



Integriertes Stadt-Land-Konzept zur Erzeugung von Aktivkohle und Energieträgern aus Restbiomassen

Sachbericht zum Verwendungsnachweis



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FONA
Ressource Land
BMBF



Fördermaßnahme Stadt-Land-Plus

Förderkennzeichen: 033L206

Projektleitung:

Prof. Dr. Michael Wachendorf

Universität Kassel

Projektlaufzeit: 01.07.2018 – 31.12.2023

Inhalt

1.	Ausgangssituation	1
1.1	Mikroverunreinigungen in der Abwasserbehandlung	1
1.2	Restbiomassen	2
2.	CoAct-Verfahren.....	3
2.1	Biomassen	4
2.1.1	Holzige Biomassen	4
2.1.2	Grasartige Biomassen	4
2.2	IFBB-Technikkonzept.....	5
2.3	Pyrolyse und Aktivierung	7
2.3.1	Anforderungen an das Rohmaterial	7
2.3.2	Aktivierung.....	8
2.3.3	Aktivierungspotenzial	8
2.3.4	1-stufiges und 2-stufiges Aktivierungsverfahren.....	8
3.	Projektregion und Biomassen	9
3.1	Stadt-Land-Beziehung	9
3.1.1	Bodenseekreis.....	9
3.1.2	Stadt Friedrichshafen.....	9
3.2	Biomassen Verfügbarkeit, Potenzial	10
3.2.1	Charakterisierung der Restbiomasse	10
3.2.2	Menge der Restbiomassen	12
3.2.3	Verfügbarkeit der Restbiomassen	13
3.2.4	Biomasse-Steckbriefe	13
3.3	Ernteketten	13
3.4	„Entscheidungsmatrix“	15
3.4.1	Notwendigkeit einer Entscheidungsmatrix CoAct	15
3.4.2	Aufbau.....	15
3.4.3	Konsequenzen	17
3.4.4	Bearbeitung des Entscheidungsbaums.....	17
3.4.5	Bearbeitung der Matrix	17
3.4.6	Bearbeitung der abschließenden Bewertung.....	17
3.5	Rechtliches Fazit.....	18
3.6	Konzepte für Standorte.....	18
4.	Forschung und Entwicklung des CoAct-Verfahrens	20
4.1	Probenahmen	20
4.1.1	Biomassentyp A	20
4.1.2	Biomassentyp B	20
4.2	Physikalisch-chemische Charakterisierung der Restbiomassen	21
4.2.1	Holzige Restbiomassen (Typ A).....	21
4.2.2	Grasartige Biomassen (Typ B).....	22

4.2.3	IFBB-Presskuchen.....	22
4.2.4	IFBB-Presssaft	23
4.3	Pyrolyse & Aktivierung.....	23
4.3.1	Entwicklung und Bau des Laborreaktors	23
4.3.2	Durchführung der Aktivierungs-Untersuchungen	25
4.4	Spurenstoffelimination der CoAct-Aktivkohlen	27
4.5	Ökobilanzierung	29
4.6	Integrative Anlagenplanung.....	31
4.6.1	IFBB	31
4.6.2	Pyrolyse- und Aktivierungsanlage.....	33
5.	Umsetzung und Verstetigung.....	35
5.1	Anlagenplanung für den Standort Kläranlage.....	35
5.1.1	Auswahl der Kläranlage Kressbronn-Langenargen.....	36
5.1.2	Das CoAct-Konzept für die Kläranlage Kressbronn-Langenargen.....	36
5.1.3	Integrative Anlagenplanung für die Kläranlage Kressbronn	37
5.1.4	Ökologische Bewertung.....	39
5.2	Der CoAct-Praxisversuch.....	40
5.2.1	Beschaffung einer biogenen Aktivkohle	40
5.2.2	Biogene Aktivkohle der Firma AdFiS.....	41
5.2.3	Messkampagnen auf der Kläranlage	42
5.2.4	Ergebnisse des Praxisversuches.....	43
6.	Ökonomische Analyse und Governance	47
6.1	Das CoAct-Kalkulationstool.....	47
6.2	Vergleich der Wirtschaftlichkeit von CoAct-Anlagenvarianten	48
6.2.1	Investitionskosten.....	48
6.2.2	Aufwendungen	49
6.2.3	Erträge	49
6.2.4	Gewinn- und Verlustrechnung.....	50
6.3	Sensitivitätsanalyse.....	51
6.4	Regionale Governance und Betreibermodelle.....	52
6.5	Potenziale für eine regionale nachhaltige Entwicklung.....	53
6.6	Ökonomische Gesamtbewertung des CoAct-Konzepts unter Berücksichtigung seiner Potenziale für eine nachhaltige, regionale Entwicklung	53
6.7	Empfehlungen zur Übertragbarkeit	58
7.	Fazit und Ausblick.....	60
8.	Literaturverzeichnis.....	63

1. Ausgangssituation

Das Forschungs-Projekt CoAct hat im Rahmen einer interkommunalen Zusammenarbeit die nachhaltige Inwertsetzung von Restbiomassen in der Untersuchungsregion entwickelt und eine Stärkung der Stadt-Land-Beziehungen durch eine integrierte nachhaltige Entwicklung der Stadt Friedrichshafen (FN) und des Bodenseekreises (BSK) vorangetrieben.

Grundlage des Vorhabens bildete das innovative Konzept der Universität Kassel zur Integrierten Festbrennstoff- und Biogasproduktion aus Biomasse (IFBB-Verfahren), welches um die Pyrolyse und Aktivierung der Festbrennstoffe zum CoAct-Technikkonzept erweitert wurde und für eine nachhaltige Produktion von Aktivkohlen für die Abwasserreinigung eingesetzt werden soll. Zur Integration dieses technologischen Ansatzes in die Projektregion als ganzheitliches CoAct-Verfahren haben sich die folgenden Verbundpartner zusammengeschlossen, um den Ansatz in seinen vielseitigen Facetten zu untersuchen:

- Bodensee-Stiftung (BoSti)
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. – Technologiezentrum Wasser (TZW)
- Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu)
- Institut für Ländliche Strukturforchung (IfLS)
- Krieg & Fischer Ingenieure GmbH (K&F)
- Landkreis Bodenseekreis (BSK)
- PYREG GmbH (PYREG)
- Stadt Friedrichshafen (FN)
- Universität Kassel (UniKS)

Als assoziierter Partner wurde außerdem der Abwasserzweckverband Kressbronn a. B.-Langenargen (AZV) gewonnen.

Das Projekt hat in der Forschungs- und Entwicklungsphase zum einen die notwendigen technischen, ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Wissensgrundlagen ermittelt, die der Entwicklung nachhaltiger CoAct-Verfahrensvarianten dienen. Zum anderen wurden die betroffenen Akteure, ihre Beziehungen und Interessen analysiert und innovative Strategien und Instrumente zur Gestaltung des Entscheidungs- und Umsetzungsprozesses für das CoAct-Verfahren entwickelt, der gemeinsam durch Stadt und Landkreis erfolgen soll.

In der zweiten Projektphase (Umsetzung und Verstetigung) hat das Projekt den Entscheidungsprozess für eine CoAct-Verfahrensvariante und die Erarbeitung des Realisierungskonzeptes durch die Gebietskörperschaften mit innovativen Instrumenten unterstützt, moderiert und begleitet.

1.1 Mikroverunreinigungen in der Abwasserbehandlung

Kommunen und Landkreise sehen sich mit zunehmenden Anforderungen beim Umwelt- und Klimaschutz konfrontiert. Im Bereich der Abwasserreinigung wird die Entfernung von organischen Mikroverunreinigungen stufenweise für viele Kläranlagen zur Pflicht werden.

Bei den sogenannten Mikroverunreinigungen handelt es sich um Spuren von Arzneimitteln, Pflanzenschutzmitteln, Bioziden und anderen Chemikalien, die schon in geringen Konzentrationen nachteilige Wirkungen auf die Umwelt oder auf die menschliche Gesundheit haben können. Ein wesentlicher Eintragungspfad dieser Substanzen in Gewässer ist die Abwasserableitung und sind somit die

kommunalen Kläranlagen (Ahting et al. 2018). Die drei etablierten Klärstufen können diese Substanzen nicht bzw. nicht ausreichend entfernen. Ein neuer Gesetzesvorschlag der EU-Kommission sieht vor, die sogenannte „4. Reinigungsstufe“ auf den Kläranlagen in Zukunft flächendeckend einzuführen (Obermaier et al. 2023).

Im Wesentlichen haben sich nach aktuellem Stand zwei unterschiedliche Verfahren zur Spurenstoffelimination sowie Mischformen als geeignet erwiesen. Einerseits gibt es das oxidative Verfahren der Ozonung, welches jedoch besonders energieintensiv ist. Eine etablierte Alternative hierzu ist der Einsatz von **Aktivkohle** in pulverförmiger oder granulierter Form zur Adsorption der Mikroverunreinigungen. Aktivkohle wird derzeit größtenteils aus fossilen Rohstoffen hergestellt und hat damit auch einen hohen Primärenergieverbrauch. Zwar sind auch Kokosshalen als nachwachsender Rohstoff schon in Verwendung, aber auch dort bestehen viele Bedenken gegenüber der Nachhaltigkeit, etwa hinsichtlich der Emissionen bei Produktion und Logistik, der lokalen Arbeitsbedingungen, oder der Abhängigkeit von globalen Handelsketten.

Das Land Baden-Württemberg nimmt bei der Umsetzung der 4. Reinigungsstufe unter den deutschen Bundesländern eine Vorreiterrolle ein. Stand November 2023 sind dort bereits 30 Anlagen in Betrieb, weitere 27 befinden sich in Bau oder Planung, der Großteil davon mit einer Adsorptionsstufe mit Pulveraktivkohle (PAK)¹. Speziell im BSK ist auf der Kläranlage Kressbronn-Langenargen die PAK-Anlage bereits seit 2011 etabliert und somit ein potenzieller Konsument von CoAct-Aktivkohle. Außerdem tragen die im Einzugsgebiet des Bodensees gelegenen Kommunen eine besondere Verantwortung für die Reinigung ihrer Abwässer, da der See die Wasserversorgung für ca. 4 Mio. Menschen sicherstellt.

Demnach besteht ein großes Interesse der Gebietskörperschaften, im Rahmen von CoAct einen neuen Ansatz der Stadt-Land-Kooperation zur Lösung übergreifender Probleme zu verfolgen und die für die Abwasserreinigung benötigte Aktivkohle aus einer nachhaltigen und regionalen Produktion zu beziehen.

1.2 Restbiomassen

Kommunen und Landkreise stehen außerdem vor der Herausforderung, zunehmend erneuerbare Energieträger zu erschließen und aus fossilen Rohstoffen erzeugte Produkte zu ersetzen. Während nachwachsende Rohstoffe aus Forst- und Landwirtschaft in großem Umfang energetisch bzw. stofflich genutzt werden, finden städtische (z.B. Grünschnitt, Laub) und ländliche Restbiomassen (z.B. Landschaftspflegematerial, Obstbaumschnitt) kaum oder gar keine Verwertung. Vielmehr erfolgt häufig eine mehr oder weniger geordnete Entsorgung. Nicht selten findet man „wilde Deponien“, um die Kosten für unrentable Verwertungswege einzusparen. Das theoretisch verfügbare ungenutzte Biomasse-Reststoffpotenzial für Deutschland wird nach Abzug bereits existierender energetischer oder stofflicher Nutzung sowie verschiedenste Nutzungsrestriktionen (ökologisch, gesellschaftlich, wirtschaftlich) auf bis 30,9 Mio. t TM geschätzt (Brosowski et al. 2015).

Allgemein wurde folgende Definition für Restbiomasse im CoAct-Projekt getroffen:

„In dem Forschungsvorhaben CoAct wird der Begriff „Restbiomassen“ für alle pflanzlichen Rest- und Abfallstoffe verwendet, die bei Produktionsprozessen (z.B. dem Anbau landwirtschaftlicher Produkte) und der Erstellung von Dienstleistungen (z.B. der Flächen- und Landschaftspflege) in der Forschungsregion anfallen.“

¹ <https://koms-bw.de/klaeranlagen/uebersichtskarte/>

2. CoAct-Verfahren

Im Zentrum des Vorhabens steht das technische CoAct-Verfahren (vgl.

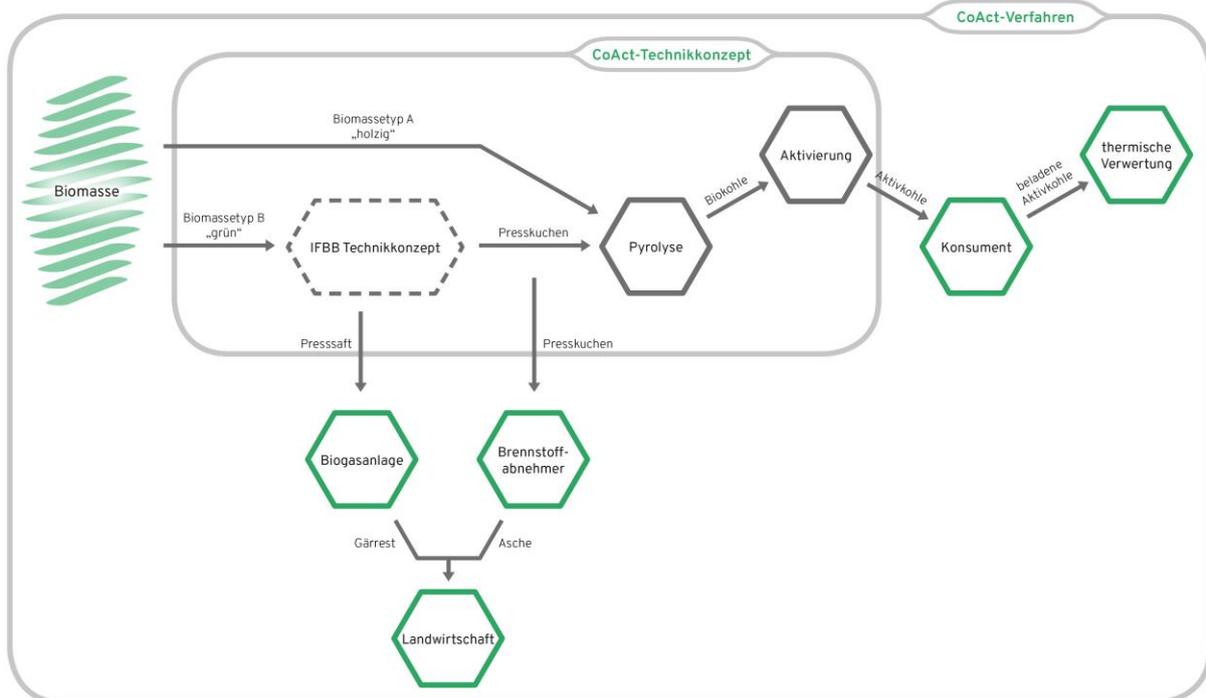


Abbildung 1). Es wurde ausgehend vom IFBB-Technikkonzept der Universität Kassel im Rahmen des Projektes zur stofflichen und energetischen Verwertung von unterschiedlichen Restbiomassen weiterentwickelt. Dieses Verfahren setzt sich aus einer stofflichen Verwertung der Biomassen, dem sogenannten CoAct-Technikkonzept und der Anwendung der darin generierten Produkte und Nebenprodukte zusammen.

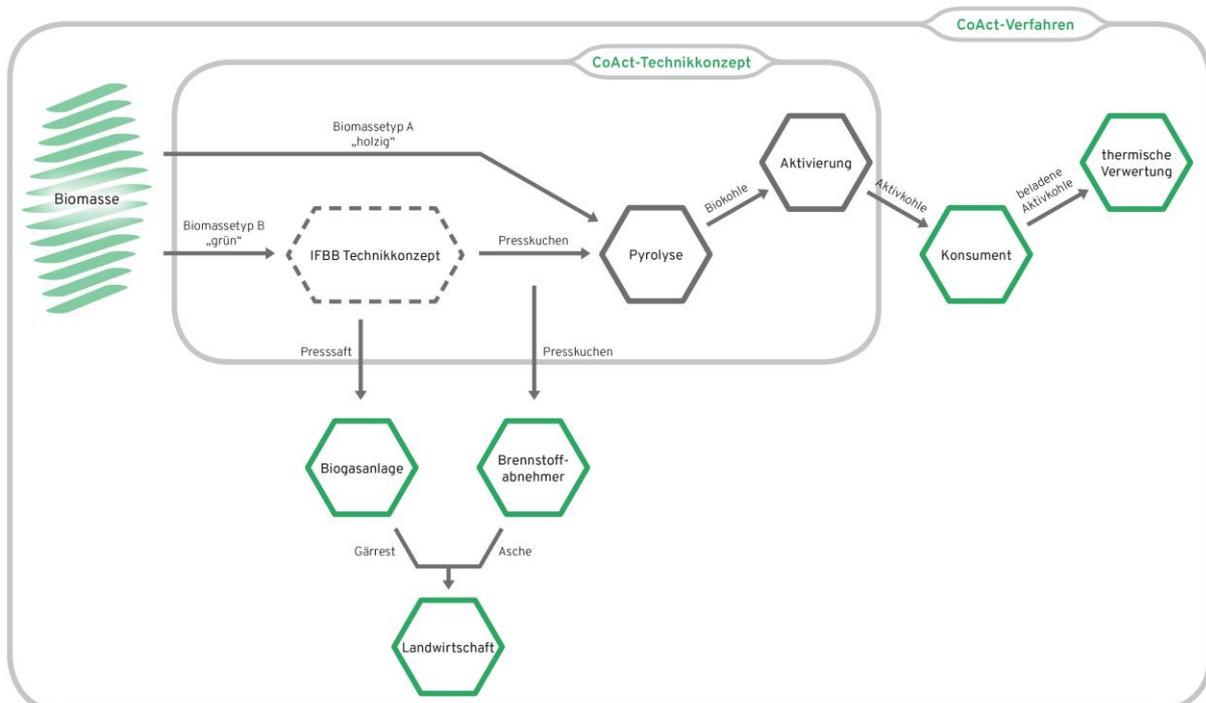


Abbildung 1: Schematische Darstellung des CoAct-Verfahrens, um Restbiomassen je nach Typ („holzig“ oder „grün“) hochwertig verwerten zu können. (Quelle: Universität Kassel, 2018)

Der Fokus für das Verbundvorhaben liegt auf der Erzeugung von hochwertigen Aktivkohlen zur weitergehenden Behandlung von kommunalem Abwasser und der Entfernung von organischen Spurenstoffen. Für die beladene Aktivkohle steht am Ende des CoAct-Verfahrens die thermische Verwertung und die energetische Nutzung der in der Kohle enthaltenen Energie.

Als Biomassen, welche dem CoAct-Technikkonzept zugeführt werden können, eignet sich grundsätzlich eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Biomassen. Um jedoch sowohl Nutzungskonkurrenzen mit bestehenden Verwertungswegen zu vermeiden als auch einen ökologischen Mehrwert und eine nachhaltige Bewirtschaftung von Flächen zu fördern, liegt der Fokus in dem CoAct-Technikkonzept auf der Verwertung von Restbiomassen (vgl. Abschnitt 1.2).

2.1 Biomassen

Mit Hilfe des CoAct-Technikkonzeptes können eine Vielzahl an unterschiedlichen Restbiomassen verwertet werden. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Qualität von Aktivkohlen maßgeblich von einem hohen Kohlenstoff- bzw. geringen Mineral- und Aschegehalt positiv beeinflusst wird (Hagemann et al. 2020; Joseph et al. 2020). Zusätzlich muss zwischen Biomassen unterschieden werden, welche direkt einer Pyrolyse und Aktivierung zugeführt werden können und Biomassen, welche eine vorherige Aufbereitung benötigen.

2.1.1 Holzige Biomassen

Unter dem Begriff „holzige Biomassen“, bzw. Biomassetyp A werden in dem Forschungsvorhaben CoAct alle Biomassen zusammengefasst, welche ohne eine Vorbehandlung direkt pyrolysiert und aktiviert werden können, bzw. direkt einer thermischen Verwertung zugeführt werden können. Neben klassischen Holzrestbiomassen, wie beispielsweise Hochstamm- oder Heckenschnitt (vgl. Abbildung 2) beinhaltet diese Fraktion auch Restbiomassen mit einem sehr hohen Trockensubstanzgehalt, wie z.B. Mais- und Getreidestroh, aber auch den Siebüberlauf aus Gärresten oder von Kompostierungsanlagen. Grundsätzlich handelt es sich hierbei um Biomassen, welche über einen hohen Ligninanteil verfügen und ohne weitere Konservierung trocken gelagert werden können.



Abbildung 2: Holzige Restbiomassen vom Typ A (Wurzelstöcke und Heckenschnitt)

2.1.2 Grasartige Biomassen

Im Gegensatz zu den holzigen Biomassen werden Restbiomassen mit einem geringen TS-Gehalt bzw. hohem Wassergehalt als Biomassetyp B bzw. als grasartig/„grün“ zusammengefasst. Unter diesen Begriff fallen beispielsweise Landschaftspflegeschnitt oder landwirtschaftliche Restbiomassen, wie z.B.

Hopfenhäcksel oder Weintrester, aber auch kommunaler Bioabfall. Diese Restbiomassen werden i. d. Regel mittels Silage konserviert und benötigen vor einer pyrolytischen Verwertung eine Aufbereitung mittels IFBB-Technikkonzept (vgl. Absatz 2.2). Diese Aufbereitung ist erforderlich, um sowohl den Mineralstoff- bzw. Aschegehalt in den Biomassen zu reduzieren als auch korrosive Bestandteile der Biomassen, wie Chlor und Schwefel zu reduzieren, da diese bei einer Pyrolyse in das Pyrolysegas überführt würden und bei der Verbrennung der Gase zu Schäden an der Brennkammer führen könnten (vgl. Absatz 2.3).



Abbildung 3: Grasartige bzw. „grüne“ Restbiomassen vom Typ B (Grünschnitt und Weintrester)

2.2 IFBB-Technikkonzept

Das am Fachgebiet Grünlandwissenschaft und Nachwachsende Rohstoffe entwickelte und seit Jahren beforschte Technikkonzept der Universität Kassel zur Integrierten Erzeugung von Festbrennstoff und Biogas aus Biomassen (IFBB-Konzept) zielt darauf ab, grasartige Restbiomassen durch eine Reduzierung des Aschegehaltes nutzbar zu machen.

Für das IFBB-Technikkonzept werden die geernteten Biomassen bei Bedarf grob zerkleinert und anschließend siliert. In der Silierung werden die in den Biomassen enthaltenen Zuckerverbindungen mikrobiell unter anaeroben Bedingungen in Milchsäure umgewandelt. Hierdurch sinkt der pH-Wert der Biomassen auf etwa 3 ab, wodurch der anaerobe mikrobielle Abbau gestoppt wird und die Silage stabil bis zur weiteren Verarbeitung gelagert werden kann. Entwickelt wurde das Technikkonzept zur Produktion eines lagerfähigen Festbrennstoffes und Biogas aus Restbiomassen.

Zur weiteren Verarbeitung mittels des IFBB-Technikkonzeptes werden die silierten Biomassen zerkleinert und mittels hydrothermalen Konditionierung weiter verarbeitet (Abbildung 5). Hierzu wird die Biomasse für mindestens 15 Minuten mit ca. 40 °C warmen Wasser konditioniert, wodurch die Biomassen Wasser aufnehmen und aufquellen (Abbildung 4). Im Anschluss an die Konditionierung erfolgt eine mechanische Entwässerung des Biomasse-Wasser-Gemisches mittels einer Schneckenpresse. Durch den bei der Entwässerung entstehenden Druck und Scherkräften werden die Pflanzenzellwände mechanisch zerstört und entwässert. Hierdurch werden sowohl mineralische Bestandteile der Pflanzen, als auch leicht abbaubare organische Verbindungen, wie Zucker und organische Säuren in den entstehenden Presssaft überführt (Hensgen et al. 2012). Grundsätzlich führen erhöhte Temperaturen während der hydrothermalen Konditionierung zu verbesserten Massenflüssen von Mineralstoffen und Asche aus der Biomasse in den Presssaft, jedoch auch zu erhöhten Energiebedarfen. Die gewählte Temperatur von etwa 40 °C lässt sich jedoch aus mesophil betriebenen Biogasanlagen als Abwärme auskoppeln und stellt somit einen Kompromiss aus Ökonomie und Verfahrenseffizienz dar (Bühle et al. 2012; Richter et al. 2011).



Abbildung 4: Hydrothermale Konditionierung (links) und mechanische Entwässerung (rechts) von Restbiomassen im IFBB-Technikkonzept

Als Produkte des IFBB-Technikkonzeptes fallen nach der mechanischen Separierung einerseits ein entwässerter Presskuchen und andererseits ein energiereicher Presssaft an (Abbildung 5). Während der Presssaft durch anaerobe Co-Vergärung in Biogasanlagen in Biogas und anschließend in Strom und Wärme gewandelt werden kann, wird der Presskuchen nach einer Trocknung wahlweise als lagerfähiger Festbrennstoff, oder als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Pflanzen- und Aktivkohlen genutzt.

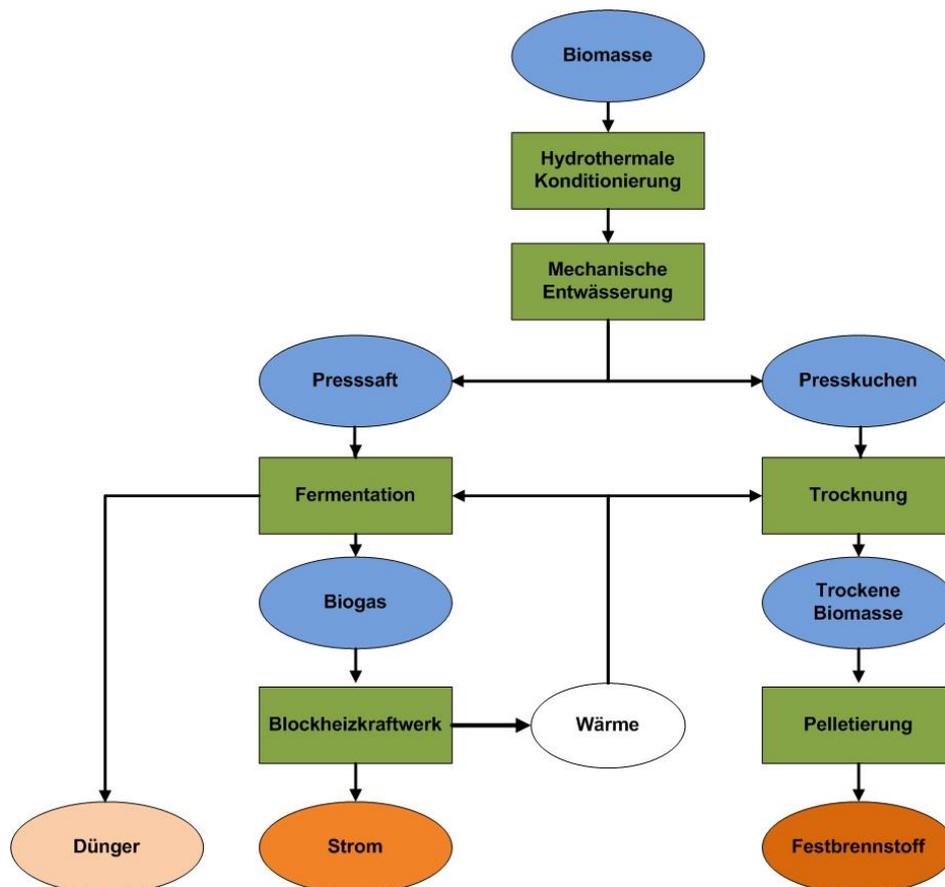


Abbildung 5: Verfahrensfließbild des Technikkonzeptes zur Integrierten Erzeugung von Festbrennstoff und Biogas aus Biomassen (IFBB-Technikkonzept)



Abbildung 6: Presssaft (links) und Presskuchenbrikett (rechts) nach mechanischer Entwässerung, Trocknung und Brikettierung im IFBB-Technikkonzept

Der mittels IFBB-Technikkonzept gewonnene Presskuchen weist nicht nur signifikant niedrigere Mineralstoff- und Aschegehalte auf, sondern erfüllt bei einer thermischen Verwertung die geforderten Grenzwerte gemäß 4. BimSchG.

2.3 Pyrolyse und Aktivierung

Für die Herstellung von Pflanzenkohlen aus unterschiedlichen Biomassen mittels Pyrolyse unter sauerstofffreien oder sauerstoffarmen Bedingungen, reichen schon Temperaturen von 400°C bis 500°C aus. Diese Kohlen können bei besonders gut geeigneten Materialien innere Oberflächenwerte von bis 300 m² g⁻¹ annehmen. (Joseph und Lehmann 2009) Konventionelle **Aktivkohlen** zeichnen sich jedoch durch eine deutlich höhere spezifische Oberfläche von über 1000 m² g⁻¹ aus (Zietzschmann et al. 2014).

Solch hohe Oberflächen können durch eine sogenannte physikalische Aktivierung mittels Partialoxidation an der Kohlenoberfläche bei hohen Temperaturen (800°C bis 1000°C) erzielt werden (Alt et al. 2016). Dafür können unterschiedliche Oxidationsmittel genutzt werden, wie z.B. reiner Sauerstoff, Luft, CO₂ oder auch Wasserdampf. Diese Aufzählung spiegelt auch die Reaktionsfreudigkeit der Oxidationsmittel wider (Aufzählung von links nach rechts: sehr schnell zu träge). Ein trägeres Oxidationsverhalten ermöglicht dabei grundsätzlich eine stabilere und gezieltere Prozessführung, was sich positiv auf die Herstellung von qualitativ hochwertigen Aktivkohlen auswirkt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde daher Wasserdampf als Oxidationsmedium verwendet.

2.3.1 Anforderungen an das Rohmaterial

Aufgrund der oxidativen Bedingungen durch die Wasserdampfzugabe besteht bei einem heterogenen (Partikelgröße und Zusammensetzung) Ausgangsmaterial die Gefahr, dass Teile überaktiviert werden, also verbrennen und andere Teile noch nicht vollständig aktiviert sind. Daher ist eine homogene Aufbereitung der Biomassen essentiell. Diese Anforderungen erfüllt insbesondere der pflanzenfaserreiche Presskuchen aus dem IFBB-Technikkonzept nicht, weswegen eine Pelletierung erforderlich ist, um ein homogenes Eingangsmaterial zu gewährleisten (Abbildung 7). Für ein optimales Ergebnis sollten jedoch auch holzige Biomassen mittels Pelletierung homogenisiert und kompaktiert werden.



Abbildung 7: Verarbeitung von IFBB-Presskuchen für die anschließende Pyrolyse und Aktivierung

2.3.2 Aktivierung

Vereinfacht lässt sich die bei der Wasserdampfaktivierung ablaufende Reaktion wie folgt ausdrücken:



Wobei C für den Kohlenstoff der Biomasse steht und H₂O für Wasserdampf als Oxidationsmittel. Durch die Zugabe von Wasserdampf bei hohen Pyrolysetemperaturen erfolgt durch den im Wasserdampf enthaltenen Sauerstoff eine Oxidation des Kohlenstoffes zu CO bzw. CO₂, welches zusammen mit dem Wasserstoff in das entstehende Synthesegas überführt wird. Hierdurch wird eine hochporöse Aktivkohle mit einer hohen spezifischen Oberfläche erzeugt.

2.3.3 Aktivierungspotenzial

Um die Aktivierungsergebnisse von unterschiedlichen Biomassen vergleichen zu können, ist eine Normierung der Wasserdampfzugabe erforderlich, um ein sogenanntes Oxidations- oder Aktivierungspotenzial zu berechnen. Dies erfolgt über eine stöchiometrische Berechnung der erforderlichen Wasserdampfzugabe bezogen auf den Kohlenstoffgehalt des Eingangsmaterials. Hierzu wird die Wasserdampfmenge errechnet, die benötigt wird, um stöchiometrisch einen definierten Anteil des Kohlenstoffes zu CO zu oxidieren. Bei einem Aktivierungspotenzial von 100 % wird beispielsweise die gleiche Stoffmenge an Sauerstoff (in H₂O) und Kohlenstoff (in Biomasse) in den Reaktor eingetragen, sodass stöchiometrisch eine vollständige Oxidation des Kohlenstoffes erreicht werden könnte. Durch diese Berechnung der Wasserdampfmenge wird der unterschiedliche Kohlenstoffgehalt der Eingangsmaterialien bei der Aktivierung berücksichtigt und die Ergebnisse vergleichbar.

2.3.4 1-stufiges und 2-stufiges Aktivierungsverfahren

Die Aktivierung kann sowohl in einem sogenannten 1-stufigen Verfahren oder einem 2-stufigen Verfahren erfolgen (Hagemann et al. 2020). Bei einem 1-stufigen Verfahren wird das Oxidationsmittel (Wasserdampf) zusammen mit der Biomasse in den Reaktor eingetragen. Die Pyrolyse und Aktivierung erfolgt somit zeitgleich in einem Verfahrensschritt. Prozesstechnisch ist dies das einfachste Verfahren, da die in der Biomasse bzw. in dem daraus entstehenden Synthesegas enthaltene Energie zum Heizen des Reaktors verwendet werden kann. Da die Pyrolyse und Aktivierung der Biomassen jedoch in einem Verfahrensschritt erfolgt, finden diese Prozesse bei der gleichen Temperatur und Verweilzeit statt.

Folglich können insbesondere bei heterogenen und qualitativ minderwertigen Biomassen die Konversionsraten und Aktivierungsergebnisse nicht optimal gesteuert werden.

Bei einem 2-stufigen Verfahren erfolgen die Pyrolyse der Biomassen und die Aktivierung der dabei generierten Karbonisate in getrennten Prozessen. Entsprechend können für beide Prozesse optimale Bedingungen (u.a. Verweilzeit und Temperatur) eingestellt werden, wodurch die Konversionsrate und das Aktivierungsergebnis verbessert werden kann. Prozesstechnisch ist dieses Verfahren jedoch deutlich aufwändiger und in großtechnischen Anlagen schwer zu realisieren. Insbesondere, da die Energie, welche für das Erreichen der optimalen Aktivierungstemperatur benötigt wird, unter Umständen nicht aus den erzeugten Synthesegasen gewonnen werden kann und somit evtl. der gesamte Prozess externe Energie benötigen kann.

3. Projektregion und Biomassen

3.1 Stadt-Land-Beziehung

Die Untersuchungsregion des CoAct-Forschungsprojektes setzt sich aus dem Bodenseekreis und der Stadt Friedrichshafen zusammen.

3.1.1 Bodenseekreis

Der Bodenseekreis (BSK) erstreckt sich nahezu entlang des gesamten baden-württembergischen Nordufers des Bodensees und gehört zum Regierungsbezirk Tübingen, Kreisstadt und Sitz des Landratsamts ist Friedrichshafen. Auf einer Fläche von 664,72 km² leben rund 223.000 Menschen in 23 Gemeinden. Mit 335 Einwohnern/km² ist der Kreis verhältnismäßig dicht besiedelt. In den vergangenen zehn Jahren ist die Bevölkerung zudem stetig gewachsen. Wirtschaftlich dominieren Industrie und produzierendes Gewerbe. In zahlreichen Rankings und Landkreisvergleichen wurde bisher immer wieder bestätigt, dass der Bodenseekreis zu den Topregionen Deutschlands zählt, was Wirtschaftskraft, Innovationstärke und Entwicklungschancen anbelangt. In der Landwirtschaft prägen Sonderkulturen wie Obst-, Wein- und Hopfenanbau das Bild. Dank des hohen Freizeitwertes und der landschaftlichen Schönheit ist auch der Fremdenverkehr für die Wirtschaftskraft der Region von großer Bedeutung. Das Landschaftsbild ist durch den Bodensee sowie das angrenzende Hügelland mit Obstkulturen, Weinbau, Wiesen und Wäldern geprägt.

Der Bodenseekreis ist öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz für das Gebiet des Bodenseekreises. Als solcher ist er dazu verpflichtet, die in seinem Gebiet angefallenen und ihm überlassenen Abfälle aus privaten Haushalten zu verwerten oder zu beseitigen, wozu auch die ordnungsgemäße Entsorgung von Gartenabfällen gehört. Der Bodenseekreis sammelt bereits seit Ende der 1980er Jahre Gartenabfälle separat.

3.1.2 Stadt Friedrichshafen

Die Stadt Friedrichshafen ist mit rund 63.000 Einwohnerinnen und Einwohnern die größte Stadt am Nordufer des Bodensees und der Region Bodensee-Oberschwaben. Der Verwaltungssitz des Bodenseekreises nimmt zusammen mit seinen Ortsteilen Ailingen, Ettenkirch, Kluftern und Raderach eine Fläche von rund 7.000 Hektar ein. Die Gesamtfläche gliederte sich 2017 in rund 30 % Siedlungs- und Verkehrsfläche, 50 % Landwirtschaftsfläche sowie 20 % Waldfläche. Seit 1990 hat die Bevölkerung

um 12 %, die Siedlungs- und Verkehrsfläche sogar um 20 % zugenommen, während der Anteil der Agrarflächen um 9 % abgenommen hat.

Gemeinsam ist dem Bodenseekreis und der Stadt Friedrichshafen ihr Engagement für nachhaltige Entwicklung. Im Jahr 2010 ist der Bodenseekreis dem Programm des European Energy Award (eea), einem internationalen Qualitätsmanagement- und Zertifizierungsinstrument für kommunalen Klimaschutz, beigetreten und wurde 2013 zertifiziert. In den Jahren 2017 und 2021 hat der Bodenseekreis die Auszeichnung in Gold erhalten. Eine verbesserte energetische Nutzung der Garten- und Bioabfälle ist ein wesentliches Handlungsfeld im eea-Prozess des Bodenseekreises. Die Stadt Friedrichshafen als größte Kommune des Bodenseekreises ist seit 2006 Mitglied im European Energy Award (eea) und hat im Frühjahr 2021 zum dritten Mal die Auszeichnung in Gold erhalten. Die Stadt erstellt seit 2003 alle zwei bis drei Jahre einen Nachhaltigkeitsbericht und begleitet ihr Handeln mit Erfolgskontrollen. Auch in anderen Themenfeldern mit Nachhaltigkeitsbezug ist die Stadt im Süden Baden-Württembergs hervorragend aufgestellt. Unter anderem fördert sie den Ausbau erneuerbarer Energien und der E-Mobilität, ist Gründungsmitglied im Bündnis der Kommunen für biologische Vielfalt und bietet ein umfassendes Angebot zur Bildung für nachhaltige Entwicklung.

Sowohl in der Stadt als auch in Kommunen des Landkreises und auf Landkreisstraßen gibt es verschiedene kommunale Aufgaben, bei deren Erfüllung viele Restbiomasse anfallen. Beispielhaft genannt seien hier die Pflege städtischer Grünflächen und Parks, der Grünflächen an kommunalen Liegenschaften, das Mähen und der Rückschnitt von Verkehrsbegleitflächen, die Pflege von Gewässerrandstreifen, von Kompensationsflächen, von Ausgleichs- und Landschaftspflegeflächen sowie von bereits erworbenem Bauerwartungsland. Eine gemeinsame Erfüllung dieser Aufgaben – Pflegemaßnahmen, wertgebende Biomasseverwertung aber auch Abwasserreinigung für nachhaltigen Gewässerschutz – durch Stadt und Landkreis kann die Kosten für Maschinen und Geräte sowie Personal reduzieren und zu einer besseren Auslastung führen.

3.2 Biomassen Verfügbarkeit, Potenzial

3.2.1 Charakterisierung der Restbiomasse

Nach der Definition von Restbiomassen wurde in einem iterativen Prozess durch die Projektpartner Universität Kassel und Bodensee-Stiftung eine Liste mit pflanzlichen Rest- und Abfallstoffen im Bodenseekreis erstellt.

Zur Bewertung der Eignungen von Biomassen für das CoAct-Technikkonzept erfolgte eine Unterteilung in die Biomassefraktionen „grasartiges Material“, „halmartiges/strohartiges Material“, „holzige Material“ und „sonstiges Material“. Diese Unterteilung erlaubt eine erste Abschätzung, welche Biomassen für das IFFB-Technikkonzept geeignet sind und welche direkt pyrolysiert werden können. Während insbesondere grasartige Materialien mittels IFFB-Verfahren verwertet werden müssen, können holzige Materialien ohne Vorbehandlung pyrolysiert werden. Für die Biomassefraktionen „halmartiges/strohartiges Material“ und „sonstiges Material“ erfolgt die Verteilung der Massenströme auf die jeweiligen Verfahren nach einer eingehenden Untersuchung ihrer Eignungen.

Die erstellte Liste mit pflanzlichen Rest- und Abfallstoffen im Bodenseekreis wurde durch die Bodensee-Stiftung als Regionalkoordinator mit den Projektpartnern in der Region, den Mitarbeitenden der Umweltabteilung der Stadt Friedrichshafen und des Abfallwirtschaftsamtes im Bodenseekreis abgeglichen. Somit berücksichtigt die Auswahl die im Bodenseekreis vorkommenden Biomassen. Die

Liste enthält aber ebenso Biomassen, bei denen eine Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf andere Regionen in Deutschland und Mitteleuropa in Frage kommt.

Tabelle 1: Liste zu untersuchender Restbiomassen

01 Restholz von Hochstammpflegeschnitt	13 Maisstroh
02 Obstbäume (Rodung)	14 Hopfenpflanzenreste
03 Wurzelstöcke von z.B. Apfelplantagen	15 Weintrester
04 Holz aus Pflege von Fluss- und Seeufern	16 Obsttrester
05 Schwemmholz	17 Maische (Brennrückstand)
06 Hecken- und Strauchschnitt	18 Obstkerne
07 Restholz (Forst und sonst. Gehölze)	19 Nussschalen
08 Holziges Straßenbegleitgrün	20 Algen
09 Straßenbegleitgrün	21 Klärschlamm
10 Landschaftspflegeschnitt von Streuwiesen	22 Durchwachsene Silphie
11 Landschaftspflegeschnitt von Feuchtwiesen	23 Siebüberlauf Biomüllverwertung-Biogasanlage
12 Landschaftspflegeschnitt von Streuobstwiesen	24 Grün- und Gartenabfälle

Parallel zur Definition der Restbiomassen wurden durch die Bodensee-Stiftung erste Biomassen im Spätsommer/Herbst 2018 erfasst und an die Universität Kassel zur Untersuchung geschickt. So konnten bereits im ersten halben Projektjahr acht Restbiomassen – unter anderem fünf unterschiedliche grasartige Biomassen von verschiedenen Standorten – erfasst und untersucht werden. Dieser Schritt war wichtig, da hierbei einige Restbiomassen als für das CoAct-Projekt ungeeignet ausgeschlossen werden konnten.

Um eine Anzahl an Biomassen zu definieren, für die detaillierte Informationen bzgl. raumzeitlicher Verfügbarkeit, Logistik, stoffliche Eigenschaften, Verarbeitbarkeit zu Aktivkohle im Rahmen der ersten Projektphase generiert werden können, einigten sich die Projektpartner auf 7 Biomassen. Dabei wurden Restbiomassen aus allen vier Biomassefraktionen gewählt. Zudem wurden Restbiomassen mit einem relevanten Mengenanfall, die von unterschiedlichen Akteursgruppen geworben/verarbeitet werden und auch für andere Landkreise eine potentielle Relevanz haben, berücksichtigt. Die Projektpartner verständigten sich auf die folgenden Fokus-Restbiomassen:

Tabelle 2: Fokus-Restbiomassen, die prioritär untersucht wurden.

1. Maisstroh (strohartige)
2. Hochstammschnitt (holzige)
3. Strauch- und Heckenschnitt (holzige)
4. Landschaftspflegematerial von Streuwiesen (grasartige)
5. Straßenbegleitgrün (grasartige)
6. Hopfenhäcksel (sonstige)
7. Weintrester (sonstige)

3.2.2 Menge der Restbiomassen

Nach der Auswahl der Restbiomassen recherchierte die Bodensee-Stiftung gemeinsam mit den Projektpartnern Bodenseekreis und Stadt Friedrichshafen relevante Personen und Personengruppen, die mit den entsprechenden Biomassen Berührungspunkte haben. Das sind zum einen Akteure, die Restbiomassen verwalten, z.B. da sie diese besitzen oder über Verträge deren Entstehen oder Behandeln regeln. Zum anderen gibt es handelnde Akteure, die Restbiomassen bergen, verarbeiten oder entsorgen. Darüber hinaus gibt es Experten, die sich Wissen über die Restbiomassen und den Umgang damit erworben haben. Einzelne Personen können in allen drei Gruppen vertreten sein.

Zur Bestimmung des theoretischen Potenzials im Bodenseekreis verfügbarer Biomassen wurden die oben genannten Akteure und Experten durch die drei regionalen Projektpartner fragebogenbasiert zum Mengenaufkommen und zur Verwendung von Biomassen holziger, halmartiger und grasartiger Struktur befragt. Diese Befragung wurde ergänzt durch mündliche und schriftliche Nachfragen und durch eingehende Gespräche mit Vertreter:innen der Städte und Gemeinden im Bodenseekreis, der Landkreisverwaltung sowie mit weiteren Akteuren, wie beispielsweise Landwirt:innen und Dienstleistungsunternehmer:innen, die im Bereich der Biomasseverwertung tätig sind. Die Ergebnisse wurden in der Kurzstudie zur Ermittlung des tatsächlich nutzbaren Restbiomassepotenzials in der gesamten Projektregion zusammengestellt.

Durch Interviews mit Akteuren in der Region und ergänzende Recherchen und Berechnungen konnte allein mit den Fokus-Restbiomassetypen der jährliche theoretische Anfall im Bodenseekreis auf etwa 31.200 t Trockenmasse (TM) beziffert werden (Abbildung 8).

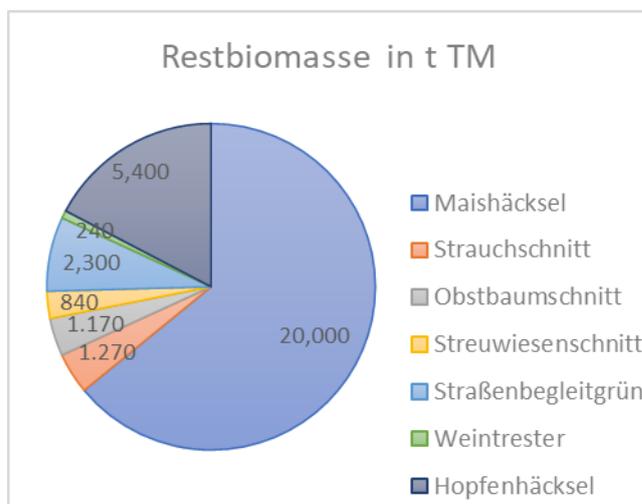


Abbildung 8: Jährlicher Anfall an Restbiomassen in t (TM)

Dabei fallen zwar das ganze Jahr über verschiedene Restbiomassen in der Stadt Friedrichshafen, den Gemeinden im Landkreis sowie im Landkreis an, jedoch nicht gleichmäßig. Vereinfacht kann man resümieren, dass grasartige Biomassen vor allem von Frühjahr bis Herbst, Erntereststoffe unter den sonstigen Biomassen im Herbst und holzige Restbiomassen im Winterhalbjahr anfallen, wobei Heckenschnitt als Vertreter der holzartigen Biomassen auch im Frühjahr und Herbst anfällt. Da es sich um natürlich wachsende Rohstoffe handelt, sind die jährlichen Mengen mitunter starken Schwankungen aufgrund unterschiedlicher

Witterung unterworfen. Die daraus resultierenden Schwankungen in den qualitativen Eigenschaften wie Trockensubstanzgehalt und Nährstoffzusammensetzung wird sich vor allem in den nicht holzigen Biomassen zeigen. Die langfristige Verfügbarkeit und die Schwankungen aufgrund von Klimawandel sind mit weiteren Unsicherheiten behaftet. Auch die Besitzrechte schwanken je nach Vertragsgestaltung und Marktnachfrage. Generell ist derzeit der Bezug von Material aus dem privaten, abfallwirtschaftlichen, landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Sektor vorstellbar.

3.2.3 Verfügbarkeit der Restbiomassen

Bei der Erfassung bzw. Kalkulation der Mengen wurden Rest-Biomassen als theoretisch verfügbar eingestuft, wenn es keine andere explizite bzw. einzigartige Verwertung gibt. D.h. Reststoffe, die beispielsweise in einer Biogasanlage verwertet werden, könnten auch durch andere Rest-Biomassen ersetzt werden und wurden daher als theoretisch verfügbar gezählt. Rest-Biomassen, die nicht einfach ersetzt werden können, werden nicht als theoretisch verfügbar berücksichtigt. Das ist beispielsweise bei dem Anteil an Weintrester der Fall, der zur Herstellung von Tresterbrand (Grappa) verwendet wird, da er nicht durch eine andere Rest-Biomasse ersetzt werden kann.

Bei der Betrachtung der Verwendung einer Restbiomasse für das CoAct-Verfahren wurde berücksichtigt, welche Verwertung die Biomasse im Status-Quo erfährt und wie die Restbiomasse substituiert werden müsste.

3.2.4 Biomasse-Steckbriefe

Um diese und weitere Informationen zu den sieben Fokusbiomassen zusammenzutragen, wurde von der Bodensee-Stiftung der Prozess zur Erstellung der Biomassesteckbriefe koordiniert. Sie enthalten neben den Informationen zur Verfügbarkeit der Restbiomassen die wichtigsten Ergebnisse des CoAct-Vorhabens zu den untersuchten Restbiomassen und den daraus hergestellten Aktivkohlen. Die Steckbriefe befinden sich im Anhang dieses Berichts.

3.3 Ernteketten

In der Praxis ist es nicht gegeben, dass Rest-Biomassen ohne weiteres in der Entsorgungs- oder Verwertungsform verändert werden können. Zur besseren Einschätzung der tatsächlichen Verfügbarkeit haben die regionalen Partner Bodensee-Stiftung, Bodenseekreis und Stadt Friedrichshafen folgende Unterteilung vorgenommen:

- a) Ernte- und Erfassungsketten, an deren Ende zum Status-quo die Biomasse bereits bei einer potenziell abgabewilligen Organisation im Bodenseekreis in einer für CoAct verwendbaren Form vorliegt. Das praktizierte Verwertungsverfahren für die Biomasse ist nicht oder nur marginal wirtschaftlich.

Dies sind Ernte- und Logistikketten, die für eine Nutzung des Materials im CoAct-Verfahren keiner größeren Änderungen bedürfen. Hierbei tritt die Verwendung des Materials für CoAct üblicherweise in Konkurrenz mit einem bestehenden Verwertungsverfahren, typischerweise mit Kompostierung oder der mehr oder weniger wirtschaftlichen Verwendung des Materials zur Energieerzeugung, z.B. in Biogas-Anlagen.

- b) Ernte- und Erfassungsketten, an deren Ende das Material in verarbeiteter oder unverarbeiteter Form an einen Abnehmer innerhalb oder außerhalb des Bodenseekreises zur Verwertung abgegeben wird. Durch die wirtschaftliche Eigenverwertung des Materials besteht vermutlich ein geringes Interesse an einer Abgabe.

Diese Art von Ernte- und Logistikketten sind bei einer Änderung durch das CoAct-Verfahren üblicherweise durch die Änderung/den Wegfall eines Transport- und/oder Verarbeitungsschritts gekennzeichnet. Das Material kann üblicherweise nur zum Marktpreis für CoAct gewonnen werden. Hinzu kommt auch hier, dass die Verwendung im CoAct-Verfahren in Konkurrenz zur Verwendung des

Materials in einem alternativen Verfahren (üblicherweise die Nutzung als Brennstoff oder als Substrat zur biogasbasierten Stromerzeugung) tritt.

- c) Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren, bzw. kein Verfahren, an deren Ende keine Nutzung des Materials steht. Üblicherweise finden für diese Art von Verfahren keine systematische Erfassung und kein nennenswerter Transport des Materials statt.

Eine Nutzung dieses Materials im Rahmen des CoAct-Verfahrens würde also zumeist ein „Verrottenlassen“ in der Landschaft ersetzen, meist in Form von aufgehäuften Schnittgut oder nach der Mahd flächig verteilt als Mulch, teilweise auch das Verbrennen unter freiem Himmel, wie im Fall von Obstbaumschnitt, insbesondere von aus ökologischen Gründen schützenswerten Hochstamm-Obstbäumen. Dem damit verbundenen Nutzen gegenüber steht die Herausforderung, neue Ernte- und Logistikketten zu etablieren, die wirtschaftlich tragfähig und technisch umsetzbar sind und zudem möglichst geringe negative Umweltwirkungen mit sich bringen, z.B. verursacht durch zusätzlichen Treibhausgas-Ausstoß, Lärm, Bodenerosion und –verdichtung, etc.

Fazit:

Chancen für die Akquise von Material in den Kategorien a) und b) mit keinen bzw. sehr geringen und daher leicht zu kompensierenden Konkurrenzsituationen ergeben sich bei: i) nachgewiesener Vorzüglichkeit des geänderten Verfahrens gegenüber bestehender Verfahren bei (turnusgemäßen) Änderungen oder Neuausschreibungen von Abnahme- und Verwertungsverträgen, z.B. mit Dienstleistern, die bereits im Abfallwirtschaftssystem befindliche Biomassen verwerten; ii) langfristigen Trends, die zu Nutzungsänderungen und damit zu einer verringerten Nachfrage nach den entsprechenden Biomassen führen, wie z.B. bei einem möglichen Rückgang der Nachfrage nach Einstreumaterial aus der Landwirtschaft in Folge vermehrter Betriebsaufgaben viehhaltender Betriebe; iii) einer Ausweitung des Angebots durch gesetzliche Vorgaben und andere steuerungspolitische Maßnahmen (wie z.B. finanzielle Anreize zur höherwertigen Nutzung pflanzlicher Rest- und Abfallstoffe), beispielsweise im Rahmen der Bioökonomiestrategie oder ähnlicher Programme mit Bezug zu nachhaltiger Ressourcennutzung und Klimaschutz.

Der aktuelle Verwertungsstatus von Material in Kategorie c) sowie auch die Möglichkeiten der Akquise des Materials für CoAct ergeben sich meist aus den gesetzlichen Rahmenbedingungen, die die bisherige (ressourcenineffiziente) Verwertungsform zulassen und aus der Unwirtschaftlichkeit bestehender Nutzungsverfahren. Gleichwohl geht die Nutzung dieser Art von Restbiomassen mit den größten Herausforderungen bezüglich tragfähiger Erfassungs- und Logistikkonzepte einher, die weitgehend neu entwickelt und etabliert werden müssten. Könnte das CoAct-Verfahren hier eine wirtschaftliche Nutzungsalternative aufzeigen, könnte ebenfalls mit einer (marktpreisbasierten) Abgabewilligkeit der Akteure gerechnet werden, die diese Art von Restbiomassen besitzen bzw. verwalten. Unter der Annahme nicht geänderter gesetzlicher Rahmenbedingungen müsste diese Wirtschaftlichkeit des Verfahrens auch die Finanzierung geänderter Ernte-, Lager- und Logistikketten umfassen.

Diese Einstufungen können nur eine erste Orientierung bieten. Für definitive Aussagen bezüglich der Biomasseverfügbarkeit, muss mit den Biomasse-Akteuren konkret gesprochen werden. Liefer- oder Abnahmeverträge können für langfristige Versorgungssicherheiten sorgen.

3.4 „Entscheidungsmatrix“

3.4.1 Notwendigkeit einer Entscheidungsmatrix CoAct

Die Entscheidung für oder gegen die Verarbeitung bestimmter Biomassen in einer zukünftigen CoAct-Anlage im Bodenseekreis hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Eine systematische Bewertung der einzelnen Biomassen soll sowohl aus technischer Sicht, aber auch insbesondere von nachvollziehbaren Nachhaltigkeitskriterien abhängig gemacht werden. Zuletzt spielen auch gesellschaftliche Akzeptanz sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen für die genaue Ausgestaltung eine Rolle. Um allen Aspekten gerecht zu werden, wurde ein mehrstufiger Entscheidungsweg entwickelt. Hierzu hat die Bodensee-Stiftung einen Entwicklungsprozess angestoßen, bei dem verschiedene Varianten entwickelt und in den gemeinsamen CoAct-Projekttreffen besprochen und weiterentwickelt wurden. Mit den jeweiligen Projektpartnern der verschiedenen Nachhaltigkeitsaspekte (ökologische Nachhaltigkeitsbewertung: ifeu, ökonomisch und sozial IfLS, rechtlich: ÖR der Uni Kassel) wurden Parameter für die Bewertung der Auswirkungen der unterschiedlichen Biomassen auf die verschiedenen Nachhaltigkeitsbereiche ausgewählt und Skalen zur Bewertung entwickelt.

Vorgehensweise

Es hat sich gezeigt, dass technische Kriterien nicht gleichwertig in einer Entscheidungsmatrix zu den Nachhaltigkeitskriterien zu sehen sind. Technische Kriterien bestimmen, in welche Richtung die Verwertung überhaupt gehen kann wie z.B. IFBB Brennstoff, Pflanzenkohle, Pulveraktivkohle, Kornaktivkohle. Technische Kriterien müssen daher vorangestellt werden. Gesellschaftliche Akzeptanz und rechtliche Aspekte sind überwiegend als relevante Rahmenbedingungen (weniger als zwingendes und objektives Entscheidungskriterium) zu betrachten. Daher ist eine mehrstufige Entscheidungsfindung sinnvoll:

3.4.2 Aufbau

- Entscheidungsbaum zur Definition des Verwertungsweges. (basierend auf den „technischen Kriterien“; vgl. Abbildung 10)
- Entscheidungsmatrix für die Abwägung der Nachhaltigkeits-Kriterien ("ökologisch", "ökonomisch", "sozial"; vgl. Abbildung 11)

- Abschlussbewertung unter Berücksichtigung weiterer Rahmenbedingungen („gesellschaftliche Akzeptanz“, „rechtliche Bedingungen“)

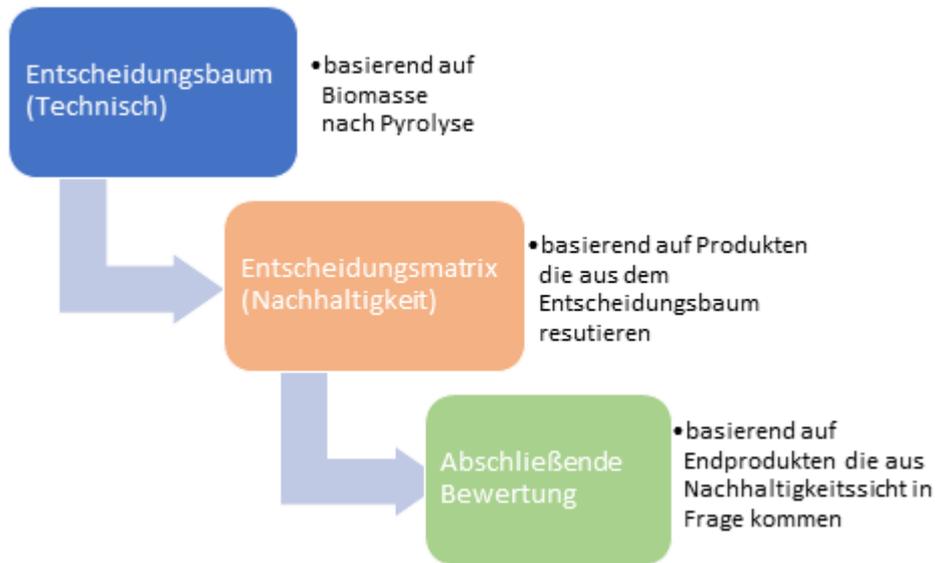


Abbildung 9: Mehrstufige Entscheidungsfindung

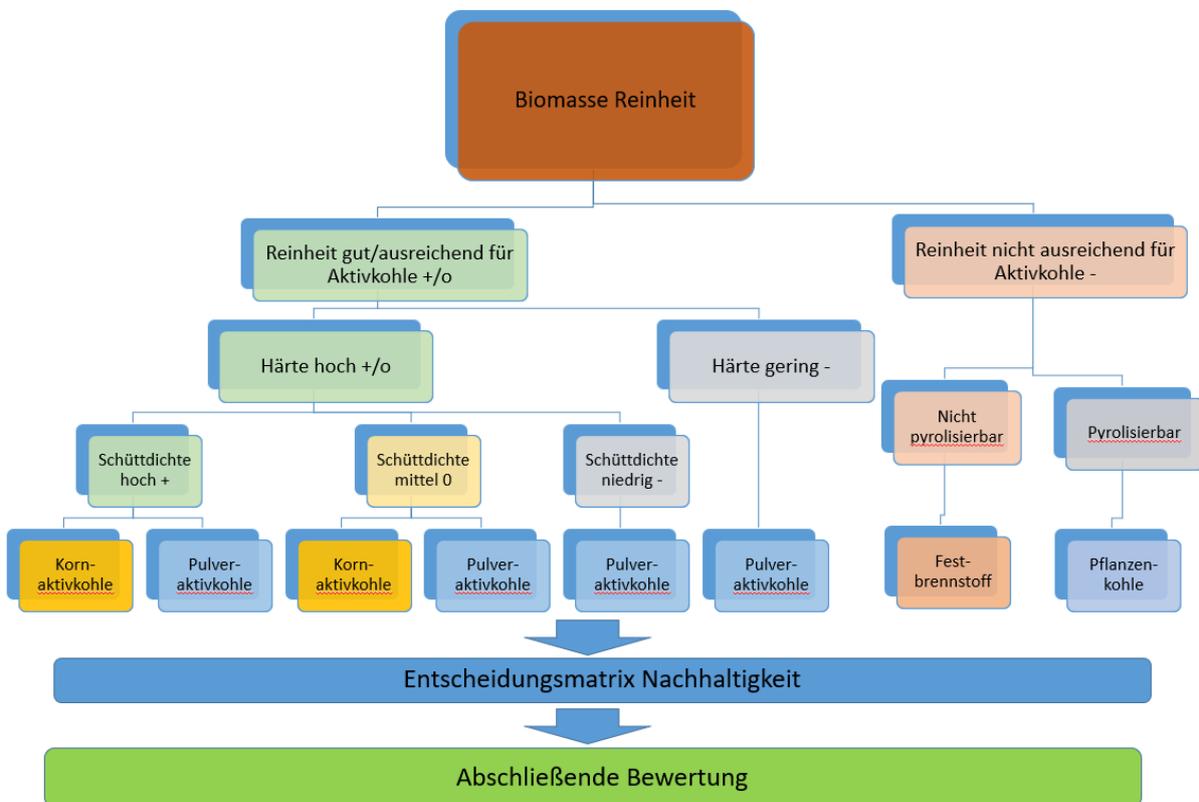


Abbildung 10: Entscheidungsbaum (Technische Eignung)

Biomassebezeichnung	Produkt	Ökologie						Ökonomie			Soziales				
		Flächenwirkung	Versauerungspotential	Feinstaub PM _{2,5}	Terrestrisches Eutrophierungspotential	THG-Bilanz	Nebenkriterium: REA gesamt	Technisch verfügbares TM-Volumen hoch/gering	Wertschöpfungsentwicklung	Opportunität/Nachfrage	aktueller Verwertungs- pfad/ Konkurrenz	Beschäftigung/ Arbeitsplätze	Verkehrsbelastung	von (rechtl./techn.) Herausforderungen	
		positive Auswirkungen +1, keine Auswirkungen 0, negative Auswirkungen -1 (0,5 Schritte)						positive Auswirkungen +1, keine Auswirkungen 0, negative Auswirkungen -1 (0,5 Schritte)			positive Auswirkungen +1, keine Auswirkungen 0, negative Auswirkungen -1 (0,5 Schritte)				
Maisstroh	PAK														
Hochstammschnitt	PAK														
Holz aus Hecken- und Strauchschnitt	PAK														
Landschaftspflegematerial (Streuwiesen)	PAK														
Straßenbegleitgrün	PAK														
Hopfenhäcksel	PAK														
Weintrester	PAK														

Abbildung 11: Tool Entscheidungsmatrix

3.4.3 Konsequenzen

Diese Vorgehensweise bedeutet, dass die ökologisch, ökonomische und soziale Bewertung der Biomassen nur für die technisch sinnvollen Verwertungswege vorgenommen werden muss. Wenn sich beispielsweise aus der technischen Betrachtung ergibt, dass eine bestimmte Biomasse sich nicht für Aktivkohle eignet, dann müssen die weiteren Betrachtungen auch „nur“ für Pflanzenkohle, Brennstoff und den Status Quo erfolgen.

Im Laufe des CoAct-Projektes hat sich ein klarer Fokus auf die Verwertung als Pulveraktivkohle (PAK) herauskristallisiert. Hierbei kann die höchste stoffliche und ökonomische Wertschöpfung erzielt werden. Daher wird im Folgenden nur noch auf die Verwertung als Pulveraktivkohle eingegangen. Gleichwohl eignet sich die Entscheidungsmatrix als Tool, dass auch auf andere Produktkategorien angepasst werden kann.

3.4.4 Bearbeitung des Entscheidungsbaums

Der Entscheidungsbaum wird anhand der technischen und physikalischen Eigenschaften der einzelnen Biomassen abgearbeitet. Anhand der Ergebnisse aus den Laborversuchen an der Universität Kassel und dem Technologie Zentrum Wasser in Karlsruhe können diese Eigenschaften spezifiziert werden und eine objektive Bewertung der möglichen Endprodukte kann erfolgen.

3.4.5 Bearbeitung der Matrix

Die aus dem Entscheidungsbaum resultierenden Biomasse-Endprodukt-Kombinationen bzw. ausgewählten biobasierten PAKs werden anschließend ökonomisch, ökologisch und sozial bewertet. Die gesammelten Erkenntnisse aus den einzelnen Forschungsdisziplinen zu den verschiedenen Nachhaltigkeitsaspekten werden in den Biomasse-Steckbriefen zusammengestellt und erläutert. Aus diesen Biomasse-Steckbriefen lassen sich die für die Matrix benötigten Bewertungen ableiten. Eine einheitliche Bewertung von -1 bis +1 in 0,5er Schritten ermöglicht eine aussagekräftige Nachhaltigkeitsbewertung über die Bereiche hinweg und verhindert den übermäßigen Einfluss eines einzelnen Bereichs.

3.4.6 Bearbeitung der abschließenden Bewertung

Die objektive Bewertung aus Entscheidungsbaum und Entscheidungsmatrix wird zuletzt noch in den gesellschaftlichen und rechtlichen Rahmen eingefügt und final bewertet. So kann beispielsweise eine objektiv positiv bewertete Biomasse-Endprodukt-Kombination aus rechtlicher Sicht schwierig

umzusetzen sein oder gesellschaftliche und regionale Aspekte führen dennoch zu einem Ausschluss in einer Projektierung. In diesen finalen Prozess werden alle Projektpartner und insbesondere die regionalen Akteure eingebunden

3.5 Rechtliches Fazit

Durch das CoAct-Verfahren sollen im städtischen und regionalen Kontext verfügbare Restbiomassen, die bisher aufgrund ihrer Beschaffenheit für herkömmliche Verfahren der stofflichen und energetischen Nutzung nicht in Frage kamen (zum Beispiel Rasenschnitt, Straßenbegleitgrün, Landschaftspflegematerial), in einen speicherbaren Energieträger (Festbrennstoff) oder in Aktivkohle gewandelt und in der Region verwertet werden.

Im Rahmen des Projektes wurden rechtliche Rahmenbedingungen für die Nutzung von durch das CoAct-Verfahren genannten sieben Fokusbiomassen in Betracht gezogen. Rechtliche Fragestellungen ergeben sich grundsätzlich entlang des gesamten Verfahrenskonzeptes. Dieses fängt mit der Bergung von Landschaftspflegematerial oder Straßenbegleitgrün an, wobei zum Beispiel naturschutzrechtliche Fragen beziehungsweise Fragen zur Straßenbaulast geklärt werden müssen, und wird mit der thermischen Verwertung von Klärschlamm samt beladener Aktivkohle, im Rahmen derer zum Beispiel die Klärschlammverordnung und immissionsschutzrechtlichen Vorgaben zu berücksichtigen sind, beendet.

Da eine Darstellung und Bewertung sämtlicher für das CoAct-Verfahren relevanter Rechtsbereiche und Rechtsfragen im Rahmen des Projektes nicht möglich war, wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern besonders relevante und problematische Rechtsbereiche und Fragestellungen ausgewählt und diese vertieft bearbeitet.

Von zentraler Bedeutung für die Umsetzung des CoAct-Verfahrens sind abfallrechtliche Fragestellungen, da davon auszugehen ist, dass die meisten Restbiomassen als Abfall zu qualifizieren sind und dementsprechend abfallrechtliche Vorgaben berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus wurden bestimmte Biomassen ausgehend von allgemeinen abfallrechtlichen Erkenntnissen im Hinblick auf ihre abfallrechtliche Einordnung sowie insbesondere in Bezug auf ihre Verfügbarkeit und Mobilisierung für das CoAct-Verfahren im Bodenseekreis tiefergehend betrachtet. Schließlich wurden rechtliche Fragestellungen im Zusammenhang mit der Vergärung des IFBB-Presssaftes, Verwendung von Aktivkohle aus pflanzlichen Rohstoffen in der Abwasserbehandlung und der energetischen Verwertung der IFBB-Pellets bearbeitet. Im Detail sind diese drei Bereiche im Bericht Meilenstein 15 „Gutachten zu den institutionellen und rechtlichen Rahmenbedingungen und weiteren Governance-Arrangements – Teil 2 Rechtliche Rahmenbedingungen“ in den Kapiteln 2-4 erörtert. Der Bericht findet sich in der Anlage zu diesem Bericht.

3.6 Konzepte für Standorte

Biomassen zu beschaffen (einsammeln, anzutransportieren), zu lagern und für das CoAct-Verfahren aufzubereiten ist je nach Biomasse mit unterschiedlich großem Aufwand verbunden, der unterschiedlich viel an Ressourcen wie Maschinen, Personal und Logistik erfordert.

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage und zur Nutzung von vorhandenen Strukturen ist es daher sinnvoll, die CoAct-Anlage an eine bestehende Anlage anzukoppeln. Dieses Vorgehen verspricht Synergien, da entweder Strukturen der Biomasseverarbeitung und -lagerung bereits vorhanden oder Verwertungsmöglichkeiten der CoAct-Produkte am Standort gegeben sind. Die

Synergien ergeben sich aus den bereits an den Standorten vorhandenen Anlagen, Maschinen oder Verarbeitungs-/Verwertungsprozessen. Dabei eignet sich aufgrund des Wasserbedarfs für das IFBB-Verfahren verfahrenstechnisch die Kombination mit einer Anlage, bei der eine große Menge Wasser vorhanden ist. Wobei für das IFBB-Verfahren durchaus mit Brauchwasser und nicht notwendigerweise mit Trinkwasser gearbeitet werden kann. Dass ist beispielsweise bei einer Kläranlage oder einer Biogasanlage der Fall. Hier können diverse Synergieeffekte genutzt werden. Ebenso kann der beim IFBB-Verfahren anfallende Presssaft als Gärsubstrat in der Biogasanlage oder im Faulturm einer Kläranlage verwertet werden. An Standorten ohne eine entsprechende Wasseranbindung eignet sich ein Szenario ohne Nassaufbereitung. Die Annahme an Substraten ist dadurch auf trockene, holzige Substrate reduziert, die nicht durch das IFBB-Verfahren aufbereitet werden müssen.

Darauf aufbauend wurden Standorte im Bodenseekreis gesucht, die entweder bereits Biomassen verarbeiten oder an denen CoAct-Produkte eingesetzt werden könnten. Dabei wurden vier mögliche Anlagentypen zur Kombination mit einer CoAct-Anlage identifiziert. Das sind Kläranlagen, Biogasanlagen, Wertstoffhöfe und Bauhöfe. Diese Varianten wurden näher untersucht und beschrieben. Da in der konkreten Projektregion Bodenseekreis das Gelände des Bauhofs nicht groß genug für die Aufnahme einer CoAct-Anlage und der benötigten Logistikflächen ist, wurde diese Standortvariante nicht weiterverfolgt. Grundsätzlich erscheint der Betrieb einer CoAct-Anlage auf einem Bauhof eine prüfungswürdige Diskussion, da auch dort Biomassen anfallen und verarbeitet werden können.

Für die Region des Bodenseekreises wurden vier Varianten an drei Standorten miteinander verglichen, die auch für weitere Landkreise in Deutschland relevant sind. Dazu wurde das modulare Modell der Basisvariante an die Gegebenheiten des jeweiligen Standorts angepasst. So werden die spezifischen Synergien zu den standortspezifischen Prozessen sichtbar. Die betrachteten Anlagenvarianten sind:

- CoAct-Variante 1: Standort Kläranlage
- CoAct-Variante 2: Standort Biogasanlage
- CoAct-Variante 3: Standort Entsorgungszentrum (Variante mit IFBB-Anlage)
- CoAct-Variante 4: Standort Entsorgungszentrum (Variante ohne IFBB-Anlage)

Für die ökologische und ökonomische Bewertung der einzelnen Standort- und Umsetzungsvarianten der CoAct-Anlage wurde die CoAct-Anlage auf Basis verschiedener Module entwickelt. Als Vergleichsvariante wurde eine Anlage „auf der grünen Wiese“ konzipiert. Diese beinhaltet alle potenziellen Module und bietet keine Synergien mit bestehenden Anlagen. Bei den Anlagenvarianten, die an bestehende Anlagen integriert werden, fallen entsprechende Anlagenkomponenten weg.

Die entwickelten Standortvarianten und Umsetzungsvarianten einer CoAct-Anlage wurden regionalen Stakeholdern in zwei Workshops vorgestellt und diskutiert. Während der erste Workshop eine breite Öffentlichkeit ansprach und über das Projekt und seine Zwischenergebnisse informierte, wurden auf dem zweiten Workshop Bewertungsgrundlagen, Annahmen sowie Vor- und Nachteile der einzelnen Standortvarianten und Umsetzungsvarianten diskutiert.

4. Forschung und Entwicklung des CoAct-Verfahrens

Die sieben identifizierten Fokus-Restbiomassen (vgl. Tabelle 2) wurden im weiteren Verlauf der Forschungs- und Entwicklungsphase für eine Verwertung mit dem CoAct-Verfahren untersucht.

4.1 Probenahmen

4.1.1 Biomassentyp A

Holzige Restbiomassen, welche in Abstimmung mit dem Projektpartner PYREG ohne weitere Vorbehandlung für die Herstellung von Aktivkohle geeignet erschienen, wurden getrocknet und für die Pyrolyse aufbereitet. (Max. Partikelgröße für den Laborreaktor: 15 mm. Maisstroh wurde pelletiert.)

4.1.2 Biomassentyp B

Grasartige Restbiomassen wurden in der Projektregion durch den Projektpartner Bodensee-Stiftung gesichert und siliert. Hierzu wurden die frischen Biomassen in 60 L Fässer gefüllt und verdichtet, um einen Sauerstoffeinschluss und negative Effekte auf die Silierung zu vermeiden (vgl. Abbildung 12). Anschließend wurden die Fässer luftdicht verschlossen und für mindestens sechs Wochen gelagert, um eine vollständige Silierung der Biomassen und anaerobe Stabilisierung durch Milchsäuregärung zu erreichen.



Abbildung 12: Sichern der Biomasse im Bodenseekreis

Die vollständig silierten Biomassen wurden anschließend durch die Universität Kassel mit dem IFBB-Verfahren verarbeitet. Hierzu wurden die Silagen zunächst gehäckselt, durchmischt und gewogen. Die homogenisierten Restbiomassen wurden anschließend mit 40 °C warmen Wasser für 15 min. hydrothermal konditioniert (vgl. Abbildung 4). Das Biomasse zu Wasser-Verhältnis wurde analog zu vorherigen Studien mit 1:4 gewählt. Anschließend wurde das Gemisch mechanisch entwässert und mineralische und organische Bestandteile in den Presssaft überführt. Proben der Ausgangsbiomasse (Silage), des Presskuchens und des Presssaftes wurden für die weiteren Analysen genommen.

Für die weitere Verarbeitung zu Aktivkohle wurde der getrocknete Presskuchen erst homogenisiert und anschließend pelletiert (vgl. Abbildung 7). Der gewonnene Presssaft wurde mittels 20 L Batch-Fermentern hinsichtlich seines Biogas- und Methanertrags gemäß der VDI-Richtlinie 4630 untersucht (Verein Deutscher Ingenieure 2014).

4.2 Physikalisch-chemische Charakterisierung der Restbiomassen

Alle für das CoAct-Vorhaben relevanten Restbiomassen wurden hinsichtlich ihrer physikalisch-chemischen Zusammensetzung durch die Universität Kassel analysiert. Hierzu wurden repräsentative Stichproben der gesicherten Biomassen vom Typ A, Proben der Silagen der Biomassen vom Typ B, sowie der zugehörigen IFBB-Produkte genommen (Presskuchen und Presssaft).

4.2.1 Holzige Restbiomassen (Typ A)

Die untersuchten Biomassen vom Typ A weisen überwiegend einen sehr geringen Aschegehalt von unter 6 % TS und einen Kohlenstoffgehalt von etwa 50 % TS auf. Auch die zugehörigen Anteile an Stick-, Sauer- und Wasserstoff, sowie Schwefel dieser Biomassen sind relativ ähnlich verteilt. Entsprechend ergeben sich auch bei den Heiz- und Brennwerten keine großen Abweichungen.

Holzige Ausgangsbiomassen wurden bereits in verschiedenen Forschungsprojekten hinsichtlich ihrer Eignung zur Erzeugung von Aktivkohlen untersucht. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse mit unterschiedlichen holzigen Biomassen zur Entfernung von Spurenstoffen aus Abwasser (Hagemann et al. 2020) und der relativ geringen Unterschiede bzgl. physikalisch-chemischer Zusammensetzung der holzigen Biomassen (vgl. Tabelle 3) wurden diese Biomassen als Cluster im CoAct-Verfahren untersucht. Zusätzlich wurde Maisstroh als landwirtschaftliche Restbiomasse in diesem Cluster gesondert betrachtet.

Tabelle 3: Trockensubstanz, Asche- und Fasergehalt, Elementarzusammensetzung und Brenn (H_s)- und Heizwert (H_i) der untersuchten Fokus-Biomassen von Typ A (orange) und Typ B (grün; B), sowie des Presskuchens von Biomassen vom Typ B nach der IFBB-Vorbehandlung (gelb; PK).

Biomasse	Parameter mit Einheit												
	TS	oTS	Asche	C	H	N	S	O	H _s	H _i	NDF	ADF	ADL
	%FM	%TS	%TS	%TS	%TS	%TS	%TS	%TS	MJ/kg	MJ/kg	%TS	%TS	%TS
Maisstroh	35,9	94,9	5,1	47,8	4,7	0,71	0,08	41,0	18,9	17,8	66,4	1,9	35,6
Hochstammsschnitt	69,9	94,6	5,4	48,3	5,7	0,35	0,03	40,2	19,1	18,0	69,9	11,5	48,5
Heckenschnitt	59,5	94,4	5,6	48,2	5,2	0,62	0,02	40,3	19,0	18,0	68,7	11,9	47,6
Weintrester (B)	46,8	96,9	3,1	52,9	6,0	1,9	0,14	36,0	21,4	20,2	45,3	36,9	26,2
Weintrester (PK)	51,1	97,0	3,0	54,6	6,0	1,8	0,1	34,4	22,2	21,0	44,5	39,9	29,3
Streuwiese (B)	26,5	94,5	5,5	47,3	5,5	1,1	0,18	40,4	18,8	17,7	56,5	39,0	9,5
Streuwiese (PK)	56,6	96,8	3,2	49,3	5,5	1,0	0,03	40,1	19,5	18,5	67,1	47,0	9,9
Hopfenhäcksel (B)	25,1	88,6	11,4	48,7	4,7	3,5	0,16	31,6	19,4	18,5	65,5	52,2	25,1
Hopfenhäcksel (PK)	41,8	91,0	9,0	50,2	5,6	2,4	0,13	32,6	20,1	19,0	70,4	58,0	25,8
Straßenbegleitgrün (B)	39,0	86,8	13,2	44,3	5,3	2,2	0,09	34,9	17,8	16,7	49,3	33,0	8,0
Straßenbegleitgrün (PK)	45,1	90,2	9,8	45,9	5,4	1,7	0,15	37,0	18,3	17,3	62,8	41,6	11,4
Streuobstwiese (B)	53,4	80,6	19,4	40,7	4,8	1,4	0,09	33,6	16,5	15,6	58,2	37,6	12,8
Streuobstwiese (PK)	56,7	90,4	9,6	45,9	5,3	1,2	0,09	37,9	18,2	17,1	64,7	40,3	9,7

4.2.2 Grasartige Biomassen (Typ B)

Die Restbiomassen vom Typ B wurden auch vor der Nutzung des IFBB-Verfahrens charakterisiert, um die Auswirkungen dieser Aufbereitung bewerten zu können.

Ein besonderer Fokus des CoAct-Vorhabens lag auf der Inwertsetzung von minderwertigen grasartigen Restbiomassen beispielsweise aus der Landschaftspflege von Extensivgrünland oder Naturschutzflächen. Im Gegensatz zu homogenen Restbiomassen aus intensiv bewirtschafteten landwirtschaftlichen Flächen, wie beispielsweise Mais- und Hopfenanbau oder Weintrester, sind diese Restbiomassen sehr heterogen zusammengesetzt. So weisen grasartige Biomassen aus der Landschaftspflege meist eine heterogene botanische Zusammensetzung auf, welche sich auch innerhalb eines Standortes stark unterscheiden können. Ebenso haben Standortfaktoren, wie beispielsweise Bodenqualität, Niederschlag und Bewirtschaftung, aber auch der Schnitzeitpunkt einen maßgeblichen Einfluss auf die Biomassequalität (Bühle et al. 2011; Hensgen et al. 2014; Hensgen et al. 2012a).

Um diese Heterogenität im Rahmen des CoAct-Vorhabens adäquat abbilden zu können, wurden verschiedene und repräsentative Biomassen untersucht. Die Ergebnisse der Charakterisierung dieser Biomassen bestätigen diese Heterogenität (vgl. Tabelle 3).

Diese Ergebnisse zeigen, dass eine abschließende Bewertung und Einteilung der identifizierten grasartigen Restbiomassen aus Landschaftspflegeschnitten in der Projektregion schwer möglich ist, da Standortfaktoren und botanische Zusammensetzung zu variabel sind. Deutlich wird dies insbesondere bei Straßenbegleitgrün, welches aufgrund des Standortvorkommens entlang von Straßen extrem heterogen ist (Piepenschneider et al. 2016). Entsprechend dienen die Ergebnisse jedoch einer ersten Einschätzung der Verwertbarkeit von diesen Biomassen für die Herstellung von Aktivkohle zur Abwasserbehandlung.

Insgesamt zeigt sich, dass die Restbiomassen vom Typ B sehr heterogene physikalisch-chemische Eigenschaften besitzen. Insbesondere die für die Aktivkohleherstellung relevanten Parameter Mineralstoff- bzw. Aschegehalt und Kohlenstoffgehalt schwanken bei den Biomassen zwischen 3-25 % TS bzw. zwischen 40-50 % TS (vgl. Tabelle 3).

4.2.3 IFBB-Presskuchen

Für Restbiomassen vom Typ B, welche mittels IFBB-Technikkonzept vorbehandelt wurden, erfolgte zusätzlich eine Charakterisierung des dabei generierten Presskuchens und des gewonnen Presssaftes. Während der Presskuchen im Rahmen des Forschungsvorhabens hinsichtlich seiner Eignung für die Aktivkohleproduktion weiter untersucht wurde, wird eine Verwertung des Presssaftes als Biogassubstrat zur Erzeugung von Strom und Wärme untersucht (vgl. Abbildung 5).

Die physikalisch-chemische Charakterisierung der erzeugten Presskuchen aus den Restbiomassen erfolgte analog zu den Charakterisierungen der Ausgangsbiomassen.

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere bei mineralstoff- bzw. aschereichen Restbiomassen eine deutliche Reduzierung des Aschegehalts durch das IFBB-Technikkonzept erreicht werden kann. Durch die Überführung von Mineralstoffen aus den Silagen in den Presssaft kann außerdem höhere Kohlenstoffgehalte in dem Presskuchen erreicht werden. Dies führt auch zu erhöhten Heiz- und Brennwerten der Restbiomassen (vgl. Tabelle 3). Durch das IFBB-Technikkonzept kann der Aschegehalt der erzeugten Presskuchen auf unter 10 % TS gesenkt werden was einen Kohlenstoffgehalt zwischen 46-55 % TS im Presskuchen bedingt.

Ein hoher Kohlenstoffgehalt und zugleich ein geringer Aschegehalt der Biomassen begünstigt grundsätzlich die Herstellung hochwertiger Aktivkohlen mit hohen spezifischen Oberflächen. Daher kann das IFBB-Technikkonzept einen substantziellen Beitrag zur Verwertung minderwertiger Restbiomassen leisten und ist ein vielversprechendes Technikkonzept für diese Biomassen.

4.2.4 IFBB-Presssaft

Die im IFBB-Technikkonzept anfallenden energiereichen Presssäfte können in Biogasanlagen in Methan und Energie gewandelt werden. Zur Bestimmung des Biomethanertrags aus den Presssäften wurden Vergärungsversuche nach den Richtlinien der VDI 4630 in Triplikaten durchgeführt. Für flüssige Substrate und insbesondere Abwässer wird häufig der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) in $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ als Summenparameter verwendet. Der CSB gibt an, wie viel Sauerstoff benötigt wird, um die enthaltene Organik vollständig zu CO_2 zu oxidieren. Je höher der CSB, umso energiereicher ist das Substrat in anaeroben Prozessen.

Tabelle 4: Charakterisierungsergebnisse der IFBB-Presssäfte mit Fokus auf eine mögliche Energieausbeute.

Biomasse	CSB [$\text{mg}_{\text{CSB}}/\text{L}$]	CSB [$\text{kg}_{\text{CSB}}/\text{kg}_{\text{Substrat}}\cdot\text{L}$]	Methanertrag [L_{N} , $\text{CH}_4/\text{kg}_{\text{CSB}}$]
Weintrester	48.030	0,48	333
Landschaftspflegematerial aus Streuwiese	13.870	0,014	116
Hopfenhäcksel	19.310	0,019	177
Straßenbegleitgrün	28.870	0,029	184

Für das entwickelte Fokus-Szenario Kläranlage (vgl. Abschnitt 5.1) wurde der Presssaft als Kohlenstoff-Quelle für die Denitrifikation identifiziert. In Tabelle 4 sind die gemessenen CSB-Werte aufgetragen, welche als Anhaltspunkte für diese Funktion dieser Presssäfte auf der Kläranlage dienen.

4.3 Pyrolyse & Aktivierung

Die Entwicklung von leistungsfähigen CoAct-Aktivkohlen gestaltete sich als umfangreiche Aufgabe, welche durch intensive Kollaboration der drei Verbundpartner PYREG, TZW und UniKS mit ihren jeweiligen Expertisen bewältigt wurde.

4.3.1 Entwicklung und Bau des Laborreaktors

Um die Eignung verschiedener Restbiomassen zur Herstellung von hochwertigen Aktivkohlen zu untersuchen, wurde durch den Verbundpartner PYREG ein Laborreaktor geplant, konstruiert und realisiert, welcher die Prozesse der großtechnischen PYREG Pilotanlage A500 im Labormaßstab abbildet (vgl. Abbildung 14).

In der Laboranlage wird das Rohmaterial über den Vorlagebehälter in die Anlage eingetragen. Durch diesen läuft eine Förderschnecke, die das Material zu einer Zellenradschleuse transportiert. Von dort aus wird das Material in die Eintragschnecke und anschließend in den Schneckenreaktor transportiert (Abbildung 13).

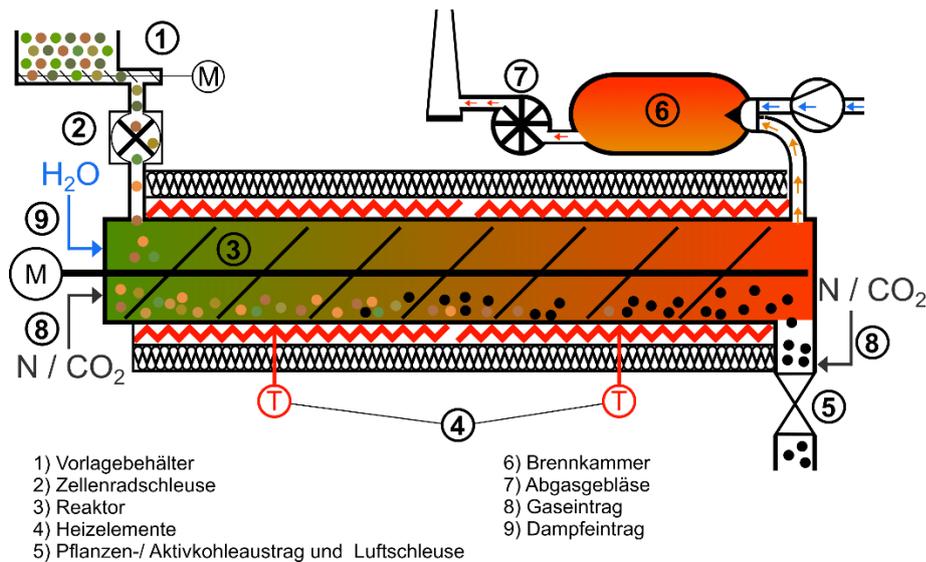


Abbildung 13: Schema der Laboranlage zur Herstellung von Pflanzen- und Aktivkohle (PYREG).

Im Reaktor wird das Material mit einer Förderschnecke kontinuierlich durch den PYREG-Reaktor geleitet. Der Reaktor wird durch elektrische Heizwindungen auf Temperaturen bis zu 950°C erhitzt. In Folge der erzeugten Hitze und der überwiegend sauerstofffreien Atmosphäre durch die Zugabe von Inertgas (N_2) wird das Rohmaterial nicht verbrannt, sondern karbonisiert. Jeweils eine Stickstoffzuleitung am Anfang und am Ende des Reaktors sorgen für die sauerstofffreien Bedingungen. Die Zellenradschleuse am Eintrag minimiert den Lufteintrag in den Reaktor und somit oxidative Bedingungen während der Pyrolyse.

Die bei der Karbonisierung entstehenden Synthesegase werden in der Brennkammer bei Temperaturen von ca. 1.000 °C vollständig oxidiert. Das anfallende Abgas wird mittels Abgasgebläse über einen Kamin ausgeleitet. Um die Bildung von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs) aufgrund von Kondensatbildung zu vermeiden, wird das Synthesegas bis zur Verbrennung auf Temperaturen von über 300 °C gehalten. Die saubere Kohle fällt in einen Auffangbehälter, welcher durch eine Luftschleuse zur Entnahme abgetrennt werden kann. Neben der Karbonisierungstemperatur lassen sich weitere Parameter einstellen. Dazu gehören die Verweilzeit im Reaktor, der Massendurchsatz sowie die N_2 -Zugabemenge und die Menge an Wasserdampf (Abbildung 13).



Abbildung 14: Unterschiedliche Bauabschnitte des PYREKA Laborsystems; links oben: Keramikrohrheizungssystem, rechts oben und links unten: Außen- und Innenansicht des Schaltschranks für die Anlagensteuerung, rechts unten: Seitenansicht des Laborsystems

4.3.2 Durchführung der Aktivierungs-Untersuchungen

Entwicklung von Aktivierungs-Profilen

Im nächsten Schritt haben die Verbundpartner PYREG und UniKS in Rückkopplung mit dem TZW geeignete Pyrolyse- und Aktivierungsprofile zur Herstellung geeigneter Aktivkohlen auf der PYREKA Laboranlage entwickelt. Dazu wurde pelletiertes Maisstroh als relevante und homogene Restbiomasse gewählt, die daraus produzierten Aktivkohlen durch das TZW charakterisiert und basierend auf den Charakterisierungsergebnissen die Profile verändert. Hierfür wurde der Einfluss folgender Prozessparameter untersucht:

- Einfluss der Dampfzugabe innerhalb eines 1-stufigen Herstellungsprozesses auf das Aktivierungsergebnis
- Einfluss von unterschiedlichen Verweilzeiten bei der Herstellung von Aktivkohlen im 1-stufigen Prozess
- Unterschiede in Bezug auf die Oberfläche der Aktivkohlen zwischen einem 1-stufigen und einem 2-stufigen Herstellungsprozess

Einstufige Aktivierung aller Restbiomassen

Schließlich erfolgte die Herstellung von Aktivkohlen aller Fokus-Restbiomassen im Labormaßstab mit folgenden Prozesseinstellungen:

- Pyrolyse- und Aktivierungstemperatur: 900 °C

- Verweilzeit der Biomassen im Schneckenreaktor: 25 Minuten
- Wasserdampfzugabe als Oxidationsmittel zur Aktivierung während des Pyrolyseprozesses in den Stufen 0 %, 50 % und 100 % Wasserdampf (in Mol O₂ pro Mol C in der Biomasse)

Vergleich: Zweistufige Aktivierung mit zwei Restbiomassen

Zusätzlich wurde der Einfluss eines 2-stufigen Aktivierungsverfahrens und der Effekt der Aktivierungstemperatur auf die Aktivkohlequalität untersucht. Diese Versuche wurden mit Streuobstwiesen und Streuwiesen (Feuchtwiesen) durchgeführt, da es sich bei diesen Biomassen a) um zwei grasartige Biomassen handelt und b) die ersten Charakterisierungen aus dem 1-stufigen Verfahren sehr unterschiedlich waren.

Beim zweistufigen Prozess wurde zunächst bei 500 °C die Pyrolyse (Kontaktzeit: 30 Minuten) und anschließend die Aktivierung bei den drei Temperaturen von 500, 700 und 900 °C und einer Kontaktzeit von 15 Minuten durchgeführt.

Charakterisierung der hergestellten Aktivkohlen

Um die Aktivkohlen und ihre Produktionsbedingungen in einem ersten Schritt für die Anwendung zur Spurenstoffelimination im Abwasser bewerten zu können, wurden sie durch das TZW zunächst mit einfachen, kostengünstigen Methoden charakterisiert:

- Jod- und Methylenblauzahl, welche Hinweise auf die spezifische Oberfläche geben.
- Reduktion des spektralen Absorptionskoeffizienten bei 254 nm (SAK₂₅₄) in Abwasserproben mit/ohne Aktivkohlezugabe. Der SAK₂₅₄ weist auf organische Verbindungen hin, die in ihren Molekülen aromatische Strukturen bzw. Doppelbindungen aufweisen.

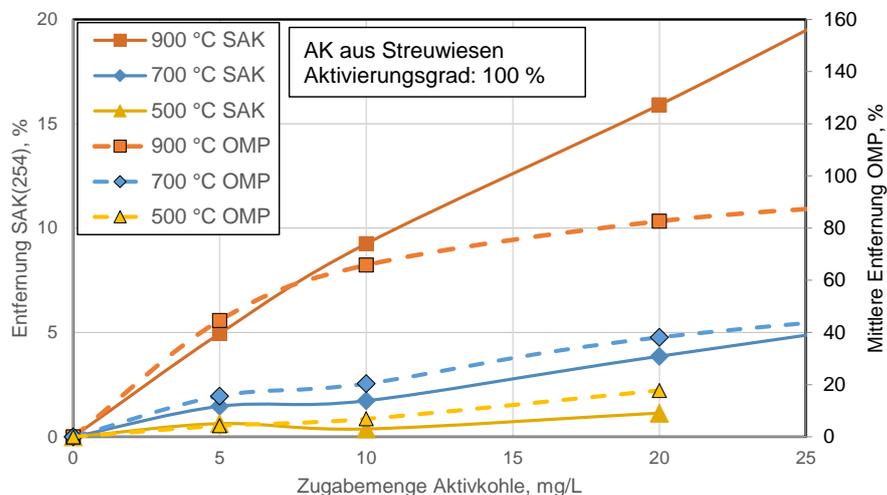


Abbildung 15: Korrelation zwischen Entfernung des SAK₂₅₄ und mittlere Entfernung organischer Mikroverunreinigungen (OMP) bei unterschiedlichen Aktivierungs-Temperaturen (zweistufig) und PAK Dosierungen.

Zur Verifizierung dieser Tests wurde die Elimination mit sieben typischerweise in kommunalen Abwässern auftretenden Spurenstoffen untersucht. Dadurch konnte bestätigt werden, dass die Reduzierung des SAK₂₅₄ eine gute Korrelation zur mittleren Entfernungsleistung von Spurenstoffen (organic micropollutants – OMP) aufweist (vgl. Abbildung 15) und somit als einfache Testmethode von Aktivkohlen zur Abwasserreinigung gut geeignet ist.

Durch die Untersuchungen zum Einfluss der Prozessparameter auf die Adsorptionseigenschaften der Aktivkohlen konnte gezeigt werden, dass der Herstellungsprozess einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Kohlen hat. Bei der Aktivierungstemperatur konnte gezeigt werden, dass eine ausreichend hohe Temperatur erforderlich ist, um Aktivkohlen mit konkurrenzfähigen Adsorptionseigenschaften zu produzieren (vgl. Abbildung 15).

Ein generelles Optimum konnte bei den anderen untersuchten Prozessparametern im Rahmen der Projektuntersuchungen nicht abgeleitet werden. Teilweise ergaben die Restbiomassen mit dem 1-stufigen Verfahren sehr hochwertige Aktivkohlen zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aus kommunalem Abwasser (vgl. nächster Abschnitt 4.4) – ein gutes Ergebnis, welches sich nicht durch das 2-stufige Verfahren verbessern ließ. Bei qualitativ minderwertigen Restbiomassen wiederum (mit einem relativ hohen Mineralstoffgehalt) konnte nicht im 1-stufigen, aber durch ein 2-stufiges Aktivierungsverfahren eine höherwertige Aktivkohle erzeugt werden. Aufgrund des prozesstechnisch einfacheren Verfahrens einer 1-stufigen Aktivierung ist dieses Verfahren jedoch für die meisten Restbiomassen das Verfahren der Wahl.

Eine Optimierung der jeweiligen Parameter für die Aktivkohleherstellung sollte im großtechnischen Betrieb erfolgen.

4.4 Spurenstoffelimination der CoAct-Aktivkohlen

Anhand der ersten Charakterisierung (vorheriger Abschnitt) wurden folgende Aktivkohlen ausgewählt (vgl. Tabelle 5), um am TZW mit weitergehenden Eliminations-Untersuchungen im Hinblick auf die Spurenstoffelimination von Abwasser analysiert zu werden. Hierzu wurde biologisch gereinigtes Abwasser aus der Kläranlage Kressbronn-Langenargen verwendet (Ablauf Nachklärung, Abbildung 23). Die untersuchten Spurenstoffe wurden gemäß der sog. KomS-B-Liste gewählt (KomS BW 2018).

Tabelle 5: Ausgewählte, leistungsfähigste CoAct-Aktivkohlen mit den jeweiligen Produktionsbedingungen.

Rohstoff	Aktivierungstemperatur [°C]	Aktivierungsgrad, [%]	Herstellung
Maisstroh	900	50 – 100	1-stufig
Holzpellets	900	100	1-stufig
Streuwiesen	900	100	1-stufig
Streuobstwiesen	900	100	2-stufig
Hopfenpellets	900	50	1-stufig
Weintrester	900	50	1-stufig

Für die Bewertung wurden die CoAct-Kohlen mit zwei marktüblichen Pulveraktivkohlen (WP 235 und SAE Super) verglichen. Die inneren Oberflächen der Aktivkohlen, dargestellt über die Iod- und Methylenblauzahlen, sind in Abbildung 16 gezeigt. Sämtliche aus den Restbiomassen produzierten Aktivkohlen zeigen eine geringere spezifische Oberfläche als die kommerziellen Pulveraktivkohlen. Speziell die beiden Kohlen auf Streuobstwiesen- und Hopfenpelletbasis weisen sehr geringe Oberflächen auf.

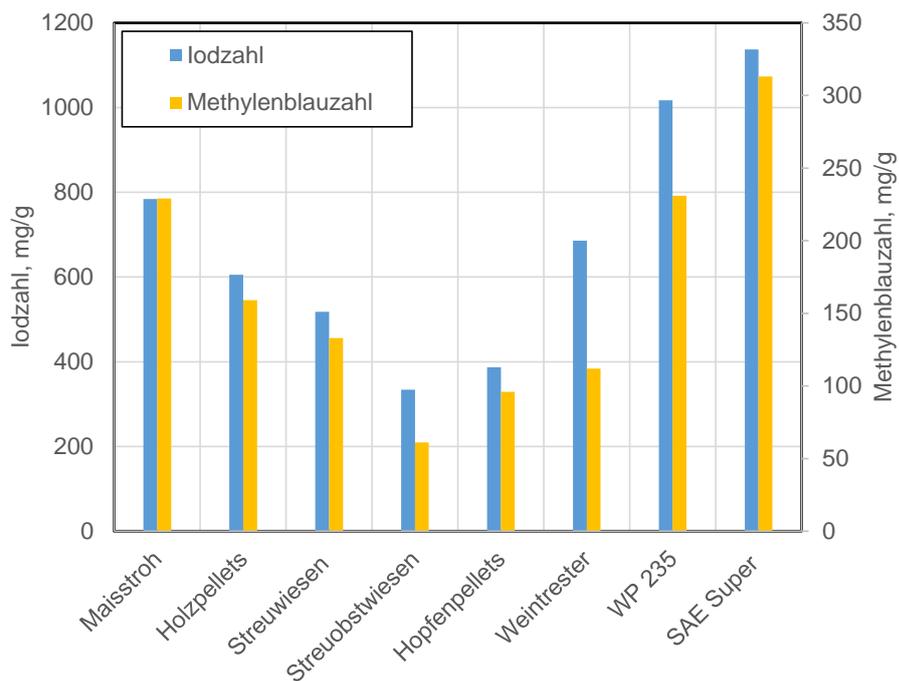
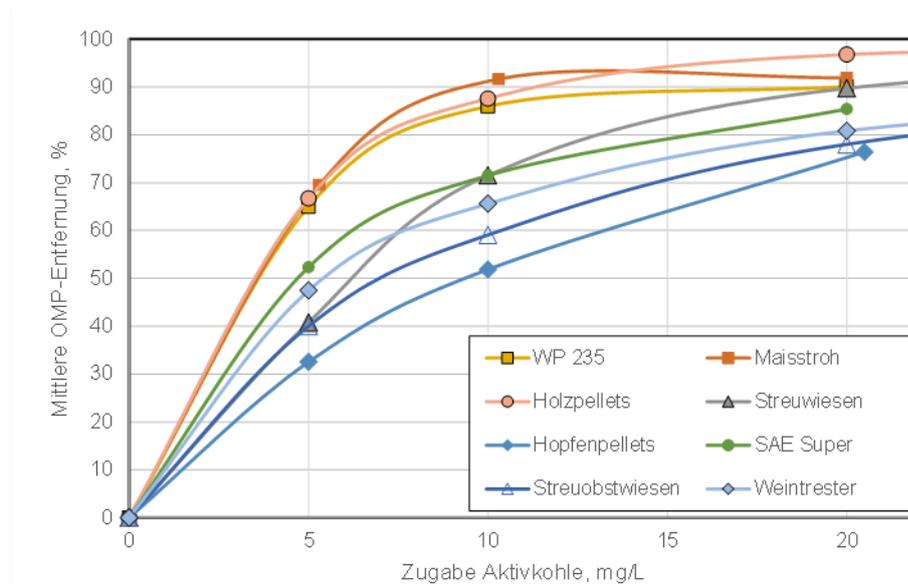


Abbildung 16: Jod- und Methylenblauzahl als Kennwerte für die inneren Oberflächen der CoAct-Aktivkohlen.

Bei der tatsächlichen (mittleren) Entfernungsleistungen für die ausgewählten sieben, gut adsorbierbaren organischen Mikroverunreinigungen² (OMP) aus dem geklärten Abwasser übertrafen die Ergebnisse der CoAct-Aktivkohlen (vgl. Abbildung 17) jedoch die Erwartungen (aus der Oberflächenbestimmung). Demnach liefern die Iod- und Methylenblauzahl keine zuverlässige Aussagekraft bezüglich tatsächlicher Spurenstoffeliminierungsleistung.



²Carbamazepin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Benzotriazol, Σ 4- und 5-Methylbenzotriazol

Abbildung 17: Durchschnittliche Entfernungsleistung der CoAct-Aktivkohlen im Vergleich zu konventionellen Produkten.

So entfernten die Aktivkohlen aus Maisstroh und Holzpellets diese sieben Substanzen ausgesprochen gut und in vergleichbaren Maße wie die Pulverkohle WP 235. Die restlichen CoAct-Aktivkohlen adsorbieren aus dem Abwasser geringere Mengen der unerwünschten OMP. Die Adsorptionseigenschaften der Aktivkohlen aus Streuwiesen und aus Weintrester sind jedoch vergleichbar mit derjenigen der SAE Super.

Die Laboruntersuchungen und der Vergleich zu handelsüblichen Pulveraktivkohlen zeigt, dass innerhalb des CoAct-Projektes Aktivkohlen hergestellt wurden, die hinsichtlich ihrer Adsorptionseigenschaften für organische Mikroverunreinigungen konkurrenzfähig sind.

Darüber hinaus wurde für den bedenkenlosen Einsatz der Kohlen im Abwasserbereich ihre Reinheit bezüglich Schwermetalle, polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) und Cyanid untersucht und als ausreichend gut eingestuft.

4.5 Ökobilanzierung

Neben der reinen Spurenstoffelimination galt es außerdem, die CoAct-Aktivkohlen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit umfassend ökologisch zu bewerten. Im Vergleich mit den konventionellen Produkten wurde dazu vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) das Instrument der Ökobilanzierung unter Beachtung der Nutzengleichheit herangezogen. Dafür wurden Emissionen und Ressourcenverbräuche aus den Prozessen aufsummiert und auf Basis wissenschaftlicher Charakterisierungsfaktoren als Wirkungskategorien ausgewiesen.

Bei den meisten betrachteten Biomassen findet auch im Status Quo schon eine Verwendung statt, wodurch ein Nutzen generiert wird, der mitbilanziert werden muss, um eine Nutzengleichheit zwischen den zu vergleichenden Systemen im Status Quo und dem CoAct-Szenario zu erreichen (Abbildung 18). Ohne Behandlung trägt bspw. auf dem Feld belassenes Maisstroh im Status-Quo zur Humusreproduktion bei. Bei der kompletten Nutzung des Maisstrohs im CoAct-Verfahren müsste auf der Fläche die Humusreproduktion durch die Erzeugung von Grüngutkompost ausgeglichen werden.

Bei der CoAct-Variante findet eine weitergehende Behandlung mit entsprechenden Lasten statt. Dadurch wird als höchste Veredelungsstufe Pulveraktivkohle produziert, die die Produktion einer bestimmten Menge konventioneller Aktivkohle auf Basis fossiler Kohle mit entsprechenden Lasten substituieren kann (Abbildung 18). Nach der Nutzung in der Abwasserreinigung wird die Pulveraktivkohle über die Klärschlammbehandlungskette ausgetragen und schlussendlich thermisch beseitigt, wobei hier von einer Monoverbrennung ausgegangen wird.

Die Emissionen aus der Monoverbrennung der biogenen CoAct-Aktivkohle und derjenigen auf fossiler Basis unterscheiden sich. Daher wird die Monoverbrennung im Bilanzrahmen mit abgebildet.

Behandlungsschritte, in denen sich Status-Quo und CoAct-Variante bei den jeweils betrachteten Biomassen nicht unterscheiden, können aus dem Bilanzrahmen gekürzt werden, weil nur der Unterschied zwischen Status-Quo und CoAct-Variante ökologisch bewertet werden soll. Dies ist oft der Fall für Erntevorgänge.

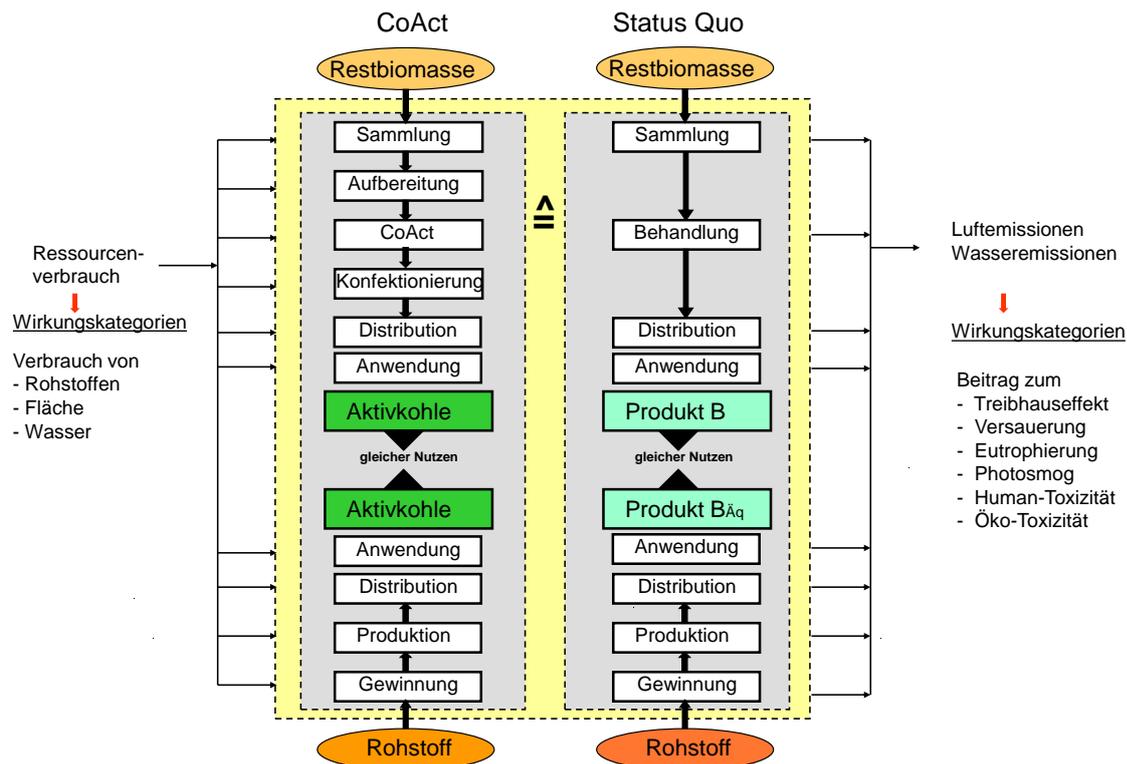


Abbildung 18: Bilanzrahmen für die Ökobilanz des CoAct-Szenarios (links) und des Status-Quo (rechts)

Für eine Vergleichbarkeit der Verwertungswege und der Biomassen untereinander wird die funktionelle Einheit auf die Behandlung jeweils einer Tonne Biomasse festgelegt. Betrachtet werden die klassischen Wirkungskategorien und Indikatoren (Ressourcenbeanspruchung als kumulierter Energieaufwand, Treibhauseffekt, Versauerung, Eutrophierung sowie Humantoxizität (Feinstaub (PM_{2,5})).

Hierbei werden für die Verwertungswege Status Quo und mögliches CoAct-Verfahren biomassedifferenziert die Nutzen und Lasten der jeweiligen Verwertungswege gegenübergestellt. Die IFBB-Anlage für die nicht-holzigen Biomassen ist dabei auf einem Kläranlagenstandort angesiedelt, der Presssaft wird in den Faultrum zugegeben. In Abbildung 19 wird der Treibhauseffekt für die Behandlung jeder Biomasse wie im Status Quo (unten) und CoAct (oben) dargestellt: jeweils unterer Balken: Lasten positiv nach rechts, Nutzen negativ nach links (Gutschriften GS), jeweils oberer Balken: Verrechnung von Lasten und Nutzen zu einem Nettowert. Es zeigt sich deutlich, dass das mögliche CoAct-Verfahren für alle betrachteten Biomassen netto mit Vorteilen im Treibhauseffekt verbunden ist. Grund dafür ist insbesondere die Substitution von Aktivkohle auf Steinkohlebasis, bei deren Produktion und Verbrennung nach Nutzung fossile Kohlendioxidemissionen freigesetzt werden. Auch bei den weiteren untersuchten Wirkungskategorien und Indikatoren ergeben sich bei den meisten Biomassen Vorteile für das mögliche CoAct-Verfahren, wobei in Summe für alle Biomassen diesbezügliche Vorteile zu verzeichnen sind. Am geringsten fallen die durch CoAct im Vergleich zur bisherigen Nutzung erzielbaren Einsparungen bei Weintrester und Maishäcksel aus und am größten mit bislang teilweise ungenutztem Hochstammschnitt.

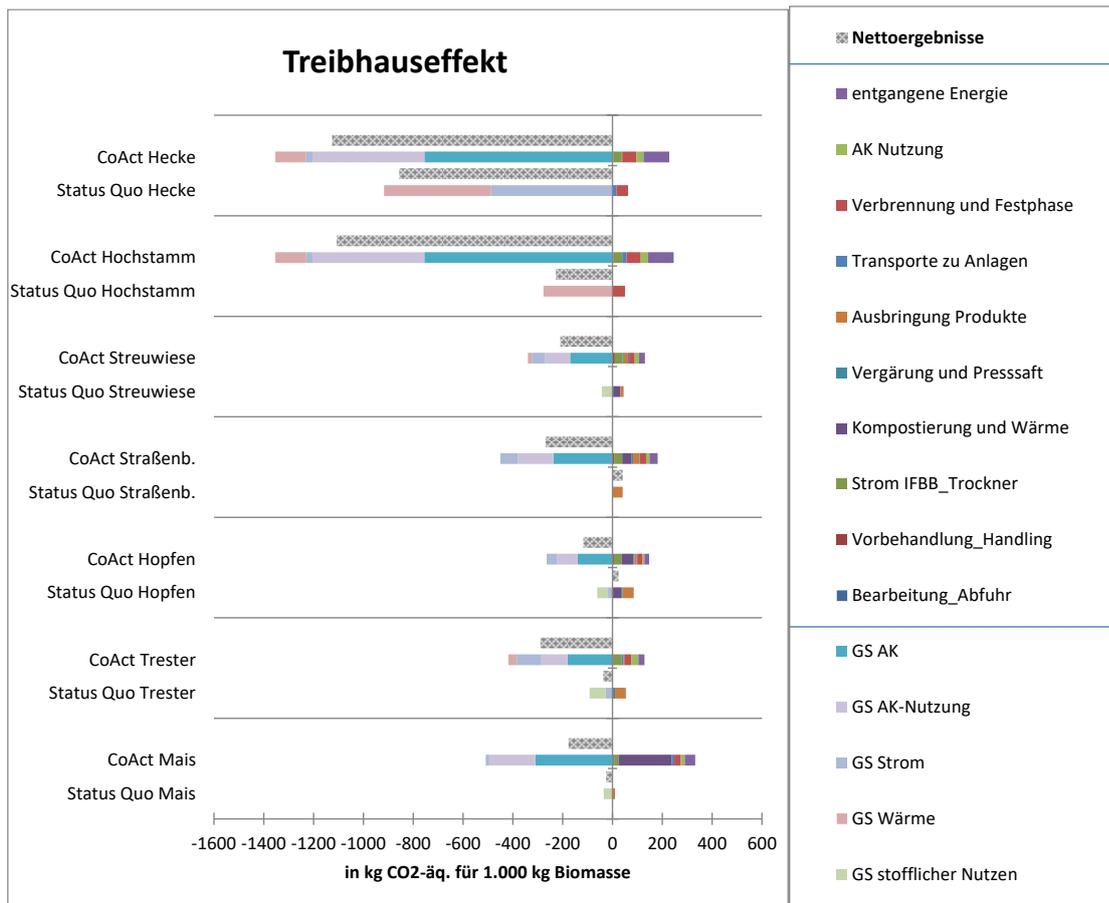


Abbildung 19: Treibhauseffekt für die Biomassebehandlung im Status Quo (unten) und im CoAct Verfahren auf einer Kläranlage (oben).

4.6 Integrative Anlagenplanung

Ein zentraler Bestandteil des CoAct-Vorhabens ist eine integrative Anlagenplanung, welche das IFBB-Technikkonzept in das CoAct-Technikkonzept zu dem CoAct-Verfahren integriert.

4.6.1 IFBB

Das IFBB Verfahren ist im Labormaßstab ausgereift. Die Aufgabe von Verbundpartner K&F war die technische Umsetzung des CoAct-Verfahrenskonzeptes zur Herstellung von Ausgangssubstrat für die Pyrolyse zur Erzeugung von Aktivkohle aus ausgewählten, in der Region anfallenden Substraten. Da es sich insgesamt um eine komplexe Verfahrenskette handelt, die in zahlreichen Wechselwirkungen mit regionalen Akteuren und anderen, bereits existierenden Verwertungsverfahren steht, wurden die Planungen in einem intensiven und iterativen Diskurs mit den Projektpartnern entwickelt. Sie dienen als Grundlage für die Abschätzung der wirtschaftlichen Rentabilität der Wertschöpfungs-Szenarien sowie für den in der Umsetzungsphase folgenden Abstimmungsprozess hinsichtlich einer Anlagenvorplanung in der Projektregion.

K&F beschäftigte sich mit technischen Fragestellungen in Zusammenhang mit dem integrierten CoAct-Technikkonzept, die sich zwischen der Anlieferung der Inputsubstrate und den Ausgangsprodukten der Entwässerung (Presskuchen und Presssaft) ergeben. Schnittstellen zu den Substratlieferanten, zu der Pyrolyse/Aktivierungs-Anlage sowie zur Biogasanlage werden ermittelt und bewertet.

In der Forschungsphase wurde in intensivem Austausch mit den Projektpartnern ermittelt, welche verfahrenstechnischen Optionen insbesondere für die Konditionierung und Entwässerung der verfügbaren Materialien in Frage kommen. Anhand von fünf vorläufigen Varianten wurde eine optimierte Variante erarbeitet, welche anschließend detailliert auf technische Machbarkeit und Investitions- sowie Betriebskosten untersucht wurde.

Als Substrat wurde ein Mix aus den identifizierten Fokus-Substraten (vgl. Tabelle 2) ausgewählt. Die Mengen wurden anteilig an der zur Verfügung stehenden Menge genommen. Durch den Substratmix kann z.B. die Aufbereitungstechnik für mehrere Substrate genutzt werden und nicht nur wenige Wochen, in denen ein Substrat anfällt. Das wurde in der Auslegung der Größen der Maschinen berücksichtigt. Durch die Mischung entsteht ein gemischtes Prozesswasser, das auch im Nährstoffgehalt vielseitiger ist und per Fermenter vergoren werden kann. Prozesswasser z.B. aus reinem Stroh würde einer aufwändigen Zugabe von Nährstoffen bedürfen.

Die Substrate stehen in unterschiedlichen Mengen zur Verfügung. Das Verhältnis dieser Mengen wurde konstant gelassen und auf den Trockenmasse-Bedarf von 1.000 t/a für die anvisierte Pyrolyseanlage angepasst. Dafür wird mit insgesamt ca. 3.200 t/a frischer Biomasse gerechnet, welche bei der Verdünnungsrate (Biomasse:Wasser) von 1:2 ein Presssaftvolumen von 7.000 m³/a liefert.

Aufbereitung und Lagerung

Um die Anlage über das ganze Jahr mit Substraten zu versorgen, werden die zumeist saisonal anfallenden Substrate konserviert und im Fahrsilo gelagert. Enthaltene Störstoffe müssen per Magnetabscheider und Siebanlage vor der Konservierung entfernt werden, da eine Abtrennung nach der Konservierung deutlich schlechter durchzuführen und technisch schwieriger ist. Während der Konservierung, die durch Milchsäuregärung durchgeführt wird, wird im Siliergut enthaltener Zucker bzw. Stärke durch Bakterien in organische Säuren abgebaut. Durch den Säuregehalt wird die Silage konserviert. Durch den teilweisen Abbau der organischen Substanz wird das Pflanzengewebe aufgeschlossen und in der Maische mehr Inhaltstoffe freigesetzt als bei unbehandeltem Substrat.

Erzeugung der Maische

Zur Anmischung wird ein Schwemmrinne eingesetzt. Dabei wird das Substrat über einen Aufgabetrichter der Schwemmrinne zugeführt und langsam vom Einlass zum Auslass geschwemmt und von oben über Verteildüsen mit Perkolatwasser berieselt. Die mechanische Entnahme erfolgt über eine Förderhaspel, die die Maische in eine Rachtrennpumpe fördert und der Separation zuführt. Wichtig ist, dass die Maische einen TS-Gehalt von unter 12 % aufweist, um pumpfähig zu bleiben.

In einem Schneckenseparator wird die Maische in Feststoffe und Presssaft separiert. Dabei erreicht die eingesetzte Schneckenpresse Trockensubstanzgehalte von > 40 % im Presskuchen.

Trocknung und Pelletierung

Für die Pelletierung muss der Presskuchen bis zu einem Trockensubstanzgehalt von ca. 90 % getrocknet werden, um eine gute Pelletfestigkeit zu erreichen. Dazu wird ein Bandtrockner eingesetzt. Die dafür benötigte Wärmemenge beträgt 2.800 MWh/a. Nach der Trocknung wird der Presskuchen pelletiert. Dadurch ergeben sich bessere Vorbedingungen für die sich anschließende Pyrolyse.

Vergärung Presssaft

Der erzeugte Presssaft kann einer Vergärung zugeführt werden. Da der Wasseranteil sehr hoch ist, werden Fermenter mit Kontaktverfahren eingesetzt. Dazu erfolgt eine Schlammrückführung. Bakterienreiche Feststoffe werden in den Fermenter zurückgeführt und so die Verweilzeit verkürzt.

Das erzeugte Biogas kann in einem Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt werden. Die anfallende Biogasmenge von 33.600 m³/a ist sehr gering. Das schon sehr kleine BHKW mit 25 kW könnte nur an 4 bis 5 Stunden pro Tag betrieben werden. Dieses Ergebnis spricht demnach sehr für eine Integration der CoAct-Anlage in schon existierende Infrastruktur zur sinngemäßen Verwertung des IFBB-Presssaftes.

Lagerung Gärrest

Der nach der Vergärung verbleibende Gärrest kann bedarfsgerecht als Flüssigdünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Gemäß den Auflagen der Düngemittelverordnung, muss für die Lagerung von Gärrest eine Lagerkapazität für einen Zeitraum von 9 Monaten vorgehalten werden (DüV §12). Die pro Jahr produzierte Gärrestmenge beträgt ca. 7.000 m³. Davon müssen ca. 5.300 m³ über 9 Monate gespeichert werden können.

Die eingesetzten, oben aufgeführten Substrate fallen teilweise nicht unter die landwirtschaftlichen Gärsubstrate gemäß §2(8) AwSV. Daher gelten die abweichenden Anforderungen gem. §37 (Biogasanlagen mit Gärsubstraten landwirtschaftlicher Herkunft) nicht, sondern die Anlage muss gem. §18 mit einer Rückhalteinrichtung für wassergefährdende Stoffe ausgestattet sein oder doppelwandig ausgeführt werden. In der Kostenaufstellung wurde daher eine Rückhaltevorrichtung für den größten Behälter eingeplant.

4.6.2 Pyrolyse- und Aktivierungsanlage

Für die dezentrale großtechnische Pyrolyse und Aktivierung von Biomassen entwickelte die Firma PYREG GmbH die Pilotanlage A500. Diese Anlage hat eine jährliche Durchsatzkapazität von etwa 1.000 t TM an Eingangsbiomasse. Im Gegensatz zu dem Laborreaktor Pyreka wird die großtechnische A500 Anlage nicht elektrisch, sondern durch eine thermische Verwertung des in dem Prozess entstehenden Synthesegases beheizt. Zusätzlich kann überschüssige Wärmeenergie zur Trocknung von Biomassen verwendet werden. Die Pyrolyse und Aktivierung erfolgt in einem 1-stufigen Verfahren, unter Verwendung von Wasserdampf als Oxidationsmittel (vgl. Abschnitt 2.3.4, Abbildung 20).

In Abhängigkeit der Ausgangsbiomasse soll mit einer PYREG A500 zwischen 100 und 200 t Aktivkohle pro Jahr produziert werden. Zugleich wäre durch Abschaltung des Dampfgenerators auch die Erzeugung von reiner Pflanzenkohle möglich.

Im Jahr 2019 wurde die erste Pilotanlage an den Eigenbetrieb Baden-Baden ausgeliefert und im Jahr 2020 erstmals in Betrieb genommen. Diese Pilotanlage sollte für die Erzeugung der biogenen Aktivkohlen für die geplanten Praxisversuche auf der Kläranlage Kressbronn-Langenargen genutzt werden. Aufgrund betriebsbedingter Umstrukturierungen des ehemaligen Eigenbetrieb Umwelttechnik Baden-Baden und dessen Eingliederung in die Stadtwerke Baden-Baden wurde der Betrieb der Pilotanlage jedoch eingestellt und die Erzeugung von biogenen Aktivkohlen nicht weiterverfolgt. Aufgrund der Rahmenbedingungen im Projekt im Hinblick auf Kapazität und Budget waren Bau und Weiterentwicklung einer neuen Pilotanlage A500 durch den Projektpartner Pyreg nicht möglich. Auch war die Entwicklung und Etablierung einer Anlagentechnologie zur dezentralen Herstellung von biogenen Aktivkohlen nicht Gegenstand des CoAct-Vorhabens. Daher wurden verschiedene Optionen zur Erzeugung einer ausreichenden Menge alternativer pflanzlicher Aktivkohle für den Praxisversuch geprüft und final eine biogene Aktivkohle von AdFiS gewählt (siehe Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

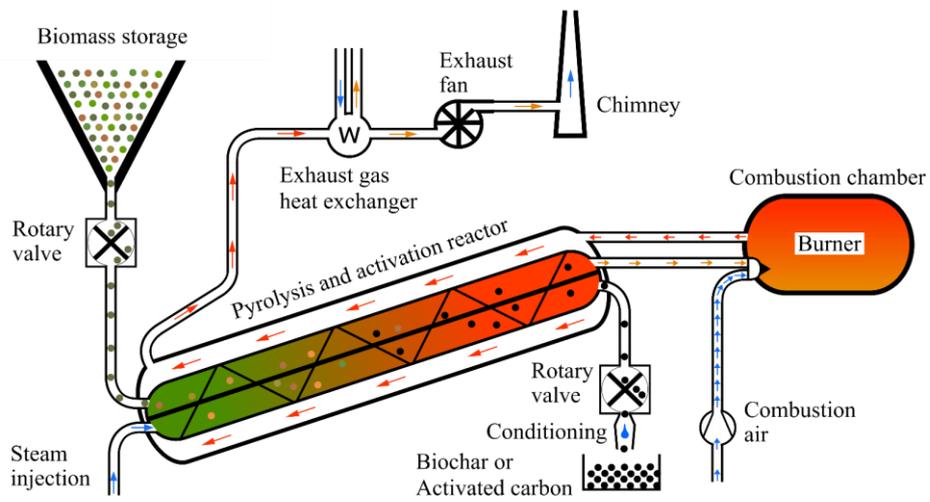


Abbildung 20: Schematische Zeichnung der PYREG A500 Pilotanlage.

5. Umsetzung und Verstetigung

In den ersten drei Jahren des Verbundvorhabens (der Forschungs- und Entwicklungsphase „FuE-Phase“) konnte u.a. nachgewiesen werden, dass die theoretisch verfügbare Restbiomasse in der Projektregion den tatsächlichen Bedarf für das CoAct-Verfahren um ein Vielfaches übersteigt. Zugleich konnte im Labormaßstab gezeigt werden, dass die Herstellung von hochwertigen Aktivkohlen aus Restbiomassen technisch machbar ist. Ebenso konnten die ökologisch positiven Effekte des CoAct-Verfahrens mittels Ökobilanz und Stoffstromanalyse nachgewiesen werden.

Die zweite Projektphase diente daher der Evaluierung der großtechnischen Umsetzbarkeit und ökonomischen Tragfähigkeit dieses Verfahrens. Zentrale Bestandteile der angepassten Vorhabenbeschreibung für die Umsetzungsphase waren die integrative Anlagenplanung einer CoAct-Anlage in die vorhandenen Infrastrukturen eines möglichen Standorts, sowie die großtechnische Produktion von pflanzlicher Aktivkohle aus Restbiomassen und ihr Einsatz im Rahmen eines Praxisversuches.

5.1 Anlagenplanung für den Standort Kläranlage

Bereits während der FuE-Phase wurden kommunale Kläranlagen als vielversprechende Standorte für eine CoAct-Anlage identifiziert. Die zahlreichen herausgearbeiteten Synergieeffekte sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 6: Identifizierte Synergieeffekte für eine CoAct-Anlage am Standort einer Kläranlage.

Herausforderung	Lösung durch Kläranlage
Hoher Aufwand an Logistik und technischen Bauten	Ideale Einbindung in bestehende Infrastruktur und Betriebsabläufe
Großer Wasserbedarf	Geklärtetes Abwasser kann genutzt werden – (Kreislauf)
Saisonal schwankender Energiebedarf: Wärmebedarf Sommer/Herbst (Trocknung IFBB Pellets) und Wärmeüberschuss aus Pyrolyse im Winter/Frühling (Abwärme)	Abwärme im Sommer vorhanden aus BHKWs (für Trocknung), Wärmebedarf im Winter für den Faulturm (aus Pyrolyse)
Presswasseranfall	Bedarf an C-Quelle zur Denitrifikation
Presswasseranfall	Faulturmkapazitäten können ideal genutzt werden um überschüssiges Presswasser zu vergären (hohe zusätzliche Gasausbeute)
Technisches Personal muss dauerhaft vor Ort sein ohne konstante Arbeitsbelastung	Personal der Kläranlage dauerhaft vor Ort/in Bereitschaft
Absatz der Aktivkohle	Eigenversorgung mit Aktivkohle: Unabhängigkeit vom Weltmarkt (Verfügbarkeit/Preisschwankungen)
Absatz der Aktivkohle	Direkter Kontakt zu Nachbar-KAs die großes Interesse an der Aktivkohle haben

5.1.1 Auswahl der Kläranlage Kressbronn-Langenargen

Die Auswahl der Kläranlage des Abwasserzweckverbandes Kressbronn a. B. – Langenargen (AZV) als Standort für die weitergehende Planung einer CoAct-Anlage mit IFBB-Verfahren erfolgte zum Ende der FuE-Phase des Vorhabens auf Basis von Workshops mit regionalen Stakeholdern (vgl. Abschnitt 3.6). Neben den generellen Synergieeffekten auf einer Kläranlage (vgl. Tabelle 6) begründet sich diese Wahl anhand von folgenden Aspekten:

- Existierende Infrastruktur: die 4. Reinigungsstufe mit Pulveraktivkohle (PAK) ist dort bereits seit Juli 2011 in Betrieb (vgl. Abbildung 24)
- Presswasser als C-Quelle: der AZV hat bei seinem Abwasseraufkommen konkreten Bedarf an zusätzlichem organischen Kohlenstoff für den Abbau von Nitrat (Denitrifikation), welcher aktuell zugekauft werden muss.
- Freie Kapazitäten: die existierenden Faultürme bieten freies Volumen für die Vergärung von überschüssigem Presssaft. Auch Platz für eine Anlage auf dem Gelände, sowie weitere Flächen in direkter Nähe und Zufahrtswege für Logistik-Zwecke konnten identifiziert werden.
- Hohes Engagement: Der Betreiber hält seine Anlage erfolgreich auf dem Stand der Technik, ist bestrebt den Betrieb zukunftsfähig aufzustellen und ist in der Branche auch über Landesgrenzen hinaus vernetzt. Auch mit der Einführung der PAK-Stufe hatte der AZV bereits eine Pionier-Rolle übernommen.
- Etablierte Zusammenarbeit: Der BSK konnte auf Initiative der Bodensee-Stiftung den AZV auch als Praxispartner gewinnen, um den CoAct-Praxisversuch mit pflanzlicher Aktivkohle im laufenden Betrieb auf dieser Anlage durchzuführen (vgl. Abschnitt 5.2.3).
- Gesellschaftliche Akzeptanz des Ansatzes (u. A. die Bürgermeister der Gemeinden Kressbronn und Langenargen)

Ebenfalls diskutiert wurde die Planung für und mit dem Entsorgungszentrum Friedrichshafen-Weiherberg bei Raderach. Es stellte sich dabei aber heraus, dass für diesen Standort eine Erweiterung um eine CoAct-Anlage aus betrieblichen Gründen nicht in Frage kommt. Daher wurden die Planungen für die Kläranlage zwar auch weiterhin auf die theoretische Variante eines Entsorgungszentrums (EZ) übertragen (vgl. Kapitel 6). Eine eigene integrative Planung für diesen realen Standort konnte jedoch nicht erfolgen.

5.1.2 Das CoAct-Konzept für die Kläranlage Kressbronn-Langenargen

Um ein tragfähiges Konzept für den realen Standort auf der Kläranlage in Kressbronn zu entwickeln, sind während der Umsetzungsphase viele FuE-Ergebnisse aller Verbundpartner zusammengeflossen, sowie weitere Rahmenbedingungen mit dem assoziierten Partner AZV vor Ort aufgenommen und berücksichtigt worden.

Die Bodensee-Stiftung hat mit Vertreter:innen der verschiedenen Ämter und Abteilungen Kontakt aufgenommen. In Gesprächen mit dem Amt für Wasser- und Bodenschutz, der Umweltabteilung, der Forstbehörde des Landkreises sowie dem Bauordnungsamt der Gemeinden wurde das Projekt vorgestellt und zu beachtende Herausforderungen und potentielle Anpassungen der Anlagenplanung identifiziert. So wurde beispielsweise herausgearbeitet, dass der Bau einer CoAct-Anlage auf dem (in einem Grünzug liegenden) Betriebsgelände voraussichtlich nur genehmigungsfähig ist, wenn eine Privilegierung des Baus vorliegt. Das wäre der Fall, wenn es sich bei der Anlage um eine Erweiterung der Kläranlage handelt und der Bau nicht auch beispielsweise in einem Industriegebiet erfolgen könnte. Das wäre der Fall bei einer CoAct-Anlage, die auch die IFBB-Anlage beinhaltet, da hier mehrere Synergien bestehen und der Bau eine sinnvolle Erweiterung der Kläranlage darstellt (vgl. Tabelle 6).

In einem gemeinsamen Workshop wurden schließlich die **Eingangssubstrate** für die benötigten 1000 t Trockenmasse bestimmt, welche als zentrale Eckpunkte des Konzeptes die weiteren Dimensionierungen definierten:

- 30 % IFBB-Presskuchenpellets, bestehend aus Grünschnitt der Kommune (10 %) und halmartigem Landschaftspflegematerial (20 %)
- 70 % holzige Biomasse

Während die holzige Biomasse im Bodenseekreis ausreichend zur Verfügung steht und wenige logistische/prozesstechnische Bedenken mit sich bringt, mussten für das **IFBB-Material** die folgenden **Rahmenbedingungen** berücksichtigt werden:

- Für einen 100%-Betrieb mit IFBB-Presskuchen fällt im BSK nicht ausreichend Material an. Außerdem würde das wasserhaltige Rohmaterial in dieser Menge hohe Beanspruchungen durch das nötige Logistik-Aufkommen und den Platzbedarf mit sich bringen.
- Nur wenige unterschiedliche IFBB-Biomassen sollen genutzt und zu einem Mix homogenisiert werden. Das reduziert nötiges Equipment zur Aufbereitung. Außerdem ist ein homogener Input wichtig bei der Produktion von leistungsfähiger Aktivkohle.
- Anhand der charakterisierten Presssäfte (dem CSB-Wert – vgl. Abschnitt 4.2.4) wurde ein Mindestbedarf von 20 % IFBB-Anteil identifiziert, um den Kohlenstoff-Bedarf der Kläranlage für die Denitrifikation zu decken. Überschüssiger Presssaft könnte über die vorhandenen Faultürme verwertet werden.
- Die Kapazität des geplanten Hochsilos (min. 964 m³) muss die Ernte-Spitzen abfangen. (Anstelle von Fahrsilos – das Hochsilo nimmt weniger Platz ein.)
- Die Kapazität des Lagers für den Presskuchen (min. 340 m³) muss auf einen durchgehenden Betrieb der IFBB-Anlage ausgelegt sein.

Dementsprechend wurde mit zwei Betriebszuständen für die Pyrolyse & Aktivierung geplant, welche je einen Teil des Jahres kontinuierlich betrieben werden können und mit optimierten Prozessbedingungen jeweils eine hochwertige Aktivkohle liefern.

5.1.3 Integrative Anlagenplanung für die Kläranlage Kressbronn

Basierend auf dem CoAct-Konzept für den Standort der Kläranlage in Kressbronn wurde durch den BSK bei dem externen Ingenieurbüro Björnsen Beratende Ingenieure (BCE) eine detaillierte Anlagenplanung in Auftrag gegeben. Aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von Anlagen zur dezentralen Aktivkohleherstellung in dieser Größenordnung wurde dabei ein zweistufiger Ansatz gewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die geplante Karbonisierungsanlage durch eine einstufige Aktivierungsanlage ersetzt werden könnte.

1. Anlagenplanung im ersten Schritt für eine Karbonisierungsanlage ohne Aktivierung
2. Untersuchung von Erweiterungen zur Aktivkohleherstellung

Für die Anlagenplanung ergaben sich zwei Prozessabläufe: die Presskuchenkonditionierung und die Karbonisierung. Diese wurden jeweils um die Biomassezwischenlagerung und Fördertechnik ergänzt. In allen betrachteten Varianten wurden kontinuierlich und automatisiert betriebene Anlagenkonfigurationen vorausgesetzt. Als entscheidende Dimensionierungsrandbedingung ergibt sich der geplante Jahresdurchsatz an Brennstoff in der Karbonisierung von 1.000 t TM/a. Bei einem ganzjährig kontinuierlichen Betrieb (ca. 7.500 h/a) ergibt sich mit ca. 133 kg TM/h eine Brennstoffleistung von ca. 670 kW. Das grundlegende Konzept für den Standort ist schematisch in Abbildung 21 dargestellt.

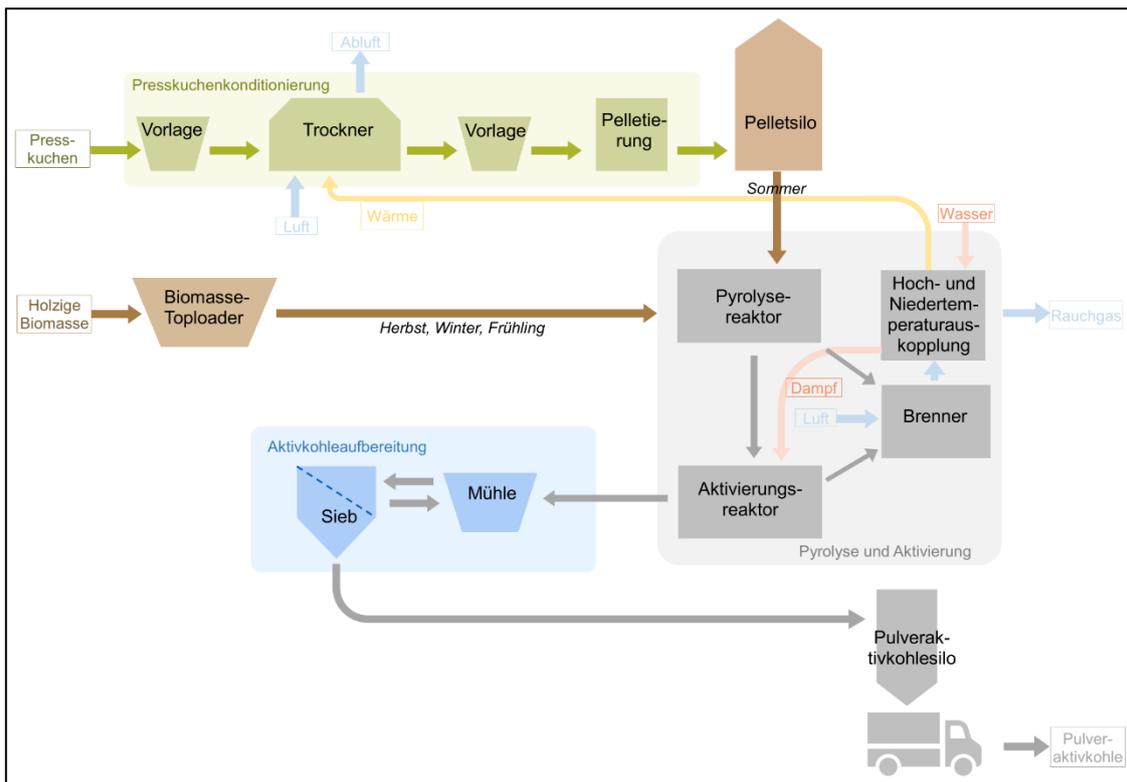


Abbildung 21: Vereinfachte, schematische Darstellung eines zweistufigen Aktivierungsverfahrens zur Pulveraktivkohleherstellung auf der Kläranlage Kressbronn (Quelle: BCE).

Bei der Auswahl der betrachteten Technologievarianten wurde eine potenzielle Erweiterung um eine Aktivierung berücksichtigt. Die Varianten unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Reaktorbeheizung. Sowohl eine direkte Beheizung mit der Rauchgaswärme der Karbonisierung, als auch ein elektrisch beheiztes System wurden untersucht. In beiden Fällen wurde ein Überschuss an auskoppelbarer Wärme identifiziert. Die effiziente Nutzung dieser Überschusswärme spielt bei dieser integrativen Planung in den Standort der Kläranlage eine zentrale Rolle. Während bei der elektrisch beheizten Variante mehr auskoppelbare Wärme erzeugt wird, bringt sie zusätzliche Vorteile bei der Regelbarkeit der Reaktortemperatur mit sich. Die Kostenschätzung dieser Planung ist schließlich auch in die ökonomische Betrachtung einer CoAct-Anlage eingegangen (vgl. Absatz 6.2).

Grundsätzlich wird angemerkt, dass die Randbedingungen der Kläranlage Kressbronn (vgl. Absatz 5.1.2) einige Herausforderungen bei der Planung um Umsetzung mit sich bringen. Beispielsweise ergibt sich durch die Betrachtung von zwei unterschiedlichen Inputbiomasseströmen teilweise ein doppelter anlagentechnischer Aufwand durch die Lagerung und Fördertechnik für die holzige Biomasse und die Presskuchenpellets, was den Platz- und Investitionsbedarf erhöht. Die insgesamt kleinen Durchsätze in der Presskuchenkonditionierung erfordern eine entsprechend kleine Dimensionierung oder eine geringe Auslastung von Trockner und Pelletierung. Als Ergebnis gibt diese Anlagenplanung dem Verbundvorhaben eine vollständige Integration des CoAct-Konzeptes in einen Standort mit den zentralen Kostenpunkten, sowie Energie- und Massenströmen – zumindest bis zur Karbonisierung der Restbiomassen.

Die Integration einer Aktivierungsanlage in die Anlagenplanung gestaltete sich hingegen trotz intensiven Recherchen aller beteiligter Projektpartner und BCE als weitgehend unmöglich. Dies ist dem geschuldet, dass kein Anlagenbauer identifiziert werden konnte, der ein passendes Pyrolyse- und

Aktivierungssystem aktuell anbietet oder realisieren könnte. Hierfür wurden insbesondere zwei Gründe identifiziert:

1. Anlagenbauer, welche Pyrolyseanlagen mit einer passenden Kapazität (1.000 t TM pro Jahr) bauen, fokussieren sich auf die Erzeugung von Pflanzenkohle, welche bei niedrigeren Temperaturen und ohne Oxidationsmedium (zur Aktivierung) hergestellt wird. Entsprechend sind die erprobten und marktreifen Anlagen nicht für die erforderlichen hohen Prozesstemperaturen ausgelegt. Verschiedene Anlagen zur Erzeugung von Aktivkohlen befinden sich zwar in der Entwicklung, sind aber noch nicht marktreif.
2. Erprobte Anlagensystem zur Herstellung von Aktivkohlen sind für deutliche höhere Massendurchsätze ausgelegt als in dem CoAct-Vorhaben vorgesehen. Diese Systeme lassen sich zwar theoretisch nach unten skalieren, jedoch gibt es keine entsprechenden Anbieter.

Entsprechend muss als Ergebnis festgehalten werden, dass die Technologie zur dezentralen Erzeugung von Aktivkohlen aus Biomassen zwar grundsätzlich existiert, aber noch nicht in einem passenden Skalenbereich umgesetzt wurde. Hier besteht ein dringender Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die vielversprechenden Ergebnisse der FuE-Phase in die Praxis zu bringen. Das CoAct-Vorhaben konnte hierzu einen maßgeblichen Beitrag leisten, in dem gezeigt werden konnte, dass die Herstellung von biogenen Aktivkohlen aus Restbiomassen mittels Wasserdampfaktivierung sowohl in einem einstufigen, als auch zweistufigen Prozess möglich ist.

Die Entwicklung großtechnischer Umsetzungslösungen muss jedoch von entsprechenden Technologieanbietern erfolgen. Die Wahl des zugrundeliegenden Verfahrens (u.a. elektrisch oder mit Abwärme beheizt) bestimmt dabei auch die Ökonomie, sowie die Energie- und Stoffströme. Aufgrund dominierender Einflussfaktoren und bereits ermittelter Energie- und Stoffströme ist jedoch davon auszugehen, dass sich an der Ökobilanz des CoAct-Verfahrens nichts Grundlegendes ändern wird.

5.1.4 Ökologische Bewertung

Das entwickelte Modell zur ökologischen Bewertung (vgl. Abschnitt 4.5) wurde auf diese weitergehende Planung einer CoAct-Anlage am Standort der Kläranlage Kressbronn-Langenargen angewendet. Dabei werden insbesondere die Ergebnisse aus der Planung zur Implementation der IFBB-Anlage sowie Interaktionen des dabei entstehenden Presssafts mit der Kläranlage berücksichtigt. Der Praxisversuch und die dort eingesetzte Aktivkohle konnte hingegen aus zeitlichen Gründen keinen Einfluss mehr auf das Modell nehmen.

Es ergeben sich die folgenden Ergebnisse im Treibhauseffekt für einen Mix aus jährlich 940 t Streuwiese/Grasschnitt inklusive IFBB-Verfahren sowie 824 t holziger Biomasse (getrocknet auf einen Trockensubstanz-Gehalt von 85 %) ohne IFBB-Verfahren am Standort der Kläranlage Kressbronn-Langenargen. Die ungetrocknete Inputmenge holziger Biomasse beträgt jährlich 1.005 t (TS-Gehalt von 66,7 %). Es zeigt sich, dass die Behandlung des Streuwiesen/Grasschnitt- und insbesondere des Holzanteils nach dem CoAct-Konzept zu einer Nettoentlastung im Treibhauseffekt führen (Balken nach links in Abbildung 22 unten bzw. Mitte), so dass in Summe für den Biomassemix mit CoAct eine deutliche Nettoentlastung zu verzeichnen ist (oben). Grund dafür ist die Substitution von konventioneller Aktivkohle auf Steinkohlebasis, deren Herstellung und Verbrennung nach der Nutzung hohe Lasten im Treibhauseffekt bedingt, die über die Nutzung der biogenen CoAct-Aktivkohle vermieden wird. Zur Bestimmung der Nutzengleichheit wurde für die ökologische Bewertung auf die Wirksamkeit der biogenen Aktivkohlen in der Abwasserreinigung im Vergleich zu konventionellen Aktivkohlen zurückgegriffen, die auf Basis von Ergebnissen aus Laborversuchen in der

Konzeptionierungsphase mit biogenen Aktivkohlen aus einer Aktivierung unter definierten Randbedingungen ermittelt wurden.

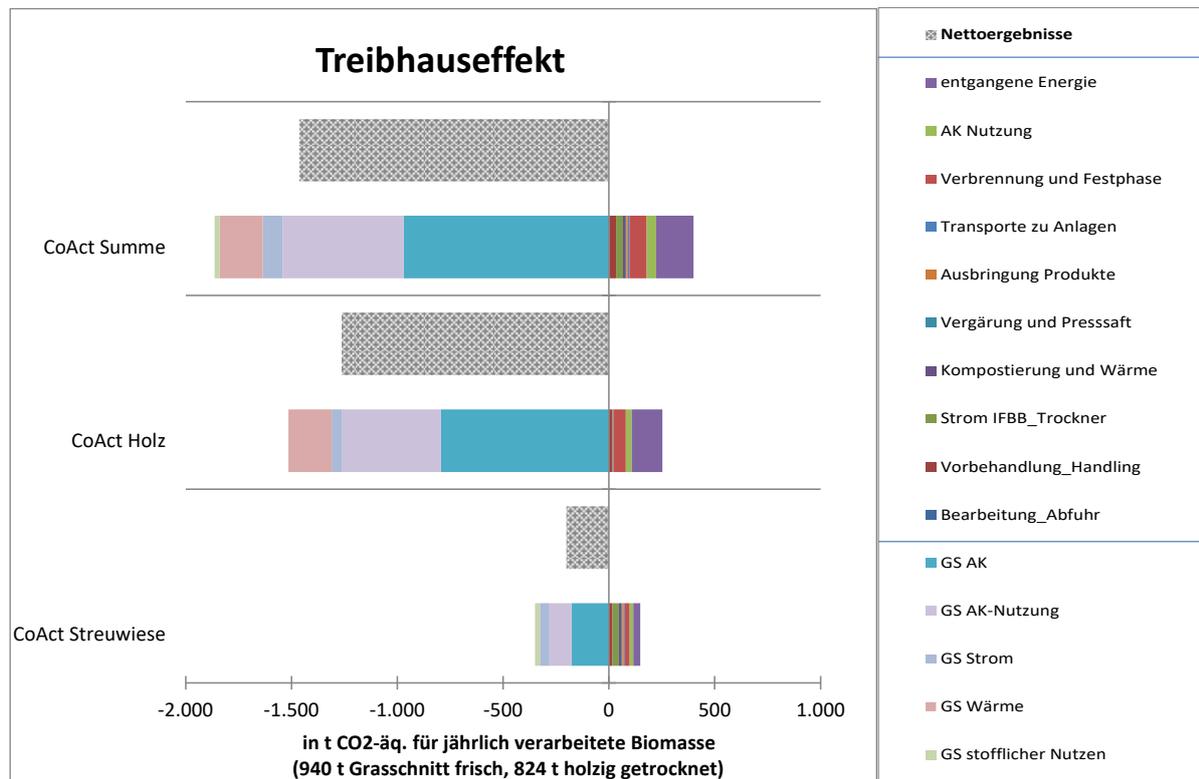


Abbildung 22: Treibhauseffekt für die Behandlung eines Biomassemixes (oben) bestehend aus Grasschnitt/Streuwiese (unten) und Holz (Mitte) nach dem CoAct Verfahren auf einer Kläranlage entsprechend den Planungen aus der Umsetzungsphase für die IFBB-Anlage und Kläranlage; unten

Die Ergebnisse für die weiteren betrachteten Indikatoren sind im Anhang dargestellt und zeigen in dieselbe Richtung wie das Ergebnis für den Treibhauseffekt (wenngleich beim terrestrischen Eutrophierungspotenzial deutlich eingeschränkter, weil diesbezüglich die biogene Aktivkohle keine großen Vorteile gegenüber der konventionellen Aktivkohle bedingt).

5.2 Der CoAct-Praxisversuch

Ziel des geplanten CoAct-Praxisversuchs war die technische Validierung der vielversprechenden Laborergebnisse aus der FuE-Phase.

Dazu sollte die Spurenstoffelimination einer kommunalen Kläranlage über einen aussagekräftigen Zeitraum mit einer Aktivkohle aus Restbiomassen durchgeführt werden und mit dem Einsatz einer konventionellen, fossilen Aktivkohle verglichen werden.

5.2.1 Beschaffung einer biogenen Aktivkohle

Für die Produktion einer ausreichenden Menge (6-10 t) biogener Aktivkohle für den Praxisversuch sollte die Pilotanlage „PYREG A500“ in Baden-Baden genutzt werden. Dabei handelt es sich um einen assoziierten Partner der Universität Kassel. Im Rahmen eines anderen Vorhabens existierte bereits eine Kooperation, in deren Verlauf die Pilotanlage auf dem städtischen Entsorgungsbetrieb (gleichzeitig Gelände der kommunalen Kläranlage) errichtet wurde. Aus innerbetrieblichen Gründen

wird sie dort jedoch inzwischen nicht weiter betrieben (vgl. Absatz 4.6.2) und stand dem Verbundvorhaben demnach nicht für den Praxisversuch zur Verfügung.

Zur Lösung dieses Problems wurden unterschiedliche Optionen hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und der Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse auf die Nutzung von Restbiomassen zur Erzeugung biogener Aktivkohlen geprüft.

A) Einstufig: Pyrolyse und Aktivierung in einem Prozess

- Verbundpartner PYREG (Technologie-Anbieter für Pyrolyse von Biomassen) mit assoziierten Pflanzenkohle-Produktionsunternehmen konnten im Rahmen von CoAct (vgl. Abschnitt 4.6.2) keine zusätzliche A500 Anlage (oder vergleichbar) bauen.
- Andere Technologieanbieter bieten in diesem Skalenbereich keine Pyrolyseanlagen mit Wasserdampfaktivierung zur Herstellung von biogenen Aktivkohlen an.

B) Zweistufig: Aktivierung nach vorher erfolgter Pyrolyse

- Es existieren nur noch wenige verbleibende Aktivierungsanlagen der klassischen Aktivkohle-Industrie in Deutschland bzw. Europa, da die Produktion weitgehend ausgelagert wurde. Die verbleibenden Anlagen werden noch zur Reaktivierung von beladener Kornaktivkohle eingesetzt und eignen sich grundsätzlich nicht für die Herstellung biogener Aktivkohlen. So benötigen diese Technologien ein möglichst homogenes (u.a. Dichte und Körnung) Material, wohingegen Pflanzenkohle insbesondere hinsichtlich der Korngrößenverteilung sehr heterogen (kleine und große Partikel) ist. Neben solch technischen Herausforderungen, gab es auch aufgrund von industriellen Dimensionen keine realistische Chance für die Aktivierung einer relativ kleinen Menge von ca. 12 t Pflanzenkohle zur Erzeugung von ca. 6 t Aktivkohle (Annahme: 50 % Abbrand) mit einer Reaktivierungsanlage.
- Andere Hochtemperatur-Technologie abseits der Kohle-Branchen: in Deutschland werden verschiedene Öfen/Reaktoren gebaut und auch betrieben, mit welchen theoretisch eine Aktivierung von (Pflanzen-)Kohle möglich gewesen wäre. Diese werden jedoch in hochpreisige Industrien wie beispielsweise der Batterie(-material)-entwicklung, welche hochreine Materialien (ppm-Bereich) in ebenso definierten Größen und Temperaturbereichen erfordert, eingesetzt. Entsprechend wäre auch hier eine Aufbereitung der Pflanzenkohle vor der Aktivierung erforderlich gewesen, was in Summe den finanziellen Rahmen des CoAct-Vorhabens überstiegen hätte.

5.2.2 Biogene Aktivkohle der Firma AdFiS

Da die ursprünglich geplante Herstellung von biogenen Aktivkohlen auf Basis von Restbiomassen für den Praxisversuch nicht erfolgen konnte, wurde auf die pflanzliche Aktivkohle der Firma AdFiS products GmbH (AdFiS) zurückgegriffen.

Die Firma AdFiS stellt in Teterow eine dotierte Aktivkohle zur Entschwefelung & Reinigung von technischen Gasen her. Ausgangsstoff ist eine Pflanzenkohle aus Buchenholz, welche nach einer Zerkleinerung unter Zugabe von Zuckerrüben-Melasse als Bindemittel und einer Kalium-Verbindung zu Pellets gepresst wird. In einem zweistufigen Verfahren werden die Pellets erst bei 400 °C erneut karbonisiert und anschließend bei 900 °C mit Wasserdampf aktiviert. Mit der Herstellung von Formaktivkohlen aus reiner Holzkohle nimmt AdFiS eine Sonderstellung in Deutschland ein. Auch wenn die Aktivkohle eigentlich nicht für die Abwasserreinigung entwickelt wurde, so lässt sich der Prozess (Pflanzenkohle → Mahlen → Bindemittel → Pelletieren → Karbonisieren → Aktivieren) von AdFiS auch auf Pflanzenkohlen aus Restbiomassen anwenden. Somit eignet sich die AdFiS-Aktivkohle zur

grundsätzlichen Überprüfung, der Eignung von biogenen Formaktivkohlen und deren Herstellungsprozess für die Entfernung von organischen Mikroschadstoffen aus Abwasser.

Zum Einsatz auf der Kläranlage kam das abgesiebte Unterkorn (< 1,6 mm), welches bei der Herstellung von Formaktivkohlen übrigbleibt. Für die Verwendung als PAK auf der Kläranlage wurde noch eine vorherige Vermahlung durchgeführt auf die Zielkorngröße mit einem Median von 22 µm.

5.2.3 Messkampagnen auf der Kläranlage

Der AZV Kressbronn-Langenargen wurde vom BSK mit der Durchführung des CoAct-Praxisversuchs beauftragt. Für die zwei Messkampagnen mit jeweils unterschiedlicher Aktivkohledosierung (vgl. Tabelle 7) stand der AZV in regelmäßigen Austausch mit den Verbundpartnern – insbesondere mit der Universität Kassel und dem TZW. Mit fünf Probenahmestellen verteilt über die Kläranlage (vgl. Abbildung 23) wurde ein sehr gründliches Monitoring der Spurenstoffkonzentrationen durchgeführt.

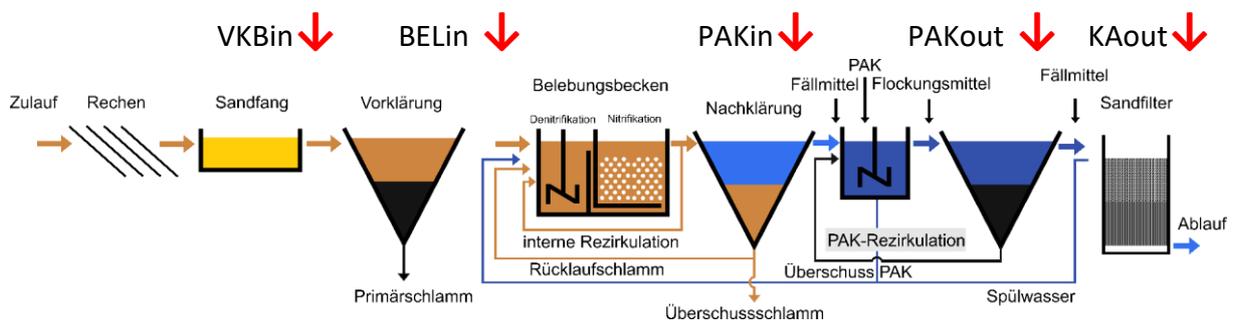


Abbildung 23: Schematische Darstellung der Kläranlage in Kressbronn mit fünf Probenahmestellen (↓) für die CoAct-Messkampagnen.

Die erste Messkampagne (insgesamt 9 Messtage) zum „Status Quo“ wurde mit der vor Ort eingesetzten, fossilen Aktivkohle Carbotech SR880 mit einer Dosierung von 7 mg/L durchgeführt. Die Dosierung erfolgte durch die festinstallierte Dosieranlage der Firma Schaub Umwelttechnik GmbH (Schaub). Für die Dosierung der biogenen Aktivkohle kam im Praxisversuch eine mobile Dosieranlage von Schaub zum Einsatz, welche das bestehende Hochsilo & Dosiersystem zeitweilig ersetzte (vgl. Abbildung 24). Dabei wurde konservativ mit 20 mg/L dosiert, um die erforderliche Spurenstoffelimination im Praxisversuch trotz Einsatz einer neuartigen Aktivkohle weiterhin zu gewährleisten.



Abbildung 24: PAK-Stufe auf der Kläranlage in Kressbronn. Zusätzlich ist die mobile Dosierungsanlage (Container rechts) sowie die biogene Aktivkohle (Bigbags links) zu sehen. (Foto: Universität Kassel)

Bei den beiden durchgeführten Messkampagnen dominierten leider unterschiedliche Witterungsbedingungen, was einen direkten Vergleich der Ergebnisse erschwert. Während bei der Kampagne mit der Referenzaktivkohle überwiegend Trockenwetterabfluss im Einzugsgebiet Kressbronn-Langenargen herrschte, überwog bei der Kampagne mit der biogenen Aktivkohle aufgrund erhöhtem Niederschlag der Niederschlagsabfluss (Abbildung 25). Entsprechend konnten hier nur Werte von 7 aus 16 erfolgten Messtagen zur gültigen Berechnung der Spurenstoffelimination (nach KomS-Handlungsempfehlung) herangezogen werden.

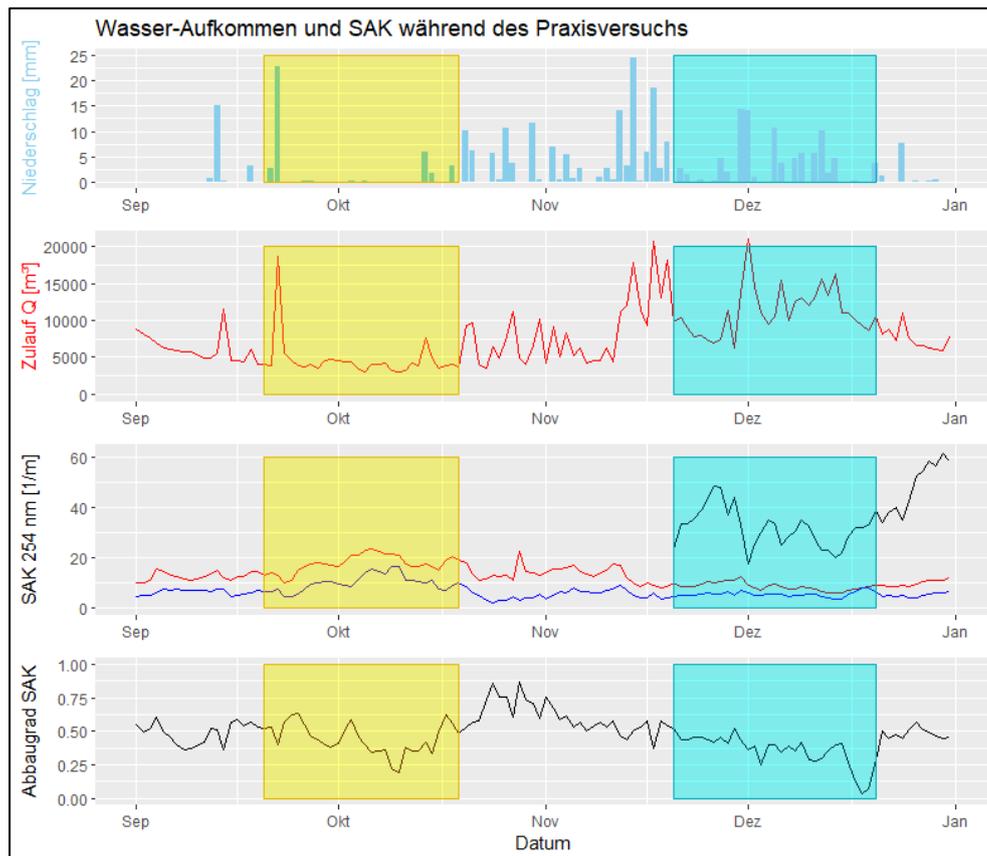


Abbildung 25: Wasser-Aufkommen an der Kläranlage in Kressbronn im Herbst/Winter 2023 und SAK(254)-Monitoring. Die eingefärbten Bereiche kennzeichnen die Zeiträume des Praxisversuches: die Aufnahme des „Status Quo“ mit fossiler Aktivkohle erfolgte überwiegend bei Trockenwetterabfluss (gelb) während die Messkampagne mit biogener Aktivkohle durch häufigen Niederschlagsabfluss geprägt war (blau). SAK254-Werte im Zulauf (rot) und Ablauf (blau) der PAK-Stufe, sowie im Zulauf zur Belebung (schwarz).

5.2.4 Ergebnisse des Praxisversuches

Aufgrund des unterschiedlichen Wasseraufkommens während des Praxisversuches traten grundsätzlich unterschiedlichen Spurenstoffkonzentrationen im Abwasser auf. Im zweiten Beprobungszeitraum, während die biogene Aktivkohle mit der mobilen Dosierungsanlage eingesetzt wurde, kam es zum Verdünnungseffekt: durch die größere Menge Wasser wurden die grundsätzlich vorhandenen Spurenstofffrachten verdünnt. Trotzdem konnten in beiden Messkampagnen ausreichend gültige Daten erhoben werden.

Der Verdünnungseffekt spiegelt sich in der Auftragung für einzelne Spurenstoffe je Messpunkt auf der Kläranlage wider. Am Beispiel von Diclofenac (einem Schmerzmittel mit ökotoxikologischer Wirkung) ist zu erkennen, dass die mittlere Konzentration im Zulauf zur Kläranlage (VKBin) beim „Status Quo“ mehr als 3x so hoch war, wie bei den späteren Messungen mit Einsatz der biogenen Aktivkohle (vgl. Abbildung 26). Ebenfalls zu sehen ist die erfolgreiche Spurenstoffelimination nach Durchlaufen der PAK-Stufe (PAKout), sowohl bei Nutzung der fossilen, als auch der biogenen Aktivkohle.

Die Eliminationsleistungen wurden entsprechend der KomS-Handlungsempfehlungen zur gezielten Spurenstoffelimination berechnet (KomS BW 2018). In Abbildung 27 sind sie dargestellt für die Spurenstoffliste B-2017 des KomS (sofern gültige Minimalkonzentrationen gemessen werden konnten).

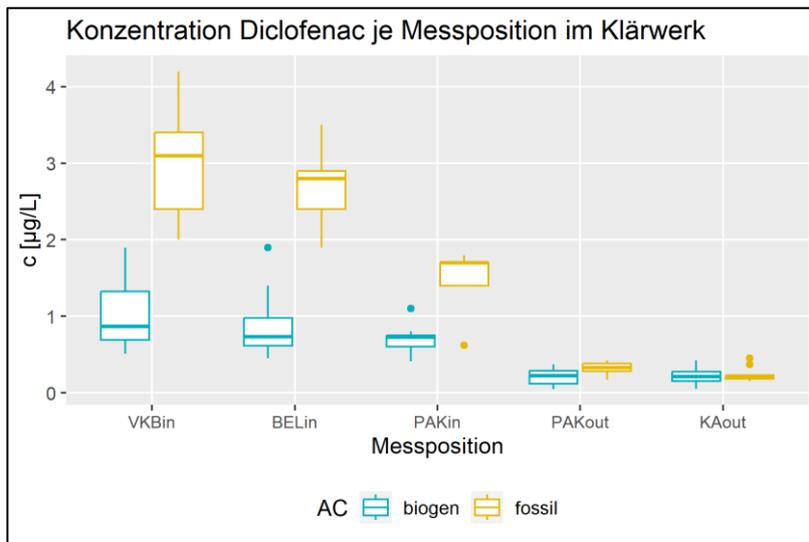


Abbildung 26: Boxplots der gemessenen Konzentrationen von Diclofenac auf der Kläranlage in Kressbronn, jeweils für die Messkampagnen mit biogener (blau) und fossiler (gelb) Aktivkohle. Messpositionen auf der Kläranlage:
 - Zulauf Vorklärbecken (VKBin)
 - Zulauf Belebungsbecken (BELin)
 - Zulauf PAK-Stufe (PAKin)
 - Ablauf PAK-Stufe (PAKout)
 - Ablauf Kläranlage (KAout).

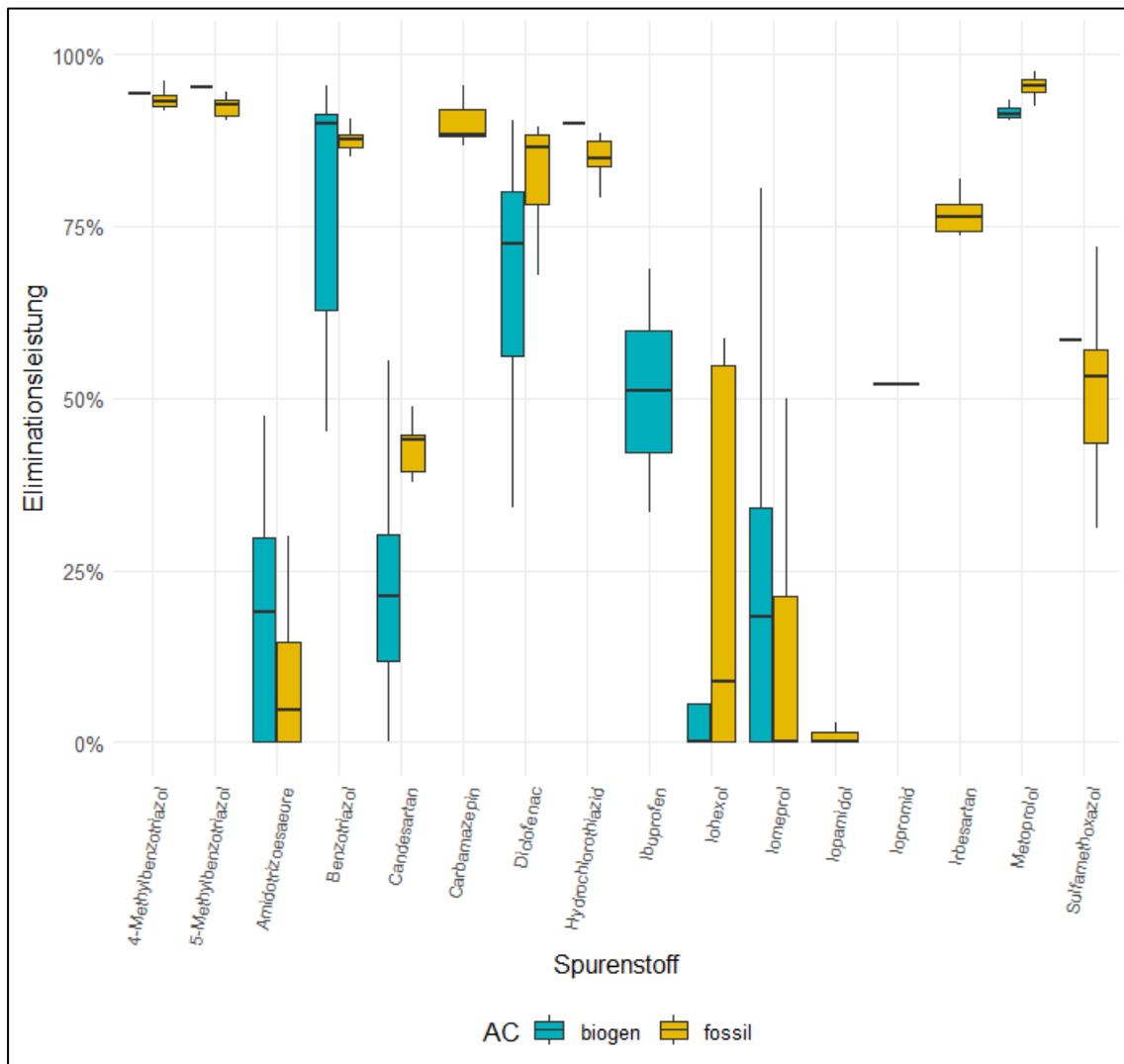


Abbildung 27: Direkter Vergleich der Eliminationsleistung der beprobten Aktivkohlen (AC) im Praxisbetrieb auf der Kläranlage jeweils für alle Spurenstoffe der KomS-B-Liste inklusive Röntgenkontrastmittel.

Aus den einzelnen Eliminationsleistungen wird ersichtlich, dass sich verschiedene Spurenstoffe unterschiedlich erfolgreich aus dem Abwasser adsorptiv entfernen ließen – unabhängig ob fossile oder biogene Aktivkohle eingesetzt wurde. Um die Spurenstoffelimination einer Kläranlage generell bewerten zu können, werden die Werte der folgenden Spurenstoffe herangezogen und gemittelt: Carbamazepin, Diclofenac, Hydrochlorothiazid, Irbesartan, Metoprolol, Benzotriazol, Σ -4- und 5-Methylbenzotriazol.

„Das Spurenstoffeliminationsverfahren ist so zu betreiben, dass die Kläranlage an Tagen mit Abflüssen von maximal $Q_{Spur,max}$ im Mittel eine Spurenstoffeliminationsleistung von mindestens 80 % aufweist.“ (Koms BW 2018)

Tabelle 7: Gemittelte Eliminationsraten (berechnet nach KomS Handlungsempfehlung) je Messkampagne & Aktivkohle mit gemitteltem Wasser-Aufkommen. *Es wurden nur 7 Messtage berücksichtigt (von 16 erfolgten), an denen der Abfluss zur Kläranlage $Q_{Spur,max}$ (für Kressbronn: 138 L/s) nicht überschritten wurde.

Aktivkohle [Dosierung]	Zeitraum	Mittlere Spurenstoffelimination	Mittelw. Tagesablauf zur KA [m ³]	Mittelw. max. Trockenwetterabfluss $Q_{inv\ 15-60, max}$ [L/s]
------------------------	----------	---------------------------------	---	--

fossil [7 mg/L]	20.09.- 19.10.2023	87.3%	4494	51
biogen [20 mg/L]	20.11.- 20.12.2023	82.4%*	8834*	107*

Die biogene Aktivkohle zeigte unter den gegebenen Rahmenbedingungen (höhere Dosierung, verdünnte Spurenstoffkonzentrationen) eine etwas geringere Leistungsfähigkeit als die fossile Aktivkohle. Es konnte aber in dem mehrwöchigen Pilotversuch demonstriert werden, dass eine ausreichend hohe Reinigungsleistung erreicht werden kann. Für eine abschließende Beurteilung, welche Dosierung der biogenen Aktivkohle erforderlich ist, um vergleichbare Reinigungsleistungen wie mit der fossilen PAK zu erzielen, müssen jedoch weitere Untersuchungen unter vergleichbaren Praxisbedingungen erfolgen.

Zusammenfassend ist der Praxisversuch als ein großer Erfolg zu werten, er lieferte wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der weiteren Entwicklung des CoAct-Ansatzes und der praktischen Umsetzung:

- Die zweistufige **Aktivierungstechnologie** der Firma AdFiS eignet sich grundsätzlich zur Herstellung von biogenen Aktivkohlen für die Spurenstoffelimination von kommunalem Abwasser.
- Es ist davon auszugehen, dass durch eine Optimierung des Prozesses (u.a. Aktivierungsbedingungen) zur gezielten Herstellung biogener Aktivkohlen für die Abwasserreinigung (anstatt Gasreinigung) die Leistungsfähigkeit der Aktivkohle deutlich verbessert werden kann.
- Das AdFiS-Verfahren stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Herstellung von biogenen Aktivkohlen aus dezentral erzeugten Karbonisaten aus Restbiomassen dar. Eine Validierung des Prozesses mit Pflanzenkohle aus Restbiomassen sollte daher erfolgen.

6. Ökonomische Analyse und Governance

Das CoAct-Konzept geht auf unterschiedliche Herausforderungen nachhaltiger Entwicklung ein, wobei Restbiomassen einer hochwertigen Nutzung zugeführt und gleichzeitig eine sozial und ökologisch hochwertige, regionale Quelle an Aktivkohlen erschlossen wird, die in der vierten Reinigungsstufe von Kläranlagen eingesetzt werden können. Zur Bewertung der Potenziale dieses Ansatzes für eine nachhaltige Entwicklung werden hier zunächst Kosten der Anlage und Erlöse durch Aktivkohlen und Energie gegenübergestellt. Anschließend werden Aspekte diskutiert, wie der Betrieb einer CoAct-Anlage regional verankert werden kann. Dabei wird sowohl auf Kooperationen als auch auf Betreibermodelle eingegangen. Anschließend wird die Nachhaltigkeit dieser Infrastruktur auf Basis von zwei standardisierten Bewertungssystemen eingeordnet. Das Kapitel schließt mit einer Gesamtbewertung der Ökonomie und Governance sowie Empfehlungen zur Übertragbarkeit.

Dem vorausgestellt wird darauf hingewiesen, dass es in Deutschland einige Hersteller von Pyrolyseanlagen gibt. Darüber hinaus gibt es mit der Firma AdFiS (vgl. Absatz 5.2.2) einen Hersteller von Aktivkohlepellets auf Holzkohlebasis. Insbesondere für die Aktivierung von Pflanzenkohlen aus krautigen Biomassen kann jedoch nicht auf existierende Anlagentechnik zurückgegriffen werden, die für die Herstellung fossiler Aktivkohlen genutzt wird, beispielsweise aufgrund der geringeren Dichte der Pflanzenkohlen. Demnach existiert bislang noch keine großtechnische Pyrolyseanlage mit Aktivierung für krautige Restbiomassen (vgl. Absatz 5.2.1).

Die ökonomische Betrachtung des CoAct-Konzepts erfolgt somit basierend auf den Annahmen der im Vorhaben beteiligten Ingenieurbüros. Diese haben das Technikkonzept ausgearbeitet und im Laufe des Vorhabens unter Berücksichtigung von immer mehr Details insbesondere für den potenziellen Anlagenstandort Kläranlage Kressbronn verfeinert. Dabei weichen die Umsetzungskonzepte der Büros hinsichtlich der Kostenschätzung, aber auch in Bezug auf die Anpassung an den Standort teilweise deutlich voneinander ab. Entsprechend weichen auch die Kostenkalkulationen teilweise erheblich voneinander ab. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Planungen a) in unterschiedlichen Projektphasen erfolgte, b) teilweise verschiedene Umsetzungsvarianten verfolgt wurden und c) sowohl das TRL Level des großtechnischen IFBB-Verfahrens mit 7 und das der dezentralen Aktivkohleherstellung mit 4-5 anzusetzen ist. Vor diesem Hintergrund gibt die ökonomische Betrachtung wertvolle Hinweise bezüglich zentraler Kosten und Erlösmöglichkeiten. Sie verdeutlicht auch die signifikanten Synergiepotenziale des CoAct-Ansatzes mit anderen Anlagenstandorten wie die erwähnte Kläranlage oder Biogasanlagenstandorte sowie Entsorgungszentren. Die Ausführungen können jedoch nicht als finale Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verstanden werden, sondern geben Hinweise zur Einordnung potenzieller Realisierungskosten. Diesen gegenüber stehen gesellschaftliche Fragestellungen, wie die Verlässlichkeit der Aktivkohleversorgung oder der Bereitstellung von Fördermitteln für den Bau von CoAct-Anlagen als Baustein hin zu einer klimaneutralen Kläranlage.

6.1 Das CoAct-Kalkulationstool

Um die ökonomischen Dimensionen der CoAct-Anlage mit allen bisher identifizierten Gewinn- und Kostenpositionen abbilden zu können, haben das ifeu, Krieg & Fischer und das IfLS gemeinsam ein „Excel-Tool“ pro Anlagenvariante mit zwei im Vorhaben präferierten Biomassemixen entwickelt.

Im CoAct-Kalkulationstool können die jeweiligen Aufwendungen für Energie, Druckluft und Biomasseankauf sowie Erlöse für überschüssige Energie und Aktivkohle variabel für die gewählte Anlagenkonfiguration eingegeben werden. Hinzukommend sind im „Excel-Tool“ Annahmen zu den Investitionskosten, Fixkosten wie Abschreibung, Kapitaldienst, Personal, Buchhaltung, Wartung und

Instandhaltung und Versicherung hinterlegt. Beim Kapitaldienst ist eine Eingabe des Zinssatzes, des Disagios und der Kreditlaufzeit möglich.

Das Ergebnis des „CoAct-Kalkulationstools“ ist eine Gewinn- und Verlustrechnung (GuV), in der alle jährlichen Erlöse und Aufwendungen gegengerechnet werden. Die Investitionskosten werden in der GuV über den Kapitaldienst und die Abschreibungen berücksichtigt. Schlussendlich bietet das „Excel-Kalkulationstool“ je nach Aktualität und Detailtiefe der Daten eine solide Orientierung für die Wirtschaftlichkeit einer geplanten CoAct-Anlage.

Das Excel-Tool sollte insbesondere dazu dienen, die potenziellen Wertschöpfungsketten bezogen auf einzelne verwendbare Biomassen ökonomisch abzubilden. Um aber eine sich stetig ändernde Biomassenzusammensetzung im Laufe eines Jahres abzubilden bzw. die Abfolge verschiedener Biomassen darzustellen, sollte ein flexibleres Tool genutzt werden, das auch Engpässe (z.B. in Produktions-, Lagerkapazitäten, Maschinenauslastungen) berücksichtigen kann.

Grundsätzlich ist es möglich, ein solches Planungstool mit linearer Programmierung zu erstellen. Hier wäre auch die Überwachung von Engpässen möglich. Das betrifft zum einen die Kapazitätsauslastungen der IFBB- und Pyrolyse-Anlage. Wenn beispielsweise in verschiedenen Jahreszeiten bestimmte Biomassen vermehrt anfallen, müssen die entsprechenden Lagerkapazitäten (z.B. Hochsilo) vorhanden sein, um die IFBB- und Pyrolyse-Anlage auslasten zu können. Andererseits müssen bei einem Überangebot von Biomasse auch die maximalen Auslastungskapazitäten der CoAct-Anlage berücksichtigt werden. Selbst Kapazitätsengpässe innerhalb des Verarbeitungsprozesses, z.B. hinsichtlich der Mengen, die ein Magnetabscheider oder Häcksler maximal pro Tag verarbeiten können, könnten miteinbezogen werden.

Für die spätere Umsetzung in der Praxis kann ein solches Tool bei der Planung helfen, aber dafür sind dann grundsätzlich auch Programme für die Fertigung, Prozessautomatisierung und -optimierung als Software erwerbbar. Diese müssen dann entsprechend an den Fertigungsprozess von einem Dienstleister angepasst werden. Die Auswahl der passenden Software und des passenden Anbieters muss von einem Ingenieurbüro unterstützt werden.

6.2 Vergleich der Wirtschaftlichkeit von CoAct-Anlagenvarianten

6.2.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten sind der größte Dreh- und Angelpunkt für die Wirtschaftlichkeit einer CoAct-Anlage, wie im Folgenden gezeigt wird. Wie die untenstehende

Tabelle 8 zeigt, ist es sinnvoll eine CoAct-Anlage an bereits bestehende Infrastrukturen, wie zum Beispiel eine Kläranlage oder Biogasanlage, anzuschließen (vgl. Absatz 5.1). Durch die Nutzung vorhandener Infrastrukturen und Ressourcen, wie das Klärwasser oder den Fermenter, ergeben sich Synergieeffekte und geringere Investitionskosten als beim Bau einer CoAct-Anlage auf der „grünen Wiese“. Die niedrigsten Investitionskosten liegen bei einer ausschließlichen Verwendung von holzigen Biomassen. Hier fallen die Kosten für das IFBB-Verfahren zur Aufbereitung grasartiger und krautiger Biomassen weg.

Tabelle 8: Vergleich der Investitionskosten einer CoAct-Anlage

Standortvarianten	Grüne Wiese (mit IFBB-Modul und Hochsilo)	Kläranlage (mit IFBB-Modul und Hochsilo)	Entsorgungszentrum (Ohne IFBB-Modul)
Investitionssumme	9.008.158 EUR	7.577.935 EUR	5.344.135 EUR

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Von der Höhe der Investitionskosten sind auch die Fixkosten betroffen, da die Investitionskosten mit der Abschreibung und dem Kapitaldienst in die Fixkosten einfließen. Darauf wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

6.2.2 Aufwendungen

In den Aufwendungen sind Abschreibungen, Personalaufwand, Dieserverbrauch, Aufwendungen für Strom, Wärme, Wasser, Druckluft und Ankauf holziger Biomasse sowie sonstige Aufwendungen enthalten.

Die jährliche Nutzungsdauer für die entsprechenden Anlagengüter wurde den aktuellen AfA-Tabellen des Bundesfinanzministeriums entnommen und für die Pyrolyse von Björnsen Beratende Ingenieure (BCE) zur Verfügung gestellt. Genutzt wurden neben der Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagengüter auch die Tabellen für Abfallentsorgungs- und Recyclingwirtschaft, den Wirtschaftszweig „Energie- und Wasserversorgung“ und für Landwirtschaft und Tierzucht. Die Nutzungsdauer für Anlagengüter, die in einer Sammelposition zusammengefasst sind, wurde anhand einer durchschnittlichen Nutzungsdauer näherungsweise geschätzt.

Der jährliche Personalaufwand wurde für 1,5 Vollzeit-Arbeitskraft angesetzt. Die sonstigen Aufwendungen enthalten den Kapitaldienst, Kosten für Wartung und Instandhaltung, Versicherung und Buchhaltung. Beim Kapitaldienst wurde von einer 50% Finanzierung sowie einem Zinssatz von sechs Prozent und einer Kreditlaufzeit von zehn Jahren ausgegangen. Die Kreditlaufzeit orientiert sich dabei an der Abschreibungsdauer der Anlagen. Den größten Betrag innerhalb der sonstigen Aufwendungen stellt der Kapitaldienst dar, gefolgt von den Kosten für die Wartung und Instandhaltung der Anlagen. Einen Vergleich der Aufwendungen für die verschiedenen Standortoptionen findet sich im *CoAct Bericht - Teilbereich ökonomische Analyse und Governance* (Mathias et al. 2024).

6.2.3 Erträge

Erträge werden aus dem Verkauf von Aktivkohle, Strom und Wärme erzielt. Als Marktpreis für den Verkauf der Aktivkohle pro Tonne wurde für die vorliegende Kalkulation 2.000 EUR / t festgelegt. Dieser Wert wurde in Anlehnung an den von einem Akteur in der Region genannten aktuellen Preis gewählt, der von ihm aktuell für eine Tonne Pulveraktivkohle bezahlt wird. Aus Literaturangaben und nach Angaben von Experten haben die Marktpreise eine relativ hohe Preisspanne (von ca. 1.200 EUR / t bis hin zu 4.000 EUR / t). Hier gibt es allerdings auch Unterschiede zwischen granulierter Aktivkohle und Pulveraktivkohle zu beachten. Letztere ist tendenziell etwas teurer als die granulierten Kohle. Nicht beachtet wurde für diese Kalkulation die Möglichkeit, eines Preisaufschlags für die nachhaltige Erzeugung. Inwieweit ein höherer Preis für nachhaltige Produktion am Markt bei gleicher Reinigungsleistung erzielbar ist, ist zum jetzigen Zeitpunkt schwer bezifferbar. Jedoch deuten

Einzelangaben von Akteuren aus der Region darauf hin, dass es eine Bereitschaft gibt, einen höheren Preis zu bezahlen.

Wird nach Abzug des anlageninternen Stromverbrauchs ein Überschuss an Energie erzeugt, kann dieser in das Stromnetz eingespeist werden. Ähnlich ist es bei Wärme: wird nach Abzug des anlageninternen Wärmeverbrauchs ein Überschuss an Wärmeenergie erzeugt, kann dieser in ein Nahwärmenetz eingespeist werden. Kombiniert mit anderen Anlagen, wie einer Kläranlage oder einem Entsorgungszentrum entstehen die größten Synergien, wenn Strom und Wärme in anderen Prozessen selbst genutzt werden können und den Bezug von Energie reduzieren. Im Fall von Wärme müsste sonst zusätzlich ein Nahwärmenetzanschluss vorhanden sein bzw. würden die Anschlusskosten die Erträge reduzieren.

Je nach Biomasse ist die Erhebung von Gebühren für die Abnahme durch die CoAct-Anlage denkbar. Beispielsweise wird für die Abnahme von Streuwiesenschnitt im Status Quo bereits eine Entschädigung von vier bis fünf EUR / m³ an die abnehmenden Landwirtinnen und Landwirte gezahlt. Die Entscheidung darüber ist allerdings auch eine politische, daher bleiben die Abgabegebühren in der vorliegenden Kalkulation unberücksichtigt.

6.2.4 Gewinn- und Verlustrechnung

Beim Vergleich der GuV der drei Standortvarianten (siehe

Tabelle 9) wird deutlich, dass eine CoAct-Anlage ohne IFBB-Verfahren aufgrund von niedrigeren Investitionskosten, Abschreibung, Kapitaldienst sowie Strombedarf, die geringsten Kosten verursacht. Die Zahlen in

Tabelle 9 beziehen sich auf eine jährliche Aktivkohleproduktion von etwa 100 Tonnen und basieren u.a. auf Angaben von zwei Ingenieurbüros. Dabei wird die im Projekt aktuellste Planung für die Standortvariante Kläranlage zugrunde gelegt und ausgehend davon Anlagenkomponenten ergänzt oder ausgelassen, um diese an Anforderungen der zwei Vergleichsstandorte „grüne Wiese“ und „Entsorgungszentrum“ anzupassen.

Tabelle 9: Vergleich der GuV verschiedener Standortvarianten bezogen auf etwa 100 t Aktivkohle

GuV	Grüne Wiese (mit IFBB-Modul und Hochsilo)	Kläranlage Kressbronn (mit IFBB-Modul und Hochsilo)	Entsorgungszentrum (Ohne IFBB-Modul)
100 t Aktivkohle	210.000 EUR	210.000 EUR	210.000 EUR
Erlös Stromeinspeisung	40.200 EUR	40.200 EUR	40.200 EUR
Erlös Wärmeeinspeisung	137.440 EUR	138.544 EUR	137.440 EUR
Ersparnis Brenntag	-	9.455 EUR	-
Summe Erlöse	387.640 EUR	398.199 EUR	387.640 EUR
Personalaufwand	75.000 EUR	75.000 EUR	50.000 EUR

Abschreibungen	730.274 EUR	612.114 EUR	398.170 EUR
Sonstige Aufwendungen	864.990 EUR	730.109 EUR	529.667 EUR
Aufwendungen für Strom	128.793 EUR	126.101 EUR	110.025 EUR
Druckluft	4.605 EUR	4.605 EUR	4.605 EUR
Biomasseankauf	20.600 EUR	20.600 EUR	25.000 EUR
Wasser	3440 EUR	-	-
Summe Aufwände	1.827.703 EUR	1.568.530 EUR	1.117.467 EUR
Ergebnis Total	-1.440.063 EUR	-1.170.331 EUR	-729.827 EUR

Quelle: Krieg & Fischer, Björnsen Beratende Ingenieure, Ifeu, eigene Berechnung und Darstellung

Der Personalaufwand ist für die Standortvariante Entsorgungszentrum (EZ) geringer, da hier keine Arbeitszeit für die Aufbereitung der Biomassen und die Betreuung des IFBB-Verfahrens erforderlich ist. Die Abschreibungen fallen entsprechend der Investitionssummen in

Tabelle 8 aus. Analog zu den Abschreibungen verteilen sich auch die sonstigen Aufwendungen auf die Standortvarianten, da der größte Teil der sonstigen Aufwendungen aus dem Kapitaldienst besteht, gefolgt von den Wartungskosten, die sich zum Teil auch an der jeweiligen Investitionssumme orientieren. Der unterschiedliche Strombedarf resultiert daraus, dass der Strombedarf des IFBB-Verfahrens, des Faulturms und des Hochsilos bei der Variante EZ entfällt. Für EZ ohne IFBB-Anlage ergeben sich leicht erhöhte Einkaufskosten für die Biomasse, da hier mehr Holz und keine grasartige Biomasse zum Einsatz kommt.

Wie die Ergebnisse dieser Gewinn- und Verlustrechnungen zeigen, ist die Konkurrenzfähigkeit einer CoAct-Aktivkohle im Vergleich zu fossilen Aktivkohlen aktuell noch nicht gegeben.

6.3 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, welche Auswirkungen veränderte Aktivkohle- und Strompreise sowie Zinssätze auf die Rentabilität einer CoAct-Anlage haben. In den Szenarien zeigt sich, dass je nach Standortvariante zu unterschiedlichen Aktivkohlepreisen wirtschaftlich produziert werden kann: Entsorgungszentren ohne IFBB-Verfahren ab 9.000 EUR / t Aktivkohle, Kläranlage ab 13.000 EUR / t Aktivkohle und auf der grünen Wiese ab 15.000 EUR / t Aktivkohle.

Bei den Szenarien mit veränderten Zinssätzen ließ sich beobachten, dass das Ergebnis der GuV auch bei einem sehr niedrigen Zinssatz (< 2%) nicht in einem wirtschaftlichen Bereich liegen würde. Folglich sind die Zinsen weniger ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit einer CoAct-Anlage, sondern vielmehr die Höhe der Investitionssumme und der damit verbundene Kapitaldienst.

Bezüglich der Szenarien mit unterschiedlichen Strompreisen tragen, wie erwartet, steigende Strompreise zu einem stetig schlechter werdenden Ergebnis der GuV und zu steigenden variablen Kosten bei.

Zusammenfassend ist erkennbar, dass der Betrieb einer CoAct-Anlage umso rentabler ist, je geringer die Investitionskosten gehalten werden können. In Bezug auf die Gesamtkosten spielen die variablen Kosten und hier insbesondere die Stromkosten eine untergeordnete Rolle. Letzteres macht maximal zehn Prozent der Gesamtkosten aus. Folglich kann eher ein Anstieg der variablen Kosten in Kauf genommen werden als ein Anstieg der Investitionskosten.

6.4 Regionale Governance und Betreibermodelle

Der Technik-Ansatz von CoAct sieht die Kooperation einer Vielzahl von Akteursgruppen vor. So ergeben sich zentrale Synergien dann, wenn

- Biomassen aus der Landschaftspflege einer hochwertigen Verwertung zugeführt werden können,
- die Aktivkohlen in regionalen Kläranlagen zum Einsatz kommen und
- der Presssaft aus dem IFBB-Verfahren am Produktionsort verwertet werden kann (z. B. als Kohlenstoffzugabe im Klärprozess oder energetisch in einem Fermenter/Faulturm) sowie
- die Wärme in ein Nahwärmenetz eingespeist werden kann.

Synergien ergeben sich somit an Standorten, an denen Biomassen verarbeitet werden. Dazu zählen Wertstoffhöfe, Kompostwerke etc. Denkbar sind Biogasanlagen, da dort ebenfalls Biomassen verarbeitet werden und das Prozesswasser aus dem IFBB-Verfahren energetisch verwertet werden kann. Darüber hinaus sind insbesondere Kläranlagen geeignet, da diese das Prozesswasser als Kohlenstoffquelle und die Aktivkohlen in der vierten Reinigungsstufe einsetzen können.

Häufig werden Kooperationen im Bereich der öffentlichen Infrastruktur und Daseinsvorsorge nie nur aus rein wirtschaftlichen Überlegungen eingegangen (Schramm et al. 2023). Vielmehr spielen auch kommunalpolitische oder gesellschaftliche Momente eine Rolle. Im Falle von CoAct werden Restbiomassen einer höherwertigen Verwertung zugeführt. Da fossile Aktivkohle ersetzt werden kann, spielen zudem die Themen Klimawandel und Versorgungssicherheit durch die so zu erschließende regionale Versorgungsquelle als Motiv für den Bau und Betrieb einer CoAct-Anlage eine Rolle.

Genauso wie bei der Wahl der Kooperationsform geht es bei der Wahl des Betreibermodells darum, die Form der Einbindung und Steuerungsmechanismen zu definieren. Während Kooperationsformen meist leichter aufgelöst werden können, werden mit dem gemeinsamen Betrieb einer CoAct-Anlage unternehmerische Risiken auf die beteiligten Akteure verteilt. Bei der Entwicklung eines CoAct-Konzepts empfiehlt es sich zu prüfen, welche Akteure sich an dem Betrieb beteiligen möchten und welche in Form von Kooperationen eingebunden werden. Die unterschiedlichen Organisationsformen und organisatorischen Aspekte für Betreibermodelle sind in Mathias et al. (2024) dargestellt. Wichtig ist, zwischen dem Eigentümer und Betreiber der Anlage zu unterscheiden. Daraus ergeben sich eine Vielzahl an Möglichkeiten den Bau, Betrieb und Übertragung des Eigentumsrechts der fertiggestellten Anlage flexibel zu handhaben.

Das organisatorische Potenzial liegt in neuen Geschäftsmodellen für die Betreiber von Biogasanlagen, Wertstoffhöfen und Kläranlagen und eine sektorübergreifende, partizipative Entwicklung neuer Wertschöpfungsnetzwerke in Stadt-Land-Partnerschaften oder innerhalb einer Region. Hier empfiehlt es sich, ein Kommunikationskonzept zu entwickeln, um alle Betroffenen einzubinden, auch die, denen Biomassen nun nicht mehr oder nicht mehr im bisherigen Maße zur Verfügung stehen. Idealerweise

werden zudem Investitionskonzepte aufeinander abgestimmt und diese in Betreiber- und Kooperationsmodellen institutionalisiert.

Letztendlich sollte das Betreibermodell Projektrisiken möglichst gut reduzieren und verteilen. Dazu zählen Risiken wie die im Zuge der Finanzierung (Projektentwickler, Projektpartner, Bank) entstehen können, Risiken des Betriebs (technischer und kaufmännischer Betreiber), Verkaufsrisiken (Abnehmer der Aktivkohle), Fertigstellungsrisiken (Bauunternehmer) und Beschaffungsrisiken (Biomasselieferanten). Um auf diese Risiken vorbeugend zu reagieren, empfiehlt sich eine gut überlegte Wahl der Gesellschaftsform bzw. des Beteiligungsmodells sowie des Betreibermodells. Kriterien für bzw. Vorteile bestimmter Betreibermodelle sowie Leitfragen für die Einengung von Betreibermodellen sind in Mathias et al. (2024) dargestellt. So plant in der Projektregion derzeit der Abwasserzweckverband den Bau und Betrieb der CoAct-Anlage in Eigenregie weiter zu verfolgen. Die Biomassebereitstellung wäre dagegen über kurz- und mittelfristige Abnahmebeziehungen zu Biomasselieferanten zu organisieren.

6.5 Potenziale für eine regionale nachhaltige Entwicklung

Die Potenziale für eine nachhaltige Entwicklung wurden auf Basis von zwei Ansätzen der Nachhaltigkeitsbewertung (NB) betrachtet. Erstens kam der kommunale Nachhaltigkeitscheck „NI-Check“ zum Einsatz, von der Landesanstalt für Umwelt in Baden-Württemberg entwickelt wurde (2019). Dieser Check ermöglicht eine ganzheitliche Bewertung der Auswirkungen eines Projekts, indem wirtschaftliche, soziale und ökologische Aspekte gleichermaßen berücksichtigt werden. Mit dem NI-Check wurde auf ein in der Projektregion bereits eingesetztes Tool zurückgegriffen, das mit den SDGs verknüpft wurde. Zusätzlich wurde das TRAFIS.NB-Tool genutzt (vgl. Olfert und Walther 2023). Dabei handelt es sich um einen Ansatz für die prozessbegleitende Nachhaltigkeitsbewertung von innovativen Infrastrukturlösungen des Umweltbundesamts. Dieser Ansatz legt besonderen Wert auf technische Aspekte im Bereich der Versorgungssicherheit, Ressourcenschonung und Nutzerorientierung. Beide Methoden ergänzen sich zu einem Gesamtbild, das einerseits Nachhaltigkeitsfragen auf regionaler Ebene wie Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit behandelt und andererseits auf Anlagenebene die Emissionen sowie die Möglichkeit eines Energieüberschusses in Betracht zieht. Eine detaillierte Darstellung der Methodik sowie Bewertungsergebnisse findet sich in Mathias et al. (2024).

Mit dem TRAFIS.NB-Tool wurden die Einschätzungen externer Stakeholder und Projektbeteiligter erfasst. Die Stärken des Ansatzes werden insbesondere in der Versorgungssicherheit mit regionalen Aktivkohlen und den Synergien durch die Integration der CoAct-Anlage in die Kläranlage gesehen. Zudem wird die Nutzung von Restbiomassen positiv bewertet. Insgesamt zeigt sich, dass die Beiträge zu den SDGs meist positiv oder neutral sind. Negativ zu bewerten sind im Rahmen beider Betrachtungen lediglich die hohen Kosten, die jedoch im Verhältnis nicht nur zum ökonomischen, sondern auch ökologischen und sozialen Nutzen sowie der Bedeutung für eine regionale, zuverlässige Aktivkohleversorgung gesehen werden müssen.

6.6 Ökonomische Gesamtbewertung des CoAct-Konzepts unter Berücksichtigung seiner Potenziale für eine nachhaltige, regionale Entwicklung

Mit der Novellierung der kommunalen Abwasserrichtlinie reagiert die EU auf die derzeitigen Herausforderungen der Abwasserreinigung. Diese bestehen einerseits in der Entfernung von Spurenstoffen, beispielsweise aus Medikamenten oder Kosmetika, sowie der Klimaneutralität der

Kläranlagen. Dazu soll die vierte Reinigungsstufe verpflichtend eingeführt werden. Darüber hinaus sieht der Entwurf der Novelle die Einführung der „erweiterten Herstellerverantwortung“ im Abwasserrecht vor. Damit werden die Hersteller animiert auf schwer abbaubare Spurenstoffe in ihren Produkten zu verzichten bzw. an den Kosten für die Abwasserbehandlung beteiligt (DWA 09.03.2023). Dies würde Kläranlagenbetreiber beim Bau und Betrieb einer vierten Reinigungsstufe unterstützen und das CoAct-Konzept attraktiv machen. Denn schon heute machen kalkulatorische Kosten wie Abschreibungen und Zinsen etwa die Hälfte der Kosten der Abwasserwirtschaft aus (DWA 25.06.2020). Die Kosten für die CoAct-Anlage wären somit weitere Vorhaltekosten für den Betrieb der vierten Reinigungsstufe. Gleichzeitig lassen Spurenstoffelimination und Phosphorrückgewinnung den Energieverbrauch von Kläranlagen weiter steigen. Mit dem CoAct-Ansatz können also Energieüberschüsse die Energiebilanz der Kläranlage verbessern und Betriebskosten senken.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Investitionskosten der größte Dreh- und Angelpunkt für die Wirtschaftlichkeit einer CoAct-Anlage sind. Damit verbunden sind die Fixkosten ebenfalls relevant für die Rentabilität einer CoAct-Anlage, da die Investitionskosten mit der Abschreibung und dem Kapitaldienst in diese einfließen. Den drittgrößten Anteil innerhalb der Fixkosten machen die Kosten für Wartung und Instandhaltung aus. Beim Vergleich der Investitionskosten der drei Standortvarianten schneidet die Variante Entsorgungszentrum am besten ab, da hier die Investitionskosten für das IFBB-Verfahren und das Biomasse-Silo entfallen. Die Variante Weiherberg hat ohne IFBB-Verfahren allerdings auch nicht mehr viel mit dem ursprünglichen CoAct-Konzept zu tun.

Wie die Darstellungen in Absatz 6.2.4 Gewinn- und Verlustrechnung zeigen, ist die Wirtschaftlichkeit einer CoAct-Anlage, wie hier konzipiert, aktuell noch nicht gegeben. Dennoch soll nachfolgend auf Aspekte verwiesen werden, die bei der Bewertung der vorliegenden Kalkulationen zu berücksichtigen sind. Die hier verwendeten Daten basieren auf den Planungen und zum Teil Schätzungen der beauftragten Ingenieurbüros und ergänzenden Annahmen aus Recherchen und Anfragen bei Anbietern. Zu Beginn und zum Ende der Projektlaufzeit wurden zwei Ingenieurbüros für die Planung und Kostendarstellung hinzugezogen. Das Resultat sind zum Teil sehr unterschiedliche Angaben zu den (Investitions-) Kosten. Hier zeigt sich einerseits, dass die Anforderungen eines bestimmten Standorts sich maßgeblich auf die Wirtschaftlichkeit auswirken und das derzeit die Teuerungsrate im Bausektor nicht zu unterschätzen ist. Die Spannbreite der Kostenabschätzungen ist in der nachfolgenden Tabelle 10 abgebildet.

Zwischen der ersten und der zweiten Kalkulation liegen etwa je Standort eine Differenz von drei bis dreieinhalb Millionen Euro. Dies ist ein erheblicher Unterschied und bei Betrachtung der vorgestellten ökonomischen Ergebnisse im Absatz 6.2 unbedingt zu beachten. Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnungen beruhen auf verschiedenen Angaben und Schätzungen von Ingenieurbüros und lassen sich nicht eins zu eins in der Realität abbilden. Folglich wäre auch der Bau einer deutlich kostengünstigeren CoAct-Anlage mit einer entsprechend höheren Wirtschaftlichkeit denkbar, wie Tabelle 10 zeigt.

Des Weiteren wurde in den vorliegenden Kalkulationen die Kreditlaufzeit auf zehn Jahre angesetzt, gemäß der Abschreibungsdauer. Die kurze Kreditlaufzeit hat einen hohen Kapitaldienst zur Folge. Bei einer Umsetzung des Vorhabens würde man längere Kreditlaufzeiten wählen und könnte entsprechende Einsparpotentiale beim Kapitaldienst realisieren.

Eine weitere Option, um die Kosten zu reduzieren wäre die ausschließliche Verwendung von Holziger Biomasse, wie beispielsweise für den Standortvariante Entsorgungszentrum angenommen. Dem entgegen steht aber der Ansatz der nachhaltigen Verwendung von bisher ungenutzten grasartigen Biomassen, daher ist dies kritisch abzuwägen. Eine weitere Option die Investitionskosten zu reduzieren

wäre das Auslagern der Biomassen, damit Siloflächen einzusparen und die Biomassen „gebrauchsfertig“ anliefern zu lassen. Wie in Mathias et al. (2024) dargestellt, hätte das eine Reduzierung der Investitionskosten je nach Vergleichswert von ca. 227.500 EUR bis 561.500 EUR zur Folge.

Tabelle 10: Spannbreite der Investitionskosten

Investitionskosten	Grüne Wiese	Kläranlage (mit IFBB)	Entsorgungszentrum (ohne IFBB)
Gebäude & Planung mit Hochsilo	405.000 EUR	917.500 EUR	142.300 EUR
Fuhrpark	70.000 EUR	70.000 EUR	-
IFBB	3.059.523 EUR	1.089.300 EUR	139.000 EUR ³
Pyrolyse mit Peripherie & Biomasselager	830.000 EUR	830.000 EUR	830.000 EUR
Aktivierung	1.100.000 EUR	1.100.000 EUR	1.100.000 EUR
Summe Kalkulation Ingenieurbüro 1	5.464.523 EUR ⁴	4.006.800 EUR	2.211.300 EUR
Kalkulation Ingenieurbüro 2 aus Tabelle 1	9.008.158 EUR	7.577.935 EUR	5.344.135 EUR
Differenz der Kalkulationen	3.543.635 EUR	3.571.135 EUR	3.132.835 EUR

Quelle: K&F, Björnsen Beratende Ingenieure

Zuletzt sollten in jedem Fall die Fördermöglichkeiten eruiert und ausgeschöpft werden. Darauf wurde bereits näher in Mathias et al. (2024) eingegangen. Trotz der aus diversen Gründen noch fehlenden Wirtschaftlichkeit einer CoAct-Anlage, bietet das Verfahren einen innovativen und nachhaltigen Ansatz für die Verwendung von ungenutzten Biomassen, die langfristige Reduzierung von CO₂ in der Atmosphäre, die Steigerung regionaler Wertschöpfung und die Vermeidung von globalen Lieferketten- und Rohstoffabhängigkeiten. Gerade auch die geplante Einführung der gesetzlich vorgeschriebenen 4. Reinigungsstufe für Kläranlagen kann eine Chance für das CoAct-Verfahren darstellen.

Zur Veranschaulichung der Chancen, Risiken, Stärken und Schwächen, die sich aus der Anwendung des CoAct-Verfahrens für ein Unternehmen ergeben können, wurde eine SWOT-Analyse durchgeführt. Die SWOT-Matrix kommt aus der strategischen Unternehmensplanung und dient der Positionierungsanalyse der eigenen Unternehmensaktivitäten gegenüber dem Wettbewerb. Dazu wird das Unternehmensumfeld analysiert und die daraus resultierenden Chancen und Risiken den Stärken und Schwächen des Unternehmens (interne Analyse) gegenübergestellt. Je nach Überschneidung (hier Matrixfeld) sollten einerseits die Stärken des CoAct-Verfahrens ausgebaut werden, um Chancen nutzen zu können und Risiken zu minimieren; und andererseits die Schwächen des CoAct-Verfahrens weiterentwickelt werden, um Risiken zu reduzieren oder diese ganz gemieden werden. Letztendlich lässt sich festhalten, dass einerseits die Umsetzung der Ziele des Green Deals wie die Schadstofffreiheit von Wasser, Luft und Boden sowie die Klimaneutralität nicht ohne Investitionen in entsprechende

³ Deponiegasnutzung und Installation

⁴ Ohne Erdarbeiten

Verfahren und Infrastrukturen erreichen lassen. Das CoAct-Konzept verspricht ein Baustein auf dem Weg zu einer klimaneutralen Kläranlage mit regionaler Aktivkohleversorgung zu sein.

Abbildung 28: SWOT Analyse für das CoAct Konzept

SWOT ANALYSE		INTERNE ANALYSE	
		STÄRKEN	SCHWÄCHEN
EXTERNE ANALYSE	CHANCEN	<p>Folgende Chancen ergeben sich durch die Stärken des CoAct-Konzepts:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verwendung von ungenutzten Biomassepotentialen • Nachhaltige Produktion von Aktivkohle • Steigerung der regionalen Wertschöpfung • Bedienung einer steigenden Nachfrage nach Aktivkohlen nach der verpflichtenden Einführung der 4. Reinigungsstufe • Einsparung von Energie (-Kosten) bzw. nutzbarer Energie-Überschuss (z. B. im Rahmen der kommunalen Wärmeplanung) 	<p>Folgende Schwächen begrenzen die Chancen des CoAct-Konzepts:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technologie noch nicht marktreif • Technologie noch zu teuer -> Förderprogramme nötig • Kein kontinuierlicher Anfall von Biomassen -> Lagerung bedarf weiterer Flächen und ggf. Gebäude • Voraussetzung? für Silierung von grasartiger Biomasse, die außerhalb von Wiesen-/Weideflächen anfällt ist Etablierung von lokalen Logistikinfrastrukturen
	RISIKEN	<p>Die Stärken des CoAct-Konzepts wirken positiv auf potenzielle Risiken:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Unabhängigkeit von globalen Lieferketten und fossilen Rohstoffen • Positive Klimaeffekte (langfristige Reduzierung von CO₂ in der Atmosphäre) • Keine Konkurrenz um Biomassenutzung bei grasartigen, kommunalen Biomassen • Beitrag zur vorgesehenen Energieneutralität⁵ von Kläranlagen 	<p>Die Schwächen des Konzepts können folgende Risiken verstärken:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von ausschließlich holziger Biomasse aufgrund der Wirtschaftlichkeit ist ökologisch weniger nachhaltig • Zusätzliche Kostensteigerungen zu den Kosten der Einführung der 4. Reinigungsstufe, die von den Kommunen bzw. Gebührenzahler:innen getragen werden müssen • Nutzungskonkurrenzen bei Biomassen und Übernutzung der Ressourcen

⁵ <https://de.dwa.de/de/presseinformationen-volltext/verursacher-in-die-pflicht-nehmen.html>

6.7 Empfehlungen zur Übertragbarkeit

Im Vergleich zu Bau und Betrieb einer CoAct-Anlage auf „der grünen Wiese“, lassen sich an Klär- und Biogasanlagen und Wertstoff- oder Bauhöfen Synergien mit den dort stattfindenden Prozessen erzielen. Dies kann eine große Bedeutung für den wirtschaftlichen Betrieb einer CoAct-Anlage haben, da hier nicht alle Maschinen und Infrastrukturen beschafft, erstellt oder unterhalten werden müssen und Synergieeffekte sowohl die Produktions- als auch die Investitionskosten reduzieren. Je nach **Anlagenkonfiguration** und Art der Biomasse ist ein IFBB-Verfahren zur Verarbeitung krautiger Biomassen erforderlich. Bei einer Variante ohne IFBB-Modul reduzieren sich aufgrund des geringeren Platzbedarfes, durch das Wegfallen von größeren Lagerkapazitäten und Aufbereitungsanlagen für die Biomasse, die Investitionskosten. Letztendlich kann die Standortwahl und Anlagenkonfiguration nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Mathias et al. (2024) werden Leitfragen und Prüfaufträge aufgezeigt, um ein größtmögliches Maß an Synergien mit bestehenden Infrastrukturen und Prozessen zu realisieren.

Bezüglich der **Biomassepotentiale** müssen unter ökonomischen Gesichtspunkten nicht nur die verfügbaren Mengen, sondern auch die preislichen Aspekte (Beschaffungskosten) betrachtet werden. Es gibt nicht per se eine günstige oder teure Biomasse, sondern die Preise können sich u.a. durch Aufwuchs, anderweitige Nachfrage oder neue rechtliche Rahmenbedingungen ändern. Entsprechend ist Flexibilität in der Biomassebeschaffung wichtig, um nicht nur auf die Verknappung einer Biomasse sondern auch auf Preisveränderungen reagieren zu können. Allerdings sind auch gute Beziehungen zu den regionalen Lieferantinnen und Lieferanten notwendig, um über Jahre hinweg stabile Liefermengen zu gewährleisten. Entsprechend bietet sich an, einen Teil des benötigten Biomasse-Mixes über Lieferverträge mittelfristig abzusichern und einen anderen kurzfristig und nach Marktlage zu beschaffen. Zu tatsächlichen und potenziellen Lieferbetrieben, insbesondere land- und forstwirtschaftlichen, und Landschaftspflege-Betriebe, sowie zu den Landschaftspflege-Verbänden, sollte ein enger Kontakt aufrechterhalten und die Zusammenarbeit beworben werden.

Für die **Logistik** ist wichtig, dass die Biomassen einfach zu mobilisieren sind und Nutzungskonkurrenzen vermieden werden. Bei der Logistik müssen spezielle Aspekte der Biomassen beachtet werden, z. B. dass frischer Grünschnitt schon nach kurzer Zeit beginnt, auf der Ladefläche zu gären. Wertstoffhöfe können im Hinblick auf die Biomassebündelung eine wichtige Rolle in der Logistik übernehmen. Für den Transport von Biomasse an Wertstoffhöfe bestehen zumeist schon etablierte Transportketten, so dass in diesem Bereich kaum Handlungsbedarf von Seiten der Betreiberorganisation einer CoAct-Anlage besteht. Neben den etablierten Transportstrukturen bietet ein Wertstoffhof größere verfügbare Biomasse-Mengen und u.U. auch notwendiges Equipment. Letztendlich muss die Biomasselogistik die im Jahresverlauf unterschiedlich anfallende Biomasse aufbereiten (z. B. durch Silage oder häckseln) und das ganze Jahr für einen kontinuierlichen Betrieb einer CoAct-Anlage bereitstellen. Dafür braucht es ausreichend Lagerflächen und klare Lieferbedingungen, auch für den Fall von Jahren mit geringem Aufwuchs.

Grundsätzlich empfiehlt es sich, die Kommune über die direkt verantwortlichen Stellen einzubinden, wenn die CoAct-Anlage an eine kommunale Kläranlage angedockt werden soll. In dem Fall ist es wichtig, dass es eine klare Rollenverteilung zwischen den Beteiligten und ein Mandat für die jeweilige Aufgabe gibt. Immer dann, wenn ein Akteur die Anlage allein betreibt, trägt er einerseits das wirtschaftliche Risiko, andererseits verfügt er aber auch über die vollständige Kontrolle über den Bau und Betrieb der CoAct-Anlage. Mischformen bieten sich immer dann an, wenn Kapital und Wissen, aber auch Risiko, ökonomischer Gewinn und organisatorische, prozessuale oder immaterielle Vorteile wie Image geteilt werden sollen. Es gilt insbesondere die lokalen Rahmenbedingungen zu beachten.

Ziel sollte es sein, möglichst umfassend Synergien mit bestehenden Anlagen und Prozessen zu generieren. Prüffragen dazu finden sich in Mathias et al. (2024) .

Bei der Frage **Eigenleistung oder Fremdbezug** von Teilleistungen können keine allgemeinen Empfehlungen gegeben werden. Vielmehr sollten die von Standort und Betreibermodell abhängigen Ressourcen und Kapazitäten berücksichtigt werden. Auf Basis unterschiedlicher Ausgangsvoraussetzungen gilt es abzuwägen, welche Ziele mit der Eigenleistung oder dem Fremdbezug erreicht werden sollen. Die Implikationen bezüglich der wirtschaftlichen und organisatorischen Risiken sollten dabei gegenübergestellt und im Entscheidungsprozess berücksichtigt werden. Ausgangspunkt für die Frage nach Eigenleistung oder Fremdbezug ist i.d.R. eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Für eine strategische Entscheidung gilt es abzuwägen, inwiefern durch die Entscheidung ein langfristiger Wettbewerbsvorteil, wie z.B. die Reduzierung von Kostenrisiken auf volatilen Märkten, generiert werden kann. Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Frage nach Eigen- und Fremdleistung nicht einfach zu beantworten ist. Neben dem Vergleich von Fertigungs- und Beschaffungskosten, sollten strategische Implikationen bedacht werden, was an die Frage nach dem Kerngeschäft anschließt. Letztendlich gilt es den CoAct-Standort als solchen möglichst effizient auszulasten und die eigenen Kapazitäten und Fachwissen zu nutzen. Alternativ zur Frage Eigen- oder Fremdleistung besteht die Möglichkeit Produkte aus unterschiedlichen Quellen zu beziehen, Fremd- und Eigenleistungen zu kombinieren oder Dritte im Rahmen von Kooperationen enger in die eigenen Prozesse einzubinden, als dies über reine Kaufverträge möglich wäre. Auch hierbei gilt es das eigene Kerngeschäft zu definieren, Risiken abzuwägen, die Flexibilität einzelner Beteiligter zu bedenken, Kosten und Erlöse sowie die vorhandenen Fähigkeiten und Kapazitäten zu berücksichtigen (Medina Serrano et al. 2018). Die Entscheidung eine Eigen- oder Fremdleistung in Anspruch zu nehmen, kann bei der Etablierung einer CoAct-Anlage kaum ohne die Frage nach dem Betreibermodell und Kooperationen beantwortet werden.

7. Fazit und Ausblick

Zum Startzeitpunkt von CoAct (2018) war in Deutschland die 4. Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination bereits an 26 Standorten in Betrieb, meistens unter Einsatz von Aktivkohle (19). Zum Ende des Verbundvorhabens (2023) hat sich die Zahl bereits mehr als verdoppelt (58 Standorte, 41 mit AC).⁶ Gleichzeitig befindet sich eine Vielzahl weiterer Anlagen in Bau oder Planung. Diese Aktivitäten konzentrieren sich bisher zwar nur auf zwei Bundesländer. Inzwischen liegt jedoch auch ein EU-Gesetzesvorschlag für eine aktualisierte kommunale Abwasserrichtlinie auf dem Tisch, welcher die Spurenstoffelimination in Zukunft flächendeckend vorsieht (Obermaier et al. 2023). Für Kläranlagen ab 100.000 Einwohnern und in sensiblen Gebieten soll die vierte Reinigungsstufe ab 2035 eingeführt sein. Das erlaubt den Kläranlagen ausreichend Vorlauf für die baulichen Veränderungen. Bis 2040 sollen auch Kläranlagen ab 10.000 Einwohner über eine vierte Klärstufe verfügen. (<https://www.bdew.de/wasser-abwasser/eu-kommission-veroeffentlicht-neue-kommunale-abwasserrichtlinie/>).

Deutschland ist das europäische Land, in dem bereits am meisten Abwasser wiederaufbereitet und somit recycelt wird. Über 96 Prozent des Abwassers aus privaten Haushalten und öffentlichen Einrichtungen wird in nahe gelegenen Kläranlagen geleitet und gereinigt, wobei eine vierte Klärstufe, wie oben dargestellt, eine Ausnahme darstellt. Somit müssen bis 2040 über 10.000 Kläranlagen mit Ozonierungstechnik oder Aktivkohletechnik oder einer Kombination ausgestattet werden. Wie oben dargestellt, setzen derzeit 41 von 58 Kläranlagen bei der vierten Reinigungsstufe auf den Einsatz von Aktivkohle. Somit ist von einem massiven Anstieg des Aktivkohlebedarfs bis 2035 bzw. 2040 zu rechnen.

Derzeit werden Aktivkohlen fast vollständig aus fossilen Quellen im globalen Süden gewonnen. Teilweise kommen auch Aktivkohlen biogenen Ursprungs, beispielsweise aus Kokosschalen, zum Einsatz. Die Herstellungsprozesse finden teilweise unter gesundheitlich und arbeitsrechtlich bedenklichen Umständen statt. Zudem zeigten die Corona-Pandemie oder die Blockade des Suezkanals in den letzten Jahren, wie fragil die Logistikketten auch für die Versorgung mit Aktivkohlen sind.

Somit stehen die EU und Deutschland vor der Frage, wie eine Versorgung mit nachhaltigen Aktivkohlen dauerhaft sichergestellt werden kann. Gleichzeitig existieren biogene Reststoffe, die bislang kaum oder im Rahmen von wenig hochwertigen Nutzungen verwertet werden. Das CoAct-Konzept verknüpft beide Herausforderungen und schlägt mit der Pyrolyse und der Aktivierung biogener Restbiomassen zur Abwasserreinigung einen möglichen Lösungsweg vor. Im Rahmen des Vorhabens wurde untersucht, inwiefern dieser Ansatz technisch umsetzbar und ökologisch und ökonomisch zielführend ist.

Die Forschungsergebnisse von CoAct zeigen, dass aus ausgewählten regionalen Restbiomassen Aktivkohlen hergestellt werden können, die ausreichende bis gute Eliminationsleistungen von Spurenstoffen aus kommunalen Abwässern gewährleisten. Zusätzlich ermöglicht das IFBB-Verfahren dabei auch die Nutzung von krautigen und grasartigen Restbiomassen mit hohem Mineralstoffgehalt.

Mit dem erfolgten **Praxisversuch** auf der Kläranlage in Kressbronn am Bodensee konnte schließlich die grundsätzliche Praxistauglichkeit von biogenen Aktivkohlen zur Spurenstoffelimination in kommunalem Abwasser erfolgreich unter Beweis gestellt werden. Weiter konnten durch den Praxisversuch Erfahrungswerte für Kläranlagen und weitere Praxispartner bereitgestellt und mit Ihnen auch ein niederschwelliger Kontakt zu einem innovativen Verfahren geschaffen werden.

⁶ Vgl. <https://de.dwa.de/de/landkarte-4-stufe.html> (Stand: Oktober 2023)

In Bezug auf den technologischen Reifegrad² kann somit gesagt werden, dass die Charakterisierung von Aktivkohlen aus unterschiedlichen Biomassen im Labormaßstab dem technologischen Reifegrad 4 entspricht (vgl. PtJ o.J.), da diese mit und ohne das IFBB-Verfahren im Labor hergestellt und ihre Reinigungsleistung in Versuchen ermittelt wurde. Der Praxisversuch entspricht einem „Versuchsaufbau in Praxisumgebung“. Zumindest für die eingesetzten Aktivkohlen aus Holziger Biomasse⁸ konnte somit ein Technologiereifegrad der Stufe 5 erreicht werden.

Eine Evaluierung des CoAct-Technikkonzeptes unterstreicht den ökologischen Mehrwert einer Verwertung von regionalen Restbiomassen durch das CoAct-Verfahren. In Relation zu dem aktuellen Verwertungswegen der untersuchten Restbiomassen und unter Berücksichtigung einer Substituierung von Aktivkohle auf Steinkohlebasis durch regionale CoAct-Aktivkohlen, kann für alle untersuchten umwelt- und klimarelevanten Parameter eine deutliche Verbesserung durch den Einsatz von CoAct-Aktivkohlen nachgewiesen werden.

Bezüglich der Ökonomie lässt sich zusammenfassend sagen, dass die derzeitigen Weltmarktpreise für fossile Aktivkohlen wesentlich niedriger liegen, als die Kosten für die Herstellung von CoAct-Aktivkohlen mit marktverfügbaren Anlagenkomponenten. Dabei sind die Investitionskosten der größte Dreh- und Angelpunkt für die Wirtschaftlichkeit einer CoAct-Anlage. Damit verbunden sind die Fixkosten ebenfalls relevant für die Rentabilität einer CoAct-Anlage, da die Investitionskosten mit der Abschreibung und dem Kapitaldienst in diese einfließen. Gleichzeitig gilt es zu berücksichtigen, dass diese Aussagen für einen Ansatz getätigt werden, der dem technologischen Reifegrad 4/5 („Labor-/Praxisversuch) entspricht. Unberücksichtigt bleiben ebenso der ökonomische Vorteil durch die erreichbaren Umweltvorteile sowie eine resiliente Aktivkohleversorgung unabhängig von volatilen Aktivkohlemärkten, erwartbaren Preissteigerungen durch eine anziehende Nachfrage infolge regulativer Vorgaben zur Einführung der 4. Klärstufe genauso wie die ökonomische Bewertung resilienter Lieferketten unabhängig von globalen Warenströmen aus sozial fragwürdigen Quellen und politisch teilweise instabilen Regionen.

Die integrative Anlagenplanung für die Kläranlage Kressbronn-Langenargen verkörpert ein „Best Practice“ Beispiel. Durch die detaillierte Berücksichtigung der standortbezogenen Gegebenheiten und der dafür angepassten CoAct-Anlage, wird eine hohe Übertragbarkeit dieses Konzeptes für andere Kläranlagen-Standorte erreicht. Darüber hinaus konnte im Vorhaben gezeigt werden, dass neben Kläranlagen weitere Standorte Synergien mit dem Bau und Betrieb einer CoAct-Anlage versprechen. Biogasanlagen verfügen bereits über einen Fermenter und können in diesem das Wasser aus dem IFBB-Verfahren aufnehmen. Sofern die Biogasanlage an ein Nahwärmenetz angeschlossen ist, kann diesem die überschüssige Wärme aus dem CoAct-Prozess zugeführt werden. Entsorgungszentren und Wertstoffhöfe eignen sich ebenfalls für den Bau und Betrieb einer CoAct-Anlage. Hier werden bereits Biomassen angedient bzw. entsorgt oder die Standorte verfügen über Maschinen- und Fuhrpark zur Verarbeitung von Biomassen. Synergiepotenziale bestehen hier somit auch im Bereich der Biomasselogistik.

Grundsätzlich zeigt der Vergleich der potenziellen Standorte, dass eine CoAct-Anlage in unterschiedlichen Kontexten an den Schnittstellen der Abwasserbehandlung, Energieerzeugung und

² Mit dem technologischen Reifegrad werden neun Entwicklungsstufen vom Beschreiben eines technischen Funktionsprinzips bis zum Nachweis des erfolgreichen Praxiseinsatzes beschrieben. Der technologische Reifegrad wurde ursprünglich von der NASA entwickelt, um den Einführungsstand neuer Technologien in der Raumfahrt zu beschreiben. Seitdem wurde das Konzept in anderen Bereichen aufgegriffen, um allgemein den Entwicklungsstand von Technologien zu beschreiben.

⁸ Aktivkohlen aus grasartigen/krautigen Restbiomassen, die in der Herstellung das IFBB-Verfahren voraussetzen, wurden im Praxisversuch nicht getestet.

Biomasseverarbeitung synergetisch eingesetzt werden kann. Dabei gilt es die überschüssige Wärme aus dem CoAct-Prozess in Nahwärmenetze einzuspeisen oder vor Ort zu nutzen. Synergien ergeben sich somit mit der kommunalen Wärmeplanung und mit dem bereits erwähnten Entwurf der kommunalen Abwasserrichtlinie, die darüber hinaus vorsieht, dass Kläranlagen ihren Energiebedarf bis 2030 zu 50 % und bis 2040 zu 100 % aus vor Ort erzeugten erneuerbaren Energien decken müssen. Weitere regionalspezifischen Bedingungen, von der Versorgung mit Biomassen, über die Verarbeitung der Wassermengen aus dem IFBB-Verfahren, bis hin zur Nutzung der Aktivkohlen, die Logistik, die unterschiedlichen Produktionsprozesse und die Nutzung der CoAct-Produkte sollten berücksichtigt werden. So können unterschiedliche Potenziale an Restbiomassen gebündelt und die Versorgung einer CoAct-Anlage über das Jahr sichergestellt werden. Gleichzeitig können die CoAct-Aktivkohlen in Kläranlagen im städtischen und ländlichen Raum eingesetzt werden.

Stadt-Land-Kooperationen oder interkommunale Zusammenarbeit bietet hier die Möglichkeit, die regionale Synergien bestmöglich zu nutzen. Sie helfen die unterschiedlichen Akteursgruppen zusammenzubringen, damit ein reibungsloser Bau und Betrieb sichergestellt werden kann. Wichtig für eine partnerschaftliche Zusammenarbeit ist, dass eine Institution federführend Aktivitäten vorantreibt. Als die verantwortlichen Stellen für Abwasserreinigung und Entsorgung privater Restbiomassen sind insbesondere Kommunen oder ihre dafür geschaffenen Betriebe prädestiniert eine koordinierende Rolle zu übernehmen. Gleichzeitig finden sich auch im privaten Sektor Fachwissen und Kapazitäten in der Bereitstellung von Restbiomassen oder für den Betrieb von Infrastrukturen in den Bereichen Abwasser und Energie, weshalb auch der Bau und Betrieb einer CoAct-Anlage sehr gut vorstellbar ist.

Mit den CoAct-Ergebnissen wurde die technische Machbarkeit und Sinnhaftigkeit in Bezug auf die Nachhaltigkeit der Aktivkohlen nachgewiesen. In Bezug auf die Versorgungssicherheit im globalen Kontext aber auch vor dem Hintergrund des erwarteten Nachfrageanstiegs, erscheint das CoAct-Konzept auch ökonomisch weiterhin vielversprechend. Somit können die CoAct-Ergebnisse als Ausgangsbasis genutzt werden, um den technologischen Reifegrad des Ansatzes weiter zu erhöhen. Der nächste anstehende Schritt wäre die Pilotierung im Praxismaßstab mit einer funktionsfähigen Pilotanlage, um belastbare Aussagen über die Kosten und die Praktikabilität der Technologie treffen zu können. Damit wäre ein Technologiereifegrad 6 erreicht. Dazu können Fördermöglichkeiten eruiert und ausgeschöpft werden. Dies sollte es ermöglichen, den Ansatz trotz derzeit nicht ausreichender Wirtschaftlichkeit zur technologischen Reife zu bringen. Denn jenseits des kurzfristigen Aktivkohlepreises verspricht der CoAct-Ansatz eine innovative und nachhaltige Verwendung von ungenutzten Biomassen, die langfristige Reduzierung von CO₂ in der Atmosphäre, die Steigerung regionaler Wertschöpfung und die Vermeidung von globalen Lieferketten- und Rohstoffabhängigkeiten. Damit kann der CoAct-Ansatz ein Baustein einer gesellschaftlichen Transformation für eine nachhaltige Entwicklung an der Schnittstelle Land-/Forstwirtschaft, Landschaftspflege, Abwasser- und Abfallwirtschaft sein und zu einem effektiven und effizienten Umgang mit Ressourcen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft beitragen.

8. Literaturverzeichnis

Ahting, M.; Brauer, F.; Duffek, A.; I. Ebert; A. Eckhardt; E. Hassold et al. (2018): Empfehlungen zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Hg. v. Umweltbundesamt Fachgebiet II 2.1 Übergreifende Angelegenheiten Wasser und Boden. Dessau-Roßlau (Hintergrundpapier | April 2018). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/empfehlungen-zur-reduzierung-von-0>.

Alt, Klaus; Benstöm, Frank; Biebersdorf, Norbert; Böhler, Marc; Bornemann, Catrin; Hiller, Christian et al. (2016): Aktivkohleeinsatz auf kommunalen Kläranlagen zur Spurenstoffentfernung. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KA-8.6 „Aktivkohleeinsatz auf Kläranlagen“. In: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 63 (12), 1062-1067.

Bosch, Dominik; Back, Jan O.; Gurtner, David; Giberti, Sara; Hofmann, Angela; Bockreis, Anke (2022): Alternative feedstock for the production of activated carbon with ZnCl₂: Forestry residue biomass and waste wood. In: *Carbon Resources Conversion* 5 (4), S. 299–309. DOI: 10.1016/j.crcon.2022.09.001.

Brosowski, André; Adler, Philipp; Erdmann, Georgia; Stinner, Walter; Thrän, Daniela; Mantau, Udo et al. (2015): Biomassepotenziale von Rest- und Abfallstoffen. Status quo in Deutschland. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe, 36).

Bühle, Lutz; Reulein, Jürgen; Stülpnagel, Reinhold; Zerr, Walter; Wachendorf, Michael (2012): Methane Yields and Digestion Dynamics of Press Fluids from Mechanically Dehydrated Maize Silages Using Different Types of Digesters. In: *Bioenerg. Res.* 5 (2), S. 294–305. DOI: 10.1007/s12155-011-9127-5.

DWA (25.06.2020): Abwassergebührenvergleiche haben nur geringe Aussagekraft. Entgelte seit zwei Jahrzehnten stabil. Hennef. Dipl.-Volksw. Stefan Bröker. Online verfügbar unter <https://de.dwa.de/de/presseinformationen-volltext/abwasserentgeltvergleiche-haben-nur-geringe-aussagekraft.html>, zuletzt geprüft am 12.03.2023.

DWA (09.03.2023): Verursacher in die Pflicht nehmen. DWA begrüßt Erweiterte Herstellerverantwortung der Kommunalabwasserrichtlinie. Hennef. Pressesprecher Dipl.-Volksw. Stefan Bröker. Online verfügbar unter <https://de.dwa.de/de/presseinformationen-volltext/verursacher-in-die-pflicht-nehmen.html>, zuletzt geprüft am 12.03.2024.

Hagemann, Nikolas; Schmidt, Hans-Peter; Kägi, Ralf; Böhler, Marc; Sigmund, Gabriel; Maccagnan, Andreas et al. (2020): Wood-based activated biochar to eliminate organic micropollutants from biologically treated wastewater. In: *The Science of the total environment* 730, S. 138417. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138417.

Heinrich, Thomas; Kaetzel, Korbinian; Libra, Judy A.; Hoffmann, Thomas (2023): Influence of Thermochemical Conversion Technologies on Biochar Characteristics from Extensive Grassland for Safe Soil Application. In: *Energies* 16 (4), S. 1896. DOI: 10.3390/en16041896.

Hensgen, Frank; Bühle, Lutz; Donnison, Iain; Frasier, Mariecia; Vale, Jim; Corton, John et al. (2012): Mineral concentrations in solid fuels from European semi-natural grasslands after hydrothermal conditioning and subsequent mechanical dehydration. In: *Bioresource technology* 118, S. 332–342. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.035.

Joseph, Ben; Kaetzel, Korbinian; Hensgen, Frank; Schäfer, Bernhard; Wachendorf, Michael (2020): Sustainability assessment of activated carbon from residual biomass used for micropollutant removal at a full-scale wastewater treatment plant. In: *Environ. Res. Lett.* 15 (6), S. 64023. DOI: 10.1088/1748-9326/ab8330.

Joseph, Stephen; Lehmann, Johannes (2009): Biochar for environmental management. Science and technology. London, Sterling, Va.: Earthscan.

KomS BW (Hg.) (2018): KomS-Handlungsempfehlungen. Handlungsempfehlungen für die Vergleichskontrolle und den Betrieb von Verfahrenstechniken zur gezielten Spurenstoffelimination. Kompetenzzentrum Spurenstoffe Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter https://koms-bw.de/cms/content/media/KomS_Handlungsempfehlung_Stand_07.2018_korrigiert.pdf.

Mathias, Christoph; Wende, Victoria; Spengler, Bettina; Gehrlein, Ulrich (2024): CoAct Bericht - Teilvorhaben Ökonomische Analyse und Governance. Institut für Ländliche Strukturforchung, Frankfurt am Main.

Medina Serrano, Rubén; González Ramírez, María Reyes; Gascó Gascó, José Luis (2018): Should we make or buy? An update and review. In: *European Research on Management and Business Economics* 24 (3), S. 137–148. DOI: 10.1016/j.iedeen.2018.05.004.

Obermaier, Nathan; Osiek, Dirk; Flügel, Ines; Braun, Ulrike; Eisenträger, Adolf; Rechenberg, Jörg; Bannick, Claus Gerhard (2023): Moving forward: The European Commission's Proposal for a Recast Urban Wastewater Treatment Directive. Hg. v. Umweltbundesamt (Scientific Opinion Paper). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/moving-forward-the-european-commissions-proposal>.

Olfert, Alfred; Walther, Jörg (2023): TRAFIS.NB Nachhaltigkeitsbewertung für innovative Infrastrukturen. Anwendungshandbuch: Methode und Bewertungswerkzeug. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/trafisnb-prozessbegleitende>, zuletzt geprüft am 12.03.2023.

Piepenschnieder, Meike; Bühle, Lutz; Hensgen, Frank; Wachendorf, Michael (2016): Energy recovery from grass of urban roadside verges by anaerobic digestion and combustion after pre-processing. In: *Biomass and Bioenergy* 85, S. 278–287. DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.12.012.

Richter, F.; Fricke, T.; Wachendorf, M. (2011): Influence of sward maturity and pre-conditioning temperature on the energy production from grass silage through the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB): 2. Properties of energy carriers and energy yield. In: *Bioresource technology* 102 (7), S. 4866–4875. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.01.020.

Schramm, E.; Trapp, J. H.; Stein, C.; Rauchecker, M. A. (2023): Aufbau und Erhalt blau-grün-grauer Infrastrukturen für die kommunale Klimaanpassung: Fallbeispiele, Konstellationen und Kooperationsmanagement. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (netWORKS-Papers, 39).

Verein Deutscher Ingenieure (2014): VDI 4630 - Gärsubstrate. Hg. v. Verein Deutscher Ingenieure.

Zietzschmann, Frederik; Altmann, Johannes; Ruhl, Aki Sebastian; Dünnbier, Uwe; Dommisch, Ingild; Sperlich, Alexander et al. (2014): Estimating organic micro-pollutant removal potential of activated carbons using UV absorption and carbon characteristics. In: *Water research* 56, S. 48–55. DOI: 10.1016/j.watres.2014.02.044.