

# 1 Einleitung [Ban 1999], [Mai 1981], [Egg 2001]

Kaffee ist nach Rohöl das zweitwichtigste Welthandelsgut. Die Umsätze allein der deutschen Kaffeeindustrie lagen im Jahr 2002 bei ca. 3,6 Milliarden Euro, der Import von Rohkaffee bei 541.050 Tonnen, womit Deutschland im europäischen Vergleich jedoch erst an siebter Stelle liegt. Bei den Netto-Rohkaffee-Einfuhren waren besonders die Kaffeesorten aus Brasilien, Kolumbien und Vietnam von Bedeutung. Kaffees aus Indien und Kenia spielten eher eine untergeordnete Rolle. Im Durchschnitt trinkt jeder Deutsche knapp vier Tassen Kaffee am Tag. Stetiger Zuwachs ist insbesondere beim Konsum von Espresso sowie löslichem Kaffee zu verzeichnen [Kaf 2003].

Da es für grüne Kaffeebohnen keine Verwendung als Lebensmittel gibt, muss der Kaffee vor dem Genuss geröstet, anschließend gequenchet und danach vermahlen werden.

Das Ziel dieser am Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Technischen Universität Braunschweig durchgeführten Arbeit ist es, die einzelnen Prozesse der Behandlung der Kaffeebohne genauer zu verstehen und ihr Zusammenspiel untereinander zu begreifen. Weiterhin wird für den Verbraucher eine Verbesserung des Produktes durch ein gleichmäßiges Rösten und ein effektives Quenchen angestrebt. Ebenfalls von Interesse sind hierbei die Parameter, die Einfluss auf die Korngrößenverteilung bei der Vermahlung nehmen und somit die Extrahierbarkeit der löslichen Substanzen beeinflussen.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit soll an der TU Hamburg-Harburg in Kooperation mit Professor R. EGGERS das instationäre Temperaturfeld der Kaffeebohne für den Röst- und Quenchprozess mit numerischen Methoden berechnet werden. Die Simulation der einzelnen Prozesse soll die Anzahl der Proberöstungen minimieren und über eine Optimierung der industriellen Prozessparameter zu Kostensenkungen beitragen.

## 1.1 Geschichtliches

Die Kaffeepflanzen wurden mit großer Wahrscheinlichkeit zwischen dem Ende des 6. Jahrhunderts und 1000 n. Chr. in Abessinien, dem heutigen Äthiopien, entdeckt. Die Pflanze verbreitete sich über Arabien nach Jemen, welches bis Ende des 17. Jahrhunderts das einzige Land war, in dem nennenswerter Kaffeeanbau betrieben wurde. Es ist nicht sicher, wie und wann begonnen wurde, den Kaffee zu rösten und aufzubrühen.

Das Kaffeegetränk wurde erst im 15. Jahrhundert in weiten Teilen des Orients bekannt und beliebt. Der Kaffee wurde aufgrund seiner physiologischen Wirkung geschätzt oder verdammt, der Geschmack spielte eher eine untergeordnete Rolle.

Mitte des 16. Jahrhunderts gelangte der Kaffee schließlich über Syrien nach Istanbul und damit über den Bosphorus in das heutige Europa. Zwischen 1645 und 1721, also in weniger als 100 Jahren wurden Kaffeehäuser in den bedeutendsten europäischen Metropolen eröffnet. Der Kaffee hatte seinen Siegeszug in Europa angetreten.

Die Holländer gründeten im 17. Jahrhundert riesige Kaffeepflanzungen in Ostindien, während die Franzosen im 18. Jahrhundert die Kaffeepflanzen in der neuen Welt ansiedelten. Die damals kultivierten Pflanzen sind die Vorfahren der meisten Kaffeebäume in Amerika.

In Europa wurde schnell nach Möglichkeiten gesucht, das Kaffeegetränk zu perfektionieren. Zahlreiche Patente wurden für die Verbesserung und die Verarbeitung des Produktes Kaffee eingereicht und erteilt [Vie 1907], [KHA 1905], [Ste 1967], [Obe 1975], [Vor 1980].

## 1.2 Die Kaffeessorten

Für die Industrie sind hauptsächlich drei Kaffeessorten von Bedeutung: der *Coffea arabica*, der *Coffea liberica* und der *Coffea canephora*, der aufgrund seiner geringen Anfälligkeit gegen Krankheiten und Schädlinge meist als *Coffea robusta* bezeichnet wird.

*Coffea arabica* stammt aus Äthiopien und ist der am längsten bekannte Kaffee. Seine Bäume erreichen in der Natur eine Höhe von 6 bis 10 Metern. Auf den Plantagen werden sie aus praktischen Gründen aber klein gehalten, damit die Pflücker die Kaffeekirschen mit der Hand erreichen können. Die gerösteten Samen der *Coffea arabica* Pflanze ergeben eine hervorragende und edle Kaffequalität. Der aus Arabica Bohnen gewonnene Kaffee hat eine feine Säure, einen runden, ausgewogenen Geschmack und ein ausgeprägtes Aroma. Um diese einzigartige Qualität hervorzubringen, benötigen die Pflanzen intensive Pflege und beste Lagen. Sie gedeihen am Besten in tropischen Gebieten zwischen 600 und 2000 Metern Höhe. *Coffea arabica* machte in den Jahren 2001/2002 einen Anteil von ca. 61 % der Weltproduktion aus.

*Coffea liberica* besitzt andere Eigenschaften als der *Coffea arabica*. Die Pflanze ist höher im Wuchs, hat ein üppigeres Laub, liebt höhere Temperaturen und findet

deshalb ein günstigeres Ambiente in niedrigeren Breitengraden. Sie ist langlebiger, ertragreicher und widerstandsfähiger gegen Parasiten. Die runden Früchte haben ein härteres Fleisch, sind weniger saftig und ausgesprochen arm an Zuckerstoffen. Die Samen sind von sehr geringer Qualität.

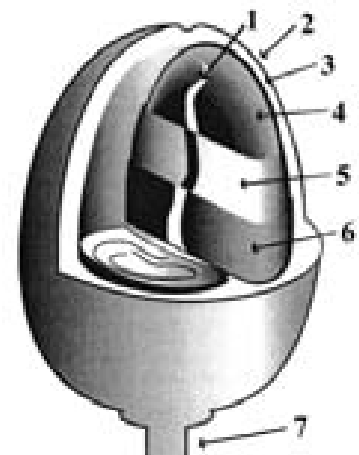
1898 entdeckte der belgische Botaniker Emile Laurent im Großen Kongobogen eine neue Kaffeesorte. Es gelang, die Pflanze leicht und einfach zu kultivieren, sie war raschwüchsig, ertragreich, bescheiden in ihren Ansprüchen an Boden und Klima, sowie resistent gegen Krankheiten und Schädlingsbefall. Aufgrund ihrer Eigenschaften bekam die Pflanze den Namen *Coffea robusta*, sie wird zuweilen auch als *Coffea canephora* bezeichnet. Die *Coffea robusta* Pflanze erreicht in der freien Natur Höhen von 8 bis 15 Metern. Die Bohnen sind rundlich und haben ein hellbraunes oder braun-grünliches Aussehen. Im Gegensatz zum *Coffea arabica* lässt sich *Coffea robusta* besser in niedrigeren Lagen anbauen. Der aus Robusta Kaffeebohnen gewonnene Kaffee hat mittelmäßige bis minderwertige Qualität und besitzt einen ausgesprochen hohen Koffeingehalt, der zwischen 2 und 4,3 % schwankt. Sein Geschmack wird von Experten als erdig, rau, hart oder kräftig bezeichnet. Aufgrund seiner minderwertigen Qualität wird *Coffea robusta* zur Herstellung von Instantkaffee und Espresso verwandt oder den hochwertigen Arabica-Sorten beigemischt. Der Weltmarktanteil von *Coffea robusta* liegt bei rund 25 %.

Es gibt noch etwa 60 weitere Kaffeesorten, die allerdings auf dem Kaffeemarkt nur eine untergeordnete Rolle spielen.

### 1.3 Die Kaffeepflanze

Die Kaffeesträucher werden je nach Art bis zu 15 m hoch und bringen mehrmals im Jahr für wenige Tage weiße Blüten hervor. Sobald die Blütenblätter abfallen, beginnen sich die Kaffeekirschen auszubilden, welche dann innerhalb von neun Monaten heranreifen. Die lange Zeit des Reifens führt dazu, dass die Kaffeesträucher gleichzeitig Früchte und Blüten tragen können. Die Kaffeekirschen verändern beim Reifen ihre Farbe von grün über gelb nach rot bis hin zu violett.

Die Kaffeekirsche (Abbildung 1.1) hat einen Durchmesser von ca. 12 Millimetern und besteht aus der Fruchthülle (Epikarp<sup>2</sup>), dem Fruchtfleisch (Mesokarp<sup>3</sup>), einer Schleimschicht, dem Pergamenthäutchen (Endokarp<sup>6</sup>), dem Silberhäutchen<sup>5</sup>, der Kaffeebohne<sup>4</sup> mit dem Schnitt<sup>1</sup> und dem Stiel<sup>7</sup>. In einer Kaffeekirsche sind meist zwei Kaffeebohnen enthalten; manchmal enthält die Frucht aber auch nur eine einzige rundliche Bohne. Diese Bohnen werden Perlbohnen genannt.



**Abbildung 1.1:** Aufbau einer Kaffeekirsche.

## 1.4 Anbau und Ernte

Kaffee wird in den Tropen und Subtropen zwischen dem 23. Grad nördlicher und dem 25. Grad südlicher Breite angebaut. Er wächst auf großen Plantagen in einer Höhe von 400 bis 2000 m über dem Meeresspiegel.

Da der Kaffeestrauch die direkte Sonneneinstrahlung nur schlecht verträgt, werden die jungen Pflanzen zumeist zwischen hohe Bäume gesetzt, die den Sträuchern den notwendigen Schatten spenden. Die Kaffeepflanzen müssen ausreichend, aber nicht übermäßig bewässert werden, vertragen keinen Frost und können von Krankheiten wie dem Kaffeerost oder Schädlingen wie dem Kaffebohner befallen werden.

Die Ernte der Früchte erfolgt entweder von Hand oder maschinell. Bei der Ernte per Hand gibt es zwei unterschiedliche Verfahrensweisen - das picking und das stripping. Beim picking werden gezielt die roten und reifen Früchte des Kaffeestrauchs geerntet. Schneller, aber weitaus ungenauer ist das stripping, bei dem der Pflücker mit der Hand über die Zweige streift und damit Blätter, Äste und Früchte abreißt. Das Gemisch wird anschließend geharkt, auf große Siebe gelegt und in die Luft geworfen. Dieser Vorgang wird wofeln genannt. Zum Schluss bleiben die Kaffeekirschen aller Reifegrade übrig. Die maschinelle Ernte ähnelt dem stripping und führt ebenfalls zu einem Gemisch aus reifen, grünen und überreifen Kaffeekirschen.

Beimengungen grüner sowie überreifer Früchte verschlechtern jedoch die Qualität des Kaffees, so dass in jedem Fall das picking den qualitativ besseren Kaffee liefert.

## 1.5 Die Aufbereitung

Die Kaffeebohnen müssen nach der Ernte der Kaffeekirschen von der Pulpa und der Schleimschicht befreit werden. Prinzipiell gibt es für diesen Prozess zwei unterschiedliche Methoden.

Eine Methode ist die trockene Aufbereitung – diese findet bevorzugt in Ländern statt, in denen das Wetter zuverlässig trocken ist. Dass diese Länder meist unter Wassermangel leiden, ist ein weiterer Grund für die trockene Aufbereitung. Die Kaffeekirschen werden zum Trocknen auf einer großen Fläche ausgebreitet und mehrmals am Tag gewendet. Nach einer Dauer von etwa 20 Tagen wird die Haut und das Fruchtfleisch durch Schälmaschinen von den Kaffeeseamen getrennt.

In den meisten Anbauländern wird jedoch die nasse Aufbereitung bevorzugt, weil kaum eine Möglichkeit besteht, die Kaffeekirschen ausreichend lange trocknen zu lassen. Zudem führt die nasse Aufbereitung zu einem qualitativ hochwertigeren Kaffee [Byt 2000]. Bei der nassen Aufbereitung müssen die Kaffeekirschen eine ausreichende Reife und eine ähnliche Größe aufweisen, damit die Maschinen sie vollständig von der Pulpa befreien können. Es wird viel Wasser benötigt, um das Fruchtfleisch von den Samen der Kaffeekirsche zu trennen. Die Bohnen sind im Anschluss an diesen Prozess noch mit einer dünnen Schleim-

schicht umhüllt, die erst nach einem längeren Gärprozess (bis zu 36 Stunden) und darauf folgenden Waschgängen entfernt wird.

Nach der Aufbereitung müssen die Bohnen auf einen Wassergehalt von 10 bis 12 % heruntergetrocknet werden, damit sie auf dem Transport nicht schimmeln.

## 1.6 Der Transport

Für den Transport werden die Kaffeebohnen in Jutesäcke gefüllt und in Containern auf Schiffe verladen. Der Transport erfolgt ungeröstet, weil sich die ungerösteten Bohnen etwa ein halbes Jahr lang ohne großen Qualitätsverlust lagern lassen. Der geröstete Kaffee ist schwieriger zu lagern, deswegen findet die Röstung zumeist im Verbraucherland statt.

## 1.7 Der Röstprozess

Beim Rösten werden die grünen Bohnen, je nach Verfahren, bei 180 bis 300 °C für anderthalb bis fünfzehn Minuten erhitzt. Durch den Röstprozess entstehen das gewünschte Kaffeearoma, die braune Färbung und die Zusammensetzung der wasserlöslichen Substanzen des Röstkaffees.

Der Röstprozess beinhaltet sowohl einen endothermen als auch einen exothermen Anteil. Bei niedrigen Temperaturen bis ca. 150 °C verdampft ganz überwiegend nur das im Kaffee physikalisch gebundene Wasser (endothermer Vorgang). Zwischen 130 und 140 °C fängt die Bohne an, sich gelblich zu verfärben; zugleich beginnt die Volumenzunahme. Oberhalb von 180 °C beginnen die pyrolytischen Reaktionen (exotherme Vorgänge), und die Bildung von CO<sub>2</sub> setzt ein. Bei Temperaturen von über 190 °C bilden sich feine Haarrisse, die bis ins Bohneninnere reichen können. Über diese Haarrisse und das Aufplatzen der Bohne am Schnitt baut sich der Druck im Bohneninneren ab. Ab 230 °C beginnt die Verkohlung der Bohne. Die Ergebnisse des Röstprozesses können über eine geeignete Wahl der Röstparameter beeinflusst werden.

In verschiedenen Regionen der Welt haben sich unterschiedliche Kaffeavorlieben herausgebildet. Während in den skandinavischen Ländern eine helle Röstung bevorzugt wird, trinken die Italiener ihren Kaffee lieber dunkel geröstet – die meisten Europäer konsumieren jedoch Kaffee aus mittelbraun gerösteten Bohnen.

Diese unterschiedlichen Vorlieben machen deutlich, dass die „optimale Röstung“ kein grundsätzlich zu definierender Zustand ist, sondern sich dem Kundenwunsch anpassen muss.

## 1.8 Der Quenchprozess

Der an die Röstung anschließende Quenchprozess soll die Kaffeebohnen möglichst schnell herunterkühlen und so ein stilles Weiterrösten verhindern, welches zu einer verbrannten Bohne führen würde. Der Quenchprozess hat ent-

scheidenden Einfluss auf die Qualität des fertigen Produkts, da über die Prozessführung unter anderem der Wassergehalt der Bohne variiert werden kann.

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, um die Temperatur der Kaffeebohne rapide abzusenken. In der Praxis wird mit kalter Luft oder mit kaltem Wasser gequenchet.

## 1.9 Der Mahlprozess

Die Zerkleinerung der Kaffeebohne ist notwendig, damit beim Aufbrühen die Aromastoffe leicht aus dem Kaffeemehl gelöst werden können.

Um den Kaffee zu zerkleinern, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Mahlwerke, die alle auf denselben Prinzipien basieren wie die Getreidemüllerei. Der Kaffee wird zwischen Walzen zermahlen, wobei die Parameter des Mahlprozesses soweit angepasst werden können, dass im Rahmen der Möglichkeiten optimal gemahlener Kaffee mit möglichst geringem Energieaufwand und Verschleiß an den Mahlwerken produziert werden kann [Dlu 1974].

Das Ziel des Mahlprozesses ist es, einen Mahlkaffee mit einer engen Korngrößenverteilung zu erhalten. Der unerwünschte Feinanteil soll möglichst gering gehalten werden [Pet 1991].

## 1.10 Röstkaffee-Extraktion [Ste 2003]

Bei der Extraktion werden die Aroma- und Geschmacksstoffe des gemahlene Röstkaffees durch heißes Wasser aus dem Kaffeemehl herausgelöst. Verfahrenstechnisch handelt es sich bei diesem Vorgang um eine Fest-/Flüssig-Extraktion, die je nach Brühmethode unterschiedliche Ergebnisse liefert.

Espresso-Maschinen arbeiten beispielsweise mit Überdruck und Wassertemperaturen von 93 – 96 °C. In einer elektrischen Haushaltskaffeemaschine wird heißes Wasser durch einen Filter gegossen, in welchen zuvor das Kaffeemehl eingebracht wurde. Die Haushaltskaffeemaschine ahmt mit diesem Verfahren den Handaufguss nach, von welchem Kaffeekenner behaupten, dass er den geschmacklich besten Kaffee produziere.

Weiterhin gebräuchlich sind die Pressstempelmethode, die Cona-Methode oder das Aufkochen des Kaffeemeis in einem Topf mit anschließendem Sedimentieren und Dekantieren.

Die Parameter, die das Ergebnis der Extraktion hauptsächlich beeinflussen, sind nach CMMENGA et al. [Cam 1998]:

- Das Mengenverhältnis Kaffeemehl/Wasser
- Die Extraktionszeit
- Die Extraktionstemperatur.

Wie die Röstung ist auch die Art der Zubereitung des Kaffeegetränks eine Frage des Verbrauchergeschmacks. HEYD und DANZART beschreiben verschiedene Methoden zur Modellierung der Vorlieben des Konsumenten bezüglich des Kaffeeengeschmacks [Hey 1998].

## 2 Stand der Forschung

Im Folgenden soll der Stand der Forschung für die Prozessparameter des Röstens, des Quenchens und der Vermahlung zusammengefasst werden.

### 2.1 Rösten [Egg 2001], [Hei 1969]

Mit Rösten wird das trockene Erhitzen der Kaffeebohnen, in der Regel unter atmosphärischem Druck bezeichnet. Der Kaffee wird entweder in einem kontinuierlichen Strom durch den Röster geführt oder in einzelnen Chargen geröstet.

Die Röstung wird durch Wärmetransfer von heißen Gasen oder heißen Oberflächen auf die grüne Kaffeebohne bewirkt. Die Art des Wärmeübergangs ist einer der wichtigsten Parameter, die Einfluss auf das Röstergebnis nehmen. Prinzipiell gibt es drei Arten des Wärmeübergangs:

- Wärmeleitung,
- Wärmestrahlung,
- Konvektion,

deren Einfluss auf das Röstergebnis im Folgenden diskutiert werden soll.

Bei dem Prozess der Wärmeleitung steht die Bohne in direktem Kontakt mit dem Röstbehälter, welcher die Wärme übermittelt. Da die Bohne nur an einer sehr kleinen Stelle Kontakt zum Röstbehälter hat, wird die Röstung sehr ungleichmäßig. Es wird deswegen versucht, bei der Röstung den Anteil der Wärmeleitung möglichst gering zu halten.

Wärme kann auch durch Strahlung auf die Kaffeebohne übertragen werden. Prinzipiell findet diese Art der Wärmeübertragung immer statt, ist jedoch bei der industriellen Standardröstung von untergeordneter Bedeutung. KINO und TAKAGI beschreiben, dass mittels Strahlung geröstete Kaffeebohnen ihre Feuchtigkeit schnell verlieren und gleichmäßig aufgeheizt werden [Kin 1995].

Bei der Konvektion ist die Bohne annähernd vollständig von dem Gas umströmt, welches die Wärme überträgt. Als Röstgas wird in der Industrie Luft verwandt.

Der Wärmeübergang durch Konvektion ist die effektivste und schonendste Methode, um eine gleichmäßig geröstete Kaffeebohne zu erhalten. Deswegen kommen heute in der industriellen Rösterei vermehrt Wirbelschicht Röster zum Einsatz, die den Anteil der Strahlung und Wärmeleitung im Vergleich zur Konvektion gering halten.

Die auf die Kaffeebohne übertragene Wärmemenge hängt ab von der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen der Bohne und dem Übertragungsmedium, der Wärmeübergangszahl  $\alpha$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der Strahlungsemission  $\varepsilon$ , der Wärmequelle  $\Phi(t)$  und der Strahlungsabsorption  $\alpha$  durch die Kaffeebohne.

Die Kaffeebohnen selbst besitzen eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit von ca.  $0,14 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  und eine hohe Wärmekapazität  $c_p$  bei Raumtemperatur von ca.  $1,46 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  [Rae 1993] bis  $2,8 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  [Sma 1993]. Das führt dazu, dass bei ungeeigneten Röstparametern Bohnen herauskommen, die zwar außen bereits fertig geröstet, im Inneren jedoch noch unterröstet sind und dem Kaffeearoma so einen unreifen Geschmack beimischen.

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  gehen in die allgemeine Wärmeleitungsgleichung ein, mit welcher der Röstprozess mathematisch beschreiben werden kann.

$$\frac{\partial T}{\partial t}(x,y,z,t) = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}(t) \left\{ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\}_{x,y,z,t} + \Phi(t) \quad \text{Gleichung 2.1}$$

Der Term

$$\frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}(t) = a(t) \quad \text{Gleichung 2.2}$$

kann dabei zur Temperaturleitfähigkeit  $a(t)$  zusammengefasst werden.

Die Wärmeleitfähigkeit ist ein Tensor 1. Ordnung und somit innerhalb der Bohne richtungsabhängig. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der Kaffeebohne ist wegen der inhomogenen Struktur der Bohne nicht einfach.

Die Temperatur  $T$  des Röstgases ist eng korreliert mit der Röstdauer  $t$ . Als Faustregel bei ansonsten gleichen Bedingungen gilt: je höher die Temperatur, desto kürzer die Röstzeit. Die Begriffe Bohnen- bzw. Produkttemperatur sind in der Literatur nicht gut definiert.

Beim High Temperature Long Time (HTLT) roasting werden die Kaffeebohnen 8 bis 12 Minuten bei Gastemperaturen von ca.  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  geröstet. Ein besseres Verhältnis von Luft zu Röstgut (air to bean ratio) ermöglicht Röstzeiten von 3 Minuten bei ca.  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Diese Röstung wird dann als High Temperature Short Time (HTST) roasting bezeichnet. Bei Röstzeiten unter 2 Minuten wird der



Röstprozess *sehr schnell* oder *ultraschnell* genannt. Andere Röstverfahren arbeiten hingegen mit niedrigen Temperaturen und längeren Röstzeiten - Low Temperature Long Time (LTLT).

SCHENKER beschäftigt sich in zahlreichen Untersuchungen mit dem Vergleich zwischen der HTST und der LTLT Röstung [Sch 2000].

Die Röstdauer hat entscheidenden Einfluss auf den Rösterfolg. Werden die Bohnen zu lange einer zu hohen Temperatur ausgesetzt, so verkohlen sie und werden damit ungenießbar.

Beim Aufheizen entweicht zunächst das in der Kaffeebohne physikalisch gebundene Wasser in einem endothermen Prozess. Der Wassergehalt der grünen Kaffeebohne liegt bei etwa 8 bis 12 % und wird durch die Röstung auf 1 bis 2 % reduziert.

Ab ca. 140 °C verliert die Kaffeebohne CO<sub>2</sub>, welches durch exotherme Reaktionen, die unter anderem auch die Aromastoffe des Kaffees herausbilden, entsteht. Stofftransportmechanismen in der Kaffeebohne sind abhängig von der Porengröße und dem Druckunterschied. Bei kleinen Porenradien dominiert die KNUDSENSche Molekulardiffusion, wohingegen bei größeren Porenradien die STEFANSche Dampfdiffusion entscheidend ist. Große Druckunterschiede führen zu einer laminaren Durchströmung in der Bohne.

Das Gewicht der Bohne nimmt mit zunehmendem Röstgrad ab. Dies erklärt sich einerseits aus dem Wasserverlust, andererseits aus dem chemischen Röstverlust (Röstgase und CO<sub>2</sub>). Der auf die ursprüngliche Masse bezogene Gewichtsverlust des Röstkaffees wird als Einbrand  $E$  bezeichnet.

$$E = \frac{m_{\text{grün}} - m_{\text{geröstet}}}{m_{\text{grün}}} \quad \text{Gleichung 2.3}$$

Der Substanzverlust des Röstkaffees ergibt sich über den Einbrand abzüglich des Wasserverlustes.

Im Gegensatz zum Gewicht nimmt das Volumen  $V$  der Kaffeebohne beim Röstprozess zu. Das Aufblähen der Bohnen wird verursacht durch einen steigenden Bohneninnendruck durch das Verdampfen von Wasser und die Entstehung von CO<sub>2</sub>. Diese Effekte wirken gegen die strukturelle Stärke der Bohne. Die Volumenvergrößerung liegt in der Größenordnung von 70 bis 100 %. Der Bohneninnendruck, ermittelt aus der Geschwindigkeit des Gewichtsverlustes bei laminarer Durchströmung, wird von HEISS und RADTKE [Hei 1969] mit 3,65 atm (3,7 bar) bei 140 °C angegeben.

Wird der Bohneninnendruck zu groß, platzt die Bohne mit einem hörbaren Knacken auf. Dieser zu späteren Röstzeiten stattfindende Vorgang wurde bereits von RADTKE und HEISS [Rad 1975] beschrieben.

Die Art des Röstgases beeinflusst den zeitlichen Verlauf der Röstung, sowie den Ablauf der Reaktionen. Gewöhnlich wird unter Luft geröstet, möglich sind aber auch Röstungen zum Beispiel unter Stickstoff oder im annähernden Vakuum.