

**Berichte aus der Energietechnik**

**Markus Spitz**

**Kraftgas aus Holz zur alternativen Verwendung  
in Zündstrahl-Dieselmotoren**

Holzgasерzeugung, Gasaufbereitung,  
chemische und physikalische Kraftstoffeigenschaften,  
Erdgassubstitution, Emissions- und Betriebsverhalten

D 386 (Diss. Universität Kaiserslautern)

**Shaker Verlag  
Aachen 1999**

# Inhaltsverzeichnis

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.      | Einleitung   | 1  |
| 2.      | Grundlagen der thermischen Biomassenutzung         | 3  |
| 2.1     | Vergasungsgüter                                    | 4  |
| 2.1.1   | Die chemischen Hauptkomponenten von Holz           | 5  |
| 2.1.2   | Physikalische Eigenschaften von Holz               | 6  |
| 2.2     | Verbrennung von Holz                               | 6  |
| 2.3     | Gaserzeugung                                       | 9  |
| 2.3.1   | Theoretische Grundlagen                            | 10 |
| 2.3.2   | Verfahren zur Gaserzeugung                         | 14 |
| 2.3.3   | Kennzahlen zur Holzgaserzeugung                    | 18 |
| 2.3.3.1 | Äquivalenzverhältnis ER                            | 18 |
| 2.3.3.2 | Druck, Temperatur, Verweilzeit                     | 19 |
| 2.3.3.3 | Kohlenstoff-/ Wasserstoffverhältnis                | 19 |
| 2.3.3.4 | Reaktivität und spezifische Oberfläche             | 19 |
| 2.3.4   | Gasaufbereitung                                    | 20 |
| 3.      | Motorische Nutzung von Holzgas                     | 21 |
| 3.1     | Zündstrahlmotoren für Holzgas, Diesel-Gasverfahren | 23 |
| 4.      | Kennzahlen zum Diesel-Gasbetrieb                   | 27 |
| 4.1     | Heizwert   | 27 |
| 4.2     | Gemischheizwert                                    | 28 |
| 4.3     | Wobbe-Index  | 30 |
| 4.4     | Energetischer Gasanteil                            | 33 |
| 4.5     | Zündung  | 33 |
| 4.5.1   | Zündgrenzen  | 34 |
| 4.5.2   | Zündtemperatur                                     | 35 |
| 4.5.3   | Flammpunkt   | 38 |
| 4.5.4   | Zündverzug   | 38 |
| 4.6     | Methanzahl   | 41 |
| 4.6.1   | Experimentelle Bestimmung der Methanzahl           | 41 |
| 4.6.2   | Klopfestigkeitsanspruch von Gasmotoren             | 43 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 4.6.3   | Vereinfachte Methode zur Best. des Methanzahlanspruchkennfeldes | 43 |
| 4.7     | Kennzeichnung von Brennstoffen                                  | 45 |
| 4.7.1   | Dichte  | 45 |
| 4.7.2   | Viskosität  | 45 |
| 4.7.3   | Oberflächenspannung   | 46 |
| 4.7.4   | Pour Point, Cloud-Point   | 46 |
| 4.7.5   | Koksrückstand nach Conradson                                    | 46 |
| 4.7.6   | Destillationsverlauf  | 46 |
| 4.7.7   | Asphaltengehalt   | 47 |
| 4.7.8   | Korrosionsverhalten (Kupferstreifenprüfung)                     | 47 |
| 5.      | Berechnungsgrundlagen   | 48 |
| 5.1     | Motorische Verbrennung  | 48 |
| 5.1.1   | Allgemeine Verbrennungsgleichung                                | 48 |
| 5.1.2   | Kraftstoff-Luft-Verhältnis                                      | 49 |
| 5.1.3   | Anwendung   | 50 |
| 5.1.3.1 | Bestimmung des Luftverhältnisses für Dieselmotoren              | 50 |
| 5.1.3.2 | Luftverhältnisse bei der Zweistoffverbrennung                   | 54 |
| 5.1.3.3 | Best. der Luftverhältnisse bei der Zweistoffverbrennung         | 56 |
| 5.1.3.4 | Koeffizientenbestimmung   | 58 |
| 5.1.4   | Bestimmung des Brennverlaufs                                    | 59 |
| 5.1.5   | Brennraumseitiger Wärmeübergang                                 | 60 |
| 5.1.6   | Heizverlaufsberechnung  | 62 |
| 5.1.7   | Parameter zur Heizverlaufsberechnung                            | 64 |
| 5.1.7.1 | Amplitudenauflösung   | 64 |
| 5.1.7.2 | Abtaste   | 64 |
| 5.1.7.3 | Nullpunkt   | 65 |
| 5.1.7.4 | Totpunkt  | 67 |
| 5.2     | Zündbeginn  | 68 |
| 5.3     | Gleichraumgrad  | 70 |
| 5.4     | Rechnerische Bestimmung der Methanzahl                          | 71 |
| 5.5     | Berechnung von Vergasungsvorgängen                              | 74 |
| 5.5.1   | Stoffmengenbilanz   | 74 |
| 5.5.2   | Massenwirkungsgesetz und Gleichgewicht                          | 76 |
| 5.5.3   | Wärmebilanz   | 78 |
| 6.      | Versuchsträger, Meßeinrichtungen, Systematik                    | 80 |
| 6.1     | Versuchsmotor   | 80 |
| 6.2     | Umbau Dieselmotor zum Zündstrahlmotor                           | 81 |
| 6.2.1   | Gasmischeinrichtung   | 82 |
| 6.2.2   | Auslegung des Venturimischers                                   | 83 |
| 6.2.3   | Gasregelstrecke   | 85 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 6.2.4   | Einspritzanlage   | 87  |
| 6.3     | Motorprüfstand  | 88  |
| 6.3.1   | Messung physikalischer Kenngrößen                             | 90  |
| 6.3.2   | Messung Abgas   | 91  |
| 6.4     | Druckindizierung  | 92  |
| 6.5     | Indizierung am MB 838CaM                                      | 94  |
| 6.6     | Holzgas erzeugungsanlage AHT                                  | 95  |
| 6.6.1   | Teerreinigung über Desintegratorwäscher                       | 97  |
| 6.6.2   | Teerreinigung über Absorption (VKM-System)                    | 98  |
| 6.7     | Bestimmung der kraftstoffspezifischen Kennwerte               | 103 |
| 6.7.1   | Umbau CFR-Prüfmotor auf Gasbetrieb                            | 103 |
| 6.7.2   | Indizierung am CFR-Prüfmotor                                  | 105 |
| 6.7.3   | Kraftstoffanalytik  | 107 |
| 6.8     | Vergasungsgüter   | 108 |
| 7.      | Gesetzliche Rahmenbedingungen                                 | 111 |
| 7.1     | Genehmigung der Gaserzeugungsanlage                           | 111 |
| 7.2     | Grenzwerte für Verbrennungsmotorenanlagen                     | 111 |
| 8.      | Versuchsdurchführung  | 114 |
| 8.1     | Bestimmung der Methanzahl am CFR-Prüfmotor                    | 114 |
| 8.2     | Bestimmung der gesetzlich limitierten Emissionen              | 119 |
| 8.3     | Bestimmung der Druckverläufe                                  | 121 |
| 9.      | Ergebnisse aus Versuch und Berechnung                         | 122 |
| 9.1     | Ergebnisse der chemischen Analysen                            | 122 |
| 9.1.1   | Holzgas   | 122 |
| 9.1.1.1 | Gas Mengenvariation   | 122 |
| 9.1.1.2 | Vergasungsgutvariation  | 125 |
| 9.1.2   | Holzteer  | 128 |
| 9.1.3   | Waschmedien, VKM-Teerwäsche                                   | 129 |
| 9.1.3.1 | Dichte  | 128 |
| 9.1.3.2 | Viskosität  | 131 |
| 9.1.3.3 | Heizwert  | 132 |
| 9.1.3.4 | Siedeverlauf  | 133 |
| 9.1.3.5 | Koksrückstand   | 134 |
| 9.1.3.6 | Kupferstreifenprüfung   | 135 |
| 9.2     | Untersuchungen am VKM-Teerwäscher                             | 136 |
| 9.3     | Ergebnisse der Untersuchungen am CFR-Prüfmotor                | 137 |
| 9.3.1   | Abhängigkeit des Druckverlaufs vom Verbrennungsluftverhältnis | 137 |
| 9.3.2   | Methanzahl von Holzgas  | 141 |
| 9.4     | Ergebnisse der Untersuchungen am Motor MB 838 CaM             | 143 |
| 9.4.1   | Gasanteile, Verbräuche, Luftverhältnisse                      | 143 |

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 9.4.2   | Abgasverhalten   | 156 |
| 9.4.2.1 | Kohlenmonoxid  | 157 |
| 9.4.2.2 | HC   | 159 |
| 9.4.2.3 | NOx  | 163 |
| 9.4.2.4 | Schwärzungszahl und Partikel                                   | 166 |
| 9.4.2.5 | Teer-DK-Chargen  | 169 |
| 9.4.3   | Ergebnisse der Druckindizierung und der Heizverlaufsberechnung | 170 |
| 9.4.4   | Temperaturen   | 177 |
| 10.     | Zusammenfassung  | 181 |
| 11.     | Literatur  | 185 |