., MAHRO, B. AND ZORN, H. 2012: Bestandsaufnahme zum biogenen Reststoffpotenzial der deutschen Lebensmittel- und Biotechnik-Industrie. Chemie Ingenieur Technik, Vol. 84 10.1002/cite.201250208
- GETRÄNKE-NEWS.DE 2020: Oettinger - Niedriger Bierpreis als Markenkern (Ed.) <https://getraenke-news.de/niedriger-bierpreis-als-markenkern/> (letzter Zugriff 08.05.2024)
- GOCHT A. UND BRITZ, W. 2011: EU-wide farm type supply models in CAPRI—How to consistently disaggregate sector models into farm type models, in: Journal of Policy Modeling 33(1):146–167. doi: 10.1016/j.jpolmod.2010.10.006.
- GREAVES, J., HOBBS, P., CHADWICK, D. AND HAYGARTH, P. 2010: Prospects for the Recovery of Phosphorus from Animal Manures: A Review. Environmental Technology, Vol. 20 (7), 697-708. doi: 10.1080/09593332008616864
- HAB, M., DEBLITZ, C., FREUND, F., KREINS, P., LAQUAI, V., OFFERMANN, F., PELIKA, J., STURM, V., WEGMANN, J., DE WITTE, T., WÜSTEMANN, F., ZINNBAUER, M. 2022: Thünen-Baseline 2022–2032: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Thünen Report 100. https://www.thuenen.de/media/ti/Verbundstrukturen/Thuenen-Modellverbund/Thuenen-Baseline/Thuenen_Report_100.pdf (letzter Zugriff: 07.03.2024).
- HOCHWALD FOODS GMBH 2023: Persönliche Kommunikation mit nova-Institut (23-10-26).
- HOLIK, H. AND TSCHUDIN, P. F. 2011: Paper and Board, 1. General. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
- HUIJBREGTS, M. A. J., ROMBOUTS, L. J. A., HELLWEG, S., FRISCHKNECHT, R., HENDRIKS, A. J., VAN DE MEENT, D., RAGAS, A. M. J., REIJNDERS, L. AND STRUIJS, J. 2006: Is Cumulative Fossil Energy Demand a Useful Indicator for the Environmental Performance of Products? in: Environmental Science & Technology, Vol. 40 (3), 641-648. doi: 10.1021/es051689g
- IFBB 2023: Biopolymers - Facts and Statistics 2022; Production capacities, processing routes, feedstock, land and water use. IfBB - Institute for Bioplastics and Biocomposites, Hochschule Hannover (Ed.), Hannover.
- IFFLAND, K., SHERWOOD, J., CARUS, M., RASCHKA, A., FARMER, T. AND CLARK, J. 2015: Definition, Calculation and Comparison of the "Biomass Utilization Efficiency (BUE)" of Various Bio-based Chemicals, Polymers and Fuels. (Ed.), Hürth, 2015.
- IMA AGRAR 2024: AgriLexikon. <https://www.ima-agrar.de/wissen/agrilexikon> (letzter Zugriff 05.07.2024)
- (IT.NRW) INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN 2023a: Gemüsearten auf dem Freiland, Anbaufläche, Hektarerträge, Gesamterträge. <https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldb NRW/online/> (letzter Zugriff 09.07.2024)

- (IT.NRW) INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN 2023b: Geschlachtete Tiere, Schlachtmengen und Art der Schlachtungen - Regierungsbezirke - Jahr (Schlachtungs- und Schlachtgewichtsstatistik). <https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldbnrw/online/> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (IT.NRW) INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN 2023c: Erntebericht: Hektarerträge, Gesamterträge und Anbauflächen nach ausgewählten Fruchtarten (39) - kreisfreie Städte und Kreise - Jahr (4-Jährlich). <https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldbnrw/online/> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (IT.NRW) INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN 2023d: Ernte- und Betriebsberichterstattung Baumobst. <https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldbnrw/online/> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- (IT.NRW) INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN 2024a: Gepachtete Fläche und Pachtentgelt je ha nach Rechtsformen und Größenklassen der landwirtschaftlichen Flächen - kreisfreie Städte und Kreise - Jahr <https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldbnrw/online/result/41141-10i#abreadcrumb>
- (IT.NRW) INFORMATION UND TECHNIK NORDRHEIN-WESTFALEN 2024b: Milchkühe: Landwirtschaftliche Haltungen und Tiere nach Bestandsgrößenklassen – kreisfreie Städte und Kreise. <https://www.landesdatenbank.nrw.de/ldbnrw/online/> (letzter Zugriff 09.07.2024)
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO 13065) 2005: Nachhaltigkeitskriterien für Bioenergie. ISO 13065:2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO 14040) 2006: Umweltmanagement – Ökobilanz. ISO 14040:2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO 14067) 2018: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung. ISO 14067:2018.
- ISCC PLUS (INTERNATIONAL SUSTAINABILITY & CARBON CERTIFICATION) 2024: ISCC PLUS Standard System Document. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2024/03/ISCC-PLUS_v3.4.2.pdf (letzter Zugriff 25.04.24).
- JHA, S., NANDA, S., ACHARYA, B. AND DALAI, A. K. 2022: A Review of Thermochemical Conversion of Waste Biomass to Biofuels. *Energies*, Vol. 15 (17), 10.3390/en15176352
- KÄHLER, F., PORC, O. AND CARUS, M. 2023: RCI Carbon Flows Report: Compilation of supply and demand of fossil and renewable carbon on a global and European level. *Renewable Carbon Initiative (RCI) (Ed.)*, Hürth, Germany, 2023-05. Download at <https://renewable-carbon.eu/publications/product/the-renewable-carbon-initiatives-carbon-flows-report-pdf/>
- KAHILUOTO, H., KUISMA, M., KETOJA, E., SALO, T. AND HEIKKINEN, J. 2015: Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environ Sci Technol*, Vol. 49 (4), 2115-2122. doi: 10.1021/es503387y
- KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (2016): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren.* (Ed.) 3. Aufl. 1 Band. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, zuletzt geprüft am 08.06.2018.

- KAMM, B., GRUBER, P. R. AND KAMM, M. 2011: Biorefineries – Industrial Processes and Products. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
- KAN, T., STREZOV, V., EVANS, T., HE, J., KUMAR, R. AND LU, Q. 2020: Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review of variations in process factors and system structure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 134 110305. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110305>
- KARDUNG, M., COSTENOBLE, O., DAMMER, L., DELAHAYE, R., LOVRIĆ, M., VAN LEEUWEN, M., M'BAREK, R., VAN MEIJL, H., PIOTROWSKI, S., RONZON, T., VERHOOG, D., VERKERK, H., VRACHIOLI, M., WESSELER, J., XINQI ZHU, B., 2019: Framework for measuring the size and development of the bioeconomy. Deliverable 1.1. des BioMonitor Projekts. <https://biomonitor.eu/wp-content/uploads/2020/04/Deliverable-1.1.pdf> (letzter Zugriff 02.04.2024).
- KEMPEN, M. 2024: Persönliche Kommunikation zwischen nova-Institut und Agrarexperte Markus Kempen, EURO CARE, März 2024.
- KIM, T., BHATT, A., TAO, L. AND BENAVIDES, P. T. 2022: Life cycle analysis of polylactic acids from different wet waste feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 380 10.1016/j.jclepro.2022.135110
- KLIEM, L., KRACHUNOVA, T., LANGE, S., WAGNER, J. AND BELLINGRATH-KIMURA, S. 2023: Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Landwirtschaft aus Sicht des Umwelt- und Naturschutzes. (Ed.), Bonn, 2023.
- KUMAR, M., SUN, Y., RATHOUR, R., PANDEY, A., THAKUR, I. S. AND TSANG, D. C. W. 2020: Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges. *Sci Total Environ*, Vol. 716 137116. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137116
- KRETSCHMER, A. 2023: Clariant schließt Bioethanol-Werk in Rumänien, 07.12.2023. . (Ed.), <https://www.chemietechnik.de/anlagenbau/clariant-schliesst-bioethanol-werk-in-rumänien-124.html> (letzter Zugriff 16.07.2024)
- LANDESREGIERUNG NORDRHEIN-WESTFALEN 2023: Eckpunkte für eine Bioökonomie-Strategie Nordrhein-Westfalen. MWIKE23-016. www.wirtschaft.nrw/broschuerenservice
- (LWK NRW) LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2012: Anforderungen von Cross Compliance an die Humuswirtschaft. <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/boden/cc-organische-substanz.pdf> (letzter Zugriff 22.04.2024).
- (LWK NRW) LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2017: Auszüge und Tabellen zur Ermittlung des N-Düngebedarfs für Grünland aus der DüV 2017. <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/duengung/duengeverordnung/dbe/dbe-gruenland/tabellen-gruenland.pdf> (letzter Zugriff 12.12.2024).
- (LWK NRW) LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2021: NRW: Mehr Milch von weniger Kühen. <https://www.landwirtschaftskammer.de/presse/archiv/2021/aa-2021-02-01.htm> (letzter Zugriff 07.06.2024).
- LANUV (Ed.) 2014: Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW. Teil 3 – Biomasse-Energie. LANUV-Fachbericht 40. https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/30040c.pdf (letzter Zugriff 03.07.2024).

- LEE, U., BHATT, A., HAWKINS, T. R., TAO, L., BENAVIDES, P. T. AND WANG, M. 2021: Life cycle analysis of renewable natural gas and lactic acid production from waste feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 311 10.1016/j.jclepro.2021.127653
- LIAN, T., ZHANG, W., CAO, Q., YIN, F., WANG, S., ZHOU, T., WEI, X., ZHANG, F., ZHANG, Z. AND DONG, H. 2024: Enzyme enhanced lactic acid fermentation of swine manure and apple waste: Insights from organic matter transformation and functional bacteria. *J Environ Manage*, Vol. 356 120573. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120573
- LOHMANN, B. AND GRAF, P. 2024: Präzisionsfermentation: Maßgeschneiderte Bioproduktion. *bioökonomie.de* (Ed.) <https://biooekonomie.de/themen/dossiers/praezisionsfermentation-massgeschneiderte-bioproduktion>
- LORRETTE, B. AND SANCHEZ, L. 2022: New lipid sources in the insect industry, regulatory aspects and applications. *Ocl*, Vol. 29 10.1051/ocl/2022017
- MACLEMAN, E. 2022: Palmitic Acid, <https://thederreview.com/palmitic-acid/> (letzter Zugriff 22.04.2024).
- MAJER, S.; STECHER, K.; ADLER, P.; THRÄN, D.; MÜLLER-LANGER, F. 2013: Biomassepotenziale und Nutzungskonkurrenzen. Kurzstudie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima. Leipzig.
- MATERIAL ECONOMICS 2019: Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. *Material Economics* (Ed.), Stockholm, 2019.
- MATTHAUS, B., ÖZCAN, M., AL JUHAIMI, F. 2016: Some rape/canola seed oils: fatty acid composition and tocopherols in: *Z Naturforsch C J Biosci*. 2016 Mar; 71(3-4):73-7. [https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27023318/#:~:text=The%20oil%20contents%20of%20rapeseeds,\(4.18%2D5.01%25\)%20acids](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27023318/#:~:text=The%20oil%20contents%20of%20rapeseeds,(4.18%2D5.01%25)%20acids) (letzter Zugriff 15.03.2024).
- MCDOWELL, R. W., PLETNYAKOV, P. AND HAYGARTH, P. M. 2024: Phosphorus applications adjusted to optimal crop yields can help sustain global phosphorus reserves. *Nat Food*, Vol. 5 (4), 332-339. doi: 10.1038/s43016-024-00952-9
- MITTAL, V. 2012: *Polymers from Renewable Resources. Renewable Polymers - Synthesis, Processing, and Technology*. Mittal, V. (Ed.). Wiley, Scrivener Publishing, New Jersey.
- NOVA-INSTITUT 2020: *Bioökonomie: Potenziale im Rheinischen Revier – Industrie und Verwertung*. Koordinierungsstelle BioökonomieREVIER, Forschungszentrum Jülich GmbH (Ed.) https://www.biooekonomierevier.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/1cd7d23c-a5fe-11ec-a609-dead53a91d31/live/document/nova_Institut_Studie_Biooekonomie_Potenziale_Rhein_Revier_Industrie_u_Verwertung_final.pdf (letzter Zugriff 17.07.2024).
- NOVA-INSTITUT 2024: *Experteneinschätzungen der Mitwirkenden an der Studie*. nova-Institut für politische und ökologische Innovation GmbH, Hürth, Frühjahr/Sommer 2024.
- OECD/FAO 2023: *OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032*. OECD Publisher (Ed.), Paris, Download: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/08801ab7-en> (letzter Zugriff: 25.03.2024).

- PATT, R., KORDSACHIA, O. AND SÜTTINGER, R. 2011: Pulp. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
- PFEIFER & LANGEN 2023: Persönliche Kommunikation mit nova-Institut, 30.11.2023.
- PHYLLIS (ECN.TNO) 2024: Phyllis2, database for (treated) biomass, algae, feedstocks for biogas production and biochar. (Ed.), <https://phyllis.nl/> (letzter Zugriff 16.07.2024)
- PINSTRUP-ANDERSEN, P. 2018: Is it time to take vertical indoor farming seriously? *Global Food Security*, Vol. 17 233-235. doi: 10.1016/j.gfs.2017.09.002.
- PIOTROWSKI, S, ESSEL, R., CARUS, M., DAMMER, L., ENGEL, L. 2015: Nachhaltig nutzbare Potenziale für Biokraftstoffe in Nutzungskonkurrenz zur Lebens- und Futtermittelproduktion, Bioenergie sowie zur stofflichen Nutzung in Deutschland, Europa und der Welt“. nova-Institut (Ed.), Hürth, 19.08.2015.
- PIOTROWSKI, S., VERKERK, H., LOVRIÇ, M., RONZON, T., PARISI, C., PHILIPPIDIS, G., M'BAREK, R. 2019: Status quo of data collection methodologies on bioeconomy and recommendations. Deliverable D3.1 des BioMonitor Projekts. https://biomonitor.eu/wp-content/uploads/2022/10/BioMonitor_D3.1_submitted.pdf (letzter Zugriff 02.04.2024).
- PORC, O., CARUS, M. 2022: nova Price Indices for Fossil Resources, Metals and Biomass 1980–2021/2022 (based on IMF, The World Bank, ANRPC). <https://renewable-carbon.eu/publications/product/nova-price-indices-for-fossil-resources-metals-and-biomass-february-2022-png/> (letzter Zugriff 05.07.2024).
- PRABHU, P., WAN, Y. AND LEE, J.-M. 2020: Electrochemical Conversion of Biomass Derived Products into High-Value Chemicals. *Matter*, Vol. 3 (4), 1162-1177. doi: 10.1016/j.matt.2020.09.002
- RASCHKA, A. 2020: Mapping der vorhandenen Bioökonomie-Akteure im Rheinischen Revier. Erfassung im Rahmen des Projekts BioökonomieREVIER, Forschungszentrum Jülich (unveröffentlicht).
- RASCHKA, A. 2024: Persönliche Kommunikation mit Achim Raschka, Experte für stoffliche Nutzungen von Biomasse am nova-Institut, Hürth. Frühjahr/Sommer 2024.
- RAVILLA, A., SHIRKEY, G., CHEN, J., JARCHOW, M., STARY, O. AND CELIK, I. 2024: Techno-economic and life cycle assessment of agrivoltaic system (AVS) designs. *Sci Total Environ*, Vol. 912 169274. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169274
- REDCERT² 2024: Systemdokumente. <https://www.redcert.org/redcert-systeme/systemdokumente.html> (letzter Zugriff 25.04.2024).
- ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE BIOMATERIALS (RSB) 2020: RSB Principles and Criteria. RSB-STD-01-001. <https://rsb.org/wp-content/uploads/2020/06/RSB-Principles-Criteria-STD-01-001-v4.pdf> (letzter Zugriff: 25.04.2024).
- ROUNDTABLE ON SUSTAINABLE PALM OIL (RSPO) 2018: RSPO Prinzipien und Kriterien. <https://rspo.org/de/resources/?category=rspo-principles-and-criteria-2018-pc-standards> (letzter Zugriff 25.04.2024).
- RUIZ, P., SKOCZINSKI, P., RASCHKA, A., HARK, N. AND CARUS, M. 2023: Carbon Dioxide (CO₂) as Feedstock for Chemicals, Advanced Fuels, Polymers, Proteins and Minerals. nova-Institut GmbH (Ed.), Hürth, Germany, 2023-04. <https://doi.org/10.52548/HKBS8158> (letzter Zugriff 16.07.2024)

- SAATEN-UNION 2024: Der Klimawandel: Auswirkungen auf die Braugerstenproduktion. <https://www.saaten-union.de/getreide/sommergerste/sommerbraugerste/der-klimawandel-auswirkungen-auf-die-braugerstenproduktion/#:~:text=F%C3%BCr%20ei-nen%20Liter%20Bier%20werden,also%20der%20Hauptbestandteil%20die-ses%20Traditionsgetr%C3%A4nkes> (letzter Zugriff 09.06.2024).
- SACHIN POWAR, R., SINGH YADAV, A., SIVA RAMAKRISHNA, C., PATEL, S., MOHAN, M., SAKHARWADE, S. G., CHOUBEY, M., KUMAR ANSU, A. AND SHARMA, A. 2022: Algae: A potential feedstock for third generation biofuel. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 63 A27-A33. doi: 10.1016/j.matpr.2022.07.161
- SARKAR, A. AND MAJUMDER, M. 2015: Opportunities and Challenges in Sustainability of Vertical Eco-Farming: A Review. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, Vol. 2 (2), 10.12720/joaat.2.2.98-105
- SCHIEVANO, A., PEPE SCIARRIA, T., VANBROEKHOVEN, K., DE WEVER, H., PUIG, S., ANDERSEN, S. J., RABAEY, K. AND PANT, D. 2016: Electro-Fermentation - Merging Electrochemistry with Fermentation in Industrial Applications. *Trends Biotechnol*, Vol. 34 (11), 866-878. doi: 10.1016/j.tibtech.2016.04.007
- SCHOUMANS, O. F., RULKENS, W. H., OENEMA, O. AND EHLERT, P. A. I. 2010: Phosphorous recovery from animal manure: Technical opportunities and agro-economical perspectives. *Alterra, Wageningen University (Ed.), Wageningen*.
- SERVICEGESELLSCHAFT TIERISCHE NEBENPRODUKTE MBH/ VERBAND DER VERARBEITUNGSBETRIEBE TIERISCHER NEBENPRODUKTE 2023: *Verarbeitung tierischer Nebenprodukte*. (Ed.), <https://www.stn-vvtn.de/index.php> (letzter Zugriff 16.07.2024)
- SKOCZINSKI, P., CARUS, M., TWEDDLE, G., RUIZ, P., DE GUZMAN, D., RAVENSTIJN, J., KÄB, H., HARK, N., DAMMER, L. AND RASCHKA, A. 2023: *Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2022-2027*. nova-Institut GmbH (Ed.), Hürth 2023.
- SKOCZINSKI, P., CARUS, M., TWEDDLE, G., RUIZ, P., HARK, N., ZHANG, A., DE GUZMAN, D., RAVENSTIJN, J., KÄB, H. AND RASCHKA, A. 2024: *Bio-based Building Blocks and Polymers – Global Capacities, Production and Trends 2023–2028*. nova-Institut GmbH (Ed.), Hürth, 2024-03. 10.52548/VXTH2416
- STADLER, R. 2010: Der Überflieger, in: *Süddeutsche Magazin*, 25.11.2010. <https://sz-magazin.sueddeutsche.de/tiere-pflanzen/der-ueberflieger-77730> (letzter Zugriff 09.06.2024).
- STARZ, N. T. 2023: *Road to a Bioeconomy in the European Union: Mapping Drivers of Precision Fermentation Adoption*. Otto Beisheim School of Management (Ed.), Innsbruck.
- TENG, T. S., CHIN, Y. L., CHAI, K. F. AND CHEN, W. N. 2021: Fermentation for future food systems: Precision fermentation can complement the scope and applications of traditional fermentation. *EMBO Rep*, Vol. 22 (5), e52680. doi: 10.15252/embr.202152680
- TEREFE, N. S. 2022: *Recent developments in fermentation technology: toward the next revolution in food production*. *Food Engineering Innovations Across the Food Supply Chain*. Elsevier.

- THRÄN, D., PONITKA, J., ARENDT, O., LENZ, V., DANIEL-GROMKE, J., STINNER, W., ORTWEIN, A., ZEYMER, M., GRÖNGRÖFT, A., MÜLLER-LANGER, F., KLEMM, M., BRAUN, J., ZEUG, W., O'KEEFFE, S. AND MILLINGER, M. 2015: Konversionspfade zur energetischen Biomassenutzung im 21. Jahrhundert. FOCUS ON Bioenergie-Technologien, Vol. 1
- TICKNER, J. A., GEISER, K. AND BAIMA, S. 2022: Transitioning the Chemical Industry: Elements of a Roadmap Toward Sustainable Chemicals and Materials. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, Vol. 64 (2), 22-36. doi: 10.1080/00139157.2022.2021793
- TOKAY, B. A. 2011: Biomass Chemicals. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- TWEDDLE, G. 2023: Persönliche Kommunikation mit Gillian Tweddle, Marktexpertin für petro- und bio-basierte Chemikalien. Februar 2023.
- UBANDO, A. T., DEL ROSARIO, A. J. R., CHEN, W. H. AND CULABA, A. B. 2021: A state-of-the-art review of biowaste biorefinery. *Environ Pollut*, Vol. 269 116149. doi: 10.1016/j.envpol.2020.116149
- (UBA) UMWELTBUNDESAMT 2014: Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. Kurzfassung. Texte 02/2014. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau
- (UBA) UMWELTBUNDESAMT 2018: Daten zur Umwelt. Umwelt und Landwirtschaft. Ausgabe 2018. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- (UBA) UMWELTBUNDESAMT 2019: BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). (Ed.), Bonn, Dezember 2018.
- VAKALIS, S., SOTIROPOULOS, A., MOUSTAKAS, K., MALAMIS, D., VEKOS, K. AND BARATIERI, M. 2017: Thermochemical valorization and characterization of household biowaste. *J Environ Manage*, Vol. 203 (Pt 2), 648-654. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.04.017
- VAN HECKE, W., BOCKRATH, R. AND DE WEVER, H. 2019: Effects of moderately elevated pressure on gas fermentation processes. *Bioresour Technol*, Vol. 293 122129. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122129
- VAN HOREN, L. 2018: Vertical farming in the Netherlands. Is the only way up? *Rbobank* (Ed.)
- VAN HUIS, A. 2017: Edible insects: marketing the impossible? *Journal of Insects as Food and Feed*, Vol. 3 (2), 67-68. doi: 10.3920/JIFF2017.x003
- VAN ZANTEN, H. H. E., MOLLENHORST, H., OONINCX, D. G. A. B., BIKKER, P., MEERBURG, B. G. AND DE BOER, I. J. M. 2015: From environmental nuisance to environmental opportunity: housefly larvae convert waste to livestock feed. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 102 362-369. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.106
- VCI (VEREIN DER CHEMISCHEN INDUSTRIE) 2023: Chemistry 4 Climate – Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf> (letzter Zugriff 05.06.2024).
- VEREINTE NATIONEN 2015: Ziele für Nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals). <https://sdgs.un.org/goals> (letzter Zugriff: 25.04.2024).

- VOGT, E. T. C. AND WECKHUYSEN, B. M. 2024: The refinery of the future. *Nature*, Vol. 629 (8011), 295-306. doi: 10.1038/s41586-024-07322-2
- VOLLMANN, J., RAJCAN, I. (ed.) 2010: *Handbook of Plant Breeding – Oil Crops*. New York 2010.
- WANG, G., DAI, Y., YANG, H., XIONG, Q., WANG, K., ZHOU, J., LI, Y. AND WANG, S. 2020: A Review of Recent Advances in Biomass Pyrolysis. *Energy & Fuels*, Vol. 34 (12), 15557-15578. doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c03107
- WILTS, H., LÜHR, O., BITTER-KRAHE, J., DEMANDT, M., WILKSKAMP, K., KÖLMEL, R., EISERBECK, L. 2022: Methodische Konzeption einer regionalen Ressourcenwende im Rheinischen Revier. Studie für den Revierknoten Ressourcen und Agrobusiness. https://www.rheinisches-revier.de/wp-content/uploads/2022/09/Abschlussdokument_Ressourcenwende_RR_final.pdf (letzter Zugriff 02.04.2024).
- ZUKUNFTSAGENTUR RHEINISCHES REVIER 2021: Wirtschafts- und Strukturprogramm für das Rheinische Zukunftsrevier 1.1 (WSP 1.1); Stand 06/2021. Jülich.
- ZUKUNFTSAGENTUR RHEINISCHES REVIER 2021: Innovationsstudie 2021 Leuchttürme im Rheinischen Revier. Jülich.
- ZUR STRASSEN, T., SCHARF, A., CARUS, G., CARUS, M. 2020: Are new food and biomass technologies more sustainable? A review. nova-Paper #14. <https://renewable-carbon.eu/publications/product/nova-paper14-are-new-food-and-biomass-technologies-more-sustainable-a-review-full-version/> (letzter Zugriff 15.03.2024).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Rheinisches Revier: Anrainerkommunen (hellgrau) und umliegende Kreise (dunkelgrau).....	11
Abbildung 2:	Stoffliche Nutzungen von Biomasse in Europa	18
Abbildung 3:	Aufteilung der Haupternteprodukte im Rheinischen Revier (Betrachtungsjahr 2020) in ihre Hauptbestandteile, in t TM (Sonstige: Asche, Lignin, etc.).....	50
Abbildung 4:	Verwendung der Haupternteprodukte im Rheinischen Revier (t TM).....	51
Abbildung 5:	Verwendung der Hauptbestandteile im Rheinischen Revier (t TM)	52
Abbildung 6:	Haupternte- und Nebenernteprodukte im Rheinischen Revier (t FM).....	53
Abbildung 7:	Menge und hauptsächliche Verwendung der Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft im Rheinischen Revier in t TM (bezogen auf die Erntemenge im Jahr 2020, bzw. Milch- und Schlachtmenge)	59
Abbildung 8:	Modellierte Ertragsentwicklung von Raps.....	69
Abbildung 9:	Modellierte Ertragsentwicklung von Weizen.....	69
Abbildung 10:	Modellierte Ertragsentwicklung von Zuckerrübe.....	69
Abbildung 11:	Biomasseangebot und -nachfrage in den Szenarien im Jahr 2035 im Rheinischen Revier.....	70
Abbildung 12:	Biomasseangebot und -nachfrage in den Szenarien im Jahr 2045 im Rheinischen Revier.....	71
Abbildung 13:	Produzentenpreis in den Szenarien Umwelt, Technologie und Kombi im Jahr 2045, Referenz = Szenario BAU.....	73
Abbildung 14:	Produzentenpreise im Szenario Kombi bei verstärkter Nachfrage nach Weizen, Raps und Zuckerrüben im Jahr 2035, Referenz = Szenario BAU.....	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Technologien für den Anbau von Biomasse.....	19
Tabelle 2:	Mechanische und physikalische Aufbereitung von Biomasse.....	20
Tabelle 3:	Chemische Verarbeitung von Biomasse.....	24
Tabelle 4:	Thermochemische Verarbeitung von Biomasse.....	25
Tabelle 5:	Biotechnologische Verarbeitung von Biomasse.....	26
Tabelle 6:	Übersicht über die in den Steckbriefen dargestellten Technologien und Nutzungsverfahren.....	30
Tabelle 7:	Einteilung der Kriterien „Nachhaltigkeit“ und „Relevanz“ für die Bewertung der Nutzungsverfahren.....	31
Tabelle 8:	Anbaufläche und Erntemenge der Haupternteprodukte im Rheinischen Revier im Jahr 2020.....	49
Tabelle 9:	Verwendung der Haupternteprodukte im Rheinischen Revier (%), berechnet durch nova-Institut.....	51
Tabelle 10:	Untersuchte Sektoren der Ernährungswirtschaft und entsprechende Reststoffe.....	54
Tabelle 11:	Übersicht über die in der Ernährungswirtschaft eingesetzten Rohstoffe (bezogen auf die im Rheinischen Revier produzierten Mengen) und die aus der Verarbeitung resultierenden Reststoffe, berechnet durch nova-Institut.....	58
Tabelle 12:	Überblick über die Parameter aller vier Szenarien (alle +/- %-Werte in Bezug auf Referenzjahr 2020).....	67
Tabelle 13:	Eckdaten der Anlagen, deren Rohstoffbedarf als Nachfrageschock in das Modell CAPRI eingebaut wurden.....	73
Tabelle 14:	Anforderungen an Biomasse verschiedener Regelwerke.....	77
Tabelle 15:	Vorschlag zu möglichen Indikatoren für ein Monitoring der stofflichen Biomassennutzung im Rheinischen Revier (RR).....	82

Anhang

- I Aufteilung der Haupternteprodukte in ihre Hauptbestandteile
- II Richtwerte für das Verhältnis von Haupternteprodukt zu Nebenernteprodukt
- III Richtwerte für den Trockensubstanzgehalt von Reststoffen aus der Ernährungswirtschaft
- IV Preisveränderungen von Weizen, Raps und Zuckerrüben in den verschiedenen Szenarien

Anhang I

Aufteilung der Haupternteprodukte in ihre Hauptbestandteile (% in FM, Quelle: FAO 2013, PIOTROWSKI et al. 2015)

Ernteprodukt	Wasser	Protein	Fette & Öle	Zucker & Stärke	Cellulose	Sonstige ¹
	% in Frischmasse					
Weizen	12	12	2	66	4	4
Roggen	12	12	2	63	5	5
Gerste	12	12	2	67	4	4
Hafer	12	13	8	66	1	1
Triticale	12	12	2	65	4	4
Mais	12	10	4	70	2	2
Kartoffeln	79	2	0	15	0	5
Zuckerrübe	77	1	0	17	5	0
Raps	8	20	45	3	5	20
Sonnenblumen	10	15	25	30	10	10
Sojabohne	9	35	15	21	10	10

¹ Asche, Lignin, etc.

Für Biomasse von Dauergrünland wurde angenommen, dass diese zu 65 % aus Cellulose/Hemicellulose, zu 20 % aus Protein, zu 10 % aus Mineralien/Vitaminen und zu 5 % aus Fett besteht (PIOTROWSKI et al. 2015).

Anhang II

Richtwerte für das Verhältnis von Haupternteprodukt zu Nebenernteprodukt (Quelle: LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NRW 2012)

Kultur	Richtwert
Weizen	0,8
Roggen	0,9
Gerste	0,8
Hafer	1,1
Triticale	0,9
Mais	1,0
Kartoffeln	0,2
Zuckerrübe	0,7
Raps	1,7

Beispiel: 10 t Weizenkorn liefern gleichzeitig 8 t Stroh

Anhang III

Richtwerte für den Trockensubstanzgehalt (%) für ausgewählte biogene Reststoffe aus der Ernährungswirtschaft

(Quelle: GAIDA et al. 2012, PHYLLIS 2024)

Sektor – Ernährungswirtschaft	Reststoffe – Ernährungswirtschaft	Richtwerte für Trockensubstanzgehalt (%)
Getreideverarbeitung	Kleie	35,5
Zuckerproduktion	Melasse	75,5
Zuckerproduktion	Zuckerrübenschnitzel	16,7
Pflanzenölproduktion	Rapspresskuchen	91,2
Obst-, Gemüse-, Kartoffelverarbeitung	Schäl- und Putzreste	14,6
Bierproduktion	Treber, Hefe	23,8
Fleischverarbeitung	Tierfette	98,8

Anhang IV

Preisveränderungen als Index für Weizen, Raps und Zuckerrüben in den verschiedenen Szenarien, 2035 (Quelle: nova-Institut 2024, CAPRI)

2035	BAU	Umwelt	Techno- logie	Kombi U & T	Kombi U & T	Kombi U & T	Kombi U & T
Index (BAU = 100)					PLA – Weizen	PLA – Zucker	Tensid Rapsöl
Produzentenpreis							
Weizen	100	102,85	98,66	101,30	101,33	101,38	101,35
Rapssaat	100	104,28	97,56	102,10	102,10	102,12	102,19
Zuckerrüben	100	100,60	99,67	100,30	100,33	100,98	100,33
Konsumentenpreis							
Weizen	100	100,15	99,92	100,07	100,06	100,07	100,07
Rapsöl	100	100,07	99,95	100,03	100,04	100,03	100,15
Zucker	100	100,02	99,99	100,01	100,01	100,03	100,01

Preisveränderungen als Index für Weizen, Raps und Zuckerrüben in den verschiedenen Szenarien, 2045 (Quelle: nova-Institut 2024, CAPRI)

2045	BAU	Umwelt	Techno- logie	Kombi U & T	Kombi U & T	Kombi U & T	Kombi U & T
Index (BAU = 100)					PLA – Weizen	PLA – Zucker	Tensid Rapsöl
Produzentenpreis							
Weizen	100	106,35	95,14	100,67	100,75	100,72	100,69
Rapssaat	100	108,43	97,02	104,05	104,06	104,03	104,04
Zuckerrüben	100	101,48	98,92	100,28	100,25	100,99	100,99
Konsumentenpreis							
Weizen	100	100,22	99,82	100,02	100,03	100,03	100,03
Rapsöl	100	100,10	99,95	100,04	100,04	100,04	100,04
Zucker	100	100,04	99,97	100,01	100,01	100,03	100,03

IMPRESSUM

Herausgeber Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Dieser Fachbericht entspricht im Wesentlichen dem Abschlussbericht einer Studie, die im Auftrag des LANUV erstellt wurde.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektbearbeitung Lara Dammer, Olaf Porc, Achim Raschka, Matthias Stratmann, Mika Plum
nova-Institut für politische und ökologische Innovation GmbH,
Leyboldstraße 16, 50354 Hürth

Projektkoordination & Fachredaktion Carmen Haase, Gero Oertzen, Amir Panah (LANUV)
E-Mail: Fachbereich34@lanuv.nrw.de

Stand Februar 2025

Titelbild Adobe Stock / Cornelius Otto

ISSN 1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte

Informationsdienste Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucher-
schutz unter
• www.lanuv.nrw.de
Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext

Bereitschaftsdienst Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV
(24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Landesamt für Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de