

---

# Transport in der Brennstoffaufgabe – Teil1: Brennstoffcharakterisierung

---

Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS

Dipl.-Ing. (FH) Florian Grafmans, GKS

Dipl.-Ing. Martin Zwiellehner, SAR

---

# Inhalt

1. Einleitung
2. Brennstoffdichten
3. Brennstoffzusammensetzung
4. Zusammenfassung

# 1. Einleitung



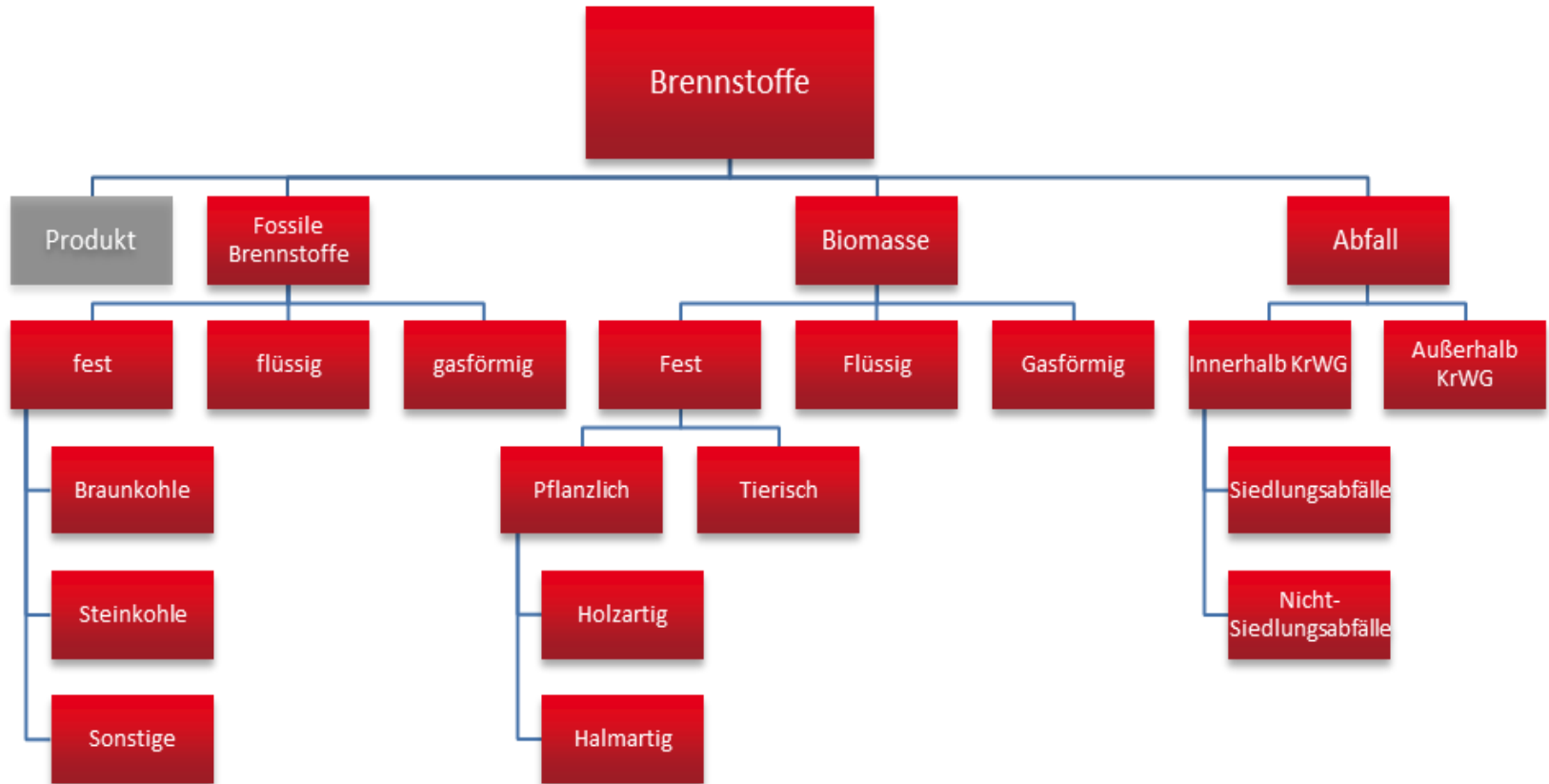
---

# Was ist Brennstoff?

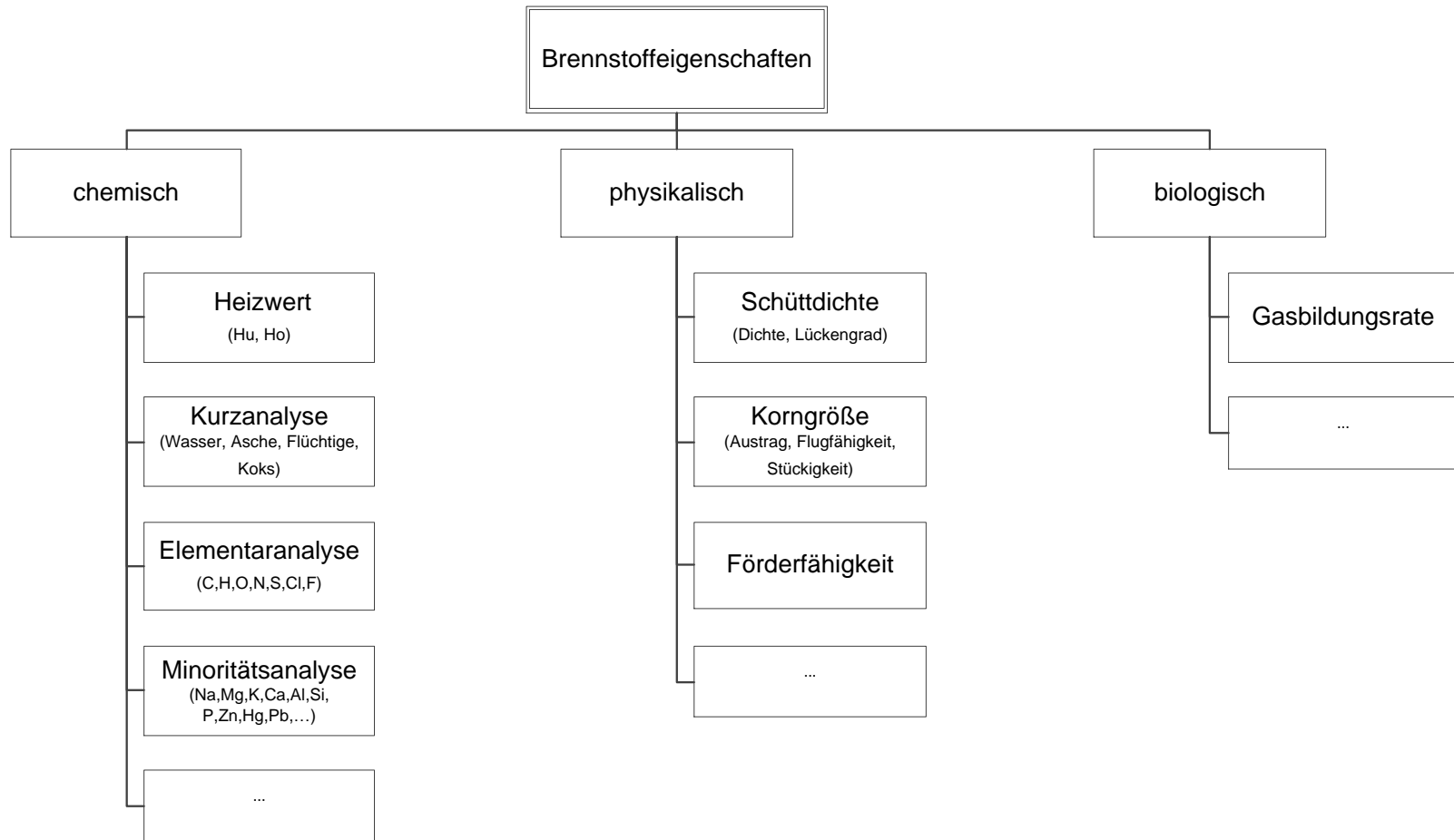
## Definition: Brennstoff

Ein Brennstoff ist ein Stoff,  
dessen gespeicherte chemische Energie sich  
durch Oxidation  
in Form einer thermo-chemischen Umsetzung  
in eine andere Energieform umwandeln lässt und  
für den diese Umwandlung beabsichtigt (Ziel) ist/war.  
(VDI 3459 – Gründruck, 2012)

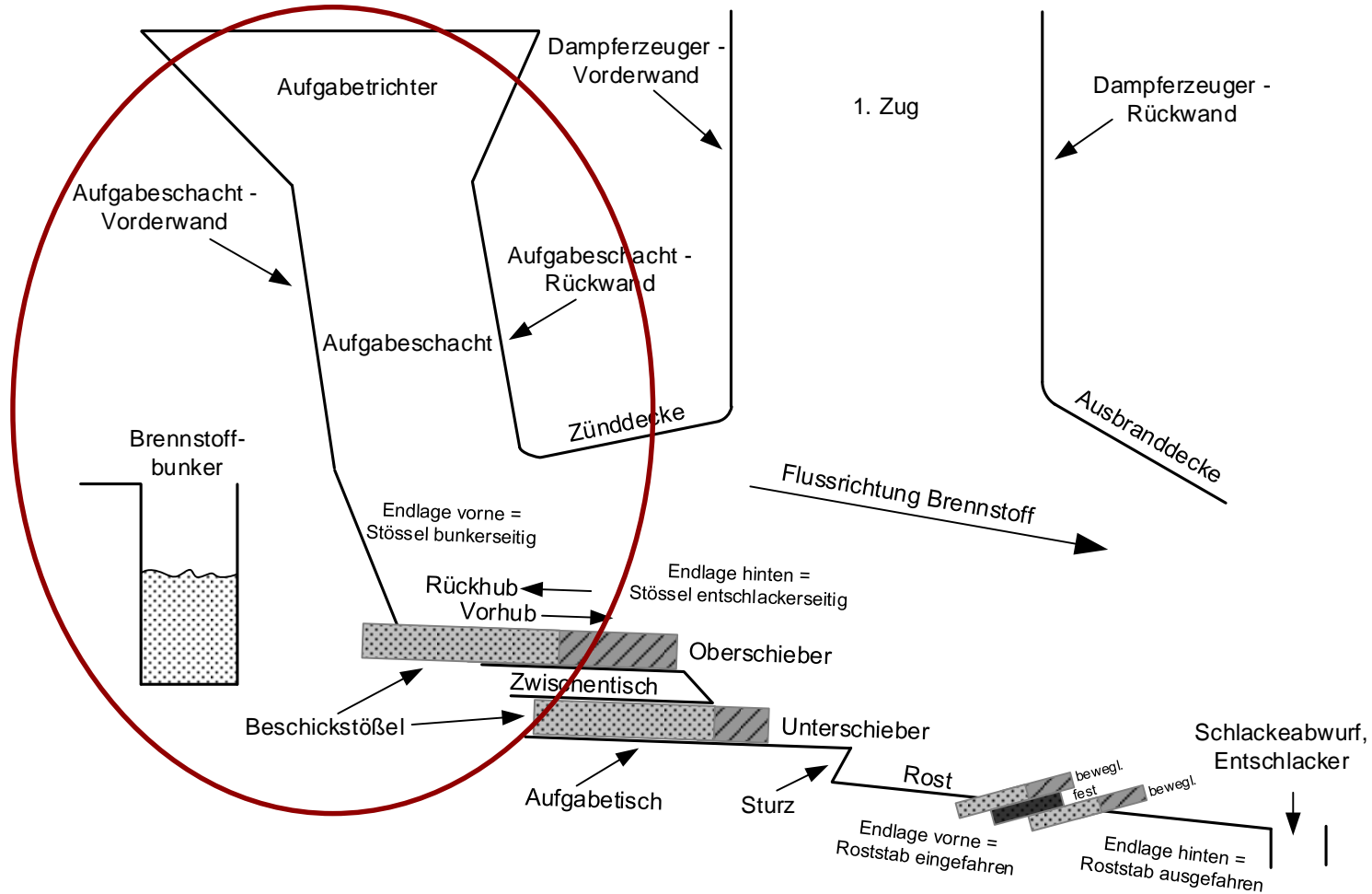
# Brennstoffe



# Brennstoffeigenschaften



# Anlagen für heterogene Fest-Brennstoffe



# 2. Brennstoffdichten

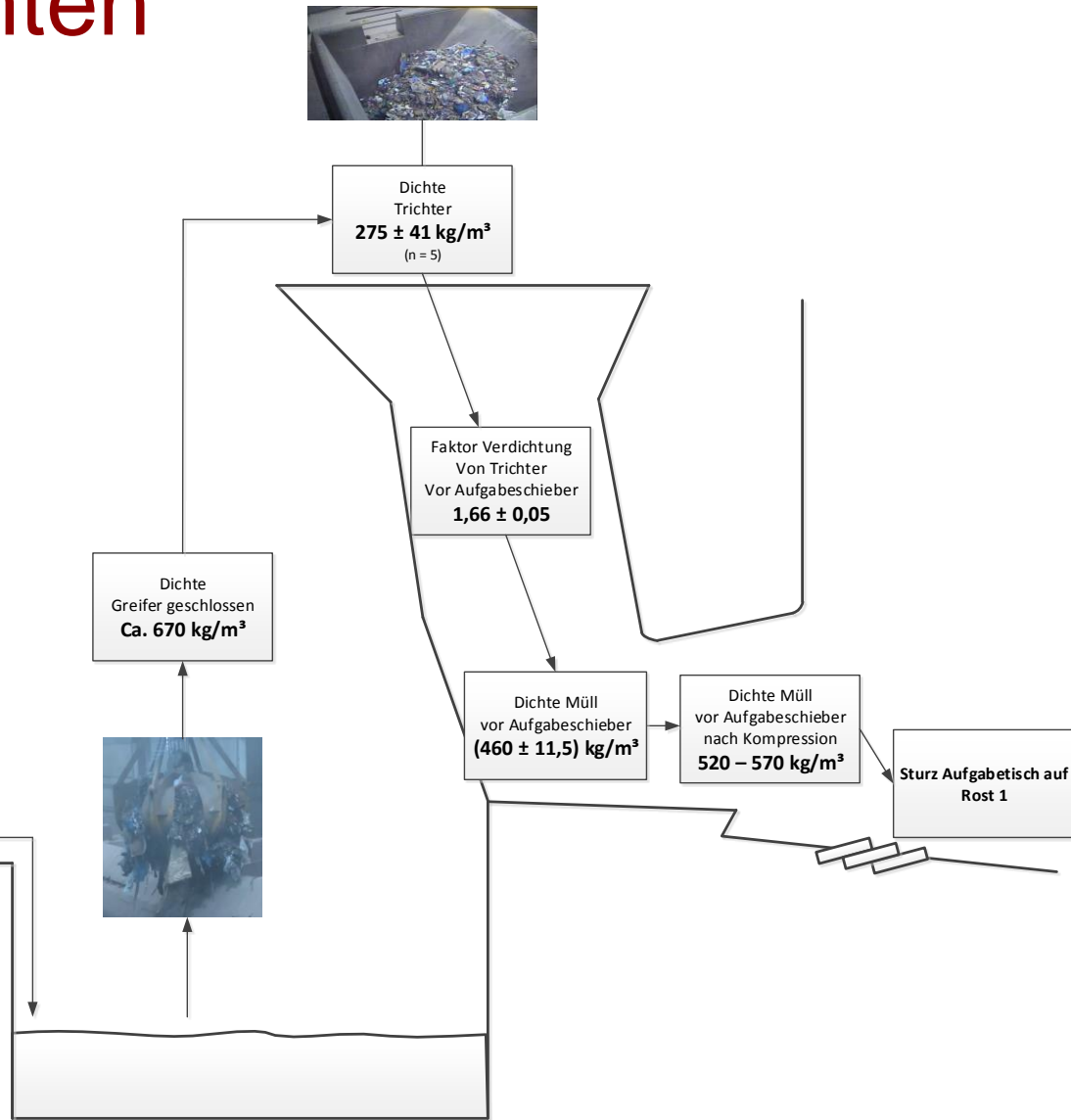


Dichte  
Pressfahrzeug  
Städtischer Hausmüll  
**594 ± 53 kg/m<sup>3</sup>**  
(n = 28)

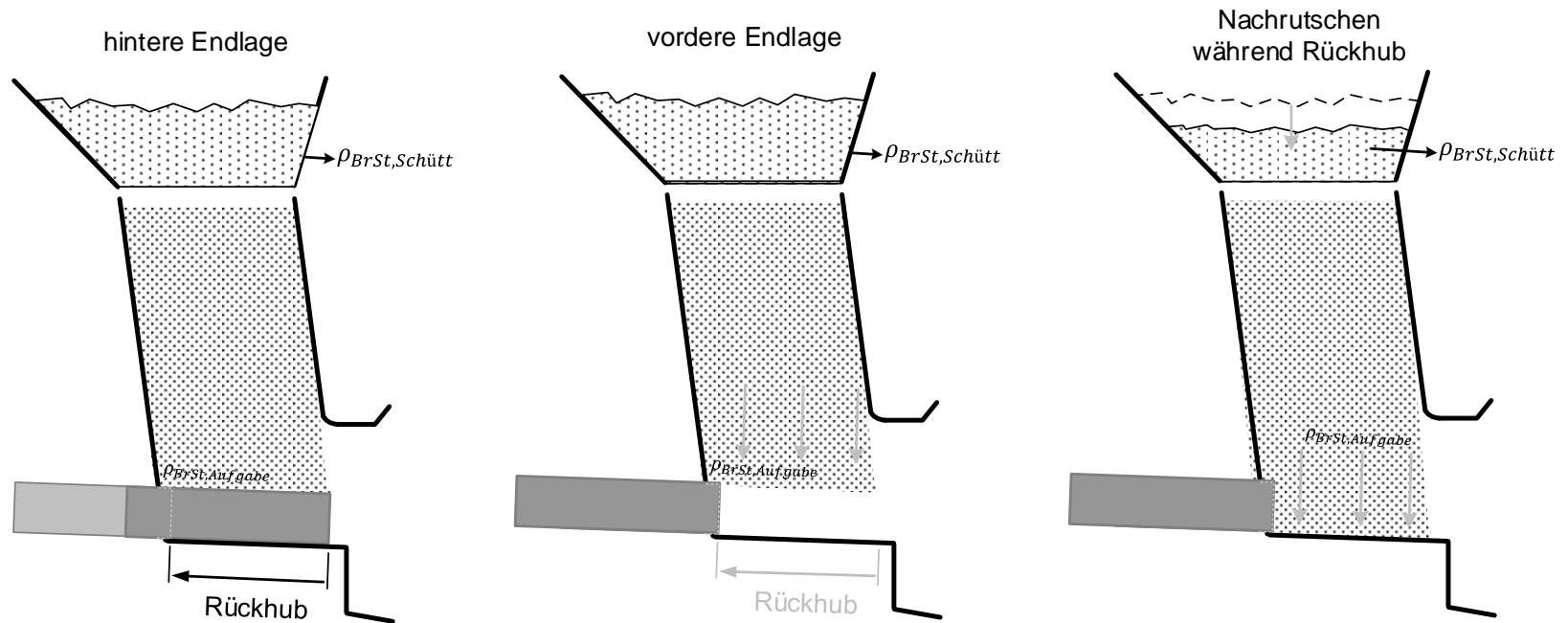


Schüttdichte  
Schubboden  
Abraum Deponie  
**481 ± 27 kg/m<sup>3</sup>**  
(n = 13)

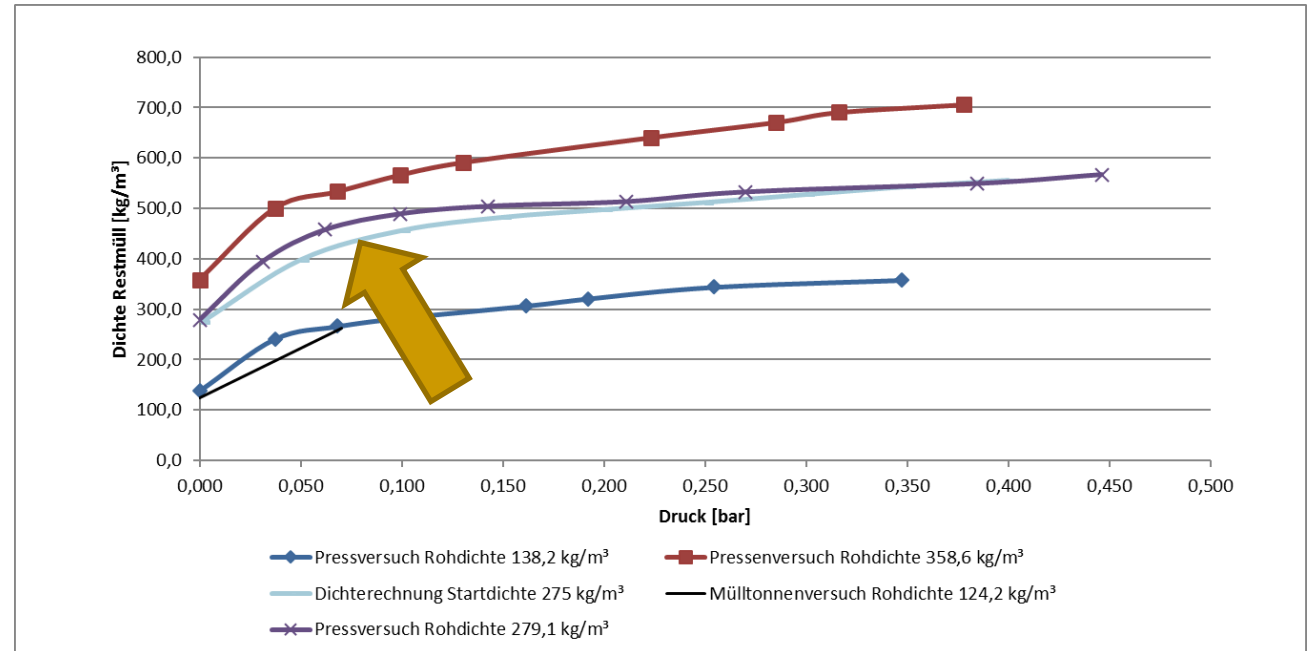
Schüttdichte  
Schubboden  
Von Umschlagstation  
**269 ± 47 kg/m<sup>3</sup>**  
(n = 17)



# Brennstoffdichte Trichter und Schacht

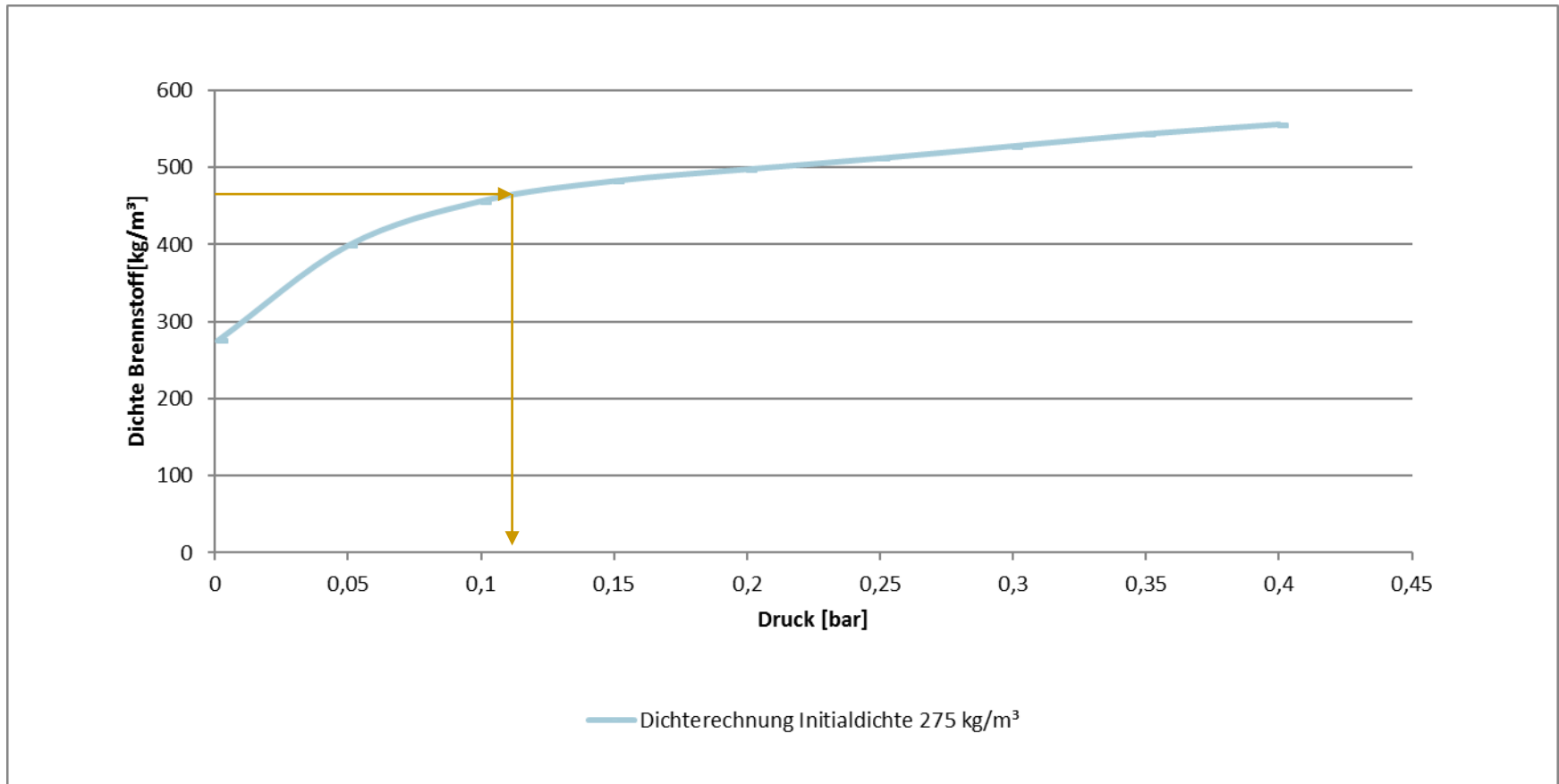


# Pressversuche



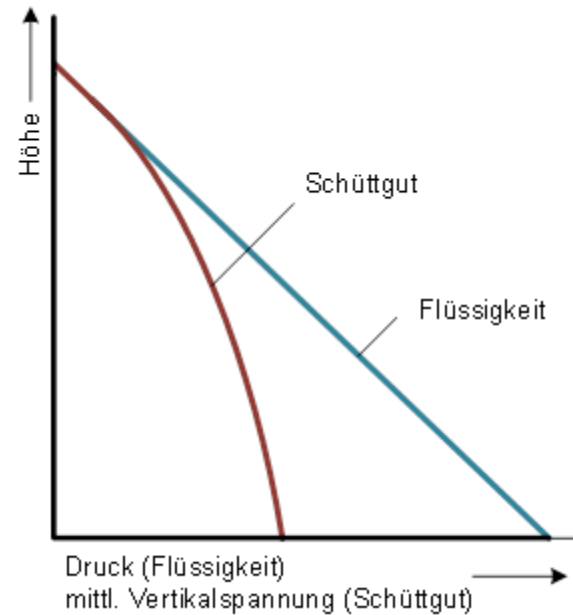
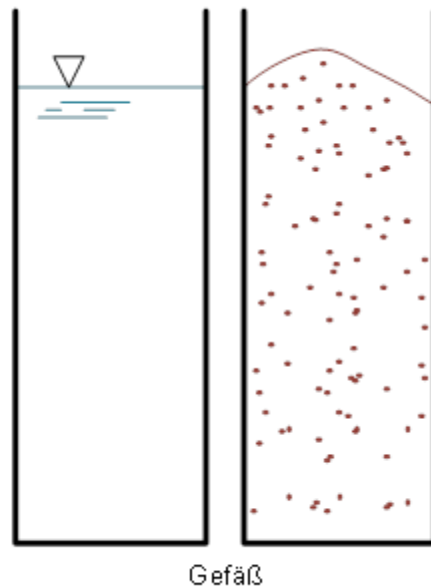
$$\begin{aligned}
 & \rho_{\text{Müll,Druck}} \\
 &= \left( 82984 \cdot \frac{1}{\text{bar}^5} \cdot p^5 - 132738 \cdot \frac{1}{\text{bar}^4} \cdot p^4 + 80349 \cdot \frac{1}{\text{bar}^3} \cdot p^3 - 23053 \cdot \frac{1}{\text{bar}^2} \cdot p^2 \right. \\
 & \left. + 3438,2 \cdot \frac{1}{\text{bar}} \cdot p \right) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + \rho_{\text{Müll,Schütt}}
 \end{aligned}$$

# Druck im Schacht / Aufgabebereich



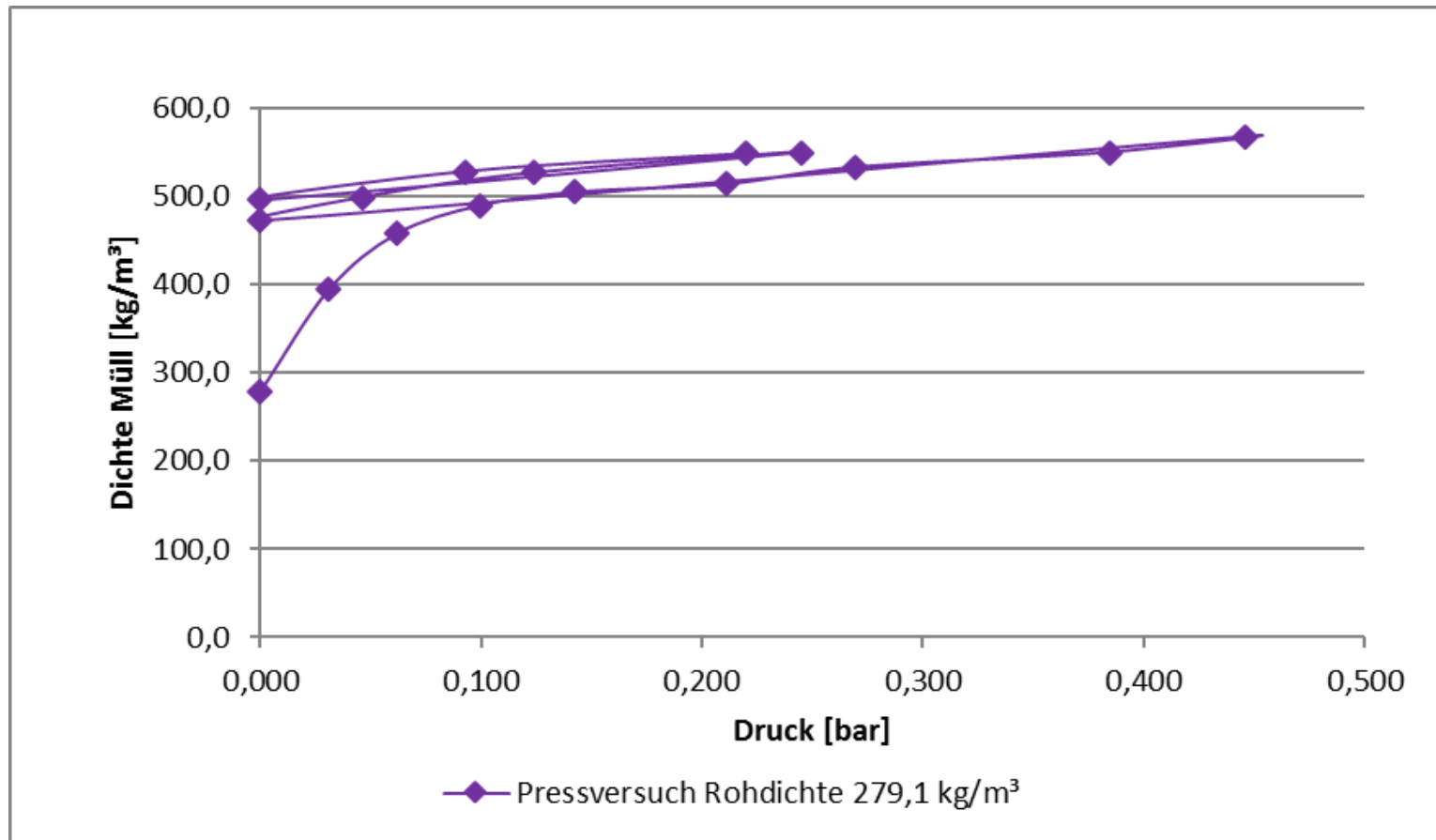
$$p_{BrStS} = 0,105bar \cdot \frac{h_{BrStS}}{h_{BrStS,GKS}} \cdot \frac{\rho_{BrSt,Schütt,Trichter}}{\rho_{BrSt,Schütt,Trichter,GKS}}$$

# Dichte im Schacht / Aufgabebereich



(Schulze, D.: Pulver und Schüttgüter - Fließeigenschaften und Handhabung, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, ISBN 978-3-542-53884-1)

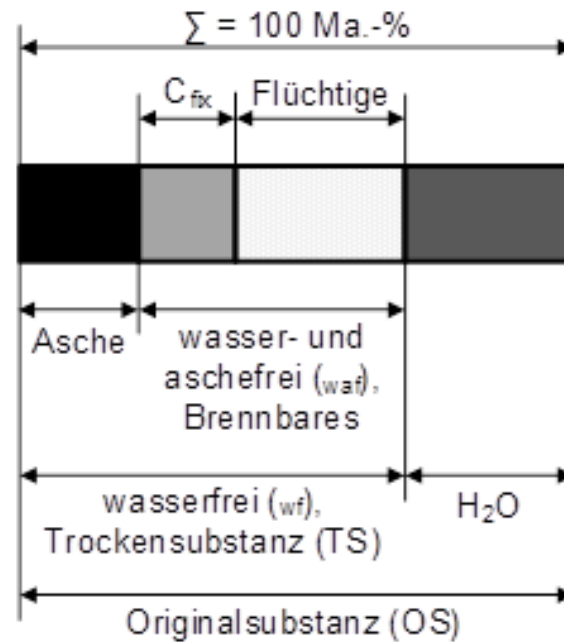
# Dichte-Hysterese



# Kompressibilität in der Praxis



# Brennstoffanalytik / Elementaranalyse



(Günther)

# Vergleich Brennstoffe / Brennstofffraktionen

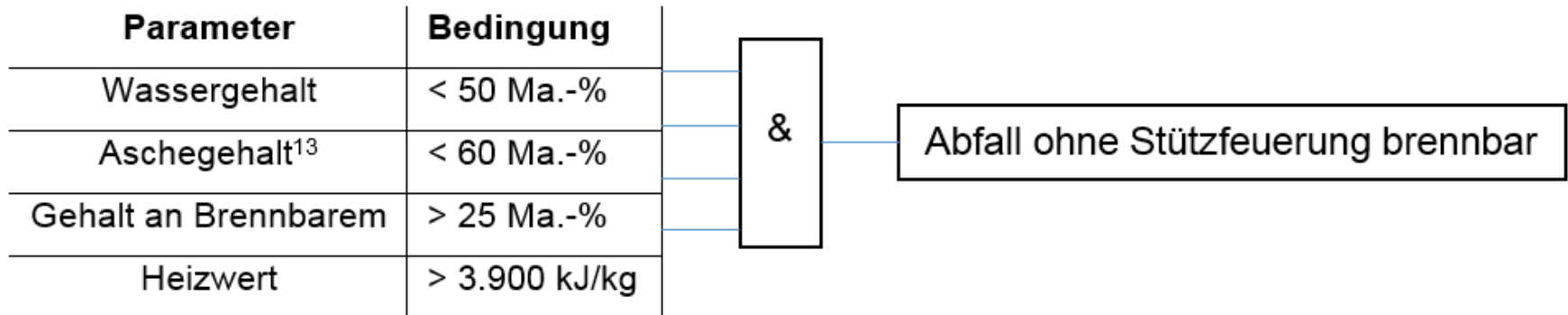
Stoffname	Heizwert (roh)	Heizwert- Anteil der Flüchtigen	Heizwert- Anteil des C,Fix	C/H-Verhältnis (gerundete Mittelwerte)
	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[Mas.-% C/ Mas.-% H]
Steinkohle (Anthrazit)	27.840	24,7%	75,3%	39,14
Rohbraunkohle	8.830	44,7%	55,3%	12,81
Torf	20.700	76,7%	23,3%	9,29
Kompost - Rotteendprodukt	5.696	64,3%	35,7%	8,10
Holzhackschnitzel	17.600	77,4%	22,6%	8,39
Buche	16.600	76,2%	23,8%	7,96
Restmüll-Fraktion - Kunststoffe	28.400	98,5%	1,5%	6,59
Restmüll-Fraktion - Verbunde	19.300	86,6%	13,4%	6,61
Restmüll-Fraktion - Mittelmüll	6.935	82,6%	17,4%	6,07
Restmüll-Fraktion - Feinmüll	3.065	74,4%	25,6%	5,88

# Zusammensetzung Siedlungsabfall

Komponenten	Symbol	Einheit	Schwankungsbreite	
Kohlenstoff	$\xi_C$	Ma.-%	28	bis 40
Wasserstoff	$\xi_H$	Ma.-%	4	bis 5
Sauerstoff	$\xi_O$	Ma.-%	16	bis 22
Stickstoff	$\xi_N$	Ma.-%	0,2	bis 1,3
Schwefel	$\xi_S$	Ma.-%	0,3	bis 0,5
Chlor	$\xi_{Cl}$	Ma.-%	0,4	bis 1
Cadmium	$\xi_{Cd}$	Ma.-%	0,0001	bis 0,0033
Blei	$\xi_{Pb}$	Ma.-%	0,039	bis 0,18
Kupfer	$\xi_{Cu}$	Ma.-%	0,006	bis 0,21
Zink	$\xi_{Zn}$	Ma.-%	0,047	bis 0,65
Chrom	$\xi_{Cr}$	Ma.-%	0,003	bis 0,27
Eisen	$\xi_{Fe}$	Ma.-%	3	bis 5
Quecksilber	$\xi_{Hg}$	Ma.-%	0,00005	bis 0,0011
Dioxine	-	ng/kg	10	bis 256
Asche	$\xi_{In}$	Ma.-%	25	bis 35
Wasser	$\xi_{H_2O}$	Ma.-%	15	bis 35
Anteil Brennbares	$\xi_{Brenn}$	Ma.-%	40	bis 60
Heizwert	$H_u$	kJ/kg	7000	bis 15000

(Scholz, R., Beckmann, M., Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Hrsg.: Bahadir, M., Collins, H.-J., Hock, B. Verlag B. G. Teubner-Reihe UMWELT, 1. Auflage, 2001, ISBN 3-519-00402-X)

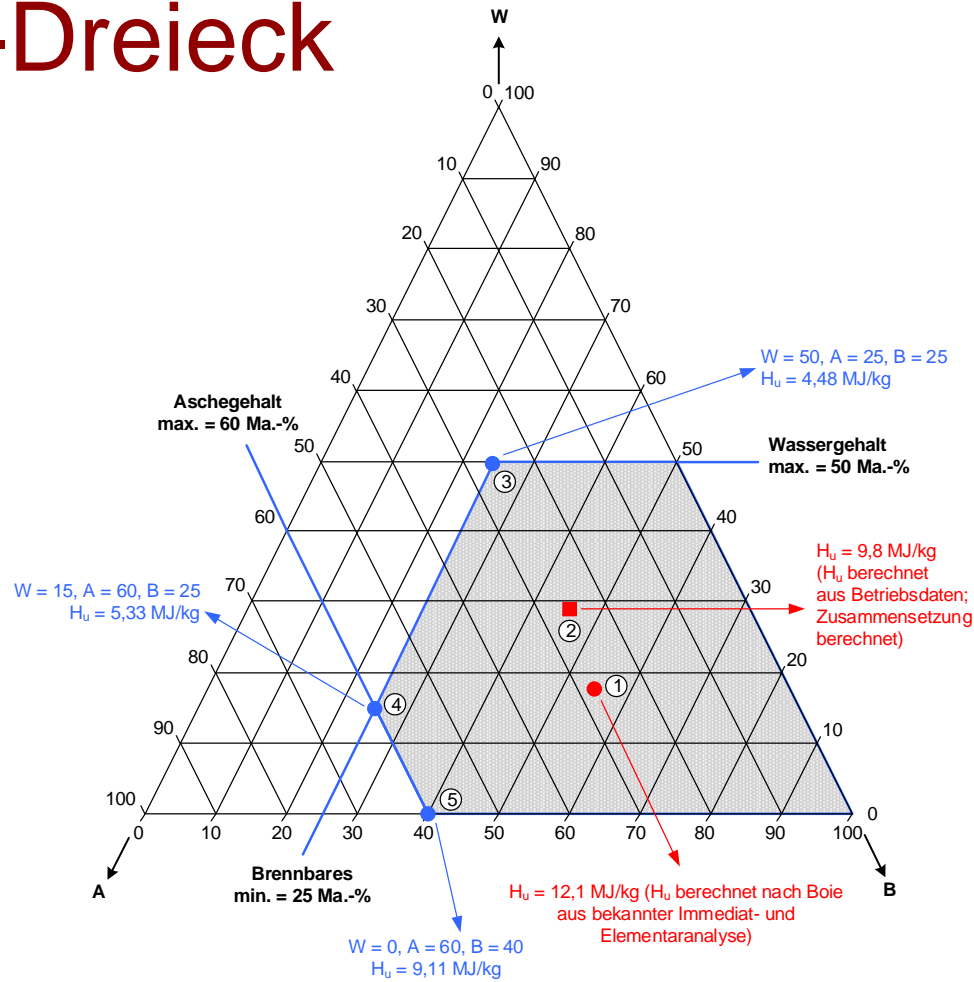
# Verbrennung ohne Stützfeuerung



<sup>13</sup> Unter dem Aschegehalt wird das Unbrennbare / Inerte im Input-Brennstoff verstanden. Nachfolgende Betrachtungen gehen davon aus, dass sich dieser Aschegehalt während der thermochemischen Vorgänge auf dem Rost nicht wesentlich erhöht.

(Hämmerli)

# Brennstoffzusammensetzung nach Tanner-Dreieck

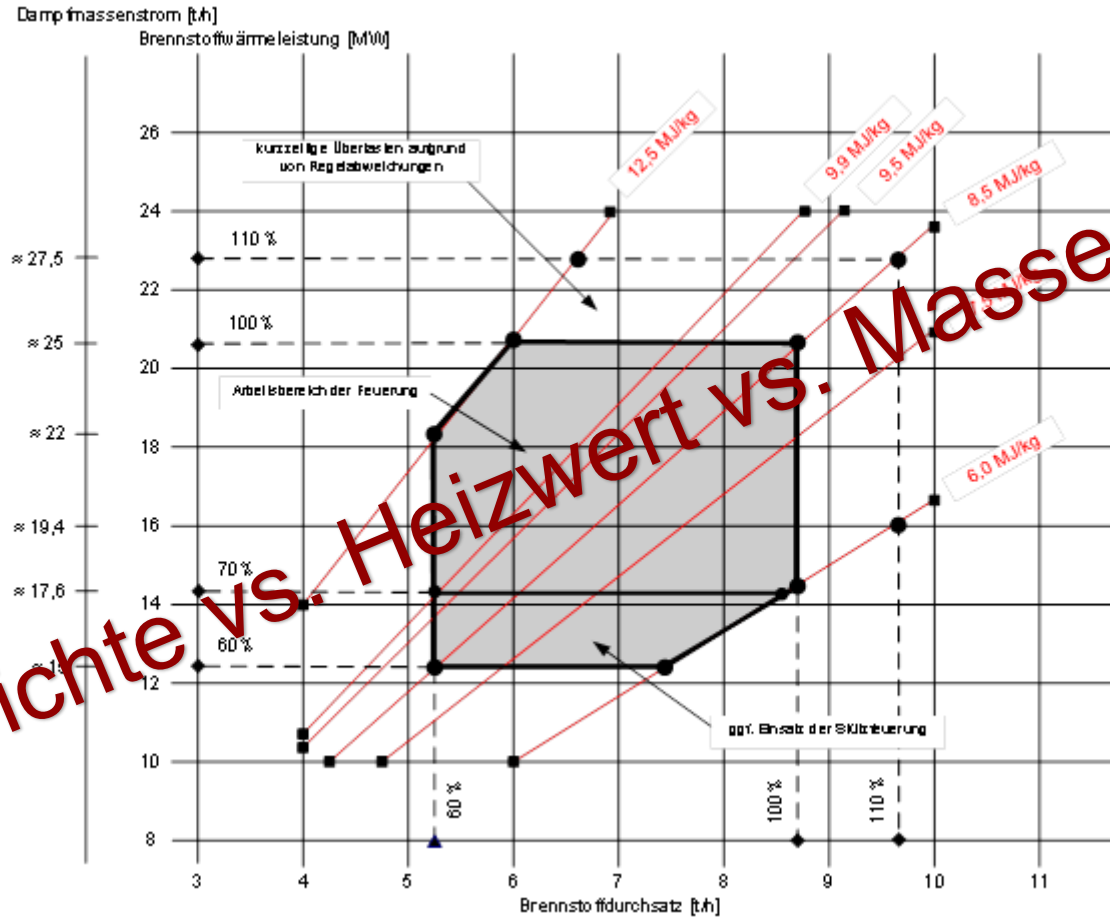


(Tanner)

A = Aschegehalt in Ma.-%    W = Wassergehalt in Ma.-%    B = Brennbares in Ma.-%

... Bereich der Müllfeuerung ohne Stützfeuer

# Feuerungsleistungsdiagramm (FLD)



Frage: Dichte vs. Heizwert vs. Massenstrom

# Brennstoffzusammenstellung

Kurzanalyse	Elementaranalyse <sup>1</sup>			
Wasser =		16,4 Ma.-%	16,4 Ma.-%	16,4 Ma.-%
Asche =		29,0 Ma.-%	29,0 Ma.-%	29,0 Ma.-%
$C_{\text{fix}}$ =	C =	3,2 Ma.-%	3,2 Ma.-%	30,2 Ma.-%
Flüchtige =				
	H (org. gebunden) <sup>2</sup> =		4,3 Ma.-%	4,3 Ma.-%
	O (org. gebunden) =		19,2 Ma.-%	19,2 Ma.-%
	N =	51,4 Ma.-%	0,6 Ma.-%	0,6 Ma.-%
	S =		0,3 Ma.-%	0,3 Ma.-%
	Cl =		0,0 Ma.-%	0,0 Ma.-%
	F =		0,0 Ma.-%	0,0 Ma.-%
	Σ	100 Ma.-%	100 Ma.-%	100 Ma.-%

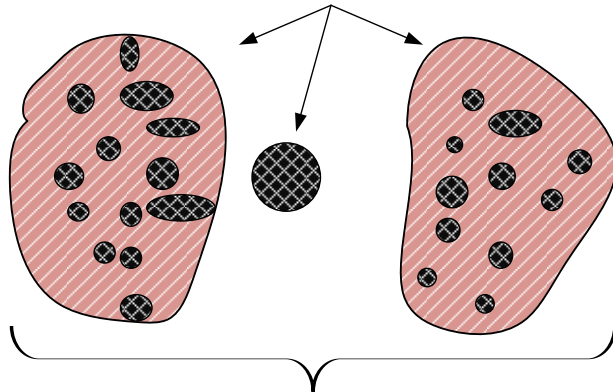
$$C:H = 7,0$$

$$C:O = 1,6$$

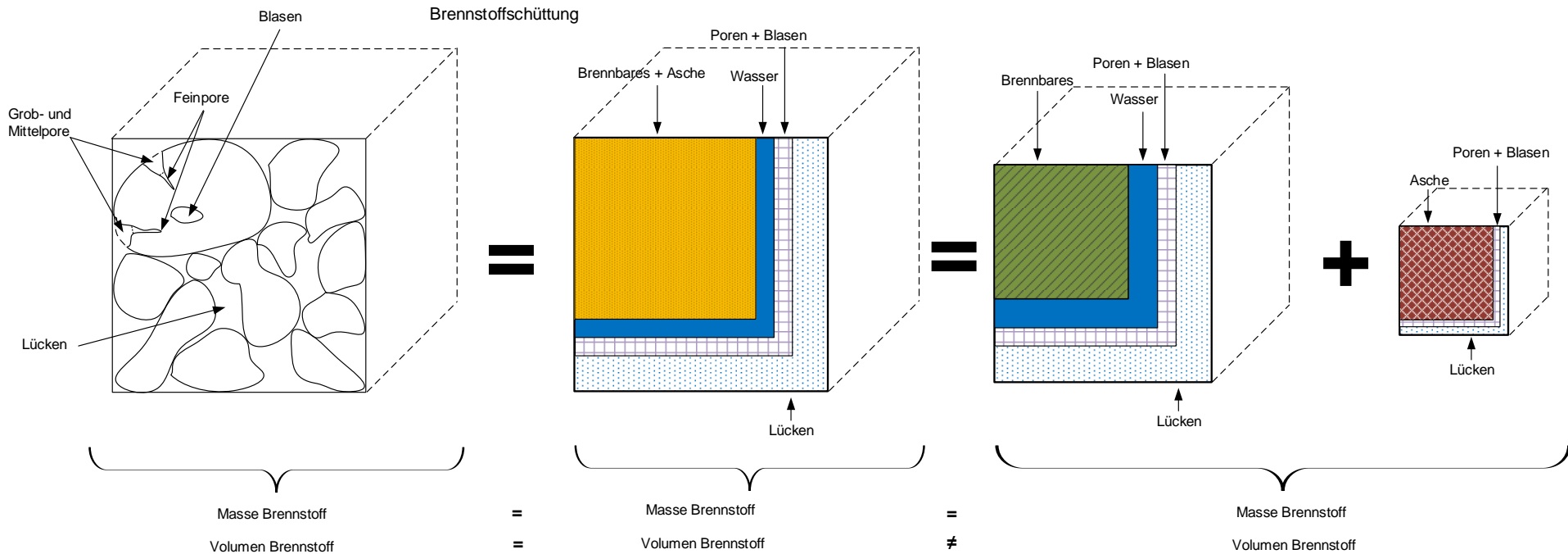
$$H_u \text{ (nach Boie)} = 12,1 \text{ MJ/kg}$$

# Dichte Brennstoff

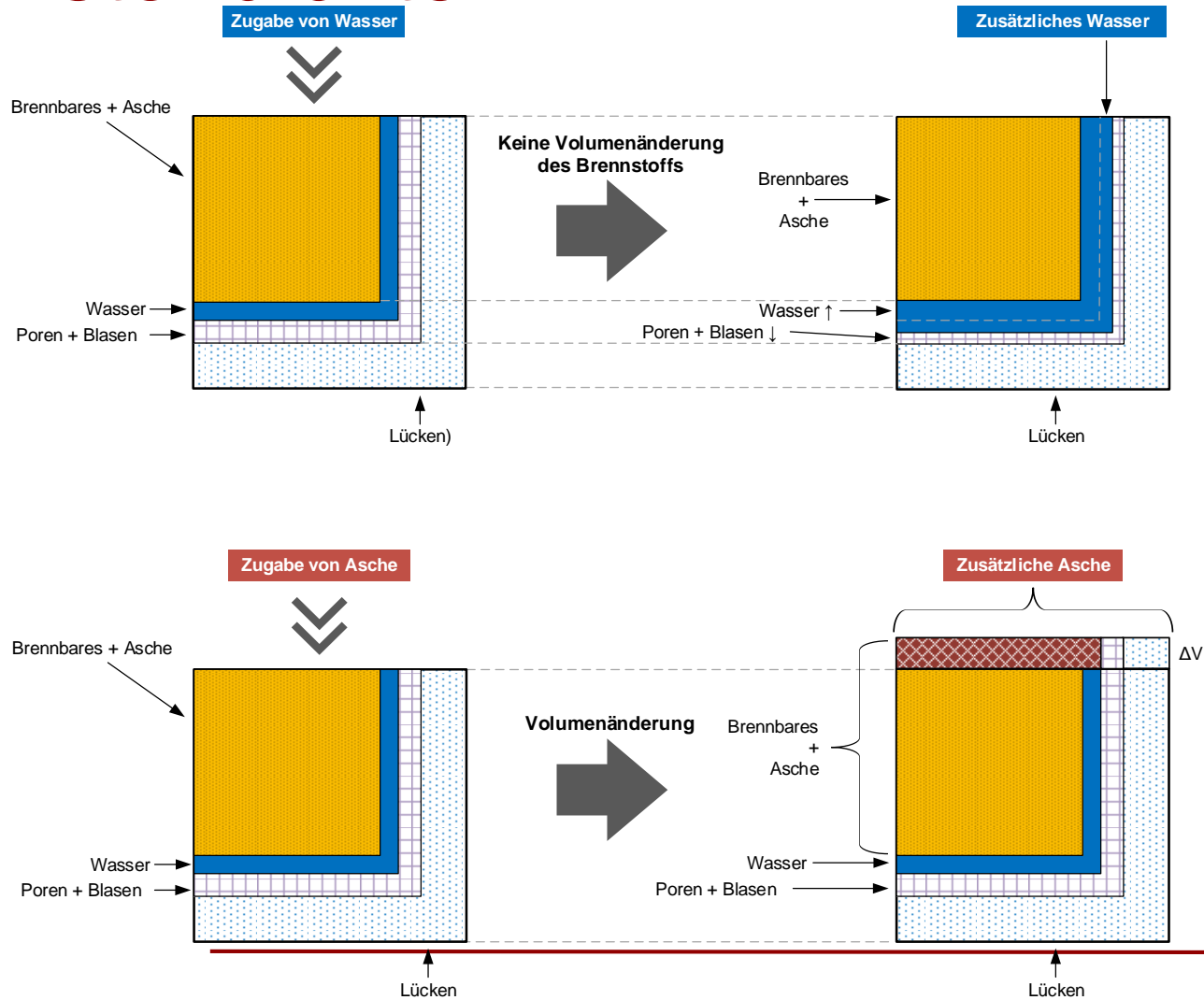
Brennstoff mit – in Summe – z. B. ≈ 25 Ma.-% Asche



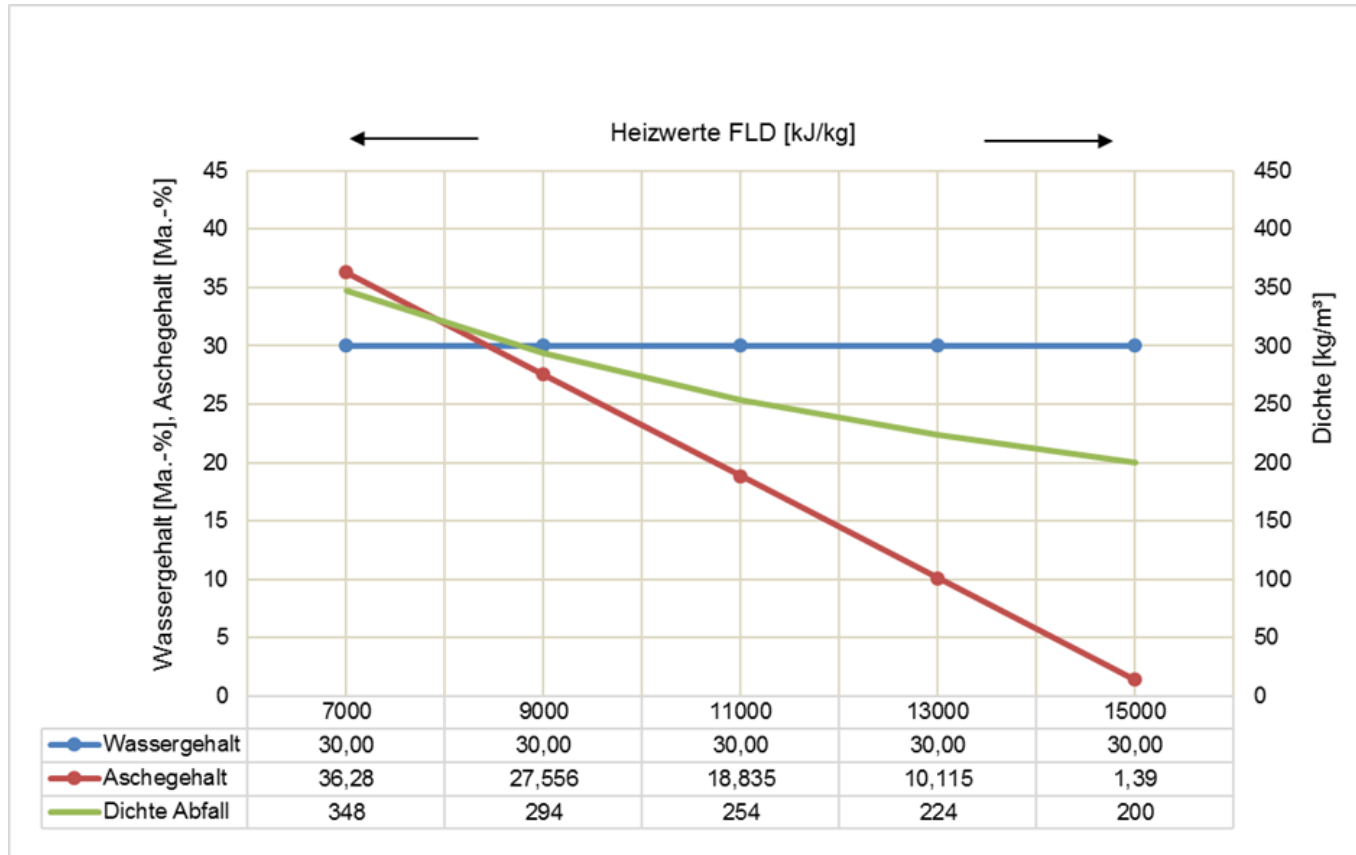
Brennstoffschüttung



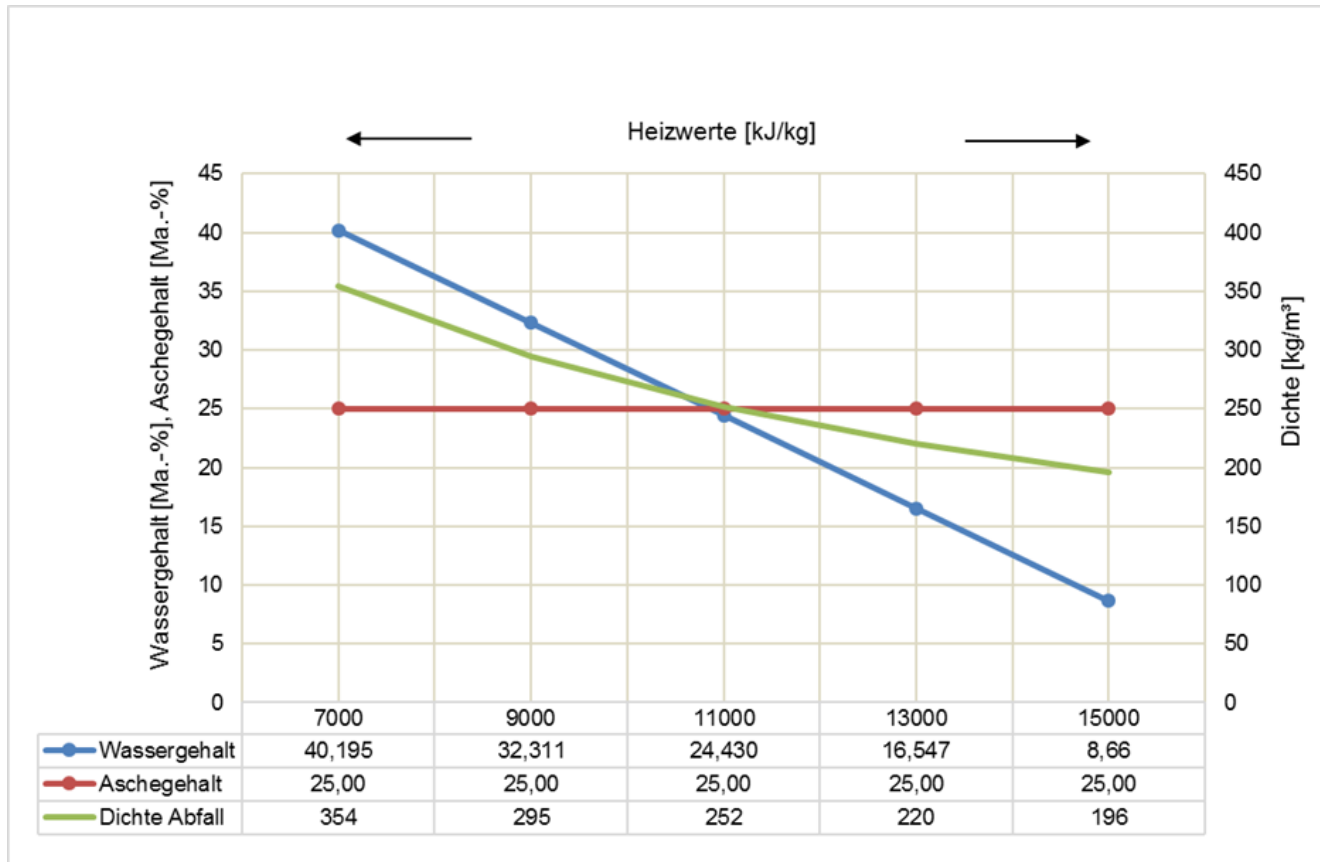
# Berechnung einer „neuen“ Brennstoffdichte



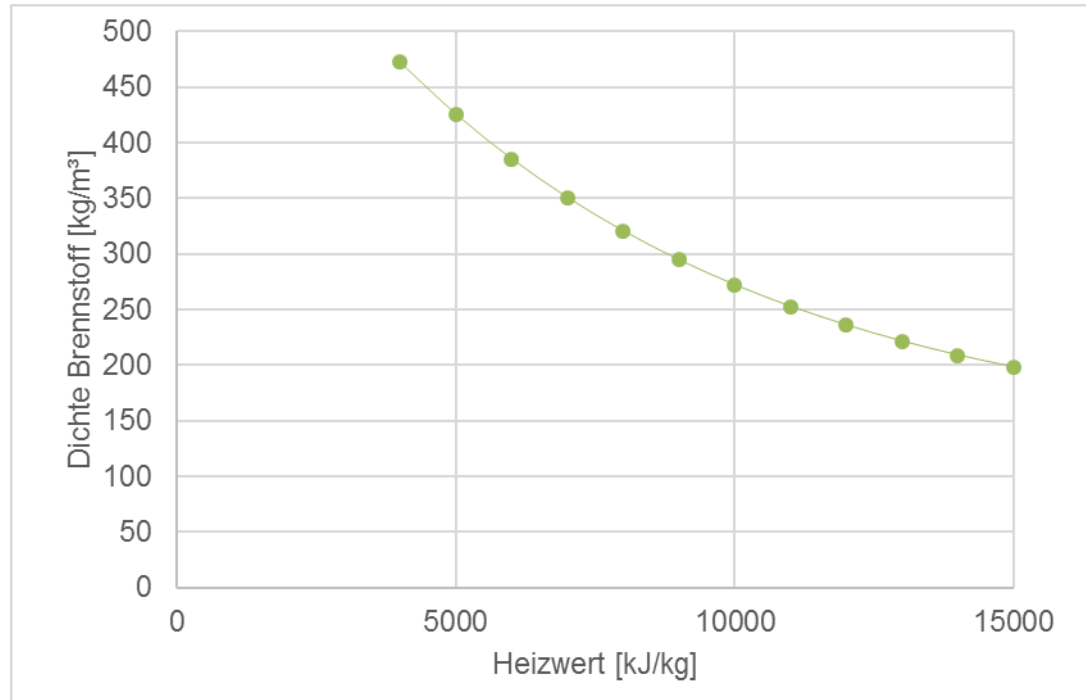
# Heizwert bei konstanten Wassergehalt



# Heizwert bei konstanten Aschegehalt

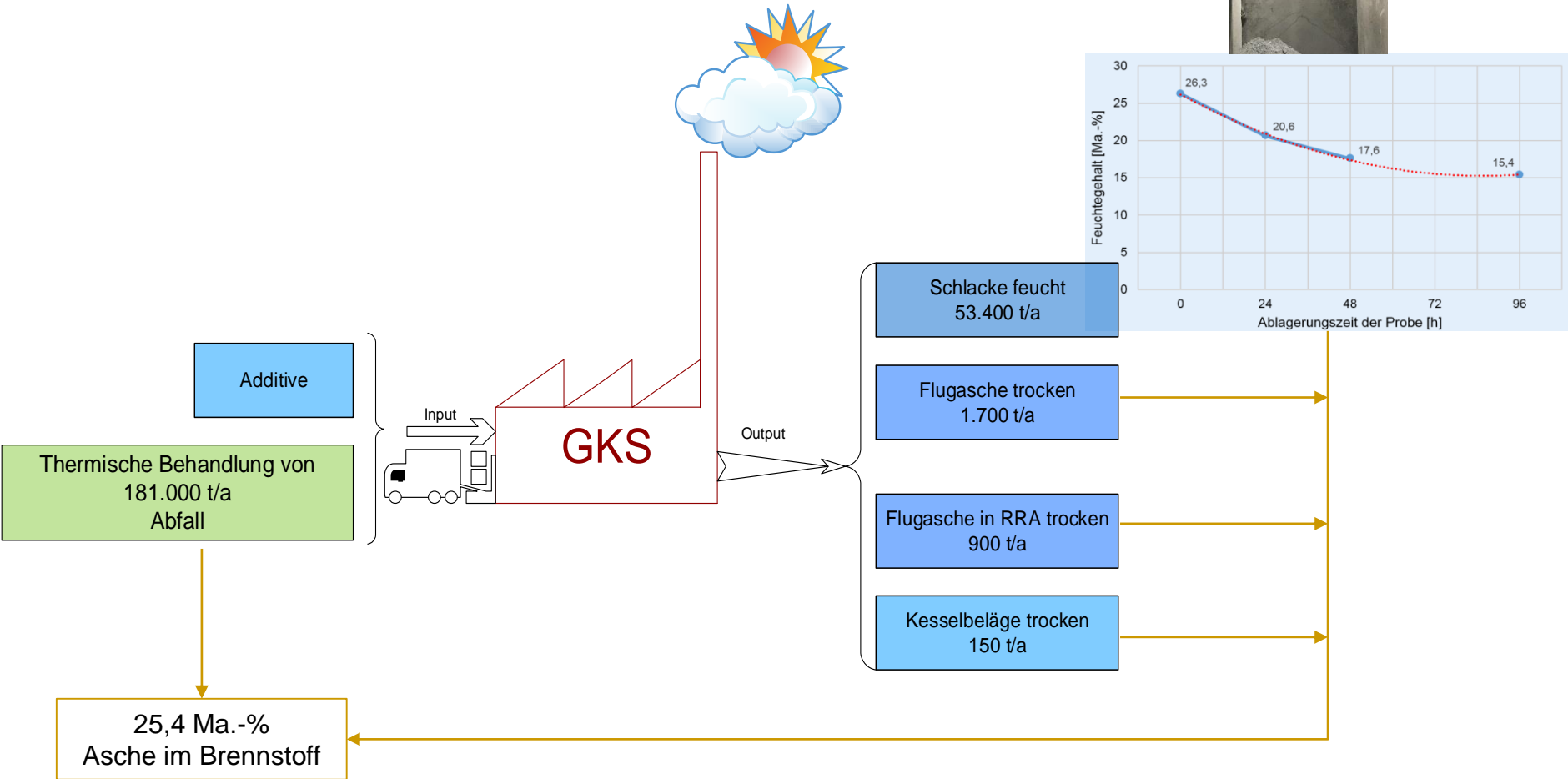


# Dichtepolynom Heizwertabhängig



$$\rho_{BrSt} = 129,057 + 614,845 \cdot e^{-1,456 \cdot 10^{-4} \cdot H_u}$$

# Berechnung des GKS-Durchschnittsbrennstoffs



# GKS-Durchschnittsbrennstoff

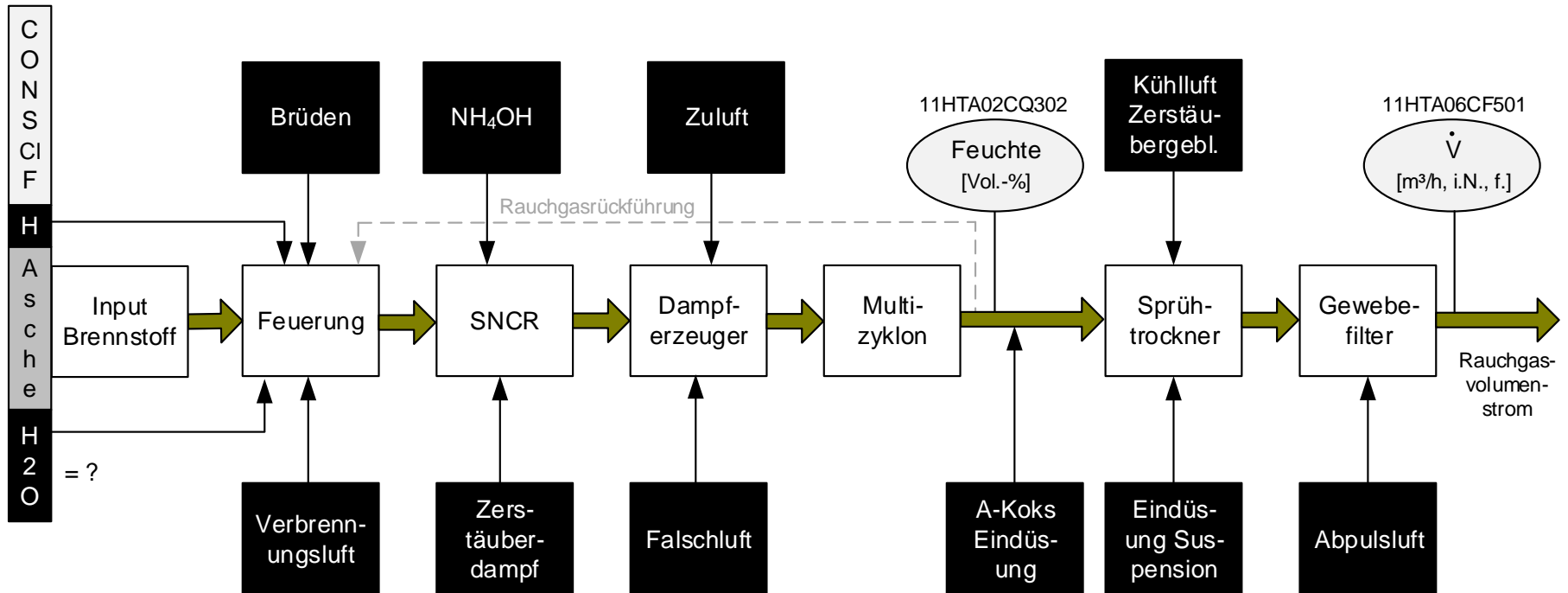
Kurzanalyse	Elementaranalyse <sup>1</sup>			
Wasser =		28,7 Ma.-%	28,7 Ma.-%	28,7 Ma.-%
Asche =		25,4 Ma.-%	25,4 Ma.-%	25,4 Ma.-%
C <sub>fix</sub> =	C =	2,7 Ma.-%	2,7 Ma.-%	25,4 Ma.-%
Flüchtige =			22,7 Ma.-%	
	H (org. gebunden) =		3,6 Ma.-%	3,6 Ma.-%
	O (org. gebunden) =	43,2 Ma.-%	16,14 Ma.-%	16,14 Ma.-%
	N =		0,51 Ma.-%	0,51 Ma.-%
	S =		0,25 Ma.-%	0,25 Ma.-%
	Cl =		0,0 Ma.-%	0,0 Ma.-%
	F =		0,0 Ma.-%	0,0 Ma.-%
	Σ	100 Ma.-%	100 Ma.-%	100 Ma.-%

C:H = 7,0

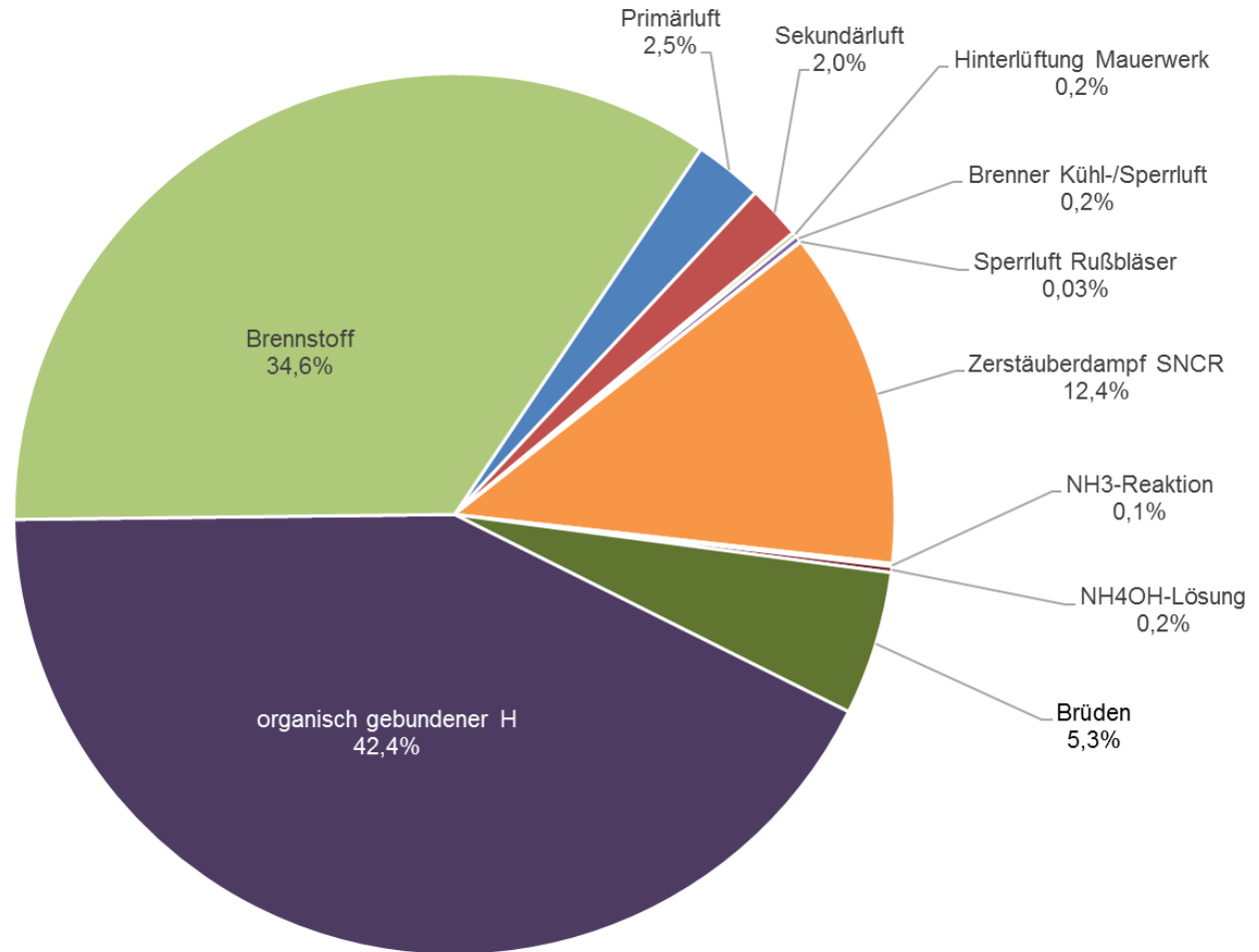
C:O = 1,6

H<sub>u</sub> (aus Betriebsdaten) = **9,8 MJ/kg** (validiert nach Boie)

# Rückrechnung Feuchtegehalt Brennstoff aus Rauchgasfeuchte



# Feuchtequellen des Rauchgases



# Zusammenfassung

- Berechnungspolynom druckabhängig für Abfalldichte

$$\rho_{Müll,Druck} = \left( 82984 \cdot \frac{1}{bar^5} \cdot p^5 - 132738 \cdot \frac{1}{bar^4} \cdot p^4 + 80349 \cdot \frac{1}{bar^3} \cdot p^3 - 23053 \cdot \frac{1}{bar^2} \cdot p^2 + 3438,2 \cdot \frac{1}{bar} \cdot p \right) \cdot \frac{kg}{m^3} + \rho_{Müll,Schütt}$$

- Formel Brennstoffdichte in Abhängigkeit der Höhe des Aufgabeschachtes

$$p_{BrStS} = 0,105bar \cdot \frac{h_{BrStS}}{h_{BrStS,GKS}} \cdot \frac{\rho_{BrSt,Schütt,Trichter}}{\rho_{BrSt,Schütt,Trichter,GKS}}$$

- Expansionsverhalten von Hausmüll (ca. 11% Expansion)
- Berechnungspolynom Schüttdichte Abfall heizwertabhängig

$$\rho_{BrSt} = 129,057 + 614,845 \cdot e^{-1,456 \cdot 10^{-4} \cdot H_u}$$

- Feuchtegehalt Schlacke (kein Kristallwasseranteil)
- Feuchtequellen des Rauchgases

# Vielen Dank!

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Ansprechpartner: Dr.-Ing. Karen Otten

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor