

Charakterisierung von Abfallproben mit FT-IR Spektroskopie und Thermogravimetrie

Ena Smidt

Institut für Abfallwirtschaft, Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Universität für Bodenkultur, Wien

1 Einleitung

Reife und Stabilität des organischen Materials sind wichtige Kriterien zur Beurteilung eines Abfalls. In Komposten, die im Pflanzenbau verwendet werden, ist Reife eine geforderte Eigenschaft. Bei der mechanisch-biologischen Behandlung von Abfällen ist das Ziel des biologischen Prozesses, die Reaktivität des Materials zu reduzieren, um die für die Ablagerung erforderliche Stabilität zu erreichen. In Altlasten ist der Abbauzustand der organischen Substanz neben anderen Kriterien ausschlaggebend für die Auswahl des Sanierungsverfahrens.

Stabilität und Reife sind komplexe Eigenschaften des Abfallmaterials, die nur durch mehrere Parameter bestimmt werden können. Atmungsaktivität, C/N Verhältnis, der gesamte organische Kohlenstoff (TOC), Ammonium- und Nitratgehalt, Pflanzenverträglichkeitstests sind üblicherweise durchgeführte Analysen zur Bestimmung von Reife und Stabilität.

Mithilfe von Infrarotspektroskopie und der Thermogravimetrie lässt sich die chemische Zusammensetzung einer komplexen Probe in einer allgemeinen Weise darstellen. Die Infrarotspektroskopie nützt die Wechselwirkung von Infrarotstrahlung mit Materie. Die zu Schwingungen angeregten Moleküle entnehmen (absorbieren) den dafür notwendigen Energiebetrag, was als Absorptionsbande sichtbar wird. Das Infrarotspektrum stellt die Aufzeichnung dieser Absorptionsbanden über einen definierten Wellenlängen(Wellenzahl)bereich dar.

Das Thermogramm spiegelt das thermische Verhalten einer Substanz wider. Eine Änderung der chemischen Zusammensetzung manifestiert sich auch in einem veränderten Thermogramm. Mit zunehmender Stabilität eines Materials finden Verbrennungsprozesse, die bei dieser Methode als Gewichtsverlust gemessen werden, erst bei höheren Temperaturen statt. Ein dem Verbrennungsprozess nachgeschaltetes Massenspektrometer erlaubt eine Identifizierung der Verbrennungs- oder Pyrolyseprodukte.

Spektroskopische und thermische Methoden wurden bei verschiedenen komplex zusammengesetzten Proben angewandt. In der Abfallwirtschaft diente die Infrarotspektro-

skopie zur Charakterisierung der Gesamtprobe und der Huminsäuren (Chen 2003; Tan 2003; Sanchez-Monedero et al. 2002; Ouatmane et al. 2002; Zaccheo et al. 2002; Ouatmane et al. 2000; Davis et al. 1999; Zach und Schwanninger 1999). Thermische Methoden wurden von Dell'Abate et al. (2000) zum Monitoring eines Kompostierprozesses, von Otero et al. (2002) zur Beobachtung des Stabilisierungsprozesses von Klärschlamm eingesetzt.

Das Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, verschiedene Abfallmaterialien zu charakterisieren, ihren Abbau- und Stabilisierungsgrad festzustellen oder Prozesse zu beschreiben. Ein wesentlicher Punkt dabei ist die Spektreninterpretation. Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen werden Absorptionsbanden identifiziert. Durch Zugabe von Reinsubstanzen können Matrixeffekte überprüft oder Banden bestätigt werden. Chemische oder physikalische Veränderungen der Probe liefern weitere Informationen. Der Vergleich mit Spektren von Reinsubstanzen oder Probenbestandteilen kann als Identitätsnachweis dienen. Mathematische Methoden der Spektrenumwandlung (z.B. Derivativspektren, Subtraktionsspektren) sind in manchen Fällen hilfreich. In der Anfangsphase war auch die Zusatzinformation durch chemische und physikalische Daten des Probenmaterials wichtig.

Die Interpretation der Thermogramme basiert derzeit hauptsächlich auf dem Vergleich unterschiedlicher Proben, die durch chemische und physikalische Parameter gut charakterisiert sind. Erste Untersuchungsergebnisse der Kombination von Thermoanalyse und Massenspektrometrie werden vorgestellt.

2 Material und Methoden

2.1 Abfallproben

Sämtliche Proben stammen aus realen Prozessen oder von existierenden Altlasten.

2.1.1 Komposte

Komposte A und B (Offene Mietenkompostierung; während der ersten Woche tägliches Umsetzen, dann 2x/Woche; Nachrotte ab der 7. Woche auf einer Tafelmiete; Kompost A: 260 Tage Rottedauer, Kompost B: 142 Tage Rottedauer)

2.1.2 MBA Material

Verschiedene Entwicklungsphasen eines mechanisch-biologischen Verfahrens mit Klärschlammzumischung

2.1.3 Klärschlamm

Klärschlamm aus einer kommunalen Abwasserreinigungsanlage: Rohschlamm, Überschussschlamm, anaerob stabilisierter Schlamm, 2 Jahre abgelagerter mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ stabilisierter Schlamm.

2.1.4 Altlasten

Probenmaterial aus einer Jahrzehnte alten Altablagerung (Identifizierung einer unbekanntes Altlast), Nachweis der Veränderung des Sickerwassers einer noch reaktiven Altlastenprobe durch Aerobisierung im Laborversuch.

2.2 Methoden

Für die FT-IR spektroskopischen Untersuchungen wurden die Proben luftgetrocknet, in der Scheibenschwingmühle gemahlen, < 0,63 mm abgeseibt und gemörsert. Zwei mg des so aufbereiteten Materials wurden mit KBr (Reinheitsgrad für FT-IR) 1:100 gemischt, zu einem Pressling verarbeitet und sofort unter Umgebungsbedingungen im Transmissionsmodus gemessen. Die Messungen wurden im mittleren Infrarotbereich ($4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$) durchgeführt. Die Auflösung betrug 4 cm^{-1} , 32 Scans wurden gemittelt und gegen Umgebungsluft als Hintergrund korrigiert (Gerät: Bruker Equinox 55). Zur Entfernung von Carbonat wurde die unbekanntes Altlastenprobe 3x mit 0,1 N HCl behandelt und anschließend mit deionisiertem Wasser gewaschen. Sickerwasserproben wurden lyophilisiert und dann wie eine Festprobe behandelt.

Für die thermogravimetrischen Untersuchungen erfolgte die Probenaufbereitung wie für die spektroskopischen Untersuchungen. Die Messungen wurden über einen Temperaturbereich von 20-900 °C aufgezeichnet, Gas: synthetische Luft (Gasfluss: 75 ml/min), Heizrate: 10 K/min (Gerät: Netzsch STA 409C/CD).

Die Probenaufbereitung für die chemischen Analysen (Glühverlust, TOC und Gesamtstickstoff) erfolgte wie oben beschrieben. Der Glühverlust wurde durch Verbrennen bei 545 °C ermittelt. Der Stickstoff, der gesamte (TC) und der anorganische Kohlenstoff (TIC) wurden im CNS Analysator (Variomax) bestimmt. Der organische Kohlenstoff (TOC) wurde durch Differenzbildung aus $\text{TC} - \text{TIC}$ berechnet.

Die Atmungsaktivität über 4 bzw. 7 Tage wurde im Sapromat (Sulzer) als Sauerstoffverbrauch gemessen (Binner et al.1998).

Für die Aerobisierung des Altlastenmaterials wurden 25 Liter fassende zylindrische Plexiglasgefäße mit Probe befüllt und belüftet (1,4 l/h, Zugabe von 300 ml deionisiertem Wasser).

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 FT-IR spektroskopische Untersuchungen

3.1.1 Kompostierung

Abbildung 1 zeigt verschiedene Stadien eines Kompostierprozesses von Bioabfällen. Die Banden der aliphatischen Methylengruppen (2920 und 2850 cm^{-1}) nehmen während der Kompostierung bis zu einem gleichbleibendem Niveau ab und sind daher gute Indikatoren für den Abbaufortschritt und die erreichte Stabilisierung. Die Bande bei 1740 cm^{-1} ist der C=O Schwingung aus Aldehyden, Ketonen und Estern zugeordnet. Diese Bande ist in Bioabfällen meist nur schwach oder als Schulter ausgeprägt und verschwindet in der Anfangsphase der Kompostierung. Die Bande im Bereich von 1640 cm^{-1} ist einerseits auf die C=O Schwingung von Amidin (Amid I) und Carboxylaten, andererseits auf die C=C Gruppe von Alkenen und Aromaten zurückzuführen. Diese Bande zeigt daher zunächst keine eindeutige Ab- oder Zunahme. Carboxylate werden abgebaut, andererseits können Amide durch die Bildung mikrobieller Biomasse zunehmen oder es kommt zu einer Anreicherung von schwer abbaubaren aromatischen Verbindungen. In Altablagerungen ist diese Bande schwach, aber immer noch vorhanden. Die Bande bei 1512 cm^{-1} kann in pflanzlichem Material Lignocellulosen zugeordnet werden (Ouattmane et al. 2000). Obwohl die Bande relativ schwach ist, erweist sie sich als guter Indikator für Bioabfälle, da sie nicht überdeckt wird wie andere Ligninbanden. Die Bande bei 1425 cm^{-1} stammt sowohl von der CO_2 Streckschwingung organischer Verbindungen als auch von der C-O Schwingung aus Carbonaten. Da sich anorganische Komponenten während des Abbaus relativ anreichern, nimmt diese Bande zu. Bei 1384 cm^{-1} findet sich die N-O Streckschwingung der Nitratbande (Smidt 2002; Zaccheo 2002), die erst in einem späteren Stadium der Kompostierung auftaucht, wenn der aus dem Abbau der Proteine stammende Stickstoff zu Nitrat mineralisiert wird. Ein guter Indikator für die Dynamik eines Prozesses ist die Bande bei 1320 cm^{-1} , die aromatischen Aminen zugeordnet werden kann. Diese Bande nimmt während der Kompostierung häufig erst zu, dann ab, wie in Prozess I, oder sie nimmt gleich ab. Jedenfalls weist sie auf eine mikrobielle Aktivität und Umsetzungsprozesse hin. Gleichzeitig kennzeichnet ihr Verschwinden das Eintreten eines stabileren Zustandes. Zwischen 1260 und 1240 cm^{-1} absorbieren Carbonsäuren (C-O Schwingung) und Amide (C-N der Amid III Bande). Auch ihr Verschwinden deutet auf eine Stabilisierung hin. Polysaccharide absorbieren in der Region zwischen 1170 - 950 cm^{-1} . Durch die dominierende Silikatbande erscheinen sie nur als Schultern an deren linker Flanke bei 1160 cm^{-1} und 1080 cm^{-1} . Bei 1080 cm^{-1} absorbieren allerdings auch andere Gruppen (Quarz, Phosphat), sodass nur die Abnahme dieser Schultern organische Komponenten bestätigt (Grube et al. 1999). Eine Überprüfung erfolgt auch durch das Spektrum des Glührückstandes. Die

intensive Bande bei 1030 cm^{-1} kann auf die Si-O Streckschwingung der Tonminerale zurückgeführt werden (Madejova 2003). Sie ist in der Regel in allen Abfällen zu finden.

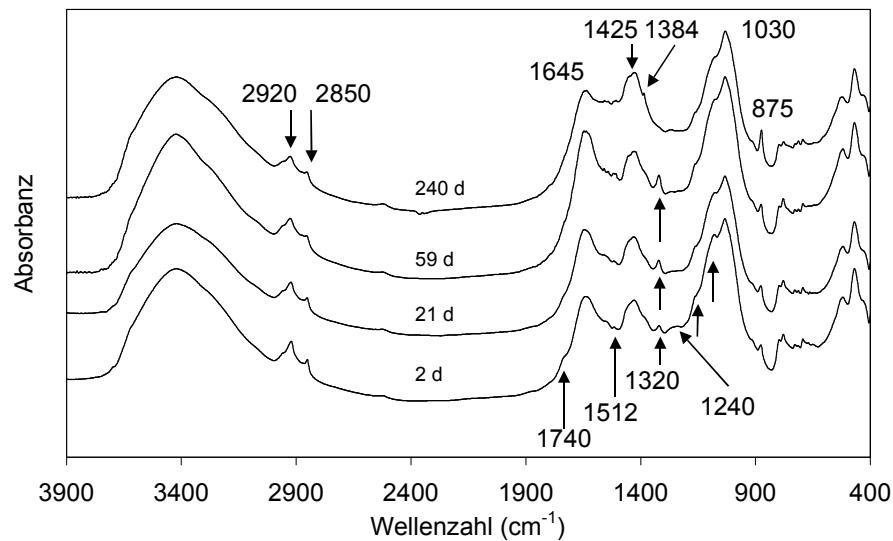


Abbildung 1 Spektroskopische Charakteristik verschiedener Abbaustadien von Bioabfallkompost (Prozess I)

In der Abbildung 2 wird der Vergleich von zwei Kompostierprozessen (Prozess I und II) dargestellt. Im Prozess II wurde wahrscheinlich durch eine ungünstige Mischung der Bioabfälle wenig organisches Material abgebaut.

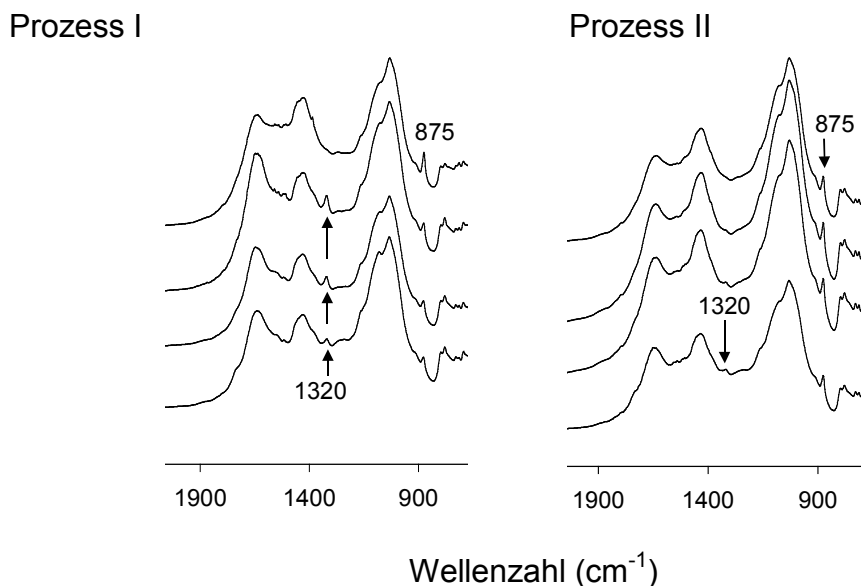


Abbildung 2 Vergleich der spektroskopischen Charakteristik der Fingerprintregion der Kompostierprozesse I und II

Der Glühverlust nahm in 142 Tagen von 35,4 auf 31,2 % (TM) ab, das C/N Verhältnis verringerte sich von 12,5 auf 11,1. Die schwache Reaktivität des Materials spiegelt sich auch im Spektrum wider. Die Bande bei 1320 cm^{-1} ist nur als Schulter sichtbar und zeigt

keine Entwicklung während des Prozesses. Die schwache Mineralisierung ist an der gleichbleibenden Carbonatbande bei 875 cm^{-1} zu erkennen und an der geringen Abnahme der aliphatischen Methylenbanden bei 2920 und 2850 cm^{-1} (hier nicht gezeigt).

3.1.2 Mechanisch-biologische Behandlung

Die für die Bioabfallkompostierung genannten Indikatorbanden finden sich zum Großteil auch in Abfällen, die einer mechanisch-biologischen Behandlung zugeführt werden. Die aliphatischen Methylenbanden sind meist noch stärker ausgeprägt. Das gilt auch für die Banden anorganischer Bestandteile. Im gezeigten Beispiel (Abbildung 3) enthält der Abfall viel Carbonat. Die Zunahme der intensivsten Carbonatbanden bei 1425 cm^{-1} und 875 cm^{-1} ist deutlich sichtbar. Die häufig übliche Zumischung von Klärschlamm zur Regulierung des Wassergehaltes zeigt sich in der Zunahme der Amid II Bande bei 1560 cm^{-1} (Smith 1999; Naumann et al. 1996). Eine Abnahme erfolgt auch bei den Banden (Schultern) der Polysaccharide ($1160, 1080\text{ cm}^{-1}$), die mit Pfeilen gekennzeichnet sind. Nach 90 Tagen ist das MBA-Material aufgrund der Intensität der Methylenbanden noch nicht als stabil zu bezeichnen. Das bestätigen auch die chemischen und biologischen Untersuchungen. Der TOC beträgt $18,6\%$ (TM), die Atmungsaktivität über 4 bzw. 7 Tage wurde mit 15 und $39\text{ mg O}_2/\text{g TM}$ bestimmt.

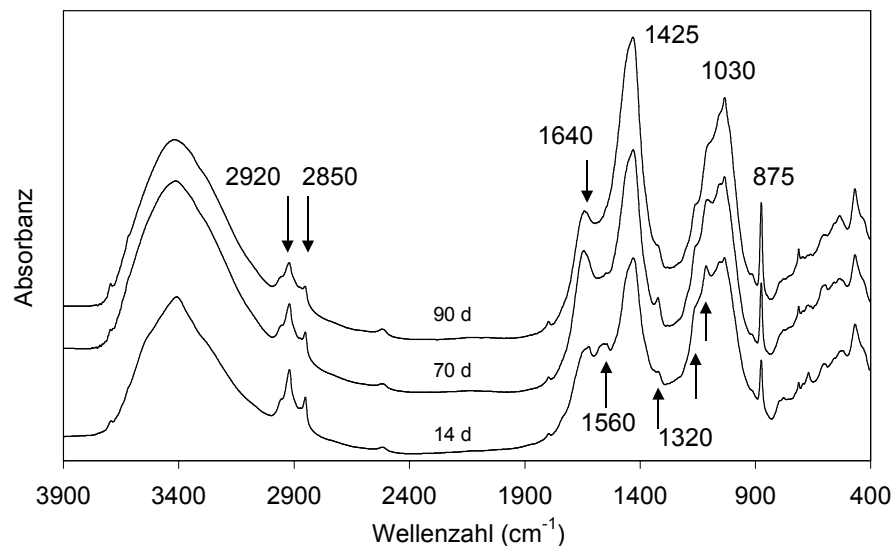


Abbildung 3 Verschiedene Abbaustadien bei der biologischen Behandlung (MBA) von Restmüll

3.1.3 Klärschlamm

Schlämme aus der Abwasserreinigung ändern ihre Zusammensetzung während des Prozesses. Während der Primärschlamm, der zur Reinigungsanlage gelangt, einen hohen Gehalt an Cellulose aufweist, besteht ein größerer Anteil des Überschussschlamm-

mes aus der mikrobiellen Biomasse, die während des Reinigungsprozesses gebildet wird. Diese Veränderung spiegelt sich in der IR spektroskopischen Charakteristik wider. In Abbildung 4 wird der Vergleich der Derivativspektren von Rohschlamm und Cellulose gezeigt. Die Übereinstimmung der Spektren, die durch die zweite Ableitung noch deutlicher wird, unterstützt die Identifizierung dieser Komponente im Abwasser.

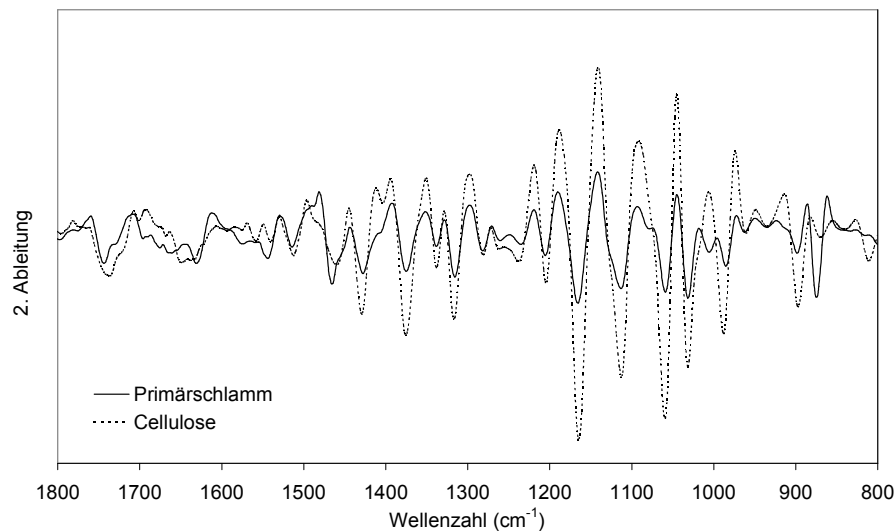


Abbildung 4 Zweite Ableitung des IR-Spektrums von Primärschlamm und Cellulose

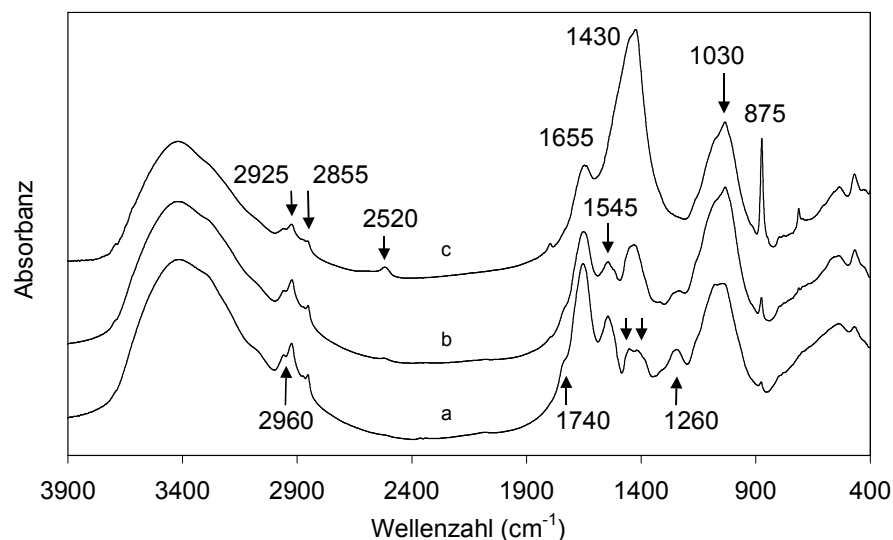


Abbildung 5 IR-Spektren von Überschussschlamm (a), anaerob stabilisiertem Schlamm (b) und 2 Jahre deponiertem gekalktem Schlamm (c)

Im Spektrum (a) der Abbildung 5 sind die Amidbanden (I, II, III) bei 1655, 1545 und 1260 cm^{-1} durch die mikrobielle Biomasse besonders ausgeprägt (Naumann et al. 1996). Durch die anaerobe Behandlung nehmen diese Banden zwar ab, allerdings ist der vollständige Abbau dieser ziemlich stabilen Biomasse unter anaeroben Bedingungen nicht möglich. Der Glühverlust der Probe (b) beträgt noch immer 53,8 %,

der TOC 27,9 % und der N-Gehalt 3,1 % (alle auf TM bezogen) im Vergleich zu 72,9 %, 37,6 % und 7,1 % im Überschussschlamm (a). Der Abnahme der Amidbanden entspricht auch eine Zunahme des C/N Verhältnisses von 5 (Überschussschlamm) auf 9 beim anaerob behandelten Schlamm. Spektrum (c) zeigt intensive Carbonatbanden. Durch die Ablagerung des mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ versetzten Klärschlammes hat in den oberflächennahen Schichten Karbonatisierung stattgefunden.

3.1.4 Altlasten

Identifizierung einer unbekanntes Ablagerung

Das Spektrum einer unbekanntes Ablagerung zeigt dominierende Carbonatbanden (2520 , 1800 , 1425 , 875 und 713 cm^{-1}), allerdings auch eine stärkere Bande im Bereich 2920 cm^{-1} (aliphatische Methylenbande) und einige Banden zwischen 1200 und 880 cm^{-1} , die auf organische Komponenten hinweisen. Durch Entfernung des Carbonats wurden weitere Banden, die durch die intensive Carbonatbande bei 1425 cm^{-1} überdeckt waren, sichtbar. Der Vergleich mit dem Cellulosespektrum beweist die Übereinstimmung. Das Material wurde als Altablagerung von Papierschlamm, der zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften für die Deponierung mit Carbonat vermischt worden war, identifiziert. Kaolin, dessen 3 charakteristische Banden in der Region $3695\text{-}3620 \text{ cm}^{-1}$ gefunden werden, ist ein Zusatzstoff bei der Papierherstellung.

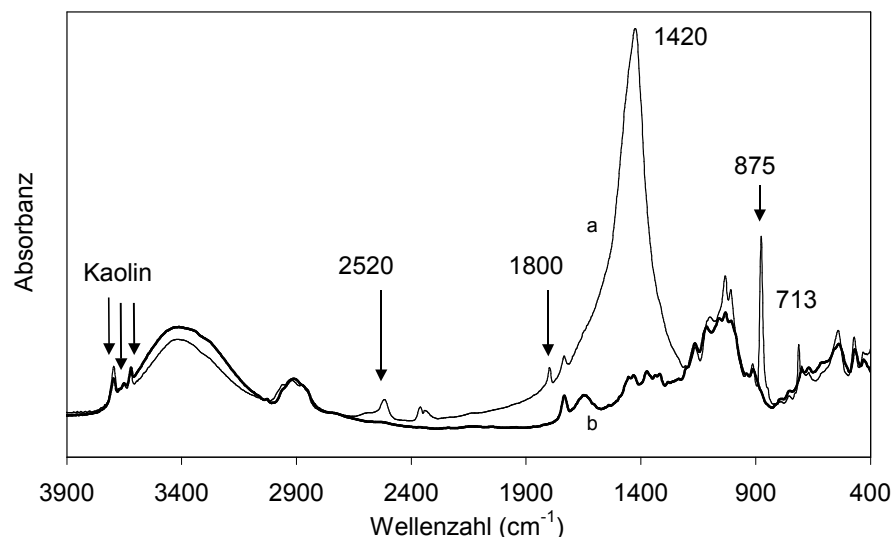


Abbildung 6 Spektrum der unbehandelten (a) und der mit HCl behandelten Gesamtprobe (b)

Die Abbildung 7 zeigt die Gegenüberstellung von Cellulose- und Probenspektrum (säurebehandelte Probe). Die Bande bei 1735 cm^{-1} kann der $\text{C}=\text{O}$ Schwingung von Aldehyden, Ketonen und Estern zugeordnet werden. Sie deutet auf einen teilweisen Abbau der Cellulose hin.

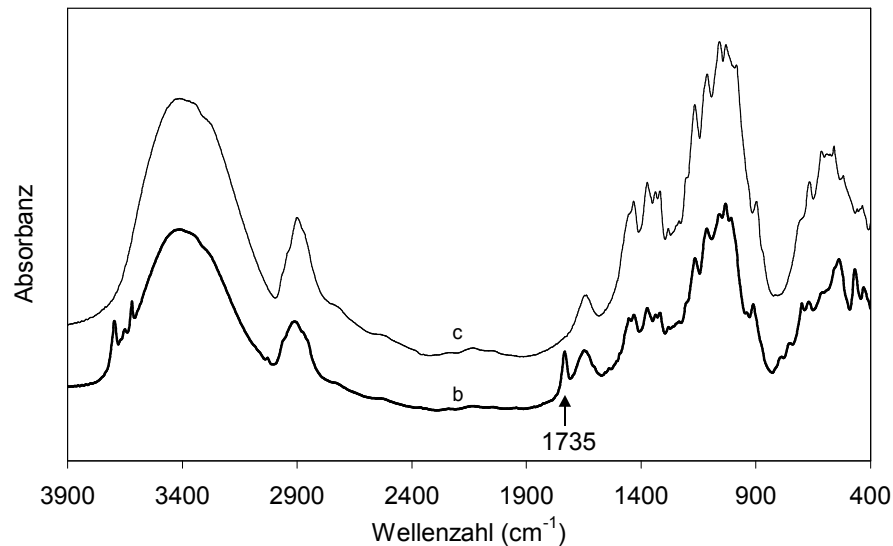


Abbildung 7 Spektrenvergleich: säurebehandelte Probe (b) und Cellulose (c)

Veränderung der Sickerwasserzusammensetzung bei Belüftung des Abfalls (Laborversuch)

Das noch reaktive Material aus einer Altlast wurde in Laborreaktoren eingebaut und belüftet. Die Spektren des nach 4 Wochen gewonnenen Sickerwassers aus dem belüfteten Material und der unbelüfteten Referenzprobe werden in Abbildung 8 dargestellt. Das Sickerwasserspektrum des unbelüfteten Abfalls weist zahlreiche Banden auf. Interessant ist die Absorptionsbande der S-H Gruppe (Thiole), da in der belüfteten Probe (b) das Oxidationsprodukt in Form der beiden Sulfatbanden bei 1100 und 616 cm⁻¹ auftritt. Auch die Stickstoffverbindungen, erkennbar an der N-H Streckschwingung im Bereich > 3000 cm⁻¹, der C-N Streckschwingung bei 1295 cm⁻¹ und den N-H Deformationsschwingungen bei 834 und 706 cm⁻¹ im Spektrum (a), wurden oxidiert und finden sich im Spektrum (b) als Nitratbande bei 1400 cm⁻¹.

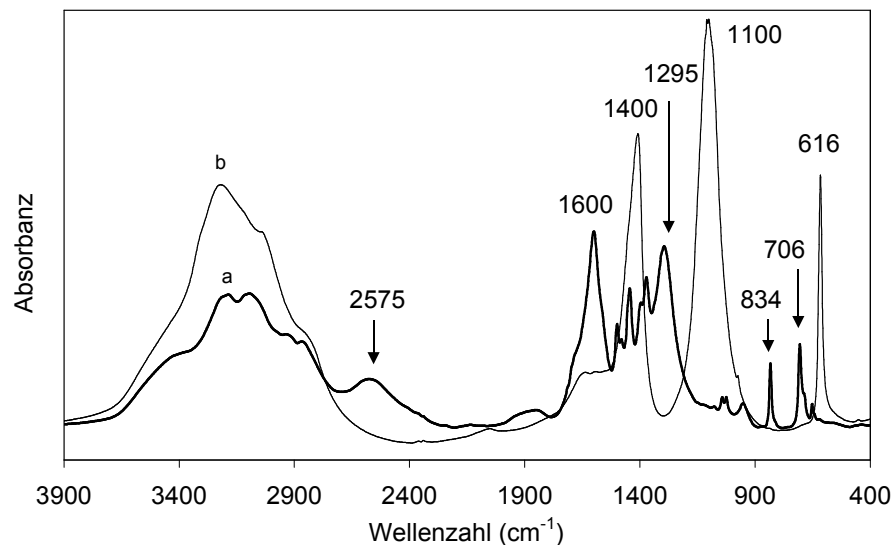


Abbildung 8 IR-Spektren der lyophilisierten Sickerwasserproben aus dem belüfteten Abfallreaktor (b) und der unbelüfteten Referenzprobe (a)

3.2 Thermogravimetrische Untersuchungen

Das Ausgangsmaterial und der reife Kompost aus Prozess I (Rottedauer 240 Tage) wurden thermogravimetrisch untersucht. In Abbildung 9 wird das Thermogramm dargestellt, das den Gewichtsverlust über den gesamten Temperaturverlauf angibt. Mit fortschreitendem Alter und zunehmender Stabilisierung des Materials verschiebt sich die Kurve in den höheren Temperaturbereich, das heißt, dass der gleiche Gewichtsverlust erst bei höheren Temperaturen erzielt wird. Die Abnahme über 650 °C ist auf die Zerstörung des Carbonats zurückzuführen.

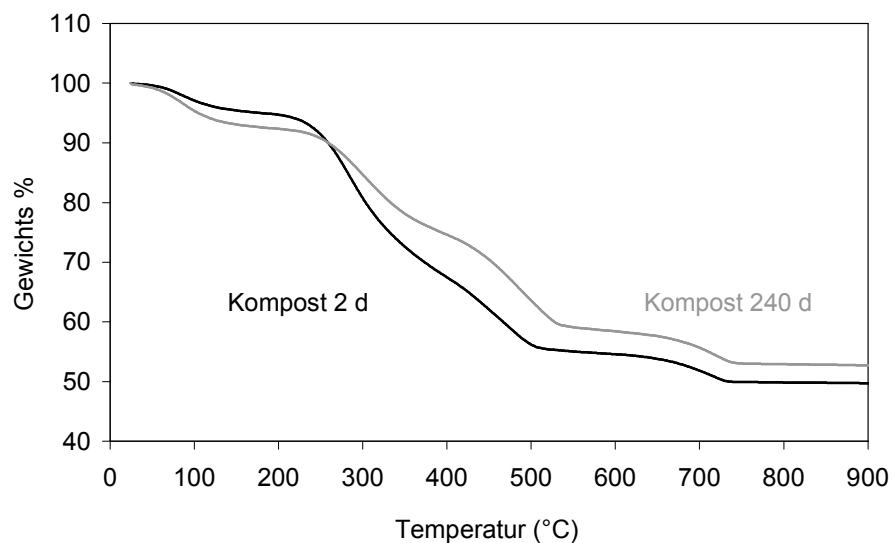


Abbildung 9 Thermogramm von frischem (2 d) und kompostiertem Bioabfall (240 Tage)

Eine zusätzliche Information bietet das integrierte Massenspektrometer zur Detektion der Verbrennungsgase. Neben dem gesamten Massenspektrum zeigt der Verlauf des Ionenstroms einzelner Massen über den gesamten Temperaturbereich, welche Substanz in welcher Menge (integrierte Peakfläche) bei einer bestimmten Temperatur entweicht. In Abbildung 10 ist die Verlaufskurve des Ionenstroms der Massenzahl 44 (CO_2) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der älteren Probe die größere Menge an CO_2 erst bei höheren Temperaturen freigesetzt wird. Der CO_2 Ionenstrom aus Carbonat erreicht bei beiden Proben um $700\text{ }^\circ\text{C}$ ein Maximum.

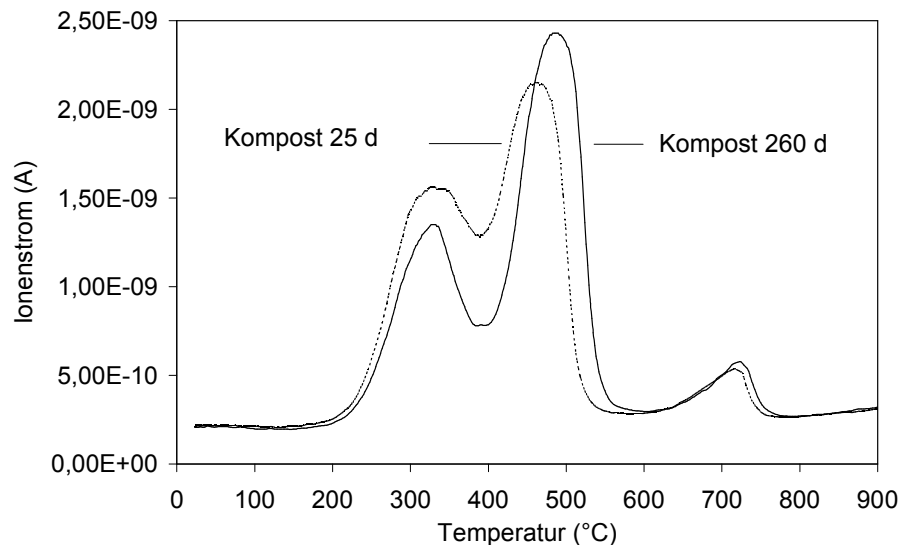


Abbildung 10 Ionenstrom der Massenzahl 44 (CO_2) über den gesamten Temperaturbereich

Der Ionenstrom der Massenzahl 18 (Wasser) über den gesamten Temperaturbereich zeigt, dass nicht nur das anhaftende Wasser, das bei $105\text{ }^\circ\text{C}$ bestimmt wird, eine Rolle spielt, sondern auch das Zwischenschichtwasser, das in Tonmineralen gebunden ist und erst bei etwa $300\text{ }^\circ\text{C}$ freigesetzt wird. In Abfällen, die reich an Tonmineralen sind, ist das zu berücksichtigen, da diese Wassermenge dem Glühverlust zugeordnet wird.

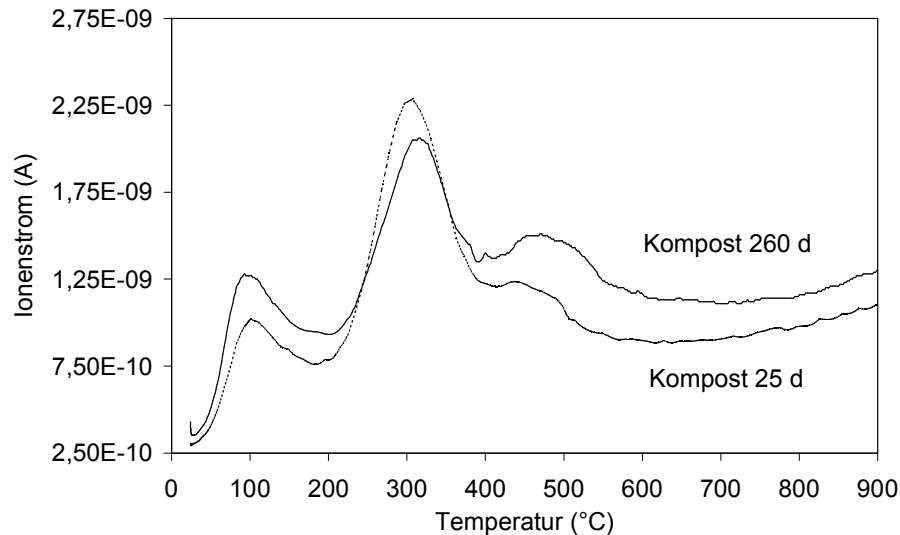


Abbildung 11 Ionenstrom der Massenzahl 18 (Wasser) über den gesamten Temperaturbereich

4 Zusammenfassung

Mit spektroskopischen und thermischen Methoden lassen sich komplexe Proben in einer „ganzheitlichen“ Weise charakterisieren. Dieser Zugang ist relativ neu, da in der Vergangenheit hauptsächlich der rein analytische Weg gewählt wurde, das heißt, dass komplex zusammengesetzte Proben in ihre Komponenten zerlegt und diese einzeln bestimmt wurden. Das Hauptziel war und ist auch meistens die quantitative Bestimmung einer chemischen Substanz oder Substanzgruppe. Zur Bestimmung umfassender Eigenschaften wie Stabilität, Reife und Reaktivität, zur Charakterisierung der Gesamtprobe und zum Verständnis der Vorgänge können Infrarotspektroskopie und thermische Methoden einen wertvollen Beitrag leisten. Das IR-Spektrum, das Thermogramm und das Massenspektrum subsumieren viele chemische und auch physikalische Parameter, sodass sie als „Fingerprint“ der Probe Rückschlüsse auf deren Eigenschaften zulassen. Die einfache Handhabung der Geräte macht sie auch für die Praxis tauglich. Ein weites Feld für die Forschung bleibt die Interpretation der IR-Spektren, der Thermogramme und Massenspektren, um noch mehr Information aus ihnen zu gewinnen. Vieles gibt es zu entdecken, das zu einem besseren Verständnis der chemischen und biologischen Vorgänge in Abfällen beiträgt.

Mein Dank gilt der Firma Netzsch in Selb, die die Durchführung der thermogravimetrischen Untersuchungen ermöglicht hat.

5 Literatur

- Binner, E.; Zach, A.; Widerrin, M.; Lechner, P. 1998 Auswahl und Anwendbarkeit von Parametern zur Charakterisierung des Endproduktes aus mechanisch-biologischen Restmüllbehandlungsverfahren. Schriftenreihe des BMUJF, Wien
- Chen, Y. 2003 Nuclear magnetic resonance, infrared and pyrolysis: Application of spectroscopic methodologies to maturity determination of composts. *Compost Science & Utilization* 11 (2), 152-168
- Davis, W.M.; Erickson, C.L.; Johnston, C.T.; Delfino, J.J.; Porter, J.E. 1999 Quantitative Fourier transform infrared spectroscopic investigation of humic substance functional group composition. *Chemosphere* 38 (12), 2913-2928
- Dell'Abate, M.T.; Benedetti, A.; Sequi, P. 2000 Thermal methods of organic matter maturation monitoring during a composting process. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 61, 389-396
- Grube, M.; Zagreb, E.; Gromozova, E.; Fomina, M. 1999 Comparative investigation of the macromolecular composition of mycelia forms *Thielavia terrestris* by infrared spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy* 19, 301-306
- Madejova, J. 2003 FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy* 31, 1-10
- Naumann, D.; Schultz, C.P.; Helm, D. 1996 What can infrared spectroscopy tell us about the structure and composition of intact bacterial cells? Infrared spectroscopy of biomolecules. Mantsch, Chapman (Eds.), Wiley-Liss, New York
- Otero, M.; Calvo, L.F.; Estrada, B.; Garcia, A.I.; Moran, A. 2002 Thermogravimetry as a technique for establishing the stabilization progress of sludge from wastewater treatment plants. *Thermochimica Acta* 389, 121-132
- Ouatmane, A.; Provengano, M.R.; Hafidi, M.; Senesi, N. 2000 Compost maturity assessment using calorimetry, spectroscopy and chemical analysis. *Compost Science & Utilization* 8, 124-134
- Ouatmane, A.; D'Orazio, V.; Hafidi, M.; Senesi, N. 2002 Chemical and physicochemical characterization of humic acid-like materials from composts. *Compost Science and Utilization* 10 (1), 39-46
- Sanchez-Monedero, M.A.; Cegarra, J.; Garcia, D.; Roig, A. 2002 Chemical and structural evolution of humic acids during organic waste composting. *Biodegradation* 13, 361-371
- Smidt, E.; Lechner, P.; Schwanninger, M.; Haberer, G.; Gerzabek, M.H. 2002 Characterization of waste organic matter by FT-IR spectroscopy – Application in waste science. *Applied Spectroscopy* 56, 1170-1175
- Smith, B. 1999 Infrared spectral interpretation. CRC Press: Boca Raton, New York
- Tan, K.H. 2003 Humic matter in soil and the environment. M. Dekker, New York

- Zaccheo, P.; Ricca, G.; Crippa, L. 2002 Organic matter characterization of composts from different feedstocks. *Compost Science & Utilization* 10 (1), 29-38
- Zach, A.; Schwanninger, M. 1999 Charakterisierung von Huminsäuren aus Abfallstoffen mittels FTIR. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 51 (11/12), 333-340

Anschrift der Verfasserin

Dr. Dipl.Ing. Ena Smidt

Institut für Abfallwirtschaft, Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt

Universität für Bodenkultur, Wien

Muthgasse 107

A - 1190 Wien

(+43-1) 318 99 00-343

Email: ena.smidt@boku.ac.at

Website: <http://www.boku.ac.at/abf/>