

Integrierte Bewertung des chemischen Recyclings von Restabfällen in Deutschland: Emissionsreduktionspotenzial und Kosten

Forschungshintergrund, Methode, Ergebnisse & Ausblick

Raoul Voss^{1,2}, Roh Pin Lee^{1,3}, Magnus Fröhling²

¹Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, TU Bergakademie Freiberg

²Lehrstuhl für Circular Economy, TU München

³Fraunhofer Außenstelle Freiberg „Kohlenstoffkreislauf-Technologien“, Fraunhofer IMWS

8. Oktober 2020

Kurze Vorstellung

Arbeitsort und Dissertation

Forschungshintergrund

Kreislaufwirtschaft und chemisches Recycling

Methode

Agentenbasierte Modellierung

Ergebnisse

Investitionen, Behandlungskosten, CO₂

Ausblick

Nutzung der Ergebnisse im Kontext von ABM

Raoul Voss



- ursprünglich aus Köln
- wohnhaft in Dresden
- Seit 2.5 Jahren wissenschaftlicher Mitarbeiter

<p>Arbeitsort</p>	<p>TU Bergakademie Freiberg (TUBAF) Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC) Abteilung Technikfolgenabschätzung (TA)</p> <p><u>Projekt STEEP-Carbon Transition</u></p> <p>Thema: Integrierte Bewertung von alternativen Kohlenstoffressourcen für die Chemieindustrie in Deutschland</p> <p>Förderung: BMBF</p> <p>Projektdauer: 5 Jahre (läuft seit 3 Jahren)</p>
<p>Dissertation</p>	<p>TU München (TUM) Campus Straubing (TUMCS) Lehrstuhl für Circular Economy (Inh. Herr Prof. Magnus Fröhling)</p>



Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (gegründet 1919; ca. 100 Mitarbeiter)

Institute of Energy Process Engineering and Chemical Engineering

Fraunhofer Außenstelle für Kohlenstoffkreislauftechnologien (Fraunhofer IMWS) seit 2019



<p>Fachgebiet</p>	<p>Experimentelle Untersuchung, theoretische Beschreibung, Modellierung und Simulation von thermochemischen Konversionsprozessen für fossile und alternative Kohlenstoffressourcen</p>
<p>Eins der aktuellen Schlüsselthemen</p>	<p>Technische Lösungen für das chemische Recycling zur Unterstützung der Umsetzung einer „Kohlenstoffkreislaufwirtschaft“</p> <p>Technologien: z.B. Gasifizierung (partiell Oxidationsverfahren) zur Umwandlung von bspw. kohlenstoffhaltigen Abfällen oder Biomasse in ein Synthesegas, das reich an H₂ und CO ist.</p> <div data-bbox="955 1063 2153 1270" style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p> , → Syngas (H₂, CO) → Chemische Produkte wie Kunststoffe, Düngemittel oder Medizin </p> </div> <div data-bbox="2135 853 2471 1285" style="float: right; margin-top: 20px;"> <p>FlexiSlag Gasifier @ IEC</p> </div>

Agenda

Kurze Vorstellung

Arbeitsort und Dissertation

Forschungshintergrund

Kreislaufwirtschaft und chemisches Recycling

Methode

Agentenbasierte Modellierung

Ergebnisse

Investitionen, Behandlungskosten, CO₂

Ausblick

Nutzung der Ergebnisse im Kontext von ABM

Was ist chemisches Recycling?

Chemisches Recycling (CR) wird im Allgemeinen zur Beschreibung von Technologien verwendet, bei denen **kohlenstoffhaltige Abfälle in ihre chemischen Grundbausteine zerlegt werden**, die anschließend als Rohstoffe für die Herstellung neuer Produkte wie Kunststoffe, Chemikalien und Brennstoffe verwendet werden können (ACC, 2020; PRE, 2020).

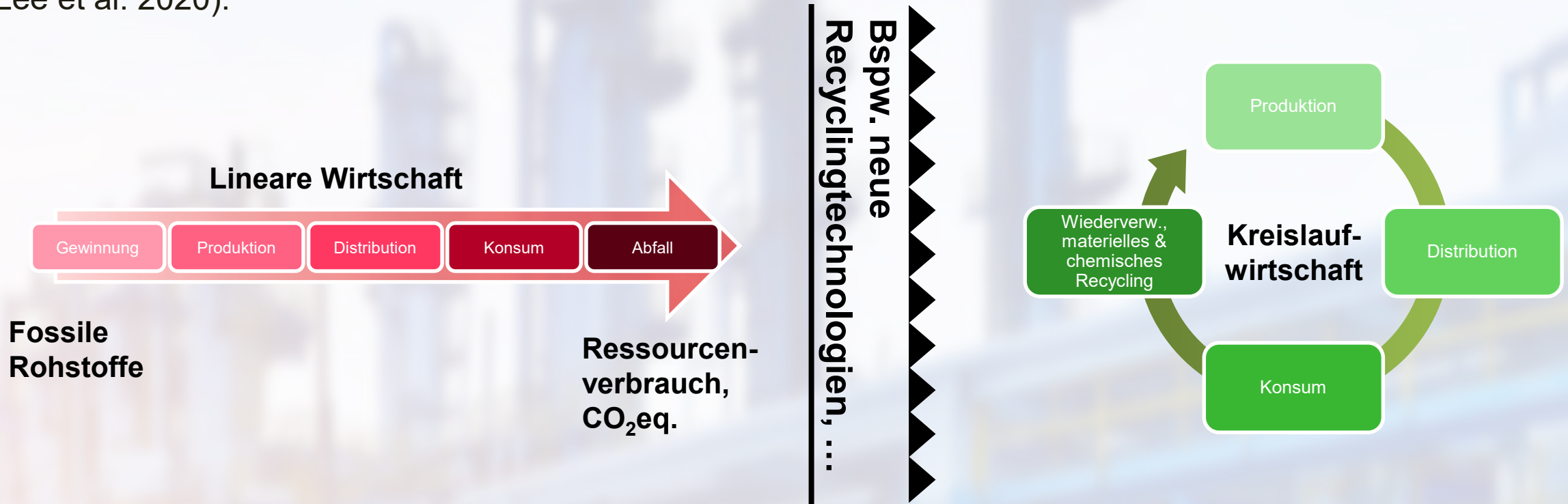
Bspw:

	Solvolyse	Pyrolyse	Gasifizierung
Temperatur (°C)	200	400	1000
Hilfsmittel	Lösungsmittel	Wärme	Sauerstoff
Produkt	Basischemikalien	Pyrolyseöl	Synthesegas
Einbindung des Kohlenstoffs			
Energiebedarf/CO2eq.			
Einsatzstoffe			
Praxisanwendungen			

Forschungshintergrund (2/7)

Warum gewinnt chemisches Recycling an Bedeutung?

Zunehmende politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Bestrebungen, die Europäische Union zu einer **klimaneutralen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Kreislaufwirtschaft** zu transformieren (Lee et al. 2020).



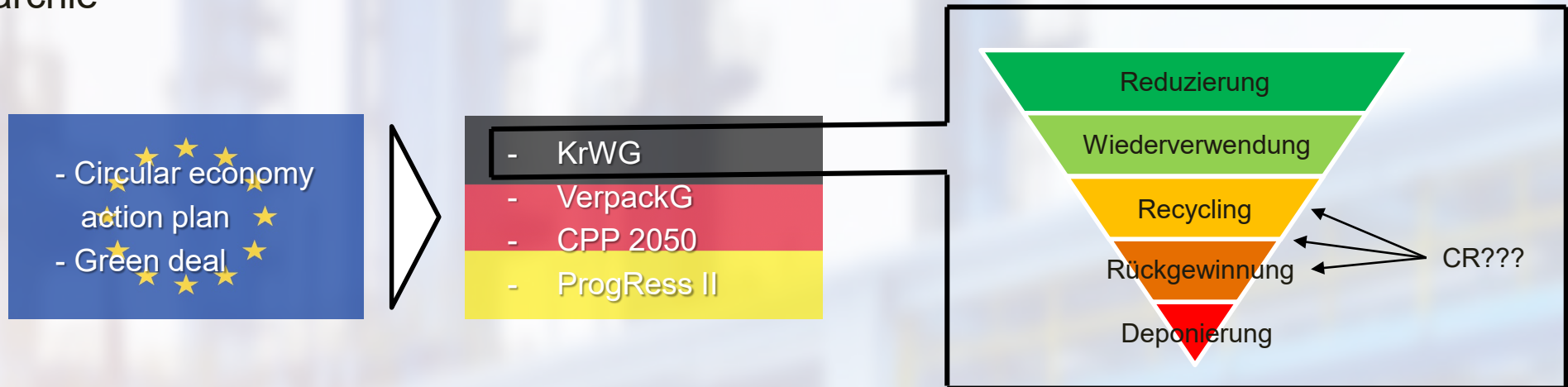
Dynamische Entwicklungen auf lokalen, regionalen, nationalen und internationalen Ebenen erfordern jedoch, den **Maßnahmenfokus** und das **Technologiespektrum** zukünftig **signifikant zu erweitern**.

Forschungshintergrund (3/7)

Wie kann das chemische Recycling zur Lösung künftiger Problemstellungen beitragen?

Robuster als konventionelle Recyclingverfahren; **weniger CO₂** als Abfallverbrennung; eröffnet **neue Geschäftsfelder**; **senkt die Importabhängigkeit** der Chemieindustrie (Keller et al., 2020; Seidl et al., 2019, 2020). Integration in den Europäischen und nationalen regulatorischen Rahmen sinnvoll, aber herausfordernd.

Bspw.: Abfallhierarchie



Vorraussetzung: Innovative und neue Technologien des chemischen Recyclings müssen aus technischer, ökologischer, ökonomischer und sozialer Perspektive hinreichend beleuchtet werden.

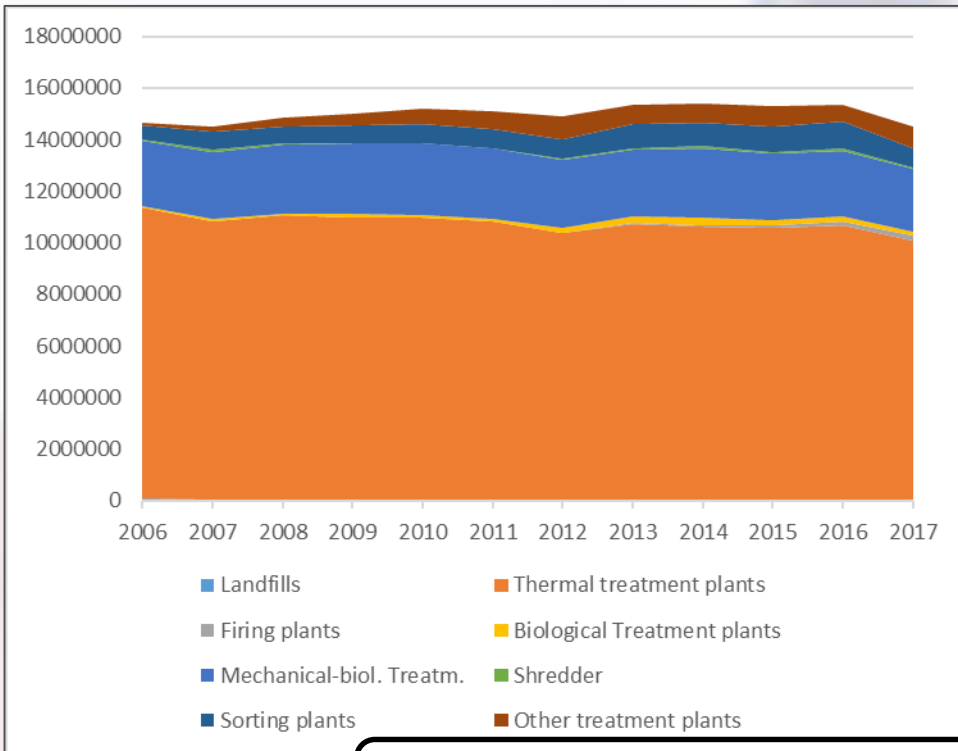
Derzeitiger Stand von Forschung und Praxis?

- Fokus auf (sortenreinen) Kunststoffen (Mamani et al. 2020)
- Technische Bewertungen stehen im Vordergrund. Ökologische, ökonomische oder soziale Dimensionen werden seltener betrachtet. Integrierte Bewertungen sind die Ausnahme (bspw. Materazzi et al., 2016; Miandad et al., 2016; Quicker et al., 2017)



Was macht Restabfälle interessant?

Aktuelle Behandlungspfade für Restabfälle



DESTATIS (2019)

I. Derzeit hauptsächlich direkt und indirekt verbrannt

Zentrale Merkmale von Restabfällen gemäß der Literatur

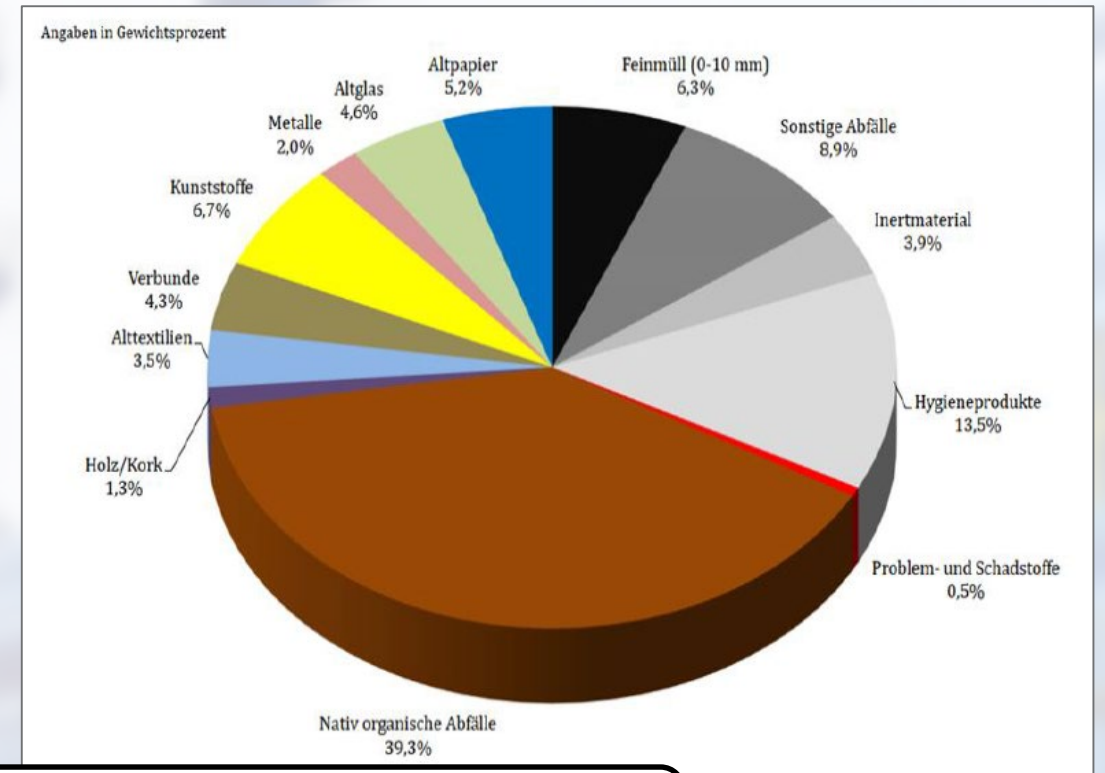
Energy (GJ)	C (%)	C biogen (%)	Water (%)
6.3 – 10.9	0.23 – 0.245	0.177	0.315

(EC 2019; IGW 1999; State of Saxony 2009; UBA 2011)

II. ~270 kg CO₂/t Restabfall durch Verbrennung
3.9 * 10⁶ Tonnen für ganz Deutschland (0.5%*)

*751 Mio. Tonnen fossile THG für Deutschland in 2020

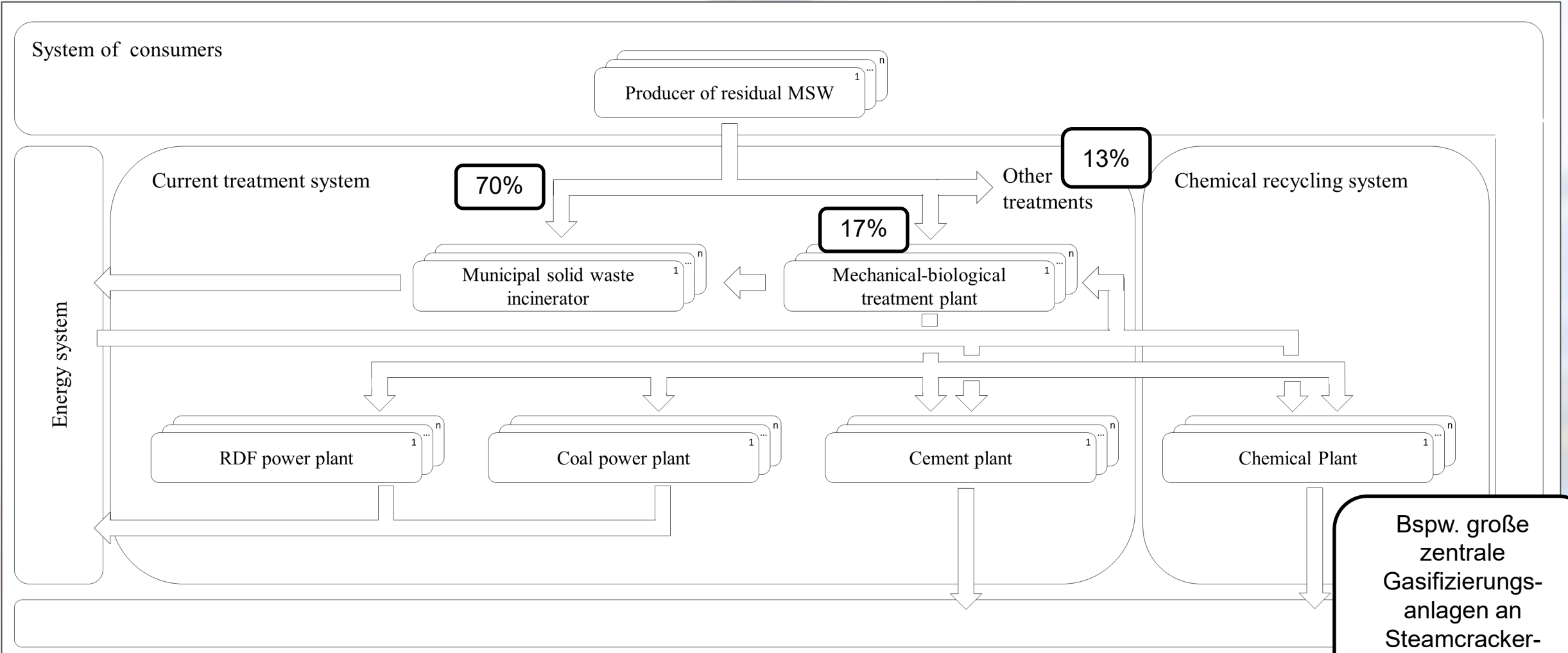
Zusammensetzung von Restmüll gemäß Literatur



UBA (2020)

III. ~25% Anteil an Produkten der chemischen Industrie

Hauptsystem zur Restabfallbehandlung in Deutschland + chemische Recyclingroute



IV. Anlagenstruktur für notwendige Vorbehandlung von Restmüll in Deutschland bereits vorhanden

Voss et al. (under review)

Forschungshintergrund (7/7)

Wie lauten konkrete Forschungsziele bzw. Forschungsfragen?

Bspw:

I.

Chemie- und Abfallindustrie sind etablierte Wirtschaftszweige in Deutschland mit gefestigten Strukturen und Abläufen. **Welche (partiellen) Transformationspfade in eine umfängliche Kreislaufwirtschaft existieren** für diese Sektoren und wie verlaufen sie?

II.

Restabfälle beschreiben interessante Einsatzstoffe für das chemische Recycling, weil derzeitige Verwertungswege mit Ressourcenverbrauch und Emissionsausstoß verbunden sind. Aber wie gestalten sich die **Vor- und Nachteile im systemischen Kontext** (bspw. zusätzliche Emissionen durch längeren Transport oder Behandlungskosten)?

Kurze Vorstellung

Arbeitsort und Dissertation

Forschungshintergrund

Kreislaufwirtschaft und chemisches Recycling

Methode

Agentenbasierte Modellierung

Ergebnisse

Investitionen, Behandlungskosten, CO₂

Ausblick

Nutzung der Ergebnisse im Kontext von ABM

Methode (1/7)

Forschungsziel skizziert ("Szenarien für eine Kreislaufwirtschaft in Deutschland") ✓

Abfallfraktion identifiziert (Restabfall) ✓

Gute Vorstellung vom derzeitigen System der Behandlung von Restabfällen ✓

Methode??

Entwicklung eines **computergestützten Modells**, um einen genaueren Blick in die inneren Mechanismen und die Zukunft des Systems zu werfen



Entwicklung eines Systemmodells

↳ basierend auf dem agentenbasierten integrierten Bewertungsmodell-Ansatz OTELLO/DECARBONISE (KIT)

I. OTELLO

- abgeschlossen 2010
- Energie, Stahl und Zementindustrie
- gemischter Modellansatz (agentenbasiert + Input-Output)



II. DECARBONISE

- abgeschlossen 2014
- Stahl- und Aluminiumindustrie auf der Grundlage des OTELLO-Ansatzes



III. TRANSFORM WASTE

(INTEGRATED AGENT BASED MODEL FOR MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT)

- Abschluss in 2021
- Chemische Industrie und Abfallindustrie
- z.B. Weiterentwicklung des agentenbasierten Modells von DECARBONISE

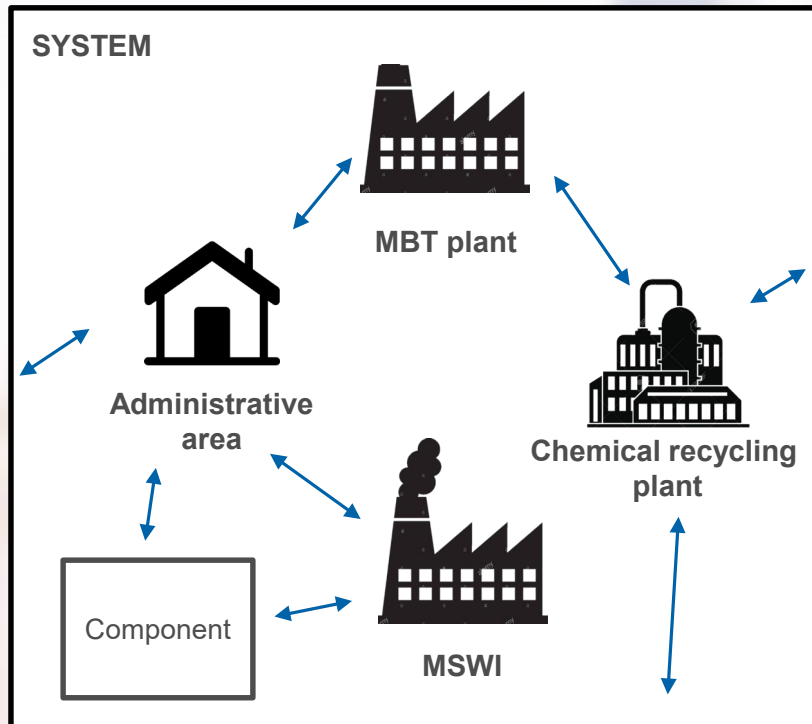


Methode (3/7)

Agentenbasierte Modellierung (1970er Jahre)

Die Individuen eines Systems agieren als **heterogene Akteure**, die Eigenschaften haben, Ziele verfolgen, kommunizieren, Systemzustände wahrnehmen und beeinflussen, mglw. irrational handeln und sich weiterentwickeln

Genau wie in der Realität **ergeben sich systemische Effekte** und die Weiterentwicklung des Systems teilw. **aus den Interaktionen der Agenten**



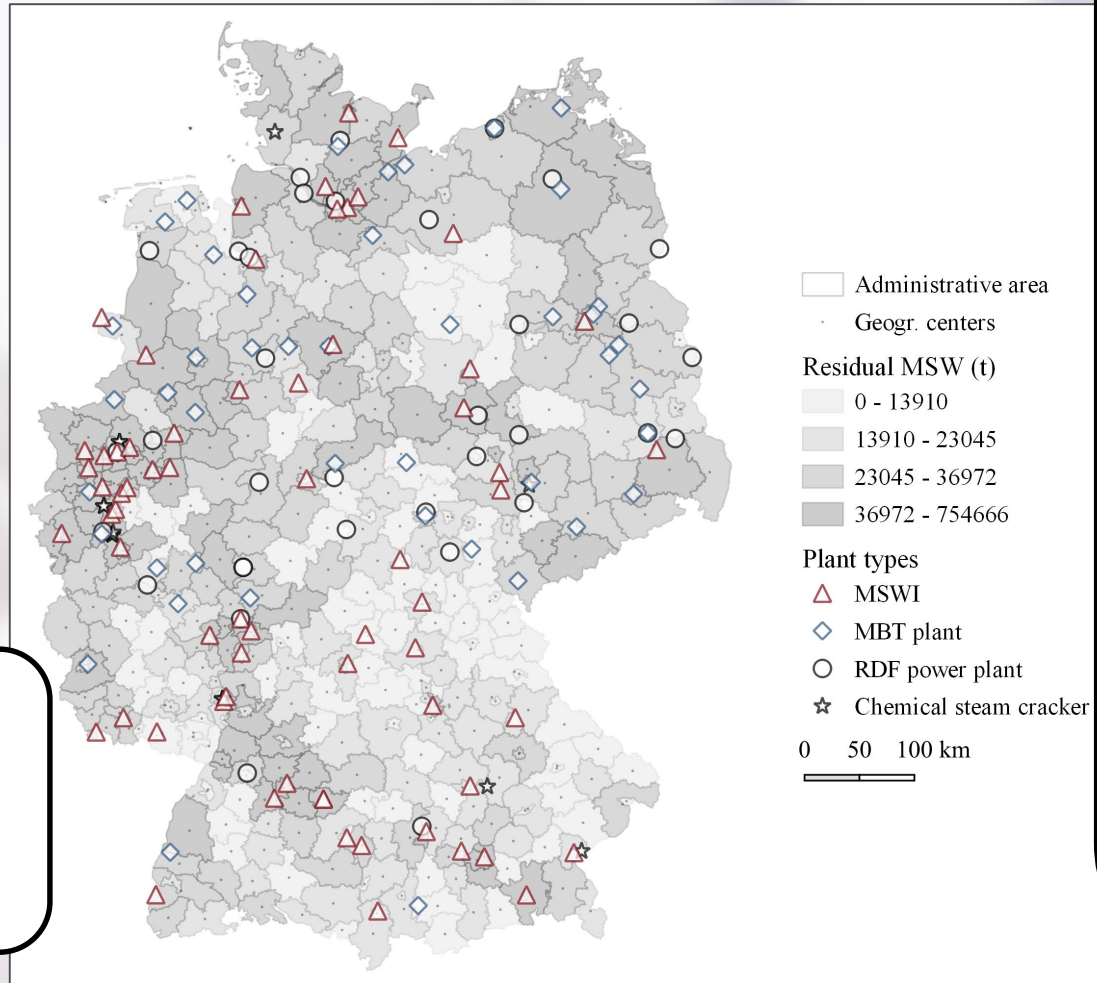
Zentrale **Vorteile** von ABM:

- Natürlicher Ansatz zur Untersuchung von Systementwicklung und Technologiediffusion
- Erlaubt die Berücksichtigung von Irrationalität und Unvollkommenheit
- Macht es einfach, logistische Aspekte zu berücksichtigen

Grundlegende **Anforderungen** von ABM:

- Umfassende und hochqualitative Datenbasis
- Anzahl der Agenten bzw. Agententypen überschaubar
- Irrationales Verhalten der Agenten begrenzt (bspw. durch gesetzliche Richtlinien)

Anlagenstruktur des Verwertungssystems für Restabfälle in Deutschland



System der Abfallproduktion
401 Landkreise bzw. kreisfreie Städte

Derzeitiger Anlagenbestand für die Behandlung von Restabfällen

66 Müllverbrennungsanlagen (MVA)
Gesamtkapazität: 20,634,782 t/a

44 Mechanisch-biologische Aufbereitungsanlagen (MBA)
Gesamtkapazität: 5,421,100 t/a

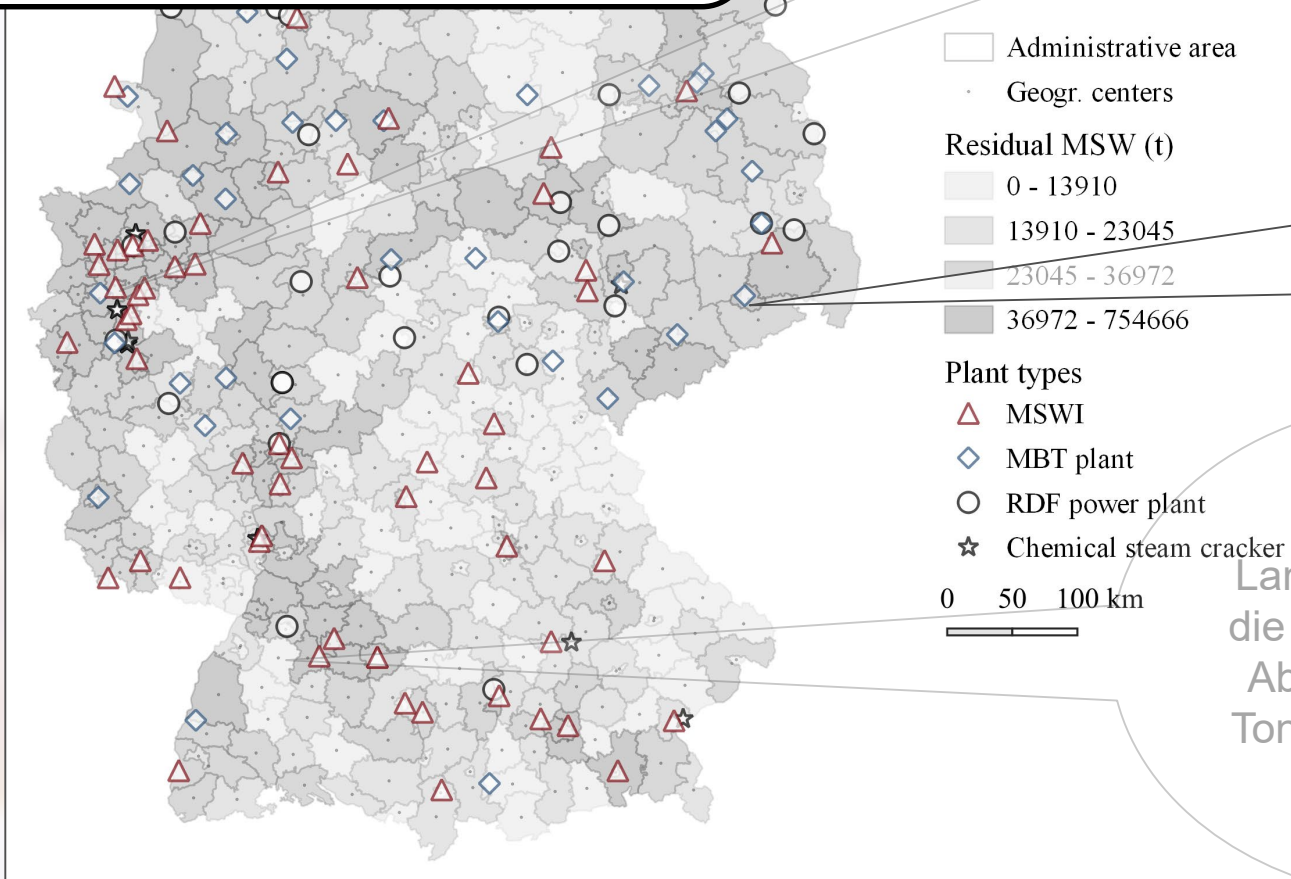
32 Ersatzbrennstoff Kraftwerke (EBS-Kraftwerke)
Gesamtkapazität: 6,310,750 t/a

13 Steamcracker
Potenzielle Abfallverwendung in der Zukunft

...

Modellmechanismus Ausschreibung Abfallbehandlungsvertrag

2021



Landkreis ... schreibt die Behandlung einer Abfallmenge von ... Tonnen Restmüll aus

Landkreis ...
Landkreis ... schreibt die Behandlung einer Abfallmenge von ... Tonnen Restmüll aus

Landkreis „Dresden, Stadt“ **schreibt die Behandlung einer Abfallmenge von bis zu 68.894 Tonnen Restmüll aus**

DESTATIS liefert Daten zum Abfallaufkommen für jeden Landkreis für die letzten 14 Jahre

2021

MBA 11 prüft die verfügbare Kapazität und **berechnet das Angebot** einschließlich Transport

MVA 22 prüft die verfügbare Kapazität und **berechnet das Angebot** einschließlich Transport

MBA 24 prüft die verfügbare Kapazität und **berechnet das Angebot** einschließlich Transport

Administrative area
Geogr. centers

Residual MSW

13910
23045
36972

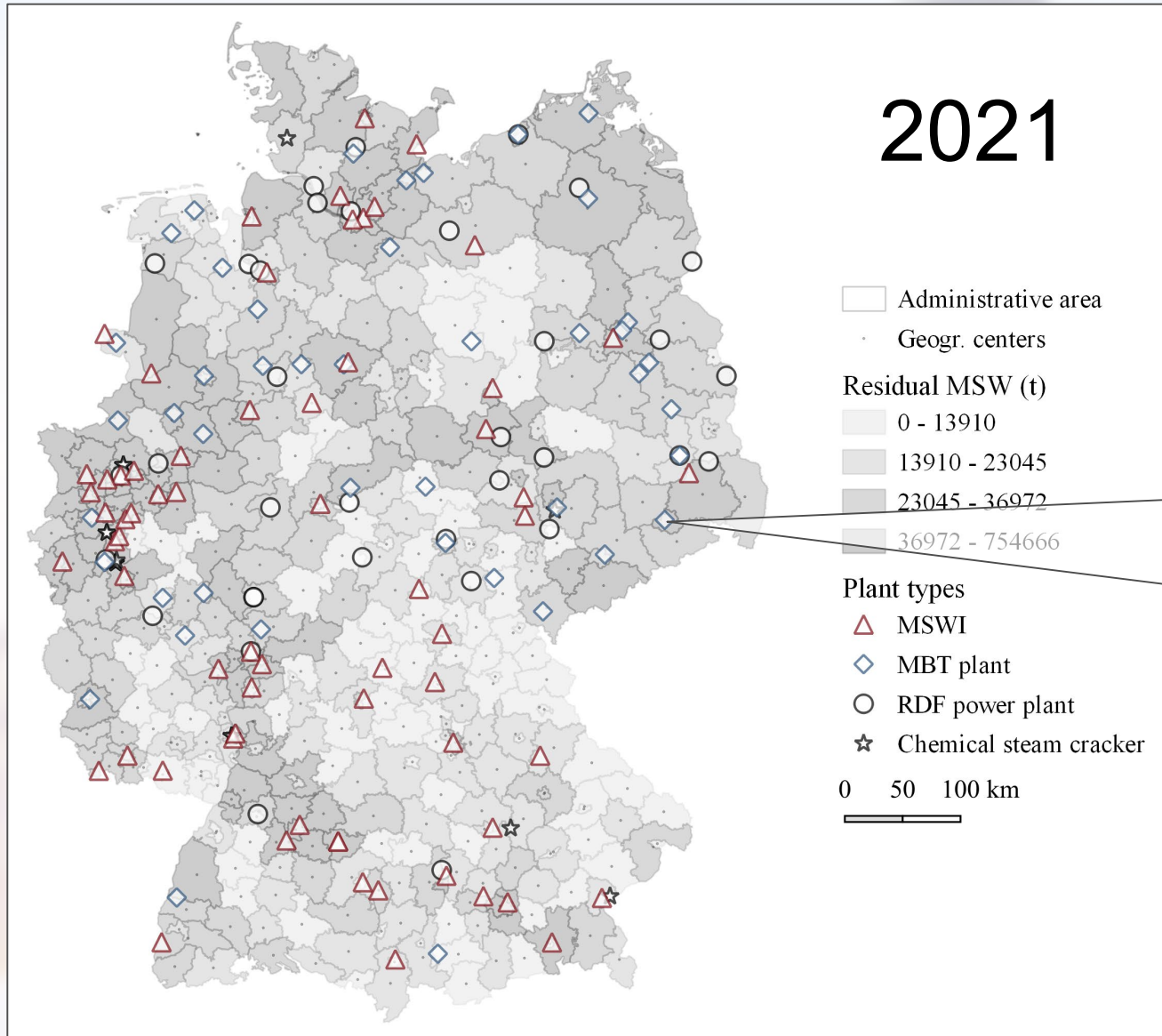
Plant types

△ MSW
◇ MBT
○ RDF p
☆ Chem

0 50 100

Es wird ein **Kostenkalkulationsschema** angewendet, das auf den Ein- und Ausgängen der Anlage für ein Jahr basiert

Typ	Faktor	Bspw.
Makrofaktoren	Regulatorik	CO ₂ -Bepreisung
	Marktbedingungen	Kosten für die Verwertung von EBS
Mikrofaktoren	Standortspezifische Faktoren	Auslastung, Abschreibungen



Landkreis „Dresden, Stadt“
entscheidet sich für MVA
22, **das günstigste
Angebot.**

Mit dieser Anlage wird ein
Vertrag über die
Behandlung der
Abfallmenge für die
kommenden Jahre
vereinbart (random 1-5).

Agenda

Kurze Vorstellung

Arbeitsort und Dissertation

Forschungshintergrund

Kreislaufwirtschaft und chemisches Recycling

Methode

Agentenbasierte Modellierung

Ergebnisse

Investitionen, Behandlungskosten, CO₂

Ausblick

Nutzung der Ergebnisse im Kontext von ABM

Welche Ergebnisse wurden bislang erzielt?

Bspw:

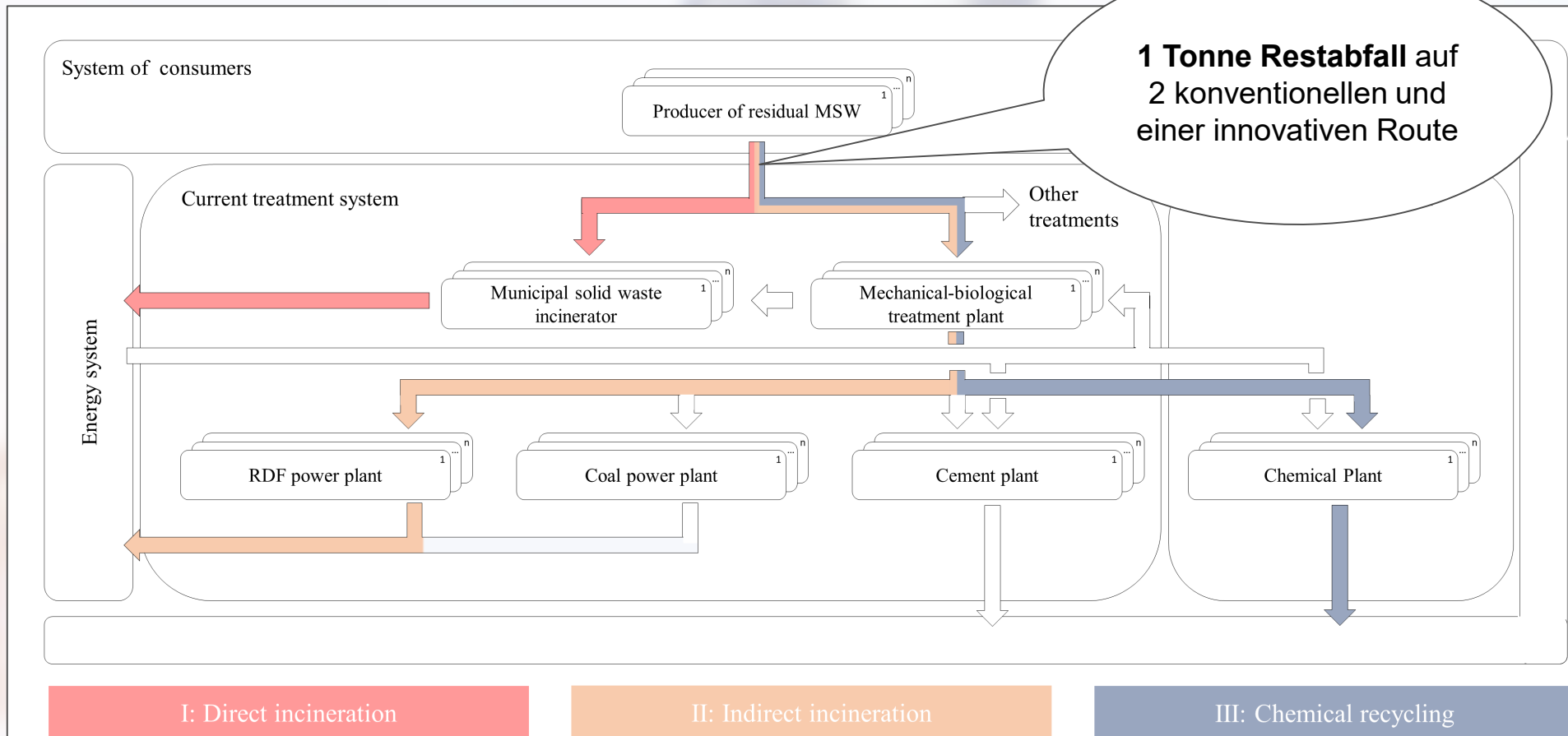
- I. Relevante Beiträge zu einzelnen Veröffentlichungen: Bspw. „***Sustainable waste management for zero waste cities in China: potential, challenges and opportunities***“, Lee, Meyer, Huang & Voss, 2020, Clean Energy

Vergleich deutsches Abfallsystem und chinesisches System; Ableitung von Handlungsoptionen

- II. Einreichung Erstautorenschaft: „***Comparative evaluation of incineration and chemical recycling for residual municipal solid waste: Greenhouse gas emissions reduction potential and associated costs***“, Voss, Lee, Seidl & Fröhling (under review), Waste Management

Zentrale Bausteine für das agentenbasierte Modell: bspw. Sachbilanzen von Anlagen und Kalkulationsschema

Veröffentlichung der Datenbasis



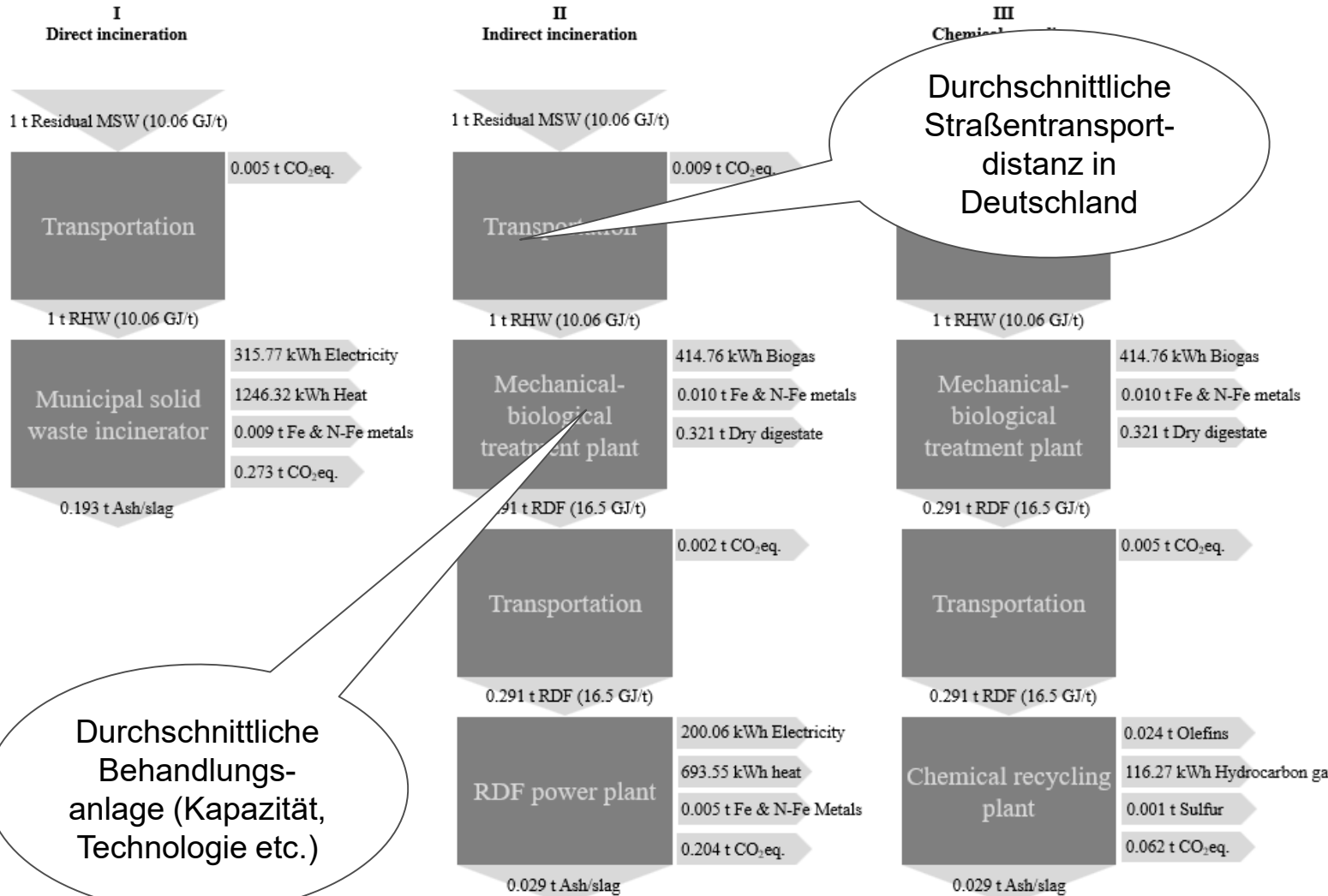
Behandlungswege

- (I) Verbrennung in einer Müllverbrennungsanlage
- (II) Behandlung in einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage & Verbrennung von EBS in einem EBS-Krafwerk
- (III) Behandlung in einer mechanisch-biologischen Aufbereitungsanlage & **chemisches Recycling** an einem Chemiestandort (Steamcracker)

I: Direct incineration

II: Indirect incineration

III: Chemical recycling



Modellierung mit EASTECH V. 3.1.7

- + Investitionsrechnung
- + Berechnung der Lohnkosten
- + Annahme mehrerer Zuschlagsfaktoren (z.B. Reparatur und Wartung)
- + Berechnung der durchschnittlichen Transportdistanz

Daten: EASETECH; German Federal Environmental Agency; DESTATIS; German Federal Agency for Cartography and Geodesy; Microsoft Bing; TUBAF (Aspen Plus; ...); ...

Voss et al. (under review)

The screenshot displays the EASETECH V3.1.7 software interface. On the left is a 'Modul-Bibliothek' (Module Library) with a tree view of process categories like 'Waste generation', 'Waste Technologies', and 'Energy technologies'. The main area shows a 'Prozess- oder Systementwicklungsfenster' (Process or System Development Window) with a flow diagram. Processes include 'Residual household waste, Germany, 2012 - Copy', 'Road, Truck, 14t-20t, Euro5 on highway, DK, 2009', 'Household waste (SF), Herring, DK, 2005, [1]', and 'Waste to energy plant, generic, DK, 2012 - Copy'. A callout circle highlights this diagram. Below the diagram is the 'Material generation: amount and fractions' window, which includes a table of material fractions.

Material fraction	%
Vegetable food waste_mod water content	27.51
Disposable sanitary products (cloths, gloves)	16.12215815486
Ash	7.52367380560132
Paper and carton containers	6.21001647446458
Milk cartons (carton/plastic)	5.13520593080725
Stones, concrete	4.65751235584843
Textiles	4.17981878089962
Hard plastic	4.00068369028007
Soft plastic	4.00068369028007

Modul-Bibliothek

Prozess- oder Systementwicklungsfenster

Informations- und Ergebnisfenster

EASETECH V3.1.7

Entwickelt an der Technischen Universität von Dänemark – DTU

Open source

Wurde in mehreren erfolgreichen Studien zum Abfallmanagement verwendet

Kommt mit einem reichhaltigen Datenpool und vordefinierten Modulen

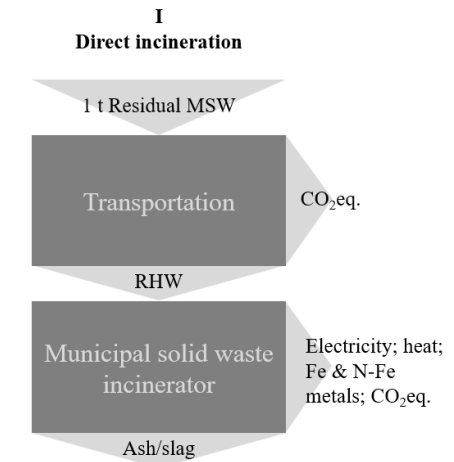
Table 1: Calculation scheme of total plant internal costs in 2020

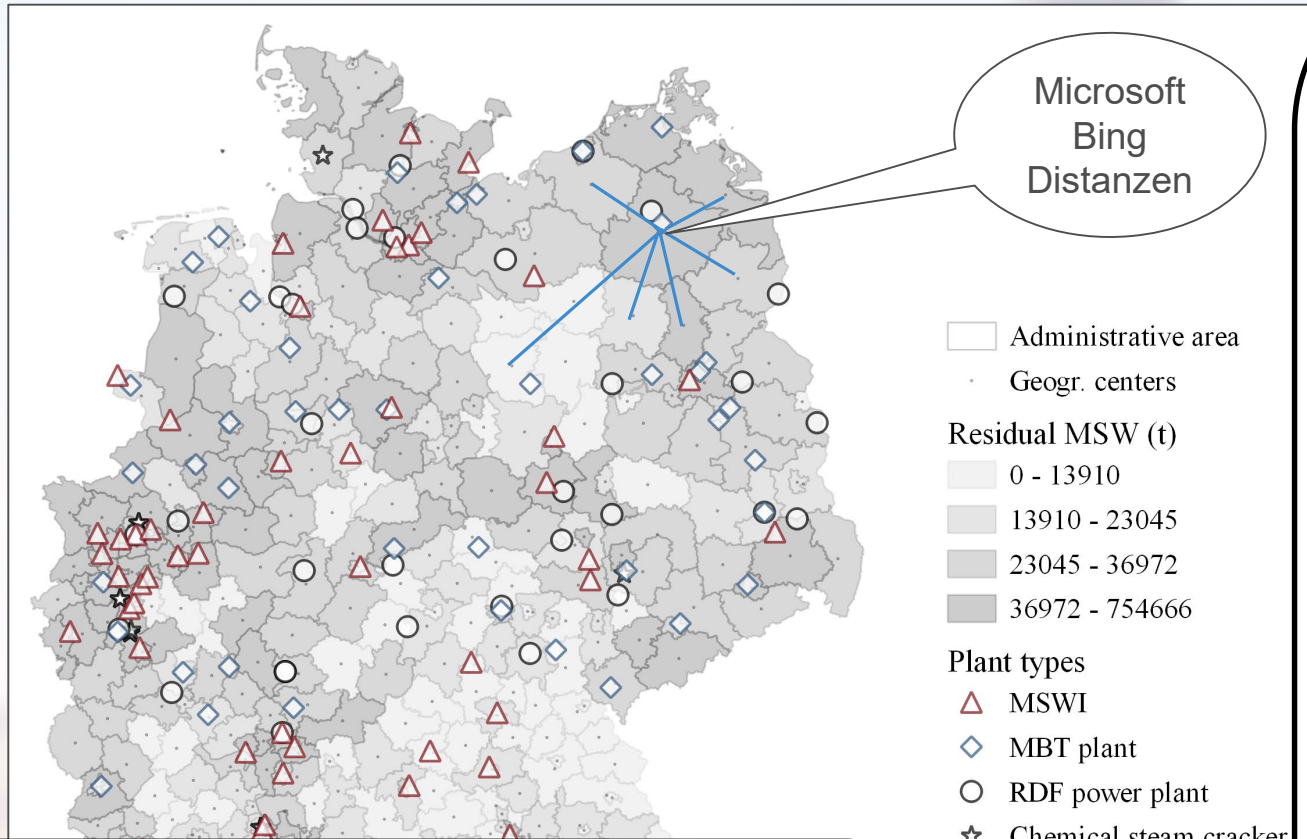
No.	Notation	Costs and revenues	Calculation	Category
1	c_1	Capital expenses	f (fixed capital investment; equity ratio; interest rate on borrowed capital; depreciation period)	Fixed costs
2	c_2	Local taxes & insurance	f (fixed capital investment; percentage local taxes; percentage insurance)	
3	c_3	Maintenance & repair	f (fixed capital investment; percentage maintenance & repair; factor consumables)	
4	c_4	Raw materials & supplies	f (total requirements of goods; prices for goods)	Variable production costs
5	c_5	Labor costs	f (total jobs in reference plant; plant capacity; capacity of reference plant; labor depression coefficient; workers per job; gross salary for a worker; percentage for supervision; percentage for r&d)	
6	c_6	Overhead costs	f (labor costs; percentage for overhead)	Production costs
7	c_7	Administration costs	f (labor costs; percentage for supervision; percentage for r&d; percentage for administration costs)	
8	c_8	Environmental expenses	f (output of emissions; prices for treatment/handling of emissions)	
9	r	Product revenues	f (output of products; selling prices for products)	Total operating costs

Wie kommen die einzelnen Behandlungsanlagen zu ihrem Angebot?



Entwicklung eines **einheitlichen Kostenkalkulationsschemas**, das sich auf Bestandsdaten und ergänzenden Daten stützt





- Administrative area
- Geogr. centers
- Residual MSW (t)
- 0 - 13910
- 13910 - 23045
- 23045 - 36972
- 36972 - 754666
- Plant types
- △ MSWI
- ◇ MBT plant
- RDF power plant
- ☆ Chemical steam cracker

0 50 100 km

Table 13: Average transportation distances for the basic analysis

km	Route to primary treatment		Distance from MBT plants to secondary treatment	
	MSWI	MBT plants	RDF power plants	Chemical recycling plant
General	40.578	68.101	58.905	138.150

Entfernungen beim Transport

Berechnung der durchschnittlichen Transportdistanzen auf Grundlage eines umfangreichen Datensatzes (46.000 Werte), der mit aggregierten Microsoft Bing-Abfragen in einem eigens programmierten Excel-Makro erstellt wurde:

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3			MBA				
4			No.	1	2	3	... 44
5	Landkreise	No.	Geocords	53.30016, 10.52.82422,	8.652.64147, 13.52.5813,	13	
6			1	54.785147, 9.213,630327	295,131901	425,160102	426,06090
7			2	54.3251211, 151,030709	232,532286	343,579543	344,48035
8			3	53.872715, 116,901007	209,655176	292,355495	293,25630
			...				
			401				

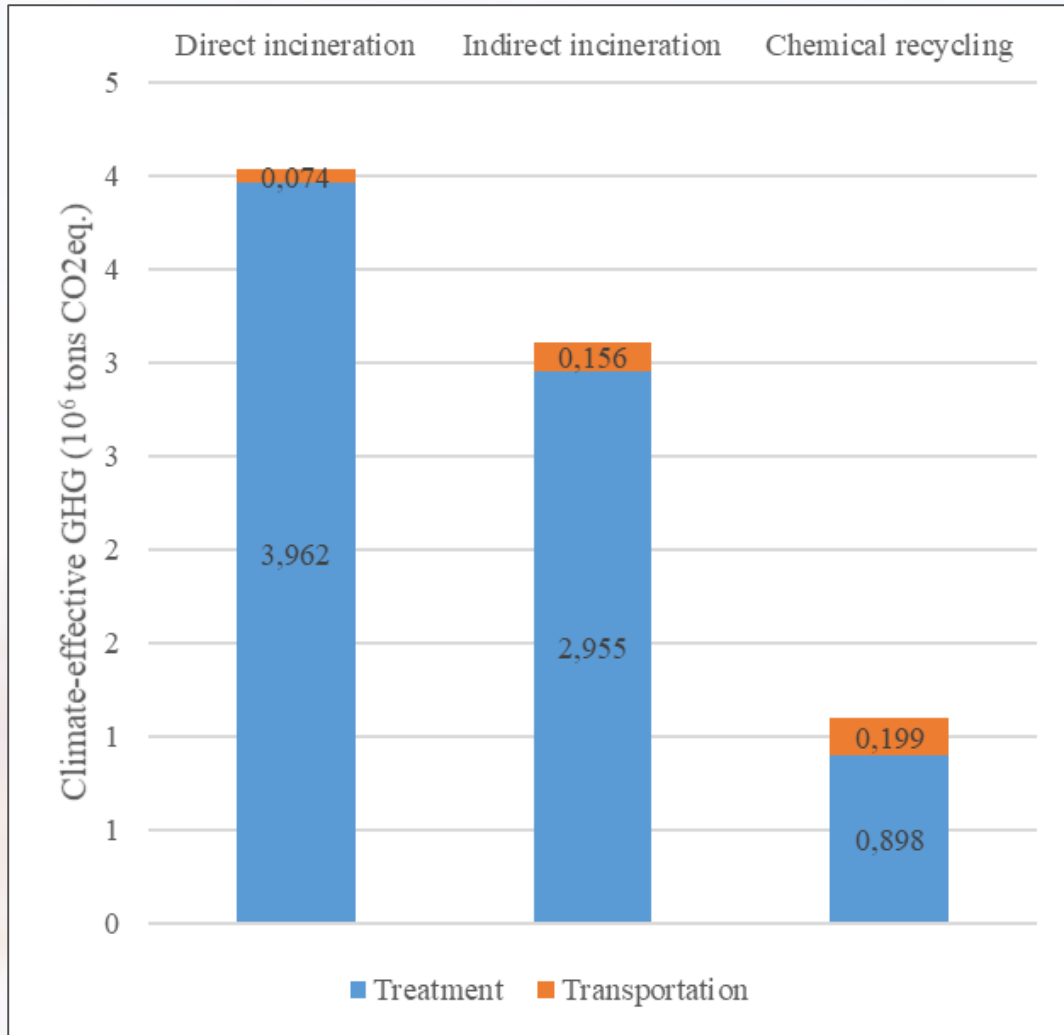
Formeln

$$dist_{pinttp}^{MSWI|MBT\ plant} = \sum_{aa} \frac{wp_{aa} \cdot mindist_{aa,pt}}{wp} \quad (2.1)$$

$$dist_{pinttp}^{RDF\ power\ plant|CR\ plant} = \sum_{aa} \frac{wp_{aa} \cdot mindist_{aa,pt,st}}{wp} \quad (2.2)$$

- with
- $dist_{pinttp}$... Approximated average transportation distance to a plant type $pinttp$
 - wp_{aa} ... Residual MSW production in administrative area aa
 - $mindist_{ii,pt}$... Road distance from administrative area aa to closest primary treatment plant pt
 - wp ... Total amount of residual MSW produced in all administrative areas
 - $mindist_{aa,pt,st}$... Road distance from primary treatment plant pt nearest to the administrative area aa to the nearest secondary treatment plant st

Ökologische Ergebnisse



Klimawirksame (fossile) CO₂-Emissionen

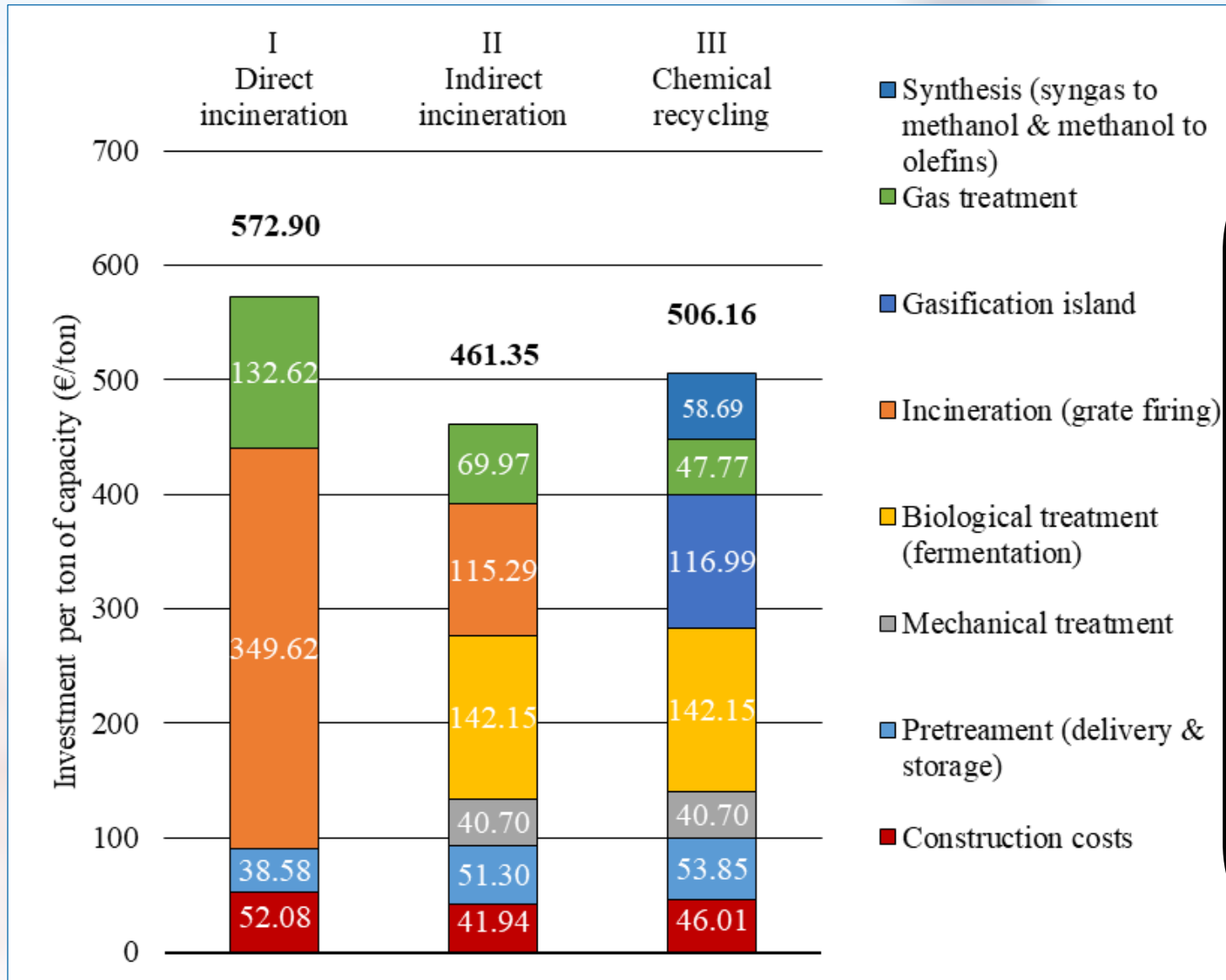
Geringer Einfluss des **Transports** bei der Abfallverbrennung, hoher Einfluss beim chemischen Recycling

No.	Type	Kg/ton input	Reason for reduction
1	Direct incineration	278.6	-
2	Indirect incineration	214.7	MBT sorting step (not all fossil carbon goes into RDF)
3	Chemical recycling	75.7	Carbon capture in product

Hochrechnung auf die Gesamtmenge des Restmülls in Deutschland:

Die Route 3 spart 2 Millionen Tonnen CO₂ (0.26%*) im Vergleich zur Route 2 und 3 Millionen (0.4%*) im Vergleich zur Route 1

*751 Mio. Tonnen fossile THG für Deutschland in 2020



Ökonomische Ergebnisse

Investitionen

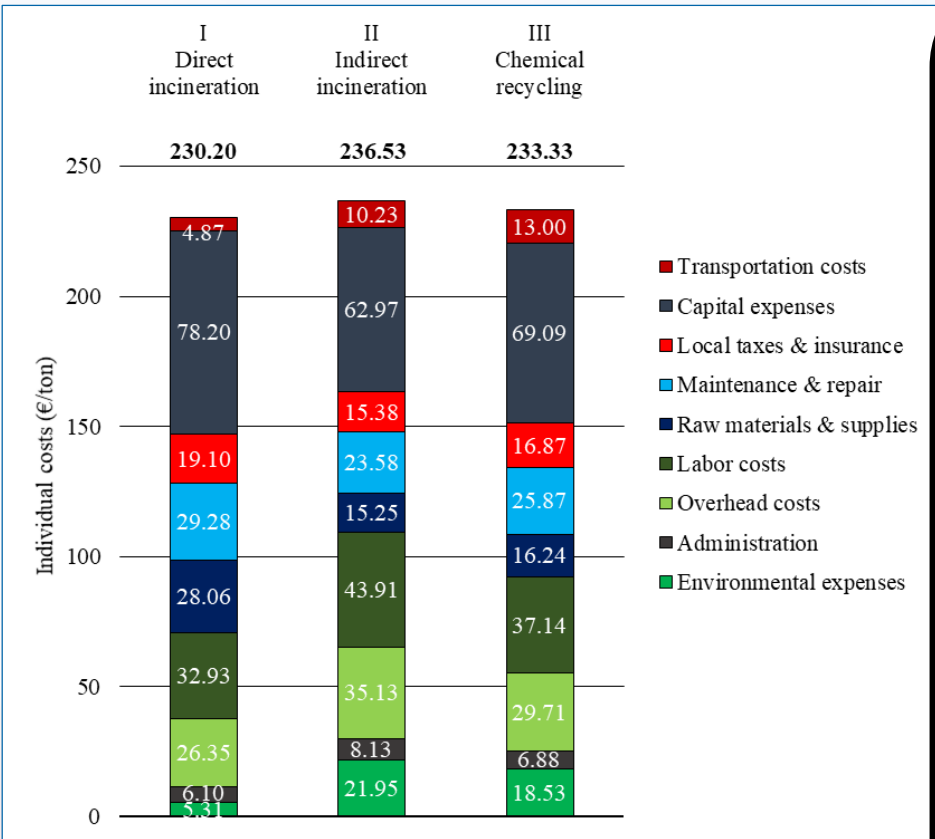
Die höchsten **relativen** Investitionen für den direkten Verbrennungsweg (572,90 €/Tonne Restabfallkapazität), niedrigere für das chemische Recycling (506,16 €) und die niedrigsten für die indirekte Verbrennung (461,35 €).

- Warum CR besser als MVA? -

- MBA verursacht nur geringe relative Investitionen
- Die Annahmen von TUBAF für die optimale Kapazität einer Gasifizierungsanlage sind sehr hoch. Daher führen Skaleneffekte zu einer relativen Investition vergleichbar zum EBS-Kraftwerk

ABER: Hohe absolute Investitionen für die chemische Recyclingroute könnten als Gatekeeper für die Technologiediffusion wirken!

Ökonomische Ergebnisse

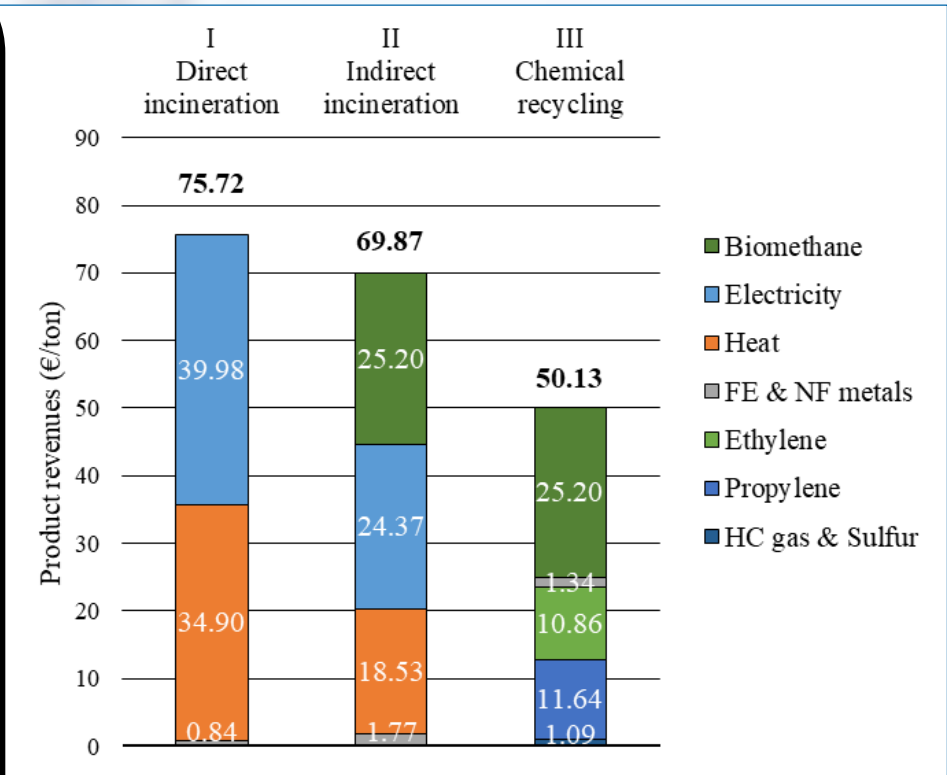


Behandlungskosten

Höchste Behandlungskosten für chemisches Recycling (183,20 €), mittlere Behandlungskosten für indirekte (166,66 €) und niedrigste für direkte Verbrennung (154,48 €)

Ausschlaggebend sind geringe Behandlungserlöse und die Belastung durch den Zertifikatshandel

ABER: Konventionelle Olefinpreise für chemisches Recycling angenommen



Voss et al. (under review)

CO₂-Zertifizierung

Bei CO₂-Zertifikaten von 130€/t wäre das chemische Recycling konkurrenzfähig. Ab 100€/t bei Freistellung von CR

Ergebnisse (10/10)

Schlussfolgerungen

- **Chemisches Recycling zeigt eine bessere Umweltverträglichkeit als die derzeitigen Wege der Behandlung von Restabfällen**, was durch geringere CO₂-Emissionen nachgewiesen wird.
- Chemische Recyclingkonzepte können bereits heute in Bezug auf **Investitionen wettbewerbsfähig sein**.
- Chemisches Recycling ist derzeit **mit höheren Behandlungskosten verbunden**, die letztlich von der Gesellschaft getragen werden müssen. In naher Zukunft könnte sich diese Situation jedoch umkehren, in erster Linie durch verstärkte staatliche Sanktionen für Treibhausgasemissionen.
- Die isolierte Betrachtung der verschiedenen Behandlungswege für Restmüll ist nur ein Element ihrer Bewertung. **Es sind komplexere systemische Betrachtungen erforderlich**, um ein tieferes Verständnis des derzeitigen Systems und potentieller Gatekeeper für innovative Recyclingkonzepte zu gewinnen.

Agenda

Kurze Vorstellung

Arbeitsort und Dissertation

Forschungshintergrund

Kreislaufwirtschaft und chemisches Recycling

Methode

Agentenbasierte Modellierung

Ergebnisse

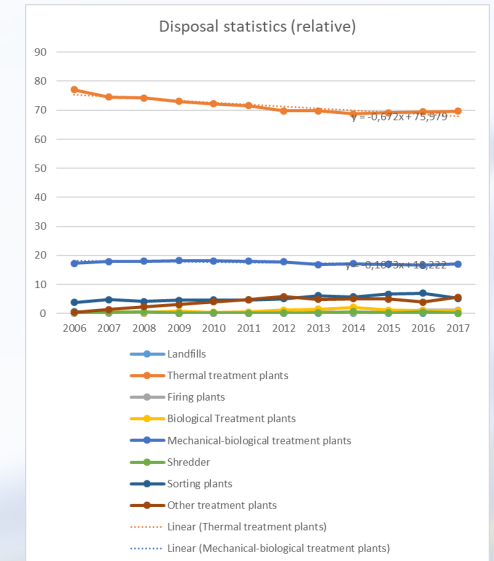
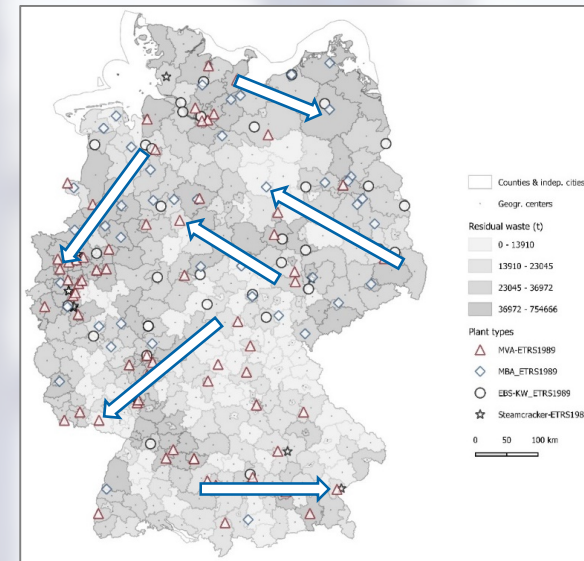
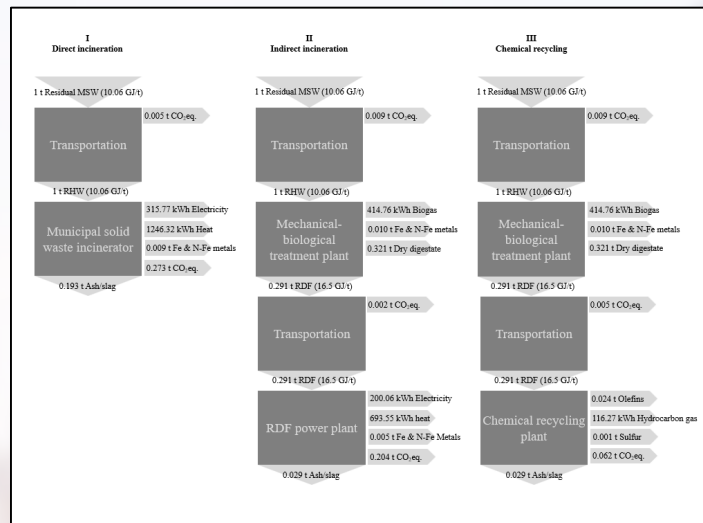
Investitionen, Behandlungskosten, CO₂

Ausblick

Nutzung der Ergebnisse im Kontext von ABM

Ausblick (1/5)

Systemanalyse mit agentenbasiertem integrierten Bewertungsmodell



2020


Könnte diese Technologie von Nutzen sein?

1990 - 2050

Ist es wahrscheinlich, dass sich diese Technologie Verbreitung findet? Was könnten Einflussfaktoren sein?

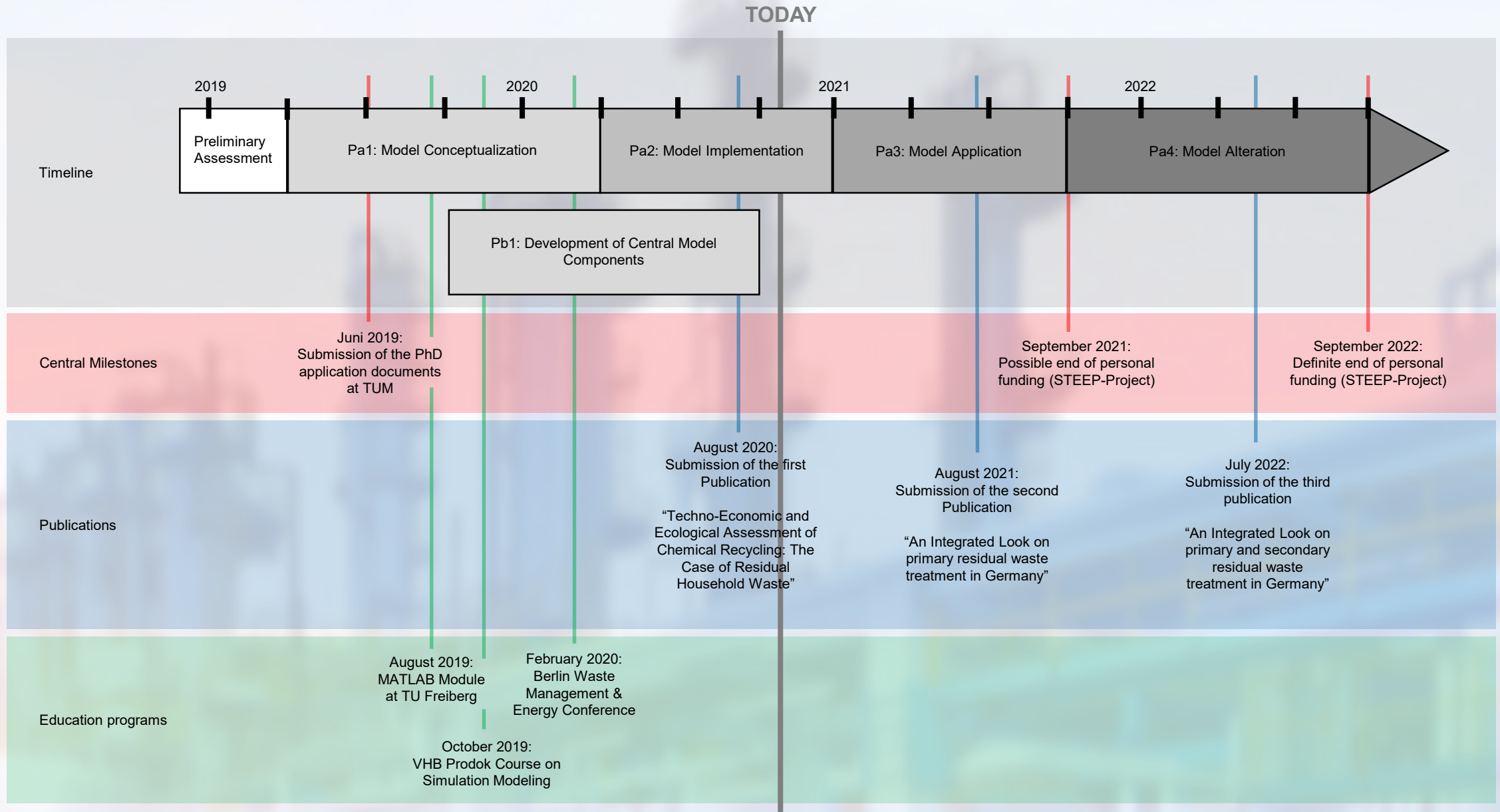
Schritte der Modellumsetzung

Entwicklung des Modellkonzepts ✓
Entwicklung der Datengrundlage ✓
Implementierung des Modells ✓
Kalibrierung ←
Validierung
Erweiterung
Kalibrierung
 ...



Characteristic	No.
Programming platform	MATLAB R2019a
Lines of code	~4500
Runtime	30-50 minutes
Simulation period	1990 - 2050
Temporal resolution	1 year
Environmental outputs	GHG (CO ₂ , CO)
Economic outputs	Mainly waste treatment costs for every single administrative area and every single MBT plant
Scenarios	A: No chemical recycling B: Centralized chemical recycling in a large scale Gasification plant after 2025 C: Decentralized chemical recycling in 13 small scale gasification plants after 2025

Ausblick (3/5)



Offene Herausforderungen bezüglich des Modellkonzepts

No.	Typ	Herausforderung	Mögliche Lösung
1	Initialisierung des Modells	Initialisierung der Entsorgungsverträge im Basisjahr der Modellierung	<ul style="list-style-type: none"> • Annahme einer einjährigen Vertragslaufzeit • Gesonderten Initialisierungszeitraum vor der Validierungsphase implementieren
2	Systemgrenzen	Auch andere Fraktionen haben einen Einfluss auf die verfügbaren Kapazitäten der Abfallbehandlungsanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Auslastung durch andere Abfallfraktionen wird jährlich per Zufall generiert
3	Modellmechanik	Investitionsentscheidungen chemischer Standorte schwer abzubilden	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung konkreter Szenarien (in 2030 existiert eine zentrale Anlage, ...) • Kapitalwertmethode

Ausblick (5/5)

Mögliche Erweiterungen des Modells

1. Ergänzung weiterer Fraktionen (bspw. Leichtverpackungen)
2. Implementierung weiterer Technologien (bspw. Pyrolyse, CCS, CCU)
3. Erweiterung der ökologischen Betrachtung (bspw. Ressourcenverbrauch etc.)
4.

Vielen Dank für das Interesse

Fragen oder Kommentare?

Raoul L. Voss

Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC)

TU Bergakademie Freiberg

Email: raoul-lukas.voss@iec.tu-freiberg.de

Tel: +49 3731 39 4710

Acknowledgements: This research is supported by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) through the research project grant no. 01LN1713A to the research group Global Change: STEEP-CarbonTrans. Any opinions, findings, conclusions and recommendations in the document are those of the authors and do not necessarily reflect the view of the BMBF.

Literatur

ACC, 2020. Plastics - What is advanced recycling? <https://plastics.am>

BfJ, 2017. Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die hochwertige Verwertung von Verpackungen. <https://www.gesetze-im-internet.de/verpackg/VerpackG.pdf>.

BMU, 2020. Faserverbundwerkstoffe: Zukunftsmaterial mit offener Entsorgung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. <https://www.umweltbundesamt.de/faserverbundwerkstoffe-zukunftsmaterial-offener#faserverbundwerkstoffe-und-ihr-potenzial-fur-klima-und-ressourcenschonung>

BR, 2019. Oberpfälzer Firmen bekommen ihren Müll nicht mehr los. Bayrischer Rundfunk. <https://www.br.de/nachrichten/bayern/oberpfaelzer-firmen-bekommen-ihren-muell-nicht-mehr-los,RYT9Ais>

bvse, 2019. Umfrage sieht Entsorgungsbranche am Limit. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung. <https://www.bvse.de/recycling/pressemitteilungen/5112-umfrage-sieht-entsorgungsbranche-am-limit.html>

Conversio, 2020. Studie Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Kurzfassung. https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/kurzfassung_stoffstrombild_kunststoffe_2019?e=14847134/80757890

DESTATIS, 2019. Umwelt - Abfallentsorgung. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallentsorgung-2190100177004.pdf?__blob=publicationFile

EC, 2019. Best available techniques reference document for waste incineration. ISSN: 18319424.

Freistaat Sachsen, 2009. Klimarelevanz und Energieeffizienz - Untersuchungen zur Klimarelevanz der Abfallwirtschaft in den Abfallverbänden des Freistaates Sachsen. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13774/documents/15997>

IGW, 1999. Stabilisierung von Restmüll durch mechanisch-biologische Behandlung und Auswirkungen auf die Deponierung. https://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/26407_-_Abschlussbericht.pdf

- Lee, Roh Pin; Meyer, Bernd; Huang, Qiueliang, Voss, Raoul, 2020. Sustainable waste management for zero waste cities in China: potential, challenges and opportunities. *Clean Energy*; <https://doi.org/10.1093/ce/zkaa013>
- Mamani, P., Seidl, L.G., Keller, F., Lee, R.P., Meyer, B., 2020. Chemisches Recycling - Aktueller Stand und neue Entwicklungen, in: Thomé-Kozmiensky, E., Holm, O., Friedrich, B., Goldmann, D. (Eds.), *Recycling and secondary raw materials* - 13. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, Nietwerder, pp. 268–284. ISBN: 9783944310510.
- Materazzi, M., Lettieri, P., Taylor, R., Chapman, C., 2016. Performance analysis of RDF gasification in a two-stage fluidized bed-plasma process. *Waste Manage.* 47 (Pt B), 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.016>
- Miandad, R., Nizami, A.S., Rehan, M., Barakat, M.A., Khan, M.I., Mustafa, A., Ismail, I.M.I., Murphy, J.D., 2016. Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil. *Waste Manage.* 58, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.023>
- MSV, 2019. Carbonfaser-verstärkte Kunststoffe haben auch im Automobilsektor eine Zukunft. *EU-Recycling(05)*, 34. <https://eu-recycling.com/Archive/23368>
- PRE, 2020. Chemical recycling. <https://www.plasticsrecyclers.eu/chemical-recycling>
- Quicker, P., Neuerburg, F., Noël, Y., Huras, A., Eyssen, R.G., Seifert, H., Vehlow, J., Thomé-Kozmiensky, K., 2017. Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen. ISSN: 18624359. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-03-06_texte_17-2017_alternative-thermische-verfahren_0.pdf
- UBA, 2011. Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung. ISSN: 18624804.
- UBA, 2018b. Energieerzeugung aus Abfall. ISSN: 18624359.
- UBA, 2020. Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien. ISSN: 18624804.
- Voss, R., Lee, R. P., Seidl, L., Fröhling, M., under review. Comparative evaluation of incineration and chemical recycling for residual municipal solid waste: Greenhouse gas emissions reduction potential and associated costs, *Waste Manage.*