

Technische Universität München  
Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung  
Fachgebiet Technik in Pflanzenbau und Landschaftspflege

**Verfahren zur Bestimmung physikalischer  
Qualitätsmerkmale und des Wassergehaltes  
biogener Festbrennstoffe**

**Thorsten Böhm**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät  
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. J. Meyer  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. H. Auernhammer  
2. Univ.-Prof. Dr. Dr. G. Wegener  
3. Univ.-Prof. Dr. M. Faulstich

Die Dissertation wurde am 15.12.2005 bei der  
Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät  
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
am 10.06.2006 angenommen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis .....</b>	<b>XVI</b>
<b>Verzeichnis der verwendeten Einheiten.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1 Einleitung und Problemstellung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemein .....	1
1.2 Physikalisch-mechanische Qualitätsmerkmale.....	3
1.3 Problemstellung .....	8
<b>2 Zielsetzung .....</b>	<b>10</b>
<b>3 Verfahren zur Bestimmung des Wassergehaltes.....</b>	<b>12</b>
3.1 Geeignete Messverfahren .....	12
3.1.1 Herstellerumfrage .....	12
3.1.2 Messprinzipien .....	13
3.1.2.1 Thermogravimetrische Verfahren .....	13
3.1.2.2 Elektrische Verfahren .....	18
3.1.2.3 Optische Verfahren .....	23
3.1.2.4 Hygrometrische Verfahren.....	25
3.2 Material und Methoden der Versuchsdurchführung.....	26
3.2.1 Verwendete Brennstoffproben .....	26
3.2.2 Messgeräte, Versuchsaufbau und -durchführung .....	29
3.2.2.1 Trockenschrankverfahren.....	29
3.2.2.2 Gefriertrocknung.....	30
3.2.2.3 Infrarottrocknung .....	31
3.2.2.4 Mikrowellentrocknung.....	33
3.2.2.5 Kapazitive Verfahren .....	34
3.2.2.6 Mikrowellenverfahren .....	37
3.2.2.7 Time–Domain-Reflectometry-Verfahren (TDR) .....	40
3.2.2.8 Leitfähigkeitsverfahren .....	41
3.2.2.9 Infrarotreflektionsverfahren.....	43
3.2.2.10 Luftfeuchte-Ausgleichsverfahren .....	46

3.2.3	Versuchspläne .....	48
3.2.4	Datenauswertung .....	49
3.2.5	Vorversuche .....	51
3.2.5.1	Temperaturkontrolle in den Trockenschränken .....	51
3.2.5.2	Ermittlung der Trocknungsdauer von Scheithölzern im Trockenschrank.....	52
3.2.5.3	Ermittlung der Trocknungsdauer von Holzhackschnitzeln im Trockenschrank .....	53
3.2.5.4	Ermittlung von Geräteeinstellungen für die Infrarottrockner .....	54
3.3	Ergebnisse und Diskussion.....	57
3.3.1	Messungen mit Holzhackschnitzeln .....	57
3.3.1.1	Korrelation mit der Referenzmethode .....	59
3.3.1.2	Sensitivitätsanalyse über den Einfluss der Schüttdichte .....	61
3.3.1.3	Simulation von Kalibriermodellen .....	63
3.3.2	Messungen mit Scheithölzern .....	64
3.4	Schlussfolgerungen .....	67
<b>4</b>	<b>Verfahren zur Bestimmung der Größenverteilung .....</b>	<b>69</b>
4.1	Übliche Messverfahren .....	69
4.1.1	Siebverfahren.....	70
4.1.1.1	Plansiebung.....	70
4.1.1.2	Trommelsiebung.....	71
4.1.2	Optische Verfahren .....	72
4.1.2.1	Bildanalyse .....	72
4.1.2.2	Lichtstreuunganalyse (Laserbeugung) .....	73
4.2	Material und Methoden der Versuchsdurchführung.....	73
4.2.1	Verwendete Brennstoffproben.....	73
4.2.1.1	Holzhackschnitzel .....	73
4.2.1.2	Standardprobe mit definierten Teilchengrößen.....	76
4.2.2	Messgeräte, Versuchsaufbau und -durchführung .....	77
4.2.2.1	Plansiebmaschine.....	77
4.2.2.2	Trommelsiebmaschine.....	78
4.2.2.3	Bildanalysegerät .....	80
4.2.2.4	Gegenüberstellung der methodischen Unterschiede .....	83
4.2.2.5	Vorversuche .....	83
4.2.3	Versuchsplan .....	85
4.2.4	Datenauswertung .....	86

4.3	Ergebnisse und Diskussion .....	91
4.3.1	Verteilungssummenkurven .....	91
4.3.2	Medianwert und mittlere Teilchengröße .....	94
4.3.3	Wiederholbarkeit .....	96
4.3.4	Fehlgutanteil .....	97
4.4	Schlussfolgerungen .....	99
<b>5</b>	<b>Verfahren zur Bestimmung der Schüttdichte .....</b>	<b>101</b>
5.1	Übliche Messverfahren .....	101
5.2	Material und Methoden der Versuchsdurchführung .....	103
5.2.1	Verwendete Brennstoffproben .....	103
5.2.2	Messverfahren und Versuchsaufbau .....	103
5.2.3	Versuchsdurchführung .....	105
5.2.4	Versuchspläne .....	106
5.2.5	Datenauswertung .....	108
5.3	Ergebnisse und Diskussion .....	111
5.3.1	Einfluss der Behälterform und -größe .....	111
5.3.2	Einfluss von Erschütterungen .....	113
5.3.3	Einfluss des Wassergehaltes .....	115
5.4	Korrelation von Schüttdichte und Größenverteilung .....	119
5.5	Schlussfolgerungen .....	120
<b>6</b>	<b>Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte .....</b>	<b>121</b>
6.1	Übliche Messverfahren .....	121
6.1.1	Stereometrie .....	122
6.1.2	Hydrostatische Verfahren .....	123
6.1.2.1	Auftriebsmessung .....	123
6.1.2.2	Flüssigkeitsverdrängung .....	123
6.1.2.3	Fehlerquellen hydrostatischer Verfahren .....	124
6.1.3	Feststoffverdrängung .....	125

6.2	Material und Methoden der Versuchsdurchführung.....	125
6.2.1	Verwendete Brennstoffproben.....	125
6.2.2	Messgeräte, Versuchsaufbau und -durchführung .....	126
6.2.2.1	Stereometrische Volumenbestimmung .....	126
6.2.2.2	Auftriebsmessung .....	128
6.2.2.3	Flüssigkeitsverdrängung.....	128
6.2.2.4	Anwendung von Netz- und Hilfsmitteln .....	129
6.2.2.5	Oberflächenversiegelung der Prüflinge.....	130
6.2.2.6	Bestimmung der Feststoffverdrängung.....	131
6.2.3	Wahl des Stichprobenumfangs .....	132
6.2.4	Versuchsplan .....	133
6.2.5	Datenauswertung (Varianzanalyse) .....	135
6.2.6	Vorversuche .....	136
6.3	Ergebnisse und Diskussion.....	137
6.3.1	Messungen von Pellets .....	138
6.3.1.1	Benetzungsmittel .....	139
6.3.1.2	Ultraschallbad .....	141
6.3.1.3	Imprägnierungsmittel .....	142
6.3.1.4	Stereometrische Messungen .....	142
6.3.1.5	Feststoff-Pyknometermessung .....	143
6.3.1.6	Allgemeine Beobachtungen .....	144
6.3.1.7	Mindest-Stichprobenumfang .....	145
6.3.2	Messungen von Briketts.....	146
6.3.3	Systematische Fehlerquellen im Tauchbad .....	150
6.4	Schlussfolgerungen .....	151
<b>7</b>	<b>Einordnung der Ergebnisse im Standardisierungs-</b> <b>prozess .....</b>	<b>153</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>158</b>
<b>9</b>	<b>Summary .....</b>	<b>163</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>167</b>
<b>11</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>174</b>