

**Untersuchung zur Röstung von Kaffeebohnen und dabei entstehender  
Emissionen in der Wirbelschicht**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von: Dipl.-Ing. Thomas Piofczyk  
geb. am: 18.04.1975  
in: Magdeburg

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Lothar Mörl  
Prof. Dr.-Ing. Eckehard Specht

eingereicht am: 01.12.2008

Promotionskolloquium am: 24.02.2009



Diese Arbeit wurde durch die DBU unterstützt.

Diese Arbeit wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert.

„Drum so trincket den ihr Gesunden diesen Coffeé damit ihr nicht erfrancket; Trincket ihn ihr Ungesunden / damit ihr eure Unpäßlichkeit loß werden möget / und erhaltet ein glückliches Ende.“

Stephan Blancard, Arzt in Amsterdam, 1705

## Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	I
Abstrakt .....	VII
1 Zielstellung.....	1
2 Einleitung .....	2
2.1 Allgemeines über den Kaffee .....	2
2.2 Historisches über den Kaffee .....	3
2.3 Kaffeesorten.....	6
2.4 Anbau und Aufbereitung des Kaffees.....	7
2.5 Kaffee-Inhaltsstoffe .....	8
2.6 Koffein.....	12
2.7 Rösten von Kaffeebohnen.....	14
2.8 Zubereitung.....	16
3 Stand der Technik.....	19
3.1 Rösten und Röstverfahren .....	19
3.1.1 Röstertechnologie.....	20
3.1.2 Kandierung von Röstkaffee .....	23
3.1.3 Das Wirbelschicht-Verfahren.....	23
3.2 Röstgaszusammensetzung und -reinigungsverfahren .....	25
3.3 Gesetzesvorlagen zu Emissionen .....	26
3.4 Messmethoden.....	27
3.4.1 Feuchte und Feuchtebestimmung .....	27
3.4.2 Dichte .....	28
3.4.3 Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung bzw. Volumen .....	28
3.4.4 Masseverlust beim Rösten .....	28
3.4.5 Geruchs- und Aroma-Emissions-Messverfahren.....	29
3.4.6 Poren und Porenmessung.....	30
3.4.7 Farbe .....	30
3.4.8 Endo- und exotherme Wärmen beim Rösten von Kaffeebohnen.....	31
3.5 Aromabildung und Maillard-Reaktionen .....	31
3.6 Mathematische Beschreibung .....	32
3.6.1 Wirbelschicht.....	33
3.6.2 Blasenbildende Wirbelschicht.....	33
3.6.3 Modellansatz für die Trocknung in Dampf und Luft in einer Wirbelschicht.....	33
3.6.4 Stoffdaten .....	37
3.7 Standards und Normen .....	38
4 Experimentelle Untersuchungen .....	39
4.1 Versuchsanlage DN 100 .....	39
4.2 Messungen mit dem Flammenionisationsdetektor (FID) .....	40
4.3 Versuchsmaterialien.....	41
4.4 Versuchsplanung.....	42
4.5 Konzentrationsbestimmung der $C_mH_n$ in Luft und in Dampf .....	44
4.6 Stoffwertmessungen.....	48
4.6.1 Versuche zur Ermittlung veränderlicher Stoffwerte.....	48
4.6.2 Bestimmung des Masseverlustes .....	48
4.6.3 Bestimmung der Beladung .....	49
4.6.4 Bestimmung der Partikeldichte .....	50
4.6.5 Bestimmung der Partikelgröße, der Partikelgrößenverteilung und der scheinbaren Dichte.....	50

4.6.6	Bestimmung der Farbe .....	51
4.7	Auswertung und Vergleich der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen .....	52
4.7.1	Fehlerbetrachtungen zu den experimentellen Untersuchungen .....	60
5	Mathematische Beschreibung .....	61
5.1	Modellgleichungen zu den Röstvorgängen .....	61
5.1.1	Röstung .....	61
5.1.2	Berücksichtigung von Emissionen .....	62
5.1.3	Stoffeigenschaften von Kaffee .....	63
5.1.4	Ermittlung geeigneter Berechnungsgleichungen für einige Stoffeigenschaften .....	64
5.1.5	Wärmeleitkoeffizient und Wärmekapazität von Kaffeebohnen .....	88
5.1.6	Zusammenfassung zur mathematischen Beschreibung .....	89
5.2	Übersicht über Stoffwerte aus der Literatur .....	91
6	Zusammenfassung und Diskussion .....	94
7	Quellenverzeichnis .....	97
7.1	Literatur .....	97
7.2	Normen .....	113
7.3	Patente .....	114
7.4	Internetquellen .....	117
8	Anhang .....	118
8.1	Formeln und Berechnungen .....	118
8.1.1	Stoffdaten für Luft .....	118
8.1.2	Stoffdaten für Wasser .....	119
8.1.3	Stoffdaten für Wasserdampf .....	120
8.1.4	Kenngößen der Wirbelschicht .....	121
8.1.5	Berechnung der Wärmeübergänge .....	121
8.1.6	Sonstige Berechnungen .....	124
8.2	Übersicht über die Anfangsbedingungen aller Röstversuche .....	126
8.3	Übersichten über die durchgeführten Versuchsreihen .....	127
8.3.1	Versuchsreihe für $\dot{Q} = 2600 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ .....	127
8.3.2	Versuchsreihe für $\dot{Q} = 3000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ .....	130
8.3.3	Versuchsreihe für $\dot{Q} = 3400 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ .....	133
8.3.4	Versuchsreihe für $\dot{Q} = 4000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ .....	136
8.3.5	Versuchsreihe für $\dot{Q} = 4300 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ .....	140
8.3.6	Versuchsreihe für $\dot{Q} = 5000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ .....	143
8.3.7	Versuchsreihe für $\dot{Q} = 5200 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ .....	146
8.3.8	Versuchsreihe für $\dot{Q} = 6000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ .....	149
	Lebenslauf .....	152

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	$[m^2]$	Flächeninhalt, allgemein
A	$[-]$	Koeffizient
$A_{\text{Apparat}}$	$[m^2]$	Querschnittsfläche des Apparates
$A_{\text{Part}}$	$[m^2]$	Partikeloberfläche
AKZ	$[-]$	Alkalifarbzahl
AnKWE	$[\%]$	Anteil $m_{\text{C}_m\text{H}_n}$ bezogen auf $m_{\text{ein}}$
AP	$[-]$	Austragspunkt der Wirbelschicht
Ar	$[-]$	Archimedes-Zahl
B	$[-]$	Koeffizient
C	$[\frac{mg}{m^3}]$ , [ppm]	Konzentration
C	$[-]$	Koeffizient
$C_{\text{C}_m\text{H}_n}$	$[\frac{mg}{m^3}]$ , [ppm]	Konzentration aller Kohlenwasserstoffe in einem Gas (Luft, Wasserdampf)
$c_p$	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$	spezifische Wärmekapazität
C-5-HT	$[-]$	Carbonsäurehydroxytryptamide
D	$[mm]$	Durchmesser, allgemein
D	$[-]$	Koeffizient
DN	$[mm]$	Nenndurchmesser
$d_{\text{ein}}$	$[mm]$	Sauterdurchmesser der Partikel am Eintritt
$d_{\text{Part}}$	$[mm]$	Partikeldurchmesser
$d_{\text{Sauter}}$	$[mm]$	Sauterdurchmesser
F	$[-]$	Standardabweichung
$F_a$	$[\frac{kg}{m \cdot s^2}]$	Auftrieb
Farbe	[Skt]	Farbe oder Helligkeit der Kaffeebohnen, Skalenteile nach Messgerät LK 100 Dr. Lange
FID	$[-]$	Flammen-Ionisations-Detektor
g	$[\frac{m}{s^2}]$	Fallbeschleunigung
Gl.		Gleichung
Gr	$[-]$	Grashoff-Zahl
H	$[m]$	Höhe, allgemein
H	$[\frac{J}{g}]$	Enthalpie
h	$[m]$	Höhenlaufvariable

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$h$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right]$	spezifische Enthalpie
$\Delta h_{V0}$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right]$	spezifische Verdampfungsenthalpie
$k_{\text{ORV}}$	$[-]$	Konstante zur Berücksichtigung des ORV
Lit	$[-]$	Literaturangabe aus Literaturverzeichnis
$M_i$	$\left[\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right]$	Molmasse von Stoff $i$
$m$	$[-]$	Anzahl der Variablen
$m_{\text{aus}}$	$[\text{g}]$	Partikelmasse nach Austritt in die WS
$m_{\text{C}_m\text{H}_n}$	$[\text{g}]$	gesamte Masse der emittierten $\text{C}_m\text{H}_n$
$m_{\text{ein}}$	$[\text{g}]$	Partikelmasse vor Eintritt in die WS
$m$	$[\text{kg}]$	Masse
$\dot{m}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]; \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$	Massestrom
$\dot{m}_{\text{spez}}$	$\left[\frac{\text{g}}{\text{kg}\cdot\text{s}}\right]$	auf die Chargenmasse bezogener Massestrom $\text{C}_m\text{H}_n$ -Emissionen
$\dot{m}_{\text{spez end}}$	$\left[\frac{\text{g}}{\text{kg}\cdot\text{s}}\right]$	auf die Chargenmasse bezogener Massestrom $\text{C}_m\text{H}_n$ -Emissionen im konstanten Endzustand
$\dot{m}_{\text{spez max}}$	$\left[\frac{\text{g}}{\text{kg}\cdot\text{s}}\right]$	bezogener Massestrom $\text{C}_m\text{H}_n$ -Emissionen im Maximumpunkt
MI	$[-]$	Modellintervall
$n$	$[-]$	Anzahl, allgemein
$n$	$[-]$	Anzahl der Messungen
$n_{\text{Part}}$	$[-]$	Partikelanzahl
Nu	$[-]$	Nusselt-Zahl
NTU	$[-]$	NTU-Zahl
ORV	$[\%]$	organischer Röstverlust, Verlust an Trockensubstanz beim Rösten
$p$	$[\text{Pa}], [\text{bar}]$	Druck, allgemein
$p_{\text{ges}}$	$[\text{Pa}], [\text{bar}]$	Gesamtdruck oder Systemdruck
$p_{\text{satt}}$	$[\text{Pa}]$	Sättigungsdruck
$p_{\text{sattD}}$	$[\text{Pa}]$	Sättigungsdruck vom Wasserdampf
Pr	$[-]$	Prandtl-Zahl
$\dot{Q}$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]; \left[\frac{\text{J}}{\text{s}}\right]$	Wärmestrom
$Q_3$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]; [\%]$	Volumenverteilungssumme
$q_3$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}\cdot\text{mm}}\right]; \left[\frac{\%}{\text{mm}}\right]$	Verteilungsdichte
$R_{xy}^2$	$[-]$	Genauigkeit
Ra	$[-]$	Rayleigh-Zahl

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
Re	[–]	Reynolds-Zahl
RV	[%]	Röstverlust, Masseverlust beim Rösten
RV <sub>knick</sub>	[%]	RV am Punkt der beginnenden C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> -Emissionen, RV am Knickpunkt im Farbverlauf
RV <sub>max</sub>	[%]	RV am Punkt der maximalen C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> -Emissionen
RV <sub>hyg</sub>	[%]	hygroskopischer Röstverlust (bei Erreichen der hygroskopischen Endfeuchte)
$\overline{RV}_{hyg}$	[%]	mittlerer hygroskopischer Röstverlust
RV <sub>w</sub>	[%]	Wasserverlust
S	[–]	Stoffwert
S <sub>v</sub>	[m <sup>-1</sup> ]	spezifische Oberfläche, volumenbezogen
s	[m]	Dicke
SPHT	[–]	Sphärizität, vom Gerät Camsizer berechnet
t	[s]	Zeit, allgemein
TA0	[–]	0. Trocknungsabschnitt, Kondensation bzw. Erwärmung
TA1	[–]	1. Trocknungsabschnitt
TA2	[–]	2. Trocknungsabschnitt
U	[mm]	Umfang
V	[m <sup>3</sup> ]	Volumen, allgemein
$\dot{V}$	$\left[\frac{m^3}{s}\right], \left[\frac{m^3}{h}\right]$	Volumenstrom, allgemein
w	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Geschwindigkeit, allgemein
$\bar{w}$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	mittlere Geschwindigkeit
WP	[–]	Wirbelpunkt, Lockerungspunkt der Wirbelschicht
WS	[–]	Wirbelschicht
X	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	Beladung des Feststoffes
X <sub>kn</sub>	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	Beladung im Knickpunkt des RV
X <sub>max</sub>	$\left[\frac{kg}{kg}\right]$	maximale Beladung der Partikel (bei Kondensation)
x	[%]	Feuchte vom Feststoff
X <sub>area</sub>	[mm]	flächenbezogener Durchmesser aus der Auswertung der Software vom Messgerät Camsizer
X <sub>c,min</sub>	[mm]	Breite: Partikeldurchmesser bestimmt aus der kleinsten maximalen Sehne jedes Partikels aus der Auswertung der Software vom Messgerät Camsizer



<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$x_{\text{Fe,max}}$	[mm]	Länge: maximaler Abstand zweier Tangenten, die senkrecht zur Messrichtung an das Partikel angelegt wurden (Feret-Durchmesser) aus der Auswertung der Software vom Messgerät Camsizer
$Y$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	Gasbeladung
$Y_{\text{satt}}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	Sättigungsbeladung im Gas
$y_i$	variabel	einzelne Elemente
$\alpha$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}}\right]$	Wärmeübergangskoeffizient
$\gamma$	[–]	Akkommodationskoeffizient
$\delta_g$	[m]	effektiv kleinster Abstand zwischen Wand und Partikel
$\varepsilon$	[%]	relatives Lückenvolumen
$\eta$	[Pa · s]	dynamische Viskosität
$\Theta$	[–]	dimensionslose Temperatur
$\bar{\Theta}$	[–]	mittlere dimensionslose Temperatur
$\vartheta$	[°C]	Temperatur
$\vartheta_E$	[°C]	effektive Emissionstemperatur
$\pi$	[–]	Kreiskonstante
$\Lambda$	[m]	effektive freie Weglänge
$\lambda$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right]$	Wärmeleitfähigkeit
$\nu$	$\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$	kinematische Viskosität
$\nu_{\text{Blasen}}$	[–]	Blasenanteil
$\xi$	[–]	dimensionslose Beladung
$\rho$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Dichte, allgemein
$\rho_{\text{end}}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	konstante Enddichte beim Rösten von Kaffeebohnen
$\rho_{\text{WS}}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Dichte der Wirbelschicht
$\tau$	[–]	dimensionslose Zeit
$\Phi$	[–]	dimensionslose Trocknungsgeschwindigkeit
$\Phi_{\text{Approx}}$	[–]	angenommene dimensionslose Trocknungsgeschwindigkeit
$\varphi$	[–]	Feststoffkonzentration
$\Psi$	[–]	Sphärizität der Partikel
$\Psi$	[–]	Blasenstrom bzw. Bypass-Strom des Gases

<b>Indizes</b>	<b>Beschreibung</b>
0	auf den leeren Apparat bezogen
Anfang	auf den Anfangszustand bezogen
AP	auf den Austragspunkt bezogen
aus	auf den Austrittszustand bezogen
Blase	auf die Blasen in der WS bezogen
Bohrung	auf die Bohrungen der Löcher im Anströmboden der WS bezogen
$C_m H_n$	Summe aller Kohlenwasserstoffverbindungen
D	Dampf (Wasserdampf)
ein	auf den Eintrittszustand bezogen
Fest	Feststoff
feucht	auf den feuchten Zustand bezogen
Fl	Flüssigkeit
Gas	auf das Fluidisationsgas / die Gasphase bezogen
Gas Part	zwischen Gas und Partikeln
Gas Wand	zwischen Gas und Wand
ges	gesamt
hyg	hygroskopischer Zustand (Feuchte, Beladung)
i	Zähler
KG	Kühlgrenze
kr	kritische Feuchte oder Beladung
L	Luft
lam	laminar
max	maximal
min	minimal
mod	modifizierter Wert
O	Oberfläche
Part	Partikel
Part Gas	zwischen Gasphase und Partikel
Part Part	zwischen den Partikeln
Part Wand	zwischen Partikeln und der Apparatewand
satt	auf den Sättigungspunkt bezogen
Schütt	auf die gesamte Schüttung bezogen
Strahl	Strahlung
trocken	auf den trockenen Zustand bezogen
TS	Trockensubstanz, trockene Masse
turb	turbulent
U	Umgebung
W	Wasser
Wand	an der Apparatewand, auf die Apparatewand bezogen
Wand U	zwischen Wand und Umgebung
WP	auf den Wirbelpunkt bezogen

**Dimensionslose Kennzahlen:**

Gl. 1 Archimedes-Zahl:

$$Ar = \frac{g \cdot d_{\text{Part}}^3 \cdot (\rho_{\text{Part}} - \rho_{\text{Gas}})}{v_{\text{Gas}}^2 \cdot \rho_{\text{Gas}}}$$

Gl. 2 Biot-Zahl:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

Gl. 3 Grashof-Zahl:

$$Gr = \frac{g \cdot H_{\text{WS}}^3}{v_U^2} \cdot \frac{\rho_{\text{LU}} - \rho_{\text{LWand}}}{\rho_{\text{LU}}}$$

Gl. 4 Nusselt-Zahl:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

Gl. 5 Prandl-Zahl:

$$Pr = \frac{\rho \cdot v \cdot c_p}{\lambda}$$

Gl. 6 Rayleigh-Zahl:

$$Ra = Pr \cdot Gr$$

Gl. 7 Reynolds-Zahl:

$$Re = \frac{w \cdot d}{v}$$

## **Abstrakt**

Kaffeebohnen sind ein wichtiges Welthandels- und Konsumgut. Um den typischen Geschmack von Bohnenkaffee zu erhalten, müssen die Kaffeebohnen geröstet werden. Der Röstprozess von Kaffeebohnen hängt dabei von der Art der Röstung, dem Röstverfahren und von den Verfahrensparametern ab. Hierzu zählen ganz besonders die Rösttemperatur und die Röstzeit.

Das Projektziel besteht in einer Verbesserung der Kenntnisse über das Kaffeerösten, besonders sich beim Rösten verändernder Eigenschaften der Kaffeebohnen sowie der Entstehung von Emissionen. Dadurch soll das Rösten von Kaffeebohnen optimaler und umweltschonender gestaltet werden können.

Für diese Arbeit wurden in einem Wirbelschichtapparat mit Luft oder Wasserdampf als Röstgas bei zwei Temperaturen und vier Gasmasseströmen Kaffeebohnen geröstet. Die sich beim Rösten der Kaffeebohnen verändernden Stoffwerte Beladung, Masse, Partikeldurchmesser, Dichte und Farbe wurden bestimmt. Die beim Rösten von Kaffeebohnen entstehenden Kohlenwasserstoff-Emissionen wurden ebenfalls bestimmt. Alle Messergebnisse sind im Versuchsanhang dargestellt.

Die Versuchsergebnisse wurden als mathematische Formeln für Santoskaffe in einer Wirbelschichtröstung bei 230 °C und 250 °C dargestellt.

## **Abstract**

Coffee beans are an important worldwide merchandise and consumer good. To get the typical taste of coffee, the coffee beans has to be roasted. The roasting process depends on the kind of roasting, the roasting process and its parameters. These are especially the roasting-temperature and the roasting-time.

The project aim is a better knowing about the roasting process of coffee beans. An important point of view are the changing material properties and the generation of emissions. Hereby the roasting of coffee beans can be considered better and the roasting process can be designed more efficient and environmently friendly.

Coffee beans were roasted in a fluidized bed with air or steam at two different temperatures and four different gas-mass-flows. The parameters particle-humidity, particle-mass, particle-diameter, density and color, that changes while roasting coffee beans, were measured. The generated roasting-emissions were detected too. All results are shown in the annex.

The examination results were shown as mathematical functions for Santos coffee, roasted in a fluidised bed at 230 °C and 250 °C.

# 1 Zielstellung

Die Röstung und Kühlung von Kaffeebohnen in der Wirbelschicht mit überhitztem Wasserdampf wurde 1981 in Zusammenarbeit mit der Röstfein Kaffee GmbH Magdeburg von der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg entwickelt. Seit dem Jahr 2000 befindet sich ein Röst- und Kandier-Wirbelschicht-Apparat für Kaffeebohnen im Einsatz.

Besonders vorteilhaft bei der Röstung von Kaffeebohnen in einer Wirbelschicht sind:

- kurze Röstzeiten durch die Ausnutzung der hohen Wärme- und Stoffübergänge
- hohe Umweltverträglichkeit wegen der sehr geringen Emissionen durch die Möglichkeit einer geschlossenen Prozessführung
- eine gute Ausnutzung eingesetzter Energie durch geschlossene Kreisläufe
- die Erzeugung von hervorragenden Produkteigenschaften, z. B. einer sehr gleichmäßigen Röstung innerhalb einer Charge in der Wirbelschicht.

Um die Produktions- und Verarbeitungsprozesse von Kaffeebohnen optimaler, preiswerter und umweltschonender gestalten zu können, besteht z. B. Bedarf an genauen Kenntnissen zur Biologie, zum Röstprozess, zu den Inhaltsstoffen, zu entstehenden Emissionen, zur Bildung vom Aroma und zur Veränderung des Aromas nach dem Rösten, zum Mahlverhalten, zur Ausgasung von CO<sub>2</sub> und zu Veränderungen bei der Lagerung.

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Beschreibung des Kaffeeröstprozesses in der Wirbelschicht, besonders der veränderlichen Stoffdaten und des Emissionsverhaltens.

Dazu werden experimentelle Untersuchungen zur Röstung der Kaffeebohnen in Luft und überhitztem Wasserdampf durchgeführt. Das Projektziel besteht in einer besseren Kenntnis des Röstverhaltens in Luft und Dampf und seiner mathematischen Beschreibung. Die Eigenschaften Beladung, Partikeldichte, Partikeldurchmesser, Masse von Kaffeebohnen sowie die Bildung von Kohlenwasserstoffemissionen sollen dabei besonders betrachtet werden. Dazu werden verschiedene Kaffeesorten unter variierten Bedingungen in einer Luft- und DampfWirbelschicht chargenweise geröstet und die Kaffeebohnen nach unterschiedlichen Röstzeiten untersucht. Zur Bestimmung der entstehenden Kohlenwasserstoff-Emissionen werden parallel mittels Flammenionisations-Detektor die Röstabgase hinsichtlich der Kohlenwasserstoff-Konzentrationen untersucht.

## 2 Einleitung

### 2.1 Allgemeines über den Kaffee

Kaffee ist ein bedeutendes Welthandelsprodukt. In der Weltwirtschaft nimmt das Produkt Kaffee den zweiten Platz hinter Erdöl ein (Müller Lit 175; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211).

Der Anbau von Kaffee findet auf einer Fläche von über 10,9 Millionen Hektar in mehr als 70 Staaten statt. Ca. 20 bis 25 Millionen Menschen leben in den Anbauländern von der Herstellung von Rohkaffee. Weltweit beschäftigt die Produktion und Verarbeitung von Kaffee ca. 100 Millionen Menschen (Müller Lit 211). Es wurden im Jahr 2006 118 Millionen Sack (1 Sack = 60 kg) Kaffee verbraucht, während die Produktion mit 122 Millionen Sack überdurchschnittlich gut ausfiel. Die größten Hersteller von Rohkaffee waren Brasilien mit 22,5 Millionen Sack Arabica-Rohkaffee und Vietnam mit 13,7 Millionen Sack Robusta-Rohkaffee zu 60 kg (Deutscher Kaffee-Verband Lit 8, Lit 9).

Deutschland ist nach den USA und Brasilien der drittgrößte Kaffee-Konsummarkt der Welt. Im Jahr 2006 wurden in Deutschland 4,25 Milliarden Euro innerhalb der gesamten Kaffeebranche umgesetzt. Der Absatz betrug 392.000 t Röst- und 16.900 t löslichen Kaffee. Das entspricht insgesamt 510.420 t Rohkaffee (8,225 Millionen Sack). Der Pro-Kopf-Verbrauch betrug 6,2 kg Rohkaffee. Im Durchschnitt trinken die Deutschen 3 bis 4 Tassen Kaffee pro Tag. Damit ist Kaffee das beliebteste Getränk in Deutschland und liegt vor Mineralwasser und Bier (Deutscher Kaffee-Verband Lit 8, Lit 9).

Die Kaffeepreise in Deutschland sind nach den historisch niedrigsten Preisen Anfang 2004 mit weniger als 3 € für eine 500 g Röstkaffeepackung wieder auf 3,67 Euro Anfang 2007 gestiegen. Auf dem Weltmarkt haben sich im März 2007 die Indikatorpreise „Other Mild Arabicas“ im gewichteten Durchschnitt bei 117,08 US-cts/lb und „Robustas“ bei 77,00 US-cts/lb befunden. Der Kaffeepreis in Deutschland beinhaltet neben 7 % Mehrwertsteuer auch 1,095 € pro 500 g Packung Röstkaffee Kaffeesteuer (Deutscher Kaffee-Verband Lit 8, Lit 9).

Aufgrund der Acrylamid-Problematik, welche während der letzten Jahre in den Medien diskutiert wird, wurden entsprechende Untersuchungen für Röstkaffee durchgeführt. Acrylamid bildet sich zu Beginn des Röstprozesses und wird zum großen Teil beim Rösten weit vor Erreichung handelsüblicher Röstgrade wieder abgebaut (Abbildung 2.1). Einfluss auf die Bildung von Acrylamid haben dabei dieselben Größen, die auch Einfluss auf die Bildung des Röstaromas von Kaffeebohnen nehmen, jedoch nicht die Temperatur. Das im Röstkaffee enthaltene Acrylamid wird beim Aufbrühen des Kaffeepulvers nahezu vollständig im Wasser gelöst. Der Signalwert von  $370 \frac{\mu\text{g Acrylamid}}{\text{kg Kaffee}}$  wurde 2007 auf  $277 \frac{\mu\text{g Acrylamid}}{\text{kg Kaffee}}$  gesenkt (Deutscher Kaffee-Verband Lit 8, Lit 9).

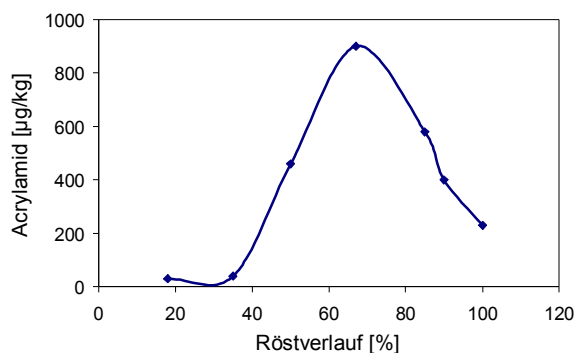


Abbildung 2.1 Entwicklung von Acrylamid beim Rösten von Kaffeebohnen (Deutscher Kaffee-Verband Lit 8; Lit 354)

Aufgrund des hohen Stellenwertes von Kaffee in Handel und Verbrauch wurden bereits sehr viele Untersuchungen und Veröffentlichungen zum Roh- und Röstkaffee und damit zusammenhängenden Problemen durchgeführt. Einige Autoren haben solche Veröffentlichungen zusammengefasst (Cidada Lit 38; Clarke Lit 43 und Lit 48; Flament Lit 69; Reineccius Lit 204; Rothfos Lit 209; Smith Lit 240, Lit 241, Lit 242, Lit 243 und Lit 244; Wurziger Lit 286).

Ebenso ist eine Vielzahl von Büchern erschienen, welche die Produktion von Kaffeebohnen und ihre Weiterverarbeitung bis hin zum Endverbrauch beschreiben; dazu gehören unter anderem Clarke und Macrae (Herausgeber) (Lit 45), Maier (Lit 156), Rotzoll und Müller-Henniges (Lit 211), Viani (Lit 263; Lit 264), Wurziger (Lit 283) und der Deutsche Kaffee-Verband (Lit 354). Einen sehr umfangreichen Überblick über erschienene Werke bieten von Hünersdorff und Hasenkamp (Lit 109) mit einer Bibliographie über alle Themen zum Kaffee.

## 2.2 Historisches über den Kaffee

Die Geschichte der Trocknungstechnik beginnt vor 750.000 Jahren mit dem Trocknen von Tierhäuten und Feuerholz. Mit der Trocknung pflanzlicher Produkte über dem Feuer kam es zu einer ersten Anwendung der Röstung von Getreide und Nüssen vor 10.000 Jahren (Kröll und Mitarbeiter Lit 128; Rothfos Lit 209).

Die Entdeckung des Kaffeestrauches zur Nutzung durch den Menschen ist nicht mehr nachvollziehbar, sicher liegt sie schon einige hundert Jahre zurück. Die Kaffeekirschen wurden zunächst als Früchte konsumiert oder als Getränk mittels Gärung aufbereitet. Später haben sich die Produkte des Kaffeebaums, Früchte und Blätter, für medizinische Anwendungen angeboten (Rothfos Lit 208). Als Heimat des Kaffeebaums wird Äthiopien angesehen (Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211).

Um 850 wurde die wilde Form des *Coffea Arabica* in Äthiopien entdeckt und später in der arabischen Kolonie Harar kultiviert (Maier Lit 156; Smith Lit 245).

Um die Entdeckung des Kaffees ranken sich viele Legenden (Neumann Lit 181; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Smith Lit 245). Die älteste sichere Beschreibung von Kaffee in der Literatur aus dem Jahr 1450 erwähnt Scheich Ech-Ghadzeli, welcher den Kaffee aus Abessinien, einem Hochland in Äthiopien, eingeführt hat (Faust Lit 67). Damit nahm im arabischen Raum die Verbreitung des Kaffees ihren

Anfang in den Sufi-Gemeinschaften zur Unterstützung religiöser Rituale. 1530 und 1532 wurden die ersten Kaffeehäuser in Damaskus und Aleppo eröffnet, 1554 das Erste auf europäischem Boden in Konstantinopel (Ukers Lit 261).

Der Augsburger Medikus Leonhart Rauwolf beschrieb als erster Europäer den während seiner Orientreise von 1573 bis 1576 in Aleppo kennen gelernten Kaffee (Abbildung 2.2; Rauwolf Lit 203; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Ukers Lit 261).

Under andern habens ein gut Getränk / welchs sie hoch halten / Chaube von jnen genennet / das ist gar nahe wie Dinten so schwarz / un in Gebresten / sonderlich des Magens / gar dienstlich. Dieses plegens am Morgen frü / auch an offenen Orten / vor jedermeniglich / one alles abscheuen / zu trincken / auß jredinen unnd Porcellanischen tieffen Schällein / so warm / als dies können erleiden / setzen offit an / thun aber kleine trüncklein / und lassens gleich weiter / wie sie neben einander im Kreiß sitzen / herum gehen. Zu dem Wasser nehmen sie Frucht Banna von Jnnwohnern genennet / die aussen in Ihrer grössse und Farb / schier wie Lorbeer / mit zwey dünnen Schelflein umbgeben / anzusehen / und fernner jrem alten berichten nach / auß India gebracht werden. Wie aber die an jr selbst ring seind / und innen zween gelblechte Körner in zweyen Häußlein unterschiedlich verschlossen haben / zu dem / daß sie auch mit jrer wirckung / dem namen unnd ansehen nach / dem Buncho Auric. und Bunca Rhafif ad almanaf. gantz ähnlich / halte ichs dafür / so lang / biß ich von Gelehrten ein besseren Bericht eynnemme. Dieses Franck ist bey jnen sehr gemein / darumb dann deren / so da solches außschencken / wie auch der Krämer / so die Frucht verkauffen / im Bazaar hin un wider nit wenig zu finden: Zu dem/ so haltens das auch wol so hoch und gesund seyn / als wir bey un jrgend den Wermutwein / oder noch andere Kräuterwein / ...



Abbildung 2.2 Erste europäische Beschreibung des Kaffees im Reisebericht von Rauwolf von 1582 (Lit 203)

Die ersten Zeichnungen von der Kaffeepflanze und deren Früchten enthielt der Bericht „De Plantis Ægypti Liber“ von 1592 von dem italienischen Arzt und Botaniker Prosper Alpinus (Abbildung 2.3; Alpinus Lit 10; Rothfos Lit 208; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211).



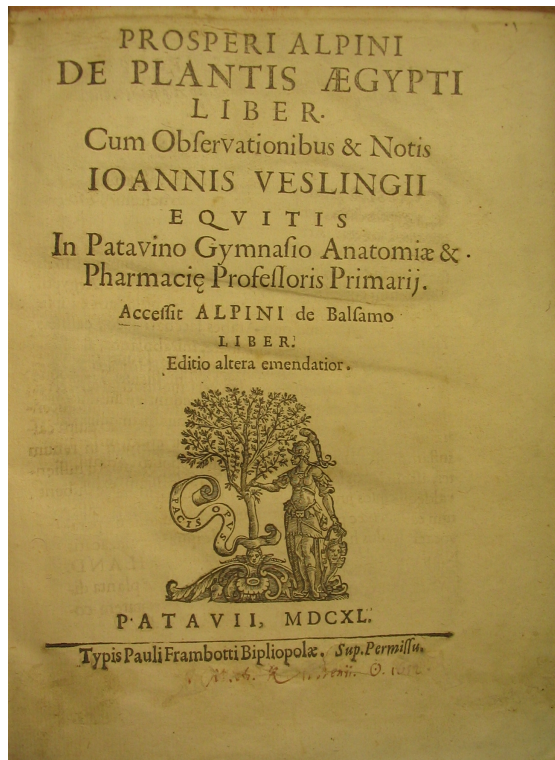


Abbildung 2.3 Erste bildliche Darstellung einer Kaffeepflanze in Europa von Alpini von 1592 (Lit 10; Lit 211)

Alpini schreibt über den Kaffee:

"De Bon. Cap. XVI

Ich habe einen Baum gesehen im türkischen Garten Halybei, dessen Bildnis Du nun sehen wirst und aus dem die Frauen dort das herstellen, was gewöhnlich Bon oder Ban genannt wird: daraus bereiten die Ägypter und die Araber einen überaus verbreiteten Sud, welchen sie anstelle des Weines trinken und in öffentlichen Weinschenken zum Kaufe feilbieten, nicht anders als bei uns der Wein: sie nennen dies Caova. Die Samen werden aus dem fruchtbaren Arabien geholt. Der Baum von dem ich berichte, das ich ihn untersucht habe, ist dem Evonomo ähnlich, aber er hat härtere, gröbere fettere und grünere Blätter und ist immergrün. Jeder Frau ist die Verfahrensweise zur Bereitung des schon genannten Suds bekannt, der auf die Weise bereitet wird, die von mir schon anderwärts erläutert worden ist. Sie gebrauchen diesen Sud zur Stärkung des trägen Magens und zur Unterstützung der Verdauung und nicht weniger häufig zum Behandeln von Verstopfung. Der Sud wird viele Tage lang angewandt bei Geschwulsten der Leber und bei kalter Milz bei alten Verschlüssen mit großem Erfolg. Es scheint, dass dieser Sud großen Einfluß auf den Uterus hat, er erhitzt ihn nämlich und entfernt Verschlüsse aus ihm. Auf solche Weise ist er nämlich in gewöhnlichem Gebrauch bei allen ägyptischen und arabischen Frauen solange die Mensis fließt, deren Entleerung sie immer unterstützen, indem sie nach und nach viel diesen heißen Suds schlürfen. Die Anwendung diesen Suds ist auch überaus nützlich der Reinigung des Körpers nach dem Verschieben um viele Tage, an denen sie unterdrückt wird. Guiland Avicennas erinnert sich an diese Samen und berichtet einen ähnlichen oder denselben Gebrauch der Samen, wie er von mir berichtet worden ist. Er teilt den frischen Samen in den dritten und den getrocknete in den zweiten Grad ein, aber gleichwohl wird es nicht richtig, weil der Samen im Geschmack süß wird, leicht bitter und nicht scharf. Um nichts weniger zeigt er jedoch, daß er dem Verschluss der Eingeweide und bei kalten Geschwulsten der Leber und Milz viel vermag. Aber er sagt, daß es die Übelkeit im Magen erregt, Schleim abführt und das diese Samen viele andere Vorzüge haben, wie die Erfahrung bei den Ägyptern lehrt. Und dies ist der Baum, welchen ich in Kairo seinerzeit untersucht habe"

Der berliner Hofapotheker und Chemieprofessor Caspar Neumann beschreibt 1735 die Ankunft des Kaffees in Marseille um 1650: afrikanische oder asiatische Kaufleute haben wegen ihrer Gewohnheit Kaffee zu trinken, diesen auf einer Handelsreise mit nach Frankreich gebracht. Französische Handelspartner haben das Kaffeetränk

gekostet, als schmackhaft befunden und bei der Abreise der Kaufleute die Proviantreste übernommen (Lit 181).

Die arabischen und afrikanischen Kaffeehersteller achteten auf ihr Monopol und verboten streng eine Ausfuhr von Kaffeepflanzen oder -samen. Um das Jahr 1600 gelang es dem indischen Pilger Baba Budan, sieben keimfähige Kaffeebohnen von Mekka nach Mysore (Indien) in seinem Gürtel versteckt zu schmuggeln. In Mysore fanden diese Bohnen günstige Bedingungen und gediehen gut (Smith Lit 245).

Ab 1700 pflanzten die Holländer Kaffeebäume in Java an, ab 1723 in Martinique die Franzosen (Maier Lit 156) und in der Folgezeit verbreitete sich der Kaffeeanbau über den gesamten Tropengürtel der Erde durch britische, holländische und französische Kolonialgesellschaften (Smith Lit 245).

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, Kaffee zuzubereiten. Hierbei unterscheiden sich die Kaffeearten, die Art der Röstung, die Art der Mahlung des Kaffees zu Pulver, die Extraktion, die Zugabe von Zucker, Milch, Aroma, alkoholischen Getränken und die Art des Trinkens (Baxter Lit 20; Baxter Lit 192; Wurziger Lit 280).

### 2.3 Kaffeesorten

Die erste botanische Einordnung des Kaffeebaums erfolgte durch Carl von Linné (1707-1778), der die ihm vorliegenden Pflanzen als "Coffea arabica" bezeichnete. Durch Antoine de Jussieu (1748-1836) wurde der Kaffeebaum den Rubiaceen zugeordnet. Später wurden weitere Formen des Kaffees entdeckt, so z. B. der Robusta-Kaffee im Jahr 1898 im großen Kongobogen (Rothfos Lit 208; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211).

Der Kaffeebaum wächst im gesamten Tropen- und Subtropengürtel der Erde in verschiedenen Höhenlagen. Die Kaffeepflanzen werden in die folgenden bekannteren Arten unterteilt:

**Coffea Arabica**, der Arabica-Kaffee, ist ein kleiner Baum, welcher eine Höhe von 6 m bis 10 m erreicht und wie alle anderen Kaffeearten das ganze Jahr über Blätter trägt. Er hat 2 bis 3 Blütezeiten im Jahr. Die Frucht wird als Kaffeekeirsche bezeichnet, sie erreicht einen Durchmesser von 14 mm und kann dunkelrot gefärbt sein. Außen befindet sich eine feste Oberhaut, darunter das Fruchtfleisch, darin zwei Kaffeesamen, welche als Bohnen bezeichnet werden, in je einer festen Hülle, der Pergamenthaut, nochmals umgeben von einer Samenhaut, der Silberhaut. Die Kaffeebohnen haben eine plankonvexe Form und liegen mit den flachen Seiten zueinander in der Frucht. Vereinzelt treten Kaffeekeirschen mit nur einer Kaffeebohne im Inneren auf, diese sind rund und werden als Perlbohnen gehandelt. Der Arabica-Kaffee hat zahlreiche Unterarten, z. B. den Mokka-Kaffee *Coffea Arabica* var. *Mokka* (Lindner Lit 147; Maier Lit 156; Rothfos Lit 208; Wintgens Lit 278; Wurziger Lit 283).

**Coffea Liberica**, der Liberiakaffee, ist in Angola heimisch und wird in Liberia nur als Kulturpflanze angetroffen. Er wächst zu Bäumen mit bis zu 15 m Höhe und blüht nicht das ganze Jahr über. Er wird in geringem Maße kultiviert. Die Bohnen sind deutlich größer als beim Arabica-Kaffee. Der Robusta-Kaffee hat ihn als weltwirtschaftlich genutzte Sorte abgelöst (Lindner Lit 147; Rothfos Lit 208; Wintgens Lit 278; Wurziger Lit 283).

**Coffea Canephora**, Varietät *Laurentii* oder Varietät **Robusta**, wird als Robusta-Kaffee bezeichnet. Er blüht das ganze Jahr über und stellt geringere Anforderungen

an Boden und Klima als die Arten Arabica und Liberica und ist weniger krankheitsanfällig als der Arabica. Er hat dünne Fruchtschalen wie Arabica-Kaffee und es gibt diverse Unterarten (Lindner Lit 147; Maier Lit 156; Rothfos Lit 208; Wintgens Lit 278; Wurziger Lit 283).

**Coffea Stenophylla** wächst in Sierra Leone und Französisch Guinea an Flussufern und wird dort von den Einheimischen angebaut. Diese Kaffeeart wird als „Highland-Coffee“ geschätzt und gehandelt (Zimmermann Lit 353).

**Coffea Arabusta** ist eine Kreuzung aus Arabica und Robusta. Diese Kaffeeart soll die geschmacklichen Qualitäten von Arabica mit der Widerstandsfähigkeit des Robustas vereinen (Maier Lit 156).

Von diesen Kaffeearten haben Arabica- und Robusta-Kaffees die größte wirtschaftliche Bedeutung erlangt, Liberica-Kaffee wurde bis um 1900 in größerem Maßstab gehandelt. Die anderen Arten wachsen ausschließlich wild und werden nur von Einheimischen genutzt. Weitere Arten werden von Rothfos (Lit 208) beschrieben. Insgesamt gibt es mehr als 70 verschiedene Arten und Unterarten (Wurziger Lit 283).

## **2.4 Anbau und Aufbereitung des Kaffees**

Der Anbau erfolgt in den Tropenregionen, da die Pflanzen frostempfindlich sind. Die Arabica-Kaffees sind außerdem empfindlich gegen große Hitze. Kaffee wird zwischen dem 23. Grad nördlicher Breite und dem 25. Grad südlicher Breite in Höhenlagen zwischen 600 m und 2000 m kultiviert. Robusta-Kaffees sind weniger klimaempfindlich und wachsen auch zwischen 10 Grad nördlicher und südlicher Breite im Flachland. Während Trockenperioden kann Bewässerung nötig werden. Kaffee ist eigentlich ein tropischer Unterholzbaum, so sind Schattenspendler nötig. Auf den Plantagen werden die Kaffeebäume auf 2 m bis 3 m Höhe gehalten, um besser ernten zu können. Nach 3 bis 4 Jahren bilden sich die ersten Blüten und erste Ernten sind möglich. Nach 10 bis 15 Jahren werden die Ertragsmaxima erreicht. Insgesamt haben die Bäume eine Lebensdauer von ca. 50 Jahren. Der mittlere Ertrag einer Plantage pro Jahr kann zwischen  $200 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}$  und  $600 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}$  liegen. Um einen Kaffeesack von 60 kg zu füllen, müssen ca. 100 Bäume abgeerntet werden (Maier Lit 156; Rothfos Lit 208; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Wurziger Lit 283).

Geerntet wird durch Pflücken von Hand oder mit Erntemaschinen. Die Kaffeeirschen werden noch grün gepflückt, da zu unreife oder überreife Kaffeeirschen minderwertigen Kaffee ergeben. Der Zeitraum zwischen beginnender Reife und beginnender Überreife beträgt nur 10 bis 14 Tage. Für die nasse Aufbereitung wird früher geerntet als für die Trockene (Lit 156; Rothfos Lit 208; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Wurziger Lit 283).

Das Ziel der Aufbereitung ist es, die Kaffeebohnen vom Fruchtfleisch, der Pulpe, zu befreien und möglichst schnell auf ca. 12 % Feuchte zu trocknen, um mikrobiologische Schädigungen zu vermeiden (Brando Lit 31; Maier Lit 156; Rothfos Lit 208).

Nach der nassen oder trockenen Aufbereitung wird der Kaffee gereinigt, poliert und nach Größe sortiert. Hierbei überwiegt inzwischen die maschinelle Klassierung gegenüber der Manuellen (Brando Lit 31; Clarke Lit 44; Maier Lit 156; Rothfos Lit 208; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Vincent Lit 265; Wurziger Lit 283).

Der fertige Rohkaffee wird in Jutesäcke zu 60 kg verpackt und bis zum Transport gelagert. Er ist chemisch stabil und verträgt lange Lagerzeiten bei geringer Luftfeuchte und Temperaturen unter 25 °C (Clarke Lit 44; Maier Lit 156; Rothfos Lit 209; Vincent Lit 265).

## 2.5 Kaffee-Inhaltsstoffe

Seit der Entdeckung und Verbreitung des Kaffees wird die Möglichkeit, Kaffee als Medizin zu verwenden, diskutiert. Rauwolf beschreibt ihn 1582 als Heilmittel bei Magenbeschwerden (Abbildung 2.2; Lit 203). Ebenso verweist Alpini 1640 auf die Heilwirkung bei Magen- und Darmproblemen, zusätzlich auch auf Hilfe bei Geschwulsten der Leber, kalter Milz und Menstruationsproblemen (Abbildung 2.3; Lit 10). Spon berichtet 1686 über eine Verdauungsförderung, Hilfe gegen Unterleibs- und Weiberkrankheiten, gegen Brustbeschwerden, gegen Kopfschmerzen und gegen Schlaf bei Kaffeegenuss (Lit 248). Der Arzt Blancard schreibt 1705 über seine Erfahrungen in der Anwendung von Kaffee zur Verdauungsförderung, für gute Zähne, Speichelfluss, Gallentätigkeit, gegen Gallenbeschwerden, gegen Kinderlosigkeit (beim Mann), als menstruationsförderndes Mittel, gegen Brennen im Mund, Mundgeruch, Augenentzündung (hier zum Auswaschen und nicht zum Trinken), gegen Nasenbluten, Zahnschmerzen, Skorbut, Halsgeschwüre, Seitenstechen, Koliken und Podagra (Gicht im Fußbereich) (Lit 26). Der Autor empfiehlt, viel Kaffee zu trinken. Heisler (Lit 99) und Link (Lit 149) berichten 1938/39 über ihre Erfahrungen mit der Anwendung von Kaffeekohle, d. h. fein gemahlene überbröstete verkohlte Kaffeebohnen, bei Angina, Mandelentzündung, Parodontose, Herzbeschwerden, Erkältung, Darminfektionen und -störungen und Ekzemen. Lindner bestätigt die Wirkung von Kaffeekohle 1955 (Lit 147).

Durch die große Popularität und die unterschiedlichen Wirkungen des Trinkens von Kaffee sind die Inhaltsstoffe dieses Getränkes von Interesse. Eine frühzeitige Analyse der in den Kaffeebohnen enthaltenen Stoffe kommt von Neumann aus dem Jahr 1686 (Abbildung 2.4; Lit 181).

- „ $\frac{5}{8}$ partibus terrestribus“	( $\frac{5}{8}$ Teile Erde)
- „ $\frac{5}{16}$ partibus gummoso-mucilaginosi“	( $\frac{5}{16}$ Teile Gummi)
- „ $\frac{3}{16}$ partibus resinosis“	( $\frac{3}{16}$ Teile Harz)
- „ein gut Theil Wasser“	
- „sehr wenig Salz“	
- „kein Oleum 'essentiale', aber durch Feuer erhältliches Öl“	

Abbildung 2.4 Analyse der Kaffeeinhaltsstoffe nach Neumann von 1686 (Lit 181)

Die grünen oder rohen Kaffeebohnen beinhalten eine Vielzahl von Verbindungen, welche an der Bildung der Aromakomponenten beteiligt sind. Hier sind vor allem Wasser, Fette, Proteine, Aminosäuren, Zucker, Koffein, Triognellin und reduzierte Zucker und die Säuren Apfelsäure, Ameisensäure, Chinasäure, Chlorogensäure, Zitronensäure, Essigsäure, Milchsäure, Oxalsäure und Phosphorsäure zu nennen (Baltus Lit 13; Balzer Lit 17; Bradbury Lit 29 und Lit 30; Flament Lit 69; Held Lit 96; Homma Lit 108; Maier Lit 156; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Silwar und Lüllman Lit 231; Speer und Kölling-Speer Lit 247; Viani Lit 262; Vitzthum Lit 266; Wurziger Lit 283).

Die über 850 Inhaltsstoffe von Röstkaffee werden aus einer Vielzahl von im Rohkaffee vorhandenen Substanzen gebildet (Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Silwar und Lüllman Lit 231; Yeretjian und Mitarbeiter Lit 289). Die Aroma- und Geruchsstoffe von Röstkaffee allein zeigen auf das Gehirn bereits eine anregende Wirkung (Koga Lit 123).

Bereits 1880 führte Bernheimer Versuche an einer speziellen Versuchsanordnung durch, um den Röstprozess zu beschreiben. Er fand z. B. einen Röstverlust von 25 % für dunkelbraun in der Trommel gerösteten Kaffee, destillierte aufgefangene Röstabgase und untersuchte den Kaffee auf seine Inhaltsstoffe (Lit 23).

Im Rohkaffee enthaltene Kohlenwasserstoffverbindungen und deren Veränderungen beim Rösten werden von Bradbury (Lit 30) beschrieben: **Polysaccharide** als Hauptbestandteile der Zellwände verhalten sich relativ stabil während des Röstprozesses und werden nur wenig abgebaut, Zucker mit geringerem Molekulargewicht (Fructose, Glucose, Psicose, Mannose, Galactose) kommen im Rohkaffee in kleineren Mengen vor und werden schneller abgebaut und umgewandelt durch Fragmentierung, Dehydrierung und Maillard-Reaktionen. Diese Substanzen tragen einen großen Teil zum Endprodukt Röstkaffee bei. Mit einer Menge von 30 % bis 40 % sind die Kohlenhydrate die am stärksten vertretene Gruppe im Röstkaffee (Lit 211).

Zu den Röststoffen gehören unter anderem **Furane**. Sie sind die am häufigsten vorkommenden flüchtigen Verbindungen. Sie sind auch bekannt als Zuckerabbau- oder Karamelisationsprodukte; sie zeigen ein Karamelaroma und sorgen für „Tassenfülle“. Weitere Röststoffe sind Thiazole und Oxazole (Baltes Lit 15; Flament Lit 69; Silwar Lit 231; Tressl Lit 257; Yeretjian und Mitarbeiter Lit 289).

1940 gelang es Behrens und Malorny, Röststoffe im Kaffee für physiologische Wirkungen auf den Organismus verantwortlich zu machen. Zuvor wurde Koffein für die einzig wirksame Substanz gehalten. Die größte Wirkung entfalten die Inhaltsstoffe von Röstkaffee auf das zentrale Nervensystem durch eine Stimulierung der Hirnrinde. Durch Untersuchungen konnte ein beschleunigter Gedankenablauf nachgewiesen werden. Kaffeegenuss erhöht die Zahl der zur Verfügung stehenden Gedankenverbindungen. Der Genuss von Kaffee kann sich erheiternd auf die Stimmung auswirken, d. h. er kann eine Euphorie auslösen, ohne hinterher eine depressive Wirkung zu zeigen. Die Wirkung von Kaffeegenuss hängt zu einem großen Teil an den Aromen und dem Geschmack und nicht allein am Koffein. Weiterhin bewirkt Kaffee die Abnahme von Müdigkeit und Schlafbedürfnis (Bättig Lit 21; Czok Lit 53 und Lit 54; Yamamoto Lit 287).

Andererseits gibt es Menschen, die nach dem Genuss von Kaffee besonders gut schlafen können. Das wird mit der euphorisierenden Wirkung erklärt, wodurch vor dem Einschlafen schlechte Stimmungen oder Depressionen unterdrückt werden. Eine bessere Durchblutung des Gehirns kann für eine schnelle Aktivierung des Schlaf-Zentrums sorgen. Durch die müdigkeitsverschleichende Wirkung kann der Genuss von Kaffee die körperliche Leistungsfähigkeit steigern, z. B. beim Sporttreiben (Czok Lit 53 und Lit 54; Mühleib und Detering Lit 174).

Ein wichtiger Bestandteil im Kaffee, welcher neben Koffein eine anregende Wirkung zeigt, ist die **Chlorogensäure**. Sie wurde 1837 von Robiquet und Bourton entdeckt. Chlorogensäure besitzt ca. 1/6 der Wirkung des Koffeins auf das zentrale Nervensystem (Czok Lit 52 und Lit 53; Eichler Lit 59; Viani Lit 262). In Robusta-Kaffees sind mehr Chlorogensäuren enthalten als in Arabica-Kaffees. Beim Rösten zersetzen sich die Chlorogensäuren mit linearer Abhängigkeit vom Röstverlust je nach Röstung um 30 % bis 70 %. Die dabei entstehenden Produkte liefern einen großen Beitrag zur Aroma- und Geschmacksentwicklung von Röstkaffee. Chlorogensäuren sind in der Kaffeetasse zu 14,8 % enthalten, d. h. 55 bis 240 mg pro Tasse (Baltes Lit 13; Held Lit 96; Homma Lit 108; Maier Lit 156; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Viani Lit 262; Vitzthum Lit 266).

**Triognellin** ist neben Koffein ein weiteres Alkaloid, welches bereits im Rohkaffee enthalten ist. Die Wirkung von Triognellin ist physiologisch nur schwach (Maier Lit 156). Im Röstkaffeegetränk ist es zu 1,6 % enthalten (Viani Lit 262; Vitzthum Lit 266).

Sesso, Gaziano, Buring und Hennekens (Lit 225) untersuchten den Zusammenhang zwischen **Herzinfarkt-Risiko** und Konsum von koffeinhaltigem und entkoffeiniertem Kaffee und Tee. Sie stellten im Ergebnis fest, für einen Kaffeekonsum von mehr als 5 Tassen (hier: 1 Tasse = 237 ml) am Tag ist kein Zusammenhang bei den Kaffees feststellbar und bei Tee geht das Risiko zurück, wenn der Einfluss durch Rauchen gering gehalten wird.

Außer auf das zentrale Nervensystem zeigt Kaffee Wirkungen auf das Magen-Darm- und das Leber-Galle-System. Kaffee-Genuss kann helfen, das **Gallenstein-Risiko** bei Männern zu senken. Hierbei spielt das Koffein nur eine sehr untergeordnete Rolle. Die Magenaktivität und die Bildung von Salzsäure im Magen werden durch Furane und Chlorogensäuren angeregt. Auch die **Darmtätigkeit** wird angeregt; so nutzen viele Personen diese Wirkungen, um nach dem Essen die Verdauung anzuregen oder um morgens den Gang zur Toilette einzuleiten. Auch hier zeigen die Röstprodukte, Chlorogensäure und Triognellin eine stärkere Wirksamkeit als das Koffein. Die Gallenanregung erfolgt fast nur durch die Röststoffe, z. B. Chlorogensäure. Gallenkoliken, welche häufig nach dem Genuss von Kaffee auftreten, lassen sich nicht mit der Wirkung von Koffein begründen (Czok Lit 52, Lit 53 und Lit 54; Leitzmann und Mitarbeiter Lit 144; Mühleib und Detering Lit 174; Seifert Lit 224; Viani Lit 262).

Einige Kaffeeinhaltsstoffe entfalten ihre Wirkung erst zusammen mit anderen Nahrungsmitteln. Zucker, Sahne und Kuchen können in Verbindung mit Kaffee Beschwerden im Leber-Gallesystem auslösen, welche durch Kaffee allein nicht auftreten (Czok Lit 53).

Die Röststoffe spielen bei zentralnervösen Wirkungen keine Rolle, jedoch bei der Wirkung auf Magen und Darm sind nur Röststoffe beteiligt. Sie können eine brechreizerregende Wirkung oder Reizung im Magen verursachen. Es kommt zu einer Anregung der Magensäure durch Kaffee und entkoffeinierten Kaffee, d. h. durch die Röststoffe. Durch Kaffeegenuss wird eine starke Anregung der Galle erreicht, ebenso durch hohe Dosen von Chlorogensäure. Entkoffeinierte und behandelte Kaffees zeigen nur eine schwache Anregung, jedoch eine stärkere als reines Koffein und Triognellin (Bättig Lit 21; Czok Lit 52 und Lit 53).

Oft diskutiert worden ist der Zusammenhang zwischen Kaffeetrinken und **Krebserkrankungen**. Nach neueren Untersuchungen ist die Befürchtung, Kaffee könne Krebs begünstigen, nicht nur widerlegt worden; bestimmte Inhaltsstoffe im Kaffee wirken sogar schützend vor Krebserkrankungen. Hierzu gehören die Chlorogensäuren als Schutz vor Dickdarm- und Leberkrebs (Eichler Lit 60; Heyden Lit 101; Mühleib und Detering Lit 174). Nach Giovannucci (Lit 77) kann das Risiko, an Darmkrebs zu erkranken, mit einem hohen Kaffeekonsum von 4 Tassen täglich oder mehr um 24 % zurückgehen.

Ein weiterer in der Vergangenheit aufgetretener Verdacht, Kaffee gehöre zu den Risikofaktoren für **Osteoporose-Erkrankungen** und könne einen Einfluss auf die Knochendichte nehmen, konnte ebenfalls widerlegt werden (Eichler Lit 60; Heyden Lit 101; Lloyd und Mitarbeiter (Lit 150); Mühleib und Detering Lit 174).

Der **Cholesterinspiegel** wird nicht beeinflusst, wenn der Kaffee bei der Zubereitung gefiltert wird, z. B. in einer Filterkaffeemaschine. In ungefiltertem Kaffee ist eine Lipidfraktion enthalten, die den Blutfettspiegel kurzfristig ansteigen lässt (Mühleib und Detering Lit 174; Speer und Kölling-Speer Lit 247).

Eine Vielzahl umfangreicher Untersuchungen beschäftigt sich mit den **Säuren** im Rohkaffee, da diese großen Anteil an der Aromabildung haben. Die im Rohkaffee enthaltenen Säuren erfahren durch die Röstung Veränderungen. So werden einige abgebaut und andere neu gebildet. Im Röstkaffee sind z. B. die Säuren Apfelsäure, Ameisensäure, Bernsteinsäure, Chlorogensäure und Chinasäure enthalten (Balzer Lit 17; Held Lit 96; Homma Lit 108; Speer und Kölling-Speer Lit 247; Vitzthum Lit 266). Balzer (Lit 17) untersucht die Abhängigkeit der gesamten Säurekonzentration der Kaffeebohnen beim Rösten vom Röstverlust. Die Säurekonzentrationen nehmen bis zu einem ORV = 4 % zu und anschließend wieder ab. Der Gesamtgehalt an Säuren im Rohkaffee liegt bei 5 % (Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211).

Kaffeegenuss kann bei einigen Menschen Magenbeschwerden oder Sodbrennen auslösen. Die Ursache hierfür sind im Kaffee enthaltene **Reizstoffe**, unter anderem die Kaffee-Wachse, welche den Schonkaffees entzogen werden. Sie rufen bei manchen Menschen Unverträglichkeiten beim Kaffeegenuss hervor. Durch die Bestimmung dieser Wachse und ihre Entfernung vor dem Röstprozess lassen sich bekömmlichere Kaffees herstellen. Bei Erkrankungen im Galle- und Lebersystem und dem Magen-Darm-System konnte bei Verabreichung reizstoffarmer Kaffees eine gute Verträglichkeit beobachtet werden (Czok Lit 54; Maier Lit 156; Mühleib und Detering Lit 174; Seifert Lit 224; Speer und Kölling-Speer Lit 247; Wurziger Lit 285).

Zur Herstellung von Schonkaffees werden unterschiedliche Methoden verwendet:

- Das **Lendrich-Verfahren**: 2-stündiges Dämpfen und anschließendes Trocknen des Rohkaffees vor dem Rösten, die patentierte Chlorogensäure-Umlagerung wird jedoch vom Röstprozess deutlich überlagert (Clarke Lit 46; Gál und Mitarbeiter Lit 71; Harms und Wurziger Lit 93; Rahn Lit 202; Speer und Kölling-Speer Lit 247; Vitzthum Lit 266; Wurziger Lit 285). Nach diesem Verfahren behandelte Kaffee ist bekömmlicher (seltener Magenreizung und Brechreiz). Unterschiede bei Chlorogensäure und Trigonellin im Vergleich mit unbehandeltem Kaffee sind nicht feststellbar (Czok Lit 52).

- Das **Bach-Verfahren**: Röstkaffee wird mit flüssiger Kohlensäure gewaschen, dadurch werden die an der Oberfläche der Kaffeebohnen befindlichen Schmutzstoffe

und Kaffeewachse entfernt; chemische Unterschiede zu unbehandeltem Kaffee sind nicht nachweisbar (Rahn Lit 202; Speer und Kölling-Speer Lit 247; Vitzthum Lit 266).

- Das **Entwachsen und Dämpfen**: Behandlung vom Rohkaffee mit einem leichtflüchtigen Lösungsmittel zum Entfernen der anhaftenden Kaffeewachse, anschließende Wasserdampfbehandlung nach Lendrich (Rahn Lit 202; Vitzthum Lit 266).

- Das **mechanische Abbürsten** der oberflächen-anhaftenden Substanzen von Rohkaffee (Harms und Wurziger Lit 93; Vitzthum Lit 266).

Bei den so genannten **Röstreizstoffen** handelt es sich um phenolische Substanzen, die durch den thermischen Abbau der Chlorogensäure entstehen. Bei einer Dämpfung über 1 bis 2 Stunden können diese Bestandteile zumindest teilweise durch den Wasserdampf herausgelöst werden, nachdem infolge der Wärmeeinwirkung bereits ein Umbau der Chlorogensäure stattgefunden hat (Speer und Kölling-Speer Lit 247; Sturm Lit 254). Von den Kaffeewachsen gilt C-5-HT (Carbonsäure-5-hydroxytryptamide) als analytischer Nachweisparameter für die Wirksamkeit der Reizstoffentfernung. C-5-HT und die Alkalifarbzahl (AKZ) können zur ergänzenden Beurteilung von Kaffee in Hinsicht auf Bekömmlichkeit und Genusswert genutzt werden. C-5-HT haftet auf der Oberfläche der Kaffeebohnen und ist daher als Indikator geeignet, weil bei den Behandlungsverfahren zur Herstellung bekömmlicher Kaffees zusätzlich der Kaffee gewaschen wird. Durch eine Reduzierung von C-5-HT um 20 % bis 25 % ist eine bessere Bekömmlichkeit bei Magen-Gallen-Beschwerden möglich. Eine geringere Bildung von Magensäure konnte beim Genuss solcher Kaffees beobachtet werden. Mit der AKZ lässt sich das Alter eines Kaffees abschätzen; frische Rohkaffees liegen bei 1-7 und ältere oder falsch gelagerte darüber. Ebenso kann die AKZ ein Maß für den Genusswert sein, je kleiner die AKZ, desto höher der Genusswert in Abhängigkeit vom Rohkaffeewert der AKZ. Mit der AKZ als Indikator sind gedämpfte Kaffees künstlich gealtert, C-5-HT nimmt ab und die AKZ nimmt zu (Clarke Lit 46; Maier Lit 156; Wurziger Lit 282 und Lit 283).

Steinhart und Luger haben die Aminosäuren als Nachweismöglichkeit für behandelten und unbehandelten Röstkaffee untersucht, wobei Unterschiede erkennbar waren (Lit 250).

## 2.6 Koffein

Nach einer Anregung durch J. W. von Goethe fand Ferdinand Runge 1820 im Kaffee eine Substanz, die er nach dem Kaffee benannte und die ein wichtiger Inhaltsstoff ist: das Koffein. Heute ist Koffein der am besten erforschte Inhaltsstoff des Kaffees. Der Kaffeebaum und andere koffeinhaltige Pflanzen, wie z. B. Tee, produzieren das Koffein als Schutz vor Pilzkrankungen. Die Gehalte von Koffein liegen in Arabica-Kaffees bei 1,2 % i. Tr. und bei Robusta-Kaffee bei 2,0 % i. Tr. Es ist gleichmäßig über die Kaffeebohne verteilt. Koffein ist geruchlos und schmeckt schwach bitter. Bei sehr starker Röstung kann ein Verlust durch Sublimation entstehen (Czok Lit 53; Heilmann Lit 97; Kersting Lit 117; Maier Lit 156; Mühleib und Detering Lit 174; Pfaff und Liebig Lit 193; Puhlmann und Sobek Lit 197; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Viani Lit 262; Vitzthum Lit 266).

Koffein ist die weltweit am meisten genutzte psychoaktive Substanz. Als Koffeinquellen werden hauptsächlich die natürlichen Vorkommen wie Kaffee und



Tee, Kakao und Cola genutzt. Bei moderaten Dosen von 50 mg bis 300 mg werden Aufmerksamkeit und Konzentrationsfähigkeit des Konsumenten gestärkt. Eine Tasse Kaffee enthält ca. 80 mg Koffein. Höhere Dosen können negative Wirkungen zeigen, wie Ruhelosigkeit, Beklemmung und Schlaflosigkeit. Seine hohe Beliebtheit als Getränk hat der Kaffee auch dem Alkaloid Koffein zu verdanken, welches eine belebende und anregende Wirkung auf den Körper hat, besonders in der Kombination mit einigen Röstprodukten (Maier Lit 156; Mühleib und Detering Lit 174; Nehlig Lit 180; Viani Lit 262).

Die höchste Konzentration von Koffein im Blut wird 30 bis 60 Minuten nach der Aufnahme erreicht. Der Körper setzt das Koffein im Stoffwechsel mit um und scheidet nur sehr geringe Mengen wieder aus. Die Halbwertszeit im menschlichen Körper beträgt 3 bis 3,5 Stunden, d. h. 14 % bis 17 % des Koffeins im Blut werden pro Stunde umgesetzt (Czok Lit 52).

Die Wirksamkeit von Koffein stimmt mit der Wirksamkeit von Kaffee im Wesentlichen überein. Jedoch ist es nicht allein für die physiologischen Wirkungen von Kaffee verantwortlich. Die Wirkung auf Herz und Kreislauf beruht weitgehend auf dem Koffein: durch den Einfluss auf das Vagus- und Vasomotorenzentrum nimmt die Pulsfrequenz ab und die peripheren Blutgefäße zeigen eine Kontraktion mit der Folge eines erhöhten Blutdrucks; in den Blutgefäßen von Niere, Haut und Muskeln kommt es zu einer Erweiterung, die Herzkontraktionen verlaufen schneller und kräftiger, dabei werden die Herzkranzgefäße erweitert. Unter Aufnahme üblicher Kaffeedosierungen lassen sich keine stärkeren Änderungen am Herz- und Kreislaufsystem feststellen. Auf die Nieren hat Koffein eine anregende Wirkung. Gleichzeitig verringert es das Wasserbindungsvermögen von Blut und Gewebe (Czok Lit 53 und Lit 54; Mühleib und Detering Lit 174; Seifert Lit 224). Die Wirkung vom Koffein entfaltet sich 20 min nach seiner Aufnahme. Die Halbwertszeit im menschlichen Körper kann danach 2 Stunden bis 12 Stunden betragen. Eine Beeinträchtigung des Einschlafens kann auftreten. Mengen unter 100 mg Koffein, entsprechend einer Tasse Kaffee, zeigen hierbei keine Wirkung (Eichler Lit 58 und Lit 59; Mühleib und Detering Lit 174). Durch die anregende Wirkung von Koffein liegt der Verdacht nahe, Koffein könne Schlafstörungen verursachen. Nachgewiesen wurde das nur für unphysiologisch hohe Dosierungen. Wie bei Kaffeeegenuss kann reines Koffein bei älteren Menschen abends auch als Schlafmittel angewandt werden (Eichler Lit 58 und Lit 59; Kersting Lit 117; Seifert Lit 224). Hör-, Tast- und Sehsinn reagieren empfindlicher und geschärfter (Eichler Lit 58). Koffein hat eine euphorisierende und müdigkeitsverscheuchende Wirkung. Es kann positiv bei Funktionsstörungen im Gehirn wirken. Koffein kann die Aufmerksamkeit erhöhen und dabei die verarbeitbare Datenmenge vergrößern. Bei Konzentrationsschwächen und Vergesslichkeit kann es den Lernprozess, die Speicherfähigkeit und die Sauerstoffversorgung im Gehirn verbessern (Czok Lit 52 und Lit 54; Eichler Lit 58; Smith und Brice Lit 238; Snel und Mitarbeiter Lit 246). Der Blutdruck wird auch bei Herzerkrankungen durch die Aufnahme von Koffein nicht wesentlich beeinflusst. Bei Kreislaufkrankungen und bei niedrigem Blutdruck kann sich die Einnahme von Koffein als günstig erweisen. Das Risiko zur Erkrankung steigt durch Kaffee und Koffeinkonsum nicht. Selbst bei Herzrhythmusstörungen gelten 2 Tassen Kaffee täglich als völlig unbedenklich. Bei der Stoffwechselerkrankung Gicht zeigen sich keine negativen Wirkungen durch den Koffeinkonsum mittels Bohnenkaffee. Kaffee und Koffein erhöhen das Risiko für koronare Herzkrankheit, Herzrhythmusstörungen und Herzinfarkt nicht. Durch beispielsweise einen schnelleren Koffeinabbau bedingt

beim Rauchen kann hier der Kaffee auch als Sündenbock für andere Risikofaktoren in Verruf geraten sein (Mühleib und Detering Lit 174).

Der menschliche Körper kann sich an Koffein gewöhnen, so dass durch Verzicht bei Kaffeetrinkern Kopfschmerzen und Verstimmungen auftreten können. Eine suchterregende Droge ist Koffein nicht, so werden vom Körper nicht ständig wachsende Dosen verlangt, der Kaffeekonsum wird sich auf ein konstantes Maß einstellen (Mühleib und Detering Lit 174).

Koffein verfügt über schmerzlindernde Eigenschaften. Kopfschmerzen können durch Kaffeegenuss behandelt werden. So kommt Koffein in Verbindung mit Schmerzpräparaten zum Einsatz, z. B. Acetylsalicylsäure. Durch Kombination von Koffein mit anderen Wirkstoffen kann deren Wirkung um bis zu 40 % verbessert werden (Eichler Lit 58; Mühleib und Detering Lit 174).

Koffein löst im Körper einen thermogenen Effekt aus: aus den körpereigenen Fettreserven wird Wärme und Energie freigesetzt, ohne die körperliche Leistung zu erhöhen. Der Stoffwechsel baut Fettreserven im Körper ab (Mühleib und Detering Lit 174). Während des Schlafes setzt Koffein die Herzfrequenz herab (Czok Lit 52).

Zur Herstellung koffeinfreier Kaffees werden folgende Verfahren angewendet:

- Die **Extraktion mit leichtflüchtigen Lösungsmitteln**: Rohkaffee wird im Satt Dampf aufgequollen, dadurch wird die äußere Kaffeehaut koffeindurchlässig und bei 40 °C bis 70 °C wird mit leichtflüchtigen Lösungsmitteln das aus der Kaffeebohne heraus diffundierende Koffein entfernt; anschließend werden die Lösungsmittelreste mit Wasserdampf entfernt und die Kaffeebohnen getrocknet (Held Lit 96; Katz Lit 114; Maier Lit 156; Vitzthum Lit 266).
- **Extraktion mit Wasser**: dem Rohkaffee werden alle wasserlöslichen Inhaltsstoffe mit dem Koffein zusammen durch Wasser entzogen, die erhaltene Lösung wird mit Trichloräthylen extrahiert und damit das Koffein entfernt und danach wird die Rohkaffeelösung ohne Koffein dem Rohkaffee wieder zugeführt und aufimprägniert (Held Lit 96; Katz Lit 114; Maier Lit 156; Vitzthum Lit 266).
- Die **Extraktion mit überkritischem Kohlendioxid**: unter einem Druck von 100 bar bis 200 bar wird dem Rohkaffee bei 70 °C bis 90 °C das Koffein entzogen (Lit 95; Held Lit 96; Katz Lit 114; Maier Lit 156; Vitzthum Lit 266; Wurziger Lit 286).

## **2.7 Rösten von Kaffeebohnen**

Um Geschmack und Aroma im Kaffee zu erhalten, müssen die rohen Kaffeebohnen geröstet werden.

Unter der Einwirkung von Wärme trocknen die Kaffeebohnen zunächst. Ist ein großer Teil des enthaltenen Wassers verdampft, steigt die Temperatur in den Kaffeebohnen an. Mit der abnehmenden Feuchte verändert sich die Farbe der rohen Kaffeebohnen von grün zu gelb und sie werden heller. Da der Trocknungsvorgang relativ schnell abläuft, einige Sekunden bis einige Minuten, verdampft auch das enthaltene Wasser sehr schnell. Hierbei werden die inneren Strukturen der Kaffeebohnen, ihre Zellen und Zellwände, zerstört. Durch das Trocknen der Bohnen im Inneren werden die Zellwände unelastischer. Die Kaffeebohnen werden porös. Sie verlieren an Festigkeit. Da sich im Inneren der Bohnen hohe Dampfdrücke aufbauen können, wird auch die äußere Geometrie verändert, die Kaffeebohnen blähen sich auf. Dieser

Vorgang geht mit einem deutlich hörbaren Knacken einher. Hierbei lösen sich die Silberhäutchen von der Bohne. Ab 170 °C bis 200 °C beginnen die im Rohkaffee enthaltenen Substanzen (Zucker, Fette, Eiweiße, Säuren) miteinander zu reagieren und Geschmacks- und Aromastoffe zu bilden. Derartige Vorgänge laufen bei vielen Prozessen zur Nahrungszubereitung ab, sie werden als Maillard-Reaktionen bezeichnet. Hierbei verändert sich die Farbe der Kaffeebohnen weiter. Vom gelben Farbton gehen sie erst in einen hellen, dann in einen immer dunkleren Brauntönen über. Hierbei verändern sich auch die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Kaffeebohnen (siehe Kapitel 3.5). Aroma- und Geschmacksstoffe bilden sich weiter und mit zunehmender Röstung verändert sich der Geschmack der Kaffeebohnen. Bei stärker werdender Röstung nimmt die Säure im Kaffee ab, der Geschmack wird stetig intensiver. Läuft die Röstung weiter, gehen die Bohnen in eine immer dunklere Farbe über und der Geschmack wirkt verbrannt. Es tritt Öl aus der Kaffeebohnenoberfläche aus. Während des gesamten Röstprozesses bilden sich Gase, welche aus den Kaffeebohnen austreten. Zu einem großen Teil sind das neben Wasserdampf Kohlendioxid und Kohlenmonoxid. Weitere Gase sind flüchtige Kohlenwasserstoff-Verbindungen, welche wie die Aromastoffe gebildet werden (Bürgin Lit 35; Maier Lit 156; Rothfos Lit 209; Rotzoll Lit 211; Wurziger Lit 283).

Zurzeit sind im gerösteten Kaffee mehr als 850 verschiedene Aromaverbindungen identifiziert (Bonnländer und Mitarbeiter Lit 28).

Das Röstverhalten der Kaffeebohnen ist abhängig von der Kaffeeart, dem Aufbereitungsverfahren (nass oder trocken), ob eine Vorbehandlung stattgefunden hat, der Feuchte und weiteren Einflussgrößen. Wie stark die Röstung ausgeführt werden soll hängt davon ab, für welchen Kulturkreis geröstet wird, wie die Art der Kaffeezubereitung ist, von der Kaffeesorte und mit welchen anderen Kaffeesorten sie gemischt werden soll (Lit 209). Eine Übersicht hierzu bieten Abbildung 2.5 und Tabelle 1.

Temperatur [°C]	Farbe [-]	RV [%]	Art der Röstung [-]
226	sehr hellbraun	13,5	englisch
232	hellbraun	15,0	amerikanisch
238	braun	16,5	europäisch
246	dunkelbraun	20,0	Espresso
254	schwarz	> 25	verbrannt

Tabelle 1 Arten der Röstung nach Sivetz (Lit 236)

Die in Tabelle 1 gezeigten Röstungen wurden von Sivetz (Lit 236) in einem Wirbelschichtroster klassifiziert; der Rohkaffee hatte eine Feuchte von 12 %.

### Rösten von Kaffeebohnen

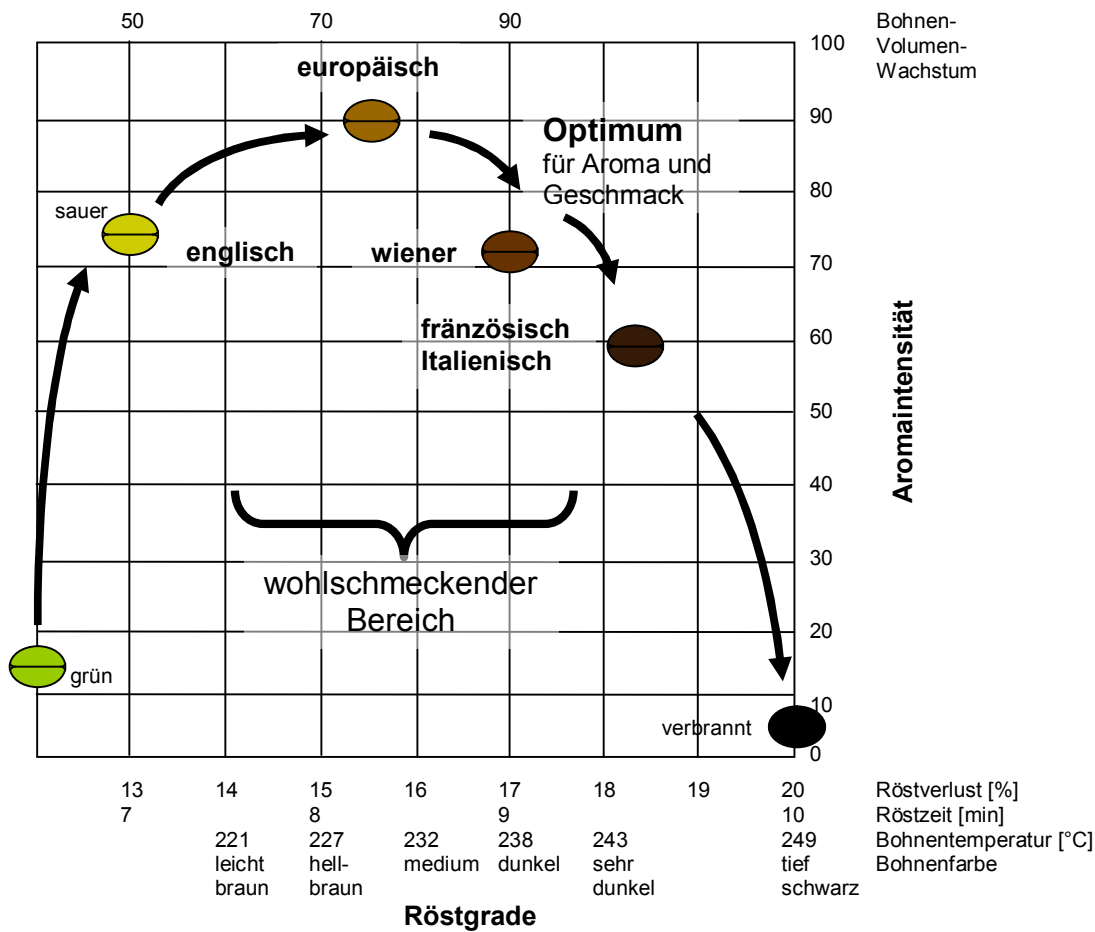


Abbildung 2.5 Röstgrade nach Sivetz (Lit 236)

### 2.8 Zubereitung

Die Temperatur und das Verhältnis von Wasser zu Kaffeepulver sind die Haupteinflussgrößen auf eine Kaffee-Extraktion für ein gutes Getränk. Die Extraktionszeit hat keinen erkennbaren Einfluss, da der Prozess schnell verläuft (Nicoli und Mitarbeiter Lit 182). Für den üblicherweise in Deutschland zubereiteten Filterkaffee sollte für ein möglichst gutes Aroma in der Kaffeetasse eine Wassertemperatur zwischen 85 °C und 95 °C verwendet werden, um pro Tasse (150 ml Wasser) 6 g Kaffeepulver zu extrahieren. Andueza und Mitarbeiter schlagen zur Extraktion eine Wassertemperatur von 92 °C vor (Lit 2). Wurziger schlägt für geschmacklich milde Kaffee-Zubereitungen ein Verhältnis von 1 zu 10 von Röstkaffee zu Wasser für normal geröstete Kaffees vor (Wurziger Lit 280; Lit 283 und Lit 286). Maier beschreibt für Normal-Kaffee in Deutschland 7,5 g bis 8 g Kaffeepulver für 150 ml Wasser (Lit 156). Vitzthum (Lit 266) beschreibt für einen Aufguss mittlerer Stärke 50 g Kaffee pro 1 l Wasser; für Mokka und Espresso 100  $\frac{g}{l}$  und 150  $\frac{g}{l}$ .

Bei der **Brühmethode** wird Kaffeemehl mit kochendem Wasser in der Kanne übergossen, 5 bis 10 Minuten stehen gelassen und dann abgegossen. Bei längerem Stehenlassen lösen sich zu viele Bitterstoffe im Extrakt. Beim **Filterverfahren**, dem in Deutschland gebräuchlichsten Verfahren, wird das Kaffeemehl auf einem Filter mit kochendem Wasser übergossen. Ergiebigkeit und Filtrierzeit nehmen mit feinerem Mahlgrad zu. Für die **Espresso-Zubereitung** wird heißes Wasser durch Dampfdruck schnell durch auf einer Filterplatte befindliches Kaffeemehl gedrückt. Für **türkischen Mokka** werden sehr fein gemahlenes Kaffeemehl und Zucker in einem Kupferkännchen mit Wasser vermischt und aufgekocht (Maier Lit 156; Rothfos Lit 209; Vitzthum Lit 266; Wurziger Lit 283).

Die Aromaqualität hängt von Kaffeesorte, Aufgussstärke, Röstgrad, Zubereitungsart, Mahlgrad und Wasserqualität ab. Zu hartes und zu weiches Wasser wirken sich ungünstig aus (Bersten Lit 24; Maier Lit 156; Rothfos Lit 209; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Vitzthum Lit 266).

Eine Einschätzung zum Verhältnis Kaffeepulver:Wasser liefert Adinolfi mittels eines Geschmacksdiagrammes für gebrühten Kaffee (Abbildung 2.6; Lit 1). Demnach lässt sich ein gutes Ergebnis mit 16 bis 20 Unzen Wasser pro Unze Kaffeepulver erzielen, entsprechend einem Mischungsverhältnis von 1:16 bis 1:20 (hier: 1 Unze = 0,02835 kg, 1 Pfund = 0,4536 kg, 1 Gallone = 3,785 l).

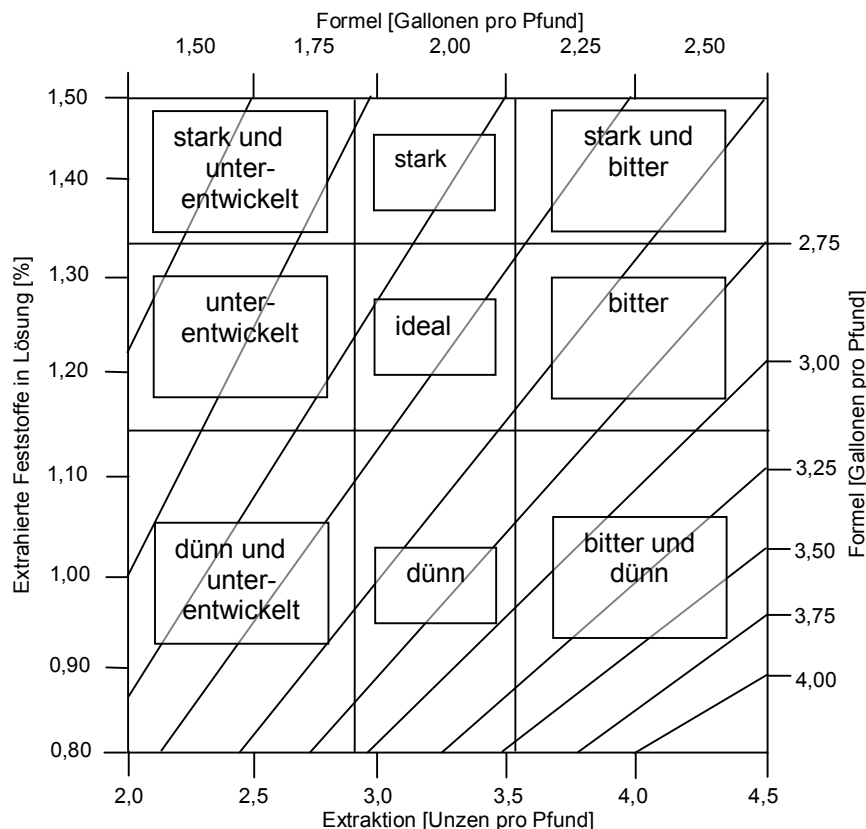


Abbildung 2.6 Geschmacksdiagramm für gebrühten Kaffee nach Adinolfi (Lit 1)

Kaffee schmeckt am besten, wenn er frisch aufgebrüht getrunken wird. Stand das Kaffeegetränk bereits eine Weile, verändert sich die Zusammensetzung und der

Geschmack leidet erheblich (Maier Lit 156; Rotzoll und Müller-Henniges Lit 211; Vitzthum Lit 266; Wurziger Lit 286).

### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Rösten und Röstverfahren

Nach der Entdeckung des Kaffees als Getränk wurden Röstverfahren entwickelt, um das Kaffeearoma zu erhalten. Die einfachste und früher sicher gebräuchlichste Variante ist das Rösten von Kaffeebohnen unter Zugabe von Öl in einer Pfanne auf dem Herd oder über dem Feuer (Rothfos Lit 209). Eine Beschreibung liefert J. L. M. C. aus dem Jahr 1686 (Lit 110). Eine Trommel zum Rösten von Kaffeebohnen wird 1705 von Blancard beschrieben (Abbildung 3.1; Lit 26).

„Andere werfen sie in ein mit Zinn überkleidetes kupfernes Instrument, oder ein eisernes / welches länglich / und an der einen Seiten geschlossen ist; Hernach / wenn es mit Bohnen angefüllt / legen sie dieses Instrument auff glüende Kohlen / und wenden es beständig um / so lange biß sie meinen / daß der Coffeé gaar genug sey. Diese Methode halte ich vor gut / weil nichts davon verfliegen kan / wie wohl sonst in den offenen Pfannen geschieht; hernach weil sie auch alle zugleich in diesem Instrument braten können.“

Abbildung 3.1 Nutzung einer Rösttrommel nach Blancard um 1700 (Lit 26)

Der weltweit erste industrielle Kaffeeröst-Apparat, ein Trommel-Röster, wurde 1824 von Richard Evans in England patentiert (engl. Patent Nr. 4907 80; Ukers Lit 261). Der erste Wirbelschichtapparat zum Rösten von Kaffeebohnen wurde 1926 von Heinrich Caasen in Deutschland zum Patent angemeldet (Bersten Lit 24; Caasen Lit 303).

Mit der zunehmenden Verbreitung des Kaffees wurden weitere technische Möglichkeiten entwickelt. Beschrieben werden sollen hier nur industrielle Lösungen.

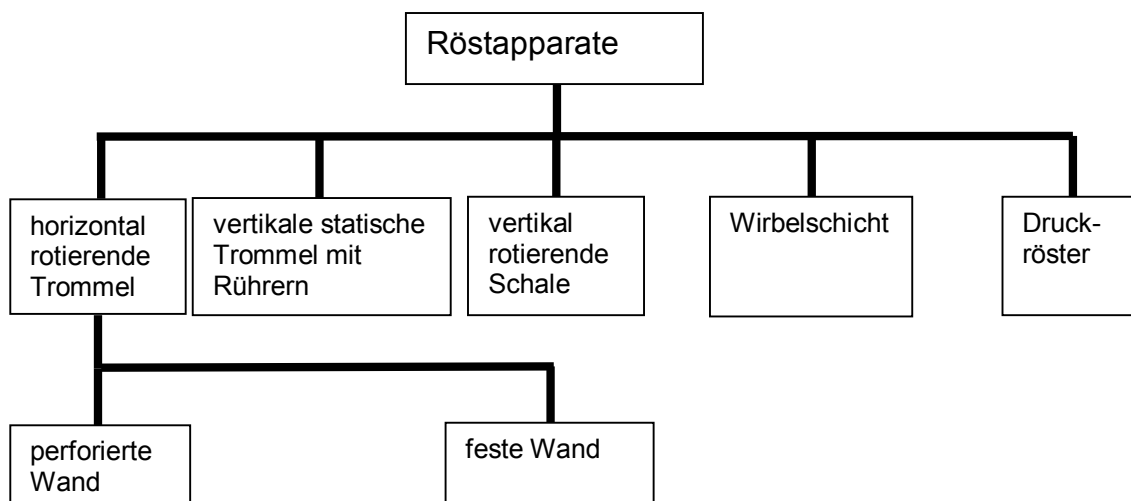


Abbildung 3.2 Röster nach Viani (Lit 263)

In Abbildung 3.2 ist eine Einteilung der Röstapparate nach Viani gezeigt. Ergänzend zu erwähnen sind hier Infrarot- und Mikrowellenröster. Die Strahlschichtröster stellen eine spezielle Art der Wirbelschicht dar.

### 3.1.1 Röstertechnologie

Wie in Abbildung 3.2 dargestellt ist, gibt es unterschiedliche technische Lösungen für Kaffee-Röst-Apparate. Im Folgenden sollen Trommel-, Druck-, Mikrowellen-, Wirbelschicht-, Strahlschicht-, Infrarot- und Zentrifugalröster sowie Sonderformen vorgestellt werden.

**Trommel-Apparate** zum Rösten von Kaffeebohnen durch Kontakt und Konvektion sind schon lange in der Anwendung. Sie wurden zuerst für den Hausgebrauch entwickelt, wo sie über dem Herdfeuer zur Anwendung kommen konnten. Eine Rösttrommel ist ein zylinderförmiger Apparat, welcher in Rotation versetzt wird. Die Kaffeebohnen werden hierdurch und mit Hilfe von eingebauten Rührern durchmischt. Beheizt wird entweder von außen über die Mantelfläche oder direkt mit Brenngas, welches durch die Trommel geleitet wird. Die Röstzeiten für Trommelröster liegen bei 10 bis 30 Minuten. Es gibt Rösttrommeln für chargenweisen und kontinuierlichen Betrieb: Anonym (Lit 5), Bersten (Lit 24), Eggers und Pietsch (Lit 63), Klein und Mitarbeiter (Lit 119), Lindner (Lit 147), Maier (Lit 156, Lit 157 und Lit 158), Rothfos (Lit 209), Rotzoll und Müller-Henniges (Lit 211), Sivetz (Lit 233 und Lit 234), von Gimborn (Lit 76) Wurziger (Lit 283). Eine gute Beschreibung von Rösttrommeln mit Anleitung zum Rösten liefert Ciukpka (Lit 39).

Aufgrund der langen Nutzung von Rösttrommeln gibt es unzählige Patentanmeldungen für dieses Röstprinzip mit unterschiedlichen technischen Varianten, beispielsweise von Igusa und Chiba (Lit 320), Hizaki (Lit 317), Tamaki und Mitarbeiter (Lit 333), eine indirekt beheizte Rösttrommel von Johanessen (Lit 322), mit online-Messung von Temperatur, Druck, Röstzustand, Abgasen von Toriba (Lit 335), Bewley und Mitarbeiter (Lit 301), Hibi und Yamanashi (Lit 314), ein Apparat mit Wärmeübertrager von Pera (Lit 336); Allington und Torbet (Lit 295); Verfahren und Vorrichtung zum Rösten und Abkühlen von Kaffeebohnen mit isoliertem Kühlgaskreislauf, damit kein Aroma beim Kühlen verloren geht von Shinkawa und Mitarbeiter (Lit 343); Trommelröster mit Röstprofilkontrolle von Gerhardt und Cook (Lit 311); Lemme und Fudge (Lit 325).

Die **Druckröster** sind eine Weiterentwicklung der Trommelröster. Die Kaffeebohnen werden in einer geschlossenen gasdichten Rösttrommel oder -kugel geröstet, wobei in der heißen Phase über 180 °C durch Schließen von Ventilen ein Druck von ca. 600 kPa durch die den Kaffeebohnen entweichenden Gase aufgebaut wird. Nach Einspritzen von Kühlwasser steigt der Druck auf 1000 kPa, während die Temperatur unter 100 °C sinkt. Diese Röstertypen sollen besonders aromaschonend Röstkaffee herstellen können. Der Wassergehalt druckgerösteten Kaffees liegt höher als bei anders gerösteten Kaffees und der Masseverlust ist geringer: Arnestad (Lit 12), Lawler (Lit 142), Maier (Lit 156), Rothfos (Lit 209), Sivetz (Lit 233); Wurziger (Lit 283). Lee und Smith beschreiben eine Druckwirbelschicht mit dem Inertgas Stickstoff (Lit 143). Zu Druckröstern sind ebenfalls Patentanmeldungen zu finden: Maki und Haruyama (Lit 328) beschreiben eine Druckröst-Trommel mit einer Stufe, wo die Dampftemperatur 251 °C bis 400 °C für 50 s bis 300 s unter 6,5 bar bis 20 bar und eine zweite Stufe, wo die Temperatur 251 °C bis 400 °C für 60 s bis 800 s unter atmosphärischem Druck betragen sollen; Eichner beschreibt einen Wirbelschicht-Druckröster (Lit 306).

Die **Mikrowellentechnologie** im Lebensmittelbereich hat zur Entwicklung von Mikrowellen-Röstern geführt. Die Kaffeebohnen werden beispielsweise als



Feststoffschüttung in ein Rohr gegeben, in welches die Mikrowellen von oben eingeleitet werden. Die entstehenden Röstgase werden seitlich abgezogen (Hamid und Mitarbeiter Lit 87). Patentanmeldungen bei den Mikrowellenröstern sind eine Vorrichtung zum Rösten von Kaffeebohnen durch Mikrowellen (Gerling und O'Meara Lit 312) und ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Aufbereitung von Kakao- und Kaffeebohnen mit einer Wirbelschichttrocknung und einer Mikrowellenröstung (Drevici-Kux und Drevici Lit 305).

Die **Wirbelschichttechnologie** in der Anwendung beim Kaffeerösten hat sich im industriellen Maßstab immer mehr durchsetzen können. Die Vorteile dieser Konvektions-Röstung liegen in einer sehr gleichmäßigen Produktqualität. Die Kaffeebohnen sind immer gleichmäßig von heißem, indirekt beheiztem Röstgas umgeben. Durch hohe Wärmeübergänge sind die Röstzeiten deutlich kürzer als in der Trommel. Durch eine geschickte Kreislaufführung der Röstgase lassen sich energetisch effizientere Röstapparate bauen. In einer Röstkammer, welche von unten durch einen Lochboden begrenzt ist, befinden sich die Kaffeebohnen. Durch den Lochboden wird heißes Gas (Luft, Wasserdampf, Stickstoff) in die Röstkammer eingeleitet. Die Kaffeebohnen fluidisieren darin und werden gut durchmischt. Nach oben ist die Röstkammer aufgeweitet, so dass die Gasgeschwindigkeit hier abnimmt und kein Partikelaustrag erfolgt (Arjona und Mitarbeiter Lit 11; Cammarn und Mitarbeiter Lit 36; Eggers und Pietsch Lit 63; Eggers und Mitarbeiter Lit 64 und Lit 65; Kliefoth Lit 120; Krüger und Mitarbeiter Lit 130; Maier Lit 156 und Lit 158; Mörl und Mitarbeiter Lit 172; Pittia und Mitarbeiter Lit 194; Röhm Lit 206; Schenker Lit 215; Sivetz Lit 233, Lit 234 und Lit 236; Tscheuschner Lit 259; Wurziger Lit 283).

Durch kurze Röstzeiten sind in Wirbelschicht- und Strahlschichtröstern bessere Produktqualitäten erzielbar als beispielsweise in den Trommelröstern mit deutlich höheren Verweilzeiten. Je kürzer die Röstzeit und je höher die Rösttemperatur ausfallen, umso besser wird die Qualität der gerösteten Kaffeebohnen sein: der Ertrag an aus dem Kaffeepulver löslichen Extrakten steigt, die Geschmacksintensität nimmt zu, das Aroma wird reicher und vielfältiger, der Röstkaffee ist weniger teerig (Ko Lit 121).

Schemas zur Wirbelschichttröstung sind in Abbildung 4.1 dargestellt und in Kapitel 4.1 beschrieben.

Zur Wirbelschichttröstung ist eine große Anzahl Patente angemeldet worden, eine kleine Auswahl soll im Folgenden dargestellt werden: ein Wirbelschichtröster (Gell Lit 309); ein rotierender Wirbelschichtröster mit heißer Luft und einer außerhalb des Rösters befüllbaren und entleerbaren Röstkammer (Gell und Porto Lit 310); ein Verfahren zum Rösten von Kaffee mit reduzierter Dichte in einer zweiphasigen Wirbelschicht (Hubbard und Mitarbeiter Lit 318); ein zweistufiger Wirbelschichtröster (Aufwärmen und Fertigrösten mit geringerer Gasgeschwindigkeit) von Hubbard (Lit 319); ein Verfahren zum Rösten dunkler Kaffeebohnen mit Vortrocknung durch unterschiedliche Verfahren, anschließender Wirbelschichttröstung und Kontrolle des Röstzustands über Photometrie (Kirkpatrick und Mitarbeiter Lit 323); eine fördernde Wirbelschicht-Vorrichtung und -röstung (Luhrs Lit 326); eine kontrollierte Wirbelschichttröstung (Mahlmann und Mitarbeiter Lit 327); ein schneller Heißluft-Wirbelschichtröster (30 s bis 120 s) bei 288 °C bis 399 °C (Price und Mitarbeiter Lit 337); ein Wirbelschichtröster (Puhlmann und Mitarbeiter Lit 339); eine Heißluft-Wirbelschicht mit automatischer Steuerung der Temperatur (Sewell Lit 342); ein Verfahren zur Röstung und Kühlung in zwei Wirbelschichten (Röstung und Kühlung)

von Stauber (Lit 345); eine Rotationswirbelschicht in unterschiedlichen Zeiten für unterschiedliche Stoffeigenschaften, besonders Dichte und Geschmack (Wellandt Lit 348); ein Wirbelschichtröster (Wireman und Wireman Lit 350); eine Wirbelschichtröstung mit zwei übereinanderliegenden Behältern (Wireman und Wireman Lit 351).

Patente aus dem Umfeld der Universität Magdeburg sind die Wirbelschicht-Luft-Röstung und die Wirbelschicht-Dampf-Röstung und Kandierung von Kaffeebohnen (Kliefoth und Mitarbeiter Lit 324; Mörl und Mitarbeiter Lit 329; Winkelmann und Mitarbeiter Lit 349).

Die **Strahlschicht** ist ein Spezialfall der Wirbelschicht. Hier wird das heiße Gas durch eine kleine Eintrittsöffnung mit großer Geschwindigkeit eingebracht. Die Bohnen werden mitgerissen und nach oben geschleudert. Der Gasstrahl weitet sich auf und verliert an Geschwindigkeit. Die Kaffeebohnen fallen wieder nach unten. Die Durchmischung und der Wärmeübergang sind größer als in einer Wirbelschicht und der Röstprozess kann sehr schnell verlaufen (Nagaraju und Mitarbeiter Lit 176, Lit 177 und Lit 178). Hierzu angemeldete Patente sind beispielsweise eine Strahlschichtröstung von Sivetz (Lit 344) und eine Strahlschichtröstung von Bersten (Lit 300).

**Infrarotröster** arbeiten mit einer Infrarotstrahlungsquelle und/oder einem Heißluftstrom in einer Rösttrommel. Die rotierende Trommel ist perforiert und um sie herum sind mehrere Strahlungsquellen angeordnet. Diese Anwendung findet in Japan eine erste Verbreitung (Hasimoto und Mitarbeiter Lit 94; Kino und Takagi Lit 118). Eine Patentanmeldung hierzu ist beispielsweise ein Ofen und eine Rösttrommel mit Infraroterhitzern und Kühltrommel (Nakamura und Ito Lit 331).

**Zentrifugalröster** arbeiten mit rotierenden Schalen. Die in ihnen befindlichen Kaffeebohnen werden durch die Zentrifugalkraft zum Rand transportiert. Ein hier befindlicher fester Lamellenring führt die Bohnen zurück in die Schale. Die notwendige Wärme wird über die Zuführung von Heißluft in den Apparat gebracht (Maier Lit 156; Rothfos Lit 209; Wurziger Lit 283). Eine patentierte Anwendung ist beispielsweise eine Röstung in einer runden Schüssel, die in der Mitte abgesenkt und befestigt ist und sowohl von außen als auch über die Luft, die von Öffnungen an der Schüsselmitte über die Oberfläche strömt, erwärmt wird (Totsuka Lit 347).

#### **Sonderformen:**

**Festbettröster und ähnliche Bauarten** arbeiten mit einer Partikelschüttung, welche durch eine Misch- oder Röhreinrichtung bewegt wird. Beispiele hierfür sind folgende Patentanmeldungen: ein kontinuierlicher Kaffeeröster mit einer Förderschraube und hintereinander angeordneten Kammern, durch die das Röstgas strömt (van Tongeren Lit 346); ein Apparat zum Kaffeerösten mit zwei zylindrischen, rotierenden Behältern, die durch eine schraubenförmige Fördereinrichtung verbunden sind, die die Bohnen kontinuierlich weitertransportiert und bewegt (Brandlein und Mitarbeiter Lit 302); Konditionieren thermisch expandierbarer Festkörper in einem heißgasbetriebenen Wanderbett mit Vorbehandlung zur Abtrennung der Spelzen vor dem Rösten und evtl. Zuführung von Aromastoffen in einem Wanderbett (Prior Lit 338); ein kontinuierlicher Röster von Lebensmitteln mittels horizontaler Zylinder und einer Rührschnecke zur Förderung (Inakuma und Mitarbeiter Lit 321); ein Röster aus

einem waagerechten Halbzylinder von Heißluft durchströmt mit einem Rührwerk für eine gleichmäßige Röstung (Nishikawa Lit 332).

Hirobumi schlägt einen Kaffeeröster vor, in welchem die Kaffeebohnen in eine **beheizte Sandschüttung** gemischt, 25 Minuten gerührt werden und anschließend 8 Minuten in Ruhe verbleiben ohne weiter zu beheizen. Dann werden die Bohnen herausgeschüttelt und mittels eines Luftstromes vom Sand getrennt (Lit 315).

Yukimichi und Mitarbeiter rösten Kaffee mit **Inertgas** (Lit 352). Überhitzten Wasserdampf zum Rösten verwenden Akira und Mitarbeiter (Lit 294) und im industriellen Einsatz ist ein Wirbelschicht Röster mit überhitztem Wasserdampf von Winkelmann und Mitarbeiter (Lit 349).

Delft und Tijmensen (Lit 304) und Hitosi (Lit 316) schlagen Verfahren zum Rösten von Kaffeebohnen mit Glas- oder Quarzperlen als **inerte Partikel** in Trommelröstung als Wärmeübertragungsmittel vor, Hitosi eine Rösttrommel mit inerten Partikeln (Lit 316). Einen Wirbelschicht Röster mit inerten Partikeln als Wärmeübertrager (Rios und Mitarbeiter Lit 341).

Zu den Röstverfahren existiert eine große Anzahl von Patenten, vor allem in Europa, USA und Japan. Eine detailliertere Übersicht zu weiteren Patentanmeldungen bietet beispielsweise Maier (Lit 156).

Inzwischen haben im industriellen Maßstab die Wirbelschicht Röster die größte Anwendung gefunden, während zur Herstellung von Spezialitäten und zum Selbströsten oder für Laboruntersuchungen die Trommelröster weiterhin dominieren. Das Druckrösten als eine Idee der 50er bis 70er Jahre des 20. Jahrhunderts hat sich nicht durchsetzen können.

### 3.1.2 Kandierung von Röstkaffee

Für einige Kaffeezubereitungen werden kandierte Kaffeebohnen verwendet. Kandierter Kaffee wurde 1866 von Justus von Liebig erstmals hergestellt, um den Kaffee vor Luftfeuchte und Aromaverlust zu schützen (Anonym Lit 3; Liebig Lit 146). Zum Ende des Röstprozesses werden die Kaffeebohnen mit Zucker oder Honig oder einer wässrigen Zucker- oder Honiglösung gemischt, der Zucker karamellisiert auf den Kaffeebohnen. Das Aroma des Kaffees ist hinterher kräftiger und bitterer. Kandierter Kaffee wird beispielsweise für Melange-Sorten (Wiener Melange), Espresso-Kaffees und spanischen Torrefakto verwendet (Clark Lit 40; Krüger und Mitarbeiter Lit 130; Maier Lit 156; Winkelmann und Mitarbeiter Lit 349). Die gesetzliche Regelung ist in der Kaffeeverordnung (Lit 7) enthalten. Eine Anwendung der Kandierung in der Wirbelschicht findet sich beispielsweise bei der Röstfein Kaffee GmbH seit dem Jahr 2000 (Krüger und Mitarbeiter Lit 130; Winkelmann und Mitarbeiter Lit 349).

### 3.1.3 Das Wirbelschicht-Verfahren

Eine Wirbelschicht ist ein fluidisiertes Haufwerk. Ein körniger Feststoff wird in einen Apparat gebracht, welcher unten durch einen Lochboden begrenzt ist. Durch diesen Lochboden strömt ein Fluid in die Kammer mit dem Feststoff. Bei geringer oder keiner Strömung besitzt die Feststoffschüttung ein Lückenvolumen zwischen den Partikeln von  $\varepsilon=0,4$  (Gl. 8; Gl. 9; Gl. 10), d. h. 40 % des Volumens der gesamten Schüttung sind Lücken im Feststoff. Wird die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids erhöht, gibt es einen Punkt, wo sich dieses Lückenvolumen vergrößert und die

Feststoffpartikel sich in einem Schwebезustand befinden. Jetzt ist  $\varepsilon > 0,4$ . Dieser Punkt wird als Lockerungspunkt oder Wirbelpunkt (WP) bezeichnet (Gl. 13). Steigt die Fluidgeschwindigkeit weiter an, bleibt der Druckverlust zunächst konstant, die Wirbelschicht expandiert, das relative Lückenvolumen und die Höhe der Wirbelschicht steigen an. Bei noch höherer Fluidgeschwindigkeit (Gl. 15) wird der Austragspunkt (AP) erreicht. Jetzt ist die Geschwindigkeit so groß, dass der Feststoff durch die fluide Phase ausgetragen wird. Wirbelpunkt und Austragspunkt sind abhängig von Feststoff- und Fluidichte, Partikeldurchmesser und Viskosität des Fluids.

Gl. 8 relatives Lückenvolumen einer Schüttung:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{\text{Part}}}{V_{\text{Schütt}}} \quad [-]$$

Gl. 9 für annähernd kugelförmige Partikel einer Schüttung kann gelten:

$$\varepsilon_{\text{WP}} \sim 0,4$$

Gl. 10 relatives Lückenvolumen für eine Wirbelschicht nach Todes, Goroschko, Rosenbaum (Lit 80; Lit 173):

$$\varepsilon = \left( \frac{18 \cdot \text{Re} + 0,36 \cdot \text{Re}^2}{\text{Ar}} \right)^{0,21} \quad [-]$$

Gl. 11 Dichte der Partikelschüttung:

$$\rho_{\text{Schütt}} = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{\text{Part}} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Gl. 12 Reynolds-Zahl für den Wirbelpunkt (Lit 80; Lit 173):

$$\text{Re}_{\text{WP}} = \frac{\text{Ar}}{1400 + 5,22 \cdot \sqrt{\text{Ar}}} \quad [-]$$

Gl. 13 Gasgeschwindigkeit am Wirbelpunkt:

$$w_{\text{WP}} = \frac{\text{Re}_{\text{WP}} \cdot v_{\text{Gas}}}{d_{\text{Part}}} \quad \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Gl. 14 Reynolds-Zahl für den Austragspunkt (Lit 80; Lit 173):

$$\text{Re}_{\text{AP}} = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{\text{Ar}}} \quad [-]$$

Gl. 15 Geschwindigkeit am Austragspunkt:

$$w_{\text{AP}} = \frac{\text{Re}_{\text{AP}} \cdot v_{\text{Gas}}}{d_{\text{Part}}} \quad \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Gl. 16 Geschwindigkeit des Gases im Apparat (Leerrohrgeschwindigkeit):

$$w_{\text{Gas0}} = \frac{\dot{m}_{\text{Gas0}}}{\rho_{\text{Gas}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{Apparat}}^2} \quad \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Zwischen WP und AP befindet sich der Arbeitsbereich der Wirbelschicht. Je nach Eigenschaft der fluidisierten Partikel kann es hier zu einem unterschiedlichen Erscheinungsbild der Wirbelschicht kommen. Eine ideale Vermischung ist selten zu erreichen. Bei kleinen Partikeln kommt es zu Strömungskanälen, wächst der Partikeldurchmesser, können sich Blasen bilden (Geldart Lit 75). In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit der fluiden Phase kann es eine stoßende oder pulsierende Wirbelschicht geben (Mörl und Schuart Lit 171; Lit 173; Lit 260).

Wirbelschichtapparate haben in der Trocknungstechnik, Verfahrenstechnik, Lebensmitteltechnik und pharmazeutischen Technik eine große Verbreitung gefunden. Die Anwendungen sind vielfältig und viele Autoren haben sich mit diesem Thema auseinandergesetzt, z. B. Burgschweiger (Lit 33), Cammarn und Mitarbeiter (Lit 36), Eggers und Mitarbeiter (Lit 62, Lit 64, Lit 65), Cammenga und Mitarbeiter (Lit 68), Geiger und Mitarbeiter (Lit 72), Geldart (Lit 74, Lit 75), Kliefoth (Lit 120), Kunii und Levenspiel (Lit 131, Lit 132, Lit 133, Lit 134, Lit 135, Lit 136), Kwauk (Lit 140), Machnow (Lit 155, Lit 162), Mörl und Mitarbeiter (Lit 98, Lit 130, Lit 170, Lit 171, Lit 172, Lit 173), Molerus und Werther (Lit 169, Lit 270), Schenker (Lit 215), Sivetz (Lit 233, Lit 234, Lit 236), Werther und Mitarbeiter (Lit 102, Lit 103, Lit 271, Lit 272, Lit 273, Lit 274). Zenz liefert eine Übersicht über Anwendungen von Wirbelschichtapparaten in der chemischen Industrie und nennt Vorteile (einfache Temperaturkontrolle in den Prozessen, kontinuierliche Prozessführung leicht möglich, guter Wärmetransport auch in Kombination mit anderen Verfahrensschritten leicht realisierbar, geringere Baugrößen nötig als bei Alternativen) und Nachteile (nicht anwendbar bei schwer fluidisierbaren oder zur Agglomeration neigenden Feststoffen, hohe Druckverluste in der fluiden Phase, Blasenbildung kann den Wirkungsgrad verringern) (Lit 291).

### **3.2 Röstgaszusammensetzung und -reinigungsverfahren**

Geruchsemissionen sind für den Menschen nicht direkt gesundheitsschädlich. Gerüche fallen in den Belästigungsbereich und können damit das Wohlbefinden und damit nach der WHO auch die Gesundheit beeinträchtigen (Hangartner und Kastka Lit 88). Mögliche Wirkungen von Geruchsbelästigung auf den Organismus können Schlafstörungen, Beeinflussungen des Nervensystems (psychovegetative Reaktionen) auf Geruchsreize und Belästigungswirkungen im Hirnstrombild sein (Winneke und Mitarbeiter Lit 276). Die Hauptkriterien für die Einschätzung einer Geruchsbelästigung sind die Geruchsdauer und die -intensität. Einen großen Einfluss haben auch die Geruchshäufigkeit und die -art. Häufigkeit und Dauer sind direkt messbar, die Intensität nur bedingt und die Art ist rein subjektiv zu bewerten (Harkort Lit 91; Schumacher Lit 223). Ständige belästigende Geruchseinwirkungen können zu physischen und psychischen Schädigungen beim Menschen führen (Schön und Hübner Lit 221). Rechtliche Probleme der Geruchsbelästigungen werden von Hansmann diskutiert (Lit 89).

Zur **mechanischen Abtrennung** der Häutchen, bei Wirbelschichtroöstern auch von Staubteilchen, werden Zyklone oder Gewebefilter eingesetzt. Der Anteil an Staubemissionen bei Kaffeeröstern kann bis zu 3 % und der der Spelzen 0,5 % bis 1,5 % betragen (Koch Lit 122).

Bei der **katalytischen Nachverbrennung** werden im Abgas enthaltene organische Verbindungen oxidiert. Die Katalysatoren haben Arbeitstemperaturen von 300 °C bis 550 °C. Katalysatoren sind jedoch teuer, nicht immer umweltverträglich und haben nur eine begrenzte Lebensdauer. Das zu reinigende Gas muss frei sein von Katalysatorgiften, d. h. Substanzen, die zu einer Inaktivierung des Katalysators führen können. Zur Reinigung von Kaffee-Röstabgasen ist die katalytische Nachverbrennung geeignet. Die Katalysatoren haben eine Lebensdauer von 3 - 5 Jahren (Anonym Lit 4; Betz Lit 25; Bohrer Lit 27; Harkort Lit 91; Rothfos Lit 209; Wiegard Lit 275). Eine Patentanmeldung kommt von Muraoka und Ichihara für einen

Katalysator zum Reinigen von Röstabgasen vom Kaffeerösten und für einen Röstofen (Lit 330).

Bei der **thermischen Nachverbrennung** ist dem Röstprozess eine Abgasverbrennung nachgeschaltet. Da die im Röstabgas enthaltenen Gase und Partikel organischer Natur sind, lassen sie sich bei Temperaturen zwischen 750 °C und 800 °C gut verbrennen. Nachteilig sind der zusätzliche Energieverbrauch, ein großer Platzbedarf, hohe Investitionskosten und neu entstehende Verbrennungsabgase (Anonym Lit 4; Betz Lit 25; Bohrer Lit 27; Harkort Lit 91; Koch Lit 122; Rothfos Lit 209). Ein Beispiel für eine Patentanmeldung für die thermische Nachverbrennung liefert Argiles mit einer Reinigung von Röstgasen, Aufspaltung des Röstgases in einen Rückführstrom zur Röstkammer und einen Abgasstrom, welcher einer sekundären Verbrennung unterzogen wird (Lit 298).

Eine moderne Art der Abgasreinigung ermöglichen **Biofilter** und **Biowäscher**. Besonders gut anzuwenden ist diese Methode bei hohen Geruchsbelastungen. Nachteilig sind der hohe Wartungsaufwand und die geringen Gasdurchsätze (Berkmen Lit 22; Bohrer Lit 27; Harkort Lit 91; Koch Lit 122; Perego und Mitarbeiter Lit 191; Tholander Lit 256).

Eine Alternative zu Reinigungsverfahren bietet eine **Kreislaufführung der Röstgase** oder eine Nutzung dieser als Brenner-Zuluft. Dies ist im Prinzip für alle Konvektionsröster möglich (Rothfos Lit 209). Eine Anwendung hierfür hat die Röstfein Kaffee GmbH realisiert (Winkelmann und Mitarbeiter Lit 349). Hierbei wird die zur chemischen Umsetzung der Kohlenwasserstoffverbindungen in Röstabgas und Kühlerabgas notwendige Wärme zur Erwärmung des Röstgases genutzt. Auch andere Kaffee-Röstereien nutzen dieses Verfahren (Anonym Lit 4; Lawler Lit 142). Lukin und Khramov (Lit 153) beschreiben einen kontinuierlichen Wirbelschicht-Röster mit Schlitzgasverteiler und Rezirkulation des Vortrocknungsgasstromes. Weitere Patentanmeldungen sind beispielsweise eine Vorrichtung zum Rösten mit geschlossenem Kühlgas- und Röstgaskreislauf und Wärmeaustauscher für eine verringerte Röstgastemperatur, einen besseren thermischen Wirkungsgrad und geringere Schadstoffemission von Finken und Mitarbeiter (Lit 307); ein Röstsystem mit Wärmerückführung in den Wirbelschichtroster in einem geschlossenen Gaskreislauf für die Röstung und Kühlung (Tidland und Welch Lit 334); ein kontinuierlicher Wirbelschichtapparat mit Kreislaufführung von Rios und Mitarbeiter (Lit 340).

### **3.3 Gesetzesvorlagen zu Emissionen**

Während des Röstens, Mahlens und Lagerns von Kaffee werden Kohlendioxid, Wasserdampf, Kohlenmonoxid und viele Kohlenwasserstoffverbindungen emittiert. Während der Röstkaffeeherstellung und dem Mahlen von Kaffeebohnen ist dies ein unvermeidlicher Vorgang. Um eine Belastung der Umwelt und der Anwohner zu vermeiden, hat der Gesetzgeber Gesetze und Richtlinien erlassen, z. B. BImSchG und TA-Luft (Bohrer Lit 27; Davids und Lange Lit 55; Hansmann Lit 89; Juergens Lit 112; Koch Lit 122; Schön und Hübner Lit 221).

Nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) sind Anlagen zum Rösten von Kaffeebohnen genehmigungspflichtig. Die Grenzwerte sind in der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (TA-Luft) festgeschrieben: für das Rösten von Kaffeebohnen sind  $50 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$  gasförmige organische

Stoffe (Gesamtkohlenstoff) als Emissionsbegrenzung vorgegeben. Zur Erfassung dieser gasförmigen organischen Stoffe sind das FID-Messverfahren (siehe auch Kapitel 4.5) und die Kieselgelmethode geeignet. Beim FID-Verfahren wird eine komplette Charge gemessen und anschließend der Mittelwert gebildet. Die Kieselgelmethode ist eine Probenahme-Methode; hierbei wird nur ein Mittelwert bestimmt (Bohrer Lit 27; Koch Lit 122).

### **3.4 Messmethoden**

Zur Einschätzung des Röstprozesses ist die Kenntnis von Stoffdaten des Kaffees erforderlich. Von besonderer praktischer und wissenschaftlicher Bedeutung ist zunächst die Feuchte der Kaffeebohnen. Sie bestimmt Qualität und Kosten von Roh- und Röstkaffee, sowie deren Lagerfähigkeit. Zur Durchführung des Röstens sind bei einigen Röstverfahren weitere Daten von Interesse: die Dichte der Kaffeebohnen, die Partikelgröße bzw. das Partikelvolumen, die Farbe sowie weitere physikalische Größen.

#### **3.4.1 Feuchte und Feuchtebestimmung**

Die Feuchte (Gl. 17 und Gl. 18) ist ein wichtiger Faktor; Kaffee wird nach Masse verkauft und das enthaltene Wasser hat einen Einfluss auf die Masse. Bei Röstkaffee ist die Feuchte ein Einflussfaktor für die Haltbarkeit des Aromas. Da Kaffee ein Naturprodukt ist, ist die Feuchte von Rohkaffee nicht konstant. Sie unterscheidet sich bei den Arten und Anbaugebieten, den Trocknungsverfahren und der Aufbereitung. Sie hat einen Einfluss auf den Röstprozess. Rohe Kaffeebohnen unterscheiden sich von gerösteten in ihrer Struktur sehr stark. Zur Bestimmung der Feuchte von Roh- und Röstkaffee existieren verschiedene Möglichkeiten, wie die Karl-Fischer-Methode, die Trockenschrank-Methode und Infrarot-Methoden.

Eine einheitliche Methode der Bestimmung der Feuchte hat sich weder international noch national durchsetzen können. Diskussionen mehrerer Methoden liefern Eggers und Pietsch (Lit 63), Gabriel-Jürgens (Lit 70), Kupfer (Lit 137, Lit 138, Lit 139), Maier (Lit 159) und Park (Lit 186). Einen internationalen Vergleich der Normen bietet Clarke (Lit 49), Vergleiche über die deutschen Normen bieten Clarke (Lit 49) und Kupfer (Lit 137). Eine sehr verbreitete Möglichkeit der Feuchtebestimmung ist die Trockenschrankmethode. Sie fand Anwendung z. B. bei Gabriel-Jürgens (Lit 70), Maier (Lit 159), Massini und Mitarbeiter (Lit 164), Park (Lit 186), Rolz und Mitarbeiter (Lit 207), Schenker (Lit 215) und Wootton (Lit 279). Eine weitere, jedoch aufwändigere Methode ist die Karl-Fischer-Titration. Eggers und Mitarbeiter (Lit 64), Gabriel-Jürgens (Lit 70), Maier (Lit 159) und Park (Lit 186) z. B. nutzten sie für experimentelle Untersuchungen. Weniger verbreitete Messmethoden sind die Feuchtebestimmung mittels Mikrowellen, z. B. durch Kraszewski (Lit 124) und mit der Infrarot-Methode, z. B. durch Paardekooper und Mitarbeiter (Lit 185) und Schenker (Lit 215) oder Feuchtebestimmung mittels Vakuumschrank, Gefriertrocknung, Azeotrope Destillation, Thermogravimetrie, Refraktometrie oder Gas-Chromatographie (Park Lit 186). Im Vergleich mit anderen Methoden zur Feuchtebestimmung bietet das Trockenschrank-Verfahren eine ausreichende Genauigkeit: Gabriel-Jürgens (Lit 70) und Maier (Lit 159).

Gl. 17 Feuchte:

$$x = \frac{m_W}{m_W + m_{TS}} \quad [\%]$$

Gl. 18 Feuchte:

$$x = \frac{X}{1 + X} \quad [\%]$$

Ermittelte Partikelfeuchten verschiedener Autoren sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 aufgeführt.

### 3.4.2 Dichte

Die Dichte ist eine wichtige Einflussgröße bei der Fluidisierung von Partikeln in einer Wirbelschicht. Für eine Berechnung ist somit die Kenntnis der Dichte von Interesse. Während des Röstprozesses unterliegt die Dichte von Kaffeebohnen einer Veränderung, sie nimmt um ca. die Hälfte von rund  $1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  auf rund  $600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ab.

Untersuchungen wurden bspw. von Eggers und Mitarbeiter (Lit 64) und Schenker (Lit 215) durchgeführt. Abhängigkeiten der Partikel-Dichte von der Partikel-Feuchte haben Geiger und Mitarbeiter (Lit 72) sowie Singh und Mitarbeiter (Lit 232) gezeigt. Ermittelte Dichten einiger Autoren sind in Tabelle 21 aufgeführt.

### 3.4.3 Partikelgröße, Partikelgrößenverteilung bzw. Volumen

Wie die Dichte und die Feuchte von Kaffeebohnen unterliegen auch der Partikeldurchmesser und damit das Partikelvolumen einer Veränderung beim Röstprozess. Das Volumen der Kaffeebohnen verdoppelt sich dabei. In der Literatur finden sich auch hier einige Autoren, welche sich mit diesem Problem auseinandergesetzt haben, z. B. Eggers und Pietsch (Lit 63), Eggers und Mitarbeiter (Lit 64), Fischer und Cammenga (Lit 68), Geiger und Mitarbeiter (Lit 72), Schenker und Mitarbeiter (Lit 214; Lit 215; Lit 216) und Small und Horrell (Lit 237). Die Triebkraft für das Volumenwachstum ist der Druck im Inneren der Kaffeebohnen, welcher sich durch die verdampfende Feuchte in den Zellen der Kaffeebohnen aufbaut. Das entstehende  $\text{CO}_2$  hat erst zum Ende des Röstprozesses einen Einfluss. Das Volumenwachstum ist zu Beginn der Röstung aber deutlich größer (Geiger Lit 73). Ermittelte Partikeldurchmesser einiger Autoren sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 aufgeführt.

### 3.4.4 Masseverlust beim Rösten

Durch die unterschiedlichen Vorgänge beim Rösten kommt es zu einem Masseverlust (Röstverlust, RV) der Kaffeebohnen. In erster Linie ist dies auf den beim Rösten ablaufenden Trocknungsvorgang zurückzuführen. Es gibt aber weitere Einflüsse: die Silberhaut löst sich ab, Kohlendioxid wird durch Röstprozesse freigesetzt, gebundenes Zellwasser wird durch Röstprozesse freigesetzt, gasförmige Kohlenwasserstoffe bilden sich durch die Röstvorgänge und gehen zu einem Teil ins Röstgas über (Gl. 19). Der Masseverlust ohne Wasserverlust, also der Verlust an Trockensubstanz, wird als Einbrand oder organischer Röstverlust (ORV) bezeichnet (Gl. 20).



Gl. 19 Röstverlust:

$$RV = \frac{m_{\text{Wasser}} + m_{\text{Silberhaut}} + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CO}} + m_{\text{chem. geb. Wasser}}}{m_{\text{ein}}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Gl. 20 Verlust an Trockensubstanz (organischer Röstverlust, ORV):

$$ORV = \frac{m_{\text{Silberhaut}} + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CO}} + m_{\text{chem. geb. Wasser}}}{m_{\text{ein}}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Jansen und Lange haben für die Silberhaut einen Masseanteil von 0,9 % bis 1,8 % vom Rohkaffee für ungewaschene Kaffees und für den Masseanteil von Kohlendioxid einen Anteil von 1 % vom Rohkaffee ermittelt (Jansen und Lange Lit 111).

Geiger findet als Zusammensetzung des Röstverlustes CO<sub>2</sub>, Wasser und Silberhäutchen, wobei 2 % der Masse ein „nicht beschreibbarer RV“, 4 % durch chemische Reaktionen frei gewordenes Wasser, 1 % Silberhäutchen und 1,5 % CO<sub>2</sub> sind (Lit 73). Röstverluste einiger Autoren sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 aufgeführt.

### 3.4.5 Geruchs- und Aroma-Emissions-Messverfahren

Geruch und Aroma von Röstkaffee sind untrennbar miteinander verbunden. Sie werden beide beim Rösten aus den im Rohkaffee enthaltenen Verbindungen durch Maillard-Reaktionen gebildet. Die Bestimmung der Vielzahl dieser Verbindungen ist sehr aufwändig. Aus der Anzahl der Veröffentlichungen sollen die Folgenden nur beispielhaft genannt werden: Baltés (Lit 13, Lit 15), Barnett (Lit 18), Breeger (Lit 32), Clarke (Lit 50), Eitner (Lit 61), Graus und Mitarbeiter (Lit 81), Gretsche und Mitarbeiter (Lit 82), Holley (Lit 106), Maier (Lit 158), Noordally, Richmond und Drumm (Lit 183), Perego und Mitarbeiter (Lit 189, Lit 190, Lit 191), Sakano und Mitarbeiter (Lit 212), Schenker und Mitarbeiter (Lit 217), Schumacher (Lit 223), Schön und Hübner (Lit 221), Silwar und Lüllman (Lit 231), Vitzthum (Lit 266) und Yerezian und Mitarbeiter (Lit 289).

Röstkaffee enthält mehr als 850 verschiedene identifizierte Aromaverbindungen (Bonnländer und Mitarbeiter Lit 28). Aromaverbindungen aus dem Röstprozess von Kaffeebohnen mit Einfluss auf das Kaffeearoma im Röstkaffee sind 2-Furfurylthiol, 4-Vinylguaiacol, Alkylpyrazine, Furanone, Acetaldehyde, Propanal, Steckeraldehyde (Czerny und Mitarbeiter Lit 51). Charakteristische Aroma-Stoffe im Kaffee, das Kaffeearoma, kann so imitiert werden, sind 2-Furfurylthiol, 4-Vinylguaiacol, Alkylpyrazine, Furanone, Acetaldehyde, Propanal, Stecker Aldehyde und 3-Isobutyl-2-Methoxypyrazine (Grosch und Mitarbeiter Lit 83 und Lit 85). Mayer und Mitarbeiter bieten eine Übersicht zu ermittelten Aromakomponenten (Lit 161). Yerezian und Mitarbeiter haben einzelne Komponenten der Röstaromen röstzeitabhängig im Röstgas bestimmt: Methanol, Acetaldehyd, Essigsäure, Furan, Butanal, Isobutanal, Pentan, Butanon, Pyrazin, Furfurylalkohol, Methyl-Furan, Methyl-Acetat, Pyridin (Lit 288). Lukin und Khramov haben Kohlenmonoxid im Röstabgas gemessen (Lit 153).

Der Flammen-Ionisations-Detektor (FID) ist der am weitesten verbreitete Detektor. Er arbeitet kontinuierlich mit einer registrierenden Datenerfassung organisch gebundenen Kohlenstoffs aus einem Probeluftstrom (Kapitel 4.5). Nachteilig ist die Erfassung geruchsintensiver und geruchsarmer Verbindungen gleichermaßen in einem Messsignal. Stickstoffverbindungen, welche ebenfalls geruchsintensiv sein

können, werden überhaupt nicht ermittelt (Eitner Lit 61). Der Umgang mit einem FID ist in DIN EN 12619 (Lit 293) geregelt. Einzelne Messungen von Kohlenwasserstoff-Konzentrationen mit einem FID im Abgas von Kaffeeröstereien wurden bereits von Bohrer (Lit 27), Eitner (Lit 61), Schenker und Mitarbeiter (Lit 217) und Staudinger (Lit 249) durchgeführt.

Eine patentierte Anwendung ist eine Methode in einem Heißluft-Wirbelschichttröster, über die Gasmessung von "Pyrolyse-Peaks" und damit gesteuertem Röstabbruch nach dem Überschreiten eines Grenzwertes von Friedrich und Lemaire (Lit 308).

### 3.4.6 Poren und Porenmessung

Das beim Rösten von Kaffee unter hohen Temperaturen und mit hohem Druck entweichende Wasser zerstört die innere Struktur der Kaffeebohnen und verändert somit die Poren der Kaffeebohnen. Diese haben einen großen Einfluss auf das Trocknungsverhalten von Kaffeebohnen. Untersuchungen zur Porenstruktur von Kaffeebohnen wurden z. B. von Bürgin (Lit 35), Massini und Mitarbeiter (Lit 164), Puhmann und Mitarbeiter (Lit 198), Radtke (Lit 199) und Schenker und Mitarbeiter (Lit 214; Lit 216) durchgeführt.

### 3.4.7 Farbe

Die Farbe von Röstkaffee ist ein wichtiges Merkmal zur Bestimmung der Qualität des Kaffees. Sie wird zur Qualitätssicherung beim Kaffeerösten eingesetzt. Hier existieren verschiedenen Möglichkeiten der Farbmessung bzw. -bestimmung: Standardverfahren ( $a \cdot b \cdot c \cdot L$ ), Reflektionsmessverfahren nach Dr. Lange oder eine Farbauswertung mit einem Grafikprogramm am PC. Diese unterschiedlichen Messverfahren sind nicht direkt miteinander zu vergleichen. Eine Einschätzung der Farbänderung in Abhängigkeit vom Verlust an Trockensubstanz gibt Clarke (Lit 47, Tabelle 2). Die Farbe der Kaffeebohnen beim Rösten ist dabei direkt abhängig vom Masseverlust oder Trockenmasseverlust der Kaffeebohnen (Lit 202, Lit 254, Abbildung 5.34). Da Porto und Mitarbeiter haben bis zu einem Röstverlust von 23 % die Helligkeit der Kaffeebohnen über dem Röstverlust dargestellt (Lit 196).

Röstgrad (Farbe oder Helligkeit)	ORV [%]
hell	1-5
medium	5-8
dunkel	8-12
sehr dunkel	mehr als 12

Tabelle 2 Röstgrade nach Clarke (Lit 47)

Untersuchungen zur Farbveränderung von Kaffeebohnen beim Rösten finden sich bei Baltas (Lit 13), Eggers und Mitarbeiter (Lit 64), Cammenga (Lit 68), Mohr (Lit 168), Paardekooper und Mitarbeiter (Lit 185), Puhmann und Mitarbeiter (Lit 197), Rothfos und Mitarbeiter (Lit 210), Schenker und Mitarbeiter (Lit 217), Sivetz (Lit 236) und Smith und Mitarbeiter (Lit 239).

Die Änderung der Farbe wird in der industriellen Anwendung als Abbruchkriterium für den Röstprozess genutzt. Unter gleichen Bedingungen gerösteter Kaffee hat bei

Erreichen einer bestimmten Qualität immer die gleiche Farbe. Patentierte Anwendungen hierbei sind z. B. ein Verfahren zum Beenden des Röstvorgangs aufgrund der objektiv bestimmten Farbe des Materials: der Lichtstrahl wird auf zu untersuchendes Material gerichtet, dabei reflektiertes Licht wird charakterisiert und dadurch der Röstzustand des Materials festgestellt von Allington und Mitarbeiter (Lit 296 und Lit 297). Ein Reflektionsmesser für ein Röstsystem von Granger und Torbet (Lit 313), wobei das Messgerät Licht aussendet und empfängt, welches vom Material reflektiert wird und der Röstzustand des Materials festgestellt werden kann.

### **3.4.8 Endo- und exotherme Wärmen beim Rösten von Kaffeebohnen**

Der Kaffee durchläuft beim Rösten verschiedene Stufen; bei der zunächst stattfindenden Trocknung entzieht der Kaffee seiner Umgebung Wärme, bei der bei höheren Temperaturen ablaufenden Pyrolyse gibt er Wärme an seine Umgebung ab. Einige Autoren haben bereits versucht, diese Wärmeströme zu untersuchen und zu bestimmen.

Beschreibungen zu Vorgängen der Pyrolyse beim Rösten von Kaffeebohnen liefern z. B. Eggers, Cammenga und Mitarbeiter (Lit 64; Lit 65; Lit 105), Pittia und Mitarbeiter (Lit 195), Tscheuschner (Lit 259) und Yeretziyan und Mitarbeiter (Lit 288).

Grundsätzlich bieten sich 2 Möglichkeiten an, um aufgenommene und abgegebene Wärmen zu ermitteln: die Kalorimetrie und die Thermoanalyse. Untersuchungen von Kaffee mit der Thermoanalyse haben z. B. Eggers (Lit 62), Raemy (Lit 200), Singh und Mitarbeiter (Lit 232), Small und Mitarbeiter (Lit 237) und Streuli (Lit 253) durchgeführt. Kaffeebohnen mit kalorimetrischen Messverfahren haben z. B. Raemy und Mitarbeiter (Lit 201) untersucht.

Eine Übersicht zu ermittelten Werten dieser Autoren ist in Tabelle 20 aufgeführt.

Baltes untersuchte endo- und exotherme Wärmen beim Rösten von Kaffeebohnen mittels Differentialthermoanalyse. Im Vergleich der Thermoanalyse von Kaffee mit der von Amylopektin (ein Polysaccharid) ergibt sich ein sehr ähnlicher Verlauf, d. h. der Anteil der Pyrolyse von Zuckern beim Rösten von Kaffeebohnen ist sehr hoch. Die im Rohkaffee enthaltenen Aminosäuren sind Aromavorstufen; sie verändern sich beim Rösten durch Pyrolyse (Steckerabbau zu Aldehyden und Pyrazinen) und sind an der Aromabildung beteiligt. Das Kaffeearoma ist bei einem RV = 16 % gut ausgeprägt (Lit 14).

## **3.5 Aromabildung und Maillard-Reaktionen**

Kaffeearomen sind Röstaromen. Diese werden durch Maillard-Reaktionen gebildet. Ausgangsstoffe hierfür sind unterschiedliche Zuckerverbindungen, Fette, Fettsäuren, Eiweiße und als Produkt stehen aromatische Verbindungen wie Pyrazine, Furane, Furanole (Tressl Lit 257). Bekannt sind mehr als 850 Verbindungen, die im Röstkaffee als Aroma vorkommen (Holscher und Steinhart Lit 107; Kawakami und Mitarbeiter Lit 115).

Die Aromabildung setzt bei 170 °C ein. Zunächst bildet sich ein erdnussartiges Aroma aus. Bei 180 °C bis 190 °C beginnt sich das typische Kaffee-Aroma zu entwickeln. Das „richtige“ Kaffee-Aroma bildet sich ab 220 °C Rösttemperatur aus.

Darüber hinaus kann sich das Aroma weiterentwickeln, bis hin zu überbröstet und verbrannt. Hier zeigte sich ein Maximum an Aromastoffen bei einer Rösttemperatur von 250 °C. Furane und Karamellkomponenten entwickeln sich ab 170 °C Rösttemperatur und sind bei 230 °C bis 240 °C voll ausgebildet (Silwar und Lüllmann Lit 231).

Einige Autoren haben bestimmte Aroma-Schlüssel-Komponenten oder Aromaleitstoffe gefunden, welche ein Maß für die Qualität des Kaffeearomas darstellen sollen. Lindner-Steinert und Zou (Lit 148) beschreiben 2-Methylpropanal, 2-Methylfuran, 3-Methylbutanal und Diacetyl, Grosch (Lit 84) findet 2-Furfurylthiol als Haupt-Schlüsselkomponente für Röstkaffee.

Mit der Bildung von Aromastoffen durch Maillard-Reaktionen beschäftigt sich eine Vielzahl von Autoren, z. B. Baltes (Lit 13; Lit 15; Lit 16), Buttle (Lit 34), Viani (Lit 262), Egli (Lit 57), Vitzthum (Lit 266), Grosch (Lit 86), Herrmann und Baltes (Lit 100), Ho und Mitarbeiter (Lit 104), Homma (Lit 108), Labuza (Lit 141), Parliment und Stahl (Lit 187; Lit 188), Reineccius (Lit 204), Shibamoto (Lit 228), Silwar und Mitarbeiter (Lit 229; Lit 230; Lit 231), Tressl (Lit 257; Lit 258), Winter und Mitarbeiter (Lit 277) und Wurziger (Lit 284). Ein Schema der Maillard-Reaktionen liefert Nagodawithana (Lit 179) und eine kurze Übersicht bietet Rizzi (Lit 205).

### **3.6 Mathematische Beschreibung**

Um verfahrenstechnische Prozesse mathematisch und physikalisch beschreiben zu können, sind experimentelle Untersuchungen dieser Prozesse notwendig. Am Lehrstuhl für Chemischen Apparatebau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurden bereits einige Arbeiten zur Untersuchung des Röstprozesses von Kaffeebohnen durchgeführt. Hierzu zählen Arbeiten zur Untersuchung der Röstvorgänge beispielsweise von Krüger, Mörl, Heinrich, Roebert und Rösler (Lit 130).

Modellierungen und Berechnungen zur Trocknung und zum Rösten körniger Güter, insbesondere Kaffeebohnen, liefern Heinrich, Krüger und Mörl (Lit 98), Kliefoth (Lit 120), Machnow (Lit 155), Mörl, Kliefoth und Michel (Lit 170), Mörl, Künne, Backhaus, Krüger und Sonntag (Lit 172) und Mörl (Lit 173).

Berechnungen zur Röstung von Kaffeebohnen stellte Kliefoth (Lit 120) bereits 1983 für die Röstfein Kaffee GmbH an.

Speziell für die Modellierung bieten Eggers und Cammenga (Lit 64) einen guten Überblick zu bekannten Stoffwerten vor, während und nach dem Röstprozess von Kaffeebohnen. Die Autoren führten weiterhin eigene Untersuchungen mit dem Ziel der Bestimmung des Temperaturfeldes und des Wärmetransports in der Kaffeebohne durch. Hierzu werden experimentelle Untersuchungen beschrieben, um Stoffdaten wie Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Emissionsvermögen unter dem Einfluss verschiedener Röstparameter zu ermitteln.

Modellvorstellungen zur Trocknung haben z. B. Glück (Lit 78), Goff (Lit 79), Krischer und Kast (Lit 126), Kröll (Lit 127), Kröll und Kast (Lit 129), Luyben und Mitarbeiter (Lit 154), Machnow (Lit 155), Ortola (Lit 184), Sturm (Lit 253) und van Meel (Lit 165) und

zum Wärmetransport beispielsweise Martin (Lit 162) und Yoshida und Mitarbeiter (Lit 290) entwickelt.

### 3.6.1 Wirbelschicht

Zur mathematischen Beschreibung von Wirbelschichten existiert eine Reihe von Modellen: Burgschweiger (Lit 33), Geldart (Lit 74; Lit 75), Heinrich, Krüger und Mörl (Lit 98), Kliefoth (Lit 120), Kunii und Levenspiel (Lit 132; Lit 135; Lit 136), Kwauk (Lit 140), Machnow (Lit 155), Menchú und Ortega (Lit 274), Michel, Mörl und Kliefoth (Lit 170), Mörl, Künne, Backhaus, Krüger und Sontag (Lit 172), Uhlemann und Mörl (Lit 260) und Werther (Lit 272; Lit 273; Lit 274).

### 3.6.2 Blasenbildende Wirbelschicht

Zur Berücksichtigung von Wirbelschicht-Inhomogenitäten wurden Blasenmodelle erstellt, z. B. von Hillgardt und Werther (Lit 102; Lit 103), Kunii, D.; Levenspiel (Lit 131; Lit 133; Lit 134; Lit 135), Kwauk (Lit 140), Levenspiel, Kunii und Fitzgerald (Lit 145), Manno und Ruocco (Lit 160), Martin-Gautier (Lit 163), Molerus und Werther (Lit 169; Lit 270) und Werther (Lit 271; Lit 273). Kaffeebohnen mit einem Partikeldurchmesser von 6 mm bis 8 mm und einer Feststoffdichte von  $1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  (roh) bis  $600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  (geröstet) entsprechen der Geldart-Klasse D (Geldart Lit 74 und Lit 75). In einer Wirbelschicht mit derartigen Feststoffteilchen bilden sich große, langsame und vom Fluid durchströmte Blasen. Die Durchmischung ist in der Geldart-Klasse D nicht so gut (Geldart Lit 75; Kunii und Levenspiel Lit 132, Lit 135 und Lit 136; Stieß Lit 251; Uhlemann und Mörl Lit 260). Der Einfluss solcher langsamen Blasen in grobkörnigen Wirbelschichten auf eine Modellierung ist jedoch gering (Werther Lit 274).

### 3.6.3 Modellansatz für die Trocknung in Dampf und Luft in einer Wirbelschicht

Die Modellierung nach dem Modell von Machnow basiert auf Wärme- und Stoffbilanzen in einem differentiellen Volumenelement. Daraus wird ein gekoppeltes partielles Differentialgleichungssystem mit 5 Gleichungen gebildet.

Einige Ergebnisse der Bilanzierung werden im Folgenden kurz aufgelistet. Dabei unterscheiden sich die Gleichungen in den unterschiedlichen Trocknungsintervallen. Das erste Modellintervall wird durch eine Kondensation von Dampf auf den noch kalten Partikeln bzw. der Erwärmung in Heißluft bestimmt, das zweite Modellintervall beschreibt den ersten Trocknungsabschnitt, welcher durch eine konstante Trocknungsgeschwindigkeit durch die abtrocknende freie Oberflächenfeuchte gekennzeichnet ist und das dritte Modellintervall beschreibt den zweiten Trocknungsabschnitt mit abnehmender Trocknungsgeschwindigkeit bei der Trocknung der Feuchte aus dem Inneren der Partikel. Weiterhin unterscheidet sich die Modellierung in der Verwendung der Fluidisationsgase Röstgas-Luft-Gemisch oder Wasserdampf. Diese verschiedenen Fälle werden hier gegenübergestellt. In den Gleichungen unterscheiden sich bei Luft und Wasserdampf jeweils die NTU-Zahlen und die dimensionslosen Temperaturen durch eine unterschiedliche Definition.

Geltungsbereich	Beschreibung	Dampf	Luft
Modellintervall 1 (Erwärmung)	Kondensationsphase (Dampf) oder Erwärmung (Luft)	$\vartheta_{\text{Part ein}} \leq \vartheta_{\text{Part}} \leq \vartheta_{\text{Satt}}$	$\vartheta_{\text{Part ein}} \leq \vartheta_{\text{Part}} \leq \vartheta_{\text{KG}}$
Modellintervall 2 (I. Trocknungs- abschnitt)	Trocknung einer freien Flüssigkeitsoberfläche	$\vartheta_{\text{Part}} = \vartheta_{\text{Satt}}$ $X_{\text{Part}} \geq X_{\text{kr}}$	$\vartheta_{\text{Part}} = \vartheta_{\text{KG}}$ $X_{\text{Part}} \geq X_{\text{kr}}$
Modellintervall 3 (II. Trocknungs- abschnitt)	Trocknung im Inneren der Partikel	$\vartheta_{\text{Satt}} < \vartheta_{\text{Part}} \leq \vartheta_{\text{Dein}}$ $X_{\text{kr}} > X_{\text{Part}} \geq X_{\text{hyg}}$	$\vartheta_{\text{KG}} < \vartheta_{\text{Part}} \leq \vartheta_{\text{Lein}}$ $X_{\text{kr}} > X_{\text{Part}} \geq X_{\text{hyg}}$

Tabelle 3 Start- und Randbedingungen

Gl. 21 mittlere Gastemperatur für alle Modellintervalle:

$$\bar{\Theta}_{\text{Gas}} = \frac{NTU_{\text{GasPart}} \cdot \Theta_{\text{Part}} + NTU_{\text{GasWand}} \cdot \Theta_{\text{Wand}}}{NTU_{\text{GasPart}} + NTU_{\text{GasWand}}} + \left( \Theta_{\text{Gasein}} - \frac{NTU_{\text{GasPart}} \cdot \Theta_{\text{Part}} + NTU_{\text{GasWand}} \cdot \Theta_{\text{Wand}}}{NTU_{\text{GasPart}} + NTU_{\text{GasWand}}} \right) \cdot \frac{e^{-(NTU_{\text{GasPart}} + NTU_{\text{GasWand}})} - 1}{-(NTU_{\text{GasPart}} + NTU_{\text{GasWand}})} \quad [-]$$

Gl. 22 Partikeltemperatur für Trocknung mit Dampf in MI 1 (Kondensation):

$$\frac{d\Theta_{\text{Part}}}{d\tau}_{\text{Kondensation}} = \frac{1}{NTU_{\text{GasPart}}} \cdot \left( NTU_{\text{GasPart}} \cdot (\bar{\Theta}_{\text{D}} - \Theta_{\text{Part}}) - NTU_{\text{PartWandges}} \cdot (\Theta_{\text{Part}} - \Theta_{\text{Wand}}) + \bar{\Theta}_{\text{D}} + \frac{\vartheta_{\text{Satt}}}{\vartheta_{\text{Dein}} - \vartheta_{\text{Satt}}} + \frac{\Delta h_{\text{V0}}}{c_{\text{pPart}} \cdot (\vartheta_{\text{Dein}} - \vartheta_{\text{Satt}})} \right) \quad [-]$$

Gl. 23 Partikeltemperatur für Trocknung mit Dampf in MI 2 (1. TA):

$$\frac{d\Theta_{\text{Part}}}{d\tau}_{\text{TA1}} = 0; \quad \Theta_{\text{PartTA1}} = \Theta_{\text{Satt}} = 0$$

Gl. 24 Partikeltemperatur für Trocknung mit Dampf in MI 3 (2. TA):

$$\frac{d\Theta_{\text{Part}}}{d\tau}_{\text{TA2}} = \frac{1}{NTU_{\text{GasPart}}} \cdot \left( NTU_{\text{GasPart}} \cdot (\bar{\Theta}_{\text{D}} - \Theta_{\text{Part}}) - NTU_{\text{PartWandges}} \cdot (\Theta_{\text{Part}} - \Theta_{\text{Wand}}) \right) \cdot (1 - \Theta) \quad [-]$$

Gl. 25 Partikeltemperatur für Trocknung mit Luft in MI 1 (Erwärmung):

$$\frac{d\Theta_{\text{Part}}}{d\tau}_{\text{Erwärmung}} = \frac{1}{NTU_{\text{GasPart}}} \cdot \left( NTU_{\text{GasPart}} \cdot (\bar{\Theta}_{\text{L}} - \Theta_{\text{Part}}) - NTU_{\text{PartWandges}} \cdot (\Theta_{\text{Part}} - \Theta_{\text{Wand}}) \right) \quad [-]$$

Gl. 26 Partikeltemperatur für Trocknung mit Luft in MI 2 (1. TA):

$$\frac{d\Theta_{\text{Part}}}{d\tau_{\text{TA1}}} = 0; \quad \Theta_{\text{Part TA1}} = \Theta_{\text{KG}} = 0$$

Gl. 27 Partikeltemperatur für Trocknung mit Luft in MI 3 (2. TA):

$$\frac{d\Theta_{\text{Part}}}{d\tau_{\text{Erwärmung}}} = \frac{1}{NTU_{\text{GasPart}}} \cdot \left( NTU_{\text{GasPart}} \cdot (\bar{\Theta}_L - \Theta_{\text{Part}}) - NTU_{\text{Part Wandges}} \cdot (\Theta_{\text{Part}} - \Theta_{\text{Wand}}) \right) \cdot (1 - \Phi) \quad [-]$$

Gl. 28 Trocknungsgeschwindigkeit für Trocknung mit Dampf in MI 1 (Kondensation):

$$\frac{d\xi}{d\tau_{\text{Kondensation}}} = \frac{m_{\text{Part}}}{NTU_{\text{GasPart}} \cdot m_{\text{TS}} \cdot (X_{\text{kr}} - X_{\text{hyg}})}$$

Gl. 29 Trocknungsgeschwindigkeit für Trocknung mit Dampf in MI 2 (1. TA):

$$\frac{d\xi}{d\tau_{\text{TA1}}} = \frac{m_{\text{Part}} \cdot c_{p\text{Part}} \cdot \left( -NTU_{\text{GasPart}} \cdot (\bar{\Theta}_D - \Theta_{\text{Part}}) + NTU_{\text{Part Wandges}} \cdot (\Theta_{\text{Part}} - \Theta_{\text{Wand}}) \right)}{m_{\text{TS}} \cdot c_{pD} \cdot NTU_{\text{GasPart}} \cdot (X_{\text{kr}} - X_{\text{hyg}}) \cdot \left( \bar{\Theta}_D + \frac{\vartheta_{\text{Satt}}}{\vartheta_{\text{Dein}} - \vartheta_{\text{Satt}}} + \frac{\Delta h_{V0}}{c_{pD} \cdot (\vartheta_{\text{Dein}} - \vartheta_{\text{Satt}})} \right)} \quad [-]$$

Gl. 30 Trocknungsgeschwindigkeit für Trocknung mit Dampf in MI 3 (2. TA):

$$\frac{d\xi}{d\tau_{\text{TA1}}} = \frac{m_{\text{Part}} \cdot c_{p\text{Part}} \cdot \left( -NTU_{\text{GasPart}} \cdot (\bar{\Theta}_D - \Theta_{\text{Part}}) + NTU_{\text{Part Wandges}} \cdot (\Theta_{\text{Part}} - \Theta_{\text{Wand}}) \right)}{m_{\text{TS}} \cdot c_{pD} \cdot NTU_{\text{GasPart}} \cdot (X_{\text{kr}} - X_{\text{hyg}}) \cdot \left( \bar{\Theta}_D + \frac{\vartheta_{\text{Satt}}}{\vartheta_{\text{Dein}} - \vartheta_{\text{Satt}}} + \frac{\Delta h_{V0}}{c_{pD} \cdot (\vartheta_{\text{Dein}} - \vartheta_{\text{Satt}})} \right)} \cdot \Phi$$

Gl. 31 Trocknungsgeschwindigkeit für Trocknung mit Luft in MI 1 (Erwärmung):

$$\frac{d\xi}{d\tau_{\text{Erwärmung}}} = 0$$

Gl. 32 Trocknungsgeschwindigkeit für Trocknung mit Luft in MI 2 (1. TA):

$$\frac{d\xi}{d\tau_{\text{TA1}}} = \frac{m_{\text{Part}} \cdot c_{p\text{Part}} \cdot \left( -NTU_{\text{GasPart}} \cdot (\bar{\Theta}_L - \Theta_{\text{Part}}) + NTU_{\text{Part Wandges}} \cdot (\Theta_{\text{Part}} - \Theta_{\text{Wand}}) \right)}{m_{\text{TS}} \cdot c_{pD} \cdot NTU_{\text{GasPart}} \cdot (X_{\text{kr}} - X_{\text{hyg}}) \cdot \left( \bar{\Theta}_L + \frac{\vartheta_{\text{KG}}}{\vartheta_{\text{Lein}} - \vartheta_{\text{KG}}} + \frac{\Delta h_{V0}}{c_{pD} \cdot (\vartheta_{\text{Lein}} - \vartheta_{\text{KG}})} \right)} \quad [-]$$

Gl. 33 Trocknungsgeschwindigkeit für Trocknung mit Luft in MI 3 (2. TA):

$$\frac{d\xi}{d\tau_{\text{TA2}}} = \frac{m_{\text{Part}} \cdot c_{p\text{Part}} \cdot \left( -NTU_{\text{GasPart}} \cdot (\bar{\Theta}_L - \Theta_{\text{Part}}) + NTU_{\text{Part Wandges}} \cdot (\Theta_{\text{Part}} - \Theta_{\text{Wand}}) \right)}{m_{\text{TS}} \cdot c_{pD} \cdot NTU_{\text{GasPart}} \cdot (X_{\text{kr}} - X_{\text{hyg}}) \cdot \left( \bar{\Theta}_L + \frac{\vartheta_{\text{KG}}}{\vartheta_{\text{Lein}} - \vartheta_{\text{KG}}} + \frac{\Delta h_{V0}}{c_{pD} \cdot (\vartheta_{\text{Lein}} - \vartheta_{\text{KG}})} \right)} \cdot \Phi \quad [-]$$

Die in den Bilanzgleichungen verwendeten dimensionslosen Größen lassen sich mit den folgenden Beziehungen bestimmen (Lit 155).

Gl. 34 dimensionslose Beladung:

$$\xi = \frac{X - X_{\text{hyg}}}{X_{\text{kr}} - X_{\text{hyg}}} \quad [-]$$

Gl. 35 NTU-Zahl Gas-Partikel:

$$\text{NTU}_{\text{GasPart}} = \frac{\alpha_{\text{GasPart}} \cdot A_{\text{OPartges}}}{\dot{m}_{\text{Gas0}} \cdot c_{p\text{Gas}}} \quad [-]$$

Gl. 36 NTU-Zahl Gas-Wand:

$$\text{NTU}_{\text{GasWand}} = \frac{\alpha_{\text{GasWand}} \cdot A_{\text{Wand}}}{\dot{m}_{\text{Gas0}} \cdot c_{p\text{Gas}}} \quad [-]$$

Gl. 37 NTU-Zahl Partikel-Wand:

$$\text{NTU}_{\text{PartWand}} = \frac{\alpha_{\text{Wand}} \cdot (A_{\text{Wand}} + A_{\text{OPartges}})}{\dot{m}_{\text{Gas0}} \cdot c_{p\text{Gas}}} \quad [-]$$

Gl. 38 dimensionslose Umgebungstemperatur:

$$\Theta_U = \frac{\vartheta_U - \vartheta_{\text{Satt}}}{\vartheta_{\text{Gas ein}} - \vartheta_{\text{Satt}}} \quad [-]$$

Gl. 39 dimensionslose Partikeltemperatur:

$$\Theta_{\text{Part}} = \frac{\vartheta_{\text{Part}} - \vartheta_{\text{Satt}}}{\vartheta_{\text{Gas ein}} - \vartheta_{\text{Satt}}} \quad [-]$$

Gl. 40 dimensionslose Wandtemperatur:

$$\Theta_{\text{Wand}} = \frac{\vartheta_{\text{Wand}} - \vartheta_{\text{Satt}}}{\vartheta_{\text{Gas ein}} - \vartheta_{\text{Satt}}} \quad [-]$$

Gl. 41 Partikeltemperaturänderung für 1. MI (Kondensation)  $\vartheta_{\text{Part}} < \vartheta_{\text{Satt}}$  folgt aus Gl. 22 bzw. Gl. 25 für  $\vartheta_{\text{Part ein}} \leq \vartheta_{\text{Part}} \leq \vartheta_{\text{Satt}}$ :

$$\frac{d\vartheta_{\text{Part}}}{dt} = \frac{(\alpha_{\text{Part Gas}} \cdot A_{\text{OPartges}} \cdot (\bar{\vartheta}_D - \vartheta_{\text{Part}}) - (\alpha_{\text{Part}} + \alpha_{\text{Strahl}}) \cdot A_{\text{Wand}} \cdot (\vartheta_{\text{Part}} - \vartheta_{\text{Wand}}) + \dot{m}_D) \cdot (c_{pD} \cdot \bar{\vartheta}_D + h_{v0})}{m_{\text{Part}} \cdot c_{p\text{Part}}}$$

Gl. 42 Partikeltemperaturänderung im 2. MI für 1. TA für  $X \geq X_{\text{kr}}$  aus

Gl. 23 bzw. Gl. 26:

$$\frac{d\vartheta_{\text{Part}}}{dt} = 0$$

Gl. 43 Partikeltemperaturänderung im 3. MI für 2. TA aus Gl. 24 bzw. Gl. 27 für  $X < X_{\text{kr}}$  für 3. MI (2. TA):

$$\frac{d\vartheta_{\text{Part}}}{dt} = \frac{\alpha_{\text{Part Gas}} \cdot A_{\text{OPartges}} \cdot (\bar{\vartheta}_D - \vartheta_{\text{Part}}) - (\alpha_{\text{Part}} + \alpha_{\text{Strahl}}) \cdot A_{\text{Wand}} \cdot (\vartheta_{\text{Part}} - T_{\text{Wand}})}{m_{\text{Part}} \cdot c_{p\text{Part}}} \cdot (1 - \Phi_{\text{Approx}})$$



Gl. 44 Trocknungsgeschwindigkeit im 1. MI (Kondensation):

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\dot{m}_D}{m_{TS}}$$

Gl. 45 Trocknungsgeschwindigkeit im 2. MI für 1. TA für  $X \geq X_{kr}$  :

$$\frac{dX}{dt} = \frac{-\alpha_{Part\ Gas} \cdot A_{OPart\ ges} \cdot (\bar{g}_D - g_{Part}) + (\alpha_{Part} + \alpha_{Strahl}) \cdot A_{Wand} \cdot (g_{Part} - g_{Wand})}{m_{TS} \cdot (c_{pD} \cdot \bar{g}_D + \Delta h_{v0})}$$

Gl. 46 Trocknungsgeschwindigkeit im 3. MI für 2. TA  $X < X_{kr}$  :

$$\frac{dX}{dt} = \frac{-\alpha_{Part\ Gas} \cdot A_{OPart\ ges} \cdot (\bar{g}_D - g_{Part}) + (\alpha_{Part} + \alpha_{Strahl}) \cdot A_{Wand} \cdot (g_{Part} - g_{Wand})}{m_{TS} \cdot (c_{pD} \cdot \bar{g}_D + \Delta h_{v0})} \cdot \Phi_{Approx}$$

Das Modell ist geeignet die Trocknung feuchter Güter in einer Dampf-Wirbelschicht zu berechnen. Der Nachweis wurde mit dem idealen Gut  $\gamma$ -Aluminiumoxid erbracht. Eine Anwendung auf die Trocknung und Röstung von Kaffeebohnen war nicht möglich, da keine Übereinstimmung der Ergebnisse erreicht werden konnte.

### 3.6.4 Stoffdaten

Beim Rösten von Kaffeebohnen ändert sich eine Reihe von Stoffdaten, wie Partikelgröße, Farbe, Feuchte, Dichte, Trockenmasse der Einzelpartikel, thermodynamische Stoffgrößen (Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, abgegebene und aufgenommene Wärmeströme). Um einen Röstprozess beschreiben zu können, ist die Kenntnis der Stoffdaten erforderlich. Einige Werte wurden im Rahmen der Arbeit ermittelt, jedoch ist das mit den thermodynamischen Werten nicht möglich gewesen. Diese können der Literatur entnommen werden.

Wichtige Beiträge hierzu lieferten

- zu Masseverlust, Dichte-, Partikeldurchmesser- oder -volumen, Feuchte- und Farbänderung beim Rösten: Da Porto und Mitarbeiter (Lit 196), Eggers und Mitarbeiter (Lit 63; Lit 64; Lit 65), Menchú und Ortega (Lit 166), Pittia und Mitarbeiter (auch nötige Bruchkräfte) (Lit 194), Schenker und Mitarbeiter (Lit 214; Lit 217), Schenker (Lit 215), Severini (Lit 226), Sivetz (Lit 236) und Small und Horrell (Lit 237)
- zu Röstverlusten: Maier (Lit 157; Lit 158), Jansen und Lange (Lit 111)
- zum Porenvolumen: Schenker und Mitarbeiter (Lit 214; Lit 216)
- zu thermodynamischen Eigenschaften: Eggers und Mitarbeiter (Lit 63; Lit 64; Lit 65), Pittia und Mitarbeiter (Lit 195) und Small und Horrell (Lit 237)
- zu Stoffdaten von Rohkaffee: Clarke (Lit 41) und Harms und Wurziger (Lit 92)
- zur Adsorption von Wasser: Cepeda und Mitarbeiter (Lit 37)
- zu Diffusionskoeffizienten: Luyben und Mitarbeiter (Lit 154)
- zu Luft- und Dampfstoffwerten: Glück (Lit 78), VDI-Wärmeatlas

mit ihren experimentellen Untersuchungen.

Eine Übersicht zu ermittelten Werten dieser Autoren ist in Tabelle 18, Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21 aufgeführt. Besonders interessante Ansätze zur Berechnung einiger Parameter sind in Tabelle 11 gezeigt.

### **3.7 *Standards und Normen***

Aufgrund der Bedeutung von Kaffee als Handels-, Industrie- und Konsumgut existieren eine große Anzahl an nationalen und internationalen Standards und Normen; Clarke beispielsweise nennt internationale Normen und Standards (Lit 49 und Lit 42), deutsche Normen erwähnt Kupfer (Lit 137).

## 4 Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Versuchsanlage DN 100

Zunächst soll eine kurze Beschreibung der Versuchsanlage erfolgen. Sie ist schematisch in Abbildung 4.1 dargestellt.

Zur Versuchsanlage gehört ein Elektrodampferzeuger CD 36 DUPLEX der Firma DINO, welcher über acht einzeln zuschaltbare Heizstufen mit je  $12 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  erzeugbarem Dampfstrom verfügt. Es sind bei einer maximalen elektrischen Leistungsaufnahme von 72 kW  $96 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  Dampf möglich. Der produzierte Dampfstrom wird an einem Drall-Durchflussaufnehmer mit Mikroprozessor-Messumformertechnik SWIRL-SM von ABB Automation überprüft und auf der Messwerterfassung mitgeschrieben. Um das Fluidisationsmedium, Sattdampf oder Luft, auf die gewünschte Prozesstemperatur erwärmen zu können, befindet sich ein elektrischer Heizer an der Versuchsanlage. Die maximal erreichbare Temperatur beträgt 350 °C.

Nach der Erwärmung auf die notwendige Versuchstemperatur wird das Fluid in die Wirbelkammer geleitet. Sie besteht aus einem Glasschuss mit 100 mm Innendurchmesser und wird von unten durch den Anströmboden begrenzt. Um das Versuchsgut nach dem Versuch aus dem Wirbelschichtapparat entfernen zu können, ist der Anströmboden als Klappe ausgelegt. Das Versuchsmaterial gelangt durch ihn in die unter dem Boden befindliche Austrittsschleuse, wo es mit warmer Luft gespült wird, um eine Kondensation von abkühlendem Wasserdampf zu verhindern. Um eine Kondensation in der Wirbelkammer zu verhindern, ist der Wirbelschichtbereich mit einer Isolation umgeben. Zur Abscheidung der vom Fluidisationsmedium mitgerissenen Spelzen und Silberhäutchen dient ein Zyklonabscheider. Anschließend wird der Dampf in einem Sprühkondensator kondensiert.

Um an der Versuchsanlage ein Auskondensieren des Dampfes zu verhindern, ist sie komplett mit Isoliermaterial umhüllt und hinter dem Wirbelschichtbereich sind an der Anlage Heizbänder eingebaut.

Zum Abbrechen des Röstprozesses nach Entfernung des Versuchsgutes kann eine externe Kühlung verwendet werden.

Abbildung 4.1 zeigt ein Fließschema, in dem auch die Messstellen eingetragen sind. Das Kernstück der Messtechnik ist der Messwert-PC, der alle Temperatur- und Druckmessstellen aufzeichnet sowie den Dampfmassestrom darstellt und speichert. Dazu sind an allen interessanten Stellen der Versuchsanlage Temperatur- und Druckfühler eingebaut. Zur Temperaturmessung dienen NiCr-Ni-Thermoelemente der Firma ALMEMO<sup>®</sup> mit einer Einstellzeit von  $t_{90}=3\text{s}$  und einer Abtastrate von 1,5 s. Die Messwerte werden in einem Datenwandler und unter Windows<sup>®</sup> mit AMR-Control<sup>®</sup> dargestellt und verarbeitet.

Die Druckmessstellen sind piezoresistive Druckaufnehmer, ebenfalls von der Firma ALMEMO<sup>®</sup>. Sie werden zusammen mit den Temperaturmesswerten im AMR-Control<sup>®</sup> dargestellt und verarbeitet.

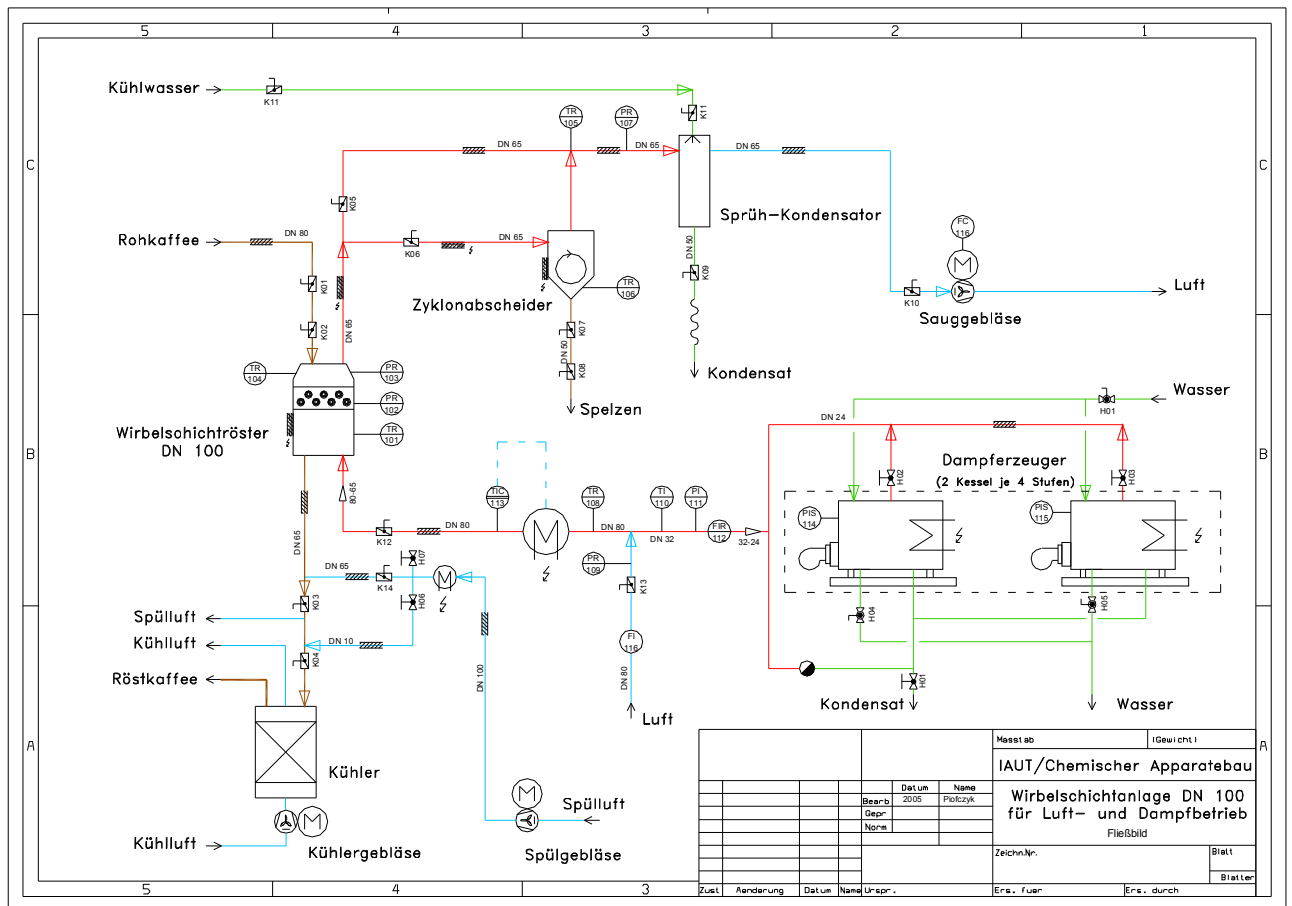


Abbildung 4.1 Schema der Versuchsanlage

### 4.2 Messungen mit dem Flammenionisationsdetektor (FID)

Ein Flammenionisationsdetektor, kurz als FID bezeichnet, dient zur Messung von Kohlenwasserstoffsummenkonzentrationen in Abgasen. Hauptsächlich findet dieses Messprinzip im industriellen Bereich Anwendung, wo in Rauchgasen die Kohlenwasserstoffsummenkonzentrationen als Maß zur Einhaltung bestimmter Gesetze und Richtlinien bestimmt werden. Der Umgang mit einem FID ist in der DIN EN 12619 - Bestimmung der Massekonzentration des gesamten gasförmigen organisch gebundenen Kohlenstoffs in geringen Konzentrationen in Abgasen - geregelt.

Zum Einsatz kam ein Gerät J.U.M. Engineering HFID Modell VE7 i der Firma J.U.M. Engineering Ges.m.b.H.

In einem FID befindet sich ein Brenngas, welches eine Flamme speist. Diese Flamme ist von einem elektrischen Feld umgeben. Weiterhin wird dem System Luft zugeführt. Um die Konzentration an Kohlenwasserstoffen in einem Messgasstrom bestimmen zu können, wird dieser ebenfalls in die Flamme eingeleitet. Bei den hohen Temperaturen in der Flamme werden die Kohlenwasserstoffverbindungen ionisiert und vom elektrostatischen Feld abgelenkt. Sie werden dann dort detektiert und als Signal an eine elektronische Auswertung weitergegeben. Vor der Benutzung wird der FID mit Propangas geeicht. Daher sind alle Signale auf eine Propangaskonzentration bezogen. Dies verursacht zwar einen Fehler, ermöglicht aber gleichzeitig den Vergleich mit anderen Messungen.

Die Umrechnung der Konzentrationswerte erfolgt entsprechend Gl. 47. Zum Kalibrieren des FID-Gerätes wird eine Propan-Stickstoff-Gasmischung mit einer Propankonzentration von 895 ppm verwendet.

Gl. 47 Umrechnung der Konzentrationen:

$$C \left[ \frac{\text{mg}}{\text{m}^3_{\text{N}}} \right] = \frac{M_i}{22,4} \cdot C[\text{ppm}]$$

Gl. 48 Massestrom  $C_{\text{mH}_n}$ :

$$\dot{m}_{C_{\text{mH}_n}} = \frac{C_{C_{\text{mH}_n}} \cdot \dot{m}_{\text{Gas}}}{\rho_{\text{Gas}}}$$

Gl. 49 spezifischer Massestrom  $C_{\text{mH}_n}$ :

$$\dot{m}_{C_{\text{mH}_n} \text{ spez}} = \frac{\dot{m}_{C_{\text{mH}_n}}}{m_{\text{Charge}}}$$

Gl. 50 Molvolumen:

$$M_{\text{Propan}} = 44,09 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

### 4.3 Versuchsmaterialien

Als Versuchsmaterialien kamen unterschiedliche Kaffeesorten zum Einsatz, welche in Tabelle 4 dargestellt sind.

Die Feuchte wurde im Trockenschrank nach DIN ISO 6673 (Lit 292) bestimmt (Kapitel 4.6.3), die Beladung entsprechend Gl. 58 berechnet, die Dichte mittels Pyknometerprinzip (Kapitel 4.6.4) ermittelt, die Schüttdichte (Kapitel 4.6.4) mit einem Messzylinder und einer Waage, der Sauterdurchmesser mit dem Camsizer über  $x_{\text{area}}$  (Kapitel 4.6.5) ermittelt. Die hygroskopische Feuchte und die Knickpunktfeuchte ergeben sich aus den Versuchsreihen.

Kaffeesorte/Herkunft/ Bezugsjahr	x [%]	X $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	$\rho_{\text{Part}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$\rho_{\text{Schütt}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$d_{\text{Part}} [\text{mm}]$	$\Psi [-]$
Coffea Arabica Santos Brasilien 2000 Nr. 1	9,74	0,104	1191	696	6,57	0,895
Coffea Arabica Santos Brasilien 2000 Nr. 2	10,46	0,117	1181	688	6,57	0,894
Coffea Arabica Santos Brasilien 2003	11,74	0,111	1218	667	6,68	0,896
Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004 Nr. 1	9,56	0,106	1195	679	6,70	0,891
Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004 Nr. 2	11,17	0,140	1130	669	6,34	0,891
Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	11,39	0,129	1102	659	6,56	0,893
Coffea Arabica Columbien 2000 Nr. 1	10,46	0,117	1213	697	6,93	0,890
Coffea Arabica Columbien 2000 Nr. 2	9,06	0,100	1201	707	7,27	0,894
Coffea Arabica Costa Rica Tarrazu 2004	10,69	0,120	1176	715	6,86	0,898
Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	10,93	0,123	1091	647	6,63	0,905
Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	11,68	0,132	1078	653	6,56	0,911

Tabelle 4 Versuchsmaterialien

#### 4.4 Versuchsplanung

Zur Durchführung der Versuchsreihen erfolgte eine Versuchsplanung (Tabelle 5), welche sich zunächst an den technischen Möglichkeiten der Versuchsanlage orientierte, wie mögliche Masseströme Luft und Dampf, Temperaturbereich des Heizers, geometrische Abmessungen der Wirbelkammer. Weiterhin für die Versuchsplanung wichtig sind die Fluidisationsparameter für eine Wirbelschicht mit Kaffeebohnen. Dabei sind die Kenngrößen Wirbelpunkt  $w_{WP}$  und Austragspunkt  $w_{AP}$  (Gl. 12 und Gl. 13), die für die Gasströmung limitierenden Parameter. Um eine Vergleichbarkeit von Röstversuchen in Luft und Dampf zu erhalten, wurden entsprechende Versuche mit gleichem eingebrachten Wärmestrom bezogen auf den leeren Apparat und untere Gastemperatur  $\vartheta = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  durchgeführt. Bei konstantem Wärmestrom sollte die Temperatur konstant gehalten werden.

Die Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 geben eine Übersicht über die geplanten Versuche. Der Vergleich zwischen Luft- und Dampfversuchen zum Rösten von Kaffeebohnen in einer Wirbelschicht erfolgt über den in den Apparat eingebrachten Wärmestrom bezogen auf den leeren Apparat (Gl. 51), ebenso die Versuchseinteilung.

Gl. 51 Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{\text{Röst}} = \dot{m}_{\text{Gas}} \cdot c_{p\text{Gas}} \cdot (\vartheta_{\text{WS}} - \vartheta) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right]$$

$\dot{Q} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right]$	$\vartheta_{\text{Gas}} [^{\circ}\text{C}]$	$\dot{m}_L \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$	$\dot{m}_D \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$
2600	230	69	36
3000	250	69	36
3400	230	92	48
4000	250	92	48
4300	230	115	60
5000	250	115	60
5200	230	138	72
6000	250	138	72

Tabelle 5 Versuchsplanung

Alle Versuche wurden mit der Kaffeesorte Arabica Santos und einer Chargenmasse von 200 g durchgeführt (Tabelle 6).

Versuche mit Santos zu 50 g und 500 g sowie mit anderen Sorten zu je 200 g wurden zusätzlich bei einzelnen Einstellungen durchgeführt (Tabelle 6, Tabelle 7, Tabelle 8).

$\dot{Q} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right]$	$\vartheta_{\text{Gas}} [^{\circ}\text{C}]$	$\dot{m}_D \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$	$\dot{m}_L \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right]$	Versuchsnummern	
				Dampf	Luft
2600	230	36	69	V113 (200 g); V183 (200 g)	V008 (50 g); V009 (500 g); V108 (200 g); V169 (200 g)
3000	250	36	69	V103 (200 g); V178 (200 g)	V036 (200 g); V037 (500 g); V038 (50 g); V107 (200 g)
3400	230	48	92	V072 (50 g); V073 (500 g); V102 (200 g); V119 (200 g); V186 (200 g)	VT01 (200 g); V111 (200 g)
4000	250	48	92	V110 (200 g); V118 (200 g); V202 (200 g); V203 (50 g); V204 (500 g)	V121 (200 g); V159 (200 g); V161 (50 g); V165 (500 g)
4300	230	60	115	V078 (50 g); V079 (500 g); V114 (200 g); V190 (200 g)	V166 (200 g); V168 (500 g)
5000	250	60	115	V085 (50 g); V086 (500 g); V116 (200 g); V208 (200 g)	V112 (200 g); V120 (200 g); V170 (200 g); V173 (50 g); V175 (500 g)
5200	230	72	138	V089 (50 g); V090 (500 g); V115 (200 g); V193 (200 g)	V017 (200 g); V020 (500 g); V123 (200 g)
6000	250	72	138	V109 (200 g); V212 (200 g)	V041 (200 g); V042 (500 g); V043 (50 g); V124 (200 g)

Tabelle 6 Übersicht Versuche mit Santos-Kaffee

$\dot{Q}$ [ $\frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ ]	$\vartheta_{\text{Gas}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\dot{m}_{\text{D}}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ]	$\dot{m}_{\text{L}}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ]	Versuchsnummern	
				Dampf	Luft
2600	230	36	69		V010 (200 g)
3000	250	36	69		V039 (200 g)
3400	230	48	92	V075 (200 g)	VT03 (200 g)
4000	250	48	92	V200 (200 g); V201 (200 g)	V162 (200 g); V164 (200 g)
4300	230	60	115	V081 (200 g)	
5000	250	60	115		
5200	230	72	138		V018 (200 g); V021 (500 g)
6000	250	72	138		V044 (200 g)

Tabelle 7 Übersicht Versuche mit Arabica-Kaffees außer Santos

$\dot{Q}$ [ $\frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ ]	$\vartheta_{\text{Gas}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\dot{m}_{\text{D}}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ]	$\dot{m}_{\text{L}}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ]	Versuchsnummern	
				Dampf	Luft
2600	230	36	69	V184 (200 g); V185 (200 g)	V011 (200 g)
3000	250	36	69	V177 (200 g); V179 (200 g)	V040 (200 g)
3400	230	48	92	V187 (200 g); V188 (200 g)	VT02 (200 g)
4000	250	48	92	V198 (200 g); V199 (200 g)	V160 (200 g); V163 (200 g)
4300	230	60	115	V077 (200 g); V080 (200 g); V191 (200 g); V192 (200 g)	V167 (200 g)
5000	250	60	115	V117 (200 g); V206 (200 g); V207 (200 g)	V171 (200 g); V172 (200 g)
5200	230	72	138	V194 (200 g); V195 (200 g)	V019 (200 g)
6000	250	72	138	V210 (200 g); V211 (200 g)	V045 (200 g)

Tabelle 8 Übersicht Versuche mit Robusta-Kaffee

#### 4.5 Konzentrationsbestimmung der $C_m H_n$ in Luft und in Dampf

Eine Übersicht ist in Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8 dargestellt. Um das Emissionsverhalten von Kaffeebohnen während des Röstens untersuchen zu können, sollten verschiedene Röstparameter variiert werden. Das waren zunächst die Temperatur und der in der Wirbelschicht umgesetzte Gasmassstrom sowie die Chargenmasse und die Kaffeesorte. Die Temperatur wurde dabei auf 230 °C, 250 °C und 260 °C, der Luftmassstrom von 30  $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$  bis 150  $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$  und die Chargenmasse mit 50 g, 200 g und 500 g verändert. Die Messungen sollten jeweils 600 s laufen. Technisch von Interesse sind dabei nur die ersten 200 s, da der Kaffee danach stark überröstet und nicht mehr genießbar ist. Während der Versuche wurden die Temperaturverläufe im Eintritt in die Wirbelschicht und im Austritt aus der Wirbelschicht sowie der Verlauf der Emissionen mittels FID als Datei mitgeschrieben. Diese umfangreichen Messwerte standen danach zur Auswertung bereit. Nach der Röstung der Kaffeebohnen wurden der Röstprozess in einem externen Kühler mit Luft abgebrochen und hinterher der Verlust der Masse sowie die Dichte der Kaffeebohnen bestimmt.



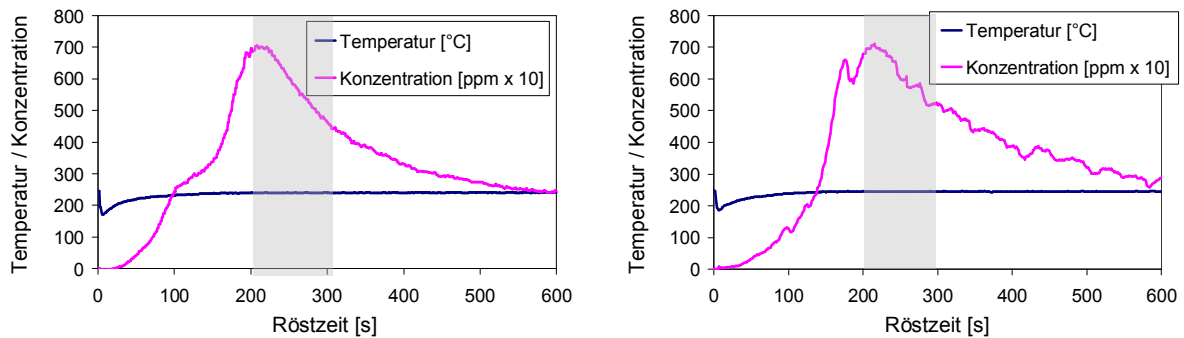


Abbildung 4.2 Gemessene Temperatur- und  $C_mH_n$ -Konzentrationsverläufe für Luftröstung in V041 (links) und Dampftröstung in V212 (rechts) (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

In Abbildung 4.2 sind beispielhaft die Versuche V041 in Luftröstung und V212 in Dampftröstung (siehe Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8) dargestellt. Die Parameter für V041 waren Santos-Kaffee mit einer Chargenmasse von 200 g, einem Luftmassenstrom von  $132 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ , welcher einer Gasgeschwindigkeit von  $7,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  in der Wirbelschicht entspricht und einer Eintrittstemperatur in die Wirbelschicht von  $249 \text{ °C}$ . Die Versuchsdauer betrug 600 s. Im Diagramm zu sehen ist die Luftaustrittstemperatur aus der Wirbelschicht und das Summensignal der Kohlenwasserstoffkonzentration im aus der Wirbelschicht austretenden Gasstrom. Für die Versuchsdurchführung wurde der Wirbelschichtapparat DN 100 des Institutstechnikums genutzt; ein Fließbild wird in Abbildung 4.1 gezeigt. Die Temperaturkurve zeigt während der ersten 6 Sekunden einen starken Abfall von  $249 \text{ °C}$  auf  $170 \text{ °C}$ . Dies ist auf die viel geringere Temperatur der Kaffeebohnen zurückzuführen. Die Darstellung der  $C_mH_n$ -Emissionen in den Diagrammen mit Temperaturkurven erfolgte immer mit dem Faktor 10, um beide Kurven besser erkennen zu können.

Nach dem schnellen Rückgang der Temperatur schließt sich ein langsamerer Anstieg der Temperatur an. Während dieser Zeit trocknen die Kaffeebohnen in der Wirbelschicht. Zunächst trocknet das Wasser an der Oberfläche ab. Daran schließt sich dann ein Trockenprozess des Wassers in den Zellen der Kaffeebohnen an.

Erst wenn die Röstgasaustrittstemperatur der Kaffeebohnen  $200 \text{ °C}$  überschreitet, hier nach ca. 30 s, beginnen die  $C_mH_n$ -Emissionswerte anzusteigen. Bei einer Partikeltemperatur von mehr als  $180 \text{ °C}$  beginnen chemische Reaktionen, die Maillard-Reaktionen, abzulaufen, die für die Bildung der typischen Kaffeearomen verantwortlich sind. Hierbei entstehen ebenfalls die  $C_mH_n$ -Emissionen.

Diese Reaktionen werden mit zunehmender Temperatur immer intensiver. Der Temperaturverlauf nähert sich nun wieder dem Start- und Eintrittswert an. Nach 300 s ist er nahezu stationär. Die Kaffeebohnen haben nun ihre hygroskopische Gleichgewichtsbeladung erreicht. Sie liegt bei ca. 1 % bis 2 %. Zu diesem Zeitpunkt wäre eine industrielle Röstung von Kaffeebohnen in einer Wirbelschicht spätestens abgeschlossen. Um das Emissionsverhalten der Kaffeebohnen beim Rösten besser zu erkennen, wurden die Versuche jedoch nach Möglichkeit bis 600 s weitergeführt. Wie in Abbildung 4.2 zu sehen ist, erreichen die  $C_mH_n$ -Emissionen bei 160 s einen Maximalwert und nehmen wieder ab.

Die für den mit Luft als Röstgas durchgeführten Versuch V041 beschriebenen Verläufe für die Röstgastemperatur über der Wirbelschicht und die emittierten Kohlenwasserstoffe sind denen von Versuch V212 mit Dampf als Röstgas sehr ähnlich (Abbildung 4.2 rechts).

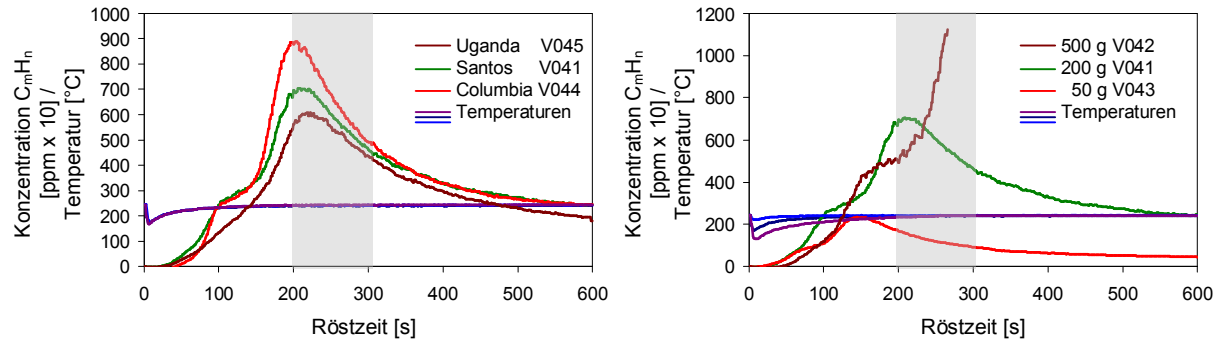


Abbildung 4.3 Variation der Kaffeesorten (links) und der Chargenmasse (rechts), (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

Dieses Verhalten war für alle Versuche typisch, wie der Darstellung aller Versuche im Anhang entnommen werden kann. Der Abfall der Emissionen zum Ende des Versuches konnte jedoch nicht immer beobachtet werden. Bedingt wird dies durch die unterschiedlichen Stoffeigenschaften der verschiedenen Kaffeesorten und die damit unterschiedlich ablaufenden chemischen Reaktionen.

Nach 600 s Röstzeit waren die Kaffeebohnen stark überbröstet, haben ungefähr das doppelte Volumen und ein Viertel ihrer Masse verloren, während die Dichte sich halbiert hat. Auch andere Stoffwerte haben sich verändert, z. B. die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität, die Farbe und das Porenvolumen. In Abbildung 4.3 links sind die Versuche mit Santos- (V041), Columbia- (V044) und Uganda-Kaffee (V045) für Luftröstung dargestellt. Der prinzipielle Verlauf ist bei allen Kaffeesorten sehr ähnlich. Grundsätzlich zu bemerken ist, dass Uganda-Kaffee zu einem geringeren Emissionsverhalten neigt. Die Versuchsparameter waren 200 g Chargenmasse,  $138 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  Luftmassenstrom und eine Rösttemperatur von  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Beim Columbia-Kaffee hingegen traten die stärksten Emissionen auf.

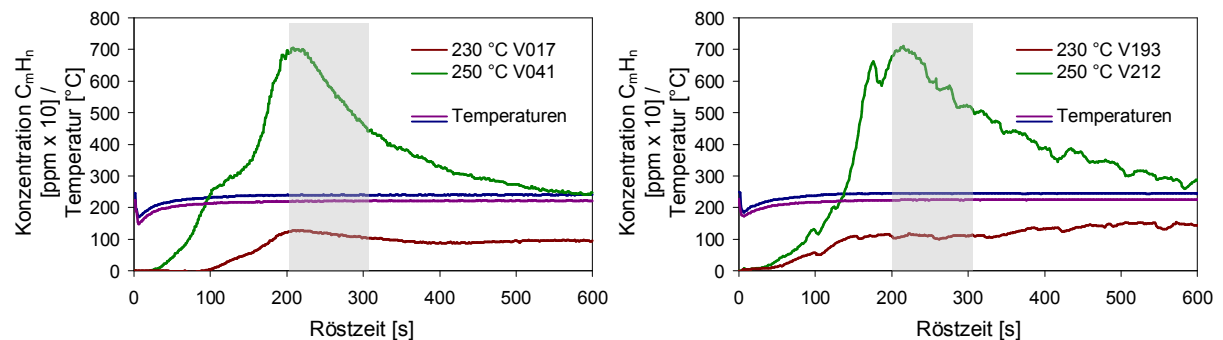


Abbildung 4.4 Variation der Gaseintrittstemperatur Luft (links) und Dampf (rechts), (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

Eine weitere Zielstellung bei der Versuchsdurchführung war die Variation der Chargenmasse. In Abbildung 4.3 rechts ist ein solcher Vergleich dargestellt. Hier handelt es sich um Santos-Kaffee bei 250 °C und einem Luftmassenstrom von  $138 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ . Eindeutig zu sehen ist die Abhängigkeit der Emissionen von der eingesetzten Masse der Kaffeebohnen in der Wirbelschicht. Bei 500 g waren die  $C_mH_n$ -Emissionen so stark, dass der Messbereich des FID überschritten wurde und der Versuch bei 288 s abgebrochen wurde. Ähnliche Abhängigkeiten sind in Abbildung 4.5 bei der Variation des Luftmassenstromes zu erkennen: je geringer der Luftmassenstrom, umso größer sind die gemessenen  $C_mH_n$ -Konzentrationen. Dies hängt mit der Verdünnung der Emissionswerte durch die Fluidisationsluft zusammen. Im industriellen Bereich sind hierbei kleine Gasmassenströme und große Chargenmassen von Interesse, da bei einem hohen Umsatz wenige Aromen in das Gas übergehen sollen. Untersuchungen hierzu hat Schenker (Lit 215) durchgeführt. Der Massenstrom der  $C_mH_n$ -Emissionen zeigt bei denselben Versuchen ein annähernd gleiches Verhalten, die ins Röstgas übergegangenen Emissionen sind nicht vom Gasmassenstrom abhängig (Abbildung 4.5).

Wie zuvor beschrieben besitzt die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Emissionen, da sie der Auslöser für die Röstprozesse und die damit einhergehenden chemischen Reaktionen ist. Die Abhängigkeiten hierfür sind in Abbildung 4.4 und im Anhang aufgeführt. Die Röstungen in Luft und in Dampf zeigen einen ähnlichen Verlauf.

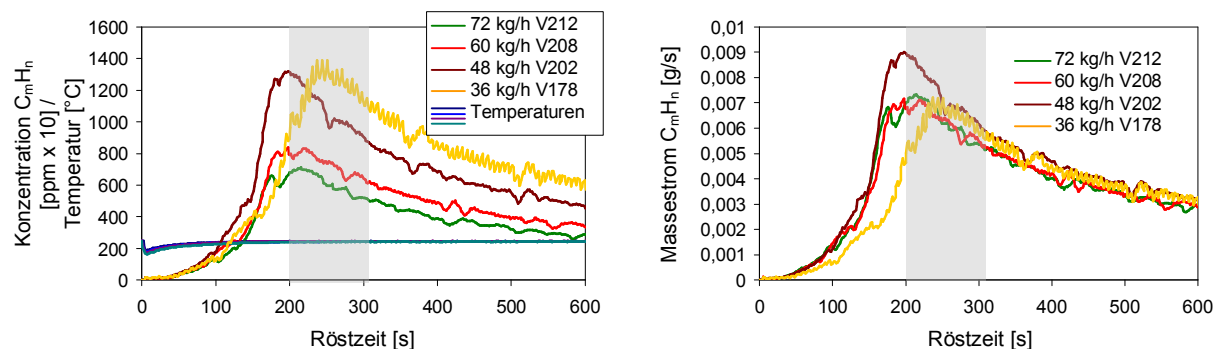


Abbildung 4.5 Variation des Gasmassenstromes als Konzentration (links) und als Massenstrom (rechts) der Emissionen für Dampfrostung von 200 g Santos bei 250 °C, (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

In Abbildung 4.5 ist die Variation des Röstgasmassenstromes für Dampfrostung gezeigt. Die Konzentration unterscheidet sich durch die Verdünnung der Emissionen im Röstgas. Ein Vergleich der  $C_mH_n$ -Massenströme zeigt, dass der Gasmassenstrom auf das Emissionsverhalten keinen Einfluss hat.

## 4.6 Stoffwertmessungen

### 4.6.1 Versuche zur Ermittlung veränderlicher Stoffwerte

Diese Versuche dienen der Ermittlung der in Tabelle 9 dargestellten Werte. Gemessen wurde jeweils in einer Kaffeewirbelschicht in einem Temperaturbereich von 230 °C bis 250 °C, damit der Röstvorgang einsetzt. Da der Apparat für eine Probenahme zu klein ist, wurde jeweils die gesamte Charge nach einer bestimmten Zeit als Probe betrachtet und komplett aus dem Apparat entfernt. Die Versuche wurden jeweils mit Dampf und mit Luft durchgeführt.

	vor dem Versuch zu bestimmen	während des Versuches zu messen	nach dem Versuch zu bestimmen
Farbe	X		X
Beladung	X		X
Durchmesser und Korngrößenverteilung	X		X
Masse der Charge	X		X
Dichte	X		X
Temperaturen in der WS (Gaseintritt, Gasaustritt)		X	
Drücke in der WS		X	
Massestrom Dampf / Luft in der WS		X	

Tabelle 9 Messgrößen der Stoffwertbestimmungen

Hierbei sind die zu variierenden Parameter:

- Verweilzeit
- Gasmassestrom
- Kaffeesorste
- Chargengröße
- Gaseintrittstemperatur.

Die Parameter wurden so variiert, dass bestimmte Wärmeströme im Apparat realisiert wurden. Diese dienen als Vergleichsparameter zwischen Luft- und Dampfversuchen (Tabelle 6, Tabelle 7 und Tabelle 8).

### 4.6.2 Bestimmung des Masseverlustes

Der Masseverlust der Kaffeebohnen während des Röstens wird als Röstverlust oder als Einbrand bezeichnet. Vor und nach den Röstversuchen wurden die Chargenmassen bestimmt. Der Masseverlust wird im Folgenden auch als Röstverlust (RV) bezeichnet und in Prozent angegeben (Gl. 19; Gl. 57).

Der Verlust an Trockensubstanz beim Rösten wird im Folgenden als organischer Röstverlust (ORV) bezeichnet (Gl. 56).

Gl. 52 Masse der Partikel:

$$m_{\text{Part}} = m_{\text{W}} + m_{\text{TS}}$$

Gl. 53 Masse der Partikel (aus Gl. 52 und Gl. 58):

$$m_{\text{Part}} = m_{\text{TS}} \cdot (X + 1) \quad [\text{kg}]$$

Gl. 54 Masse der Trockensubstanz (TS):

$$m_{\text{TS}} = m_{\text{Probe}} - m_{\text{Probe}} \cdot \frac{X_{\text{Probe}}}{100}$$

Gl. 55 gesamter Röstverlust:

$$\text{RV} = 100 \cdot \frac{m_{\text{ein}} - m_{\text{aus}}}{m_{\text{ein}}} \quad [\%]$$

Gl. 56 organischer Röstverlust:

$$\text{ORV} = 100 - 100 \cdot \frac{m_{\text{TSaus}}}{m_{\text{TSin}}} \quad [\%]$$

Gl. 57 organischer Röstverlust (Berechnung aus RV):

$$\text{ORV} = \text{RV} \cdot \frac{m_{\text{P ein}}}{m_{\text{TS}}} + \frac{100}{m_{\text{TS}}} \cdot (m_{\text{P}} - m_{\text{TS}} - m_{\text{P ein}} + m_{\text{TS ein}}) \quad [\%]$$

### 4.6.3 Bestimmung der Beladung

Im Verlauf dieser Arbeit wurde für die Feuchtebestimmung aller Kaffeebohnen, auch der Gerösteten, das Verfahren nach DIN ISO 6673 für Rohkaffee (Lit 292) verwendet. Hierbei werden die Kaffeebohnen 16 h in einem Trockenschrank bei 105 °C getrocknet und der Masseverlust bestimmt. Im Vergleich mit anderen Methoden zur Feuchtebestimmung bietet dieses Verfahren eine ausreichende Genauigkeit (Lit 70; Lit 159). Die Berechnung der Beladung aus der Feuchte der Kaffeebohnen erfolgte nach Gl. 59.

Gl. 58 Beladung:

$$X = \frac{m_{\text{W}}}{m_{\text{TS}}} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$$

Gl. 59 Beladung:

$$X = \frac{x}{1-x} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$$

#### 4.6.4 Bestimmung der Partikeldichte

Die Dichte der Kaffeebohnen wurde nach dem archimedischen Prinzip mit einem Sartorius-Dichtebestimmungsset ermittelt. Der Auftrieb der Kaffeebohnen in destilliertem Wasser wurde gemessen und mit Gl. 60 berechnet. Hierbei ist  $F_a$  der Auftrieb,  $\rho_{Fl}$  die Dichte der Flüssigkeit, 0,99983 und 0,0012 sind Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung des Luftauftriebs und der Eintauchtiefe des Tauchsiebes. Diese Partikeldichte beinhaltet auch die Poren in den Kaffeebohnen.

Gl. 60 Dichtebestimmung:

$$\rho = \frac{F_a}{0,99983 \text{ kg} \cdot \text{g}} \cdot \rho_{Fl} + 0,0012 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

#### 4.6.5 Bestimmung der Partikelgröße, der Partikelgrößenverteilung und der scheinbaren Dichte

Der Camsizer misst die Partikelgrößenverteilung und Kornformeigenschaft rieselfähiger Materialien. Die zu messenden Partikel fallen an einer CCD-Kamera vorbei und werden fotografiert. Die so erhaltene Projektionsfläche wird mit der zugehörigen Software ausgewertet. Für die Kaffeebohnen besteht das Ergebnis aus einer Partikelverteilung, welche als flächenbezogener kreisäquivalenter Durchmesser berechnet ist (Gl. 61). Weiter wird vom Gerät eine Sphärizität (Gl. 63) bestimmt und eine Scheindichte ermittelt. Für diese Scheindichte wird die Probemasse mit angegeben und das Volumen nach Gl. 62 bestimmt.

Gl. 61 flächenbezogener Partikeldurchmesser mittels Camsizer bestimmt:

$$x_{\text{area}} = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

Gl. 62 Volumenberechnung einzelner Kaffeebohnen mittels Camsizer als Rotationsellipsoid aus der Partikelprojektion:

$$V = \frac{\pi}{6} \cdot x_{\text{cmin}}^2 \cdot x_{\text{Fe max}}$$

Gl. 63 Sphärizität Camsizer:

$$\text{SPHT} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{U^2}$$

Gl. 64 spezifische Oberfläche, volumenbezogen:

$$S_v = \frac{\text{Oberfläche aller Partikel}}{\text{Volumen aller Partikel}}$$

Gl. 65 Sauterdurchmesser mit Camsizer ermittelt

$$d_{\text{Sauter}} = \frac{6}{S_v}$$

#### 4.6.6 Bestimmung der Farbe

Ein wesentliches Merkmal eines jeden Röstprozesses ist die Farbänderung (Abbildung 4.6). Bedingt durch ablaufende Maillardreaktionen tritt sie auch beim Rösten von Kaffeebohnen auf. Für die Röstkaffeeproduzenten ist die Farbe der Kaffeebohnen ein wichtiges Qualitätsmerkmal; über sie kann die Qualität der Charge festgestellt werden. In Zusammenarbeit mit der Röstfein Kaffee GmbH Magdeburg wurden die Proben aus den Versuchen zur Stoffwertbestimmung auf ihre Farbe hin untersucht. Zum Einsatz kam ein LK 100 der Firma Dr. Lange Berlin. Dieses Gerät wird mit zwei Farbkacheln auf bestimmte Farbbereiche geeicht, welche dann 50 und 100 Skalenteile betragen. Das Gerät kann dann von 0 bis 100 Skalenteilen die Farbe einer definiert gemahlene Probe bestimmen (Mahlgrad: 470 nm nach Helos-Standard; 406 nm nach Fritsch-Standard). Handelsübliche Kaffees weisen Farbwerte von 50 Skt bis 85 Skt auf.

Die gemahlene Kaffee-Proben wurden in einer Abzieh-Vorrichtung ohne Verdichtung mit einer glatten Oberfläche versehen, bevor sie in die Messkammer des Gerätes gegeben wurden.

Es konnten nur Proben untersucht werden, welche bereits einen bestimmten Röstgrad erreichten, da die Kaffeebohnen im rohen oder fast rohen Zustand die Mahlscheiben der verwendeten Mühle verkleben oder zerstören können. Sehr stark geröstete Proben hatten Röstgrade von über 100 Skalenteilen, so dass der erhaltene Messwert nur die Richtung aufzeigen kann.



Abbildung 4.6

Änderung der Farbe von Kaffeebohnen beim Rösten

#### 4.7 Auswertung und Vergleich der Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen

Ein Vergleich der gemessenen Emissionswerte zwischen den Röstversuchen in Luft und Wasserdampf für unterschiedliche Gasmasseströme ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die im Röstabgas gemessenen Kohlenwasserstoff-Masseströme sind hier als Funktion der Temperatur des Röstabgases über der Wirbelschicht dargestellt. Erkennbar ist eine Entwicklung der im Röstgas enthaltenen Kohlenwasserstoffe ab einer Temperatur über der Wirbelschicht von 200 °C. Hier erreicht die Temperatur Endwerte von 245 °C, da das die Gastemperaturen über der Wirbelschicht in diesen Versuchen waren. Im weiteren Verlauf der Röstung erreichen die gemessenen Emissionen einen Maximalwert von ca. 0,009  $\frac{g}{s}$  für Dampfrostung und 0,008  $\frac{g}{s}$  für Luftröstung. Gut erkennbar ist der ähnliche Verlauf beider Röstungen. Da die  $C_mH_n$ -Emissionen erst bei 200 °C ansteigen, ist eine Abhängigkeit der Kohlenwasserstoffe im Röstgas von den Bräunungsreaktionen zu vermuten, welche ebenfalls in diesem Temperaturbereich starten. Dieser Zusammenhang der Messergebnisse ist in Abbildung 4.8 links gezeigt.

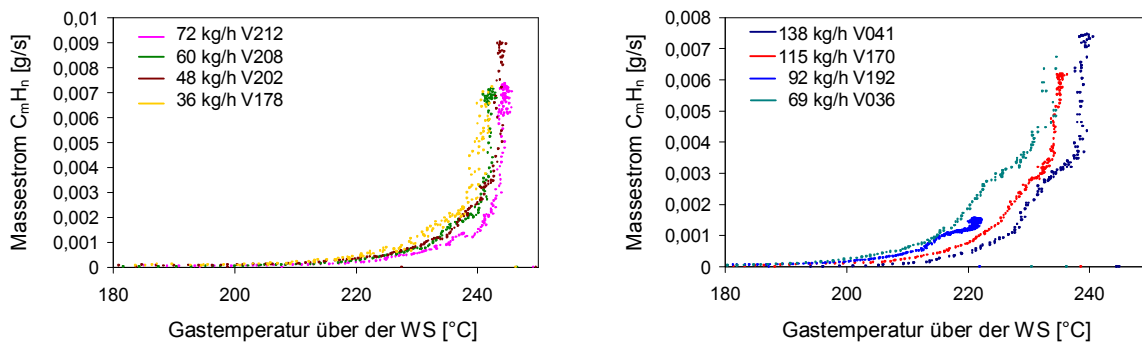


Abbildung 4.7 Vergleich der Emissionsmessungen zwischen Dampf- (links) und Luftröstung (rechts) von 200 g Kaffee in Abhängigkeit vom Röstgasmassestrom bei 250 °C

Eine entsprechende Darstellung ist in Abbildung 5.32 und Abbildung 5.34 gezeigt. Hier ist die durchgeführte Farbmessung bei Werten über 100 Skt nicht genau, da das vorhandene Gerät in diesem Messbereich nicht geeicht werden kann. Jedoch lassen die Messpunkte hier einen linearen Zusammenhang zwischen der Farbe (sie kann als Maß für ablaufende Reaktionen gelten) und der Konzentration von Kohlenwasserstoffen im Röstgas erkennen.



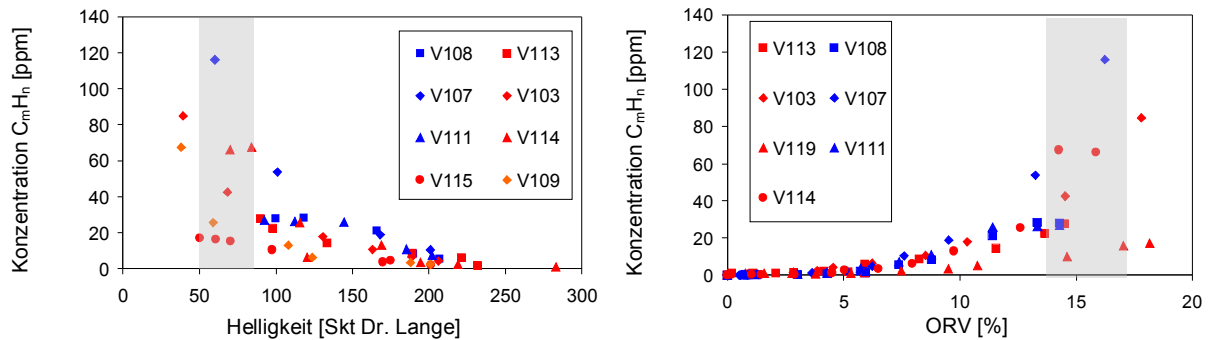


Abbildung 4.8 Konzentration der Kohlenwasserstoffe in Abhängigkeit von der Farbe (links) und in Abhängigkeit von ORV (rechts), (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

In Abbildung 4.8 links ist die Konzentration von Kohlenwasserstoffverbindungen im Röstabgas über dem Verlust an Trockensubstanz beim Rösten gezeigt. Zu erkennen ist hier ein Anstieg der Emissionen ab einem Verlust an Trockensubstanz von ca. 7 %.

Neben den Kohlenwasserstoffen gibt es weitere Trockensubstanzverluste beim Rösten von Kaffeebohnen. Nach Abbildung 4.8 laufen diese zum Teil ab, bevor Kohlenwasserstoffe in das Röstgas übergehen. Weitere Ursachen für einen Verlust an Trockensubstanz sind sich ablösende Spelzen (1 % bis 3 %) und anhaftender Staub, der in der Wirbelschicht abgetrennt wird (bis zu 3 %), in die Zellen eingebundenes Wasser, Kohlendioxid (bis 1,6 % insgesamt zum Ende des Röstens) und Kohlenmonoxid. Der Masse-Anteil der emittierten Kohlenwasserstoffe beträgt im normalen Röstprozess unter 1 %, in eigenen Versuchen konnten bei deutlicher Überröstung aus den gemessenen Konzentrationen über 1 % der Masse vom Rohkaffee bestimmt werden (siehe Versuchsübersicht im Anhang).

Wie sich bei einem Vergleich aller durchgeführten Versuche gezeigt hat, ändern sich Masse und Farbe beim Rösten von Kaffeebohnen mit einer linearen Abhängigkeit. Gut erkennbar ist dies in Abbildung 5.34 (Kapitel 5.1.4.7). Die hier dargestellte lineare Abhängigkeit der Farbe vom Röstverlust ist nur im Bereich von ca. 5 % bis 20 % Masseverlust gültig. Bei kleineren Röstverlusten sind zum einen die Farbwerte mit der vorhandenen Messtechnik nicht mehr bestimmbar gewesen und zum anderen haben andere Autoren (Lit 196; Lit 68) gezeigt, dass die Helligkeit am Anfang des Röstens zunimmt. Bei höheren Röstverlusten ändern sich die Helligkeit, und damit die Farbe nicht mehr deutlich, da hier schon sehr dunkle Werte erreicht sind.

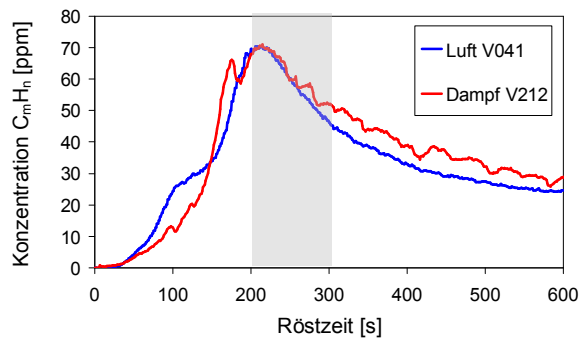


Abbildung 4.9 Emissionsmessungen der Versuchsreihe mit  $\dot{Q} = 6000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$  in Luft und Dampf (links), (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

Abbildung 4.9 zeigt die Darstellung der gemessenen Konzentrationen von Kohlenwasserstoffen im Röstabgas bei den Versuchen zum Wärmestrom  $\dot{Q} = 6000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ . Ab 50 s Röstzeit beginnt die Konzentration anzusteigen, ab ca. 120 s wächst sie sehr schnell. Das Maximum wird bei 200 s erreicht, dann fallen die Werte wieder ab. Bei Santos-Kaffee betrug die kumulierte Masse der gemessenen Konzentrationen, bezogen auf das Eichgas Propan, zwischen 1,0 % und 1,2 % der Masse an Rohkaffee über den gesamten Messzeitraum von 600 s. Eine ausführlichere Beschreibung der Verläufe wird in Kapitel 4.5 gegeben.

Die Darstellung im Diagramm in Abbildung 4.9 links zeigt, die Röst-Versuche in Luft und Dampf sind unter den gewählten Einstellungen miteinander vergleichbar. Hier weicht die Kurve von Versuch V042 mit einer Chargenmasse von 500 g von den anderen Kurven ab. Sie beginnt eher als die anderen Kurven anzusteigen. Der Versuch mit 50 g Chargenmasse hat den spätesten Anstieg zu verzeichnen. Hier ist die Gastemperatur nicht so stark abgesunken wie bei den Versuchen mit größerer Chargenmasse. Bei dem Versuch mit 500 g brauchte sie länger, um sich wieder dem stationären Wert der Temperatur zu nähern. Im Vergleich der Versuchsreihen mit Luft und Dampf als Röstgas ist in Abbildung 4.9 ein Unterschied erkennbar. Die Hauptursache hierfür liegt in der etwas unterschiedlichen Gasaustrittstemperatur bei den beiden Versuchsreihen, da in der Diagrammdarstellung diese Temperatur als Bezug dient.

Abbildung 5.25 zeigt den spezifischen Massestrom der emittierten Kohlenwasserstoffe. Der Massestrom wurde aus der vom FID gemessenen Konzentration mit Gl. 47 und Gl. 48 und der spezifische Massestrom mit Gl. 49 berechnet. Da die genaue Zusammensetzung der Verbindungen unbekannt ist, wurde sie auf das Eichgas Propan bezogen. In diesem Diagramm sind unterschiedliche Versuche mit unterschiedlichen Parametern dargestellt. Die linke Seite zeigt Versuche bei 230 °C mit Luft und die rechte Seite zeigt die Kurven für Luftröstung bei 250 °C. Bei einer Gastemperatur von 250 °C sind die spezifischen Emissionsmassenströme viermal so hoch wie bei 230 °C.

Der in Abbildung 5.21 dargestellte Zusammenhang zwischen spezifischem Massestrom der Kohlenwasserstoffe und Beladung zeigt ein starkes Ansteigen der Masseströme ab einer Beladung von weniger als  $0,04 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ . Dieses Verhalten wird in der mathematischen Beschreibung des Röstprozesses für die Modellierung genutzt.

In Abbildung 5.15 ist die scheinbare Partikeldichte (Kapitel 4.6.4) in Abhängigkeit von der Beladung der Kaffeebohnen mit Wasser aufgetragen. Der Startpunkt für die Röstprozesse liegt hier rechts oben im Diagramm mit der höchsten Dichte (ca.  $1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) und einer Beladung von ca.  $0,12 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ . Beide Messgrößen nehmen im Verlauf der Röstung ab. Die Dichte sinkt auf ca.  $600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  und die Beladung auf einen hygroskopischen Endwert von ca.  $0,01 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ . Die Streuung der Messwerte im Diagramm liegt zum einen an den unterschiedlichen Ausgangsgrößen der verschiedenen Kaffeesorten (Tabelle 4) und zum anderen an durch die Messungen bedingten Schwankungen. Dennoch gut zu erkennen sind ein Trend im Verlauf und eine relativ gute Übereinstimmung der Messergebnisse zwischen den Versuchen in Luft und in Dampf, wobei die Werte der Dampf-Röstung etwas niedriger sind als die aus der Luft-Röstung.

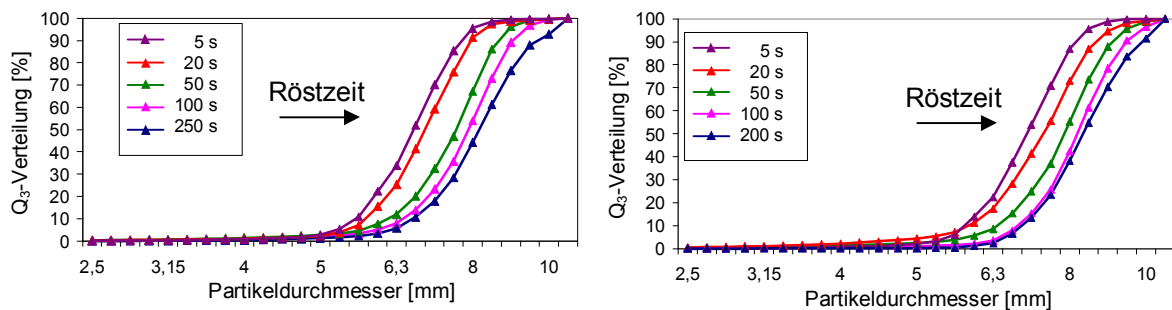


Abbildung 4.10 Partikelgrößenverteilung Versuch V107 (links) und V110 (rechts)

In den Diagrammen in Abbildung 4.10 ist der Verlauf der Partikelgrößenverteilung als  $Q_3$ -Funktion (Gl. 67) mit der Auswertungsmethode "flächenberechnet" (Kapitel 4.6.5) dargestellt. Abgebildet sind jeweils die Messwerte für die Proben (Sauterdurchmesser Gl. 68) bei 5 s, 20 s, 50 s, 100 s und 200 s. V107 ist ein Versuch mit Luft als Röstgas und V110 mit Dampf als Röstgas gezeigt. Deutliche Unterschiede sind nicht sichtbar. Die Kurvenverläufe sind parallel zueinander, d. h. die Verteilung ändert sich nicht und alle Partikel werden gleichmäßig größer. Zu erkennen ist, dass die Partikelgrößenverteilung sich in den Bereich der größeren Durchmesser verschiebt. Für den zeitlichen Bereich zwischen 5 s und 50 s geht das sehr schnell, für die weiteren Zeitabschnitte ist die Änderung deutlich kleiner.

Gl. 66 Verteilungsdichte:

$$q(d_{\text{Part}})_3 = \frac{dQ_3(d_{\text{Part}})}{dd_{\text{Part}}}$$

Gl. 67 Volumen-Verteilungssumme:

$$Q_3(d_{\text{Part}}) = \frac{\sum_{V_{\min}}^V v(d_{\text{Part}}) \cdot n_{i,\text{Part}}}{\sum_{V_{\min}} v(d_{\text{Part}}) \cdot n_{i,\text{Part}}}$$

Gl. 68 Sauterdurchmesser allgemein:

$$d_{\text{Sauter}} = \frac{6 \cdot V_{\text{Part, ges}}}{A_{\text{Part, ges}}} \quad [\text{mm}]$$

Gl. 69 Sphärizität allgemein:

$$\Psi = \frac{A_{\text{O, Kugel}}}{A_{\text{O, Part}}} \quad [-]$$

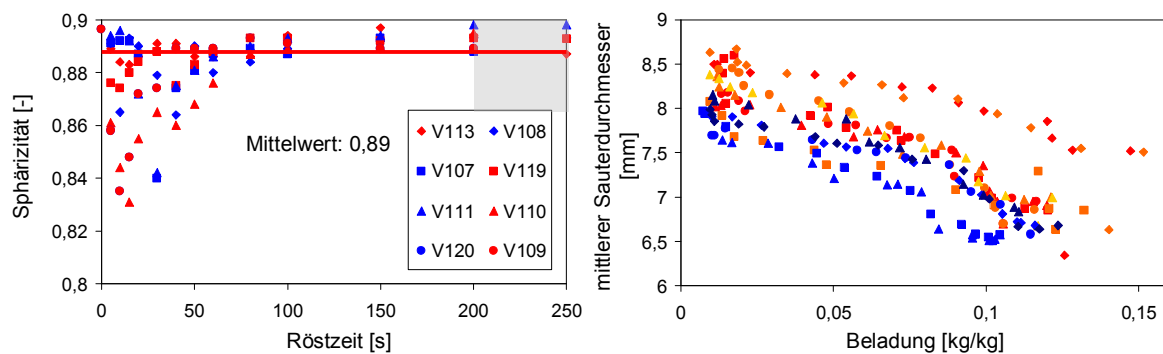


Abbildung 4.11 Sphärizität (links) und mittlerer Sauterdurchmesser in Abhängigkeit von der Beladung (rechts), (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

Abbildung 4.11 links zeigt die Veränderung der Partikelform, den Sphärizitätskoeffizienten (Gl. 69), der mit dem Partikelmessgerät Camsizer über der Röstzeit ermittelt wurde. Zwischen 5 s und 50 s ist hier eine Streuung der Werte zwischen 0,83 und 0,9 zu sehen. Der übrige Verlauf ist konstant 0,89 bei allen Versuchen. Im Bereich der Röstzeit ab 5 s bis 10 s beginnen sich die Silberhäutchen von den Kaffeebohnen abzulösen. Dieser Vorgang endet bei ca. 23 s bis 30 s Röstzeit. Die Silberhäutchen lassen sich nicht ohne großen Aufwand völlig aus den Proben entfernen. Also ist die Streuung auf Messfehler durch Reste von Silberhäutchen zurückzuführen. Die Partikelform der Kaffeebohnen ändert sich beim Rösten trotz wachsendem Durchmesser nicht.

In Abbildung 4.11 rechts ist der mittlere Sauterdurchmesser (Gl. 68) einiger Versuche in Abhängigkeit von der Beladung dargestellt. Im Verlauf des Röstprozesses nehmen die Beladung ab und der Durchmesser der Partikel zu. Die Versuche mit Luft sind von denen mit Dampf als Röstgas hier deutlich voneinander getrennt. Das Anwachsen des Partikeldurchmessers verläuft bei der Röstung in Wasserdampf in Abhängigkeit von der Beladung, also dem Trocknungsprozess, schneller. Der Einfluss der Temperatur scheint dabei geringer zu sein.

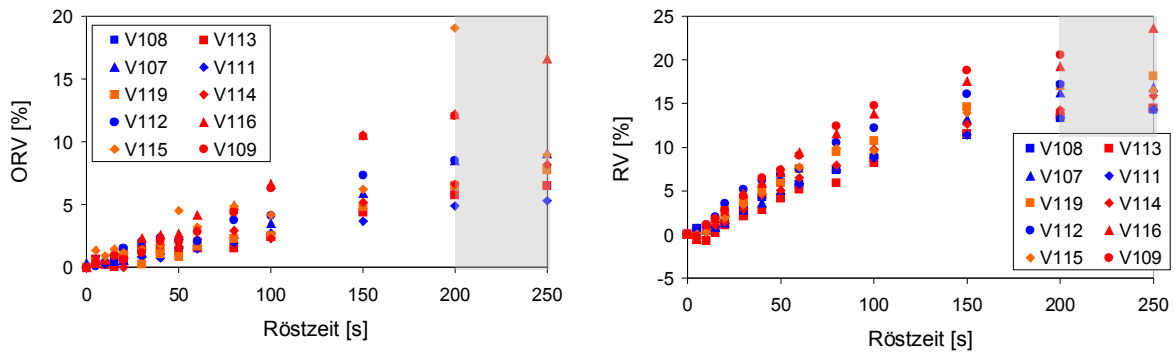


Abbildung 4.12 Organischer Röstverlust (links) und Röstverlust (rechts), (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

In Abbildung 4.12 sind zeitabhängige Darstellungen vom Röstverlust gezeigt. Der Zusammenhang zur Beladung ist in Abbildung 5.7, Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 dargestellt und erscheint bis zum Erreichen der Endbeladung linear.

Zusammenfassend lässt sich sagen, die Änderungen der untersuchten Stoffdaten Partikeldurchmesser, scheinbare Partikeldichte und Beladung der Partikel mit Wasser verlaufen in der Zeit bis ca. 50 s am schnellsten. Die Veränderungen dieser Werte im Zeitraum danach verlaufen sehr langsam. Hingegen beginnen die entstehenden Emissionen an Kohlenwasserstoffen erst ab diesem Zeitpunkt. Jetzt ist die Partikeltemperatur bei ungefähr 180 °C angelangt. Der größte Anteil des in den Kaffeebohnen enthaltenen Wassers ist verdampft und hat die innere Struktur verändert, die Kaffeebohnen sind poröser geworden. Gleichzeitig haben sie sich durch das schnell verdampfende Wasser aufgebläht, das Partikelvolumen hat sich fast verdoppelt.

Nun beginnen die für die Bildung des Kaffee-Aromas typischen Reaktionen abzulaufen. Hierbei entstehen neben den später im Kaffee-Getränk enthaltenen Aromakomponenten die flüchtigen Gase, welche als Kohlenwasserstoffverbindungen vom FID gemessen werden können. Außerdem gehen Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und weiteres Wasser in das Röstgas über. Im weiteren Verlauf kommt es zu stärker werdenden Emissionen. Die Kaffeebohnen werden schwarz und entwickeln ein stark verbranntes Aroma. Gegen Ende der Versuche zur Bestimmung von Kohlenwasserstoff-Emissionen im Röstabgas der Kaffeebohnen nehmen sie jedoch wieder ab.

Aus der Literatur ist bekannt, der Anteil der Kohlenwasserstoff-Emissionen beträgt weniger als 1 % Prozent der Masse vom Rohkaffee. Clarke (Lit 47) findet 1,7 % CO<sub>2</sub> und andere Gase im RV enthalten. Perego und Mitarbeiter (Lit 189) 1,6 % CO<sub>2</sub> der Rohkaffeemasse als Hauptkomponente des Röstgases, wovon ca. 50 % bei der Röstung entweichen. Jansen und Lange (Lit 111) finden den Masseanteil des CO<sub>2</sub> bezogen auf Rohkaffee bei 1 %, wovon ca. 15 % bis 24 h nach dem Rösten aus der Kaffeebohne entwichen sind. Der Anteil der Kohlenwasserstoffe wird von Jansen und Lange mit weniger als 1 % angegeben.

Die durchgeführten Versuchsreihen haben gezeigt, dass für normal geröstete Kaffeebohnen Verluste durch Kohlenwasserstoff-Emissionen von ungefähr 0,4 % der Masse von Rohkaffee auftreten können (0,47 % bei V110 und V118, 0,38 % bei

V116, 0,4 % bei V109, 0,42 % bei V124). Bei überröstetem Kaffee kann dieser Verlust auf ca. 1 % steigen (1,3 % bei V110 und V118, 1,1 % bei V109 und V116, 1,06 % bei V124).

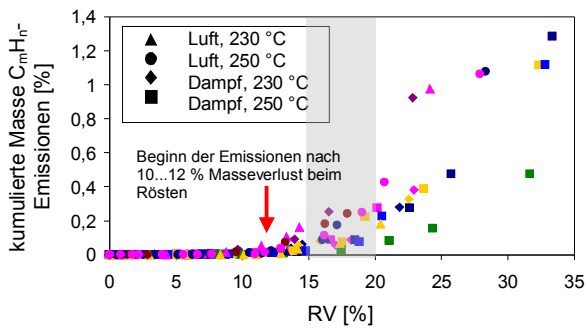


Abbildung 4.13 Kumulierter Massestrom der  $C_mH_n$ -Emissionen RV-abhängig

In Abbildung 4.13 ist der Masseverlust durch Kohlenwasserstoff-Emissionen über dem Röstverlust dargestellt. Für normale Röstverluste bewegt sich der Masseverlust durch die  $C_mH_n$ -Emissionen bei 0,3 % bis 0,5 %. Zu erkennen ist, die emittierte Masse steigt erst über 10 % Röstverlust deutlich an und zeigt bei den durchgeführten Versuchen bis über 30 RV einen stark ansteigenden Verlauf. Emissionen bilden sich erst nachdem das in den Kaffeebohnen enthaltene Wasser verdampft ist. Im Anschluss an eine normale Röstung nehmen sie stark zu.

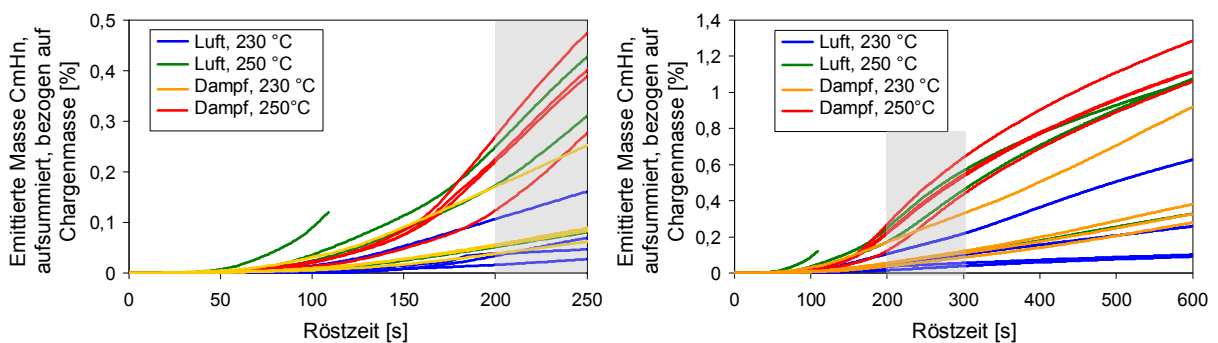


Abbildung 4.14 Emittierte Masse an Kohlenwasserstoffen aufsummiert und in Prozent vom Rohkaffee zeitabhängig bis 250 s Röstzeit (links) und 600 s (rechts) für jeweils 200 g Rohkaffee, (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

Abbildung 4.14 zeigt die emittierte Masse an Kohlenwasserstoffen während der Röstversuche für Luft- und Dampfrostung bei beiden Rösttemperaturen. Hier ist zu sehen, bei normaler Röstung in Luft bei 230 °C werden 0,1 % bis 0,2 %, in Luft bei 250 °C bis zu 0,5 %, in Dampf bei 230 °C 0,1 % bis 0,3 % und in Dampf bei 250 °C bis zu 0,5 % Kohlenwasserstoff-Verbindungen emittiert. Werden die Kaffeebohnen überröstet, wie in der rechten Darstellung zu sehen ist, steigt die emittierte Masse noch stark an. Nach 10 min Röstzeit in der Dampf-Wirbelschicht bei 250 °C bis zu 1,2 %.

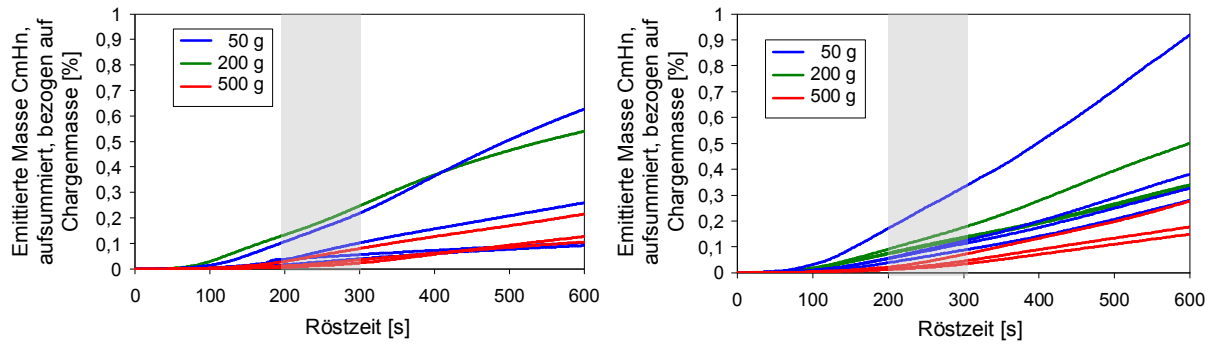


Abbildung 4.15 Emittierte Masse an Kohlenwasserstoffen aufsummiert und in Prozent vom Rohkaffee zeitabhängig bei 230°C für Luftröstung (links) und Dampftröstung (rechts), (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

Ein Vergleich unterschiedlicher Ausgangschargenmassen von Rohkaffee ist in Abbildung 4.15 für eine Röstgas-Eintrittstemperatur von 230 °C gezeigt. Bei den kleineren Massen von 50 g werden hier die höchsten Masseverluste in Prozent erreicht.

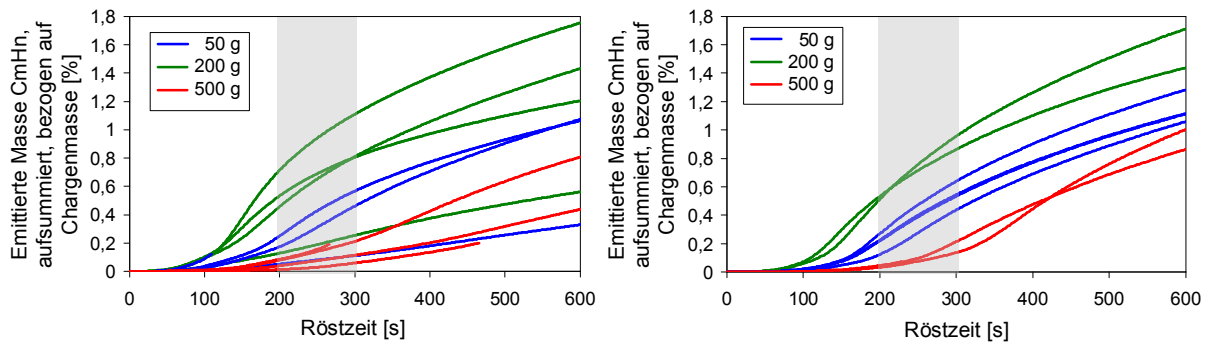


Abbildung 4.16 Emittierte Masse an Kohlenwasserstoffen aufsummiert und in Prozent vom Rohkaffee zeitabhängig bei 250°C für Luftröstung (links) und Dampftröstung (rechts), (kommerziell nutzbar im grauen Bereich)

Abbildung 4.16 zeigt für eine Röstgaseintritts-Temperatur von 250 °C die entstehenden Masseverluste durch die  $C_mH_n$ -Emissionen. Bei den hier viel stärker entstehenden Emissionen durch die höhere Temperatur bedingt, weisen hier die Versuche mit 200 g Chargenmasse die höchsten Werte auf, die mit 500 g die niedrigsten. Die Unterschiede sind deutlich größer als bei den Versuchen mit 230 °C.

#### 4.7.1 Fehlerbetrachtungen zu den experimentellen Untersuchungen

Zufällige Fehler verursachen regellos zu große und zu kleine Messwerte. Sie schränken die Reproduzierbarkeit der Messung ein. Zufällige Fehler können durch die begrenzte Leistungsfähigkeit von Messgeräten bzw. -anordnungen und Unregelmäßigkeiten in der Messdurchführung entstehen. Sie können durch statistische Methoden berücksichtigt werden; der gesuchte Wert liegt dann innerhalb der Streuungen (Lit 152).

Bei den durchgeführten Messungen sind die Proben nur einmal oder wenige Male gemessen worden. Eine gesicherte statistische Auswertung der zufälligen Fehler mit häufigeren Probenmessungen pro Probe war im Rahmen dieser Untersuchungen nicht durchführbar. Eine Abschätzung der Genauigkeit der durchgeführten Messungen ist daher nur über die Messbereiche und Messunsicherheiten der Messanordnungen möglich. Eine Übersicht zu den einzelnen Geräten ist in Tabelle 10 dargestellt.

Gerät	Hersteller	Messbereich	Fehler
Thermoelemente NiCr-Ni	Ahlborn	bis 400 °C	+/-1,5 °C; T <sub>90</sub> = 1,5 s
Dralldurchflussmesser	ABB	-55 ... 280 °C 15,2 ... 77 kg/h bei 1 bar	+/-0,5 % vom Meßwert unter Referenzbedingungen, Reproduzierbarkeit < 0,2 % vom Messwert
Flügelradanemometer	Testo	0,6 bis 40 m/s; 0 bis 60 °C	+/- (0,2 m/s +/-1,5 % vom Messwert)
FID	J.U.M.	10 ... 100.000 ppm	Empfindlichkeit: +/-1 ppb
Sartorius Dichteset YDK 01	Sartorius	keine Angabe	Bestimmung der Auftriebskraft mittels Waage, manuelle Durchführung, anhaftende Luftbläschen, Temperaturänderung der Tauchflüssigkeit, Eintauchtiefe, Dichte der Tauchflüssigkeit und der Proben können größer, kleiner und gleich sein
Sartorius RC 210P	Sartorius	0...210 g	+/- 0,05 g
Farbe	Dr. Lange		+/-0,2 Skt Reproduzierbarkeit bezogen auf Kalibrierstandard; +/- 1,5 Skt bezogen auf Proben
Partikeldurchmesser	Camsizer	30 µm - 30 mm	unbekannt, jedoch Messfehler durch die Partikelform Halb-Ellipsoid, Messgerät geht nicht von "halben" Partikeln aus
Röstzeit	div. Handstoppuhren, Uhr am Mess-PC		unbekannt, Fehler in der Versuchsdurchführung durch manuelles Bedienen der Klappen und Zeitnahme durch Stoppuhren

Tabelle 10 Genauigkeit der Messgeräte



## 5 Mathematische Beschreibung

Der Prozess des Röstens von Kaffeebohnen in einer Wirbelschicht mit heißem Dampf oder heißer Luft soll mathematisch beschrieben werden.

Am Institut für Apparate- und Umwelttechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg wurden bereits Untersuchungen zu Trocknungsprozessen in dampfbeheizten Wirbelschichtanlagen durchgeführt und ein mathematisches Berechnungsmodell zur Trocknung feuchter Güter im überhitzten Wasserdampf entwickelt (Machnow Lit 155).

Aufgrund der speziellen Eigenschaften der Kaffeebohnen als Naturprodukt war es nicht möglich, diese für ein ideales Trocknungsgut erstellte Modellierung zu nutzen. Der Röstprozess von Kaffeebohnen soll unter bestimmten Annahmen mittels empirischer Gleichungen für einige Parameter beschrieben werden.

Die zu beschreibenden Parameter sind:

- Emissionen von Kohlenwasserstoffen,
- Partikeldichte,
- Partikeldurchmesser,
- Masseverlust beim Rösten (Röstverlust) und
- Farbe der Kaffeebohnen.

Diese Parameter sollen für folgende Röstbedingungen beschrieben werden:

- Santos-Kaffee
- Wirbelschichtrostung in Luft oder Dampf
- Rösttemperatur: 230 °C und 250 °C
- Chargenmasse 200 g
- Masseströme des Gases aus den experimentellen Untersuchungen

Als Arbeitshypothese wird angenommen, dass die Haupteinflussgrößen auf die Qualitätsparameter der erzeugten Kaffeebohnen sind:

- Gastemperatur (Eintrittstemperatur in die Wirbelschicht)
- normierte Trocknungsgeschwindigkeit
- Gasgeschwindigkeit in der Wirbelschicht
- Fluidisationsmedium
- Schichtmasse in der Wirbelschicht.

### 5.1 Modellgleichungen zu den Röstvorgängen

#### 5.1.1 Röstung

Die Röstung kann als Trocknung im überhitzten Wasserdampf betrachtet werden, ähnlich dem Modell von Machnow. Hinzu kommen spezifische veränderliche Größen, die Kaffeebohnen in ihren Eigenschaften als Naturprodukt beschreiben. Dieses betrifft z. B. die Masse der Trockensubstanz des Kaffees, welche aufgrund der Röstvorgänge abnimmt, das Volumen der Kaffeebohnen, welches zunimmt, die Dichte der Kaffeebohnen, die abnimmt und die sich verschiebende Korngrößenverteilung.

Der Röstverlust, die Dichteabnahme und die Durchmesserzunahme werden in Abhängigkeit von der Partikelbeladung in das Berechnungsmodell aufgenommen, wie in Kapitel 5.1.4 beschrieben ist.

Die Kaffeebohnen durchlaufen während der Röstung Stadien endo- und exothermer Reaktionen, es wird Wärme aufgenommen bzw. abgegeben. Zunächst kommen ein endothermer Abschnitt mit der Wasserabgabe und der Zersetzung des in den Kaffeebohnen enthaltenen Zuckers und anderen Stoffen und anschließend ein exothermer durch Pyrolyse gekennzeichneter Abschnitt. Hierzu finden sich in der Literatur bereits Modellansätze (Tabelle 11).

Die Feuchte der Kaffeebohnen sinkt von 10 % bis 12 % auf 1 % bis 3 %, der Einbrand oder der gesamte Röstverlust beträgt ca. 20 %, das sind organischer Röstverlust und verdampftes Wasser zusammen. Unterschiedliche Kaffeesorten zeigen dabei ein unterschiedliches Verhalten. Volumen und Größe nehmen um bis zu 100 % zu, während die Größenverteilungen als nahezu konstant bei durch Rösten veränderter Größe beobachtet werden. Die von den Autoren bestimmte Dichte halbiert sich von  $1,2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  bis  $1,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  auf  $0,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  bis  $0,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ . Auch hier wurden bei unterschiedlichen Kaffeesorten unterschiedliche Ergebnisse beobachtet. Nach ungefähr 4 Minuten blieb die Dichte konstant. Die untersuchte Wärmeleitfähigkeit nahm bei Santos-Kaffee von  $0,18 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  auf  $0,11 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  ab und scheint innerhalb der Kaffeebohne richtungsabhängig zu sein. Die „wahre“ spezifische Wärmekapazität fällt während des Röstens ab. Die Bestimmung ist jedoch schwierig. So wird eine „effektive“ spezifische Wärmekapazität von verschiedenen Autoren definiert, in welcher die „wahre“ spezifische Wärmekapazität mit endo- und exothermen Reaktionen überlagert wird. Es werden drei wichtige Arten der Wärmezufuhr beschrieben, Leitung, Konvektion und Strahlung, wobei der Konvektion die größte Bedeutung zukommt. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt beim Rösten schnell von  $0,183 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  auf  $0,11 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$  ab.

Eine Übersicht zu Stoffwerten aus der Literatur ist in Tabelle 18, Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21 dargestellt. Die in Tabelle 11 zusammengefassten Werte kommen in der Modellierung zum Einsatz.

### 5.1.2 Berücksichtigung von Emissionen

Die Kohlenwasserstoffverbindungen, die im Röstgas als Emissionen auftreten, gehen aus unterschiedlichen Maillard-Reaktionen beim Rösten hervor. Sie werden im Modell in Abhängigkeit vom Röstverlust abgeschätzt (Kapitel 5.1.4.6) Die Berechnung erfolgt auf der Grundlage der Messgeräteeichung des FID, also entsprechend DIN EN 12619 auf Propangas bezogen.

### 5.1.3 Stoffeigenschaften von Kaffee

In Tabelle 11 sind die veränderlichen Stoffeigenschaften von Kaffeebohnen beim Rösten und ihre Berücksichtigung in der Modellierung gezeigt.

Größe	Änderung	Einflussgrößen	mathematischer Zusammenhang	Quelle
Dichte	nichtlinear abnehmend	Beladung, Temperatur, Verweilzeit	Approximationsgleichung als Funktion der Beladung (Gl. 85, Tabelle 15)	
Farbe (Helligkeit)	nichtlinear abnehmend	Verweilzeit, Temperatur, Röstverlust	Approximationsgleichung als Funktion vom Röstverlust (Gl. 107)	
Durchmesser	nichtlinear zunehmend	Beladung, Temperatur, Verweilzeit	Approximationsgleichung als Funktion der Beladung (Gl. 72, Gl. 73, Tabelle 12)	
Wärmekapazität	zu Röstbeginn stark ansteigend, ab $\vartheta_{\text{Part}} = 40\text{ °C}$ bis $\vartheta_{\text{Part}} = 200\text{ °C}$ konstant, dann Überlagerung mit exothermen Effekten	Beladung, Temperatur, Verweilzeit	Rohkaffee: $c_{p\text{Part}} = 1,11 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ Röstkaffee: für $\vartheta > 40\text{ °C}$ : $c_{p\text{Part}} = 1,4 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ effektive $c_p$ für $\vartheta < 40\text{ °C}$ : $c_{p\text{Part}} = 2,5 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ bis $c_{p\text{Part}} = 6 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ für $40\text{ °C} < \vartheta < 200\text{ °C}$ : $c_{p\text{Part}} \sim 2,5 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ für $\vartheta > 200\text{ °C}$ : $c_{p\text{Part}} = 0 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ bis $c_{p\text{Part}} = -3 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$	Eggers (Lit 64)
Wärmeleitfähigkeit	am Anfang stark fallend, konstant ab $\vartheta_{\text{Part}} = 40\text{ °C}$	Temperatur, Verweilzeit	für $\vartheta < 40\text{ °C}$ : $\lambda = 0,183 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ für $\vartheta > 40\text{ °C}$ : $\lambda \sim 0,11 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Eggers (Lit 64)
Wärmeübergangskoeffizient			$k = 1,24 \frac{\text{cal}}{\text{hcm}}$	Clarke (Lit 47)
Masseverlust	nichtlinear abnehmend	Beladung, Temperatur	Approximationsgleichung als Funktion der Beladung (Gl. 82, Gl. 83, Gl. 84, Tabelle 14)	
$C_m H_n$ -Emissionen	nicht linear	Temperatur, Röstverlust	Approximationsgleichung als Funktion vom Röstverlust (Gl. 89, Gl. 94, Gl. 100, Gl. 104, Tabelle 16)	
exotherme Wärme		Temperatur	für $\vartheta > 190\text{ °C}$ $\vartheta_{\text{Part exotherm}} = \vartheta_{\text{Part}} + 5\text{ K}$	Streuli (Lit 253)
exotherme Wärme		Temperatur	für $\vartheta = 290\text{ °C}$ bis $\vartheta = 350\text{ °C}$ $h_{\text{exotherm}} = 44,6 \frac{\text{J}}{\text{g}}$	Pittia (Lit 195)
exotherme Wärme		Temperatur	über $\vartheta = 140\text{ °C}$ : $h_{\text{exotherm}} = 250 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ $h_{\text{exotherm}} = 420 \frac{\text{J}}{\text{g}}$	Raemy (Lit 201)
endotherme Wärme		Beladung, Temperatur	für $50\text{ °C} < \vartheta < 190\text{ °C}$ : $\vartheta_{\text{Part endotherm}} = \vartheta_{\text{Part}} - 5\text{ K}$	Streuli (Lit 253)
endotherme Wärme		Beladung, Temperatur	für $\vartheta = 20\text{ °C}$ bis $\vartheta = 130\text{ °C}$ $h_{\text{endotherm}} = 39,1 \frac{\text{J}}{\text{g}}$	Pittia (Lit 195)

Tabelle 11 Eigenschaftsänderungen von Kaffeebohnen beim Rösten

### 5.1.4 Ermittlung geeigneter Berechnungsgleichungen für einige Stoffeigenschaften

In der Literatur ließen sich Beziehungen für das Wachstum des Partikeldurchmessers, die Abnahme der Dichte, das Verhalten des Röstverlustes, die Entwicklung der Kohlenwasserstoffe bzw. Röstaromen und die Farbe nicht finden. Aus den durchgeführten Versuchen lassen sich jedoch Trends dieser Stoffwerte erkennen: Der mittlere Durchmesser der Kaffeebohnen steigt beim Rösten so an, dass sich das Volumen der Kaffeebohnen ungefähr verdoppelt. Die Partikeldichte halbiert sich ungefähr. Kaffee verliert beim Rösten an Masse. Geruchs- und Aroma- bzw.  $C_mH_n$ -Emissionen steigen erst, können dann fallen oder weiter steigen. Hier sind keine eindeutigen Trends zu erkennen, am häufigsten trat ein Maximumpunkt auf. Beim Rösten werden die Kaffeebohnen dunkler.

Aus den durchgeführten Experimenten werden die benötigten Stoffdaten mittels geeigneter Gleichungen beschrieben, deren Koeffizienten mit dem Programm „Chem-Fit“ ermittelt wurden.

Alle Zusammenhänge wurden für Santos-Kaffee mit einer Chargenmasse von 200 g hergeleitet. Die Helligkeitsberechnung wurde mit allen durchgeführten Versuchen bestimmt.

#### 5.1.4.1 Einflussgrößen

Wie sich bei der Auswertung der Versuche zeigte, kommen als Einflussgrößen die Beladung, die Partikelgröße, die Temperatur, der Gasmassestrom, die Chargengröße und die Gasart in Frage. Den größten Einfluss auf alle gemessenen Werte hatten die Temperatur und die Gasart, während der Gasmassestrom keinen nachweisbaren Einfluss zeigte (Kapitel 5.1.4.3, 5.1.4.4, 5.1.4.5, 5.1.4.6 und 5.1.4.7). Um die Stoffwerte mittels Formeln sinnvoll beschreiben zu können, wurden Beladung und Röstverlust ausgewählt. Die Partikelbeladung hängt dabei stark von der Rösttemperatur ab, sie ist eine wichtige Prozessgröße, welche durch ein Trocknungsmodell geliefert werden kann. Da die Beladung nicht in allen Fällen geeignet erschien die Stoffgröße zu beschreiben, wurde in zwei Fällen der Röstverlust ausgewählt. Physikalisch sinnvoller wäre die Abhängigkeit vom Verlust an Trockensubstanz gewesen, dem organischen Röstverlust. Jedoch unterlag dieser größeren Messunsicherheiten, da er aus Masseverlust und Feuchtebestimmung berechnet wird. Der Röstverlust selbst wird nur aus dem Masseverlust bestimmt.

#### 5.1.4.2 Chem-Fit

Zur Ermittlung mathematischer Beziehungen zur Beschreibung der gesuchten Zusammenhänge wurde das Datenregressionsprogramm Chem-Fit verwendet. Das Ergebnis wird von Chem-Fit über  $F$  und  $R_{xy}^2$  (Gl. 70 und Gl. 71) eingeschätzt.  $F$  ist die Standardabweichung zwischen Messergebnissen und Berechnungsergebnissen; sie sollte möglichst klein ausfallen;  $R_{xy}^2$  ist eine Einschätzung der Genauigkeit und dient dem Programm intern als Bewertung. Die Anzahl der Datensätze ist  $n$  und  $m$  ist die Anzahl der anzupassenden Parameter. Dieser Wert soll nahe 1 sein, um eine gute Regression zu erhalten.

Gl. 70 Standardabweichung:

$$F = \sqrt{\frac{1}{n-m} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i^{\text{experiment}} - y_i^{\text{berechnet}})^2}$$

Gl. 71 Genauigkeit:

$$R_{XY}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{\text{experimentell}} - y_i^{\text{berechnet}})^2}{\sum_{i=1}^n \left( y_i^{\text{experimentell}} - \frac{\sum_{i=1}^n y_i^{\text{experimentell}}}{n} \right)^2}$$

### 5.1.4.3 Berechnung der Änderung des Partikeldurchmessers

Der als mittlerer Sauterdurchmesser dargestellte Durchmesser der Kaffeebohnen wächst im Verlauf der Kaffeeröstung an. In Abbildung 5.1 sind für Versuch V110 (wie V118) die röstzeitabhängigen Durchmesser und die röstzeitabhängigen Partikelverteilungen gezeigt.

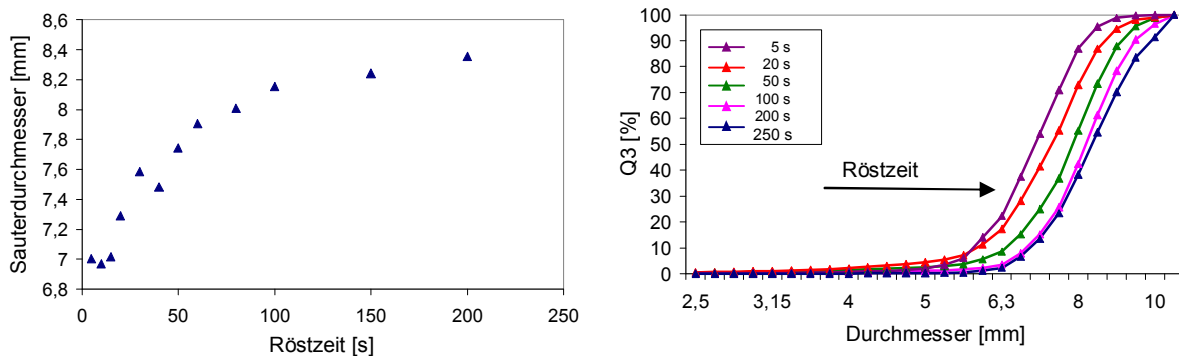


Abbildung 5.1 Modellierung Partikeldurchmesser (Messergebnisse): Sauterdurchmesser von Versuch V110 röstzeitabhängig (links) und Partikelgrößen-Verteilung Q<sub>3</sub> flächenberechnet mit Camsizer röstzeitabhängig (rechts)

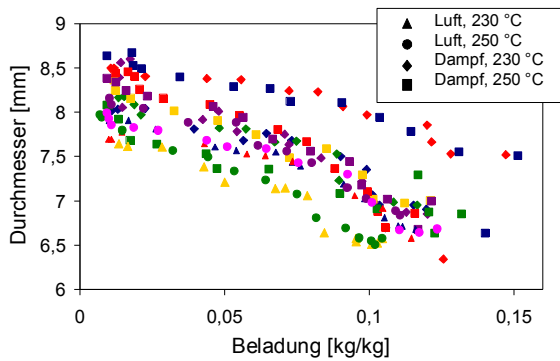


Abbildung 5.2 Modellierung Partikeldurchmesser (Messergebnisse): beladungsabhängiger Sauterdurchmesser der Kaffeebohnen

Für die Beschreibung des Durchmesser-Wachstums ist der Zusammenhang mit der Partikelbeladung gewählt worden. In Abbildung 5.2 erkennbar sind die unterschiedlichen Startbedingungen durch unterschiedliche Rohkaffees: Feuchte und Durchmesser sind nicht einheitlich. Weiter zu erkennen ist zunächst ein starkes Anwachsen des Durchmessers, welches im Verlauf der Röstung schwächer wird bis hin zu einem fast konstanten Endwert. Weitere Einflussgrößen auf das Wachsen des Durchmessers sind die Rösttemperatur und das Röstgas.

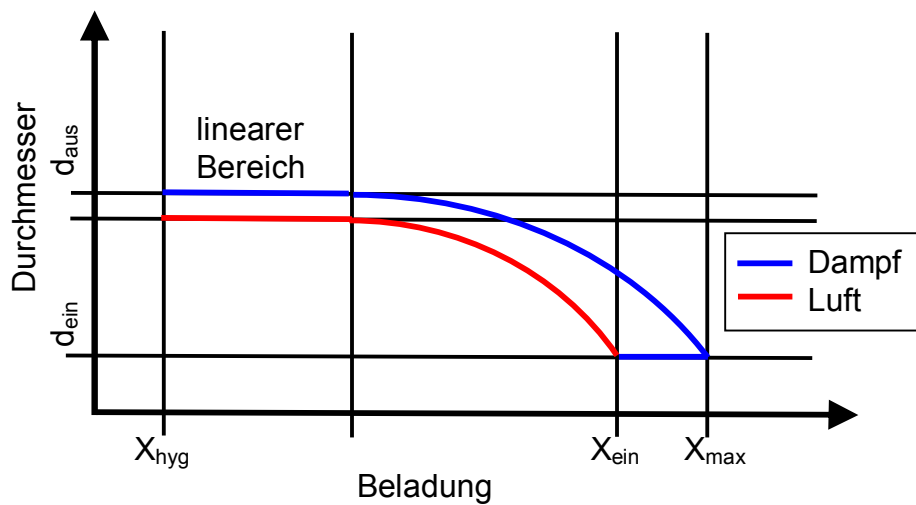


Abbildung 5.3 Modellierung Partikeldurchmesser (Modellvorstellung Durchmesser-Wachstum)

Der Modellansatz für die Approximationsgleichung geht von einem exponentiellen Wachstum auf einen konstanten Endwert aus (Abbildung 5.3). Durch die folgenden Gleichungen wird diese Vorstellung mathematisch beschrieben.

Gl. 72 Partikeldurchmesser in Luft:

$$d(X)_L = A \cdot e^{(B \cdot X + C)} + D \cdot (X - X_{ein}) + d_{ein} - A \cdot e^{(B \cdot X_{ein} + C)} \quad [mm]$$

Gl. 73 Partikeldurchmesser in Dampf:

$$d(X)_D = A \cdot e^{(B \cdot X + C)} + D \cdot (X - X_{\max}) + d_{\text{ein}} - A \cdot e^{(B \cdot X_{\max} + C)} \quad [\text{mm}]$$

Gl. 74 Randbedingung für das Durchmesserwachstum:

$$d_{n+1}(X) \geq d_n(X)$$

Gl. 75 Kondensationsbedingung für das Durchmesserwachstum:

$$d(X) = d_{\text{ein}} = \text{konstant bis } X = X_{\max}$$

Zur Berechnung ist die Kenntnis von Durchmesser und Beladung für Rohkaffee notwendig. Als zusätzliche Bedingungen soll der Durchmesser nicht wieder kleiner werden; unabhängig von allen anderen äußeren Einflüssen und für den Fall der Dampf-Röstung bleibt der Durchmesser beim Rohkaffeewert konstant bis durch die Kondensation am Anfang des Röstprozesses die maximale Beladung erreicht ist.

In Tabelle 12 ist eine Übersicht über die erhaltenen Parameter jeweils für eine Luft- und eine Dampfrostung gegeben. Die Mittelwerte der Genauigkeit und der Standardabweichung für die Versuche sind ebenfalls angegeben. In Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 sind die Ergebnisse der Parameterbestimmung graphisch dargestellt.

Parameter	Luft	Dampf
A	-133	-460
B	-34	-12
C	-5,5	-5
D	-17	-31
F	0,184	0,199
$R_{xy}^2$	0,914	0,926

Tabelle 12 Modellierung Durchmesser (Ergebnisse)

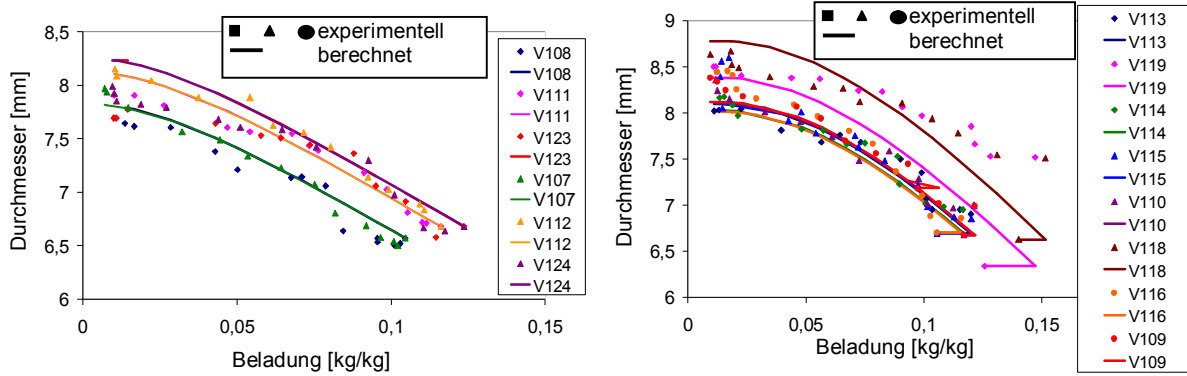


Abbildung 5.4 Modellierung Durchmesser (Ergebnisse): Vergleich von berechnetem und gemessenem Partikeldurchmesser für Röstversuche in Luft (links) und in Dampf (rechts)

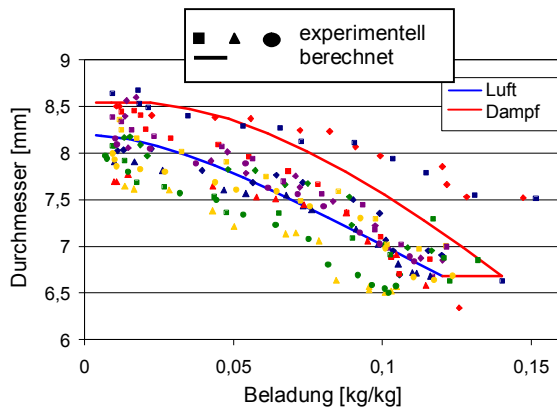


Abbildung 5.5 Modellierung Durchmesser (Ergebnisse): Berechnete und gemessene Partikeldurchmesser für Röstversuche in Luft und in Dampf

Zur Einschätzung der Ergebnisse ist der berechnete Wert jeden Versuches über dem dazugehörigen Messwert in Abbildung 5.4 und Abbildung 5.6 abgetragen. Zusätzlich sind Fehlerlinien von 10 % eingezeichnet. Im Rahmen dieser Fehlerschranke ist eine gute Übereinstimmung erkennbar.



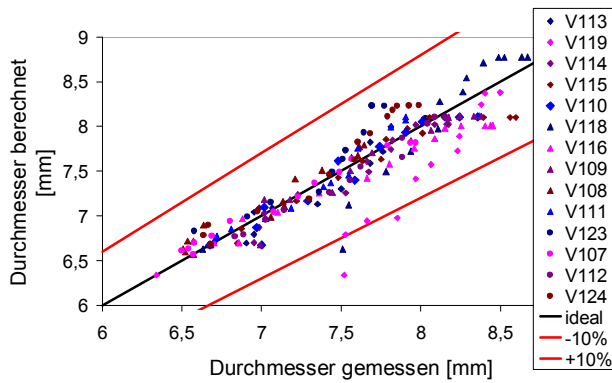


Abbildung 5.6 Modellierung Durchmesser, Fehler

### 5.1.4.4 Berechnung der Änderung des Röstverlustes

Der Röstverlust beim Rösten von Kaffeebohnen ergibt sich entsprechend Gl. 19. Der röstzeitabhängige Zusammenhang für den Röstverlust ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Der Röstverlust nimmt über die gesamte Röstzeit zu und erreicht bei fortschreitender Röstung wahrscheinlich keinen konstanten Endwert. Ebenfalls dargestellt ist der Zusammenhang zur Beladung. Der Verlauf erscheint zu Beginn der Röstung linear und geht im weiteren Verlauf an einem spezifischen Knickpunkt in einen stark ansteigenden Kurvenverlauf über, bis die hygroskopische Endbeladung erreicht wird.

Der Röstverlust steigt nach Erreichen dieser Endbeladung noch weiter an. Der Einfluss der Rösttemperatur ist erkennbar in den maximalen Röstverlusten. Der Verlauf der Kurven selbst wird jedoch nicht deutlich beeinflusst. In die Gleichungsbestimmung geht die Temperatur daher nicht ein.

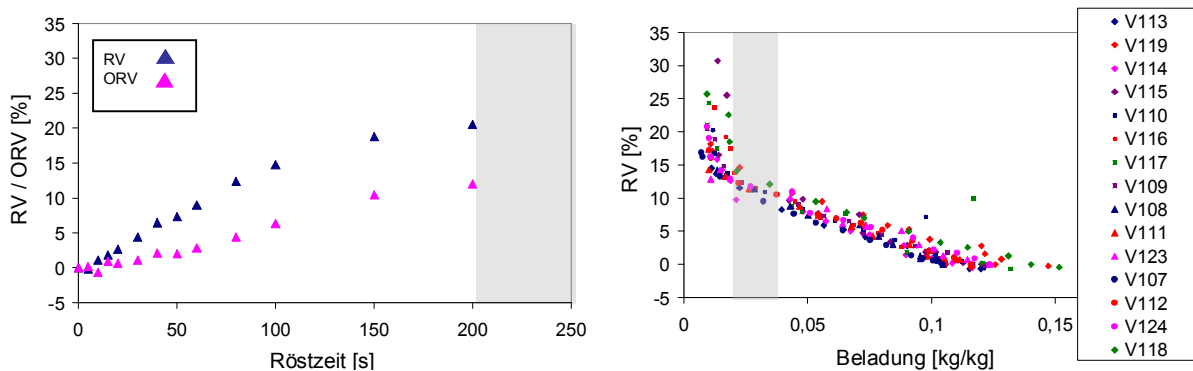


Abbildung 5.7 Modellierung Röstverlust: Darstellung der Messergebnisse RV zeitabhängig für V109 (links) und beladungsabhängig (rechts)

In Abbildung 5.9 sind die Versuche zum Kaffeerösten in Wasserdampf bei 230 °C dargestellt. Eingezeichnet sind die Versuche unterschiedlicher Dampf-Masseströme. Die Messpunkte der Versuche bei  $36 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ,  $60 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  und  $72 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  liegen sehr dicht beieinander, der Versuch bei  $48 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  liegt etwas über den anderen Kurven. Der Gas-Massestrom hat auf die durchgeführten Versuche keinen deutlichen Einfluss und wird für die Gleichungsbestimmung zum Röstverlust vernachlässigt. Dasselbe

Ergebnis zeigt sich in den anderen Diagrammen in Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 für weitere Versuchsparemeter.

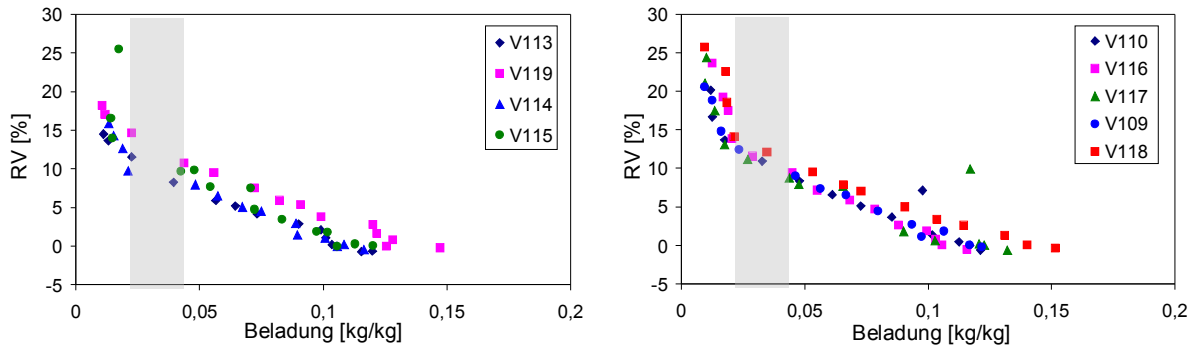


Abbildung 5.8 Messergebnisse Dampffröstung RV, Massestrom variiert,  $T = 230\text{ °C}$  (links) und  $T = 250\text{ °C}$  (rechts)

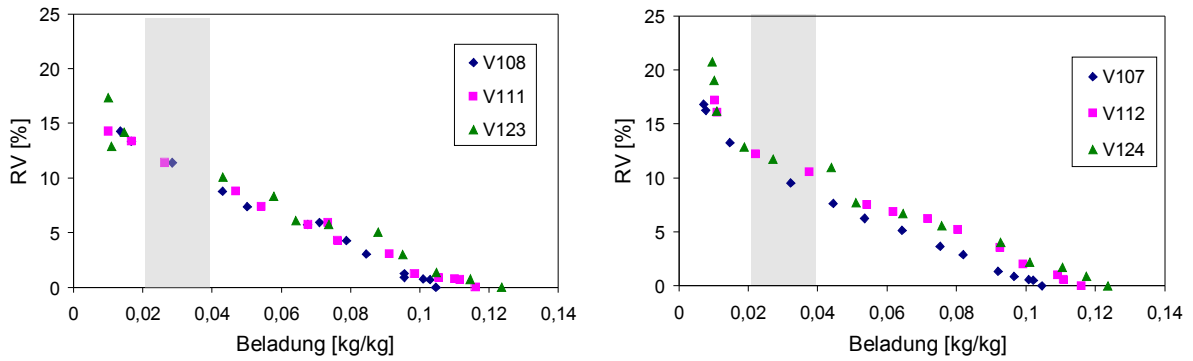


Abbildung 5.9 Messergebnisse Luftröstung RV, Massestrom variiert,  $T = 230\text{ °C}$  (links) und  $T = 250\text{ °C}$  (rechts)

**Ermittlung der maximalen Röstverluste:**

Zur Bestimmung des Masseverlustes in den Approximationsgleichungen wird ein Röstverlust bei Erreichen der hygroskopischen Endbeladung benötigt. Aus den hierfür geeigneten Versuchen (nahe der hygroskopischen Endbeladung) wurden entsprechend die Mittelwerte des Röstverlustes gebildet und aufgerundet. Diese Werte stellen nur Schätzungen dar, welche die Approximationsgleichungen auf diese Werte begrenzen sollen. Es wird von einer hygroskopischen Endbeladung von  $0,0037 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$  bei Santos-Kaffee ausgegangen. Ausgewertet wurden nur die Versuche für Santos-Kaffee bei einer Chargenmasse von 200 g. Andere Kaffeesorten und andere Chargengrößen zeigen ein abweichendes Verhalten (vergl. Anhang).

Vers.-Nr.	$X_{\text{ein}}$	$X_{\text{aus}}$	$g_{\text{Gas ein}}$	RV	Gasart	Bemerkung	$\overline{\text{RV}}_{\text{ende}}$ Versuche	$\overline{\text{RV}}_{\text{hyg}}$ geschätzt
007	0,088	0,0034	230	19	Luft	Feuchtemessung	18,5	20
166	0,129	0,0073	230	18	Luft	$X_{\text{hyg}}$ nicht erreicht		
017	0,088	0,003	230	20	Luft	$X_{\text{hyg}}$ erreicht		
123	0,129	0,001	230	17	Luft	Feuchtemessung		
170	0,129	0,005	250	28	Luft	$X_{\text{hyg}}$ nicht erreicht	28	30
041	0,088	0,0036	250	28	Luft	Feuchtemessung		
183	0,14	0,007	230	23	Dampf	$X_{\text{hyg}}$ nicht erreicht	22,5	25
186	0,129	0,007	230	23	Dampf	$X_{\text{hyg}}$ nicht erreicht		
178	0,14	0,0026	250	31	Dampf	$X_{\text{hyg}}$ erreicht	32,5	35
202	0,129	0,0041	250	33	Dampf	$X_{\text{hyg}}$ erreicht		
208	0,129	0,0056	250	32	Dampf	$X_{\text{hyg}}$ nicht erreicht		
212	0,129	0,0057	250	33	Dampf	$X_{\text{hyg}}$ nicht erreicht		

Tabelle 13 Modellierung Röstverlust (hygroskopische Endbeladung)

**Herleitung der Gleichung:**

Als Abhängigkeit für eine Gleichung wurde die Beladung gewählt. Weitere Einflussparameter sind das Röstgas und die Temperatur für die Röstverluste bei Erreichen der hygroskopischen Feuchte. Andere mögliche Abhängigkeiten waren aus den Versuchen nicht eindeutig zu erkennen.

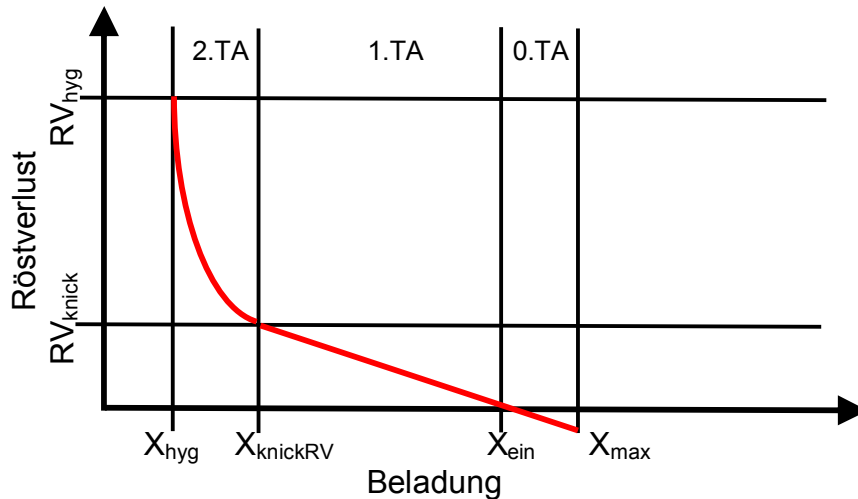


Abbildung 5.10 Modellvorstellung Röstverlust

Der Verlauf des RV als Funktion der Beladung lässt sich in 3 Abschnitte teilen: ein linearer negativer Abschnitt für Kondensation bei Dampfrostung, ein linearer Abschnitt und ein exponentieller Abschnitt, welcher bis zum Erreichen der hygroskopischen Beladung und dem dazugehörigen Endwert für den Röstverlust (hygroskopischer Röstverlust) geht. Wird noch weiter geröstet, wird der Röstverlust als nicht weiter veränderlich angenommen.

Im Abschnitt  $X_{ein} \geq X \geq X_{knickRV}$  sollen alle Messpunkte von RV aller Versuchsreihen auf einer Geraden liegen. Die Beschreibung der Messwerte im mathematischen Modell soll in diesem Intervall mit einer Geradengleichung durchgeführt werden. Die Gleichung beschreibt den Verlust der Wassermasse während der Trocknung (Gl. 76). Da bereits in diesem Intervall ein Verlust an Trockensubstanz hinzukommt, wird ein Korrekturfaktor für den organischen Röstverlust ( $k_{ORV}$ ) eingeführt (Gl. 78). Dieser Faktor wird aus den durchgeführten Versuchen jeweils für Luft und Dampf bestimmt. Das Kondensationsintervall wird ebenfalls durch diese Gleichung beschrieben.

Gl. 76 Wasserverlust bei der Röstung (Trocknung):

$$RV_w = 100 \cdot \frac{X_{ein} - X}{X_{ein} + 1} \quad [\%]$$

Gl. 77 1. TA für  $RV = f(X)$ :

$$X_{ein} \geq X \geq X_{knickRV}$$

Gl. 78 Röstverlust für 0. und 1. TA:

$$RV_{TA01}(X) = 100 \cdot \frac{X_{ein} - X}{X_{ein} + 1} \cdot k_{ORV} \quad [\%]$$

Um den wahren Röstverlust im 2. Abschnitt für  $X_{knickRV} \geq X \geq X_{hyg}$  abzuschätzen, erfolgt eine Anpassung dieser Geradengleichung mit einer Exponentialfunktion (Gl. 80) zum gesamten Röstverlust (Gl. 81).

Gl. 79 2. TA für RV = f(X):

$$X_{\text{knickRV}} \geq X \geq X_{\text{hyg}}$$

Gl. 80 Röstverlust 2. TA:

$$RV_{\text{TA2}}(X) = A \cdot e^{(B \cdot X + C)} \quad [\%]$$

Gl. 81 Röstverlust gesamt:

$$RV(X) = 100 \cdot \frac{X_{\text{ein}} - X}{X_{\text{ein}} + 1} \cdot k_{\text{ORV}} + A \cdot e^{(B \cdot X + C)} \quad [\%]$$

Nach dem Einsetzen der hygroskopischen Endbeladung  $P_{\text{hyg}}(X_{\text{hyg}}, RV_{\text{hyg}})$  ergibt sich eine Gleichung mit nur noch einer Abhängigkeit, für welche noch  $X_{\text{ein}}$ ,  $RV_{\text{hyg}}$  und  $k_{\text{ORV}}$  benötigt werden (Gl. 82).

Gl. 82 Röstverlust:

$$RV(X) = 100 \cdot \frac{X_{\text{ein}} - X}{X_{\text{ein}} + 1} \cdot k_{\text{ORV}} + \left( RV_{\text{hyg}} - 100 \cdot \frac{X_{\text{ein}} - X_{\text{hyg}}}{X_{\text{ein}} + 1} \cdot k_{\text{ORV}} \right) \cdot e^{B \cdot (X - X_{\text{hyg}})} \quad [\%]$$

**Bestimmung der Parameter:**

Eine Übersicht über alle benötigten Parameter ist in Tabelle 14 gegeben. Die Korrekturfaktoren  $k_{\text{ORV}}$  für Luft und Dampf wurden aus den Versuchsreihen mit 1,4 und 1,5 ermittelt. Hieran ist ersichtlich, die Röstung in Dampf verläuft intensiver als die entsprechende Röstung in Luft. Der Verlust an Trockensubstanz im ersten Trocknungsabschnitt fällt um 10 % höher aus. Der Anpassungsparameter A wurde über Chem-Fit bestimmt. Die Genauigkeit  $R_{xy}^2$  ist mit über 0,97 gut.

		Dampf 230 °C	Dampf 250 °C	Luft 230 °C	Luft 250 °C	Ermittlung
A	[-]	-130		-250		Chem-Fit
$k_{\text{ORV}}$	[-]	1,5		1,4		experimentell
$RV_{\text{hyg}}$	[%]	25	35	20	30	experimentell
F	[-]	2,31		0,988		
$R_{xy}^2$	[-]	0,98		0,973		

Tabelle 14 Modellierung Röstverlust (Ergebnisse)

Damit ergeben sich die Ergebnisgleichungen zu Gl. 83 für Luftröstung und Gl. 84 für Dampfrostung.

Gl. 83 Röstverlust für Luft:

$$RV(X)_L = 100 \cdot \frac{X_{\text{ein}} - X}{X_{\text{ein}} + 1} \cdot 1,4 + \left( RV_{\text{hyg}} - 100 \cdot \frac{X_{\text{ein}} - X_{\text{hyg}}}{X_{\text{ein}} + 1} \cdot 1,4 \right) \cdot e^{-250 \cdot (X - X_{\text{hyg}})} \quad [\%]$$

Gl. 84 Röstverlust für Dampf:

$$RV(X)_D = 100 \cdot \frac{X_{\text{ein}} - X}{X_{\text{ein}} + 1} \cdot 1,5 + \left( RV_{\text{hyg}} - 100 \cdot \frac{X_{\text{ein}} - X_{\text{hyg}}}{X_{\text{ein}} + 1} \cdot 1,5 \right) \cdot e^{-130 \cdot (X - X_{\text{hyg}})} \quad [\%]$$

Die Darstellungen in Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 zeigen die berechneten Kurven in den Messpunkten bei jeweils Luft, Dampf und den unterschiedlichen Temperaturen.

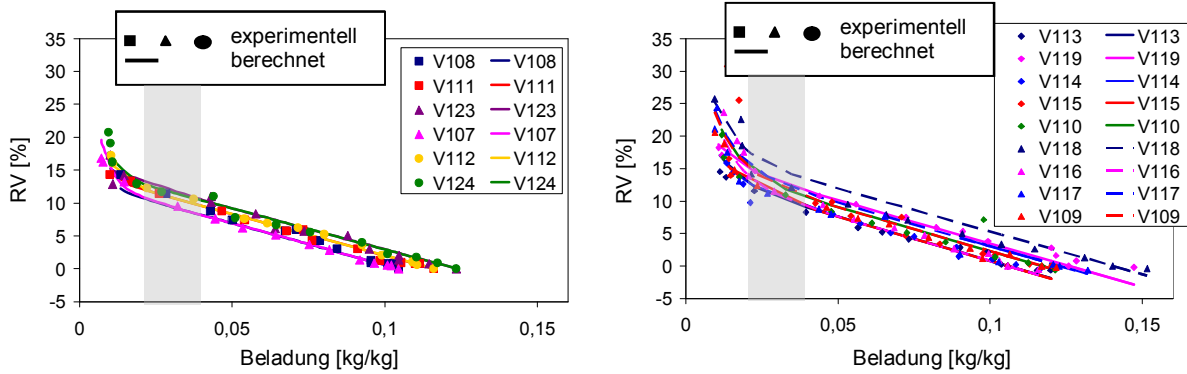


Abbildung 5.11 Ergebnisse der Modellierung RV für Lufröstung (links) und Dampfröstung (rechts)

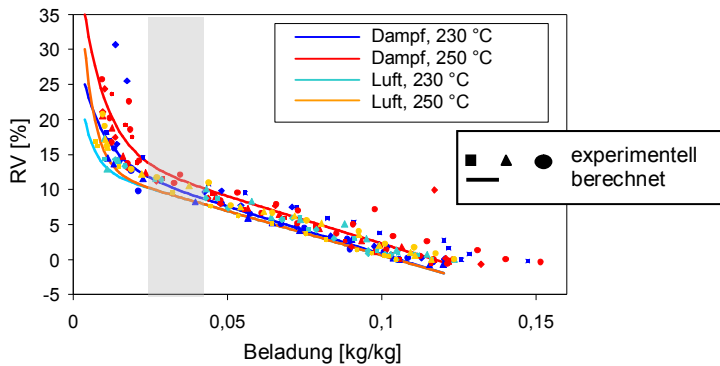


Abbildung 5.12 Modellierung Röstverlust (Ergebnisse): alle Versuche gemessen und berechnet

**Fehlerbetrachtung:**

In Abbildung 5.13 sind die berechneten Punkte über den gemessenen dargestellt. Zusätzlich sind Fehler von 20 % eingezeichnet. Bis auf wenige Ausreißer liegen die Messpunkte in diesen Schranken. Die Streuung in der Nähe von Null ergibt sich aus den Messfehlern.

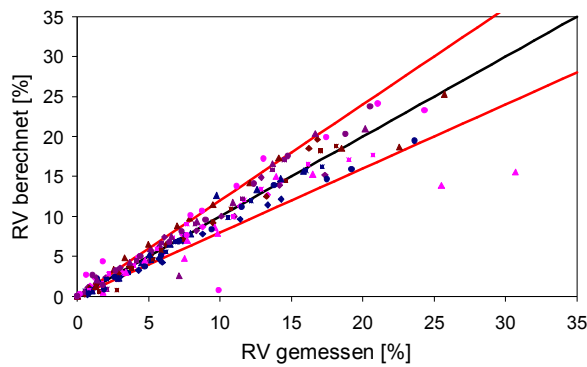


Abbildung 5.13 Modellierung Röstverlust: Fehlerschranken für den berechneten Röstverlust in Abhängigkeit vom gemessenen Röstverlust

### 5.1.4.5 Berechnung der Änderung der Partikeldichte

Die Dichte der Kaffeebohnen während des Röstprozesses nimmt ab. Betrachtet wird hier die scheinbare Partikeldichte. Kurz nach Beginn der Röstung ist die Dichteänderung am größten und bewegt sich dann gegen einen konstanten Endwert.

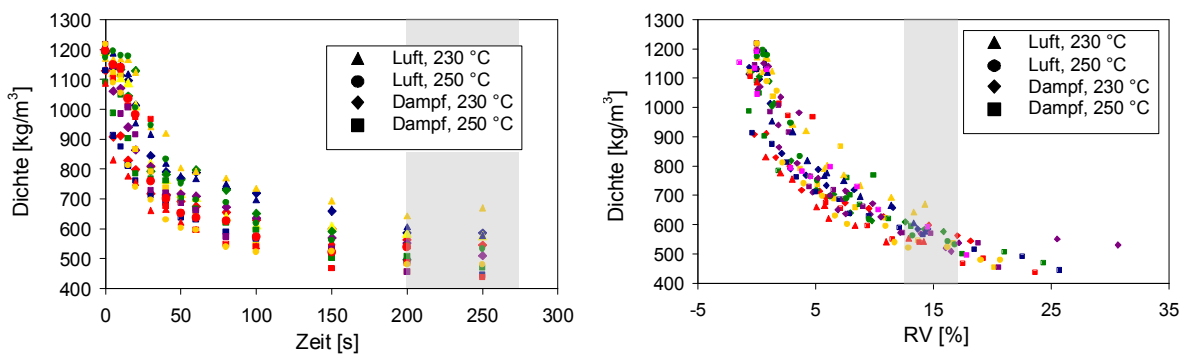


Abbildung 5.14 Messergebnisse der Dichte in Abhängigkeit von Röstzeit (links) und Röstverlust (rechts)

In Abbildung 5.14 ist der Einfluss des Röstverlustes auf die Dichteänderung abgetragen. Hier ist erkennbar; mit steigendem Röstverlust nimmt die Dichte immer weniger stark ab.

In Abbildung 5.15 ist der Einfluss der Beladung auf die Dichte dargestellt. Dieser Zusammenhang wurde gewählt, da die Beladung direkt aus einem Trocknungsmodell erhältlich ist, während der Röstverlust bzw. der organische Röstverlust, welcher vielleicht direkt verantwortlich für die Dichteänderung ist, erst über eine eigene Approximationsgleichung bestimmt werden muss.

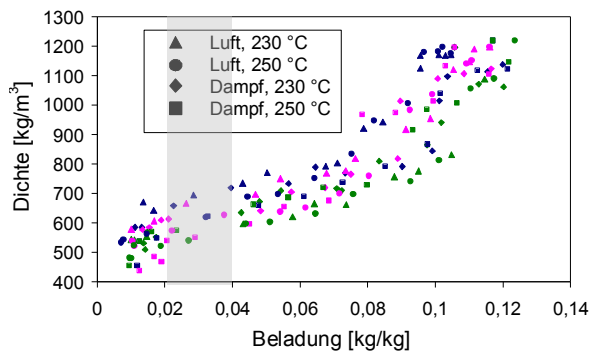


Abbildung 5.15 Messergebnisse Dichte in Abhängigkeit von der Beladung

**Herleitung der Gleichung:**

Wie in Abbildung 5.16 zu sehen ist, wird die Dichteänderung in 2 Abschnitte aufgeteilt: einen exponentiellen Abschnitt für die starke Änderung zu Beginn des Röstprozesses und einen linearen Bereich für die geringere Änderung im fortschreitenden Röstprozess bis zu einen konstanten Endwert.

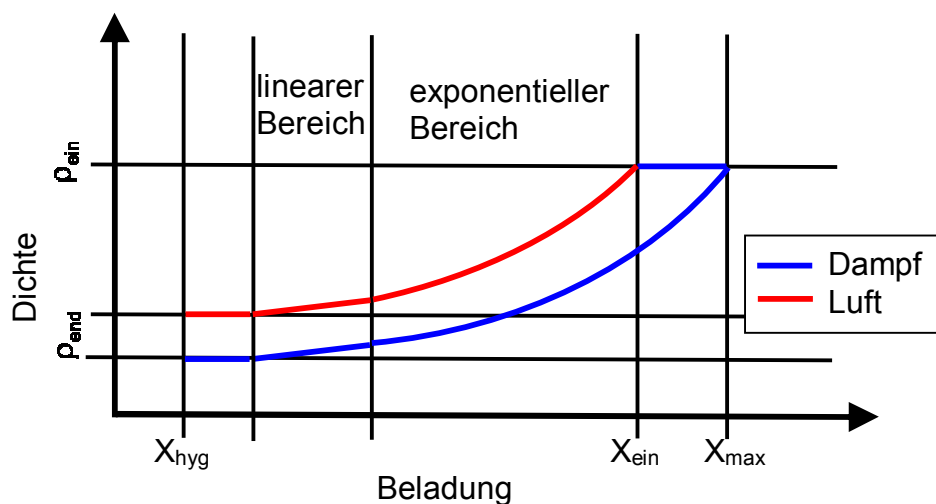


Abbildung 5.16 Modellvorstellung für die Dichteberechnung

Die Berechnungsgleichung für die Dichte setzt sich aus einem linearen und einem exponentiellen Teil zusammen (Gl. 85). Für die Gleichung werden die Rohkaffee-Werte für Beladung und Dichte benötigt. Die Enddichte wurde aus den durchgeführten Röstversuchen in Abhängigkeit von Röstgas und -temperatur bestimmt (Tabelle 15).

Gl. 85 Berechnungsgleichung Dichte:

$$\rho(X) = \rho_{ein} + A \cdot (X - X_{ein}) + B \cdot (e^{(C \cdot X + D)} - e^{(C \cdot X_{ein} + D)}) \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Gl. 86 Randbedingung:

$$\rho_{n+1}(X) \leq \rho_n(X)$$



Gl. 87 Randbedingung:

$$\rho(X) \geq \rho_{\text{end}}$$

Gl. 88 Kondensationsbedingung bei Dampfrostung:

$$\rho(X) = \rho_{\text{ein}} \text{ bis } X = X_{\text{max}}$$

**Parameterbestimmung:**

Die Anpassungsparameter A, B, C, D wurden mittels Chem-Fit in Abhängigkeit von Gasart und Rösttemperatur berechnet,  $\rho_{\text{end}}$  wurde aus den Röstversuchen bestimmt. Die Genauigkeit mit über 0,97 ist in allen Fällen gut.

		Luft 230 °C	Luft 250 °C	Dampf 230 °C	Dampf 250 °C
A	[-]	2550	2900	2500	3060
B	[-]	1200	1400	2800	2070
C	[-]	45	64	45	41
D	[-]	-6,5	-8,5	-7	-6,4
$\rho_{\text{end}}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	550	550	450	450
F	[-]	57	134	165	116
$R^2_{xy}$	[-]	0,997	0,98	0,972	0,986

Tabelle 15 Modellierung Dichte (Ergebnisse)

Die berechneten Kurven sind in den folgenden Abbildungen in die Messwert-Punkte eingezeichnet.

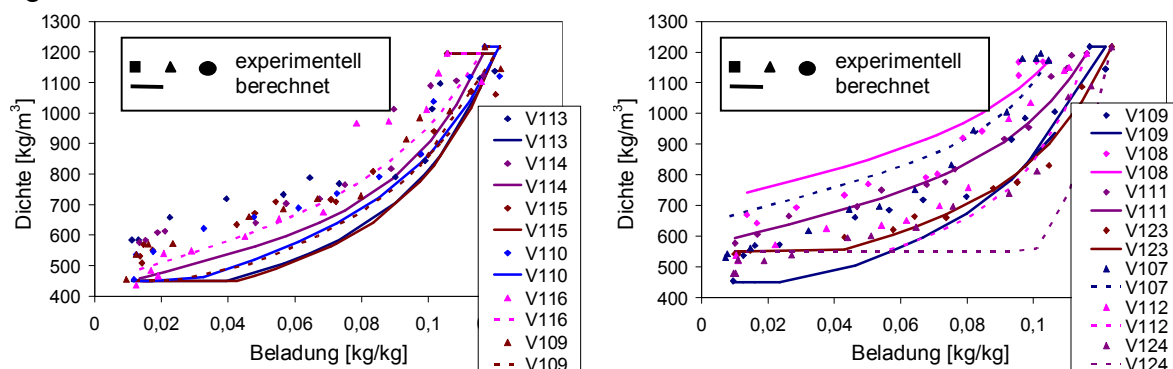


Abbildung 5.17 Modellierung Dichte, Ergebnisse berechnet und gemessen für Dampf (links) und Luft (rechts)

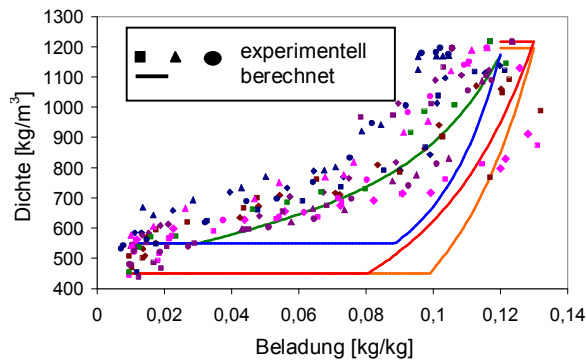


Abbildung 5.18 Modellierung Dichte, Ergebnisse allgemein

**Fehlerbetrachtung:**

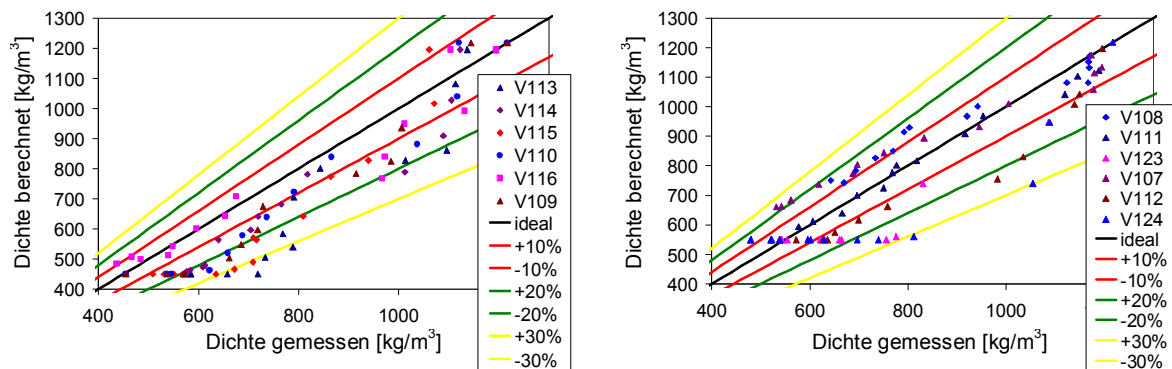


Abbildung 5.19 Fehler aus Modellierung Dichte für Dampf (links) und Luft (rechts) ohne Ausreißer

Wie in Abbildung 5.19 zu sehen ist, beträgt der Fehler zu den experimentellen Werten nicht mehr als 30 %. Ein Problem bei dieser Gegenüberstellung sind die Messwerte selbst; die manuelle Dichtebestimmung unterliegt Schwankungen.

**5.1.4.6 Berechnung der Kohlenwasserstoff-Emissionen**

Die umfangreichsten Versuchsreihen wurden zu den beim Rösten von Kaffeebohnen in einer Wirbelschicht auftretenden Kohlenwasserstoff-Emissionen durchgeführt. In Abbildung 5.20 ist der zeitliche Verlauf für zwei Versuche bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Dieser Verlauf war für die meisten Versuche typisch: nach einem Zeitraum am Anfang des Röstprozesses, in dem wenig oder keine Emissionen auftreten, steigt die Kurve sehr steil an. Sie erreicht einen Maximumpunkt zwischen 200 s und 300 s Röstzeit und fällt dann flacher werdend ab. Diese Versuchsreihen liefen über 600 s Röstzeit. Die Kaffeebohnen waren im Anschluss sehr stark überröstet. Für eine konsumierbare Röstung würde im vorliegenden Fall eine Röstzeit von 200 s bis 300 s ausreichen, also etwa das Erreichen des Emissionsmaximums an Kohlenwasserstoffen.

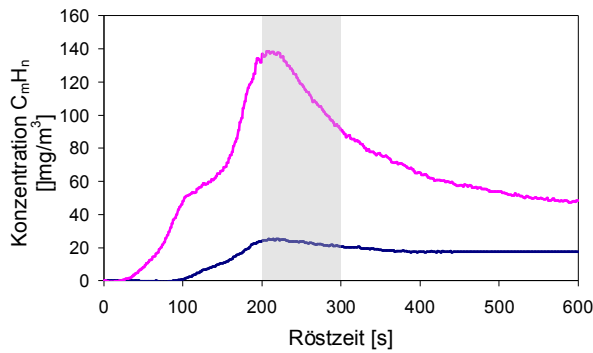


Abbildung 5.20 Messergebnisse als zeitabhängige Konzentration [ppm] der Emissionen bei unterschiedlicher Temperatur (230 °C: V017, 250 °C: V041)

Die Einflüsse von Chargengröße, Temperatur, Kaffeesorte und Gasart waren auf die gemessenen Werte groß. Daher wurden die Chargenmasse und die Kaffeesorte konstant gehalten. Der Einfluss des Gasmassstromes auf den Chargenmassenbezogenen-Kohlenwasserstoff-Emissionsstrom war nur klein (Abbildung 5.23) und wurde vernachlässigt. Für diese Auswertung wurden die Versuche mit Santos-Kaffee und 200 g Chargenmasse genutzt.

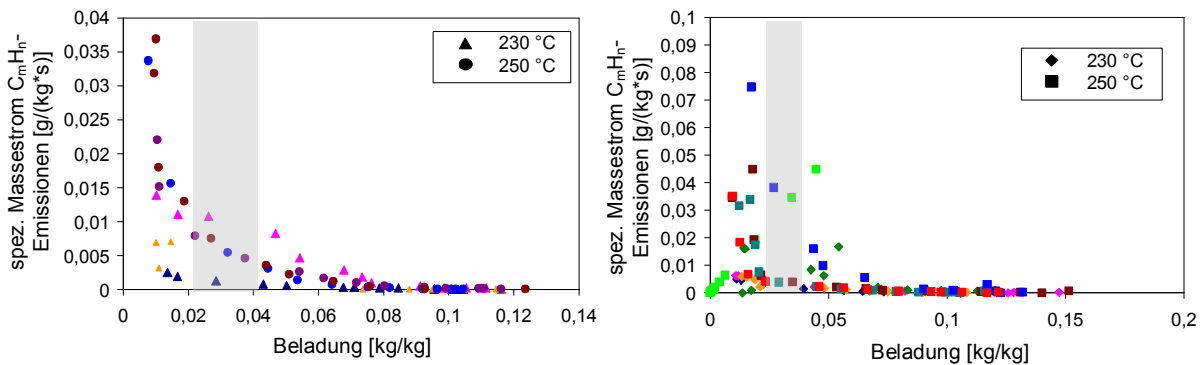


Abbildung 5.21 Temperaturabhängigkeit des spezifischen Emissionsmassesstroms bei Luftröstung (links) und Dampfröstung (rechts)

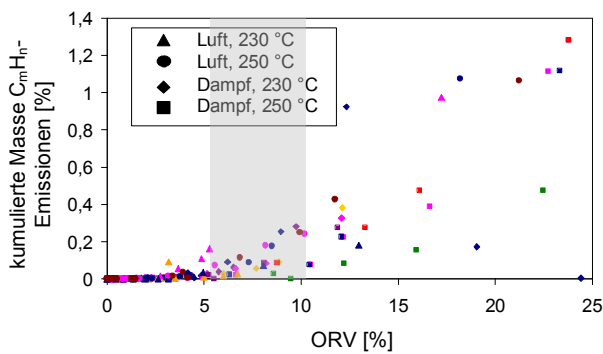


Abbildung 5.22 Durch  $C_mH_n$ -Emissionen verlorene Masse bezogen auf die Chargenmasse Rohkaffee

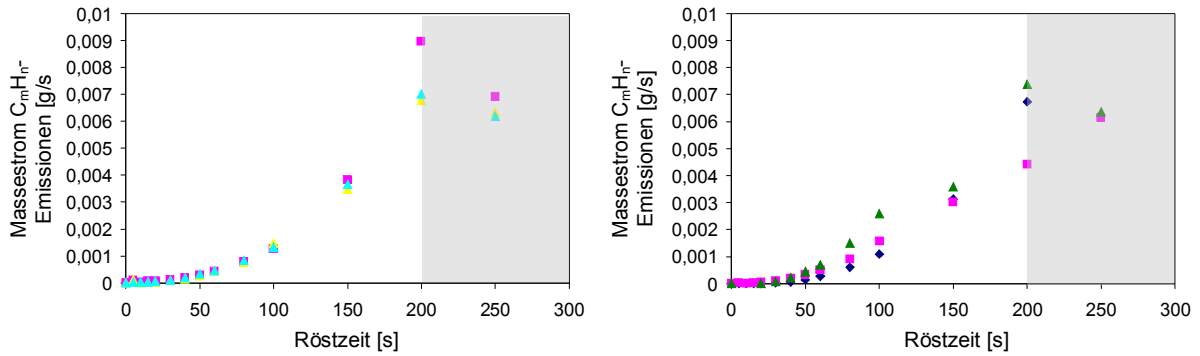


Abbildung 5.23 Variation des Gasmassestromes bei 250 °C bei Dampfrostung (links: V109, V110, V116, V118) und Luftröstung (rechts: V107, V112, V124)

In den Diagrammen zu den Emissionsmessungen (z. B. in Abbildung 5.23) ist keine deutliche Abhängigkeit vom Gasmassestrom zu sehen. Dieser wurde in den Abschätzungen für den Verlauf nicht mehr berücksichtigt. Deutliche Unterschiede sind jedoch für verschiedene Temperaturen und Röstgase zu erkennen (Abbildung 5.20, Abbildung 5.21, Abbildung 5.22 und Abbildung 5.24).

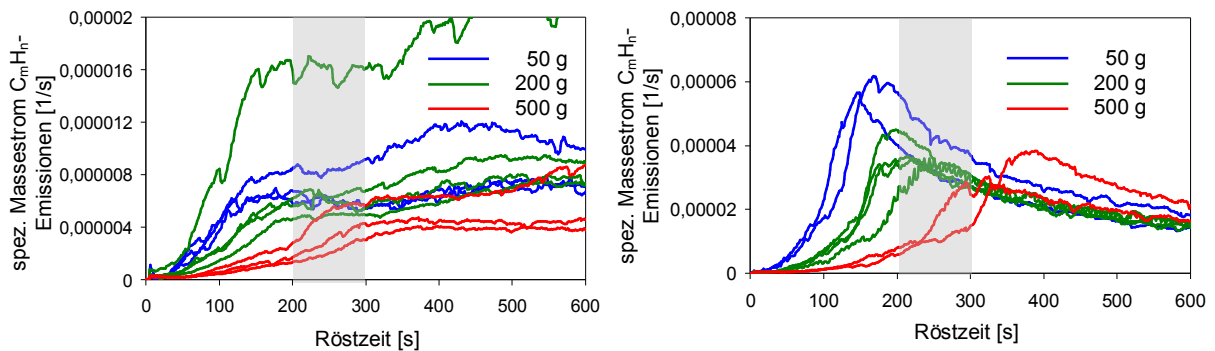


Abbildung 5.24 spez. Emissionsmassenstrom bei unterschiedlicher Chargenmasse für Dampfrostung bei 230 °C (links) und 250 °C (rechts)

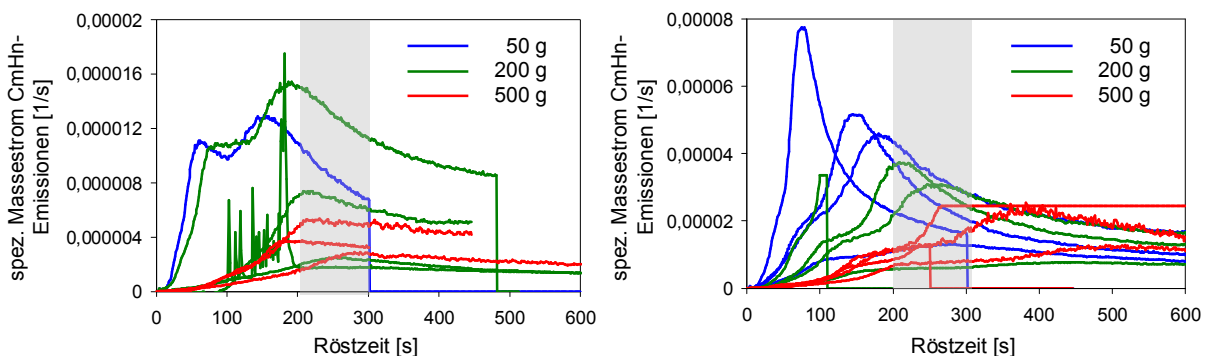


Abbildung 5.25 Spez. Emissionsmassenstrom bei unterschiedlicher Chargenmasse für Luftröstung bei 230 °C (links) und 250 °C (rechts)

Für die Modellvorstellung zur Berechnung wurde der Röstverlust ausgewählt. Eine Übersicht bietet Abbildung 5.24. Weiterhin zu berücksichtigen sind die Temperatur und die Röstgasart.

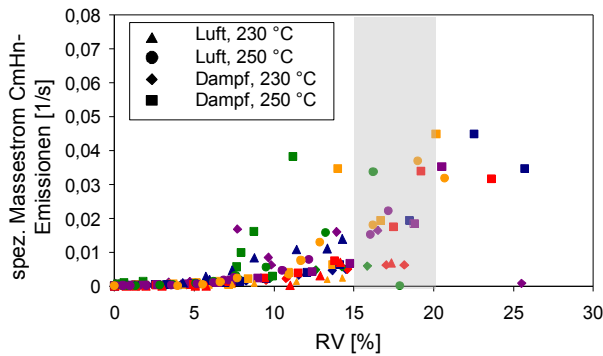


Abbildung 5.26 Spez. Massestrom der  $C_mH_n$ -Emissionen in Abhängigkeit vom RV

**Herleitung der Gleichung:**

Die Darstellung der  $C_mH_n$ -Emissionen soll als spezifischer Emissionsmassenstrom erfolgen. Diese Beziehung wird jedoch nur für die mit 200 g Chargenmasse durchgeführten Versuche hergeleitet. Der Zusammenhang mit den Versuchen bei 50 g und 500 g ist nicht linear. Die Ursachen hierfür sind schwer abzuschätzen, so gab es einige Versuche mit einer Chargenmasse von 500 g, die in der Wirbelschicht eine schlechte Durchmischung und innerhalb der Charge unterschiedliche Röstgrade zeigten.

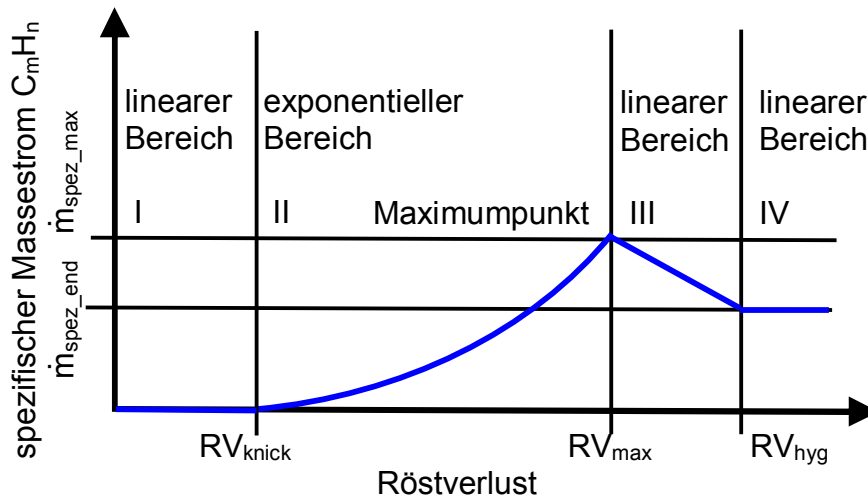


Abbildung 5.27 Modellierung Emissionen (Modellvorstellung)

Entsprechend der Abbildung wird der Verlauf in vier Abschnitte aufgeteilt (Abbildung 5.27). Für  $RV_{knick} \geq RV$ , den Abschnitt I, ist keine Emissionsentwicklung erkennbar, daher beträgt der spezifische Massestrom der Kohlenwasserstoff-Emissionen 0 (Gl. 89).

Gl. 89 spezifischer Massestrom der Kohlenwasserstoff-Emissionen für Abschnitt I:

$$\frac{\dot{m}_{C_m H_n}}{m_{\text{Charge}}_{RV \leq RV_{\text{knick}}}} = 0 \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

Für den Abschnitt II (Abbildung 5.27) scheint die Entstehung von  $C_m H_n$ -Emissionen einer polynomischen oder exponentiellen Funktion zu folgen.  $RV_{\text{max}}$  kennzeichnet den Röstverlust am Punkt maximaler Emissionen. Für die mathematische Beschreibung wurde eine quadratische Gleichung ausgewählt (Gl. 90).

Gl. 90 spezifischer Massestrom der Kohlenwasserstoff-Emissionen, quadratische Gleichung für Abschnitt II:  
 $\dot{m}_{\text{spez}}(RV) = A + B \cdot RV + C \cdot RV^2$

Gl. 91 Scheitelpunkt der Parabel (Gl. 90):

$$SP\left(-\frac{B}{2 \cdot C}; \frac{4 \cdot A \cdot C - B^2}{4 \cdot C}\right) = SP(RV_{\text{knick}}; 0)$$

Aus dem Scheitelpunkt (Gl. 91) der quadratischen Gleichung (Gl. 90) sind die Parameter A und C beschreibbar.

Gl. 92 Parameter A aus Gl. 91:

$$A = -\frac{1}{2} \cdot B \cdot RV_{\text{knick}}$$

Gl. 93 Parameter C aus Gl. 91:

$$C = -\frac{B}{2 \cdot RV_{\text{knick}}}$$

Es verbleibt nach dem Einsetzen nur noch Parameter B, welcher ab hier als A bezeichnet wird, und  $RV_{\text{knick}}$  als Kenngröße aus dem Röstprozess (Gl. 94).

Gl. 94 spezifischer Massestrom der Kohlenwasserstoff-Emissionen, Gleichung für Abschnitt II:

$$\frac{\dot{m}_{C_m H_n}}{m_{\text{Charge}}_{RV_{\text{knick}} \leq RV \leq RV_{\text{max}}}} = \frac{A}{2} \cdot \left(2 \cdot RV - \frac{RV^2}{RV_{\text{knick}}} - RV_{\text{knick}}\right) \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

Gl. 95 Knickpunkt Dampf für Gl. 94:

$$RV_{\text{knick D}} = 5 \%$$

Gl. 96 Knickpunkt Luft für Gl. 94:

$$RV_{\text{knick L}} = 4 \%$$

Für  $RV \geq RV_{\text{max}}$ , den Abschnitt III, wird ein linearer Zusammenhang angenommen (Gl. 97). Unter Festlegung der beiden Bezugspunkte für das Maximum (Gl. 98) und das Ende (Gl. 99) ergibt sich die Gleichung (Gl. 100).

Gl. 97 spezifischer Massestrom der Kohlenwasserstoff-Emissionen, Gleichung für Abschnitt III:

$$\dot{m}_{\text{spez}} = D + E \cdot RV$$

Gl. 98 Maximumpunkt des spezifischen Massestromes der Kohlenwasserstoff-Emissionen:

$$\text{Maximum}(RV_{\max}; \dot{m}_{\text{spez max}})$$

Gl. 99 Endpunkt des spezifischen Massestromes der Kohlenwasserstoff-Emissionen:

$$\text{Ende}(RV_{\text{end}}; \dot{m}_{\text{spez end}})$$

Gl. 100 spezifischer Massestrom der Kohlenwasserstoff-Emissionen, Gleichung für Abschnitt III:

$$\frac{\dot{m}_{\text{C}_m\text{H}_n}}{m_{\text{Charge } RV_{\max} \leq RV = RV_{\text{hygr}}}} = \frac{(RV - RV_{\max}) \cdot (\dot{m}_{\text{spez end}} - \dot{m}_{\text{spez max}})}{RV_{\text{end}} - RV_{\max}} + \dot{m}_{\text{spez max}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

In Gl. 100 für Abschnitt III sind der Maximumpunkt und der Endpunkt enthalten;  $RV_{\text{end}}$ ,  $\dot{m}_{\text{spez max}}$  und  $\dot{m}_{\text{spez end}}$  ergeben sich aus den durchgeführten Emissions-Röstversuchen. Der Wert für  $RV_{\max}$  wird aus Gl. 101 mit  $\text{Maximum}(RV_{\max}; \dot{m}_{\text{spez max}})$  zu Gl. 102 bzw. Gl. 103 bestimmt.

Gl. 101 spezifischer Massestrom der Kohlenwasserstoff-Emissionen Gleichung für den Maximumpunkt (Gl. 98):

$$\frac{\dot{m}_{\text{C}_m\text{H}_n}}{m_{\text{Charge } RV_{\max}}} = \frac{A}{2} \cdot \left( 2 \cdot RV - \frac{RV^2}{RV_{\text{knick}}} - RV_{\text{knick}} \right) \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

Gl. 102 maximaler Röstverlust:

$$RV_{\max 1/2} = \frac{2 \cdot A \pm \sqrt{\frac{-8 \cdot A \cdot \dot{m}_{\text{spez max}}}{RV_{\text{knick}}}}}{2 \cdot A} \cdot RV_{\text{knick}}$$

Gl. 103 maximaler Röstverlust anwendbarer Fall:

$$RV_{\max} = \frac{2 \cdot A - \sqrt{\frac{-8 \cdot A \cdot \dot{m}_{\text{spez max}}}{RV_{\text{knick}}}}}{2 \cdot A} \cdot RV_{\text{knick}}$$

Gl. 104 spezifischer Massestrom der Kohlenwasserstoff-Emissionen, Gleichung für Abschnitt IV:

$$\frac{\dot{m}_{\text{C}_m\text{H}_n}}{m_{\text{Charge } RV \geq RV_{\text{hyg}}}} = \dot{m}_{\text{spez max}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

Für den letzten Abschnitt, Abschnitt IV, für  $RV \geq RV_{\text{end}}$  wird  $\dot{m}_{\text{spez max}}$  als konstanter Endwert angenommen (Gl. 104).

Eine Übersicht der Gleichungen für die einzelnen Abschnitte ist im Folgenden nochmals gegeben:

Gl. 89      Abschnitt I oder  $RV_{\text{knick}} \geq RV$  :

$$\frac{\dot{m}_{\text{CmHn}}}{m_{\text{Charge } RV \leq RV_{\text{knick}}}} = 0 \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

Gl. 94      Abschnitt II oder  $RV_{\text{knick}} \leq RV \leq RV_{\text{max}}$  :

$$\frac{\dot{m}_{\text{CmHn}}}{m_{\text{Charge } RV_{\text{knick}} \leq RV \leq RV_{\text{max}}}} = \frac{A}{2} \cdot \left( 2 \cdot RV - \frac{RV^2}{RV_{\text{knick}}} - RV_{\text{knick}} \right) \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

Gl. 100     Abschnitt III oder  $RV \geq RV_{\text{max}}$  :

$$\frac{\dot{m}_{\text{CmHn}}}{m_{\text{Charge } RV_{\text{max}} \leq RV = RV_{\text{hyg}}}} = \frac{(RV - RV_{\text{max}}) \cdot (\dot{m}_{\text{spez end}} - \dot{m}_{\text{spez max}})}{RV_{\text{end}} - RV_{\text{max}}} + \dot{m}_{\text{spez max}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

Gl. 104     Abschnitt IV oder  $RV \geq RV_{\text{end}}$  :

$$\frac{\dot{m}_{\text{CmHn}}}{m_{\text{Charge } RV \geq RV_{\text{hyg}}}} = \dot{m}_{\text{spez max}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$$

**Parameterbestimmung:**

Parameterübersicht für den nach Chem-Fit berechneten Parameter A, die experimentell bestimmten Parameter  $\dot{m}_{\text{spez max}}$ ,  $RV_{\text{end}} = RV_{\text{hyg}}$ ,  $\dot{m}_{\text{spez end}}$ ,  $RV_{\text{knick}}$  und den berechneten Parameter  $RV_{\text{max}}$ . Die Ergebnisse für Dampf bei 230 °C und Luft bei 250 °C sind mit  $R_{xy}^2 < 0,93$  als gut zu bewerten, die Ergebnisse für Dampf bei 250 °C und Luft bei 230 °C werden ungenauer eingeschätzt. Die Versuchsreihe mit Luft bei 230 °C liefert hier einen besonders schlechten Wert mit  $R_{xy}^2 = 0,41$ . Die Streuung der Messergebnisse war in dieser Versuchsreihe groß, wodurch die Parametersuche schwierig war und die Ergebnisse hierdurch von den Experimenten große Abweichungen aufweisen.

	Dampf 230 °C	Dampf 250 °C	Luft 230 °C	Luft 250 °C
A	-0,0004	-0,001	-0,00078	-0,0017
$\dot{m}_{\text{spez max}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$	0,00832	0,036	0,0049	0,034
$RV_{\text{max}} \left[ \% \right]$	17,05	20,88	13,14	18,73
$\dot{m}_{\text{spez end}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \right]$	0,00778	0,0148	0,00478	0,0146
$RV_{\text{end}} = RV_{\text{hyg}} \left[ \% \right]$	25	35	20	30
$RV_{\text{knick}} \left[ \% \right]$	4	5	4	5
F	0,003	0,004	0,003	0,003
$R_{xy}^2$	0,95	0,86	0,41	0,93

Tabelle 16 Modellierung Emissionen (Ergebnisse)



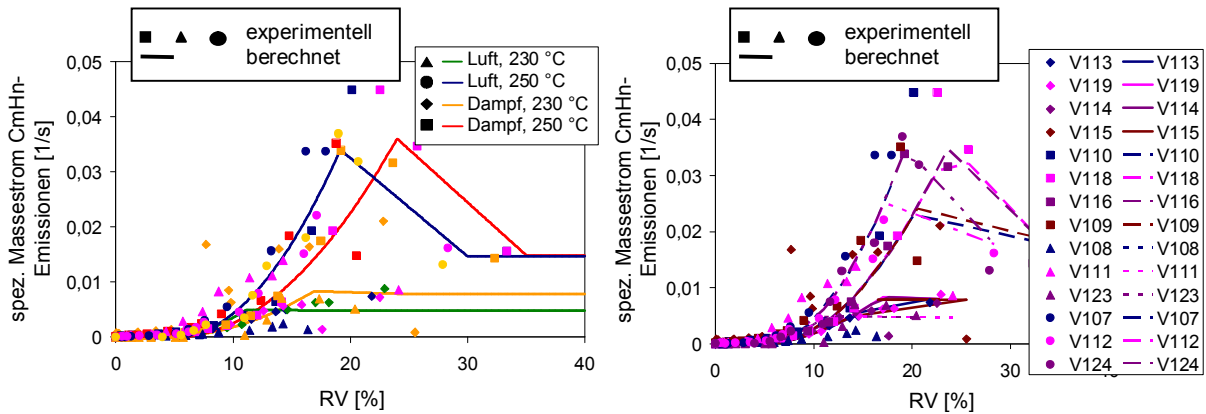


Abbildung 5.28 Allgemeine Darstellung der Berechnungsergebnisse für den spez.  $C_mH_n$ -Emissionsmassenstrom mit den Messpunkten der Versuchsreihen (links) und der spez.  $C_mH_n$ -Emissionsmassenstrom berechnet und gemessen für alle Versuche (rechts)

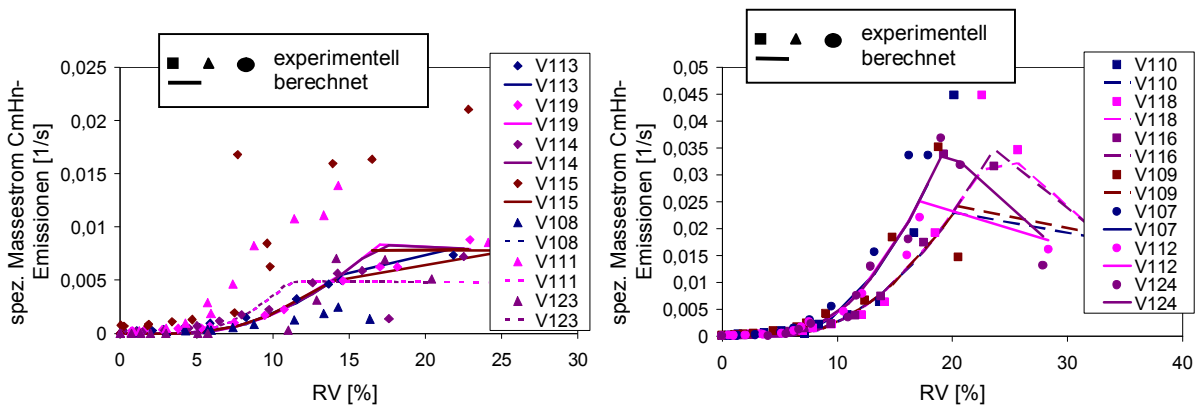


Abbildung 5.29 Spez. Massenstrom der  $C_mH_n$ -Emissionen berechnet und gemessen für alle Röstversuche bei 230 °C (links) und bei 250 °C (rechts)

In den Diagrammen in Abbildung 5.28 und Abbildung 5.29 sind die Ergebniskurven graphisch dargestellt. Zum Teil sind gute Übereinstimmungen erkennbar, zum Teil sind starke Streuungen mit weniger guten Übereinstimmungen erkennbar. Die Diagramme spiegeln die Einschätzung der Genauigkeit  $R_{xy}^2$  (Tabelle 16) wieder.

**Fehlerbetrachtung:**

Die Größenordnung der Abweichungen von berechneten und gemessenen Kurven ist in den Diagrammen in Abbildung 5.30 zur Fehlerschranke ersichtlich. Der Fehler muss hier auf ca. 50 % geschätzt werden. Ein Grund für diese hohe Fehlereinschätzung sind die kleinen absoluten Werte der Messgrößen, bei denen sich schon geringe Messwertschwankungen in hohen Beträgen prozentual bemerkbar machen. Trotz dieser hohen Abweichungen sollen diese Berechnungsgleichungen in der Modellierung zur Abschätzung von  $C_mH_n$ -Emissionen genutzt werden.

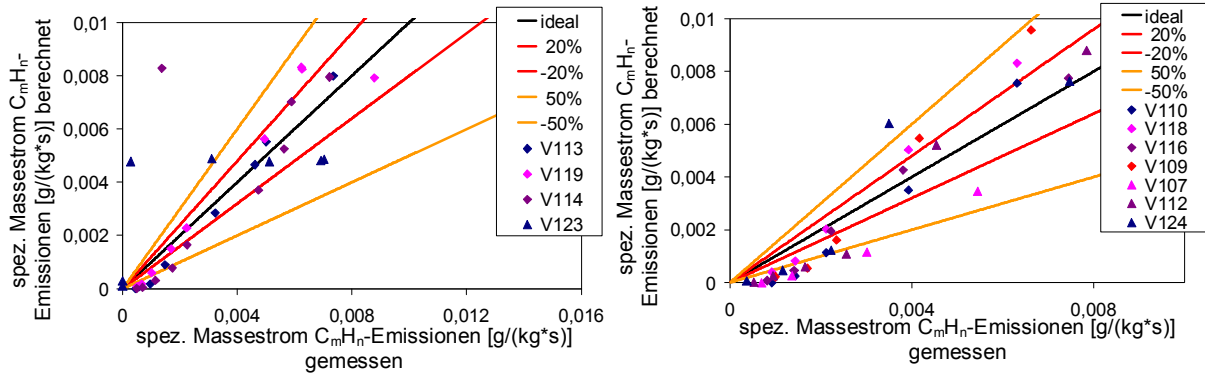


Abbildung 5.30 Abweichungen der Modellierung der Emissionen von den Messergebnissen für Röstversuche bei 230 °C für  $RV > RV_{\text{Knick}}$  (links) und für Röstversuche bei 250 °C für  $RV > RV_{\text{Knick}}$

### 5.1.4.7 Berechnung der Änderung von Farbe bzw. Helligkeit

Zur Abschätzung der Güte einer Kaffeeröstung wird oft der Röstgrad in Form der Farbe oder Helligkeit verwendet. Dieses wichtige Qualitätsmerkmal wird in Skalenteilen der Messgeräte der Dr. Lange GmbH in der Modellierung berücksichtigt.

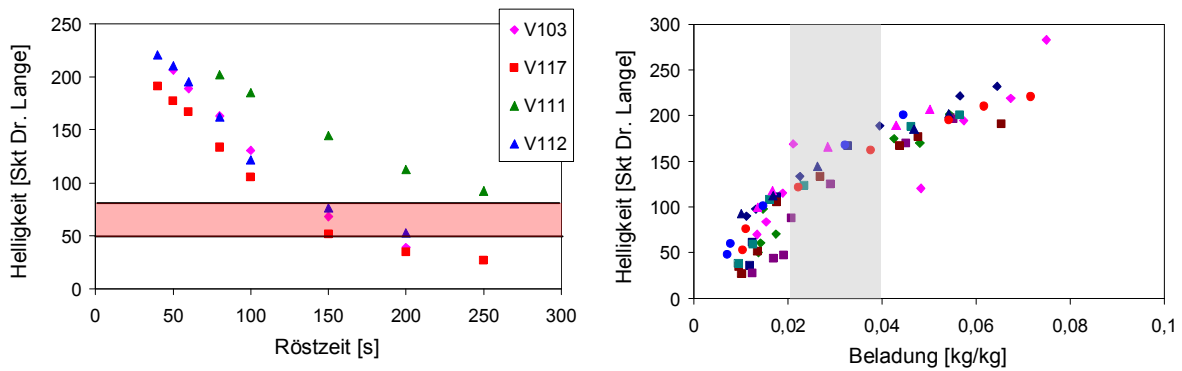


Abbildung 5.31 Zeitabhängig (links: der rote Bereich markiert Röstgrade handelsüblicher Kaffees) und beladungsabhängig (rechts)

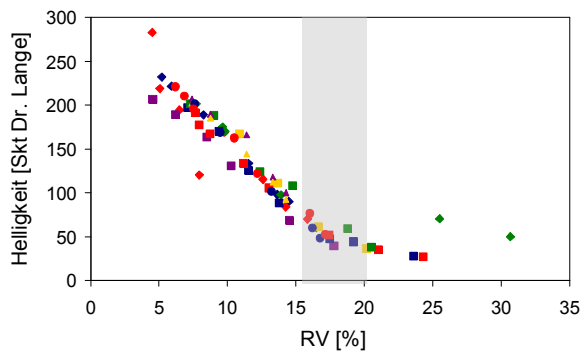


Abbildung 5.32 Darstellung der Helligkeit in Abhängigkeit vom RV

**Herleitung der Gleichung:**

Wie in Abbildung 5.32 zur erkennen ist, teilt sich der röstverlustabhängige Verlauf der Helligkeit in einen linearen und einen nichtlinearen Bereich. Dieses Verhalten wird für eine Abschätzung im Modell genutzt (Abbildung 5.33).

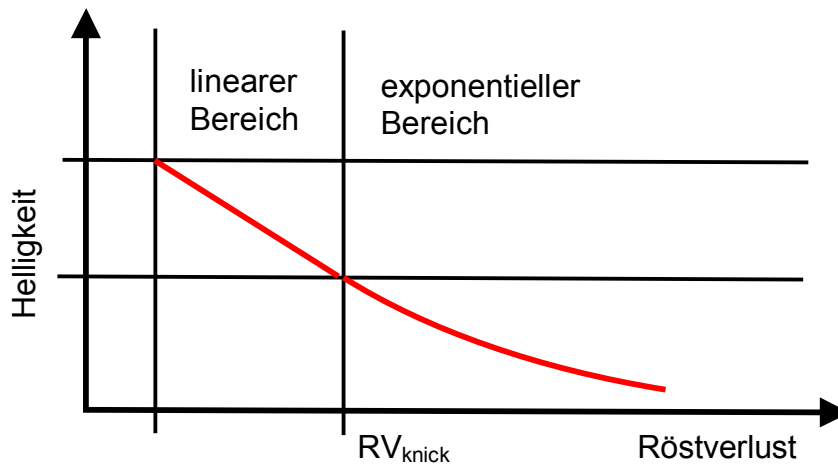


Abbildung 5.33 Modellvorstellung Verlauf der Helligkeit

Für Rohkaffee ließen sich keine Messwerte bestimmen, da das Messverfahren hierfür nicht geeignet ist. Aus der Literatur (Lit 196) ist bekannt, dass zu Beginn der Röstung die Helligkeit zunimmt. Dieser Bereich wird in der Modellvorstellung vernachlässigt. Nach der linearen Abnahme wird der Kurvenverlauf mit einer Exponentialfunktion beschrieben.

Gl. 105 Helligkeits- bzw. Farbverlauf:  

$$\text{Helligkeit} = A + B \cdot \text{RV} + \frac{C}{e^{D \cdot \text{RV} + E}} \quad [\text{Skt Dr. Lange}]$$

Gl. 106 Bedingung:  

$$\text{Helligkeit}_n \leq \text{Helligkeit}_{n-1}$$

**Parameterbestimmung:**

Mittels Chem-Fit konnten die in Tabelle 17 dargestellten Parameter bestimmt werden. Der Genauigkeitswert  $R^2_{xy}$  von 0,99 zeigt eine gute Übereinstimmung.

Parameter  $RV_{\text{knick}}$  war nur für die Gleichungsbestimmung nötig und muss nicht in die Gleichung eingesetzt werden. Er wurde experimentell bestimmt.

A	B	C	D	E	F	$R_{xy}^2$	$RV_{\text{knick}}$
302,3	-14,5	2,03	-0,34	4,6	17,9	0,99	18 %

Tabelle 17 Modellierung Farbverlauf (Ergebnisse)

Gl. 107 Farbverlauf:

$$\text{Helligkeit} = 302,3 - 14,5B \cdot RV + \frac{2,03}{e^{-0,34 \cdot RV + 4,6}} \quad [\text{Skt Dr. Lange}]$$

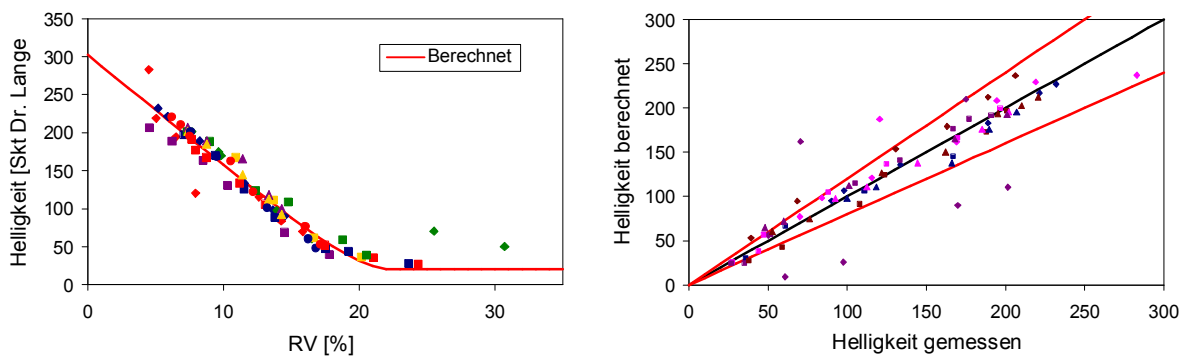


Abbildung 5.34 Modellierung Farbverlauf: Ergebnis der Helligkeitsberechnung (links) und 20 % - Fehlerschranken (rechts)

Wie in Abbildung 5.34 gezeigt ist, beträgt der Fehler mit Ausnahme einiger Ausreißer weniger als 20 %. Diese Streuung ist eher auf Messfehler zurückzuführen als auf die Approximationsgleichung.

### 5.1.5 Wärmeleitkoeffizient und Wärmekapazität von Kaffeebohnen

Die Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten für die Kaffeebohnen erfolgt nach Gl. 108 mit dem Wärmeleitkoeffizienten für trockene Kaffeebohnen nach Eggers und Cammenga (Lit 63; Lit 64; Tabelle 11).

Gl. 108 Wärmeleitkoeffizient der feuchten Partikel:

$$\lambda_{\text{Part}} = \lambda_{\text{Part trocken}} \cdot \left(1 - \frac{X}{1+X}\right) + \lambda_{\text{W}} \cdot \frac{X}{1+X} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität für die Kaffeebohnen erfolgt unter Berücksichtigung der Beladung, also der spezifischen Wärmekapazität des in den Kaffeebohnen enthaltenen Wassers, nach Gl. 109 mit der spezifischen Wärmekapazität für trockene Kaffeebohnen, wobei hier die effektive spezifische Wärmekapazität verwendet wird, welche endo- und exotherme Rösteeinflüsse berücksichtigt (Eggers Lit 64; Tabelle 11) und der spezifischen Wärmekapazität für Wasser (Gl. 122).

Gl. 109 spezifische Wärmekapazität der Partikel:

$$c_{p\text{Part}} = c_{p\text{Part trocken}} \cdot \left(1 - \frac{X}{1+X}\right) + c_{pW} \cdot \frac{X}{1+X} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

### 5.1.6 Zusammenfassung zur mathematischen Beschreibung

Mittels Messergebnisse der Röstversuche wurden Partikeldurchmesser, Röstverluste, Partikeldichte, die Kohlenwasserstoff-Summen-Emissionen und die Änderung der Farbe zur Charakterisierung der Röstung von Kaffeebohnen beschrieben.

Zu den beschriebenen Röstparametern ließen sich in der Literatur keine vergleichbaren Aussagen finden. Hier beschränken sich die Autoren auf Start- und Endwerte bei den Partikeldurchmessern und Partikeldichten, oft ohne die Röstung näher zu charakterisieren (Kapitel 5.2 Übersicht über Stoffwerte aus der Literatur).

Zur Beschreibung wurden Modellansätze gewählt, welche sich aus dem experimentellen Verlauf über einer Bezugsgröße ableiten ließen.

Die Ergebnisse wurden entsprechend den Gleichungen Gl. 70 und Gl. 71 bewertet und mittels Fehlerschranken eingeschätzt.

Die Änderung der Partikeldurchmesser wurde als Abhängigkeit von der Partikelbeladung beschrieben. Wichtige Einflußgrößen sind die Startbeladung sowie die maximale Beladung bei Kondensation und der Startdurchmesser. Die Standardabweichung  $F < 0,2$  und die Genauigkeit  $R_{xy}^2 > 0,9$  liefern gute Werte. Der Fehler im Vergleich mit den Experimenten ist kleiner als 10 %.

Der Röstverlust wurde als Abhängigkeit der Partikelbeladung beschrieben. Der Verlauf wird zunächst als linear angenommen. Ab einem Knickpunkt steigt er exponentiell an. Eine wichtige Größe ist hier der maximale Röstverlust, welcher in dieser Modellbetrachtung einen Endwert liefert. Dieser maximale Röstverlust wird durch das Erreichen der hygroskopischen Beladung markiert, also wenn sich die Beladung der Partikel mit Wasser nicht mehr ändert. Beim weiteren Rösten kommt es zu weiteren Röstverlusten, welche für eine normale Anwendung nicht betrachtet werden müssen. Weiterhin zeigt sich ein Unterschied in der Röstung mit Luft oder Wasserdampf. Die Dampfröstung verläuft schneller. Die Standardabweichung mit  $F < 2,3$  bzw.  $F < 1$  liefert ausreichende und die Genauigkeit mit  $R_{xy}^2 > 0,97$  gute Werte. Der Fehler im Vergleich mit den Experimenten ist kleiner als 20 %.

Die Änderung der Partikeldichte wurde als Abhängigkeit der Partikelbeladung beschrieben. Der Verlauf wird zunächst als linear angenommen. Ab einem Knickpunkt steigt er exponentiell an, bis ein konstanter Endwert erreicht wird. Der Endwert der Dichte ( $\rho_{\text{end}}$ ) wurde aus den experimentellen Untersuchungen ermittelt. Die Standardabweichung mit  $F < 57 \dots 165$  liefert hohe Werte, die Genauigkeit mit  $R_{xy}^2 > 0,97$  gute Werte. Der Fehler im Vergleich mit den Experimenten ist kleiner als 30 %, wobei der Messfehler aus der experimentellen Dichtebestimmung eingeht.

Die Emissionen wurden als Abhängigkeit des Röstverlustes beschrieben. Der Verlauf teilt sich in vier unterschiedliche Abschnitte, wobei ein Maximum erreicht wird. Anschließend werden die Emissionen wieder geringer. Die Standardabweichung mit  $F < 0,005$  liefert sehr gute Werte, die Genauigkeit mit  $R_{xy}^2 > 0,41$  nicht so gute Werte. Der Fehler im Vergleich mit den Experimenten ist kleiner als 50 %.

Die Farbänderung oder Helligkeitsänderung der Kaffeebohnen wurden als Abhängigkeit des Röstverlustes beschrieben. Der Verlauf teilt sich in zwei Abschnitte, welche durch einen Knickpunkt getrennt sind. Die Standardabweichung  $F < 18$  und die Genauigkeit  $R_{xy}^2 > 0,99$  liefern gute Werte. Der Fehler im Vergleich mit den Experimenten ist kleiner als 20 %.

## 5.2 Übersicht über Stoffwerte aus der Literatur

Im Folgenden erfolgt eine Zusammenstellung der wichtigsten Parameter von Roh- und Röstkaffee einiger Autoren.

Quelle	Jahr	Sorte	Röst-Verfahren	$\vartheta$ [°C]	t [s]	RV [%]	ORV [%]	$x_{Ein}$ [%]	$x_{Aus}$ [%]	$d_{PartEin}$ [mm]	$d_{PartAus}$ [mm]
Arnestad [Lit 12]	1971	Mischung	Trommel-Druck-Röster	230	900-1200	9,2		8-12	5,1		
Arnestad [Lit 12]	1971	Mischung	Trommel	230	900-1200	14,5		8-12	1,77		
eigene Messung	2005	Arabica Santos	WS-Dampf	250	200	20	12	10,5	1,17		
eigene Messung	2005	Arabica Santos	WS-Luft	250	200	17	8,5	10,5	1,03		
Da Porto [Lit 196]	1991	Arabica Santos	two-step-Labor-Röster	190	238	8,2		9,8	5,28		
Da Porto [Lit 196]	1991	Arabica Santos	two-step-Labor-Röster	205	377	11,8		9,8	5,13		
Da Porto [Lit 196]	1991	Arabica Santos	two-step-Labor-Röster	225	483	15,2		9,8	2,82		
Da Porto [Lit 196]	1991	Arabica Santos	two-step-Labor-Röster	245	600	22,6		9,8	2,1		
Eggers [Lit 63]	2001	Arabica	Medium roast			15-18	5-8	10-12	2-3	6	7
Eggers [Lit 64]	2002	Arabica	WS-Luft	240	240	bis 20	8-9	10-12	1-3		
Eggers [Lit 65]	2002	Arabica	Festbett, Einzelbohne	mittlerer Röstgrad		15-18	5-8	10-12	2-3	$V_{Bohne} [cm^3]$ 0,11-0,13	0,16-0,19
Fischer [Lit 68]	2001	Arabica Santos								100 %	125 %
Fischer [Lit 68]	2001	Robusta India								100 %	125 %
Massini [Lit 164]	1990	Arabica	Laborröster					$X = 0,11$	$X = 0,032$		
Menchù [Lit 166]	1971	keine Angabe	keine Angabe	250		13		13			
Nagaraju [Lit 176]	1995	keine Angabe	Strahl-schicht	220	1050				1,18		
Nagaraju [Lit 176]	1995	keine Angabe	Strahl-schicht	240	720				1,67		
Nagaraju [Lit 176]	1995	keine Angabe	Strahl-schicht	260	450				1,12		
Ortola [Lit 184]	1998	Arabica Brasil	Trommel	250	597	16,4		11,24	3,52	$rel_{\Delta} V = 0,59$	
Ortola [Lit 184]	1998	Robusta, Uganda	Trommel	250	508	18,0		11,49	1,33	$rel_{\Delta} V = 0,56$	
Parliment [Lit 188]	1995	Arabica	Medium				5-8	12,5	3-5		
Parliment [Lit 188]	1995	Robusta	Medium				5-8	11	3-5		

Tabelle 18 Stoffwerte aus der Literatur (1)

Quelle	Jahr	Sorte	Röst-Verfahren	$\vartheta$ [°C]	t [s]	RV [%]	ORV [%]	$X_{Ein}$ [%]	$X_{Aus}$ [%]	$d_{PartEin}$ [mm]	$d_{PartAus}$ [mm]
Perego [Lit 191]	1995	Arabica	Festbett	60 -300				8,9	1,48		
Perego [Lit 191]]	1995	Robusta	Festbett	60 -300				8,32	2,3		
Pittia [Lit 194]	2001	Arabica	Festbett	170	1200			11,45	2		
Pittia [Lit 194]	2001	Arabica	Festbett	200	960			11,45	2		
Pittia [Lit 194]	2001	Robusta	Festbett	170	1200			11,26	2		
Pittia [Lit 194]	2001	Robusta	Festbett	200	960			11,26	2		
Schenker [Lit 214]	1999	Arabica Costa Rica	WS-Labor	220	720	15,8			X = 2,15	rel. V = 1,5	
Schenker [Lit 214]	1999	Arabica Costa Rica	WS-Labor	260	180	15,3			X = 2,68	rel. V = 1,8	
Schenker [Lit 215]	2000	Arabica	WS-Luft	260	180	22	14	10-11	X = 2,68		
Schenker [Lit 215]	2000	Arabica	WS-Luft	220	720	16	6	10-11	X = 2,15		
Singh [Lit 232]	1997	Mexikan. K. Col. K.									
Schenker [Lit 217]	2001	Arabica Columbia	WS-Luft	220 -260	160 -620						
Small [Lit 237]	1993		WS mit Vortrocknen								
Smith [Lit 239]	1965	keine Angabe	keine Angabe								
Streuli [Lit 253]	1967	keine Angabe	keine Angabe	230			3-15				
Wootton [Lit 279]	1967	Arabica	keine Angabe					6-20			

Tabelle 19 Stoffwerte aus der Literatur (2)

Quelle	Jahr	Sorte	Röst-Verfahren	$\vartheta$ [°C]	t [s]	endo- und exotherme Einflüsse
Eggers [Lit 63]	2001	Arabica	mittlerer Röstgrad			$h_{-1^\circ\text{C bis } 100^\circ\text{C}} = 27 \cdot x + 210 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{g}} \right]$ $h_{-1^\circ\text{C bis } 204^\circ\text{C}} = 28 \cdot x + 450 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{g}} \right]$ bzw. $h_{\text{aufgenommen}} = 300 \text{ bis } 500 \frac{\text{J}}{\text{g}}$
Eggers [Lit 64]	2002	Arabica	WS-Luft	240	240	für $\vartheta \leq 40^\circ\text{C}$ : $c_{p \text{ effektiv}} = 2,5 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ bis $c_{p \text{ effektiv}} = 6 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ für $40^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 200^\circ\text{C}$ : $c_{p \text{ effektiv}} \sim 2,5 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ für $\vartheta \geq 200^\circ\text{C}$ : $c_{p \text{ effektiv}} = 0 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$ bis $c_{p \text{ effektiv}} = -3 \frac{\text{J}}{\text{gK}}$
Eggers [Lit 65]	2002	Arabica	Festbett, Einzelbohne		mittlerer Röstgrad	$h_{\text{exotherm}} \sim 200 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ $h_{\text{exotherm}} \sim 160 \frac{\text{J}}{\text{g}}$
Pittia [Lit 195]	2001	Arabica Santos	Festbett	190	1200	für $20^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 130^\circ\text{C}$ : $h_{\text{exotherm}} = 39,1 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ für $290^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 350^\circ\text{C}$ : $h_{\text{exotherm}} = 44,6 \frac{\text{J}}{\text{g}}$
Raemy [Lit 201]	1982	Arabica, Robusta	Kalorimetrie	30		für $\vartheta \geq 140^\circ\text{C}$ $h_{\text{exotherm}} = 250 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ bis $h_{\text{exotherm}} = 420 \frac{\text{J}}{\text{g}}$
Streuli [Lit 253]	1967	keine Angabe	keine Angabe	230		für $50^\circ\text{C} \leq \vartheta \leq 190^\circ\text{C}$ : $\vartheta_{\text{Part}} \geq \vartheta_{\text{endotherm}} \geq \vartheta_{\text{Part}} - 5 \text{ K}$ für $\vartheta \geq 190^\circ\text{C}$ : $\vartheta_{\text{Part}} \leq \vartheta_{\text{exotherm}} \leq \vartheta_{\text{Part}} + 5 \text{ K}$

Tabelle 20 Stoffwerte aus der Literatur (3)



Quelle	Jahr	Kaffee-Sorte	Röst-Verfahren	$\vartheta$ [°C]	t [s]	$\rho_{\text{sin}}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$\rho_{\text{aus}}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$c_p$ $\left[\frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}\right]$	$\alpha$ $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}\right]$	$\lambda$ $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right]$
eigene Messung	2003	Arabica Santos	WS-Dampf	250	200	1218	455			
eigene Messung	2003	Arabica Santos	WS-Luft	250	200	1218	538			
Clarke [Lit 47]	1987					1250-1300	700	0,32-0,39	$k = 1,24 \frac{\text{cal}}{\text{h}\cdot\text{cm}}$	$k = 1,49 \frac{\text{cal}}{\text{h}\cdot\text{cm}}$
Da Porto [Lit 196]	1991	Arabica Santos	two-step-Labor-Röster	190	221	1170	740			
Da Porto [Lit 196]	1991	Arabica Santos	two-step-Labor-Röster	205	377	1170	670			
Da Porto [Lit 196]	1991	Arabica Santos	two-step-Labor-Röster	225	484	1170	570			
Da Porto [Lit 196]	1991	Arabica Santos	two-step-Labor-Röster	245	600	1170	470			
Eggers [Lit 62]	2001							roh: 1,11 röst: 1,4	14 für Festbett	roh: 0,183 röst: 0,11
Eggers [Lit 63]	2001	Arabica	mittlerer Röstgrad			1200-1400	700-800			
Eggers [Lit 64]	2002	Arabica	WS-Luft	240	240	1200-1300	600-700	roh: 0,985 röst: 1,09 ~1	130 für umströmte Einzelbohne	$\vartheta < 40 \text{ °C} :$ 0,183 $\vartheta > 40 \text{ °C} :$ ~0,11
Eggers [Lit 65]	2002	Arabica	Festbett, Einzelbohne		mittlerer Röstgrad	1200-1400	700-800	roh: 1,11 röst: 1,4		roh: 0,183 röst: 0,11
Menchù [Lit 166]	1971	keine Angabe	keine Angabe	250		Schüttung: 700-730	Schüttung: 350-410			
Nagaraju [Lit 176]	1995	keine Angabe	Strahlschicht	220	1050		Schüttung: 380			
Nagaraju [Lit 176]	1995	keine Angabe	Strahlschicht	240	720		Schüttung: 380			
Nagaraju [Lit 176]	1995	keine Angabe	Strahlschicht	260	450		Schüttung: 330			
Nagaraju [Lit 177]	1997		Strahlschicht	200-260					14	
Ortola [Lit 184]	1998	Arabica Brasil	Trommel	250	597	1350	710			
Ortola [Lit 184]	1998	Robusta, Uganda	Trommel	250	508	1100	580			
Pittia [Lit 194]	2001	Arabica	Festbett	170	1200	1100	620			
Pittia [Lit 194]	2001	Arabica	Festbett	200	960	1100	750			
Pittia [Lit 194]	2001	Robusta	Festbett	170	1200	1100	650			
Pittia [Lit 194]	2001	Robusta	Festbett	200	960	1100	720			
Raemy [Lit 201]	1982	Arabica, Robusta	Kalorimetrie	30				Arabica, roh: 1,85 Robusta, roh: 1,46 röst: 1,46		
Schenker [Lit 215]	2000	Arabica	WS-Luft	260	180	1260	622			
Schenker [Lit 215]	2000	Arabica	WS-Luft	220	720	1260	747			
Small [Lit 237]	1993		WS mit vortrocknen					$\vartheta < 210 \text{ °C} :$ bis 2; $\vartheta > 210 \text{ °C} :$ bis -3		

Tabelle 21 Stoffwerte aus der Literatur (4)

## 6 Zusammenfassung und Diskussion

An einer Wirbelschichtversuchsanlage DN 100 für überhitzten Wasserdampf und heiße Luft konnte eine Reihe von Emissionsmessungen mit einem Flammenionisationsdetektor durchgeführt werden. Hierbei wurden Temperaturverläufe und die Entstehung von Röstgasemissionen unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen gemessen. Des Weiteren sind Versuche zur Bestimmung veränderlicher Stoffwerte beim Rösten von Kaffeebohnen durchgeführt worden. Hierbei konnten Werte für die Dichte, die Feuchte, die Farbe, die Masse und die Partikelgröße der Kaffeebohnen in Abhängigkeit von den Röstbedingungen und der Röstzeit ermittelt werden.

Eine mathematische Beschreibung einzelner Parameter der Röstung von Kaffeebohnen konnte erarbeitet werden.

Für die Röstversuche mit Kaffeebohnen wurden Chargen von 50 g, 200 g oder 500 g in einen Wirbelschichtapparat bei unterschiedlichen Bedingungen gegeben. Wenn die kalten Kaffeebohnen im Apparat sind, kühlt sich zunächst die Temperatur über der Wirbelschicht ab. Bei den Röstversuchen in überhitztem Wasserdampf kommt es zur Kondensation auf den Kaffeebohnen, bis diese eine Oberflächentemperatur über 100 °C erreicht haben. Im weiteren Verlauf des Röstprozesses trocknet dieses Oberflächenwasser der Kaffeebohnen wieder ab. Anschließend nimmt die Feuchte im Inneren der Kaffeebohnen ab. Während dessen beginnt die Temperatur im Inneren der Kaffeebohnen zu steigen. Das geht um so schneller, je mehr Wasser bereits verdampft ist, bis die Röstgastemperatur erreicht ist. Durch die in den Kaffeebohnen stattfindenden exothermen Reaktionen kann die Temperatur etwas weiter ansteigen.

An der Wirbelschichtversuchsanlage DN 100 für überhitzten Wasserdampf und heiße Luft konnte eine Reihe von Emissionsmessungen mit einem Flammenionisationsdetektor (FID) durchgeführt werden. Hierbei wurden Temperaturverläufe und die Entstehung von Röstgasemissionen unter unterschiedlichen Versuchsbedingungen gemessen.

Wenn die Temperatur der Kaffeebohnen angestiegen ist, steigen die Kohlenwasserstoff-Konzentrationen im Röstabgas ebenfalls und erreichen schnell ein Maximum. Beim weiteren Rösten gehen die Werte etwas zurück. Hier sind jedoch Röstgrade erreicht, welche für handelsüblichen Kaffee keine Rolle mehr spielen. Trotz unterschiedlicher Kaffeesorten sind bei allen Röstversuchen prinzipiell gleiche Verläufe beobachtet worden. Einfluss auf die Stärke der Emissionen haben die Rösttemperatur, die Chargenmasse, die Kaffeesorte und der Massestrom Fluidisationsgas. Die Versuche zur Bestimmung der Kohlenwasserstoff-Emissionen im Röstabgas liefen über 600 s. Bei einer Wirbelschichtröstung werden die Kaffeebohnen in dieser Zeit schwarz, ölig und entwickeln ein verbranntes Aroma.

Die Kenntnis der Stoffdaten ist ein wichtiger Bestandteil einer mathematischen Beschreibung. Die Veränderung der Feuchte, Dichte, Farbe und der Masseverlust beim Rösten konnten in experimentellen Untersuchungen ermittelt werden. Diese Versuche liefen 200 s bis 250 s. Hier wurde die gesamte Charge als Probe genommen. Von Rohkaffee und den Proben wurden die Feuchte, die Masse, der

Partikeldurchmesser, die Partikelgrößenverteilung, die Schüttdichte, die scheinbare Dichte der Kaffeebohnen, die Sphärizität und die Farbe bestimmt.

Die Feuchte der Kaffeebohnen wurde mit der Trockenschrankmethode für Rohkaffee bestimmt. Als Darstellung ist die Angabe als Beladung gewählt worden. Die Beladung der Kaffeebohnen nimmt zu Anfang des Röstprozesses von ca.  $0,12 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$  schnell ab. Nach einer Zeit von 50 s bis 100 s ist die Änderung der Beladung kleiner geworden und ab ca. 150 s hat sie schon fast den stationären Endwert, den hygroskopischen Punkt, von ca.  $0,01 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$  erreicht. Bei Dampfrostung trocknet zu Beginn das an der Oberfläche der Kaffeebohnen befindliche Wasser ab. Dieser Vorgang verläuft sehr schnell. Während dieser Zeit steigt die Partikeltemperatur der Kaffeebohnen nicht über  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Wenn die Oberfläche der Kaffeebohnen trocken ist, trocknet das Wasser aus den Poren der Kaffeebohnen. Jetzt steigt die Temperatur der Kaffeebohnen an. Nachdem der hygroskopische Endwert erreicht ist, haben die Temperatur der Kaffeebohnen und die des Röstgases ebenfalls einen stationären Endwert erreicht. Dieser Zeitabschnitt verläuft langsamer als der vorangegangene.

Der Trocknungsprozess zu Beginn der Röstung von Kaffeebohnen lässt das in den Zellen und Poren der Kaffeebohnen enthaltene Wasser schnell verdampfen. Hierbei bildet sich noch in den Zellen und Poren Wasserdampf. Dadurch entstehen hohe Drücke innerhalb der Kaffeebohnen, welche die Zellstruktur zerstören und die Kaffeebohnen anwachsen lassen. Dieser Vorgang ist um so ausgeprägter, je höher die Rösttemperatur und je besser der Wärmeübergang sind. Der Partikeldurchmesser wächst so zu Beginn der Röstung schnell an und erreicht nach 50 s bis 100 s bei der Wirbelschichtröstung seinen Endwert. Das mitwachsende Volumen der Kaffeebohnen hat sich ungefähr verdoppelt. Durch das Anwachsen der Kaffeebohnen verändern sich Form und Verteilung der Partikel nicht. Rohkaffee der Sorte Santos hat einen mittleren Sauterdurchmesser von 6,2 mm und handelsüblich gerösteter Kaffee von 7,6 mm.

Der gemessene Masseverlust wird auch als Röstverlust bezeichnet. Er hängt direkt mit dem Trocknungsprozess zusammen. Durch Trennen von Röstverlust und Trocknung, also Wasserverlust, ergibt sich der organische Röstverlust oder Verlust an Trockensubstanz. Dieser beinhaltet zu Beginn der Röstung das Abtrennen anhaftender Staubteilchen und der Silberhäutchen von den Kaffeebohnen durch das Wachstum des Partikeldurchmessers. Beim Ansteigen der Partikeltemperatur über  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  beginnen eine Entwicklung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}$  sowie ein Abspalten von in den organischen Verbindungen gebundenem Wasser. Mit der weiter ansteigenden Temperatur verstärken sich diese Vorgänge noch. Erreicht die Partikeltemperatur Werte von  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , starten Maillard-Reaktionen. Diese Reaktionen setzen vorhandene Verbindungen wie Zucker, Fette, Aminosäuren, organische Säuren in neue organische Verbindungen, die Röst-Produkte, um. Sie sind für das Aroma der Kaffeebohnen nach dem Rösten verantwortlich. Hierbei entstehen flüchtige organische Verbindungen, welche zusätzlich zum Masseverlust beitragen.

Der organische Röstverlust bewegt sich bei handelsüblichen Röstungen bei 5 % bis 10 %. Der gesamte Röstverlust, also unter Einbeziehen des verdampften Wassers, bei 15 % bis 20 %.

Die scheinbare Dichte und die Schüttdichte der Kaffeebohnen nehmen ab. Zu Beginn der Röstung zwischen 10 s und 60 s Röstzeit in der Wirbelschicht fällt die Dichte

sehr stark ab, über ca. 150 s tritt fast keine Veränderung mehr ein. Die scheinbare Dichte nimmt von  $1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  bei Rohkaffee auf  $600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  für handelsüblichen Kaffee ab. Die Ursachen hierfür liegen in der Änderung der Beladung, der Masse und des Volumens der Kaffeebohnen.

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal für die Röstung von Kaffeebohnen ist deren Farbe. Kaffeeröstereien nutzen sie als Maß für die Qualität der gerösteten Kaffees. Die Farbe und deren Veränderung sind stark abhängig von der Kaffeesorte. Sie verändert sich von grün zu grüngelb beim Trocknen, zu dunkelgelb bis hellbraun bei beginnender Röstung, zu braun und dunkelbraun bei mittlerer Röstung, zu tief dunkelbraun bei starken Röstungen und zu schwarz, wenn der Kaffee überröstet ist. Die Farbe und die Helligkeit sind linear abhängig vom Röstverlust.

Weitere Daten, wie spezifische Wärmekapazität, endo- und exotherme Wärmen und Wärmeleitfähigkeit, wurden der Literatur entnommen. Zusammen mit den gemessenen Werten bieten sie eine gute Übersicht über ablaufende Vorgänge beim Rösten und ermöglichen eine mathematische Beschreibung des Röstprozesses.

Die veränderlichen Stoffdaten Masse der Partikel, scheinbare Partikeldichte, Partikeldurchmesser und die emittierten Kohlenwasserstoffe sollen in die Modellierung in Abhängigkeit von der Beladung der Kaffeebohnen mit Wasser eingehen. Diese wird vom Modell berechnet, welches als Trocknungsmodell erstellt wurde. Die Änderung der Helligkeit oder Farbe ist linear abhängig vom Masseverlust beim Rösten.

## 7 Quellenverzeichnis

### 7.1 Literatur

- Lit 1 Adinolfi, J.: Review of Coffee Brewing Center Presentation to NCSA at Dallas; World Coffee and Tea; 20-27; 1974
- Lit 2 Andueza, S.; Maeztu, L.; Pascual, L.; Ibáñez, C.; de Pena, M. P.; Cid, C.: Influence of extraction temperature on the final quality of espresso coffee; Journal of the Science of Food and Agriculture 83; 240-248; 2003
- Lit 3 Anonym: Der Kaffee. Gemeinfaßliche Darstellung der Gewinnung, Verwertung und Beurteilung des Kaffees und seiner Ersatzstoffe; herausgegeben vom Kaiserlichen Gesundheitsamt; 1903
- Lit 4 Anonym: Clearing the air; Coffee International 1; 36-37; 1975
- Lit 5 Anonym: Neuzeitliche technische Lösungen. Rösten - ein heißes Vergnügen; Zucker- und Süßwarenwirtschaft 39 (10); 324-326; 1986
- Lit 6 Anonym: Die richtige Mischung für den Erfolg; Lebensmittel Zeitung; 54; 1997
- Lit 7 Anonym: KaffeeV; Verordnung über Kaffee, Kaffee- und Zichorien-Extrakte; BGBl I; Nr. 60; 15.11.2001
- Lit 8 Anonym: Jahresbericht 2004 Deutscher Kaffee-Verband e. V.; 2005
- Lit 9 Anonym: Jahresbericht 2006 Deutscher Kaffee-Verband e. V.; 2007
- Lit 10 Alpini, Prosperi: De Plantis Ægypti Liber; 1640
- Lit 11 Arjona, J. L.; Rios, G. M.; Gibert, H.; Vincent, J.-C.: Gas-fluidized bed roasting of coffee; Cafe - Cacao - Thé 23 (2); 119-128; 1979
- Lit 12 Arnestad, K. G.: Druckrösten von Kaffee; ASIC 5th; Lisbonne; 280-286; 1971
- Lit 13 Baltes, W.: Vorstufen und Entstehung von Farbe und Geschmack des Kaffees; ASIC 7th; Hamburg; 91-107; 1975
- Lit 14 Baltes, W.: Rösteffekte auf die Kaffeezusammensetzung; ASIC 8th; Abidjan; 85-96; 1977
- Lit 15 Baltes, W.: Röstaromen; Deutsche Lebensmittel-Rundschau 75; 2-7; 1979
- Lit 16 Baltes, W.: Lebensmittelchemie; 2000
- Lit 17 Balzer, H. H.: Chemistry I: Non-volatile Compounds: Acids in Coffee; In: Coffee Recent Developments; Ed. by Clarke, R. J.; Vitzthum, O. G.; 2001
- Lit 18 Barnett, J. H.; Pilon, D: Controlling coffee roaster emissions; Instrumentation in the Food and Beverage Industry; 31-42; 1972
- Lit 19 Baskakov, A. P.; Filippovski, N. F.: A simple method of heat transfer calculations in fluidized bed furnances; In: Fluidization IV; Ed. by Grace, J. R.; Schmidt, H.; de Bergougou, M. A.; 1989

- Lit 20 Baxter, J.: Das Kaffee-Buch: Das Kaffee-Kenner-Kochbuch; 1987
- Lit 21 Bättig, K.: A Review of the Effects of Coffee Drinking on Mental Performance; ASIC 14th; San Francisco; 21-30; 1991
- Lit 22 Berkmen, M. I.: Abluft biologisch reinigen. Mikroorganismen beseitigen Schad- und Geruchsstoffe aus der Abluft; Umwelt (VDI); Bd. 26 (7/8); 44-45; 1996
- Lit 23 Bernheimer, O.: Zur Kenntniss der Röstproducte des Caffees; Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaften; 456-467; 1880
- Lit 24 Bersten, I.: Coffee Floats, Tea Sinks; 1993
- Lit 25 Betz, Erwin C.: Incinerator systems for food process emissions; Proceedings, Annual Meeting - Air Pollution Control Association 72nd (3); 79-44.3; 1979
- Lit 26 Blancard, S.: Haustus Polychresti, Oder: Zuverlässige Gedancken vom Theé, Coffeé, Chocolate Und Taback; 1705
- Lit 27 Bohrer, B.: Abluftreinigungsverfahren bei diskontinuierlich arbeitenden Röstanlagen; Zeitschrift für die Lebensmittelwirtschaft; Bd. 43 (7/8); 396-402; 1992
- Lit 28 Bonnländer, B.; Eggers, R.; Engelhardt, U. H.; Maier, H. G.: Roasting; In: Espresso Coffee: The Science of Quality; Ed. by Illy, A.; Viani, R.; 2005
- Lit 29 Bradbury, A. G. W.: Carbohydrates in Coffee; ASIC 19th; Trieste; CD-Rom; 2001
- Lit 30 Bradbury, A. G. W.: Chemistry I: Non-volatile Compounds: Carbohydrates; In: Coffee Recent Developments; Ed. by Clarke, R. J.; Vitzthum, O. G.; 2001
- Lit 31 Brando, C. H. J.: Harvesting and Green Coffee Processing; In: Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production; Ed. by Wintgens, J. N.; 2004
- Lit 32 Breeger, A.: Kein Problem mit Geruchsbelästigung; Zeitschrift für die Lebensmittelwirtschaft; Bd. 46 (4); 32-33; 1995
- Lit 33 Burgschweiger, J.: Modellierung des statischen und dynamischen Verhaltens von kontinuierlich betriebenen Wirbelschichttrocknern; Fortschritt-Berichte VDI; Reihe 3; Nr. 665; 2000
- Lit 34 Buttle, H.: Vergleichende Untersuchungen über synthetische Maillard-Produkte und Kaffee-Röststoffe; Dissertation; 1970
- Lit 35 Bürgin, E.: Die Veränderung der Zellstruktur der Kaffeebohne beim Röstprozeß; ASIC 5th; Lisbonne; 270-279; 1971
- Lit 36 Cammarn, Stephen R.; Lange, Thomas J.; Beckett, Gale D.: Continuous fluidized-bed roasting; Chemical Engineering Progress; 86 (6); 40-46, General Review; 1990
- Lit 37 Cepeda, E.; de Latierro, R. O.; José, M. J. S.; Olazar, M.: Water sorption isotherms of roasted coffee and coffee roasted with sugar;

- International Journal of Food Science and Technology 34; 287-290; 1999
- Lit 38 Cidada, H. T.: Bibliographie du Café 1963; ASIC 2nd; Paris; 88-90; 1965
- Lit 39 Ciupka, P: Das Rösten von Kaffee; Manuskript; 1936
- Lit 40 Clark, R.: Torrefacto truths; Coffe & Cocoa International 19 (4); 40; 1992
- Lit 41 Clarke, R. J.: Grading green coffee; Process Biochemistry 7 (10); 18-20; 1972
- Lit 42 Clarke, R. J.: International Coffee Standartisation and Legislation; ASIC 9th; London; 467-472; 1980
- Lit 43 Clarke, R. J.: 25 Years Progress in Coffee Technology; ASIC 11th; Lomé; 281-290; 1985
- Lit 44 Clarke, R. J.: Green Coffee Processing; In: Coffee: Botany, Biochemistry and Productions of Beans and Beverage; Ed. by Clifford, M. N.; Willson, K. C.; 1985
- Lit 45 Clarke, R. J.; Macrae, R.: Coffee Volume 2: Technology; 1987
- Lit 46 Clarke, R. J.: Grading, Storage, Pre-treatments and Blending; In: Coffee Volume 2: Technology; Ed. by Clarke, R. J.; Macrae, R.; 1987
- Lit 47 Clarke, R. J.: Roasting and Grinding; In: Coffee Volume 2: Technology; Ed. by Clarke, R. J.; Macrae, R.; 1987
- Lit 48 Clarke, R. J.; Macrae, R.: Coffee Volume 6: Commercial and Technico-Legal Aspects; 1988
- Lit 49 Clarke, R. J.: International Standardisation; In: Coffee Volume 6: Commercial and Technico-Legal Aspects; Ed. by Clarke, R. J.; Macrae, R.; 1988
- Lit 50 Clarke, R. J.: The physical properties of the volatile compounds in roasted coffee; ASIC 14th; San Fransisco; 331-338; 1991
- Lit 51 Czerny, M.; Mayer, F.; Grosch, W.: Sensory study on the character impact odorants of roasted arabica coffee; Journal of Agricultural and Food Chemistry 47; 695-699; 1999
- Lit 52 Czok, G.: Untersuchungen über die Wirkung von Kaffee; Suplementa zur Zeitschrift für Ernährungswissenschaft 5; 1966
- Lit 53 Czok, G.: Der Kaffee und seine physiologischen Wirkungen; ASIC 3rd; Trieste; 269-275; 1967
- Lit 54 Czok, G.: Coffee and Health; Z. Ernaehrungswiss. 16 (4), 248-255; 1977
- Lit 55 Davids, P.; Lange, M.: Die TA-Luft '86; Technischer Kommentar; VDI-Verlag Düsseldorf; 1986
- Lit 56 Davidson, J. F.; Harrison, D.: Fluidized Particles; Cambridges University Press; 1963
- Lit 57 Egli, R. H.: Bildung und Veränderung von Aroma- und Geschmacksstoffen in verarbeiteten Lebensmitteln; In: Aroma- und

- Geschmacksstoffe in Lebensmitteln; herausgegeben von Solms, J.; Neukom, H.; 253-275; 1967
- Lit 58 Eichler, O.: Zentrale Wirkungen; In: Kaffee und Coffein; herausgegeben von Eichler, O.; 1976
- Lit 59 Eichler, O.: Die körperliche Leistung; In: Kaffee und Coffein; herausgegeben von Eichler, O.; 1976
- Lit 60 Eichler, O.: Kaffee und Krebs; In: Kaffee und Coffein; herausgegeben von Eichler, O.; 1976
- Lit 61 Eitner, D.: Erfahrungen mit dem kombinierten Einsatz von Olfaktometrie und chemisch-physikalischen Gasanalysen zur Messung und Bewertung von Gerüchen; Konferenz: Geruchsstoffe. Quellen, Ausbreitung, Wirkungen, Olfaktometrie, technische und administrative Maßnahmen. Kolloquium; VDI-Berichte; Bd. 561; 487-509; 1986
- Lit 62 Eggers, R.: Heat and Mass Transfer during Roasting - New Process Developments; ASIC 19th, Trieste; CD-Rom; 2001
- Lit 63 Eggers, R.; Pietsch, A.: Technology I: Roasting; In: Coffee Recent Developments; Ed. by Clarke, R. J.; Vitzthum, O. G.; 90-107; 2001
- Lit 64 Eggers, R.; Hobbie, M.; von Blittersdorff, M.; Cammenga, H. K.; Fischer, C.: Bestimmung von veränderlichen Stoffeigenschaften in der Kaffeebohne während des Röstprozesses; AiF; 2002
- Lit 65 Eggers, R.; Blittersdorff, M. v.; Hobbie, M.: Wärme- und Stofftransport bei der Röstung von Kaffeebohnen; Chemie Ingenieur Technik 74 (9); 1317-1321; 2002
- Lit 66 Elgeti, K.: Wärmeleitung; Ea 1 und 2; VDI-Wärmeatlas; 7. Auflage; 1994
- Lit 67 Faust, E.: Arabien 1680 Olfert Dappers Arabienbuch; 1977
- Lit 68 Fischer, C.; Cammenga, H. K.: When are coffee beans just right? Development of physico-chemical properties during roasting; ASIC 19th; Trieste; CD-ROM; 2001
- Lit 69 Flament, I.: Coffee, cocoa, tea; Food Reviews International 5 (3); 317-414; 1989
- Lit 70 Gabriel-Jürgens, H. O.: Zur Bestimmung der Feuchtigkeit in Rohkaffee - Ergebnisse aus DNA-Ringversuchen; ASIC 7th; Hamburg; 279-285; 1975
- Lit 71 Gál, S.; Windemann, P.; Baumgartner, E.: Untersuchungen über die Vorgänge beim Dämpfen von Kaffeebohnen; Chimia 30 (2); 68-71; 1976
- Lit 72 Geiger, R.; Perren, R.; Schenker, S.; Escher, F.: Mechanism of Volume Expansion in Coffee beans during Roasting; ASIC 19th, Trieste; CD-Rom; 2001
- Lit 73 Geiger, R.: Development of coffee bean structure during roasting; Dissertation; 2004
- Lit 74 Geldart, D.: Types of Gas Fluidization; Power Technology 7; 285-292; 1973



- Lit 75 Geldart, D.: Predicting the Expansion of Gas Fluidized Beds; In: Fluidization Technology; Ed. by Keairns, D. L.; 237-244; 1975
- Lit 76 Gimborn, C. H. von: Vom Rohkaffee zum Roestkaffee. II. Roestmaschinen fuer Kaffee; Probat-Werke, Emmerich; Kaffee und Tee Markt 25 (4); 3-5; 1975
- Lit 77 Giovannucci, E.: Meta-analysis of Coffee Consumption and Risk of Colorectal Cancer; American Journal of Epidemiology; Vol. 147; No. 11; 1043-1052; 1998
- Lit 78 Glück, B.: Zustands- und Stoffwerte - Wasser, Dampf, Luft - Verbrennungsrechnung; 1986
- Lit 79 Goff, J. A.: Psychrometrics as the Thermodynamics of Moist Air; In: Drying '80; Vol. 2; Ed. by Mujumdar, A. S.; 500-507; 1980
- Lit 80 Goroschko, W. D.; Rosenbaum, R. B.; Todes, O. M.: ПРИБЛИЖЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГИДРАВЛИКИ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ И СТЕЧЕННОГО ПАЛЕНИЯ; НЕФТЬ И ГАЗ (Neft i Gaz) 1; 125-131; 1958
- Lit 81 Graus, M.; Yeretjian, C.; Jordan, A.; Lindinger, W.: In-Mouth Coffee Aroma: Breath-by-Breath Analysis of Nose-Space While Drinking Coffee; ASIC 19th, Trieste; CD-Rom; 2001
- Lit 82 Gretsche, C.; Sarrazin, C.; Liardon, R.: Evolution of Coffee Aroma Characteristics during Roasting; ASIC 18th; Helsinki; 27-34; 1999
- Lit 83 Grosch, W.: Warum riecht Kaffee so gut?; Chemie in unserer Zeit; 30. Jahrgang; Nr. 3; 126-133; 1996
- Lit 84 Grosch, W.: Key Odorants of Roasted Coffee: Evaluation, Release Formation; ASIC 18th; Helsinki; 17-26; 1999
- Lit 85 Grosch, W.; Czerny, M.; Mayer, F.; Moors, A.: Sensory Studies on the Key Odorants of Roasted Coffee; In: Caffeinated Beverages; Ed. by Parliment, T. H.; Ho, C.-T.; Schieberle, P.; ASC Symposium Series 754; 2000
- Lit 86 Grosch, W.: Chemistry III: Volatile Compounds; In: Coffee Recent Developments; Ed. by Clarke, R. J.; Vitzthum, O. G.; 2001
- Lit 87 Hamid, M. A. K.; Mostowy, N. J.; Bhartia, P.: Microwave bean roaster; Journal of Microwave Power 10 (1); 109-114; 1975
- Lit 88 Hangartner, M.; Kastka, J.: Grundlagen der Geruchsbewertung; Konferenz: Geruchsstoffe. Quellen, Ausbreitung, Wirkungen, Olfaktometrie, technische und administrative Maßnahmen. Kolloquium; VDI-Berichte; Bd. 561; 427-437; 1986
- Lit 89 Hansmann, K.: Rechtsprobleme bei der Bewertung von Geruchsemissionen; NVwZ 1999 Heft 11; 1158-1165; 1999
- Lit 90 Hansmann, K.: Bundes-Immissionsschutzgesetz; 19. Auflage mit Erläuterungen; 2000
- Lit 91 Harkort, W.: Maßnahmen zur Geruchsminderung an ausgewählten Beispielen - ein Überblick; Konferenz: Geruchsstoffe. Quellen,

- Ausbreitung, Wirkungen, Olfaktometrie, technische und administrative Maßnahmen. Kolloquium; VDI-Berichte; Bd. 561; 11-21; 1986
- Lit 92 Harms, U.; Wurziger, J.: Beiträge zum Genußwert und zur Bekömmlichkeit von Röstkaffee; Kaffee und Tee Markt 19 (7); 6-9; 1969
- Lit 93 Harms, U.; Wurziger, J.: Beiträge zum Genußwert und zur Bekömmlichkeit von Röstkaffee; Kaffee und Tee Markt 19 (10); 6-11; 1969
- Lit 94 Hasimoto, K.; Kamoshita, S.; Hiraga, N.: Vibrating roaster with far infrared burner; Shinko Electric Journal; Vol. 34; Nr. 3; 82-87; 1989
- Lit 95 Haux, E.: Zwischen Destillation und Extraktion. Stofftrennung mit ueberkritischen Gasen - Geringe Zustandsaenderung: Abscheidung; VDI-Nachrichten; Band 31; Heft 22; 40; 1977
- Lit 96 Held, R.: Veränderungen der Chlorogensäuren im Kaffee beim Dämpfen, Rösten und Extrahieren; Dissertation; 1992
- Lit 97 Heilmann, W.: Technology II: Decaffeination of coffee; In: Coffee Recent Developments; Ed. by Clarke, R. J.; Vitzthum, O. G.; 2001
- Lit 98 Heinrich, S., Krüger, G., Mörl, L.: Modelling of the batch treatment of wet granular solids with superheated steam in fluidized beds; Chemical Engineering and Processing 38; 131-142; 1999
- Lit 99 Heisler, A.: Landarzt und Naturheilverfahren; In: Die natürliche Heilweise im Rahmen der Gesamtmedizin; herausgegeben von Adam, C.; 1938
- Lit 100 Herrmann, G.; Baltes, W.: Modelluntersuchungen über die Aromabildung in Kaffee; ASIC 9th; London; 77-85; 1980
- Lit 101 Heyden, S.: Coffee and Health; ASIC 15th; Montpellier; 411-419; 1993
- Lit 102 Hilligardt, K.; Werther, J.: Local Bubble Gas Hold-up and Expansion of Gas/Solid fluidized Beds; Ger. Chem. Eng. 9; 215-221; 1986
- Lit 103 Hilligardt, K.; Werther, J.: Influence of Temperature and Properties of Solids on the Size and Growth of Bubbles in Gas Fluidized Beds; Chem. Eng. Technol. 10; 272-280; 1987
- Lit 104 Ho, C.-T.; Hwang, H.-I.; Yu, T.-H.; Zhang, J.: An overview of the maillard reactions related to aroma generation in coffee; ASIC 15th; Montpellier; 519-527; 1993
- Lit 105 Hobbie, M.; Eggers, R.: The Influence of Endothermic and Exothermic Energies on the Temperature Field of Coffee Beans during the Roasting Process; ASIC 19th; Trieste; CD-Rom; 2001
- Lit 106 Holley, W.: Emissionen der Lebensmittelindustrie und ihre Vermeidung; In: Lebensmitteltechnologie: biotechnologische, chemische, mechanische und thermische Verfahren der Lebensmittelverarbeitung; herausgegeben von Heiss, R.; 415-425; 1991
- Lit 107 Holscher, W.; Steinhart, H.: Formation Pathways for Primary Roasted Coffee Aroma Compounds; In: Thermally generated Flavors; Ed. by Parliment, T. H.; Morello, M. J.; McGorin, R. J.; ACS Symposium Series 543; 1994

- Lit 108 Homma, S.: Chemistry II: Non-volatile Compounds, Part II; In: Coffee Recent Developments; Ed. by Clarke, R. J.; Vitzthum, O. G.; 2001
- Lit 109 Hünnersdorff, R. von; Hasenkamp, H. G.: Coffee A Bibliography; 2002
- Lit 110 J. L. M. C.: Naturgemässe Beschreibung Der Coffee, Thee, Chocolate und Tabacks ... / Auß der Englischen in die Hochteutsche Sprache übersetzt / durch J. L. M. C.; Erschienen: 1686; In: Schatzkammer Rarer und neuer Curiositäten: In den aller-wunderbahresten Würckungen der Natur und Kunst; Darinnen allerhand seltzame und ungemene Geheimnisse, bewehrte Artzneyen, Wissenschaftten und Kunst-Stücke zu finden ... - Der andere Druck, Jetzo mit dem Dritten Theil ... vermehret; 1686
- Lit 111 Jansen, G. A.; Lange, S.: Weight Loss in Coffee Processing; ASIC 19th, Trieste; CD-Rom; 2001
- Lit 112 Juergens, C.: Darstellung von Geruchsimmissionsprognosen unter Berücksichtigung geltender Rechtsvorschriften in Nordrhein-Westfalen; Konferenz: Geruchsstoffe. Quellen, Ausbreitung, Wirkungen, Olfaktometrie, technische und administrative Maßnahmen. Kolloquium; VDI-Berichte; Bd. 561; 343-364; 1986
- Lit 113 Kast, W.; Klan, H.: Wärmeübergang durch freie Konvektion an umströmten Körpern; VDI-Wärmeatlas; 7. Auflage; Fa1 - Fa7; 1994
- Lit 114 Katz, S. N.: Decaffeination of Coffee; In: Coffee Volume 2: Technology; Ed. by Clarke, R. J.; Macrae, R.; 1987
- Lit 115 Kawakami, Y.; Kunieda, S.; Sato, A.; Takashima, Y.; Kanisawa, T.: Studies on volatile compounds in a series of roasted coffee beans. Changes of the amounts of volatile compounds and total sulfur.; ASIC 16th; Kyoto; 332-339; 1995
- Lit 116 Kazi, T.; Clifford, M. N.: Comparison of physical and chemical characteristics of "high yield" and "regular" coffees; ASIC 11th; Lomé; 297-308; 1985
- Lit 117 Kersting, M.: Coffein; In: Kaffee, Käse, Karies ... Biochemie im Alltag; herausgegeben von Koolman, J.; Moeller, H.; Röhm, K.-H.; 90-101; 1998
- Lit 118 Kino, T.; Takagi, T.: Effects of far infrared heating on roasting coffee beans; ASIC 16th; Kyoto; 397-405; 1995
- Lit 119 Klein, H.; Speer, K.; Schmidt, E. H. F.: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) in Roh- und Roestkaffee; Bundesgesundheitsblatt 3/93; Band 36; Heft 3; Seite 98-100; 1993
- Lit 120 Kliefoth, J.: Modellierung von Röstprozessen in der Wirbelschicht zur Auslegung großtechnischer Anlagen; Dissertation; 1984
- Lit 121 Ko, Y. S.: Characterization of the Roasting Temperature and Time-Dependent Physicochemical and Sensory Evaluation of Various Coffee Beans; In: Caffeinated Beverages ASC Symposium Series 754; Ed. by Parliment, T. H.; Ho, C.-T.; Schieberle, P.; 2000
- Lit 122 Koch, W.: Auswirkungen der TA Luft auf die Kaffeeindustrie; Kaffee und Teemarkt; 1986

- Lit 123 Koga, Y.: The effect of coffee aroma on the brain function: Results from the studies of regional cerebral blood flow through positron emission tomography and event-related potential; ASIC 16th; Kyoto; 25-33; 1995
- Lit 124 Kraszewski, A. W.: Microwave Aquametry - Needs and Perspectives; IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 39; 828-835; 1991
- Lit 125 Krauss, R.: Stoffwerte von Luft; Db16-Db28; VDI-Wärmeatlas; 7. Auflage; 1994
- Lit 126 Krischer, O.; Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik; 1978
- Lit 127 Kröll, K.: Trockner und Trocknungsverfahren; 1978
- Lit 128 Kröll, K.; Mujumdar, A. S.; Menon, A. S.: Drying since the Milleniums; In: Drying '80; Vol. 2; Ed. by Mujumdar, A. S.; 485-494; 1980
- Lit 129 Kröll, K.: Trocknungsgüter; In: Trocknen und Trockner in der Produktion; herausgegeben von Kröll, K.; Kast, W.; 1989
- Lit 130 Krüger, G., Mörl, L., Heinrich, S., Roebert, L., Rösler, M.: Röstung, Kandierung und Kühlung von Kaffeebohnen in der Wirbelschicht; Chemie Ingenieur Technik 72; Nr. 9; 1044; 2000
- Lit 131 Kunii, D.; Levenspiel, O.: Bubbling bed model for kinetic processes in fluidized beds; I & EC Process design and development; Vol. 7; No. 4; 481-492; 1968
- Lit 132 Kunii, D.; Levenspiel, O.: Fluidized Reactor Models; Ind. Eng. Chem. Res. 29; 1226-1234; 1990
- Lit 133 Kunii, D.; Levenspiel, O.: Phase Interchange Coeffizients in bubbling Fuidized Beds; Journal of Chemical Engineering of Japan 24; Nr. 2; 138-141; 1991
- Lit 134 Kunii, D; Levenspiel, O.: Effect of particles in bubbles on fluidized bed mass and heat transfer kinetics; J. Chem. Eng. Jpn. 24; Nr. 2; 183-188; 1991
- Lit 135 Kunii, D.; Levenspiel, O.: Fluidization Engineering; 1991
- Lit 136 Kunii, D.; Levenspiel, O.; Heat Transfer Between Fluidized Beds and Wall Surfaces; Fluidization VII; 47-58; 1992
- Lit 137 Kupfer, K.: Grundlagen der Feuchtemessung; In: Materialfeuchtemessung. Grundlagen, Meßverfahren, Applikationen, Normen; herausgegeben von Kupfer, K.; 1-23; 1997
- Lit 138 Kupfer, K.: Thermogravimetrische Verfahren; In: Materialfeuchtemessung. Grundlagen, Meßverfahren, Applikationen, Normen; herausgegeben von Kupfer, K.; 46-57; 1997
- Lit 139 Kupfer, K.: Analytische Verfahren; In: Materialfeuchtemessung. Grundlagen, Meßverfahren, Applikationen, Normen; herausgegeben von Kupfer, K.; 58-62; 1997
- Lit 140 Kwauk, M.: Fluidization idealized and bubbleless, with applications; 1992

- Lit 141 Labuza, T. P.: The Maillard Reaction in Chemistry, Food and Health; S. 176; 1994
- Lit 142 Lawler, F. K.: Develops continuous pressure roaster; Food Engineering; Vol. 43; Nr. 2; 67-69; 1971
- Lit 143 Lee, S.; Smith, H. L., Jr.: Smitherm's new method of coffee roasting; Tea and Coffee Trade Journal 143 (2); 9, 23-25; 1972
- Lit 144 Leitzmann, M. F.; Willett, W. C.; Rimm, E. B.; Stampfer, M. J.; Spiegelman, D.; Colditz, G. A.; Giovannucci, E.: A Prospective Study of Coffee Consumption and the Risk of Symptomatic Gallstone Disease in Men; The Journal of the American Medical Association; Vol. 281; No. 22; 2106-2112; 1999
- Lit 145 Levenspiel, O.; Kunii, D.; Fitzgerald, T.: The Processing of Solids of Changing Size in Bubbling Fluidized Beds; Powder technology 2; 87-96; 1968
- Lit 146 Liebig, J. v.: Bereitung des Kaffees; Chemisches Zentralblatt; 575-576; 1866
- Lit 147 Lindner, M. W.: Warenkunde und Untersuchungen von Kaffee, Kaffee-Ersatz- und -Zusatzstoffen; 1955
- Lit 148 Lindner-Steinert, A.; Zou, M.: Aromaveränderung von vakuumverpacktem Kaffee bei unterschiedlichen Packstoffen; Verpackungs-Rundschau 47; Heft 1; 40-42; 1996
- Lit 149 Link, A: Kaffee-Kohle; Dissertation; 1939
- Lit 150 Lloyd, T.; Rollings, N.; Eggli, D. F.; Kieselhorst, K.; Chinchilli, V. M.: Dietary caffeine intake and done status of postmenopausal women; American Journal of Clinical Nutrition 65; 1826-1830; 1997
- Lit 151 Lomauro, C. J.; Bakshi, A. S.; Labuza, T. P.: Evaluation of food Moisture Sorption Isotherm Equations, Part I: Fruit, Vegetable and Meat Products; Lebensmittel- Wissenschaft und -Technologie; Band 18; Heft 2; 111-117; 1985
- Lit 152 Ludwig, E.: Mathematische Beurteilung von Methoden und Ergebnissen; In: Untersuchung von Lebensmitteln; herausgegeben von Rauscher, K.; Engst, R.; Freimuth, U.; 1986
- Lit 153 Lukin, N. I.; Khramov, V. V.: Equipment for roasting coffee, cereals and chicory in a fluidized bed; Konservnaya i Ovoshchesushil'naya Promyshlennost'; No. 3; 4-6; 1983
- Lit 154 Luyben, K. Ch. A. M.; Oliemann, J. J.; Bruin, S.: Concentration Dependent Diffusion Coefficients Derived From Experimental Drying Curves; In: Drying'80; Vol. 2; Ed. by Mujumdar, A. S.; 233-243; 1980
- Lit 155 Machnow, E.: Modellierung der diskontinuierlichen Wirbelschichttrocknung körniger Güter mit überhitztem Wasserdampf und Heißluft; Dissertation; 2001
- Lit 156 Maier, H. G.: Kaffee; 1981
- Lit 157 Maier, H. G.: Zur Zusammensetzung kurzzeitgerösteter Kaffees; Lebensmittelchemie und Gerichtliche Chemie 39 (2); 25-29; 1985

- Lit 158 Maier, H. G.: On the Composition of fast roasted coffees; ASIC 11th; Paris; 291-296; 1985
- Lit 159 Maier, H. G.: Determination of water in coffee; ASIC 12th; Montreux; 157-163; 1987
- Lit 160 Manno, V. P.; Ruocco, G.: A Performance Model of Bubbling Fluidized Bed Hydrodynamics; Powder Technology 59; 261-273; 1989
- Lit 161 Mayer, F.; Czerny, M.; Grosch, W.: Sensory study of the character impact compounds of a coffee beverage; Eur. Food. Res. Technol. 211; 272-276; 2000
- Lit 162 Martin, H.: Wärmeübergang in Wirbelschichten; VDI-Wärmeatlas; 7. Auflage; Mf1-Mf8; 1994
- Lit 163 Martin-Gautier, A. L. F.; Pyle, D. L.: The Fluid Mechanics of Single Bubbles; In: Fluidization Technology; Ed. by Keairns, D. L.; 21-41; 1975
- Lit 164 Massini, R.; Nicoli, M. C.; Cassara, A.; Lericci, C. R.: Study on physical and physicochemical changes of coffee beans during roasting. Note 1; Italian Journal of Food science 2; 123-130; 1990
- Lit 165 Meel, D. A. van: Adiabatic convection batch drying with recirculation of air; Chem. Eng. Sci. 9; 36-44; 1958
- Lit 166 Menchú, J. F.; Ortega, E. A.: Correlation between some physical properties of the roasted coffee and its inherent quality; ASIC 5th; Lisbonne; 327-335; 1971
- Lit 167 Michel, W.; Mörl, L.; Kliefoth, J.: Moderne Wirkprinzipien bei der Röstung körniger Güter zur Senkung des spezifischen Energiebedarfs; Energieanwendung 31; Heft 2; S. 60-62; 1982
- Lit 168 Mohr, E.: Die Ermittlung des Röstgrades von Röst- und Extraktkaffee durch Farbwertmessungen und Ultraviolett-spektroskopie; Kaffee- und Tee-Markt 21; 3-6; 1971
- Lit 169 Molerus, O.; Werther, J.: Vorausberechnung der Blasengröße in Wirbelschichten; Chem. Techn.; Jahrgang 34; Heft 10; 511-516; 1982
- Lit 170 Mörl, L., Kliefoth, J., Michel, W.: Entwicklung und Übertragung von Modellvorstellungen zur Auslegung großtechnischer Wirbelschichtanlagen unter dem Aspekt minimalen Energieverbrauchs, Energietechnik 32; Heft 11; 430-434; 1982
- Lit 171 Mörl, L.; Schuart, L.: Vorteile der Wirbelschichttechnik zur Gestaltung abproduktfreier Technologien; Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Otto von Guericke Magdeburg; Band 32; Heft 2; 80-85; 1988
- Lit 172 Mörl, L.; Künne, H. - J.; Backhaus L.; Krüger, G.; Sonntag, R.: Berechnung spezifischer Energieaufwände für Wirbelschichtanlagen zur Kaffeeröstung; 1991
- Lit 173 Mörl, L.: Wirbelschicht- und Wirbelschichtgranuliertrockner; In: Thermisches Trennen; herausgegeben von Weiß, S.; 1996
- Lit 174 Mühleib, F.; Detering, W.: Kaffee und Gesundheit; Deutscher Kaffee-Verband; 1996

- Lit 175 Müller, H.-G.: Kaffee-Digest 1, Daten und Hintergründe; 2005
- Lit 176 Nagaraju, V. D.; Ramalaxmi, K.; Rao, P. N. S.: Studies on roasting of low grade Indian coffee beans (black, brown, bits) using spouted bed roaster; ASIC 16th; Kyoto; 1995; 487-491; 1995
- Lit 177 Nagaraju, V. D.; Murthy, C. T.; Ramalakshmi, K.; Rao, P. N. S.: Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed; Journal of Food Engineering 31 (2); 263-270; 1997
- Lit 178 Nagaraju, V. D.; Ramalaxmi, K.: Roasting of coffee beans in a spouted bed coffee roaster; Journal of Food Science and Technology Vol. 39 No. 5; 530-533; 2002
- Lit 179 Nagodawithana, T.: Yeast-Derived Flavors and Flavor Enhancers and Their Probable Mode of Action; Food Technology; Bd. 46; H 11; 138-144; 1992
- Lit 180 Nehlig, A.: Coffee and caffeine dependence: What do we know now?; ASIC 17th; Nairobi; 35-42; 1997
- Lit 181 Neumann, C.: Vom Caffée; Faks.-Dr. (1977); 1735
- Lit 182 Nicoli, M. C.; Dalla Rosa, M.; Lerici, C. R.: Influence of some Processing Conditions on Solid-Liquid Extraction of Coffee; Lebensm.-Wiss. u. Technol. 23; 386-389; 1990
- Lit 183 Noordally, E.; Richmond, J. R.; Drumm, K. J.: Catalytic Oxidation Processes for Odour and VOC Control; In: Characterization and Control of Odours and VOC in the Process Industries; Ed. by Vigneron, Hermia, Chaouki; 459-467; 1994
- Lit 184 Ortola, M. D.; Londono, L.; Gutierrez, C. L.; Chiralt, A.: Influence of roasting temperature on physicochemical properties of different coffees; Food Science and Technology International 4; 59-66; 1998
- Lit 185 Paardekooper, E. J. C.; Driesen, J.; Cornelissen, J.: Some simple analytical methods in coffee processing; ASIC 4th; Amsterdam; 131-139; 1969
- Lit 186 Park, Y. W.: Determination of Moisture and Ash Contents of Food; In: Handbook of Food Analysis; Vol. 1; Ed. by Nollet, L. M. L.; 1996
- Lit 187 Parliment, T. H.: Thermal generation of aromas; In: Thermal generation of aromas; ACS Symposium Series 409; 2-11; 1989
- Lit 188 Parliment, T. H.; Stahl, H. D.: What makes that coffee smell so good?; Chemtech; Band 25; Heft 8; 38-47; 1995
- Lit 189 Perego, P.; Palazzi, E.; Zonato, C.; Manara, R.; Del Borghi, M.: Critical Examination Of Gaseous Emissions From Coffee Roasting Abatement Techniques, Man and his Ecosystem; Proceedings of the 8th World Clean Air Congress; Vol. 4; 1989
- Lit 190 Perego, P.; Fabiano, B.; Ferraiolo, A.; Solisio, C.; Palazzi, E.: Coffee roasting by medium sized plants: A consistent solution to abate atmospheric emissions with a low olfactory threshold; Chemical and Biochemical Engineering Quarterly 9 (1); 1-6; 1995

- Lit 191 Perego, P.; Fabiano, B.; Ferraiolo, A.; Zilli, M.; Palazzi, E.: Feasibility study on biological abatement of odorous substances from coffee roasting processes; *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 9 (3); 123-131; 1995
- Lit 192 Petracco, M.: Physio-Chemical and structural Characterisation of „Espresso“ Coffee Brew; ASIC 13th; Paipa; 246-261; 1989
- Lit 193 Pfaff, C. H.; Liebig, J. v.: Ueber die Zusammensetzung des Caffeins; *Annalen der Pharmacie*; 17-20; 1832
- Lit 194 Pittia, P.; Dalla-Rosa, M.; Lerici, C. R.: Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions; *Food Science and Technology - Iwt. Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*; Band 34; Heft 3; 168-175; 2001
- Lit 195 Pittia, P.; Manzocco, L.; Nicoli, M. C.: Thermophysical Properties of Coffee as Affected by Processing; ASIC 19th, Trieste; CD-Rom; 2001
- Lit 196 Porto, M. C. Da; Nicoli, C.; Severini, C.; Sensidoni, A.; Lerici, C. R.: Study on physicochemical changes in coffee beans during roasting. Note 2; *Italian Journal of Food science* (3); 197-307; 1991
- Lit 197 Puhlmann, R.; Sobek, E.; Volkmer, M.: Aspekte der Röstkaffeeproduktion; *Lebensmittelindustrie* 33 (4); 182-183; 1986
- Lit 198 Puhlmann, R.; Sobek, E.; Bartsch, G.: Strukturveränderungen der Kaffeebohne im Röstprozeß; *Lebensmittelindustrie* 33 (6); 278-279; 1986
- Lit 199 Radtke, R.: Das Problem der CO<sub>2</sub>-Desorption von Röstkaffee unter dem Gesichtspunkt einer neuen Packstoffentwicklung; ASIC 7th; Hamburg; 323-333; 1975
- Lit 200 Raemy, A.: Differential Thermal Analysis and Heat Flow Calorimetry of Coffee and Chicory Products; *Thermochimica Acta* 43; 229-236; 1981
- Lit 201 Raemy, A.; Lambelet, P. A.: A calorimetric study of self-heating in coffee and chicory; *Journal of Food Technology* 17; 451-460; 1982
- Lit 202 Rahn, W.: Einfluß der Wasserdampfbehandlung auf einige physiologisch wirksame Roh- und Röstkaffeebestandteile; Dissertation; 1979
- Lit 203 Rauwolf, L.: Beschreibung der Reyß Leonhardi Rauwolffen, so er vor dieser Zeit gegen Aufgang in die Morgenländer, fürnemlich Syriam, Judeam, Arabiam, Mesopotamiam, Babyloniam, Assyriam, Armeniam, u. nicht ohne geringe Mühe und grosse Gefahr selbst vollbracht: in 3 Theil abgetheylet. - Gedruckt zu Franckfurt am Mayn bey Christoff Raben; 1582
- Lit 204 Reineccius, G. A.: The Maillard reaction and coffee flavor; ASIC 16th; Kyoto; 249-257; 1995
- Lit 205 Rizzi, G. P.: The maillard Reaction in Foods; In: *The Maillard Reaction in Chemistry, Food and Health*; Ed. by Labuza, T. P.; Reineccius, G. A.; Monnier, V.; O'Brien, J.; Baynes, J.; 1994
- Lit 206 Röhm, M.: Kaffee; In: *Kaffee, Käse, Karies ... Biochemie im Alltag*; herausgegeben von Koolman, J.; Moeller, H.; Röhm, K.-H.; 78-89; 1998



- Lit 207 Rolz, C.; Menchú, J. F.; Arimany, E.: The fluidized bed drying of coffee; ASIC 4th; Amsterdam; 166-173; 1969
- Lit 208 Rothfos, B.: Kaffee: Die Produktion; 1982
- Lit 209 Rothfos, B.: Kaffee: Der Verbrauch; 1984
- Lit 210 Rothfos, J. B.; Oestreich-Janzen, S. H.: Color measurements in coffee and coffee brew; ASIC 14th; San Francisco; 277-285; 1991
- Lit 211 Rotzoll, F.; Müller-Henniges, H.-G.: Kaffee-Bibliothek; Deutscher Kaffee-Verband; 1997
- Lit 212 Sakano, T.; Yamamura, K.; Tamon, H.; Miyahara, M.; Okazaki, M.: Improvement of Coffee Aroma by Removal of Pungent Volatiles Using A-Type Zeolite; Journal of Food Science; Vol. 61; No. 2; 473-476; 1996
- Lit 213 Schär, W.; Rüegg, M.: Evaluation of G. A. B. Constants from Water Vapour Sorption Data; Lebensmittel- Wissenschaft und -Technologie; Band 18; Heft 2; 111-117; 1985
- Lit 214 Schenker, S.; Handschin, S.; Frey, B.; Perren, R.; Escher, F.: Structural properties of coffee beans as influenced by roasting conditions; ASIC 18th; Helsinki; 127-135; 1999
- Lit 215 Schenker, S.: Investigations on the hot air roasting of coffee beans; Ph. D. thesis No. 13620; 2000
- Lit 216 Schenker, S.; Handschin, S.; Frey, B.; Perren, R.; Escher, F.: Pore structure of coffee beans affected by roasting conditions; Journal of food science 65 (3); 452-457; 2000
- Lit 217 Schenker, S.; Heinemann, C.; Huber, M.; Pompizzi, R.; Perren, R.; Escher, F.: Impact of Roasting Temperature Profiles on Chemical Reaction Conditions in Coffee Beans; ASIC 19th, Trieste; 2001
- Lit 218 Schilter, B.; Cavin, C.; Tritscher, A.; Constable, A.: Health Effects and Safety Considerations; In: Coffee Recent Developments; Ed. by Clarke, R. J.; Vitzthum, O. G.; 2001
- Lit 219 Schlünder, E.-U.: Einführung in die Stoffübertragung; 1996
- Lit 220 Schlünder, E.-U.; Tsotsas, E.: Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten; 1988
- Lit 221 Schön, M.; Hübner, R.: Geruch, Messung und Beseitigung; 1996
- Lit 222 Schröder, R.: Kaffee, Tee und Kardamon: tropische Genußmittel und Gewürze; 1991
- Lit 223 Schumacher, W.: Ein Verfahren zur Ermittlung und Beurteilung von Geruchsbelästigung am Beispiel einer Kaffeerösterei; Konferenz: Geruchsstoffe. Quellen, Ausbreitung, Wirkungen, Olfaktometrie, technische und administrative Maßnahmen. Kolloquium; VDI-Berichte; Bd. 561; 289-298; 1986
- Lit 224 Seifert, J.: Bestehen Unterschiede in der Reaktion des Magens auf Kaffeegetränke, die aus Kaffee unterschiedlicher Aufbereitung bzw. Veredelung hergestellt sind?; Dissertation; 1966

- Lit 225 Sesso, H. D.; Gaziano, J. M.; Buring, J. E.; Hennekens, C. H.: Coffee and Tea Intake and the Risk of Myocardial Infarction; American Journal of Epidemiology; 1999
- Lit 226 Severini, C.; Nicoli, M. C.; Mastrocola, D.; Lerici, C. R.: Influence of heating rate on some physical and physical-chemical properties of coffee beans during the roasting process; ASIC 14th; San Francisco; 641-648; 1991
- Lit 227 Shi, D.: Fluidodynamik und Wärmeübergang in einer zirkulierenden Wirbelschicht; Fortschrittsberichte VDI; Reihe 3; Nr. 466; 1997
- Lit 228 Shibamoto, T.: An overview of coffee aroma and flavor chemistry; ASIC 14th; San Francisco; 107-116; 1991
- Lit 229 Silwar, R.: Gaschromatographisch - Massenspektrometrische Untersuchungen schwefelhaltiger Verbindungen in Röstkaffee und Cystein / Methionin - Modellsystemen; Dissertation; 1982
- Lit 230 Silwar, R.; Kamperschröer, H.; Tressl, R.: Gaschromatisch-massenspektrometrische Untersuchungen der Röstkaffee aromas - Quantitative Bestimmung wasserdampfflüchtiger Aromastoffe; Chem. Microbiol. Technol. Lebensm. 10; 176-187; 1987
- Lit 231 Silwar, R.; Lüllman, C.: Investigation of aroma formation in robusta coffee during roasting; Cafe Cacao Thé 37 (2); 145-152; 1993
- Lit 232 Singh, P. C.; Singh, R. K.; Bhamidipati, S.; Singh, S. N.; Barone, P.: Thermophysical Properties of fresh and roasted coffee powders; Journal of food processing engineering 20 (1); 31-50; 1997
- Lit 233 Sivetz, M.: Comparisons of changes in roasted coffee beans in pressurized oxygen free vs. atmospheric roasters; ASIC 6th; Bogota; 199-221; 1973
- Lit 234 Sivetz, M.: Fluid Bed Drying & Roasting of Coffee Beans; ASIC 7th; Hamburg; 359-366; 1975
- Lit 235 Sivetz, M.; Desrosier, N. W.: Coffee Technology; 1979
- Lit 236 Sivetz, M.: Growth in use of automated fluid bed roasting of coffee beans; ASIC 14th; San Francisco; 313-318; 1991
- Lit 237 Small, L. E.; Horrell, R. S.: High yield coffee technology; ASIC 15th; Montpellier; 719-726; 1993
- Lit 238 Smith, A.; Brice, C.: Behavioral effects of caffeine in coffee; ASIC18th; Helsinki; 204-207; 1999
- Lit 239 Smith, R. F.; White, G. W.: The Measurement of the Colour of ground Coffee and instant Coffee by means of the Gardner Automatic Colour Difference Meter; ASIC 2nd; Paris; 207-211; 1965
- Lit 240 Smith, R. F.: Recent Reports on the Chemistry and Technology of Coffee: A Review; ASIC 6th; Bogota; 18-27; 1973
- Lit 241 Smith, R. F.: Recent reports on the Chemistry and Technology of Coffee: A Review; ASIC 7th; Hamburg; 389-400; 1975
- Lit 242 Smith, R. F.: Recent Developments in the Chemistry and Technology of Coffee: A Review; ASIC 8th; Abidjan; 21-31; 1977

- Lit 243 Smith, R. F.: Recent Developments in the Science and Technology of Coffee; ASIC 9th; London; 443-465; 1980
- Lit 244 Smith, R. F.: Recent Developments in the Chemistry and Technology of Coffee and its Products; ASIC 10th; Salvador; 143-157; 1982
- Lit 245 Smith, R. F.: A History of Coffee; In: Coffee: Botany, biochemistry and productions of beans and beverage; Ed. by Clifford, M. N.; Willson, K. C.; 1985
- Lit 246 Snel, J.; Lorist, M. M.; Ruijter, J.; de Ruyter, M: Effects of caffeine on attention; ASIC 18th, Helsinki; 208-209; 1999
- Lit 247 Speer, K; Kölling-Speer, I.: Chemistry I: Non-volatile Compounds: Lipids; In: Coffee Recent Developments; Ed. by Clarke, R. J.; Vitzthum, O. G.; 2001
- Lit 248 Spon, J.: Drey Neue Curieuse Tractätgen Von Dem Trancke Café, Sinesischen Thé und der Chocolata; Bautzen; 1686
- Lit 249 Staudinger, W.: Untersuchungen des Reinigungseffektes gasbetriebener thermischer Nachverbrennungen an Abgasen von Kaffeeroestereien; Gas Waerme International; Bd. 23; Nr. 4; 121-125; 1974
- Lit 250 Steinhart, H.; Luger, A.: Amino acid of steam treated coffee; ASIC 16th; Kyoto; 278-285; 1995
- Lit 251 Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik 2; 1994
- Lit 252 Straub, J.: Stoffwerte von Wasser; Db2-Db15; VDI-Wärmeatlas; 7. Auflage; 1994
- Lit 253 Streuli, H.: Röstaromen; In: Aroma- und Geschmacksstoffe in Lebensmitteln; herausgegeben von Solms, J.; Neukom, H.; 119-163; 1967
- Lit 254 Sturm, R.: Untersuchung phenolischer Kaffee-Inhaltsstoffe im Hinblick auf Veränderungen bei der Wasserdampfbehandlung von Rohkaffee; Dissertation; 1983
- Lit 255 Telegdy-Kováts, L.; Kelemen-Szilas, M.: The Effect of Roasting Technology on the Surface Activity of Coffee; ASIC 4th; Amsterdam; 186-191; 1969
- Lit 256 Tholander, P. J.: Damit es nicht zum Himmel stinkt, Biologische Reinigungsverfahren; Chemische Rundschau; Bd. 39 (46); 14; 1986
- Lit 257 Tressl, R.: Bildung von Aromastoffen durch Maillardreaktionen; ASIC 9th; London; 55-76; 1980
- Lit 258 Tressl, R.: Formation of flavor components in roasted coffee; In: Thermal generation of aromas; ACS Symposium Series 409; 285-301; 1989
- Lit 259 Tscheuschner, H.-D.: Grundzüge der Lebensmitteltechnik; 1996
- Lit 260 Uhlemann, H.; Mörl, L.: Wirbelschicht-Sprühgranulation; 2000
- Lit 261 Ukers, W.: All about Coffee; 1922

- Lit 262 Viani, R.: Physiological Active Substances in Coffee; In: Coffee Volume 3: Physiology; Ed. by Clarke, R. J.; Macrae, R. 1985
- Lit 263 Viani, R.: Coffee; In: Encyclopaedia of Food Science Food Technology and Nutrition; 1114-1146; 1993
- Lit 264 Viani, R.: Coffee; In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry; 6. Aufl.; Volume 9; 1-30; 2003
- Lit 265 Vincent, J.-C.: Green Coffee Processing; In: Coffee Volume 2: Technology; Ed. by Clarke, R. J.; Macrae, R.; 1987
- Lit 266 Vitzthum, O. G.: Chemie und Bearbeitung des Kaffees; In: Kaffee und Coffein; herausgegeben von Eichler, O.; 1976
- Lit 267 Weisser, H.: Influence of Temperature on Sorption Equilibria; In: Properties of Water in Foods; Proceedings ISO-POW III, Beaune 1983; Ed. by Simatos, D.; Multon, J. L.; 1985
- Lit 268 Weisser, H.: Influence of Temperature on Sorption Isotherms; In: Food Engineering and Process Application; Vol. 1; Transport Phenomena; Ed. by Le Maguer, M.; Jelen, P.; 189-200; 1986
- Lit 269 Weisser, H.; Schoch, M.: Messen der Temperaturabhaengigkeit von Wasserdampf-Sorptionsisothermen mit verschiedenen Apparaturen; ZFL - Internationale Zeitschrift für Lebensmitteltechnologie; Band 38; Heft 4; 298-306; 1987
- Lit 270 Werther, J.; Molerus, O.: Autokorrelation und Kreuzkorrelation zur Messung lokaler Blasengrößen und -aufstiegsgeschwindigkeiten in realen Gas/Feststoff-Fließbetten; Chemie Ingenieur Technik 43; Heft 5; 271-273; 1971
- Lit 271 Werther, J.: Bubble Growth in large Diameter Fluidized Beds; In: Fluidization Technology; Ed. by Keairns, D. L.; 215-235; 1975
- Lit 272 Werther, J.: Zur Problematik der Maßstabsvergrößerung von Wirbelschichtreaktoren; Chemie Ingenieur Technik 49; 777-785; 1977
- Lit 273 Werther, J.: Grundlagen der Wirbelschichttechnik; Chemie Ingenieur Technik 54; 876-883; 1982
- Lit 274 Werther, J.: Mathematische Modellierung von Wirbelschichten; Chemie Ingenieur Technik 56; Nr. 3; 187-196; 1984
- Lit 275 Wiegard, D.: Schadstoffbegrenzung: Katalytisches System für Röst- und Räucheranlagen; ZFL - Internationale Zeitschrift für Lebensmitteltechnologie; Band 40; Heft 3; 78-82; 1989
- Lit 276 Winneke, G.; Plattig, K. H.; Brandl, U.; Berresheim, H.-W.: Extra-olfaktorische Wirkungen geruchsintensiver Stoffe; Konferenz: Geruchsstoffe. Quellen, Ausbreitung, Wirkungen, Olfaktometrie, technische und administrative Maßnahmen. Kolloquium; VDI-Berichte; Bd. 561; 411-425; 1986
- Lit 277 Winter, M.; Gautschi, F.; Flament, I.; Willhalm, B.; Stoll, M.: Die flüchtigen Aromastoffe des Kaffees; In: Aroma- und Geschmacksstoffe in Lebensmitteln; herausgegeben von Solms, J.; Neukom, H.; 165-198; 1967

- Lit 278 Wintgens, J. N.: The Coffee Plant; In: Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production; Ed. by Wintgens, J. N.; 2004
- Lit 279 Wootton, A. E.: A Comparison of Methods for the Measurement of Moisture Content in Parchment and green Coffees; ASIC 3rd; Trieste; 92-99; 1967
- Lit 280 Wurziger, J.: Über Genußwert und Bekömmlichkeit von Röstkaffee; ASIC 3rd; Trieste; 299-312; 1967
- Lit 281 Wurziger, J.: Beiträge zum Genußwert und zur Bekömmlichkeit von Röstkaffee; Kaffee und Tee Markt 19 (4); 9-10; 1969
- Lit 282 Wurziger, J.: Carbonsäurehydroxytroptamide und Alkalifarbzahlen in Rohkaffees als analytische Hilfsmittel zur Beurteilung von Röstkaffee-Genußwert und Bekömmlichkeit; ASIC 6th; Bogota; 332-342; 1973
- Lit 283 Wurziger, J.: Coffee; In: Ullmanns Encykl. Techn. Chem.; 4. Aufl.; Volume 13; 429-440; 1977
- Lit 284 Wurziger, J.: Zur Aromabeurteilung bei Röstkaffee; Chemie Mikrobiologie Technologie der Lebensmittel 6 (2); 58-63; 1979
- Lit 285 Wurziger, J.: Zur Untersuchung und Beurteilung bearbeiteter Roh- und Röstkaffees; Lebensmittelchemie und Gerichtliche Chemie 33 (4); 83-84; 1979
- Lit 286 Wurziger, J.: Kaffee; AID-Verbraucherdienst 29 (6); 123-129; 1984
- Lit 287 Yamamoto, T.: Psychophysiology of coffee in sensory domain; ASIC 16th Kyoto; 34-42; 1995
- Lit 288 Yeretian, C.; Jordan, A.; Brevard, H.; Lindinger, W.: On-line monitoring of coffee roasting by proton-transfer-reaction mass-spectrometry; Symposium Series 763 (Flavor Release); 112-123; 2000
- Lit 289 Yeretian, C.; Jordan, A.; Badout, R.; Lindinger, W.: From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles; Eur. Food Res. Technol. 214; 92-104; 2002
- Lit 290 Yoshida, K.; Ueno, T.; Kunii, D.: Mechanism of Bed-Wall Heat Transfer in a Fluidized Bed at high Temperatures; Chemical Engineering Science; Vol. 29; 77-82; 1974
- Lit 291 Zenz, F. A.: Fluidization Phenomena and Fluidized Bed Technology; In : Handbook of Powder Science and Technology; Ed. by Fayed, M. E.; Otten, L.; 1984

## **7.2 Normen**

- Lit 292 DIN ISO 6673 Rohkaffee, Bestimmung des Massenverlustes bei 105 °C; 1986
- Lit 293 DIN EN 12619 – Bestimmung der Massenkonzentration des gesamten gasförmigen organisch gebundenen Kohlenstoffs in geringen Konzentrationen in Abgasen; 1999

### 7.3 Patente

- Lit 294 Akira, O.; Tadashi, Y.; Seiji, M.; Hiromichi, H.: Method for producing roasted coffee bean; Japanisches Patent 2003144050; 2003
- Lit 295 Allington, R. A.; Torbet, P. A.: Roasting system; Kanadisches Patent 2308370; WO 99/23888; 1999
- Lit 296 Allington, R. A.; Torbet, P. A.; Granger, E. M.: Method of terminating roasting on basis of color of materials; WO 99/56601 A1; 1999
- Lit 297 Allington, R. A.; Torbet, P. A.; Granger, E. M.: Method of terminating roasting of bulk materials in real time on basis of objectively determined color of materials; US 6106877; 2000
- Lit 298 Argiles, F. D.: Purification of roaster gases; EP 0862370; US 5928697 B; WO 96/35335 A1; 1999
- Lit 299 Aznar, B.; Castello, J. y M.; Antonio: Máquina para el tostado y revestimiento con azúcar para café y productos similares; ES 1054418 U; 2003
- Lit 300 Bersten, I. J.: Apparatus and method for roasting food products; EP 449857 A1; WO 9006694; DE 000068906397 T2; EP 000000449857 B1; 1990
- Lit 301 Bewley, P.; Campbell, P.; Brennan, T.: A coffee production process; GB 2282046; 1993
- Lit 302 Brandlein, L. S.; Schechter, S. M.; Mahlman, J. P.: Coffee roasting method and apparatus; EP 0325822 B1; US 4737376; 1993
- Lit 303 Caasen, H.: Verfahren und Vorrichtung zum Rösten von Kaffeebohnen u. ggl.; Patentschrift 472391 Klasse 82a; 1926
- Lit 304 Delft, H. W. v.; Tijmensen, W. D.: Verfahren und Vorrichtung zum Rösten von Kaffee; DE 2623312; 1976
- Lit 305 Drevici-Kux, U.; Drevici, N.: Verfahren zur Aufbereitung von Kakao- und Kaffeebohnen; CH 665753 A5; 1988
- Lit 306 Eichner, J.: Coffee roasting method and apparatus; WO 00/28831 A1; 2000
- Lit 307 Finken, H.; Jansen, G.; Naves, E.: Arrangement for roasting vegetable bulk material, such as coffee beans; US 5718164 B; EP 0745334 B1; 1998
- Lit 308 Friedrich, J.; Lemaire, R.: Method and Apparatus for roasting Coffee; Kanadisches Patent 2304324; 2000
- Lit 309 Gell, H. A., Jr.: Coffee roaster; US 4494314; 1985
- Lit 310 Gell, H. A., Jr.; Porto, B.: Removable coffee roaster oven chamber; US 5500237; 1996
- Lit 311 Gerhardt, W.; Cook, W.: Coffee roaster with roasting profile control; US 6053093; 2000
- Lit 312 Gerling, J. E.; O'Meara, J. P.: Apparatus for Microwave roasting of coffee beans; US 4326114; 1982

- Lit 313 Granger, E. M.; Torbet, P. A.: Reflectometer for a roasting system; WO 99/56600 A1; US 6104494 B; 1999
- Lit 314 Hibi, H.; Yamanashi, H.: Method of manufacturing rich-flavored roasted coffee beans and ground roasted coffee beans; EP 0534051 A1; 1993
- Lit 315 Hirobumi, K.: Method for roasting coffee raw bean by sand; Japanisches Patent 2004187662; 2004
- Lit 316 Hitosi, O.: Roasting coffee bean; Japanisches Patent 10004881 A; 1998
- Lit 317 Hizaki, S.: Method for roasting coffee beans and method for producing coffee extract solution from the roasted coffee beans; JP 06209708; 1989
- Lit 318 Hubbard, M. H.; Phipps, R. R.; Thompson, R. L.: Low density coffee roasting process; US 4169164; 1979
- Lit 319 Hubbard, M. R.: High speed process for roasting coffee; US 4322447; 1982
- Lit 320 Igusa, M.; Chiba, T.: Coffee roaster; EP 0206827; 1986
- Lit 321 Inakuma, T.; Furui, H.; Tokugawa, Y.; Tsuda, F.; Nagai, M.: Method and apparatus for continuous roasting of food materials; EP 0856261; 1998
- Lit 322 Johanessen, S.: A method for the drying and roasting of coffee and cocoa beans; WO 92/12643; 1992
- Lit 323 Kirkpatrick, S. J.; Gutzein, R. W.; Bertagna, R. W.: Improved process for dark roasting coffee beans; EP 405649 A2; 1994
- Lit 324 Kliefoth, J.; Krell, L.; Kuenne, H. J.; Moerl, L.; Michel, W.; Heinz, H.: Vorrichtung zum kontinuierlichen Rösten und Kühlen körniger Güter; DD 211948; 1984
- Lit 325 Lemme, A. R.; Fudge, C.: Method and apparatus for roasting coffee beans; US 6036988; 2000
- Lit 326 Luhrs, G.: Fördernde Wirbelschicht-Vorrichtung; DE 3325967 C2; 1985
- Lit 327 Mahlmann, J. P.; Scher, L.; Schecter, S. M.: Controlled Coffee roasting; EP 0183878; 1986
- Lit 328 Maki, Y.; Haruyama, T.: Verfahren zum Rösten von Kaffeebohnen mit Dampf; EP 0732880 B1; WO 95/20325; 1997
- Lit 329 Moerl, L.; Michel, W.; Kliefoth, J.; Winkelmann, M.: Vorrichtung zum Rösten und Kühlen insbesondere von Kaffeebohnen; DD 160209; 1983
- Lit 330 Muraoka, S.; Ichihara, S.: Catalyst for Purifying Roasting Smoke of coffee beans and roaster fitted with purifier for roasting smoke of coffee bean with catalyst utilized therefor; JP 03000134 A2; 1991
- Lit 331 Nakamura, A.; Ito, T.: Coffee bean roasting device; EP 0359515 A2 (1990); US 5016362; 1991
- Lit 332 Nishikawa, T.: Coffee bean roaster; Patent; JP 10117756; 1998
- Lit 333 Tamaki, Y.; Kino, T.; Ito, T.; Nakamura, A.: Coffee beans roasting device; EP 0328791 A1; 1989

- Lit 334 Tidland, J. W.; Welch, D. S.: Roasting system with heat recycler; US 5958494 B; 1999
- Lit 335 Toriba, H.: Device for roasting coffee beans; EP 0470254 A1; WO 91/09541; 1992
- Lit 336 Pera, B.: Equipment for roasting coffee, hazelnuts, peanuts and similar commodities; EP 0315605 B1; 1993
- Lit 337 Price, S. E.; Kussin, R. F.; Fruhling, R. J.; Harris, M. B.: Ultrafast roasted coffee; US 4988590; 1991
- Lit 338 Prior, A.: Verfahren zum Konditionieren thermisch expandierbarer Festkörper in einem heißgasbetriebenen Wanderbett; EP 07029200 A2; 1996
- Lit 339 Puhlmann, R.; Bartsch, G.; Meister, U.; Beyer, W.; Luthardt, E.: Verfahren zur Verbesserung der Herstellung von Roestkaffee und Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens; DD 255079; 1988
- Lit 340 Rios, G.; Gibert, H.; Crouzet, J.; Vincent, J.-C.: Process and apparatus for treatment of a product presented in the form of grains and application to roasting; Französisches Patent 2390202; 1978
- Lit 341 Rios, G. M.; Gilbert, H.; Crouzet, J.; Vincent, J.-C.: Process for roasting an agro-food product in a fluidized bed of inert particles; US 4215151; 1980
- Lit 342 Sewell, R. C.: Fluidized Bed Coffee Roaster; US 5394623; 1995
- Lit 343 Shinkawa, K.; Nakagiri, O.; Katsuragi, Y.; Asami, H.: Method and apparatus for roasting and cooling beans; EP 0896794 A1; 1999
- Lit 344 Sivetz, M.: Coffee roasting system; US 3964175; 1976
- Lit 345 Stauber, S.: Method for roasting and cooling granular matter such as coffee; US 3821450; 1974
- Lit 346 Tongeren, D. H. D. van: A continuous coffee roaster; EP 0137556 B1; 1985
- Lit 347 Totsuka, H.: Method for roasting granular material and an apparatus therefor; US 6051266; 2000
- Lit 348 Wellandt, G. F.: Vorrichtung zum Rösten, Trocknen und/oder Kühlen von Kaffeebohnen oder anderen kleinstückigen Produkten; EP 0983731 A2; 2000
- Lit 349 Winkelmann, M., Mörl, L., Röbert, L., Krüger, G., Rösler, M., Heinrich, S., Arndt, T.: Verfahren zum Kandieren von Kaffeebohnen; DE 19902786; 2000
- Lit 350 Wireman, J.; Wireman, D. R.: Apparatus for roasting coffee beans or the like; US 5230281; 1993
- Lit 351 Wireman, D. R.; Wireman, J.: Apparatus and process for conditioning particulate material; EP 0510099 A1; WO 91/10871; 1996
- Lit 352 Yukimichi, K.; Mitsuo, N.; Tetsuo, H.; Yasuko, F.; Fujiharu, Y.: Bean Roasting; Japanisches Patent 09154502A; 1997
- Lit 353 Zimmermann, A.: Kaffee ; Hamburg : Dt. Auslandverlag, 1928



#### **7.4 Internetquellen**

- Lit 354      Deutscher Kaffee-Verband: <http://www.kaffeeverband.de/>; Dezember 2004
- Lit 355      Röstfein Kaffee GmbH Magdeburg: <http://www.roestfein.de/>; Dezember 2004

## 8 Anhang

### 8.1 Formeln und Berechnungen

#### 8.1.1 Stoffdaten für Luft

Gl. 110 dynamische Viskosität von Luft (approximiert nach den Werten des VDI-Wärmeatlas (Lit 125) mittels Chem-Fit für  $0\text{ °C} \leq \vartheta \leq 350\text{ °C}$  und  $p = 1\text{ bar}$  :

$$\eta_L = (17,2462579 + 0,05010411 \cdot \vartheta_L - 3,45 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_L^2 + 2,53 \cdot 10^{-8} \cdot \vartheta_L^3) \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

Gl. 111 Wärmeleitfähigkeit für Luft approximiert nach den Werten des VDI-Wärmeatlas (Lit 125) mittels Chem-Fit  $0\text{ °C} \leq \vartheta \leq 350\text{ °C}$  und  $p = 1\text{ bar}$  :

$$\lambda_L = (24,18486417 + 0,07600134922 \cdot \vartheta_L - 4,292148456 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_L^2 + 3,559404844 \cdot 10^{-8} \cdot \vartheta_L^3) \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 112 spezifische Wärmekapazität von Luft approximiert nach den Werten des VDI-Wärmeatlas (Lit 125) mittels Chem-Fit für  $0\text{ °C} \leq \vartheta \leq 350\text{ °C}$  und  $p = 1\text{ bar}$  :

$$c_{pL} = (1,00651982 + 1,13 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta_L + 5,56 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta_L^2 - 4,15 \cdot 10^{-10} \cdot \vartheta_L^3) \cdot 1000 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 113 kinematische Viskosität von Luft approximiert nach den Werten des VDI-Wärmeatlas (Lit 125) mittels Chem-Fit für  $0\text{ °C} \leq \vartheta \leq 350\text{ °C}$  und  $p = 1\text{ bar}$  :

$$\nu_L = (135,1587232 + 0,895472645 \cdot \vartheta_L + 0,001072712951 \cdot \vartheta_L^2 - 3,150546855 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta_L^3) \cdot 10^{-7} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Gl. 114 spezifische Enthalpie für Luft approximiert nach den Werten des VDI-Wärmeatlas (Lit 125) mittels Chem-Fit für  $0\text{ °C} \leq \vartheta \leq 350\text{ °C}$  und  $p = 1\text{ bar}$  :

$$h_L = (273,4224085 + 1,005033207 \cdot \vartheta_L + 1,812023819 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_L^2 + 1,101084661 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta_L^3) \cdot 1000 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

Gl. 115 Gasdichte nach dem idealen Gasgesetz:

$$\rho_{\text{Gas}} = \frac{M_{\text{Gas}}}{22,4} \cdot \frac{273,16\text{ °C}}{273,16\text{ °C} + \vartheta_{\text{Gas}}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Gleichungen für feuchte Luft:

Gl. 116 Partialdampfdruck der Sättigungslinie (Antione-Gleichung):

$$\ln p_{\text{satt}} = A - \frac{B}{\vartheta_{\text{satt}} + C} \quad p_{\text{satt}} \text{ in [Pa]} \text{ und } \vartheta_{\text{satt}} \text{ in } [^{\circ}\text{C}]$$

Gl. 117 Koeffizienten für Gl. 116 nach Schlünder und Tsotsas (Lit 220)

$$A = 23,462; B = 3978,205; C = 233,349$$

Gl. 118 Sättigungsbeladung der Luft nach Schlünder (Lit 219):

$$Y_{\text{satt}} = \frac{M_D}{M_L} \cdot \frac{p_{\text{sattD}}}{p_{\text{ges}} - p_{\text{sattD}}} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]$$

Gl. 119 Sättigungstemperatur nach Schlünder (Lit 219) mit  $\vartheta_{\text{satt}} \sim \vartheta_{\text{KG}}$ :

$$\vartheta_{\text{satt}} = \frac{h_{L \text{ satt}} - h_{L \text{ WSein}}}{(Y_{\text{satt}} - Y_{L \text{ ein}}) \cdot c_{p \text{ WKG}}} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Gl. 120 Prandl-Zahl für Luft approximiert nach den Werten des VDI-Wärmeatlas (Lit 125) mittels Chem-Fit für  $0^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 350^{\circ}\text{C}$  und  $p = 1 \text{ bar}$ :

$$\text{Pr} = 0,7178693164 - 0,0001660102872 \cdot \vartheta_L + 6,334867791 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta_L^2 - 6,183237271 \cdot 10^{-10} \cdot \vartheta_L^3 \quad [-]$$

### 8.1.2 Stoffdaten für Wasser

Gl. 121 Dichte von Wasser nach Glück (Lit 78) für  $10^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq \vartheta_{\text{satt}(p)}$  oder  $200^{\circ}\text{C}$ :

$$\rho_W = 1,001506 \cdot 10^{-3} - 9,418257 \cdot 10^{-2} \cdot \vartheta_W - 3,677800 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta_W^2 + 3,667823 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta_W^3 \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Gl. 122 spezifische Wärmekapazität von Wasser nach Glück (Lit 78) für  $20^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq \vartheta_{\text{satt}(p)}$  oder  $200^{\circ}\text{C}$ :

$$c_{pW} = 4174,785 + 1,785308 \cdot 10^{-2} \cdot \vartheta_W - 5,097403 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta_W^2 + 4,216721 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_W^3 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 123 Wärmeleitfähigkeit von Wasser nach Glück (Lit 78) für  $10^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 200^{\circ}\text{C}$ :

$$\lambda_W = 5,588576 \cdot 10^{-1} + 2,289358 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta_W - 1,270580 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_W^2 + 1,937536 \cdot 10^{-8} \cdot \vartheta_W^3 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

### 8.1.3 Stoffdaten für Wasserdampf

Gl. 124 dynamische Viskosität für Dampf nach Glück (Lit 78) für  
50 °C oder  $\vartheta_{\text{satt}(p)} \leq \vartheta \leq 400$  °C und  $0,01 \text{ MPa} \leq p \leq 2 \text{ MPa}$  :

$$\eta_D = 9,054339 \cdot 10^{-6} + 2,941217 \cdot 10^{-8} \cdot \vartheta_D + 4,021091 \cdot 10^{-11} \cdot \vartheta_D^2 - 4,379615 \cdot 10^{-14} \cdot \vartheta_D^3 - 10^{-6} \cdot \frac{p_{\text{ges}}}{10^6} \cdot e^{-0,0071 \cdot \vartheta_D} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}]$$

Gl. 125 Wärmeleitfähigkeit für Dampf nach Glück (Lit 78) für  
50 °C oder  $\vartheta_{\text{satt}(p)} \leq \vartheta \leq 400$  °C und  $0,01 \text{ MPa} \leq p \leq 2 \text{ MPa}$  :

$$\lambda_D = 1,707884 \cdot 10^{-2} + 5,875435 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_D + 1,169690 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta_D^2 - 7,180650 \cdot 10^{-11} \cdot \vartheta_D^3 + 0,0196 \cdot \left( \frac{p_{\text{ges}}}{10^6} - 0,01 \right) \cdot e^{-0,0077 \cdot \vartheta_D} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 126 spezifische Wärmekapazität für Dampf nach Glück (Lit 78) für  
50 °C oder  $\vartheta_{\text{satt}(p)} \leq \vartheta \leq 400$  °C und  $0,01 \text{ MPa} \leq p \leq 2 \text{ MPa}$  :

$$c_{p,D} = (1,908603 - 3,154439 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta_D + 3,027647 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta_D^2 - 3,200767 \cdot 10^{-9} \cdot \vartheta_D^3 + (-1,250596 \cdot 10^{-3} + 1,248759 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{p_{\text{ges}}}{10^6} + 1,837470 \cdot 10^{-2} \cdot \left( \frac{p_{\text{ges}}}{10^6} \right)^2 \cdot \left( \frac{\vartheta_D}{300} \right)^{-2,5}) \cdot 1000 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 127 kinematische Viskosität von Wasserdampf:

$$\nu_D = \frac{\eta_D}{\rho_D} \quad \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Gl. 128 spezifische Enthalpie für Dampf nach Glück (Lit 78) für  
50 °C oder  $\vartheta_{\text{satt}(p)} \leq \vartheta \leq 400$  °C und  $0,01 \text{ MPa} \leq p \leq 2 \text{ MPa}$  :

$$h_D = (1,988364 \cdot 10^3 + 1,904792 \cdot (\vartheta_D + 273,16^\circ\text{C}) - 1,915846 \cdot 10^{-4} \cdot (\vartheta_{\text{Dampf}} + 273,16^\circ\text{C})^2 + 3,002079 \cdot 10^{-7} \cdot (\vartheta_D + 273,16^\circ\text{C})^3 - 1,528778 \cdot 10^9 \cdot \frac{p}{10^6} \cdot (\vartheta_D + 273,16^\circ\text{C})^{-2,82} - \left( \frac{p}{10^6} \right)^3 \cdot (6,797117 \cdot 1037 \cdot (\vartheta_D + 273,16^\circ\text{C})^{-14} + 7,833161 \cdot 1084 \cdot (\vartheta_D + 273,16^\circ\text{C})^{-31,6})) \cdot 1000 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

Gl. 129 Prandl-Zahl für Dampf approximiert nach den Werten des VDI-Wärmeatlas (Lit 252) mittels Chem-Fit für  
0 °C  $\leq \vartheta_{\text{Dampf}} \leq 350$  °C und  $p = 1$  bar :

$$Pr_D = 0,981395991 - 0,0001480686274 \cdot \vartheta_D + \frac{323,4516799}{\vartheta_D^2} \quad [-]$$

### 8.1.4 Kenngrößen der Wirbelschicht

Gl. 130 Schichtdruckverlust der Wirbelschicht (Lit 173):

$$\Delta p = \rho_{WS} \cdot g \cdot H_{WS} = \rho_{Fest} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot g \cdot H_{WS} \quad [\text{Pa}]$$

Gl. 131 Höhe der Wirbelschicht:

$$H_{WS} = \frac{4 \cdot m_{Part}}{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_{Part} \cdot \pi \cdot d_{Apparat}^2} \quad [\text{m}]$$

Gl. 132 Fläche der inneren Apparatewand:

$$A_{Wand} = H_{WS} \cdot \pi \cdot d_{Apparat} \quad [\text{m}^2]$$

Gl. 133 Fläche der äußeren Apparatewand:

$$A_{Wandaussen} = H_{WS} \cdot (d_{Apparat} + 2 \cdot s_{Wand} + 2 \cdot s_{Isolierung}) \cdot \pi \quad [\text{m}^2]$$

Gl. 134 Feststoffkonzentration:

$$\varphi = 1 - \varepsilon$$

Gl. 135 Feststoffkonzentration für den Wirbelpunkt (Lit 80):

$$\varphi_{WP} = 1 - \left( 18 \cdot Re_{WP} + \frac{0,36 \cdot Re_{WP}^2}{Ar} \right)^{0,21} \quad [-]$$

Gl. 136 Feststoffvolumen-Konzentration in Wandnähe nach Shi (Lit 227):

$$\varphi_{Wand} = \frac{\varepsilon^4 + 6 \cdot \varphi_{WP}}{\varepsilon^4 + 6 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot (1 - \varepsilon) \quad [-]$$

### 8.1.5 Berechnung der Wärmeübergänge

Gl. 137 Effektive Emissionstemperatur der Wandgrenzschicht nach Baskakov und Filippovski (Lit 19; Lit 155; Lit 227):

$$\vartheta_E = \frac{\vartheta_{Wand} + \vartheta_{Part}}{2} \quad [^\circ\text{C}]$$

Gl. 138 Nusselt-Zahl für laminare Strömung nach Martin (Lit 162):

$$Nu_{lam} = 0,664 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{\frac{Re}{\varepsilon}} \quad [-]$$

Gl. 139 Nusselt-Zahl für turbulente Strömung nach Martin (Lit 162):

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot \left( \frac{Re}{\varepsilon} \right)^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot \left( \frac{Re}{\varepsilon} \right)^{-0,1} \cdot \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad [-]$$

Gl. 140 Nusselt-Zahl für Einzelkugel nach Martin (Lit 162):

$$Nu_{Kugle\text{einzeln}} = 2 + \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad [-]$$

Gl. 141 Wärmeübergangskoeffizient nach Martin (Lit 162) zwischen Partikel und Gas:

$$\alpha_{\text{Part Gas}} = \frac{\text{Nu}_{\text{Kugeleinzel}} \cdot \lambda_{\text{Gas}}}{d_{\text{Part}}} \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 142 Effektive freie Weglänge nach Martin (Lit 162):

$$\Lambda = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot (\vartheta_{\text{Part}} + 273,16^\circ\text{C})}{M_{\text{Gas}}}} \cdot \frac{\lambda_{\text{Gas}}}{p_{\text{ges}} \cdot \left( 2 \cdot c_{p\text{Gas}} - \frac{R}{M_{\text{Gas}}} \right)}$$

Gl. 143 Nusselt-Zahl für den Wärmeübergang zwischen Wand und Partikel WP0 nach Shi (Lit 227):

$$\text{Nu}_{\text{WP0}} = 4 \cdot \left( \left( \frac{2 \cdot \delta_g}{d_{\text{Part}}} + 1 \right) \cdot \ln \left( \frac{d_{\text{Part}}}{2 \cdot \delta_g} + 1 \right) - 1 \right) [-]$$

mit dem effektiv kleinsten Abstand zwischen Wand und Partikel  $\delta_g$  nach Martin (Lit 162):

$$\delta_g = 2 \cdot \Lambda \cdot \left( \frac{2}{\gamma} - 1 \right)$$

und dem Akkomodationskoeffizienten  $\gamma$  nach Martin (Lit 162):

$$\gamma = \frac{1}{10^{0,6 \cdot \frac{(\vartheta_{\text{Part}} + 273,16)}{3,62}} + 1} [-]$$

Gl. 144 Wärmeübergangskoeffizient Partikel-Partikel nach Shi (Lit 227):

$$\alpha_{\text{PartPart}} = \frac{\varphi_{\text{Wand}}}{6} \cdot \sqrt{\frac{9,81 \cdot d_{\text{Part}} \cdot (\varphi_{\text{WP}} - \varphi_{\text{Wand}})}{3 \cdot (\varphi_{\text{Wand}} + 0,05)}} \cdot \rho_{\text{Part}} \cdot c_{p\text{Part}} \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 145 Nusselt-Zahl Partikel-Partikel nach Shi (Lit 227):

$$\text{Nu}_{\text{PartPart}} = \frac{\alpha_{\text{PartPart}} \cdot d_{\text{Part}}}{\lambda_{\text{Gas}}} [-]$$

Gl. 146 Nusselt-Zahl für den inneren Wärmeübergang nach Shi (Lit 227):

$$\text{Nu}_{\text{Partinnem}} = \frac{4 \cdot \lambda_{\text{Part}}}{\lambda_{\text{Gas}}} \cdot \left( 1 + \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{6}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\lambda_{\text{Gas}}}{\lambda_{\text{Part}}} \cdot \frac{\text{Nu}_{\text{PartPart}}}{\varphi_{\text{Wand}}^{\frac{2}{3}}}} \right) [-]$$

Gl. 147 Nusselt-Zahl für Wand-Partikel nach Shi (Lit 227):

$$\text{Nu}_{\text{WandPart}} = \frac{1}{\frac{1}{\text{Nu}_{\text{WP0}}} + \frac{1}{\text{Nu}_{\text{Partinnem}}}} [-]$$

Gl. 148 Nusselt-Zahl Partikelkonvektion nach Shi (Lit 227):

$$Nu_{\text{Part}} = Nu_{\text{PartPart}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{Nu_{\text{WandPart}}}{Nu_{\text{PartPart}}} \left( \frac{9 \cdot \pi}{16} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \varphi_{\text{Wand}}^{\frac{2}{3}} \cdot 0,28} \right) \quad [-]$$

Gl. 149 Wärmeübergangskoeffizient für Partikelkonvektion nach Shi (Lit 227):

$$\alpha_{\text{Part}} = \frac{Nu_{\text{Part}} \cdot \lambda_{\text{Gas}}}{d_{\text{Part}}} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 150 Nusselt-Zahl für Gaskonvektion nach Shi (Lit 227):

$$Nu_{\text{Gas}} = \left( 0,005 \cdot Re_{\text{sink}} + 0,06 \cdot Re_{\text{sink}}^{\frac{1}{3}} \right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Gl. 151 Reynolds-Zahl für sinkende Partikel nach Shi (Lit 227):

$$Re_{\text{sink}} = \frac{50}{3} \cdot \left( \sqrt{1 + 0,1 \cdot \sqrt{\frac{4}{3}} \cdot Ar} - 1 \right)^2$$

Gl. 152 Wärmeübergangskoeffizient für die Gaskonvektion nach Shi (Lit 227):

$$\alpha_{\text{Gas}} = \frac{Nu_{\text{Gas}} \cdot \lambda_{\text{Gas}}}{d_{\text{Part}}} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 153 Wärmeübergangskoeffizient für die Strahlung nach Shi (Lit 227):

$$\alpha_{\text{Strahl}} = \varepsilon_{\text{Strahl}} \cdot \sigma_{\text{Strahl}} \cdot \frac{(\vartheta_{\text{Wand}} + 273,16^\circ\text{C})^4 - (\vartheta_{\text{E}} + 273,16^\circ\text{C})^4}{\vartheta_{\text{Wand}} - \vartheta_{\text{Part}}} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 154 gesamter Wärmeübergangskoeffizient für die Wand nach Shi (Lit 227):

$$\alpha_{\text{Wand}} = \alpha_{\text{Partikel}} + \alpha_{\text{Gas}} + \alpha_{\text{Strahl}} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \right]$$

Gl. 155 Wärmeleitung für stationären Zustand:

$$\dot{Q}_{\text{GasWand}} = \alpha_{\text{GasWand}} \cdot A_{\text{Wand}} \cdot (\bar{\vartheta}_{\text{Gas}} - \vartheta_{\text{Wand}}) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right]$$

Gl. 156

$$\dot{Q}_{\text{PartWand}} = \alpha_{\text{PartWandges}} \cdot A_{\text{Wand}} \cdot (\vartheta_{\text{Part}} - \vartheta_{\text{Wand}}) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right]$$

Gl. 157

$$\dot{Q}_{\text{Wand}} = \dot{Q}_{\text{PartWand}} + \dot{Q}_{\text{GasWand}} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} \right]; \text{ mit } \vartheta_{\text{Wandinnen}} = \vartheta_{\text{Wand}}$$

Gl. 158 Wandtemperatur außen nach Elgeti (Lit 66):

$$\vartheta_{\text{Wandaußen}} = \frac{\vartheta_{\text{Wand}} - \dot{Q}_{\text{Wand}}}{2 \cdot \pi \cdot H_{\text{WS}}} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_{\text{Stahl}}} \cdot \ln \left( \frac{\frac{d_{\text{Apparat}}}{2} + s_{\text{Wand}}}{\frac{d_{\text{Apparat}}}{2}} \right) + \frac{1}{\lambda_{\text{Isolierung}}} \cdot \ln \left( \frac{\frac{d_{\text{Apparat}}}{2} + s_{\text{Wand}} + s_{\text{Isolierung}}}{\frac{d_{\text{Apparat}}}{2} + s_{\text{Wand}}} \right) \right) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Gl. 159 Freie Konvektion zwischen Apparat und Umgebung nach Churchill und Chu (Lit 113):

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot H_{\text{WS}}^3}{\nu_{\text{U}}^2} \cdot \frac{\rho_{\text{LU}} - \rho_{\text{LWand}}}{\rho_{\text{LU}}}$$

Gl. 160 Rayleigh-Zahl nach Churchill und Chu (Lit 113):

$$\text{Ra} = \text{Pr}_{\text{U}} \cdot \text{Gr}$$

Gl. 161 Wärmeübergang für freie Konvektion an der senkrechten Platte nach Churchill und Chu (Lit 113):

$$\text{Nu}_{\text{Platte}} = \left( 0,825 + 0,387 \cdot (\text{Ra} \cdot f_{1\text{Pr}})^{\frac{1}{6}} \right)^2 \quad \text{für } 10^{-1} \leq \text{Ra} \leq 10^{12}$$

mit:

$$f_{1\text{Pr}} = \left( 1 + \left( \frac{0,492}{\text{Pr}_{\text{U}}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{16}{9}} \quad \text{für } 0,001 \leq \text{Pr} \leq \infty$$

Gl. 162 Nusselt-Zahl für senkrechte Zylinder nach Churchill und Chu (Lit 113):

$$\text{Nu} = \text{Nu}_{\text{Platte}} + \frac{0,97 \cdot H_{\text{WS}}}{d_{\text{Apparat}} + 2 \cdot s_{\text{Wand}} + 2 \cdot s_{\text{Isolierung}}}$$

daraus folgt

Gl. 163 Wärmeübergangskoeffizient zwischen Wand und Umgebung:

$$\alpha_{\text{WandU}} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{U}}}{H_{\text{WS}}} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}} \right]$$

### 8.1.6 Sonstige Berechnungen

Gl. 164 gesamte Partikeloberfläche unter Annahme von Kugeln:

$$A_{\text{OPartges}} = \frac{6 \cdot m_{\text{TS}}}{d_{\text{Partein}} \cdot \rho_{\text{Partein}}}$$

Gl. 165 mittels Formfaktor korrigierte gesamte Partikeloberfläche:

$$A_{\text{OPartkorr}} = \frac{A_{\text{OPartges}}}{\Psi}$$



Gl. 166 Gasaustrittstemperatur:

$$\vartheta_{\text{Gas aus}} = v_{\text{Blasen}} \cdot \vartheta_{\text{Gasein}} + (1 - v_{\text{Blasen}}) \cdot (\Theta_{\text{Gas aus}} \cdot (\vartheta_{\text{Gasein}} - \vartheta_{\text{Satt}}) + \vartheta_{\text{Satt}}) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

## 8.2 Übersicht über die Anfangsbedingungen aller Röstversuche

$\dot{Q}$ [ $\frac{\text{kJ}}{\text{s}}$ ]	$\vartheta_{\text{Gas}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$\dot{m}_{\text{D}}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ]	$\dot{m}_{\text{L}}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ]	Versuchsnummern	
				Dampf	Luft
2600	230	36	69	V113; V183; V184; V185	V108; V007; V008; V009; V010; V011; V169
3000	250	36	69	V103; V177; V178; V179	V107; V036; V037; V038; V039; V040
3400	230	48	92	V102; V119; V070; V071; V072; V073; V075; V186; V187; V188	V111; VT01; VT02; VT03
4000	250	48	92	V118; V198; V199; V200; V201; V202; V203; V204	V110; V121; V159; V160; V161; V162; V163; V164
4300	230	60	115	V114; V076; V077; V078; V079; V080; V081; V190; V191; V192	V120; V166; V167; V168
5000	250	60	115	V116; V117; V085; V086; V206; V207; V208	V112; V170; V171; V172; V173; V175
5200	250	72	138	V109; V210; V211; V212	V124; V041; V042; V043; V044; V045
6000	230	72	138	V115; V089; V090; V193; V194; V195	V123; V017; V018; V019; V020; V021
2570	250	72	138	V109; V210; V211; V212	V124; V041; V042; V043; V044; V045

Tabelle 22 Übersicht Versuchsplanung

### 8.3 Übersichten über die durchgeführten Versuchsreihen

#### 8.3.1 Versuchsreihe für $\dot{Q} = 2600 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$

Nr.	Kaffeesorte	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	$w_{\text{Gas 0}}$	m	RV	d	x	X	$m_{\text{CmHn}}$	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$[\text{°C}]$	$\dot{m}_{\text{Gas}}$	$[\text{s}]$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$[\text{g}]$	$[\%]$	$[\text{mm}]$	$[\%]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	$[\text{g}]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$[\text{Skt}]$
				$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$		$[-]$	roh/ röst		roh/ röst	roh/ röst	roh/ röst	$[\%]$	roh/ röst	
V007	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	2600	231	Luft 70,6	600	3,6 556	200 161,7	19 12	6,28 7,57	8,10 0,34	0,088 0,0034	0,7983 0,3992		
V008	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	2700	230	Luft 72,7	600	3,7 574	50,1 39,3	21,6 14,2		8,10 0,3	0,088 0,003	0,2968 0,5386		
V009	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	2700	228	Luft 73	600	3,3 574	500 426,4	14,7 6,7	6,28 7,4	8,1 0,28	0,088 0,0028	0,6161 0,1232		
V010	Coffea Arabica Columbien 2000	2600	230	Luft 71	600	3,6 556	200,1 161,2	19,4 10,8		9,00 0,2	0,099 0,002	0,54 0,27		
V011	Coffea Canephora var. Robusta	2600	230	Luft 68	600	3,5 539	200,1 164	18,04 6,8		10,93 0,29	0,12 0,0029	0,38 0,19		
V108	Coffea Arabica Santos Brasilien 2003	2900	230	Luft 77	250	3,9 608	200 174,5	14 7	6,3 7,69	9,47 1,34	0,10 0,014		1171 670	99,9
V113	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004 Nr.1	2700	230	Dampf 38,3	250	3,1 467	200 171	15 7	6,7 8,021	9,56 0,69	0,11 0,011		1195 585	90
V169	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	2400	230	Luft 64	600	3,3 507	200 167,3	16 3		12,27 0,42	0,14 0,0042	0,18 0,09		
V183	Coffea Arabica Santos Brasilien	2700	230	Dampf 38	600	3,1 464	200,7 159,6	21,8 9,7		12,27 0,69	0,14 0,007	0,5618 0,2799		
V184	Coffea Canephora var. Robusta	2800	230	Dampf 38,6	600	3,2 471	200,2 157,4	21,4 11		10,93 0,66	0,12 0,0066	0,63 0,31		
V185	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	2800	231	Dampf 38,6	600	3,2 471	200,2 151,6	24,3 14,4		12,14 0,68	0,14 0,0068	0,71 0,36		

Tabelle 23 Versuchsübersicht

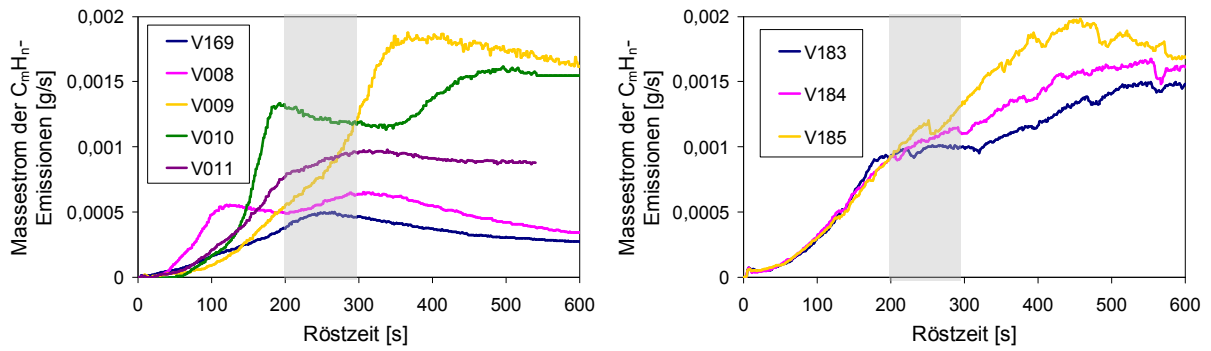


Abbildung 8.1 Versuchsergebnisse Massestrom Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

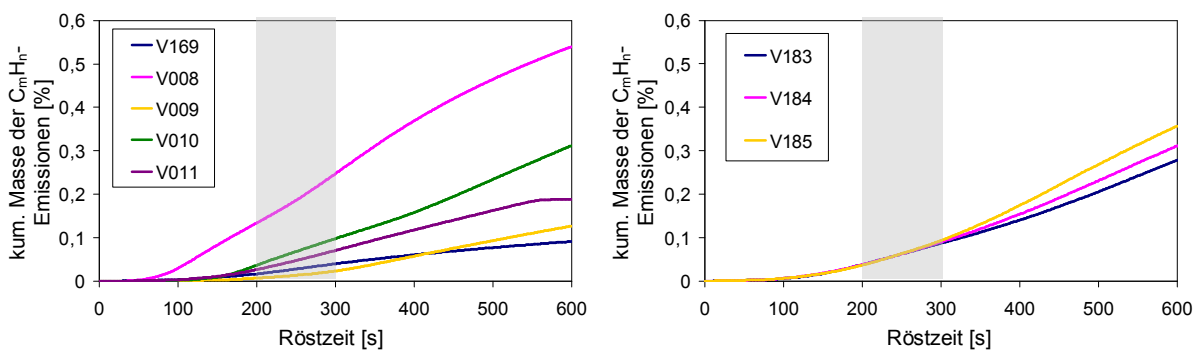


Abbildung 8.2 Kumulierte Masse der Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts) bezogen auf die Chargenmasse des Rohkaffees

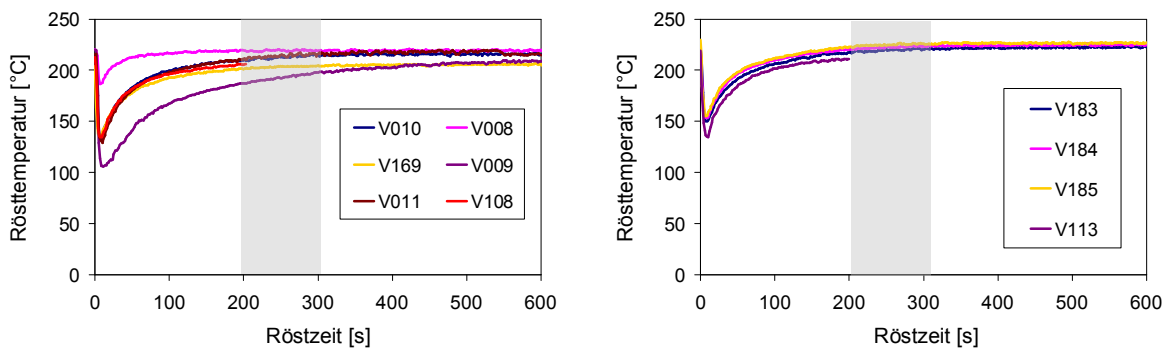


Abbildung 8.3 Temperaturverläufe für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

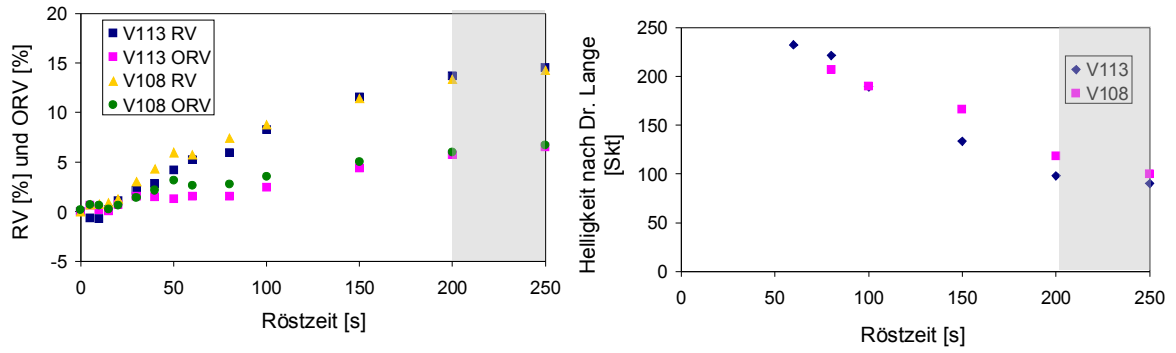


Abbildung 8.4 Röstverluste (links) und Helligkeit (rechts)

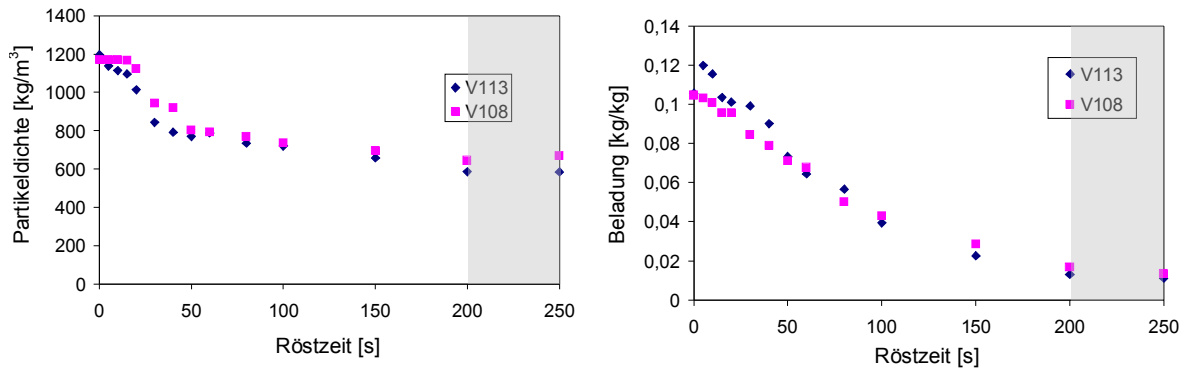


Abbildung 8.5 Partikeldichte (links) und Partikelbeladung (rechts)

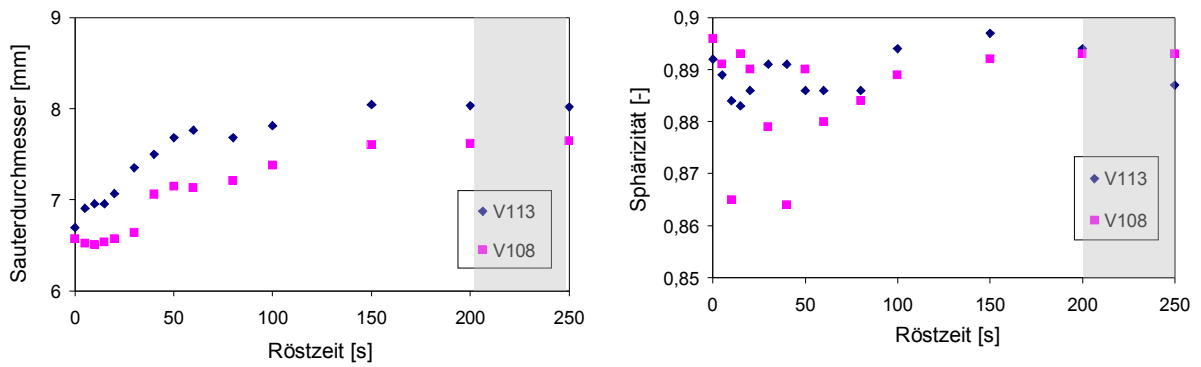


Abbildung 8.6 Mittlerer Sauterdurchmesser (links) und mittlere Sphärität (rechts)

### 8.3.2 Versuchsreihe für $\dot{Q} = 3000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$

Nr.	Kaffeesor	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	$w_{\text{Gas 0}}$	m	RV	d <sub>Sauter</sub>	x	X	$m_{\text{CmHn}}$	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$[\text{°C}]$	$\dot{m}_{\text{Gas}}$	$[\text{s}]$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$[\text{g}]$	$[\%]$	$[\text{mm}]$	$[\%]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	$[\text{g}]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$[\text{Skt}]$
				$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$		$[-]$	roh/ röst		roh/ röst	roh/ röst	roh/ röst	$[\%]$	roh/ röst	
V036	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	3100	254	Luft 70,6	219	3,7 540	200 164,2	17,9 10,2		8,10 0,24	0,088 0,0024	0,48 0,24		
V037	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	2900	250	Luft 66,2	500	3,5 506	500,1 410,9	17,8 10,1		8,10 0,26	0,088 0,0026	1,2 0,24		
V038	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	2900	253	Luft 66,2	600	3,5 506	50,4 34,8	31,1 24,6		8,10 0,31	0,088 0,0031	0,88 1,7		
V039	Coffea Arabica Kolumbien 2000	3200	253	Luft 72,8	223	3,9 557	200,5 165,5	17,4 8,8		9,0 0,43	0,099 0,0043	0,47 0,23		
V040	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	3000	253	Luft 68,4	242	3,6 523	200 161,8	19,1 8,1		10,93 0,31	0,12 0,0031	0,42 0,21		
V103	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	3000	251	Dampf 38	200	3,1 426	202 166,1	18 15	6,7 7,9				1174 495	39
V107	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	3100	250	Luft 72,8	250	3,9 557	200,4 166,7	17 9	6,7 8,1	10,46 0,71	0,117 0,007		1174 532	48
V177	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	3200	250	Dampf 38,1	600	3,1 427	200,8 139,6	30 21		10,9 0,33	0,12 0,0033	2,08 1,03		
V178	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	3300	250	Dampf 39,3	600	3,2 440	201 138,8	30,9 19,9		12,27 0,26	0,14 0,0026	2,1 1,06		
V179	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	3200	249	Dampf 38,3	600	3,1 429	200,3 137,6	31 21		12,14 0,33	0,14 0,0033	1,98 0,98		

Tabelle 24 Versuchsübersicht

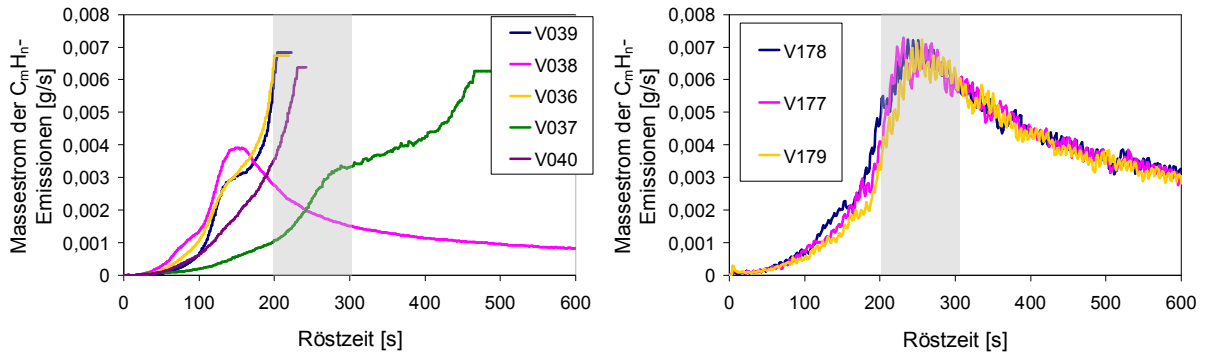


Abbildung 8.7 Versuchsergebnisse Massestrom Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

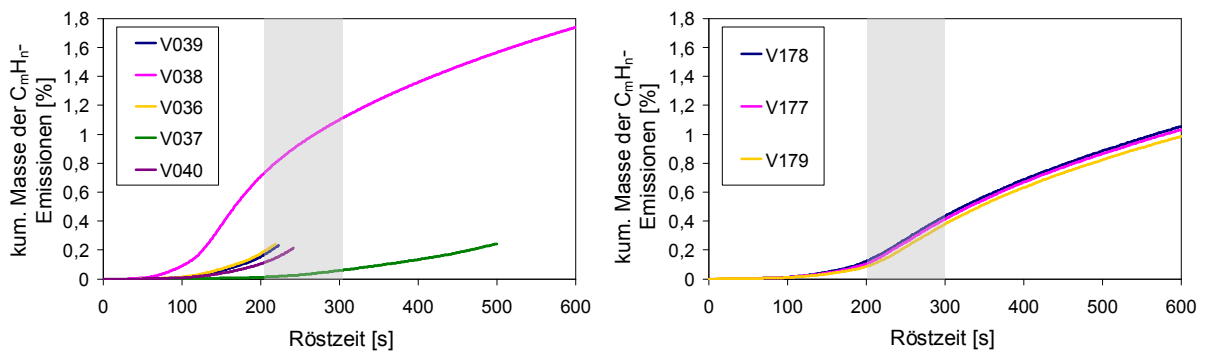


Abbildung 8.8 kumulierte Masse der Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

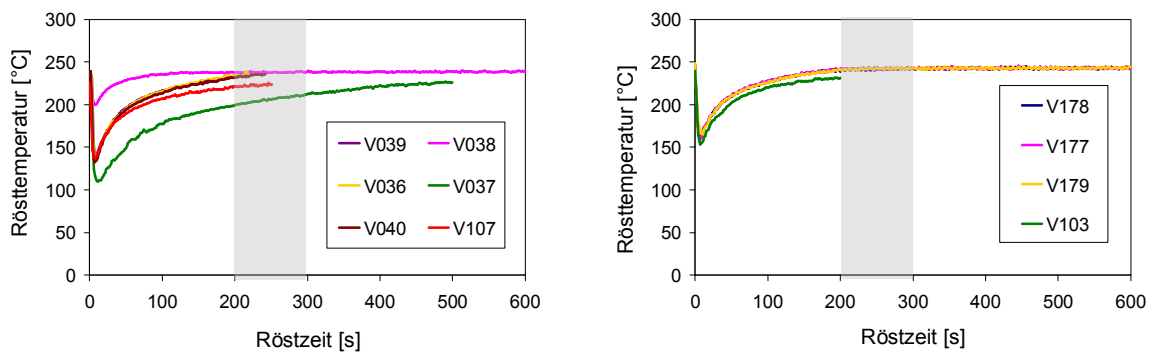


Abbildung 8.9 Temperaturverläufe für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

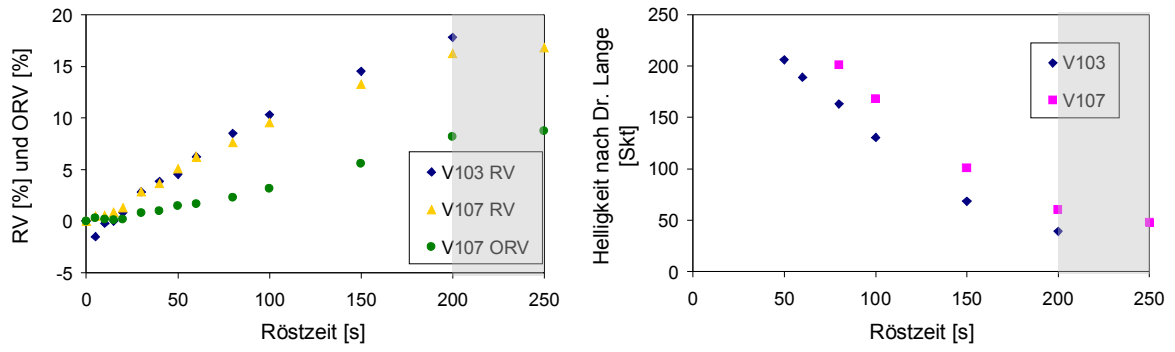


Abbildung 8.10 Röstverluste (links) und Helligkeit (rechts)

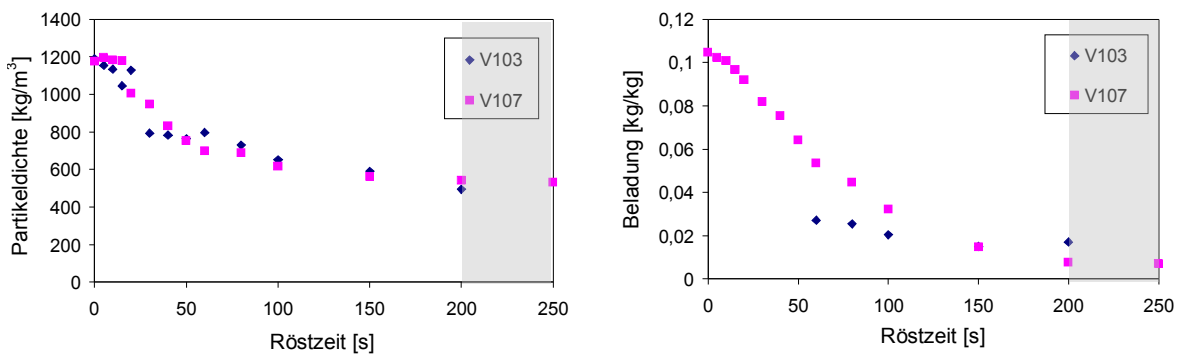


Abbildung 8.11 Partikeldichte (links) und Partikelbeladung (rechts)

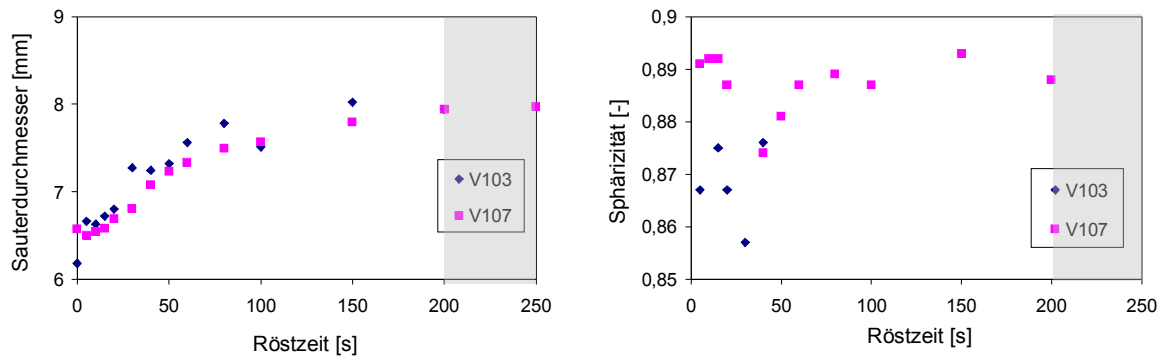


Abbildung 8.12 Mittlerer Sauterdurchmesser (links) und mittlere Sphärizität (rechts)



### 8.3.3 Versuchsreihe für $\dot{Q} = 3400 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$

Nr.	Kaffeesor	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	w <sub>Gas 0</sub>	m	RV	d <sub>Sauter</sub>	x	X	m <sub>CmHn</sub>	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$[\text{°C}]$	$\dot{m}_{\text{Gas}}$	$[\text{s}]$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	$[\text{g}]$	$[\%]$	$[\text{mm}]$	$[\%]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	$[\text{g}]$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	$[\text{Skt}]$
				$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$		$[-]$	roh/ röst		roh/ röst	roh/ röst	roh/ röst	$[\%]$	roh/ röst	
VT01	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	4000	235	Luft 104	960	5,3 817	200,2 151,9	24,1 17,2		8,1 0,52	0,088 0,0052	1,95 0,97		
VT02	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	4100	236	Luft 106	600	5,4 834	200,1 154,5	22,8 13,7		10,9 0,38	0,1227 0,0038	1,12 0,56		
VT03	Coffea Arabica Columbien 2000	4100	237	Luft 104	600	5,3 817	200 151,8	24,1 16,4		9,0 0,74	0,099 0,0075	1,6 0,8		
V072	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	3600	231	Dampf 50	600	4,1 610	50 37,7	24,6 13,5		12,27 1,31	0,14 0,0133	0,16 0,33		
V073	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	3600	230	Dampf 50	600	4,1 610	500 405,4	18,9 6,8		12,27 1,13	0,14 0,0114	0,74 0,15		
V075	Coffea Arabica Columbien 2000	3600	230	Dampf 50	600	4,1 610	200 161,1	19,5 12,1		8,97 1,55	0,099 0,016	0,53 0,26		
V102	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	3600	227	Dampf 52	250	4,3 634	200,4 171,1	15 11	6,18 7,6	10,46	0,117 0,013		1181	76,2
V111	Coffea Arabica Santos Brasilien	2900	230	Luft 101	250	5,2 800	200,3 171,7	14 5	6,7 7,9	10,4 1,0	0,12 0,01		1197 578	93
V119	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	3800	230	Dampf 53	250	4,4 647	200 163,7	18 8	7,5 8,5	12,3 1,07	0,14 0,011		1195 545	
V186	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	3800	230	Dampf 53	600	4,4 647	200,3 154,4	22,9 12,1		11,43 0,69	0,129 0,00697	0,76 0,38		
V187	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	3800	230	Dampf 53	600	4,4 647	200,5 156	22 13		10,9 0,94	0,1227 0,0095	0,7 0,35		
V188	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	3800	230	Dampf 53	600	4,4 647	200,2 152,3	23,9 13,1		11,66 0,87	0,132 0,0087	0,66 0,33		

Tabelle 25 Versuchsübersicht

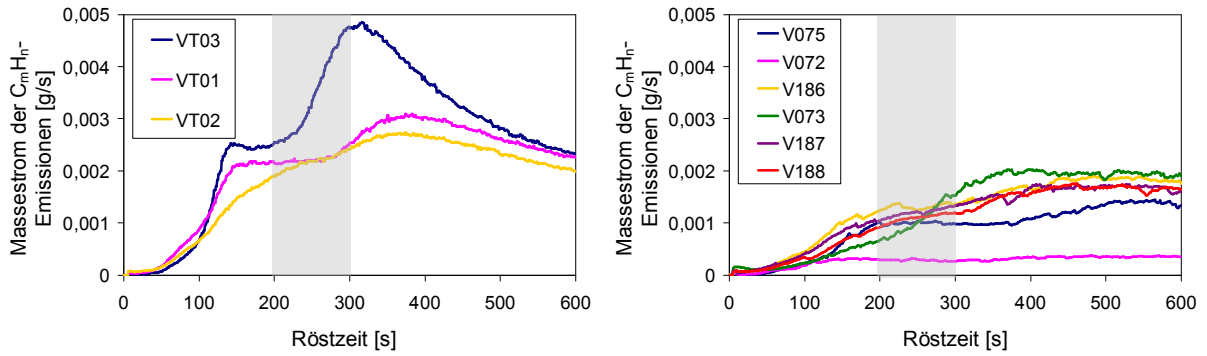


Abbildung 8.13 Versuchsergebnisse Massestrom Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

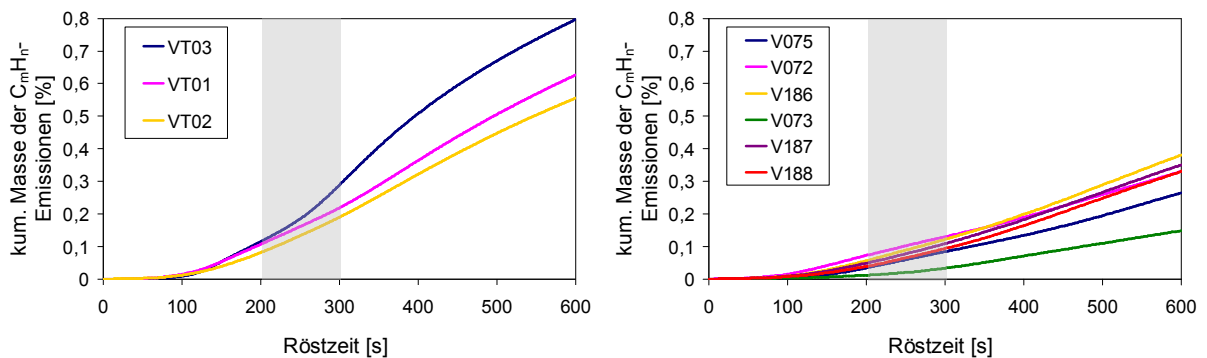


Abbildung 8.14 kumulierte Masse der Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

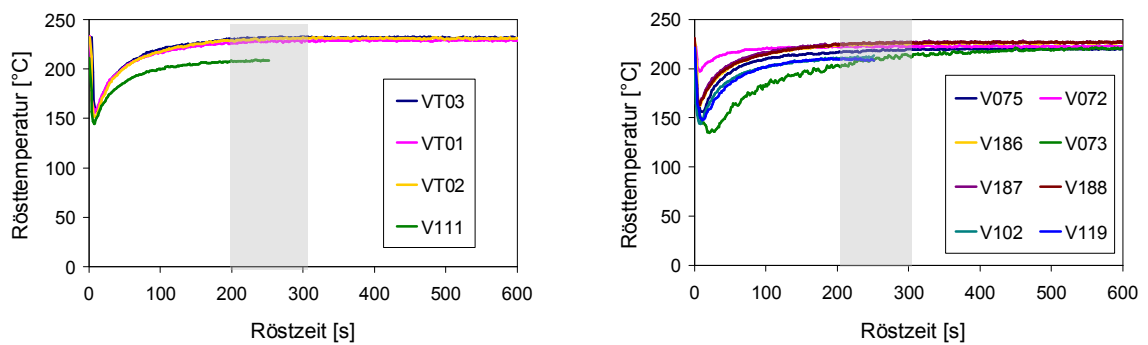


Abbildung 8.15 Temperaturverläufe für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

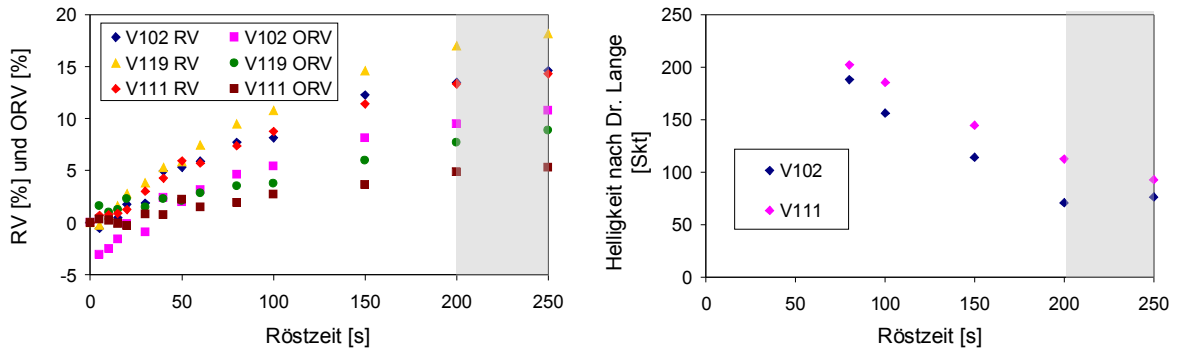


Abbildung 8.16 Röstverluste (links) und Helligkeit (rechts)

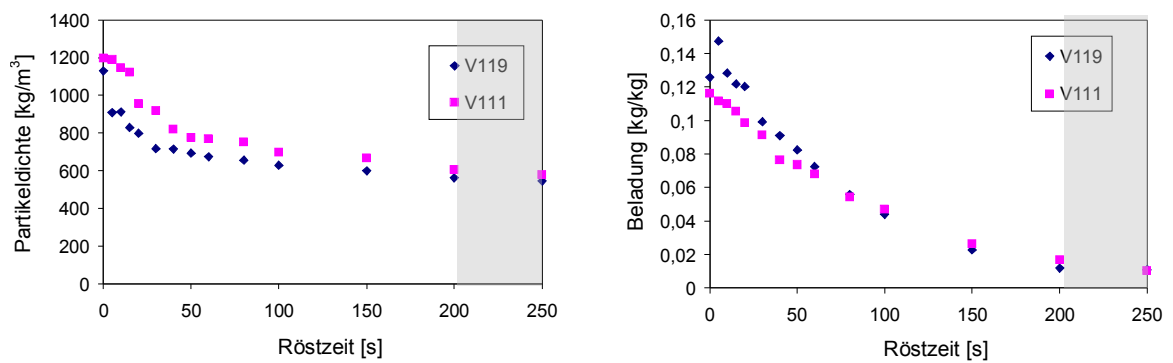


Abbildung 8.17 Partikeldichte (links) und Partikelbeladung (rechts)

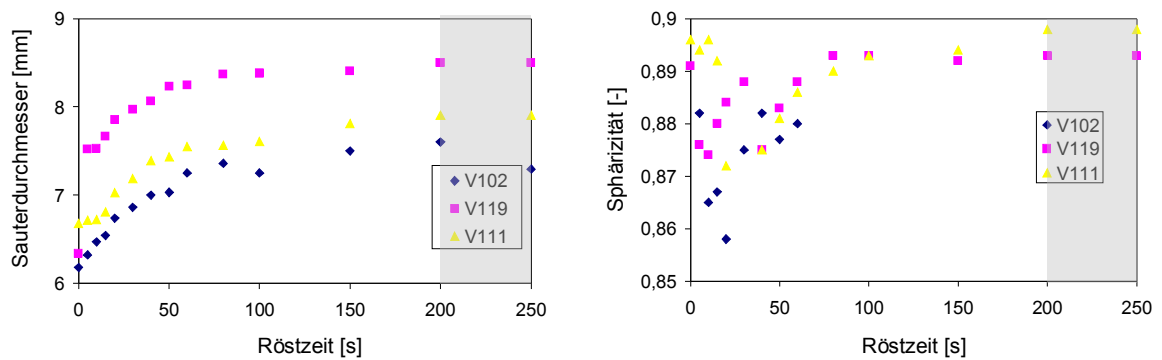


Abbildung 8.18 Mittlerer Sauterdurchmesser (links) und mittlere Sphärizität (rechts)

### 8.3.4 Versuchsreihe für $\dot{Q} = 4000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$

Nr.	Kaffeesor	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	w <sub>Gas 0</sub>	m	RV	d <sub>Sauter</sub>	x	X	m <sub>CmHn</sub>	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$\vartheta_{\text{U}}$	m <sub>Gas</sub>	[s]	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	[g]	[%]	[mm]	[%]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	[g]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	[Skt]
			[°C]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$		[-]	roh/ röst		roh/ röst	roh/ röst	roh/ röst	[%]	roh/ röst	
V110	Coffea Arabica Santos Brasilien	4400	250 27	Dampf 53	200	4,4 600	200 159,8	20,2 11,9	8,36	10,47 1,17	0,117 0,012		1218 455	36
V118	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	4400	250 25	Dampf 53	250	4,4 594	200 148,6	26 16	7,5	12,3 0,94	0,14 0,0094		1195 444	
V121	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	3500	250 21	Luft 82	250	4,3 624	200,1 176,8	12,4	7,5	12,3	0,14		1195	
V159	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	3600	251 22	Luft 84	600	4,5 641	200 154,3	22,9 12,2		11,43 0,81	0,129 0,0082	0,66 0,33		
V160	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	3600	248 21	Luft 84	600	4,5 641	200,4 156,9	21,7 11,4		10,93 0,74	0,1227 0,0074	0,68 0,34		
V161	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	3700	252 21	Luft 84	600	4,5 641	50,9 37,8	25,7 15,2		11,43 0,56	0,129 0,0056	0,2809 0,5518		
V162	Coffea Arabica Coasta Rica Tarrazu 2004	3600	249 21	Luft 84	600	4,5 641	200,1 151,2	24,4 14,6		10,71 0,5	0,12 0,005	1,03 0,51		
V163	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	3600	250 21	Luft 84	600	4,5 641	200,9 151,1	24,8 13,9		11,66 0,6	0,132 0,0061	0,83 0,41		
V164	Coffea Arabica Columbien 2000	3600	250 21	Luft 84	600	4,5 641	200,2 152,6	23,8 15,8		9,0 0,45	0,099 0,0045	1,32 0,66		
V165	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	3700	252 21	Luft 84	600	4,5 641	500,2 384,5	23,1 12,6		11,43 0,95	0,129 0,0095	2,1953 0,4389		
V198	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	4200	250 23	Dampf 51	600	4,2 571	200,9 136,8	31,9 22,7		10,9 0,376	0,1227 0,0038	2,45 1,22		
V199	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	4300	251 23	Dampf 51	600	4,2 571	200,9 133	33,8 24		11,66 0,37	0,132 0,0037	2,5 1,26		
V200	Coffea Arabica Coasta Rica Tarrazu 2004	4300	250 23	Dampf 52	600	4,3 583	200,6 134,2	33,1 24,2		10,71 0,34	0,12 0,0034	2,7 1,34		
V201	Coffea Arabica Columbien 2000	4300	250 24	Dampf 52	600	4,3 583	200,3 136,4	31,9 24,7		9,0 0,34	0,099 0,0034	2,68 1,34		

Tabelle 26 Versuchsübersicht

Nr.	Kaffeesorte	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	$w_{\text{Gas 0}}$	m	RV	d	x	X	$m_{\text{CmHn}}$	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$\vartheta_{\text{U}}$	$\dot{m}_{\text{Gas}}$	[s]	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	[g]	[%]	[mm]	[%]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	[g]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	[Skt]
			[°C]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$		[–]	roh/ röst		roh/ röst	roh/ röst	roh/ röst	[%]	roh/ röst	
V202	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4300	250 24	Dampf 52	600	4,3 583	200,4 133,6	33,3 23,8		11,43 0,41	0,129 0,0041	2,5659 1,2804		
V203	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4300	250 24	Dampf 52	600	4,3 583	50,9 33,3	34,6 25,2		11,39 0,35	0,129 0,0035	0,7199 1,4143		
V204	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4300	249 23	Dampf 52	600	4,3 583	500,2 348,5	30,3 20,4		11,43 0,5	0,129 0,005	4,3297 0,8656		

Tabelle 27 Versuchsübersicht

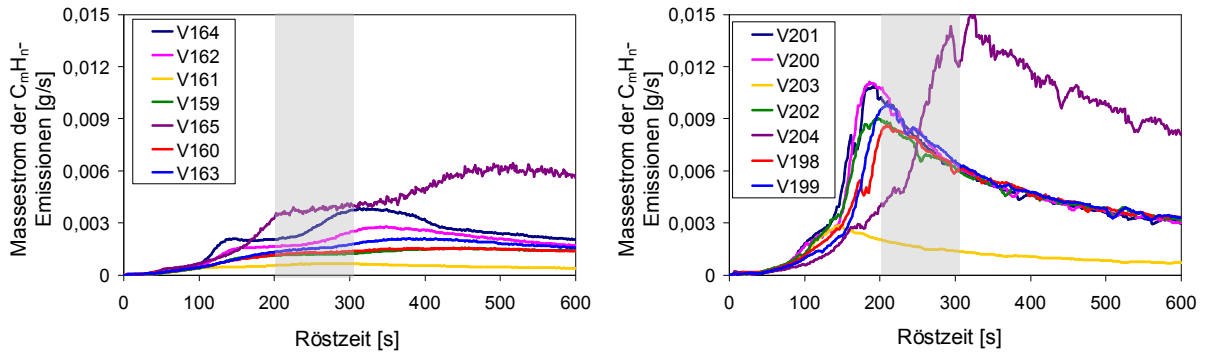


Abbildung 8.19 Versuchsergebnisse Massestrom Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

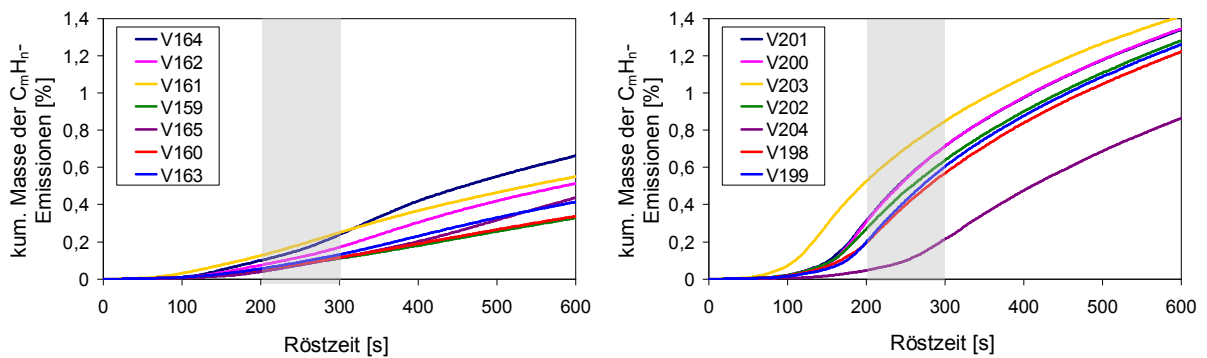


Abbildung 8.20 kumulierte Masse der Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

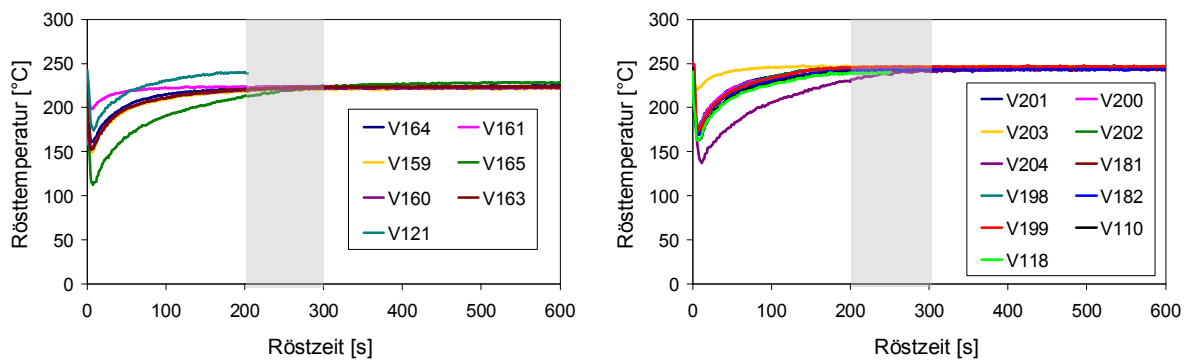


Abbildung 8.21 Temperaturverläufe für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

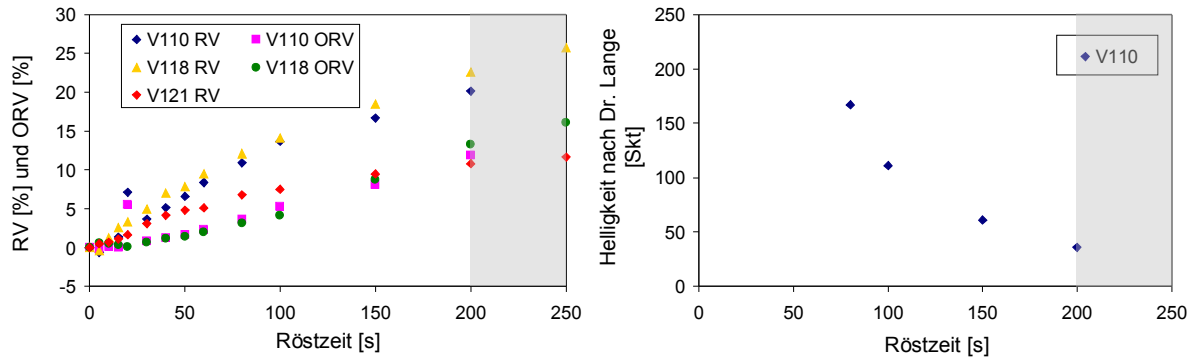


Abbildung 8.22 Röstverluste (links) und Helligkeit (rechts)

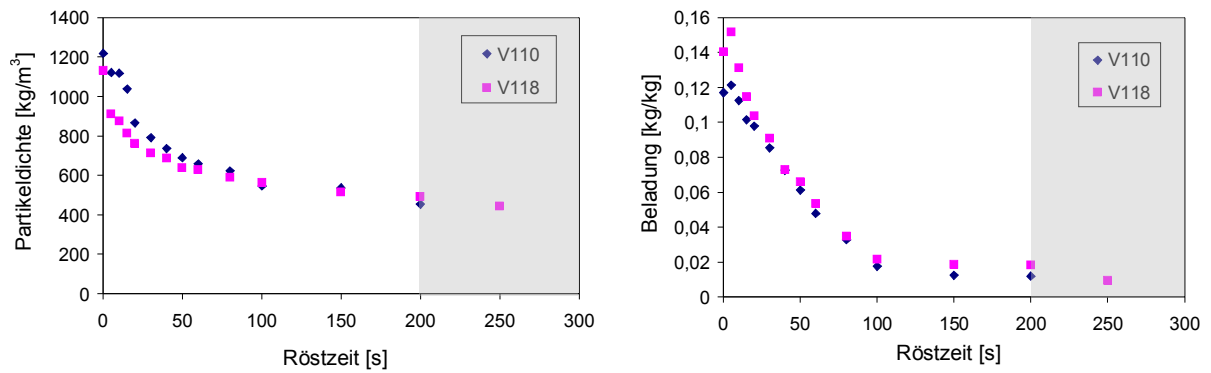


Abbildung 8.23 Partikeldichte (links) und Partikelbeladung (rechts)

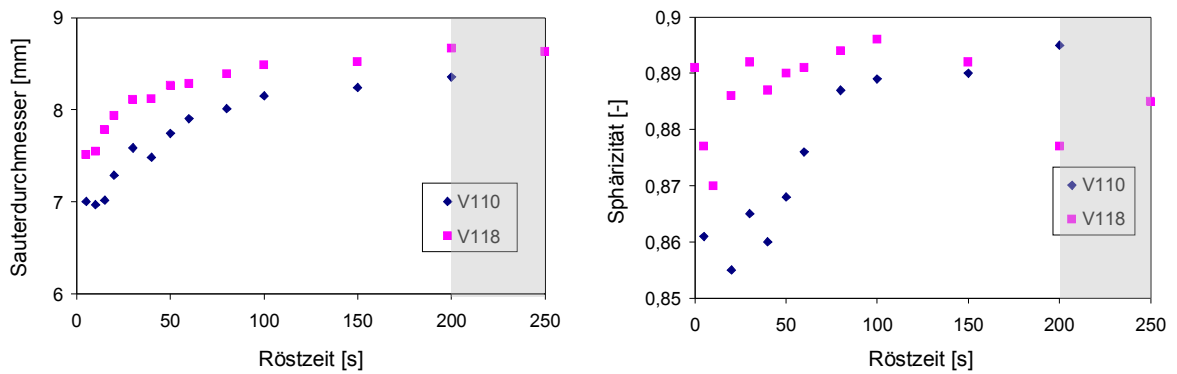


Abbildung 8.24 Mittlerer Sauterdurchmesser (links) und mittlere Sphärizität (rechts)

### 8.3.5 Versuchsreihe für $\dot{Q} = 4300 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$

Nr.	Kaffeesor	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	w <sub>Gas 0</sub>	m	RV	d <sub>Sauter</sub>	x	X	m <sub>CmHn</sub>	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$\vartheta_{\text{U}}$ [°C]	m <sub>Gas</sub> [kg/h]	[s]	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$ [-]	[g] roh/ röst	[%] ORV	[mm] roh/ röst	[%] roh/ röst	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$ roh/ röst	[g] [%] AnKWE	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ roh/ röst	[Skt]
V076	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	4500	230 24	Dampf 63	600	5,2 769	200 156,62	21,7 10,1		12,27 1,2	0,14 0,012	0,6 0,3		
V077	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	4500	230 24	Dampf 63	600	5,2 769	200 162,5	18,7 8,89		10,9 1,61	0,1227 0,016	0,48 0,24		
V078	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	4500	230 23	Dampf 63	600	5,2 769	50 38,8	22,4 12,1		12,27 2,46	0,14 0,025	0,17 0,34		
V079	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	4500	230 23	Dampf 63	600	5,2 769	500 403,0	19,4 9,5		12,27 3,4	0,14 0,035	0,89 0,18		
V080	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	4500	230 23	Dampf 63	600	5,2 769	200 161,2	19,4 9,6		12,14 3,2	0,14 0,033	0,43 0,21		
V081	Coffea Arabica Columbien 2000	4500	230 23	Dampf 63	600	5,2 769	200 163,9	18,05 10,96		9,85 2,06	0,099 0,021	0,65 0,33		
V114	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	4600	230 23	Dampf 65	250	5,3 793	200 168,3	15,8 8,2	6,7 8,16	9,56 1,32	0,11 0,013		1195 576	70
V166	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4100	231 22	Luft 108	600	5,5 852	200,9 165,5	17,6 6,1		11,43 0,72	0,129 0,0073	0,2 0,1		
V167	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	4000	230 22	Luft 108	600	5,5 852	200,3 166,5	16,9 5,6		10,9 0,4	0,1227 0,004	0,17 0,085		
V168	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4000	230 22	Luft 108	600	5,5 852	500,3 408,1	18,4 6,9		11,43 0,57	0,129 0,0057	0,53 0,11		
V190	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4700	229 21	Dampf 66	600	5,4 805	200,3 155,2	22,5 10,07		11,43 1,15	0,129 0,012	0,65 0,33		
V191	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	4800	230 21	Dampf 67	600	5,5 817	200,2 157,4	21,4 11,3		10,9 1,04	0,1227 0,0105	0,59 0,3		
V192	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	4900	230 21	Dampf 68	600	5,6 830	200,4 155	22,7 11,9		11,66 1,135	0,132 0,011	0,56 0,28		

Tabelle 28 Versuchsübersicht



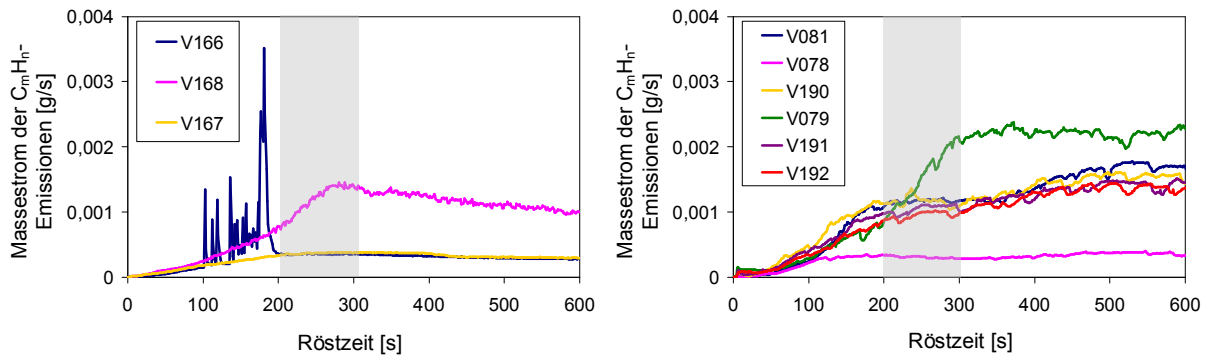


Abbildung 8.25 Versuchsergebnisse Massestrom Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

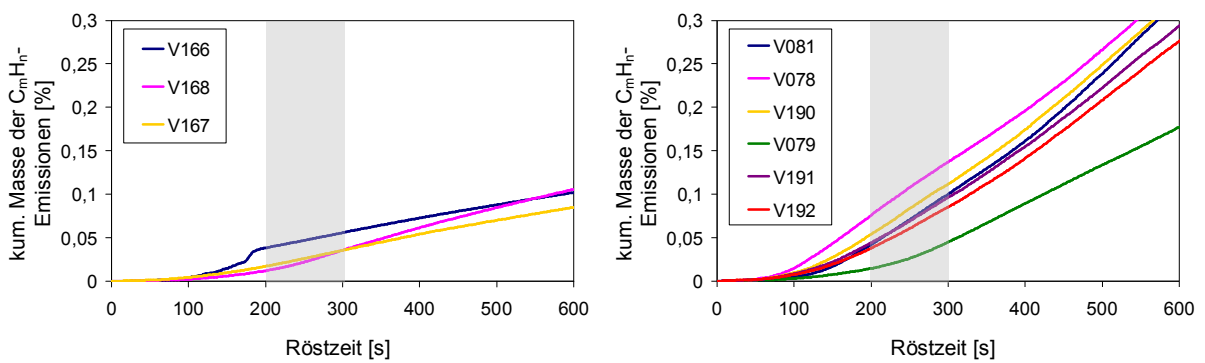


Abbildung 8.26 kumulierte Masse der Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

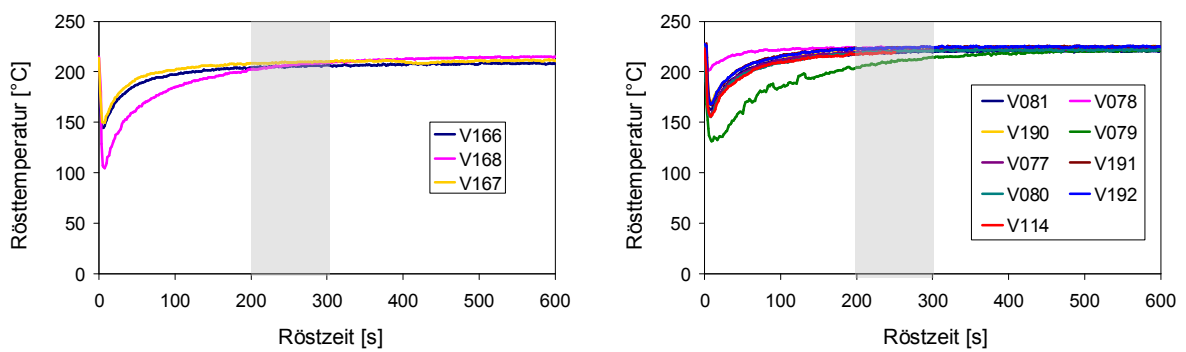


Abbildung 8.27 Temperaturverläufe für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

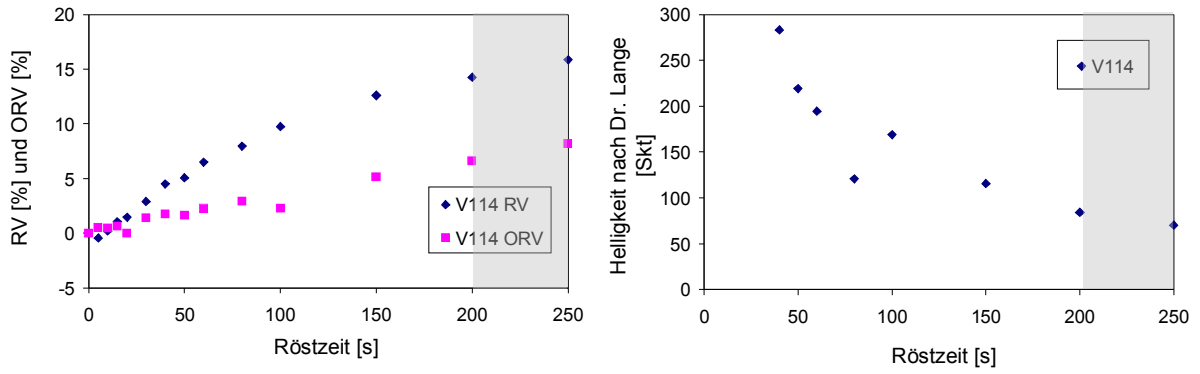


Abbildung 8.28 Röstverluste (links) und Helligkeit (rechts)

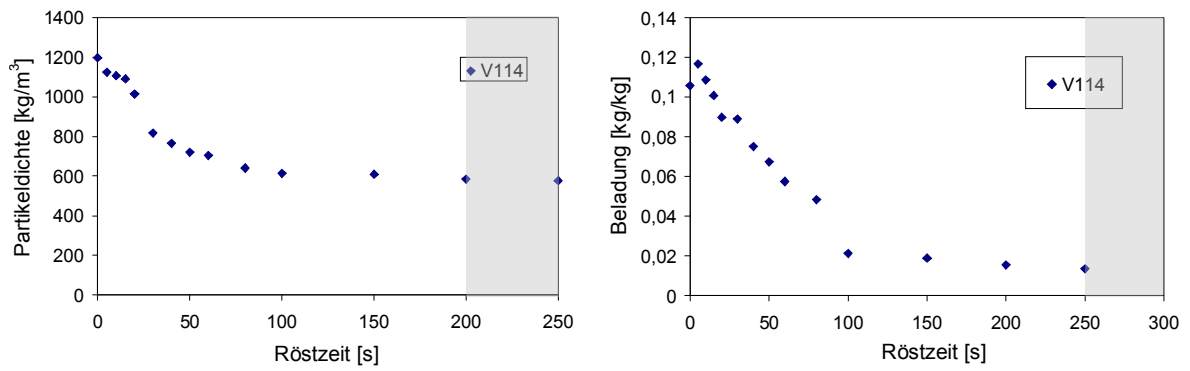


Abbildung 8.29 Partikeldichte (links) und Partikelbeladung (rechts)

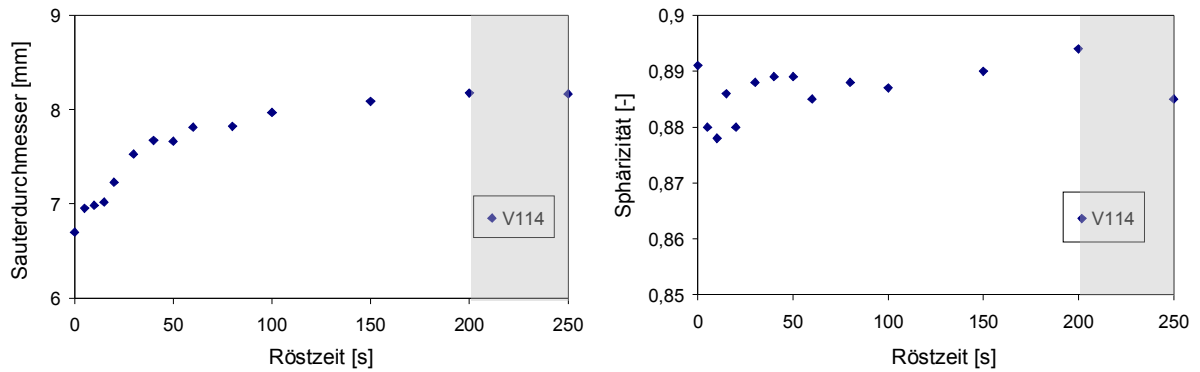


Abbildung 8.30 Mittlerer Sauterdurchmesser (links) und mittlere Sphärizität (rechts)

### 8.3.6 Versuchsreihe für $\dot{Q} = 5000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$

Nr.	Kaffeesorte	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	w <sub>Gas 0</sub>	m	RV	d <sub>Sauter</sub>	x	X	m <sub>CmHn</sub>	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$\vartheta_{\text{U}}$	$\dot{m}_{\text{Gas}}$	[s]	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	[g]	[%]	[mm]	[%]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	[g]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	[Skt]
			[°C]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$		[–]	roh/ röst		roh/ röst	roh/ röst	roh/ röst	[%]	roh/ röst	
V085	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	5200	250 23	Dampf 63	600	5,2 706	50 33,6	32,8 23,3		12,3 1,8	0,14 0,018	0,86 1,7		
V086	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	5200	250 23	Dampf 63	600	5,2 706	500 359,6	28,09 16,96		12,27 0,68	0,14 0,0068	5,03 1,01		
V112	Coffea Arabica Santos Brasilien 2003	5000	249 23	Luft 117	200	6,2 894	200,2 165,9	17 8		10,4 1,03	0,12 0,01		1197 538	53
V116	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	5300	250 26	Dampf 64	250	5,3 717	200 152,7	24 17		9,56 1,23	0,11 0,012		1195 437	28
V117	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	5300	251 23	Dampf 64	250	5,3 717	200 151,3	24 16		10,9 1,01	0,12 0,01		1091 469	27
V170	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4600	249 21	Luft 108	600	5,7 827	200,4 143,6	28,3 18,2		11,43 0,55	0,129 0,0055	2,15 1,07		
V171	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	4700	250 21	Luft 108	600	5,7 827	200,3 144	28,1 17,3		10,93 0,48	0,1227 0,0048	2,22 1,11		
V172	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	4700	250 21	Luft 108	600	5,7 827	200,7 142,5	29 18,4		11,66 0,2	0,132 0,0021	2,25 1,12		
V173	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4700	250 21	Luft 108	600	5,7 827	50,7 36	28,9 18,7		11,43 0,36	0,129 0,0036	0,72 1,4		
V175	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4500	249 20	Luft 106	600	5,6 810	500,1 370,1	26 15,6		11,43 0,62	0,129 0,0062	4,04 0,81		
V206	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	5500	250 24	Dampf 66	600	5,4 739	201 134,7	31,6 22,4		10,9 0,46	0,1227 0,0046	0,95 0,47		
V207	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	5300	250 24	Dampf 64	600	5,3 717	200,3 134,6	32,8 23,03		11,66 0,58	0,132 0,0058	2,13 1,06		
V208	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	5300	249 23	Dampf 65	600	5,3 728	200,7 135,8	32,3 22,7		11,43 0,53	0,129 0,0054	2,23 1,1		

Tabelle 29 Versuchsübersicht

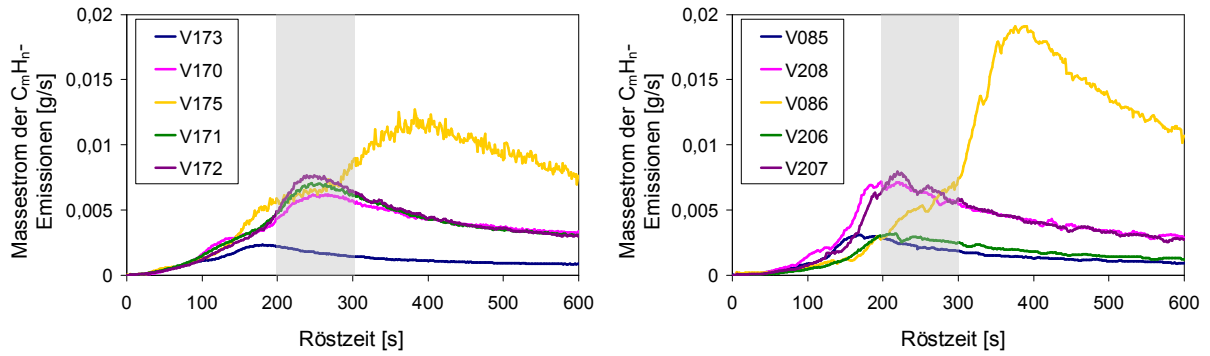


Abbildung 8.31 Versuchsergebnisse Massestrom Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

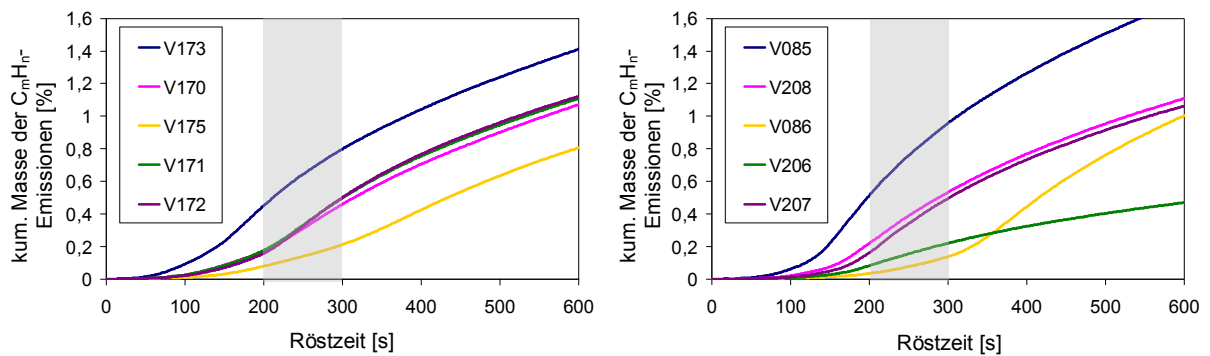


Abbildung 8.32 kumulierte Masse der Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

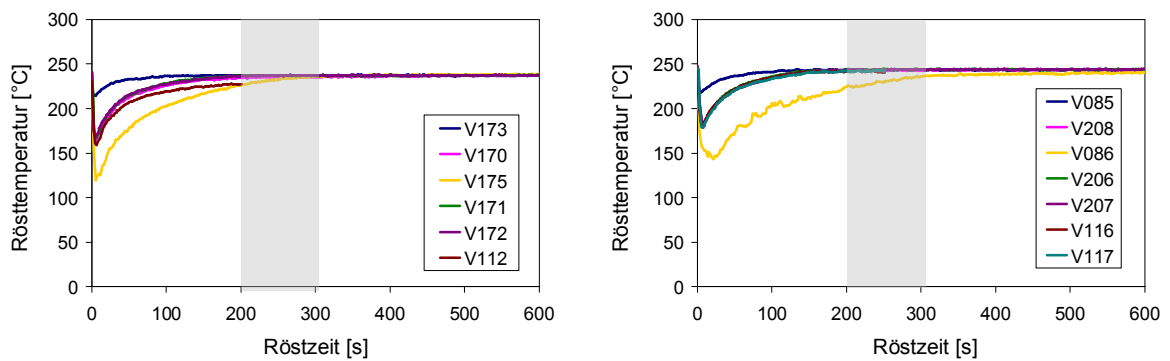


Abbildung 8.33 Temperaturverläufe für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

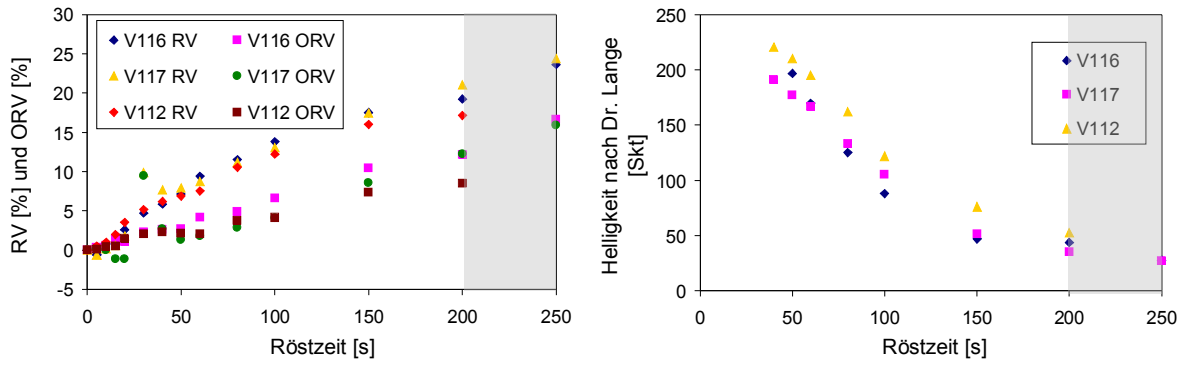


Abbildung 8.34 Röstverluste (links) und Helligkeit (rechts)

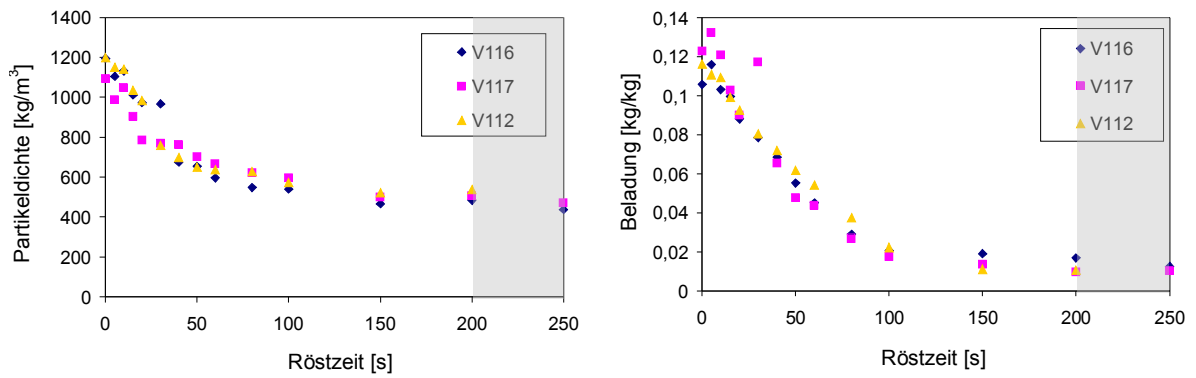


Abbildung 8.35 Partikeldichte (links) und Partikelbeladung (rechts)

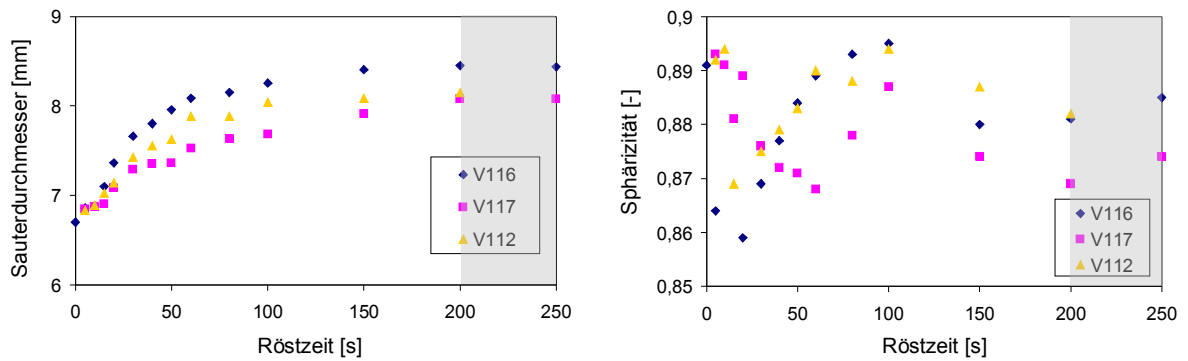


Abbildung 8.36 Mittlerer Sauterdurchmesser (links) und mittlere Sphärizität (rechts)

### 8.3.7 Versuchsreihe für $\dot{Q} = 5200 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$

Nr.	Kaffeesorte	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	w <sub>Gas 0</sub>	m	RV	d <sub>Sauter</sub>	x	X	m <sub>CmHn</sub>	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$\vartheta_{\text{U}}$	$\dot{m}_{\text{Gas}}$	[s]	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$	[g]	[%]	[mm]	[%]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$	[g]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	[Skt]
			[°C]	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$		[–]	roh/ röst		roh/ röst	roh/ röst	roh/ röst	[%]	roh/ röst	
V017	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	5400	230 16,5	Luft 146	600	7,4 1147	200,5 159,6	20,4 12,97		8,1 0,3	0,088 0,003	0,35 0,18		
V018	Coffea Arabica Columbien 2000	5500	229 16,6	Luft 148	600	7,5 1166	200,1 158,8	20,6 12,13		9,0 0,23	0,099 0,0023	0,45 0,22		
V019	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	5400	229 17,3	Luft 146	600	7,4 1147	200,3 156,9	21,7 12,2		9,85 0,2	0,109 0,002	0,32 0,16		
V020	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	5300	229 17	Luft 143	600	7,3 1130	500,1 409	18,2 10,5		8,1 0,18	0,088 0,0018	0,73 0,15		
V021	Coffea Arabica Columbien 2000	5400	229 16,6	Luft 146	600	7,4 1147	500,3 409,8	18,1 9,3		9,0 0,21	0,099 0,0021	0,66 0,13		
V089	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	5500	230 21	Dampf 77	600	6,3 939	50 37,1	25,9 14,9		12,3 1,25	0,14 0,013	0,25 0,5		
V090	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	5600	230 21	Dampf 78	600	6,4 952	500 390,9	21,8 10,4		12,27 1,39	0,14 0,014	1,38 0,28		
V115	Coffea Arabica Santos Brasilien 01/2004	5400	230 27	Dampf 76	250	6,2 927	200 167	31 24		9,56 1,35	0,11 0,014		1195 531	50
V123	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	4700	230 20	Dampf 126	250	6,4 991	200,6 165,8	17 8		11,39 1,0	0,129 0,001		543	
V193	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	5600	229 21	Dampf 79	600	6,5 964	200,3 154,6	22,8 12,3		11,43 1,05	0,129 0,0106	1,85 0,92		
V194	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	5600	229 21	Dampf 79	600	6,5 964	200,3 157,6	21,3 11,3		10,9 1,19	0,12 0,0121	1,6 0,8		
V195	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	5700	230 20	Dampf 79	600	6,5 964	200,1 153,5	23,3 12,7		11,67 1,23	0,132 0,0124	1,48 0,74		

Tabelle 30 Versuchsübersicht

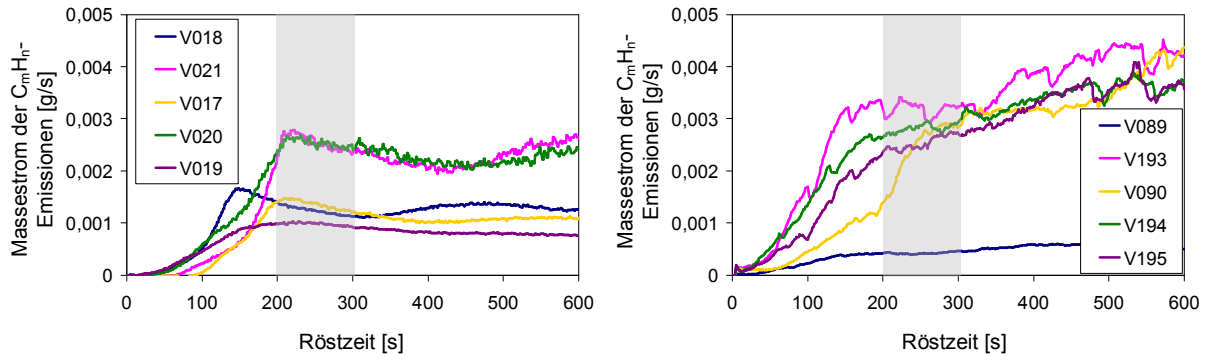


Abbildung 8.37 Versuchsergebnisse Massestrom Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

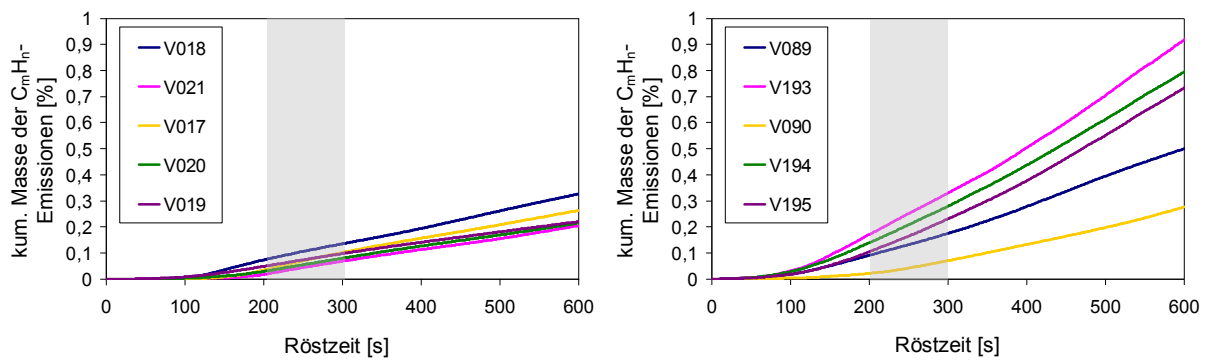


Abbildung 8.38 kumulierte Masse der Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

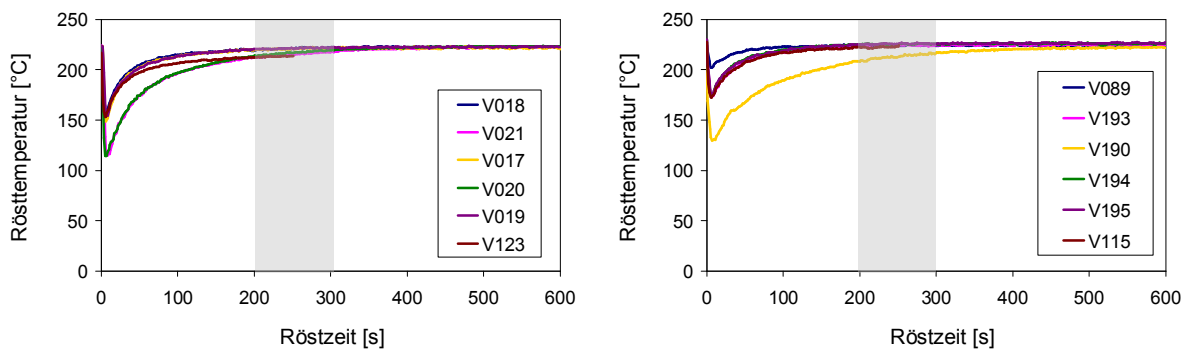


Abbildung 8.39 Temperaturverläufe für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

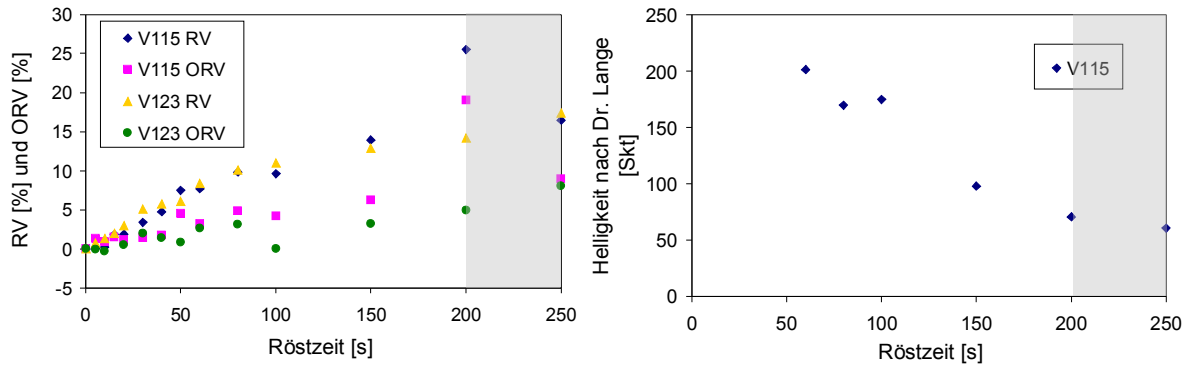


Abbildung 8.40 Röstverluste (links) und Helligkeit (rechts)

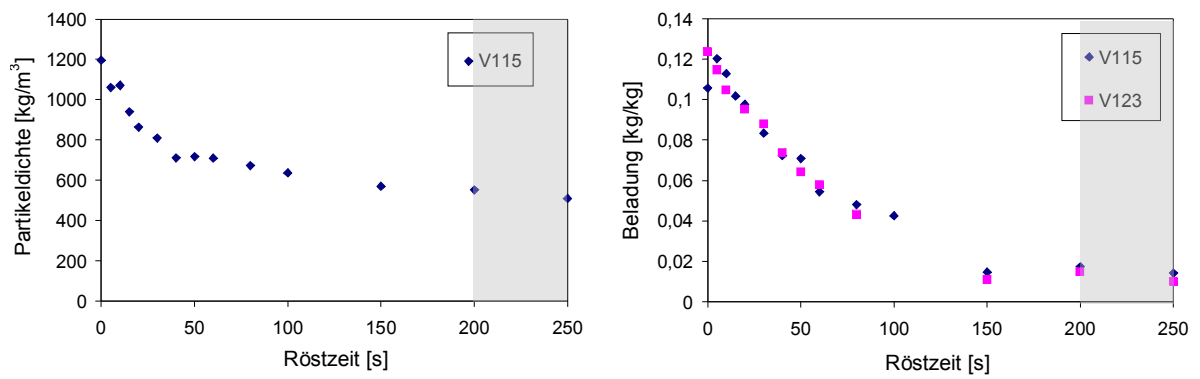


Abbildung 8.41 Partikeldichte (links) und Partikelbeladung (rechts)

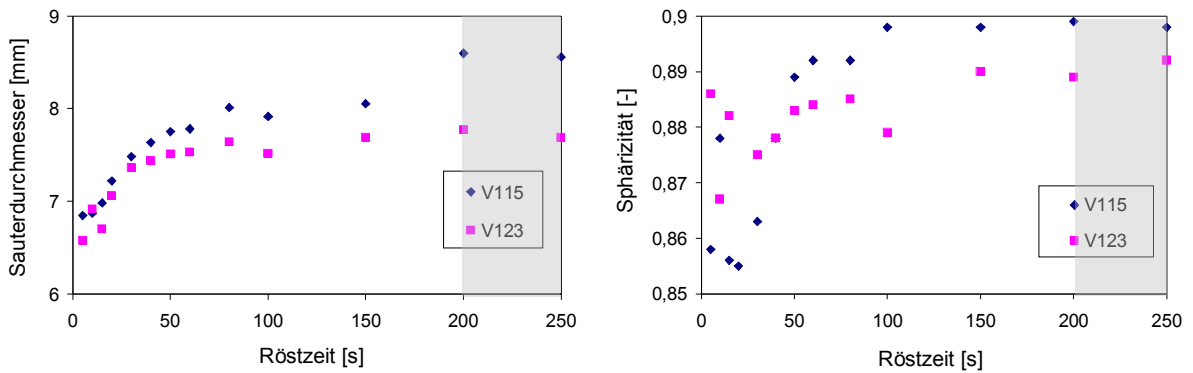


Abbildung 8.42 Mittlerer Sauterdurchmesser (links) und mittlere Sphärität (rechts)



### 8.3.8 Versuchsreihe für $\dot{Q} = 6000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$

Nr.	Kaffeesorte	$\dot{Q}_{\text{Gas}}$	$\vartheta_{\text{G ein}}$	Gas	t	w <sub>Gas 0</sub>	m	RV	d <sub>Sauter</sub>	x	X	m <sub>CmHn</sub>	$\rho_{\text{Part}}$	Hell
		$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}}\right]$	$\vartheta_{\text{U}}$ [°C]	m <sub>Gas</sub> [ $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$ ]	[s]	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$ [-]	[g] roh/ röst	[%] ORV	[mm] roh/ röst	[%] roh/ röst	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$ roh/ röst	[g] [%] AnKWE	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ roh/ röst	[Skt]
V041	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	5700	249 17,7	Luft 132	600	7,0 1013	200 1,442	27,9 21,2		8,1 0,36	0,088 0,0036	2,1255 1,0627		
V042	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	5900	249 17,8	Luft 137	288	7,3 1046	500 404,8	19,0 11,5		8,1 0,33	0,088 0,0033	5,0414 1,0083		
V043	Coffea Arabica Santos Brasilien 2000	6000	250 17,8	Luft 139	600	7,4 1063	50,4 24,9	50,2 45,6		8,1 0,38	0,88 0,0038	0,6019 1,2039		
V044	Coffea Arabica Kolumbien 2000	5700	250 16,9	Luft 132	600	7,0 1013	200,2 152,8	23,7 15,4		9,0 0,19	0,99 0,0019	2,43 1,21		
V045	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	5900	250 16,8	Luft 137	600	7,3 1046	200 141,3	29,4 20,9		9,85 0,28	0,109 0,0028	1,92 0,96		
V109	Coffea Arabica Santos Brasilien 2003	6200	249 29	Dampf 75	200	6,2 840	200,2 159,1	21 12	6,68 8,38	10,47 0,94	0,117 0,0095		1218 455	38
V124	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	5300	250 22	Luft 124	250	6,6 945	200,4 158,9	21 12		11,39 0,95	0,129 0,0096		1089 480	
V210	Coffea Canephora var. Robusta Uganda 2000	6500	250 22	Dampf 78	600	6,4 874	200,3 137,2	32 22,3		10,9 0,52	0,1227 0,00521	2,01 1,003		
V211	Coffea Canephora var. Robusta Vietnam 2004	6500	250 22	Dampf 79	600	6,5 885	200,2 133,2	33 23,3		12,14 0,671 5	0,1382 0,0068	2,12 1,06		
V212	Coffea Arabica Santos Brasilien 10/2004	6500	250 22	Dampf 78	600	6,4 874	200,5 134,7	33 23,3		11,39 0,56	0,129 0,0057	2,2361 1,1152		

Tabelle 31 Versuchsübersicht

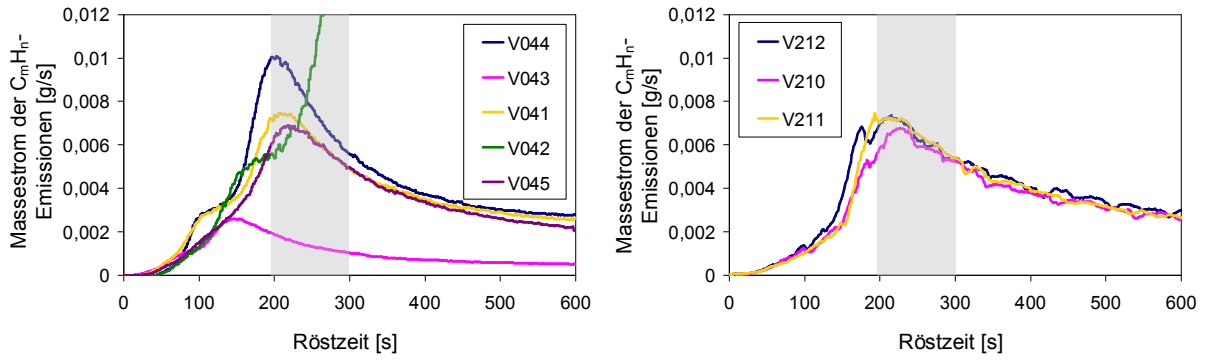


Abbildung 8.43 Versuchsergebnisse Massestrom Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

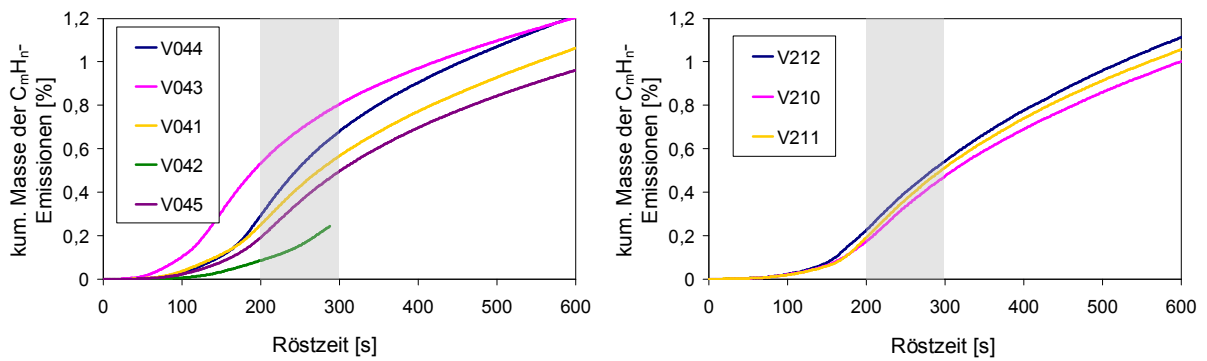


Abbildung 8.44 kumulierte Masse der Emissionen für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

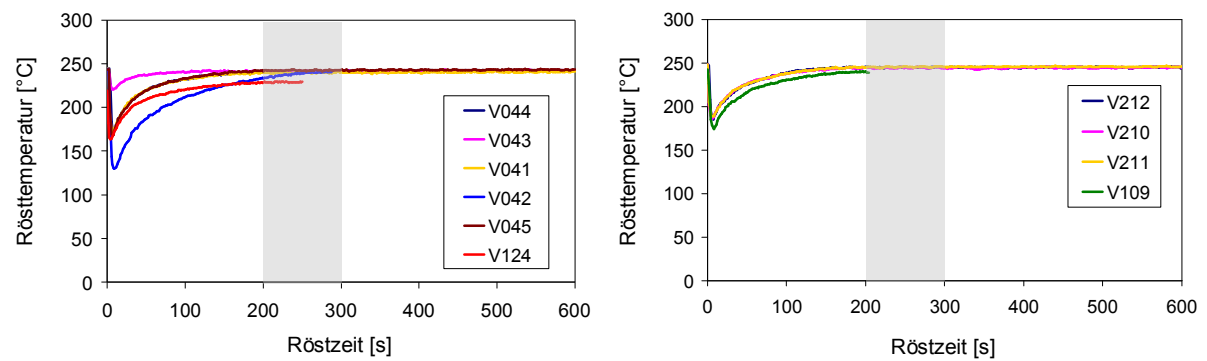


Abbildung 8.45 Temperaturverläufe für Luftröstung (links) und Dampfrostung (rechts)

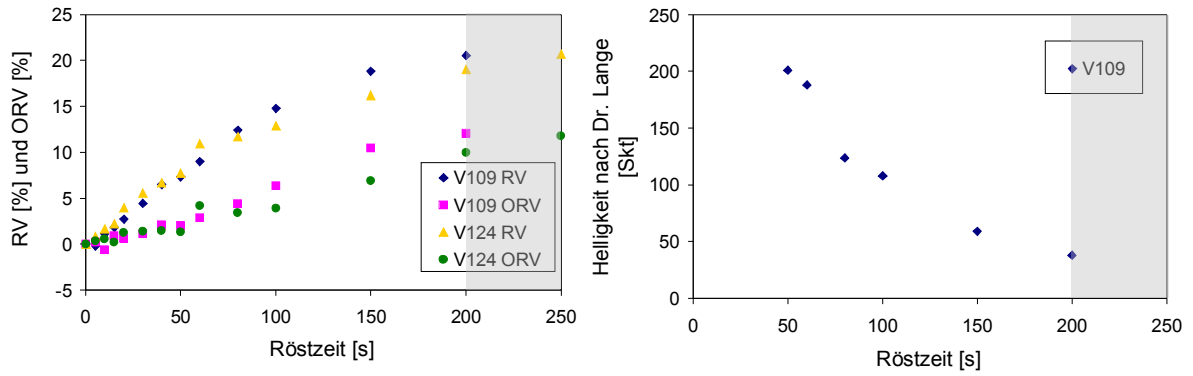


Abbildung 8.46 Röstverluste (links) und Helligkeit (rechts)

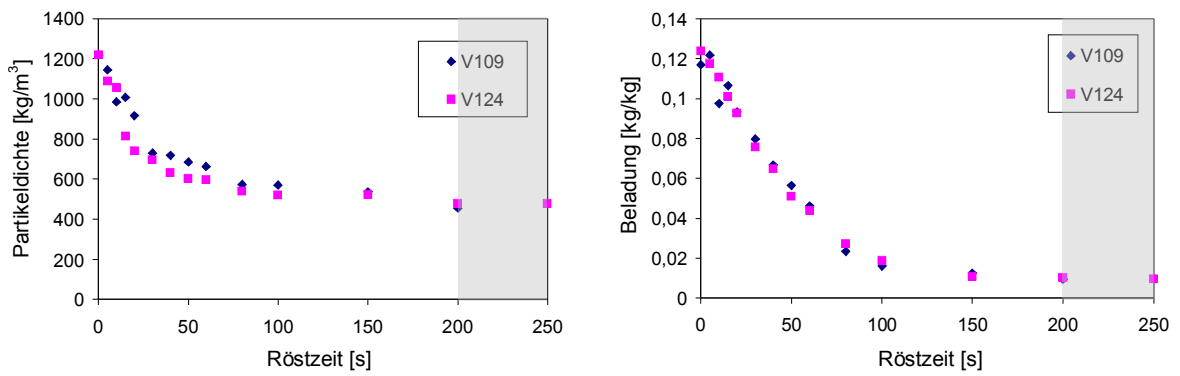


Abbildung 8.47 Partikeldichte (links) und Partikelbeladung (rechts)

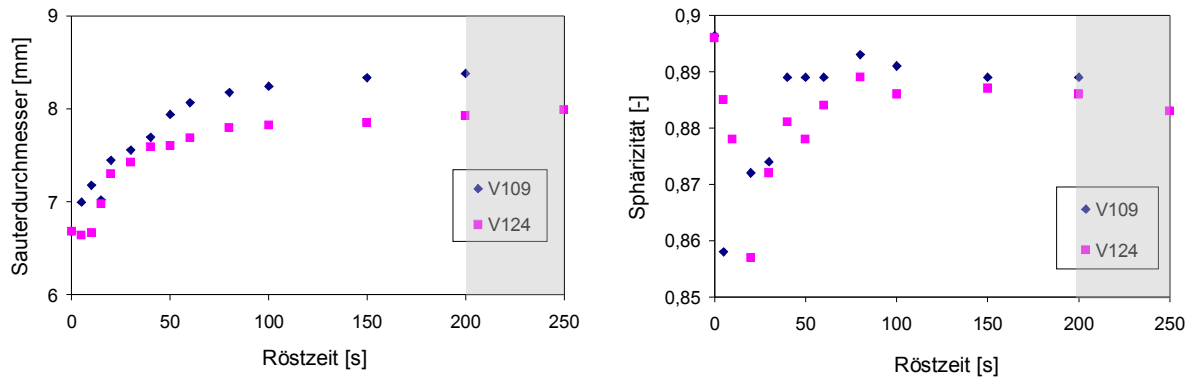


Abbildung 8.48 Mittlerer Sauterdurchmesser (links) und mittlere Sphärizität (rechts)

# Lebenslauf

## Personalien

Name: Thomas Piofczyk  
Geburtsdatum: 18.04.1975  
Geburtsort: Magdeburg  
Familienstand: verheiratet, ein Kind  
Wohnort: Henning-von-Tresckow-Straße 4  
39106 Magdeburg

## Schulbildung

1981 - 1993 Magdeburg, mit Abschluss Abitur (Note: 1,8)

## Wehrdienst

07/1993 - 06/1994 Leistung der Wehrpflicht

## Studium

10/1994 - 12/2000 Studium an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Studiengang Maschinenbau mit der Studienrichtung Verfahrenstechnik und Energietechnik, Abschluss als Diplomingenieur (Note: 1,9)

## Promotion

Beginn 07/2001 Promotionsstudium an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Studiengang Verfahrens- und Systemtechnik, Lehrstuhl für Chemischen Apparatebau mit dem Thema „Optimierung des Verfahrens zur Röstung, Kandierung und Kühlung von Kaffeebohnen in Wirbelschichtanlagen mit überhitztem Wasserdampf zur Verringerung von Emissionen“, Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Betreuung durch Prof. L. Mörl, Mitarbeit als hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter  
10/2003 - 03/2004 Mitarbeit am Lehrstuhl Verfahrenstechnik I, TU Hamburg-Harburg

## Sonstiges

01/1998 - 09/1998 Mitarbeit in der Berufungskommission für die C4-Professur „Bioprozesstechnik“ an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

## Beruf

seit 07/2006 Projektingenieur bei der ÖHMI Engineering GmbH, Planung von Anlagen zur Entschleimung und Neutralisation von Pflanzenöl

## Sprachkenntnisse

Englischkenntnisse mit Abschluss Unicert III  
Schulkenntnisse Russisch

Magdeburg, 01.07.2009