

# **Entwicklung einer Steuerungsstrategie für biotechnologische Prozesse in der Abfallbehandlung - mechanisch-biologische Restabfallaufbereitung im Drehrohr -**

**Bela Bartha, Joachim Brummack**

Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Technische Universität Dresden

## **Development of a control strategy for biotechnological processes in the waste treatment**

### **Abstract**

In a research project the control of a discontinuous operated rotary drum reactor for biological drying of residual wastes was developed. At solving the problem two new approaches have been followed: the developed control concept is based on the application of classification methods and the use of the dynamic rotary drum does not belong to the state-of-the-art. By the experiments made it could be shown, that the determined combination of biological and mechanical processes within the reactor leads to output qualities that cannot be reached with static reactors.

### **Abstract deutsch**

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde eine Steuerung für einen diskontinuierlich betriebenen Drehrohrreaktor zur biologischen Trocknung von Restabfällen entwickelt. Bei der Lösung der Aufgabe wurden neue Ansätze für die Restabfallaufbereitung verfolgt. Das Steuerungskonzept basiert auf Klassifikationsmethoden. Der Einsatz eines dynamisch arbeitenden Drehrohrreaktors für die biologische Trocknung (MBS) weist über den Stand der Technik hinaus. Durch Versuche mit Originalabfall (Restabfall) konnte in einer speziell entwickelten kleintechnischen Versuchsanlage experimentell nachgewiesen werden, dass die reaktorspezifische Kombination von biologischen, mechanischen und thermodynamischen Prozessen innerhalb eines Reaktors Outputqualitäten ermöglicht, die den mit üblichen statischen Reaktoren erreichbaren Eigenschaften insbesondere bezüglich des Verhaltens in den folgenden Verarbeitungsstufen deutlich überlegen sind.

### **Keywords**

biological drying, MSW, rotary drum reactor, control concept, Fuzzy-logic, classification

biologische Trocknung, Restabfall, Drehrohrreaktor, Steuerungskonzept, Fuzzy-Logik, Klassifikation

## **1 Einleitung**

Aerobe biochemische Prozesse stellen den entscheidenden stoffwandelnden Schritt in zahlreichen umwelttechnischen Verfahren dar. Die Besonderheit dieser Verfahren besteht darin, dass sie die in der Natur nur spontan ablaufenden und auf sauerstoffversorgte Schichten begrenzten Prozesse durch technische Maßnahmen auf die Behand-

lung großer Substratmengen bzw. -volumina übertragen. Dazu ist vor allem eine bestimmte Entkopplung der Prozesse von den Umgebungseinflüssen erforderlich, um diese stets in ihrem Optimum führen zu können.

Die Nutzung aerober biologischer Prozesse zur Behandlung biogener Feststoffe in statischen Schüttschichten bzw. Haufwerken stellt eine naturwissenschaftlich begründet nur mit Kompromissen lösbare Aufgabe dar. Einer adäquaten Steuerung solcher Prozesse sind objektiv enge Grenzen gesetzt. Dies bedeutet für die statischen Prozesse, z.B. bei den aktuellen Technologien der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung, dass nur eine vergleichsweise schematische Prozessführung realisierbar ist. Der Komplexität der zu führenden Prozesse kann eine solche Herangehensweise nicht gerecht werden. Eine solche suboptimale Prozessführung führt zu schlechteren, erheblichen Schwankungen unterliegenden Prozesseigenschaften und/oder Produktqualitäten, verlängerten Behandlungszeiten, hohen Eigenenergieverbräuchen sowie zu Akzeptanzproblemen bei den Anliegern wegen nicht behebbarer Geruchsemissionen.

Prozesse in voll durchmischten Systemen, mit *einem* als optimal annehmbaren Arbeitspunkt bieten dagegen Ansätze für intelligente Steuerungsalgorithmen. Beispiele aus der Praxis sind bei der aeroben Abwasserreinigung (Belebtschlammverfahren) z.B. für die pH-Wert-Regelung des Zuflusses zu finden.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde an der TU Dresden ein Steuerungskonzept für biotechnologische Massenprozesse entwickelt und am Beispiel der biologischen Trocknung, allgemein als mechanisch-biologische Restabfallstabilisierung (MBS) bezeichnet, in einem diskontinuierlich betriebenen Drehrohrreaktor umgesetzt.

## 2 Mechanisch - biologische Restabfallbehandlung

### 2.1 Stand der Technik

Die Veränderungen der gesetzlichen Rahmen für eine Deponierung und das Umdenkens beim Umgang mit Restabfall haben die mechanisch - biologische Abfallaufbereitung zu einem festen Bestandteil der Restabfallentsorgung und -nutzung entwickelt. Bei aeroben Verfahrenskonzepten ist zwischen zwei Hauptzielen zu unterscheiden:

- Stabilisierung durch quantitativen Abbau von nativen Kohlenstoffverbindungen zur Erzeugung einer ablagerungsfähigen sowie einer heizwertreichen Fraktion (**MBA**) und
- ausschließliche Stabilisierung durch biologisch unterstützten Feuchteentzug und anschließender Stoffstromtrennung (**MBS**) ohne Erzeugung einer anlagerungsfähigen Fraktion.

Bei der Stabilisierung vor einer Ablagerung (MBA) soll ein Großteil der organischen Bestandteile im Abfall abgebaut werden, um spätere unerwünschte biologische Prozesse im Deponiekörper zu unterbinden. Die Anforderungen an die Eigenschaften des Rotteoutputs (Deponiematerial) sind durch die AbfAbIV festgelegt.

Bei der Trocknung (MBS) ist nur so viel Abbauleistung erforderlich, wie Energie für die Verdunstung von Feuchtigkeit bis zur Trockenstabilisierung benötigt wird. Dies ist mit einem intensiven Prozess zu erreichen, dessen Laufzeit um etwa eine Größenordnung kürzer ist als die für die biologische Stabilisierung erforderliche Zeit. Durch die Trocknung wird eine Modifizierung der physikalischen Eigenschaften des Abfalls erzielt. Die Gewinnung einer heizwertreichen und schadstoffentfrachteten Fraktion mit Brennstoffeigenschaften, sowie weiterer stofflich verwertbarer Fraktionen (Metalle, Mineralien) durch bekannte physikalische Trennverfahren (Sieben, Sichten, Magnetabscheiden) wird ermöglicht.

Abgesehen von einigen prototypischen Anlagen werden sowohl in der aeroben MBA- als auch in der MBS-Technologie statisch arbeitende Reaktoren in Form von Rottetunneln, Rotteboxen sowie weitere vom Grundprinzip nicht abweichende Variationen davon für die biologischen Intensivstufen eingesetzt. Das bedeutet, dass unabhängig vom Prozessziel die gleichen grundsätzlichen Bedingungen vorliegen. In den weiteren Betrachtungen muss deshalb nicht zwischen beiden unterschieden werden.

Statische Reaktoren sind hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens, einschließlich ihrer Steuerbarkeit, bereits aus der Bioabfallverwertung bekannt. Der Einsatz statischer Reaktoren bedingt zwangsweise, dass alle physikalischen Prozessstufen vor bzw. nach der biologischen Behandlung zu realisieren sind. Aus diesem sequentiellen Prozessablauf folgt, dass die für die Rotte optimalen physikalisch-chemischen Eigenschaften des Substrates vor dem biologischen Prozess eingestellt werden müssen. Definierte Eingriffsmöglichkeiten auf die wichtigsten Haufwerksparameter sind während eines laufenden statischen Prozesses ausgeschlossen. Dadurch kann im Wesentlichen nur empirisch vorgegangen werden. Signifikante Parameter wie Haufwerksstruktur und Materialfeuchte sind nicht echtzeitfähig bestimmbar.

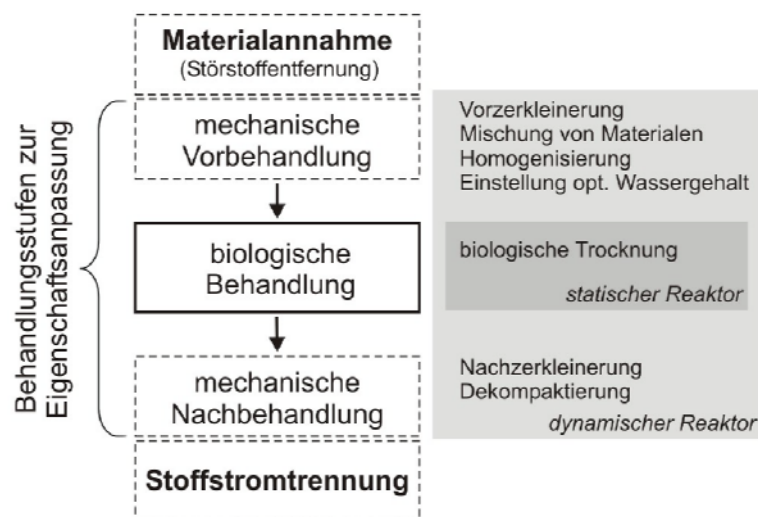
Ob und inwieweit eine physikalische Behandlung vor der biologischen Stufe tatsächlich effektiv ist, hängt in erster Linie von der Anfallfeuchte des Inputmaterials ab. Liegt diese im Bereich von größer 40 Ma.-%, was für mittlere und große Städte in Deutschland und vergleichbaren Ländern relativ unabhängig von einer installierten Bioabfallgetrennsammlung typisch ist, erfordert eine physikalische Stoffstromtrennung vor der biologischen Behandlung wegen der eingeschränkten Trennbarkeit einen hohen apparativen und energetischen Aufwand. Schlecht trennbare Gemische führen generell zu erhöhtem Verschleiß an Apparaten mit entsprechenden Folgen für die Instandhaltungskosten. Für solche Restabfälle ist es interessant, dynamische Reaktoren einzusetzen, die die

Kopplung thermischer und mechanischer Prozesse erlauben, also biologische Behandlung und mechanischen Aufschluss parallel zulassen (BARTHA ET AL, 2003). Eine exakte Bewertung nachhaltiger Auswirkungen des Einsatzes dynamischer Reaktoren in der Restabfallbehandlung durch einen direkten Vergleich ist gegenwärtig nicht möglich, da nicht nur wegen der höheren Investitionskosten, sondern auch auf Grund negativer Erfahrungen beim Einsatz so genannter Rottetrommeln in der Bioabfallverwertung kein Einsatz dynamischer Reaktoren in der Praxis vorgesehen ist.

## 2.2 Drehrohrreaktoren in der Abfallwirtschaft

Drehrohrreaktoren oder Rottetrommeln werden seit den 1930er Jahren in der aerob biologischen Behandlung von Abfällen eingesetzt. Sie kamen in den 70er Jahren weltweit in vielen Müllkompostieranlagen zum Einsatz. Die eingesetzten Drehrohre wurden kontinuierlich betrieben und hatten ähnliche Dimensionen wie die Drehrohröfen der Zementindustrie. Ein Großteil dieser Kompostierungsanlagen hat, wegen schlechter Outputqualität, gedacht war der Produkteinsatz als Bodenverbesserungsmittel, ihren Betrieb jedoch eingestellt. Bekannt ist derzeit der Einsatz von Drehrohrreaktoren in Anlagen u.a. in den USA, Frankreich und Australien.

Durch Formulierung neuer Behandlungsziele, wie z.B. die Vorbehandlung von Restabfällen vor einer qualitativ hochwertigen Stoffstromtrennung, eröffnen sich gerade jetzt neue Einsatzfelder für Drehrohrreaktoren.



**Abbildung 1** Verfahrensschritte bei der MBS

Die wesentlichen Vorteile des Drehrohres können bereits mit einer qualitativen Prozessanalyse beschrieben werden. Der wesentliche Unterschied zwischen Verfahrenskonzepten mit statischen und dynamischen Reaktoren besteht wie bereits erwähnt in der zeitlichen Abfolge der Verfahrensschritte. In einem statischen System bzw. dessen quasidynamischen Varianten mit Umsetzschritten finden alle notwendigen mechani-

schen Vor- und Nachbereitungsschritte in bzw. mit separaten Aggregaten, zeitlich vor-, zwischen oder nachgelagert, also in jedem Fall nicht simultan mit dem biochemischen Prozess statt. Es handelt sich deshalb immer um eine Reihenschaltung von mechanischen und biologischen Stufen.

In Drehrohrreaktoren laufen mechanische und biologische Prozesse zeitgleich ab. Die somit integrierte mechanische Behandlung führt zu *minimalen Ansprüchen an die Inputqualität*. So kann in der Regel sogar auf eine nicht unproblematische *Vorzerkleinerung* verzichtet werden. Bei eigenen Untersuchungen unter Nutzung der weiter unten vorgestellten Versuchsanlage wurden die in 15 Experimenten insgesamt untersuchten 10 Mg Restabfall ohne Vorzerkleinerung nach Umladen aus dem Sammelfahrzeug eingesetzt. Günstig realisierbar ist auch eine Herstellung und Behandlung von *Materialgemischen* aus für eine biologische Behandlung geeigneten Materialien (Restabfall, Sortierreste aus DSD, Klärschlamm usw.), wobei die möglichen bzw. optimalen Mischungsanteile ohne weiteren apparatetechnischen Aufwand in wenigen Versuchen festgestellt werden können. Die Einstellung eines *optimalen Wassergehaltes* stellt ebenfalls kein Problem dar, da durch die intensive Vermischung von Feststoff und Flüssigkeit (Prozesswasser, Kondensate usw.) die maximale Materialfläche für eine Benetzung herangezogen werden kann. Damit ist die Gefahr einer dauerhaften Vernässung von Schüttungsbereichen, wie diese aus statischen Reaktoren bekannt ist, nicht relevant.

Aus Sicht des im Reaktor ablaufenden biologischen Prozesses ist eine ständige Bewegung der Schüttung weder erforderlich noch sinnvoll. Nur ein in definierten Zeitabschnitten zu wiederholender Abbau prozesshemmend wirkender Gradienten ist erforderlich. Dazu zählen auch die zwangsläufig vom biochemischen Prozess verursachten und mit den anderen steuerungstechnischen Maßnahmen (z.B. durch Änderung der Belüftungsrate) nicht behebbaren Temperatur- und Wassergehaltsgradienten. Durch die *Homogenisierung* des Materials im Drehrohrreaktor wird die Prozessgeschwindigkeit signifikant erhöht und die Produktqualität gleichmäßig, da die gesamte Materialmenge unter den gleichen Bedingungen am Prozess teilnehmen kann. Aus Sicht der Prozessführung ist die durch die praktische Gradientenfreiheit gebotene Möglichkeit hervorzuheben, den Arbeitspunkt (z.B. die Materialtemperatur) in bestimmten sinnvollen Bereichen durch ein angepasstes Luftmanagement verändern zu können.

Bei den im Weiteren betrachteten diskontinuierlich betriebenen Drehrohrreaktoren ist eine Intervallsteuerung der Drehbewegung einfach zu realisieren. Bei den kontinuierlich arbeitenden, geneigten Drehrohren, in denen die Drehbewegung auch die axiale Fortbewegung des Rottegutes bewirkt, ist dies nur eingeschränkt möglich.

Durch den bauartbedingten Ausschluss von Randbereichen und Totzonen im Drehrohrreaktor wird bei entsprechenden Bedingungen (Temperaturniveau, Zeitraum) eine

gleichmäßige *Hygienisierung des gesamten* Rottegutes erreicht. Infolge der Durchmischung wird gegebenenfalls vorhandene freie Flüssigkeit auf der gesamten benetzbaren Oberfläche der Schüttung verteilt. Damit wird die maximal verfügbare Oberfläche zur mikrobiellen Aktivität nutzbar. Die unterschiedlichen Härten von Komponenten der Materialmischung (weich, spröd, hart) führen dazu, dass parallel zum biologischen Abbau durch die schonende autogene Zerkleinerung ständig neue Nährstoffquellen für die Mikroorganismen erschlossen werden.

Aus prozesstechnischer Sicht wird durch den gezielten Eintrag mechanischer Energie kombiniert mit der Steuerung der Belüftung quasikontinuierlich die zu einem bestimmten Prozesszustand maximal mögliche Triebkraft für die Stoff- und Wärmeübergangsprozesse wiederherstellbar, was zu einer maximalen Prozessaktivität (z.B. Trocknungsgeschwindigkeit) führt und den qualitativen Sprung gegenüber den statischen Verfahren kennzeichnet.

In der kurzen Prozesszeit von wenigen Tagen wird vorwiegend leichtabbaubare Organik abgebaut, also jene Fraktion die am Prozessanfang durch ihre chemische Zusammensetzung und hohen Wassergehalt eine "kontinuierliche Phase" an den festen Materialoberflächen bildet. Die mechanische Beanspruchung durch Reibung unterschiedlich harter Materialien führt zu einer wirkungsvollen Abreinigung von Oberflächen, vermeidet aber gleichzeitig weitgehend die ungewollte Zerkleinerung von Glas, größeren mineralischen Bestandteilen sowie Batterien und anderen Fehlwürfen wie Farbdosen. Die schonende Zerkleinerung von weichen Materialien und die Auffaserung bestimmter Fraktionen wie Pappe und Papier ergeben dem Output eine lockere Struktur. Demgegenüber ist in statischen Reaktoren ein "Zusammenbacken" der Bestandteile der Materialschüttung unvermeidbar. Dies hat zur Folge, dass ein zusätzlicher mechanischer Behandlungsschritt meist in Form einer Vollstromzerkleinerung eingesetzt wird. In Abhängigkeit von der Art der Zerkleinerungsmaschine sind unerwünschte Materialaufschlüsse an Fehlwürfen (siehe oben) und damit eine Freisetzung von Schad- und Störstoffen nicht vollständig vermeidbar.

Aus anlagentechnischer Sicht lassen sich weitere Vorteile des Drehrohrreaktors beschreiben. Bei der kreisrunden Geometrie gibt es keine von einer Rückkondensation von Stoffen aus der Abluft bevorzugt betroffene und damit ständig belastete Anlagenteile. Ebenso wird die Gefahr einer Vernässung der Oberflächenbereiche der Materialschüttung, die oft ein Problem bei statischen Reaktoren durch die objektiv unvermeidbare Kondensation darstellen kann, ausgeschlossen. Ein im Vergleich zu statischen Reaktoren deutlich schnelleres und dabei automatisch gleichmäßiges Befüllen und Entleeren der Drehrohre ergänzen die Vorteile im Sinne einer deutlichen Reduzierbarkeit der vor allem ökonomisch problematischen Totzeiten.

Betrachtet man alle Vorteile im Zusammenhang, die der Einsatz des Drehrohres bietet und vergleicht man dieses mit der Summe der einzelnen Aggregate, die vor und nach einem statischen Reaktors einzusetzen sind, um die gleiche Funktionalität (und Verfügbarkeit) zu erreichen, so werden weitere entscheidende Vorzüge sichtbar:

- Es ist nur *ein Apparat* erforderlich, dessen Leistung außerdem in einem gewissen Maß beeinflusst werden kann.
- Allein auf Grund der höheren Prozessgeschwindigkeit ist davon auszugehen, dass bei Drehrohranlagen *weniger Reaktorvolumen* benötigt wird als bei statischen Reaktoren.
- Im Gegensatz zu statischen Verfahren mit ihren prinzipbedingten hohen Luftwechselraten, ist mit Sicherheit davon auszugehen, dass die beim Drehrohr anfallende zu behandelnde *Abluftmenge deutlich geringer* ausfällt. Bei den aktuellen Aufwendungen für eine Abluftreinigung gemäß der 30. BImSchV gewinnt dieser Faktor an Bedeutung.
- Aus *arbeitshygienischer Sicht* ist festzustellen, dass regelmäßig wiederkehrende Arbeitsvorgänge wie das Reinigen von Belüftungsböden statischer Reaktoren in den vorzugsweise einbautenfreien Rohrreaktoren generell auszuschließen sind.

### **Fazit:**

Drehrohrreaktoren stellen sowohl aus theoretischer als auch aus anwendungstechnischer Sicht eine hervorragende Lösung für die Behandlung von Restabfällen dar. Neben den unabhängig vom Prozessziel prinzipbedingten Problemen beim Betriebsverhalten statischer Schüttschichten, in denen biochemische Reaktionen ablaufen (BRUMMACK ET AL., 2005), bietet ein dynamischer Reaktor die für die Entwicklung einer effektiven Steuerung erforderlichen Eingriffsmöglichkeiten.

Als erster Untersuchungsgegenstand wurde die biologische Trocknung von Restabfällen (MBS) im Drehrohrreaktor ausgewählt. Dies ist deshalb sinnvoll, weil durch die Bedeutung des Zeitfaktors beim Trocknungsprozess der dynamische Reaktor seine spezifischen Vorteile besonders deutlich zur Wirkung bringen kann.

## **3 Entwicklung des Steuerungskonzeptes**

### **3.1 Ausgangssituation und Zielstellung**

Die Führung mechanisch-biologischer Aufbereitungsprozesse muss stets davon ausgehen, dass

- die Prozesse in ihrer inneren Struktur äußerst komplex sind und damit eine mathematische Modellbildung nur mit eingeschränkter Genauigkeit möglich ist,
- die analytische Bestimmung der Eigenschaften des Stoffsystems (Zusammensetzung, Konsistenz usw.) sehr aufwändig ist und somit praktisch keine Zustandsgrößen echtzeitfähig gemessen werden können,
- auch der Zustand am Prozessbeginn wegen des hohen Aufwandes nicht analytisch bestimmt werden kann,
- die Anfangsbedingungen sich von Charge zu Charge signifikant unterscheiden können und innerhalb einer Charge ein breites Spektrum der kennzeichnenden Parameter zu erwarten ist.

Diese Tatsachen sind zugleich Ursachen dafür, dass derartige Prozesse nur durch hochqualifiziertes Bedienpersonal geführt werden können oder alternativ einer relativ schematischen Führung unterliegen. Durch eine automatische Steuerung kann den Anforderungen an eine möglichst günstige Prozessführung besser entsprochen werden als das durch manuelle Steuerungen bei derart komplexen Prozessen zu erwarten ist. Dabei muss aber vorausgesetzt werden, dass das Steuerungssystem auf dem systematisch erhobenen Erfahrungswissen sowie auf theoretisch begründeten Modellvorstellungen zum Prozessablauf beruht. Bezogen auf eine Charge sollte die Steuerung in der Lage sein, den Prozess so zu führen, dass das Prozessziel bei minimiertem Energieaufwand und in kürzest möglicher Zeit erreicht wird.

### **3.2 Lösungsweg - methodischer Ansatz**

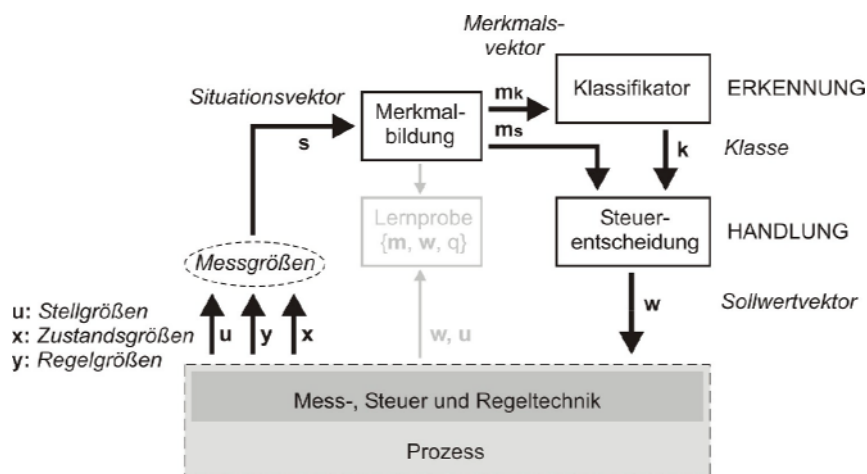
Ein Rotteverfahren besitzt mehrere, im statischen und dynamischen Verhalten zu unterscheidende Prozessabschnitte. Auch im dynamischen Fall lassen sich, bedingt durch den relativ langsam ablaufenden Gesamtprozess, quasistatische Prozessabschnitte definieren. Beim vorliegenden dynamischen Behandlungsverfahren werden die quasistatischen Prozessabschnitte durch die regelmäßigen Drehbewegungen begrenzt, die immer wieder eine deutliche Veränderung zwischen den quasistatischen Abschnitten erzwingen (BARTHA ET AL., 2002).

Bei dem zu erwartenden extrem nichtlinearen Verhalten ist eine an gewisse Situationsklassen angepasste Entscheidungsstrategie für die Prozessführung leichter zu entwerfen als eine geschlossene Gesamtstrategie. Der Ansatz, eine geschlossene Gesamtstrategie zu entwickeln, dürfte auch wegen der breiten Variation der Parameter für unterschiedliche Abfälle kaum zu einer brauchbaren Lösung führen.



Die Aufgabe besteht in der **Erkennung** der aktuellen Situationsklasse mittels Klassifikator, und in der Zuordnung der richtigen Steuerungen zu den Situationsklassen (**Handlung**).

Liegen erfolgswertete Daten aus der Praxis vor, so lassen sich die Prozesszustände mit Hilfe von Merkmalen beschreiben, die aus den gemessenen Signalen gebildet werden (s. Abbildung 2). Diese Lernstichprobe enthält eine Menge von Merkmalvektoren  $m$ , die bestimmte Prozesssituationen beschreiben, und die den Merkmalvektoren zuzuordnenden Steuerhandlungen  $w$ . Die Güte der realisierten Steuerhandlung kann durch eine skalare Größe  $q$  den Steuerungen zugeordnet werden. Die Lernstichprobe soll den gesamten Arbeitsbereich überdecken, da Klassifikatoren nur vorgelegte Handlungen nachvollziehen können (KOCH ET AL., 1996). Bei Situationen, die außerhalb der Lernstichprobe liegen, sollte die Steuerung dennoch angemessen reagieren (z.B. letzte Steuerhandlung beibehalten).



**Abbildung 2** Konzept der Klassensteuerung (nach KOCH ET AL., 1996)

Aus einer Vielzahl unterschiedlicher Klassifikationskonzepte wurde für die vorliegende Steuerungsaufgabe die Fuzzy-Klassifikation ausgewählt. Die große Parametervariation des Systems und die sehr kleine, unsichere Ausgangsdatenbasis begründen diese Entscheidung. Das Konzept der Fuzzy-Klassifikation, angewandt auf das hier untersuchte Situationserkennungsproblem, geht von einer unscharfen Zuordnung der Prozesszustände zu den einzelnen Situationen aus. Das hat zur Folge, dass jedem Merkmalsvektor ein Vektor der Zugehörigkeiten zu den Situationen zugeordnet werden kann.

Beim Entwurf wird der Klassifikator auf der Grundlage der vorhandenen Informationen strukturiert und mittels Lernen aus Beispielen parametrisiert. Die Entscheidungsfindung durch den Fuzzy-Klassifikator erfolgt in den Stufen (KOCH ET AL., 1996):

1. Ermittlung der Zugehörigkeit eines Zustandes zu allen Situationen,
2. Bestimmung der Rangfolge der Zugehörigkeiten zu den Situationen,

3. Zuordnung des Zustandes zu der Situation, für die die Zugehörigkeit maximal ausfällt.

Die Anwendung der Klassifikation während des Behandlungsprozesses erhöht die Flexibilität der Steuerung, da so eine situationsabhängige Anpassung der Prozessführung erfolgen kann. Der Behandlungsplan und damit die Form der Prozessführung werden dynamisch während des Prozesses und nicht bereits zu Prozessbeginn fixiert. Daneben unterstützt dieses Konzept die Trennung der operativen (die sich auf die derzeitige Prozessführung konzentrierenden) von den strategischen (den eher vorausschauenden) Aufgaben. Durch diese differenzierte Betrachtungsweise wäre es beispielsweise möglich, in Behandlungsanlagen mit mehreren diskontinuierlich betriebenen Drehrohren die Arbeit von einzelnen Reaktoren zu koordinieren.

### **3.3 Vorgehensweise**

Die Umsetzung des vorgeschlagenen Steuerungskonzeptes erfolgte in drei Schritten. Zunächst wurde eine tiefgehende theoretische Analyse des Prozesses durchgeführt und damit die grobe Struktur der Situationsklassen entworfen. Als nächstes wurde der am Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik in Vorversuchen bereits getestete Drehrohrreaktor hinsichtlich der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik an Anforderungen einer komplexen Automatisierbarkeit angepasst. Drittens wurden Versuche an der Anlage durchgeführt während denen die im Drehrohr ablaufenden Prozesse immer feiner beschrieben werden konnten. Wie bereits dargelegt, konnte dabei nicht auf vorhandene experimentelle Daten zurückgegriffen werden, vielmehr war es notwendig dieses Wissen während der Projektbearbeitung aufzubauen. Die so gewonnenen Erkenntnisse flossen iterativ in die konkrete Umsetzung des Steuerungskonzeptes hinein.

## **4 Umsetzung**

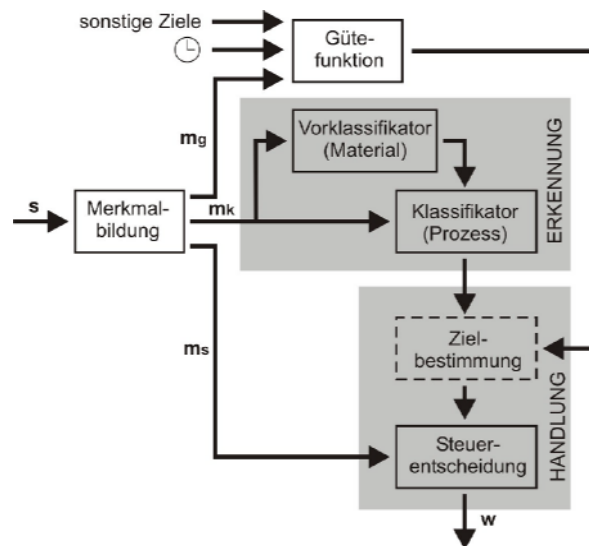
### **4.1 Entwurf des Klassifikators**

Im ersten Schritt des Entwurfs der Steuerung wurden die wesentlichen Steuergrößen, Stellgrößen und Situationsmerkmale, die semantische Struktur der Situations- und Materialklassen sowie die zu treffenden Entscheidungen definiert.

Diese Festlegungen sind für den folgenden Entwurfsprozess von grundlegender Bedeutung. Die Steuergrößen sind dabei die Prozessgrößen, die das Prozessergebnis kennzeichnen. Die Stellgrößen sind die Prozessgrößen, die durch die Steuerung zu beeinflussen sind.

Wie einleitend erwähnt, geht das Konzept der Klassifikation davon aus, dass aus den gemessenen Steuergrößen Merkmale gebildet werden, die für die Situationsbeschrei-

bung besser geeignet sind als die primären Steuergrößen. Diese Merkmale liefern eine Zuordnung des aktuellen Zustandes des Prozesses zu einer Situationsklasse. Diesen Klassen sind bestimmte Regeln für die Steuerung zugeordnet, die damit Merkmale für die Rückwirkung auf den Prozess generieren; diese Merkmale müssen nicht notwendig mit den primären Stellgrößen identisch sein. Die Menge der primären Steuergrößen kann also um gewisse Größen erweitert werden.

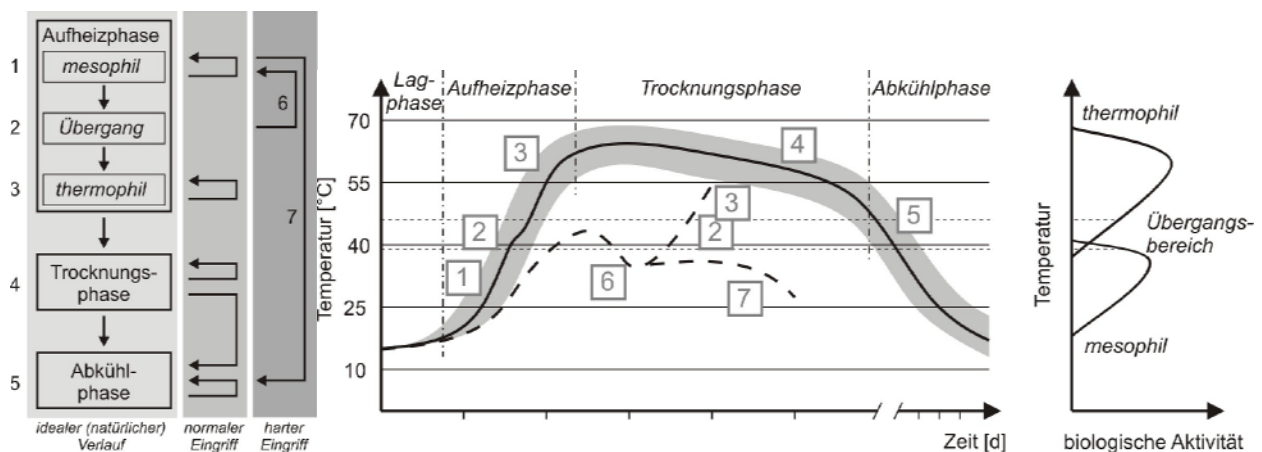


**Abbildung 3** Klassensteuerung mit Vorklassifikator

Das Klassifikationsproblem wird bezüglich des zu investierenden Aufwandes ganz wesentlich durch die Anzahl der Merkmale bestimmt. Wegen der geringen Anzahl vollständig dokumentierter Versuche können statistische Methoden zur Verringerung des Merkmalraumes (z.B. durch eine Signifikanzanalyse) nicht angewendet werden. Einen methodisch allgemeinen Zugang zur Reduktion der Dimension liefert der Ansatz, das Klassifikationsproblem zu zerlegen. Dazu wird im Rahmen der Steuerung zunächst ein „Vorklassifikator“ in der Anfangsphase des Prozesses eingesetzt, der aus einigen Messgrößen (Ablufttemperatur, -zusammensetzung) die Beschaffenheit (Wassergehalt) und das biologische Potential des Materials im Sinne eines vorgegebenen Klassenrasters bestimmt (s. Abbildung 3). Die für den Vorklassifikator gewählten Merkmale sind analytisch nur schwierig und online gar nicht zu bestimmen; sie sind aber relevant für die Charakterisierung des Prozessverlaufs. Die neuen Merkmale können nicht nur zur Erkennung des aktuellen Prozesszustandes (also für die Situationserkennung) herangezogen werden sondern auch direkt in die Regeln der Prozesssteuerung einfließen. Wird beispielsweise eine hohe  $\text{CO}_2$ -Produktion bei mäßigem Temperaturanstieg zum Prozessbeginn festgestellt, so kann ein feuchtes Ausgangsmaterial angenommen werden, das wenig oder gar nicht mehr befeuchtet werden muss. Die Bewertung der Prozesszustände würde sich auch verbessern, da z.B. ein gemessener Temperaturanstieg im Reaktor bei einem biogen aktiven Substrat anders zu bewerten ist als bei einem we-

niger aktiven (beim ersteren bestünde noch Optimierungsbedarf, während bei letzterem lediglich das Erreichen des Grenzzustandes festzustellen wäre).

Auf der Basis der vorliegenden Daten und theoretischer Untersuchungen lassen sich bei optimalem Prozessverlauf drei typischen Phasen separieren, die sich mit folgenden Bedeutungen belegen lassen: **Aufheizphase**, **Trocknungsphase**, **Abkühlphase**. Die Abbildung 4 zeigt auf der linken Seite das Aufeinanderfolgen dieser Phasen bei idealem Prozessverlauf, sowie die Ziele eines Eingriffes in diesen natürlichen Prozessverlauf. In der Mitte der Abbildung 4 sind den Phasen zugeordnete Klassen in einem idealisierten Temperatur-Zeit-Verlauf gekennzeichnet.



**Abbildung 4** Einteilung der Situationsklassen (links: Reihenfolge der Phasen und Zuordnung der Klassen, Mitte: Darstellung im Temperatur-Zeit-Diagramm)

Am Prozessanfang erfolgt ein Übergang vom mesophilen in den thermophilen Temperaturbereich, der mit einem vollständigen Populationswechsel der Mikroorganismen und dadurch mit einer zeitweilig geringeren Abbauleistung einhergeht. Die Steuerung soll dafür sorgen, dass der Übergang möglichst schnell erfolgt, gegebenenfalls ist die Wärmeabfuhr zu vermindern. Um die Handlungen besser zuordnen zu können, wird die Aufheizphase in drei Abschnitte unterteilt: **mesophil**, **Übergang**, **thermophil**, die als **Klasse 1-3** gekennzeichnet werden.

Der größte Wasseraustrag erfolgt in der Trocknungsphase (**Klasse 4**), sie beschreibt das Ziel der Steuerung. Mit abnehmendem Wassergehalt sinkt die biologische Aktivität (Zielkonflikt!), was zur Folge hat, dass die Temperatur des Materials sinkt. Die Steuerung sollte in diesem Fall zwischen den folgenden Fällen entscheiden können: Ist der Temperaturrückgang tatsächlich auf eine Wasserlimitierung zurückzuführen oder sind eventuell andere Ursachen, wie ungenügende Sauerstoffversorgung, anzunehmen. Diese beiden Fälle beschreiben zwei unterschiedliche Situationen, denen auch unterschiedliche Steuerhandlungen zuzuordnen sind. Im ersten Fall ist das Material weiter auszukühlen (**Klasse 5**) und der Prozess zu beenden, im zweiten Fall ist durch eine

Kombination von Drehen und Belüften der Temperaturabfall zu stoppen, um so zu versuchen, den optimalen thermophilen Temperaturbereich zu erreichen.

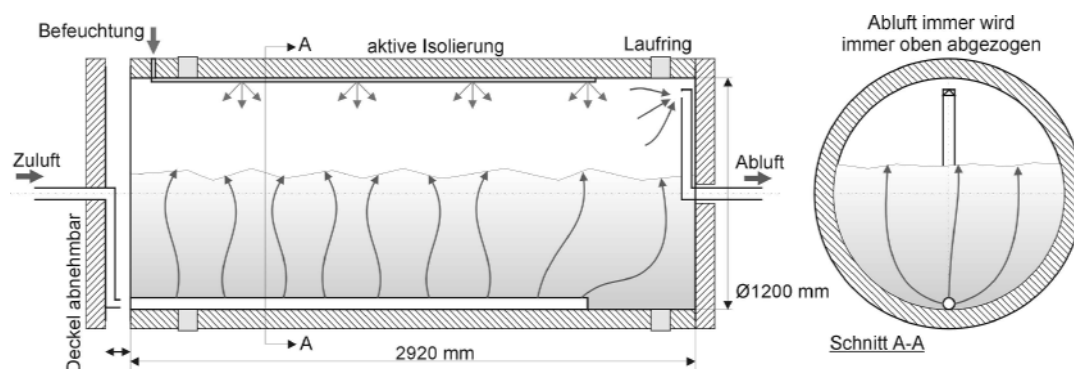
Eine weitere Situationsklasse (*Klasse 6*) wird definiert, um Zustände beschreiben zu können, bei denen der Übergang mesophil-thermophil sehr langsam oder gar nicht stattfindet. Durch geeignete Maßnahmen soll versucht werden den Übergang doch zu erreichen, beispielsweise nach einem Zurückführen in den mesophilen Bereich (s. gestrichelter Verlauf in der Abbildung 4, Mitte). Ist dies in einer vorgegebenen Zeit z.B. wegen Hemmung des biologischen Prozesses nicht möglich, so kann diese Charge in der vorliegenden Zusammensetzung nicht durch eine biologische Trocknung behandelt werden. Materialbeimischung oder Verdünnung durch bereits gerottete Komponenten könnte die Entscheidung sein. Dieser Fall soll durch die *Klasse 7* beschrieben werden.

Ist der aktuelle Prozesszustand einer Situationsklasse zugeordnet, so wird im nächsten Schritt die zugehörige Steuerhandlung ausgewählt. Als Eingriffsmöglichkeiten stehen zur Verfügung: die *Drehbewegung* (Anzahl der Umdrehungen und Drehzahl, Länge der Ruhezeit zwischen Drehintervallen), *Zuluftmenge* und *-temperatur* und die *Wassermenge* und *-temperatur* der Befeuchtung.

## 4.2 Versuchsanlage "Drehrohrreaktor"

### 4.2.1 Hardware

Die Technik der Versuchsanlage besteht aus einer um ihre Längsachse drehbaren Trommel mit einem Durchmesser von 1.200 mm und einer Länge von 2.920 mm, die von einem Grundgestell mit Antrieb und Stützrollen getragen wird. Die Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Drehrohres. Das Gesamtvolumen beträgt 3,2m<sup>3</sup>, wovon ca. 2m<sup>3</sup> befüllt werden können. Beim Restabfall entspricht dies einer Masse von 600-1.000 kg je nach Schüttdichte. Somit können repräsentative Abfallmengen unter praxisnahen Bedingungen, ohne Vorsortierung und Vorzerkleinerung, behandelt werden. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf großtechnische Anlagen ist damit besser möglich, da die Versuche mit realen Materialien durchgeführt werden.



**Abbildung 5** Aufbau des Versuchsreaktors  
Abfallforschungstage 2006 [www.wasteconsult.de](http://www.wasteconsult.de)

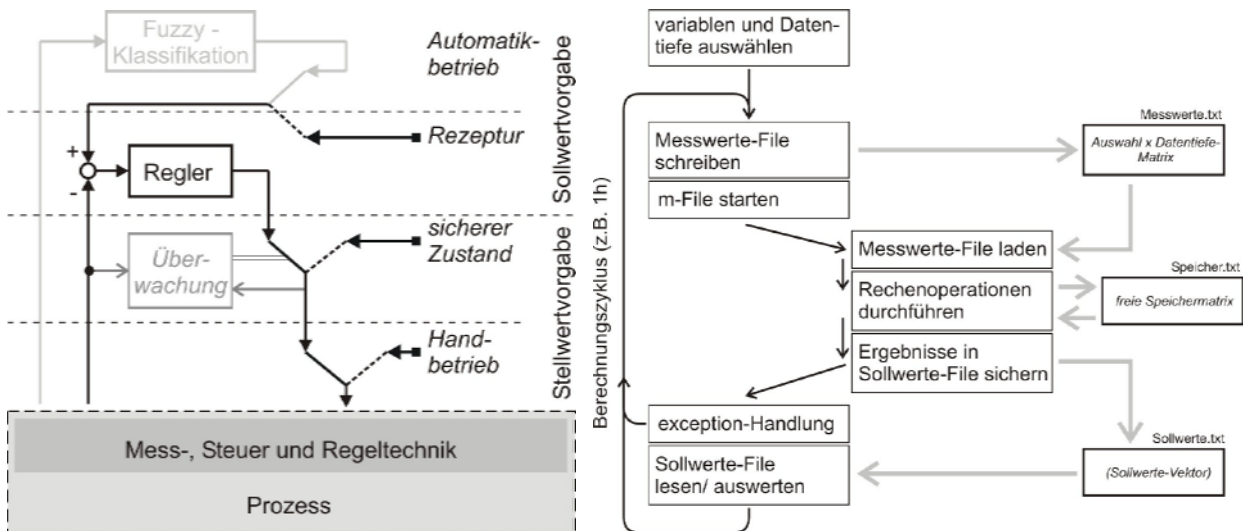
Wesentliche Charakteristika der Versuchsanlage sind:

- Die **Drehbarkeit** ist das Hauptmerkmal des dynamischen Reaktors. Zwei symmetrisch angeordnete Antriebsmotoren erlauben richtungsunabhängige Dreheigenschaften und die Übertragung eines höheren Drehmomentes. Damit wird ein sicherer Anlauf des Versuchsreaktors unter allen Betriebsbedingungen gewährleistet.
- Die **Belüftungseinrichtung** wurde so ausgelegt, dass im relevanten Arbeitsbereich Volumenstrom und Temperatur der Zuluft kontinuierlich vom Steuerrechner aus verstellt werden können. In der Abluftleitung direkt hinter dem Drehrohr werden die Temperatur und die Gaszusammensetzung ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) gemessen. Die Abluftfeuchte wird indirekt aus der im Kondensatbehälter aufgefangenen Wassermenge rechnerisch bestimmt.
- Die **Befeuchtungseinrichtung** dient der Einstellung eines optimalen Anfangswassergehaltes.
- An der Oberfläche des Reaktormantels (unterhalb einer Wärmeisolation) wurde eine **elektrische Begleitheizung** installiert, mit der die Wärmeverluste kompensiert werden können. Damit können die bekannten Probleme bei der Maßstabsübertragung (Oberflächen-Volumen-Verhältnis) behoben werden.

#### 4.2.2 Software

In der Entwicklungsumgebung BORLAND DELPHI4 wurde ein Steuerprogramm erstellt, das die Datenerfassung, -verarbeitung und -archivierung, die Bedienerkommunikation, die rechentechnische Umsetzung des Steuerungskonzeptes (Sollwertgenerierung) und die herkömmlichen Regelungsaufgaben realisiert. Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurde ebenfalls unter BORLAND DELPHI4 ein Analysetool erarbeitet, mit dem unterschiedliche Auswertungsverfahren bezüglich ihrer Eignung an bereits vorhandenen Daten durchgeführt werden können. Geeignet befundene Methoden können problemlos in das Steuerprogramm übernommen werden. Da es gleichzeitig um Datengewinnung aus dem Prozess bzw. um die Entwicklung und Erprobung des Steuerungskonzeptes ging, wurde bei der Softwareentwicklung auf eine große Eingriffsflexibilität geachtet. Wie in der Abbildung 6, linke Seite dargestellt ist, können die Eingriffe durch direkte Vorgabe von Stellgrößen (Handbetrieb) oder durch Vorgabe einer Zeitreihe von Sollwerten (Rezeptur) angegeben werden. Ziel ist der Übergang zur dritten Eingriffsmöglichkeit, in der auf Grundlage der Klassensteuerung die Sollwerte automatisch generiert werden. Zentrale Aufgabe bei der Realisierung der Steuerkomponente war die Herstellung einer Schnittstelle zum Entwicklungs- und Simulationssystem MATLAB/SIMULINK. Die programmierte Schnittstelle ermöglicht die Auswahl von Messsignalen oder berechneten

Daten in beliebiger Tiefe aus der Datenbank, die zu definierbaren Zeiten in eine Textdatei abgelegt werden. Durch einen OLE-Aufruf (Object Linking and Embedding) kann der OLE-Client (hier das DELPHI-Programm) den OLE-Server (MATLAB) ansteuern. So wird in definierbaren Zeitabständen ein externes MATLAB-Programm gestartet, das aus der Textdatei die Daten einliest, eine Berechnung (auch Simulation) durchführt und die Ergebnisse, hier die Sollwerte, wiederum in eine Textdatei ausgibt. Die Abbildung 6 (rechts) zeigt den Datenfluss zwischen dem Steuerprogramm und der verbundenen MATLAB-Anwendung in vollautomatischem Betriebszustand.

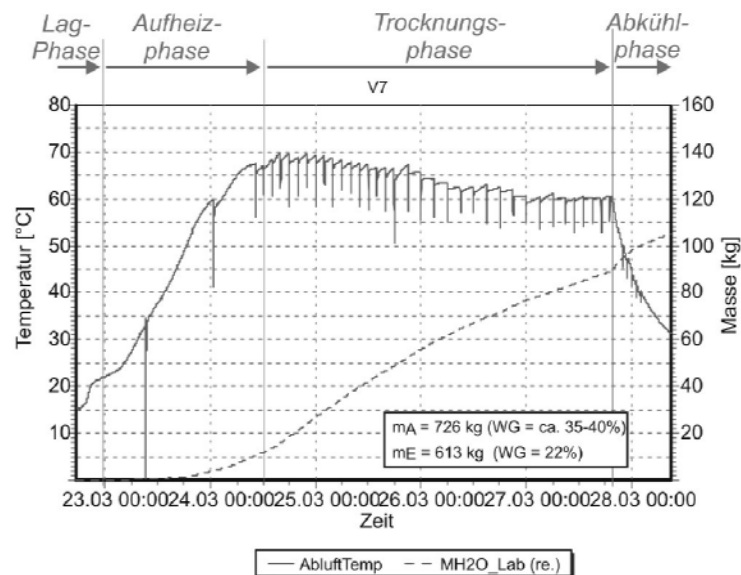


**Abbildung 6** Softwaretechnische Umsetzung des (links: Eingriffsmöglichkeiten, rechts: Datenfluss im Vollautomatischen Betrieb)

## 5 Versuchsdurchführung und Erprobung

Im Rahmen einer ersten Versuchsreihe wurden insgesamt 15 Versuche mit Restabfällen aus dem Stadtgebiet Dresden durchgeführt. Jeweils zwischen 600-1.000 kg Versuchsmaterial wurden ohne Vorzerkleinerung oder Vorsortierung in den Drehrohrreaktor gefüllt. Vor den Versuchen wurde der Abfall nicht beprobt. Vielmehr wurde das Ziel verfolgt, wie oben dargestellt, durch den Prozessverlauf auf die Anfangszusammensetzung schließen zu können.

Die Abbildung 7 zeigt exemplarisch den Prozessverlauf anhand der gemessenen Ablufttemperatur und der berechneten, mit der Abluft ausgetragenen Wassermenge (entspricht der Trocknungsleistung). Die abrupt eintretende Abkühlung wurde durch die deutliche Erhöhung der Belüftungsmenge erreicht (Erzwingung des Überganges von Klasse 4 zu 5).



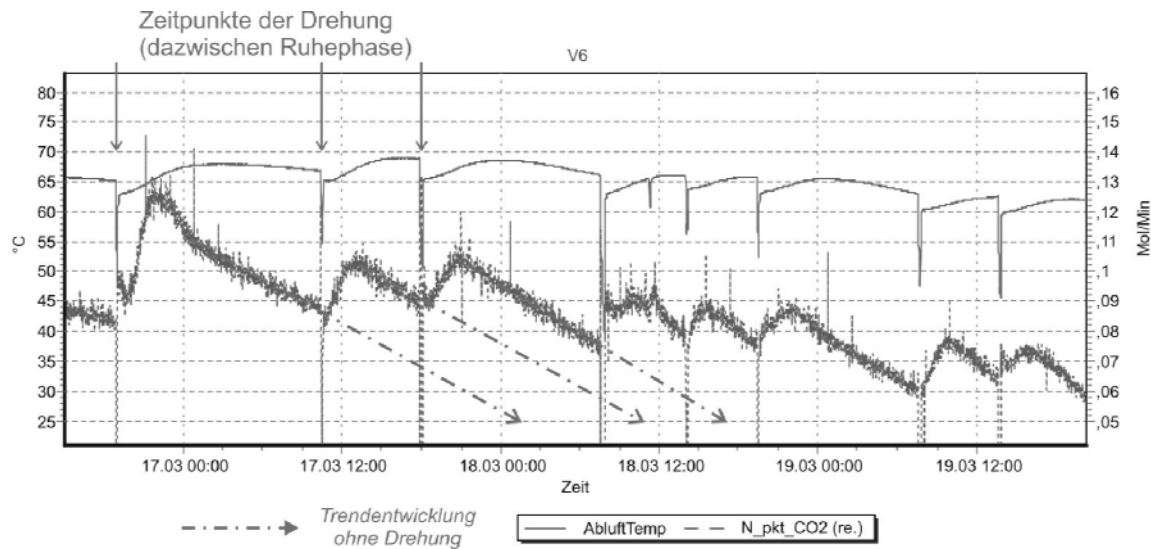
**Abbildung 7** Typischer Prozessverlauf der biologischen Trocknung

Die gestrichelte Linie gibt die insgesamt in der Abluft ausgetragene Wassermenge an. Diese wurde aus Volumenstrom, Temperatur und relativer Feuchte der Abluft berechnet. Erwartungsgemäß ist der höchste Anstieg in der Trocknungsphase zu verzeichnen. Weiter ist sichtbar, dass die gezielte Abkühlung der Schüttung am Prozessende mit etwa 15% zum gesamten Wasseraustrag beiträgt. Die Auswertung der Massenströme für Luft und Wasser(dampf) ergab, dass in allen Prozessphasen eine Trocknung im energetischen Optimum, d.h. bei Wasserdampfsättigung der Abluft, durchgeführt werden konnte.

Die Bewegbarkeit des Materials ist das Hauptmerkmal des dynamischen Rotteprozesses. Sie führt immer wieder zum Ausgleich von Gradienten im Material. Nach dem Drehen kommt es zu einer Vergleichmäßigung der Temperaturen. In der Ablufttemperatur ist dies durch eine schlagartige Veränderung zu erkennen. Gab die Ablufttemperatur vor der Drehung in erster Näherung die maximale Schüttungstemperatur wieder, so entspricht sie unmittelbar nach dem Durchmischen der integralen Schüttungstemperatur. Die Materialbewegung wirkt sich auch auf die biologische Aktivität aus, zu der die  $\text{CO}_2$ -Produktion proportional ist. In der Abbildung 8 sind die gemessene Ablufttemperatur (obere Linie) und der aus Volumenstrom und Konzentration berechnete  $\text{CO}_2$ -Strom (untere Linie) in der Abluft dargestellt. Der  $\text{CO}_2$ -Strom erreicht etwa 3-4 Stunden nach dem Drehen ein Maximum. Ungefähr zur gleichen Zeit kann im Verlauf der Ablufttemperatur der höchste Anstieg festgestellt werden. Nach Überschreiten des Maximums fällt der  $\text{CO}_2$ -Strom langsam ab. Es lässt sich erkennen, dass nach jeder Drehbewegung ein Maximum der  $\text{CO}_2$ -Produktion folgt und dass diese Maxima immer kleiner werden. In die Abbildung 8 wurden nachträglich mögliche Trendentwicklungen eingezeichnet. Diese verdeutlichen, wie die Drehbewegung mit den eingangs aufgezählten Effekten die



biologische Aktivität und damit die mikrobielle CO<sub>2</sub>-Produktion auf einem höheren Niveau fixiert.



**Abbildung 8** Auswirkung der Drehbewegung auf Ablufttemperatur und CO<sub>2</sub>-Strom

In diesem Zusammenhang lässt sich erkennen, dass die Ablufttemperatur auch dort noch steigt, wo die CO<sub>2</sub>-Produktion und damit die Wärmeproduktion bereits zurückgehen. Dieser Effekt kann auf die Temperaturschichtung in der Schüttung zurückgeführt werden und zeigt, dass die Ablufttemperatur für sich die aktuelle Situation zwar beschreiben kann, aber nicht den Trend einer Entwicklung.

Nach Versuchsende wurde eine repräsentative Probe (60-70 kg) aus dem getrockneten Material entnommen und mit unterschiedlichen Maschenweiten abgeseibt. Die Teilproben wurden beprobt und aus den Wassergehalten der einzelnen Proben konnte der Gesamtwassergehalt der gesamten Probe berechnet werden. Außerdem konnte aus dem Prozessverlauf und dem Endwassergehalt der Anfangswassergehalt bestimmt werden. Dieser Wert kann in der offline Auswertung dem Prozessverlauf zu Beginn zugeordnet werden, um als Lernprobe für den Parametrierung des Vorklassifikators eingesetzt zu werden. In der Abbildung 9 sind exemplarisch drei Siebfraktionen des getrockneten Restabfalls dargestellt.



**Abbildung 9** Siebfraktionen des dynamisch getrockneten Materials

## 6 Zusammenfassung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer Steuerung für die biologische Trocknung von Restabfällen in einem Drehrohrreaktor. Die Lösung der Aufgabe verfolgt für die Aufbereitung von Restabfällen zwei neue Ansätze: Das entwickelte Steuerungskonzept basiert auf der Anwendung von Klassifikationsmethoden; diese Methoden wurden bei biotechnologischen Massenprozessen bisher noch nicht umfassend angewandt. Zum zweiten führt der Einsatz des dynamischen Drehrohrreaktors in der biologischen Trocknung über den Stand der Technik hinaus.

Der derzeitige Stand der Projektbearbeitung belegt bereits deutlich, dass sich das Drehrohr entsprechend den Erwartungen hervorragend als dynamischer Reaktor zur biologischen Trocknung von Restabfällen eignet. Dabei bietet sich der Reaktor nicht nur für eine innovative und kostengünstige Steuerung besonders an. Es ist realistisch, davon auszugehen, dass damit prinzipiell ein qualitativer Sprung für alle geeigneten Einsatzfälle erreicht werden kann. Dies betrifft das Verhältnis Aufwand-Nutzen für die Steuerung und installierte Messtechnik ebenso wie eine Optimierung des gegenwärtig erheblichen Elektroenergieeinsatzes und des Einsatzes weiterer Energieträger z. B. für die Abluftreinigung. Ebenso erscheint damit ein Optimierungspotenzial für die peripheren technologischen Schritte, verbunden mit einer Verschlankung der Verfahrensstruktur, erschließbar.

Nach der vollständigen Auswertung und Parametrierung der Klassensteuerung ist vorgesehen, eine zweite Versuchsreihe zu starten. Dabei sollen neben Restabfall im Originalzustand auch andere Materialien (Sortierreste aus DSD), bestimmte Siebschnitte und/oder innovative Betriebsarten, wie ein quasikontinuierlicher Betrieb, untersucht werden.

## 7 Literatur

- |                     |      |  |
|---------------------|------|--|
| Bartha, B. et al.   | 2002 | Steuerung eines Reaktors zur Aufbereitung von Abfällen mit biogenen Bestandteilen. Abschlussbericht zum DBU-Projekt 14736.                                       |
| Bartha, B. et al.   | 2003 | Steuerung eines Reaktors zur Aufbereitung von Abfällen mit biogenen Bestandteilen, Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden                                  |
| Brummack, J. et al. | 2005 | Ertüchtigung der Nachrotte in MBA's durch das Dombelüftungsverfahren (DBV), in: Internationale Tagung MBA 2005. Cuvillier Verlag, Göttingen, ISBN 3-86537-665-7. |
| Koch, M. et al.     | 1996 | Fuzzy Control: optimale Nachbildung und Entwurf optimaler Entscheidungen. R. Oldenbourg Verlag, München, ISBN 3-486-23355-6                                      |

**Anschrift der Verfasser**

Dipl.-Ing. B. Bartha

Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

D-01062 Dresden

Telefon +49 351 463 32045

Email: Bela.Bartha@mailbox.tu-dresden.de

Website: <http://www.tvt-uvt.tu-dresden.de/>

Dr.-Ing. Joachim Brummack

Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

D-01062 Dresden

Telefon +49 351 463 34430

Email: Joachim.Brummack@tu-dresden.de

Website: <http://www.tvt-uvt.tu-dresden.de/>