

BERICHTE AUS DEM  
INSTITUT FÜR  
WERKSTOFFKUNDE



UNIVERSITÄT HANNOVER

WERKSTOFFTECHNIK

Dipl.-Chem. Dipl.-Wirtsch.-Chem.  
Ingo Burmester, Hannover

# **Lasergestützte Kunststofferkennung im Recyclingprozeß**

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe **5**: Grund- und Werkstoffe Nr. **517**

**Inhalt**

<b>Vorwort</b> .....	<b>III</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand von Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Recycling von Kunststoffen</b> .....	<b>2</b>
2.1.1 Situation des Kunststoffrecyclings .....	2
2.1.2 Abfallmengen und Stoffströme .....	5
2.1.3 Kunststoffrecycling im Bereich der Elektronikschrottverwertung .....	7
2.1.4 Kunststoffrecycling im Bereich der Automobilverwertung .....	8
<b>2.2 Identifikations- und Sortiertechnik im Recyclingprozeß</b> .....	<b>9</b>
2.2.1 Prozeßschritte der Kunststoffaufbereitung .....	9
2.2.2 Direkte Sortierung mit mechanischen Methoden .....	10
2.2.2.1 Manuelle Sortierung .....	10
2.2.2.2 Statische Schwimm-Sink-Trennung .....	10
2.2.2.3 Schwimm-Sink-Trennung im Hydrozyklon .....	11
2.2.2.4 Flotation .....	12
2.2.2.5 Weitere Verfahren der direkten Trennung .....	13
2.2.3 Zweistufige Sortierung mit Methoden der Kunststoffidentifikation .....	13
2.2.3.1 Spektroskopie im nahen infraroten Spektralbereich (NIR-Spektroskopie) ....	14
2.2.3.2 Spektroskopie im mittleren infraroten Spektralbereich (MIR-Spektroskopie) 15	
2.2.3.3 Spektroskopie im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich (UV / VIS)..	16
2.2.3.4 Laser-Plasma-Emissions-Spektroskopie (Laser-PES).....	16
2.2.3.5 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) .....	16
2.2.3.6 Weitere Verfahren der Kunststoffidentifikation .....	17
<b>2.3 Zusammenfassende Bewertung und Verfahrensvergleich</b> .....	<b>18</b>

<b>3</b>	<b>Grundlagen zur lasergestützten Kunststoffidentifikation.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Materialeigenschaften thermoplastischer Kunststoffe .....</b>	<b>21</b>
3.1.1	Aufbau thermoplastischer Kunststoffe .....	21
3.1.2	Thermische Kunststoffeigenschaften .....	22
3.1.2.1	Wärmekapazität .....	22
3.1.2.2	Wärmeleitfähigkeit .....	23
3.1.2.3	Phasenumwandlungen .....	24
3.1.3	Optische Kunststoffeigenschaften .....	26
<b>3.2</b>	<b>Grundlagen der automatischen Bildverarbeitung .....</b>	<b>30</b>
3.2.1	Bildvorverarbeitung .....	30
3.2.2	Merkmalsextraktion .....	31
3.2.3	Mustererkennung .....	31
<b>3.3</b>	<b>Grundlagen zur Laser-Plasma-Emissionsspektroskopie (Laser-PES) ..</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>Methodenentwicklung .....</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Ausgangssituation und Zielstellung .....</b>	<b>34</b>
<b>4.2</b>	<b>Methodenentwicklung zur Erkennung der Kunststoffart .....</b>	<b>37</b>
4.2.1	Untersuchungsmethode zur Kunststoffidentifikation .....	37
4.2.2	Lasergestützte Erwärmung .....	39
4.2.3	Materialspezifische Wärmeverteilung (Wärmeimpulsantwort) .....	40
4.2.4	Thermografische Detektion .....	42
<b>4.3</b>	<b>Methodenumsetzung und Versuchstechnik (Verfahrensaufbau) .....</b>	<b>43</b>
4.3.1	Beschreibung des Anlagenaufbaus .....	43
4.3.2	Auswirkungen der Probengeometrie .....	46
4.3.3	Methode zur Berücksichtigung variierender Probengeometrien .....	50
<b>4.4</b>	<b>Entwicklung der Analysesoftware .....</b>	<b>54</b>
4.4.1	Ablauf der Datenverarbeitung .....	54
4.4.2	Hardwareanforderungen .....	55
4.4.3	Bildvorverarbeitung .....	56
4.4.4	Merkmalsextraktion .....	59
4.4.5	Mustererkennung zur Kunststoffidentifikation .....	62
<b>4.5</b>	<b>Methode zur Identifikation von Zuschlagstoffen .....</b>	<b>64</b>
4.5.1	Untersuchungsmethode der Laser-Plasma-Emissionsspektroskopie .....	64
4.5.2	Erzeugung eines laserinduzierten Plasmas .....	65
4.5.3	Gewinnung spektroskopischer Informationen .....	65

<b>5</b>	<b>Ergebnisdarstellung und Diskussion .....</b>	<b>67</b>
<b>5.1</b>	<b>Ergebnisse zur Identifikation der Kunststoffart.....</b>	<b>67</b>
5.1.1	Merkmale und Ergebnisse zur Identifikation technischer Kunststoffe.....	67
5.1.2	Untersuchung technischer Kunststoffe aus dem Elektronikschrottreycling.	72
5.1.3	Untersuchungen an Kunststoffen aus dem Verpackungsmüllbereich .....	74
5.1.4	Untersuchungen an Kunststoffen aus der Automobilverwertung.....	75
5.1.5	Gegenüberstellung ausgewählter Kennzahlen mit Materialeigenschaften ...	77
<b>5.2</b>	<b>Störeinflüsse und Anwendungsgrenzen .....</b>	<b>79</b>
5.2.1	Einflüsse durch Zuschlagstoffe und Oberflächenmodifikationen .....	79
5.2.2	Störeinflüsse durch variierende Probengeometrien.....	82
5.2.2.1	Einflüsse variierender Probenabstände .....	83
5.2.2.2	Einflüsse variierender Oberflächenlagewinkel .....	84
5.2.2.3	Weitere geometrische Störeinflüsse .....	86
5.2.3	Weitere Störeinflüsse .....	87
<b>5.3</b>	<b>Untersuchungen zur Identifikation von Zuschlagstoffen (L-PES).....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>Modellbildung zur lasergestützten Identifikation von Kunststoffen.....</b>	<b>94</b>
<b>6.1</b>	<b>Ansatz zur Berechnung der Temperaturverteilung .....</b>	<b>94</b>
<b>6.2</b>	<b>Ergebnisse zur Simulation an ruhenden Proben.....</b>	<b>96</b>
<b>6.3</b>	<b>Ergebnisse zur Simulation an bewegten Proben.....</b>	<b>100</b>
<b>7</b>	<b>Bedeutung für die Praxis.....</b>	<b>102</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>107</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>109</b>