

Lesen aus der Flamme

Tabelle 3 zeigt einige Stationen bei der Nutzung des Feuers. Die ersten archäologischen Funde von Feuerstätten, die für Kochen benutzt waren, sind ca. 1,75 Millionen Jahre alt. Die ersten farbigen Keramikfunde weisen ein Alter von über 4000 Jahre auf (Bild 30). Die Grundlage zu ihrer Erzeugung ist ein äußerst fundiertes feuerungstechnisches Wissen.

Feuerungstechnische Meilensteine	seit
Älteste Spuren von Feuerstätten	1,7 Millionen Jahre
Älteste Spuren von Feuerstein	780.000 Jahre
Verbreitete Nutzung des Feuers	600.000 Jahre
Verbreitete Spuren von Feuer-Generieren	40.000 Jahre
Öllampe	30.000 Jahre
Älteste Keramikfunde	10.000 Jahre
Älteste Kupfergegenstände	9.000 Jahre
Älteste Glasgegenstände	7.000 Jahre
Älteste Bronzegegenstände	6.000 Jahre
Glocken gießen	5.000 Jahre
Glasierte Keramik, Älteste Eisengegenstände	4.000 Jahre
Kerze	2.000 Jahre

Tabelle3: Einige Stationen bei der Nutzung des Feuers



Bild 30: Dreitausendjährige Keramik-Gegenstände

Die dunkelbraune bis ziegelrote Grundfarbe der Töpferware ist von Eisen(III)-Oxid verursacht (Bild 30, die zwei linken Fotos), während Eisen(II)-Oxid (in der Gegenwart von Blei und Antimon) verschiedene Gelbtöne ergibt (die zwei rechten Fotos). Der Glasurbrand in reduzierender Atmosphäre, d.h. bei Luftmangel, ist die Voraussetzung mehrfarbiger Dekoration in der Keramik. Der Glasurbrand darf aber nur im schwachen Luftmangelbereich (nahstöchiometrisch) durchgeführt werden, um die Rußbildung zu vermeiden. Erschwerend kommt hinzu, dass die Temperatur des Glasurbrandes genau eingehalten werden muss: Einige Grade zu wenig, und die Glasur ist nicht glatt; einige Grade zu viel, und die Glasur fließt herunter, die Ware backt zusammen. Die Töpfer, aber auch die Schmiede und Hersteller von Metallgegenständen mussten Temperatur und Atmosphäre beim Brennen genau einhalten, und zwar ohne Messinstrumente; ihre einzige Hilfe war die Flammenbetrachtung. Die alten Meister konnten bereits vor mehreren Tausend Jahren (siehe Tabelle 3) aus dem Flammenbild die Brennstoff-Luft-Zusammensetzung und Temperatur ablesen. Die Beherrschung dieser Kunst hilft auch heute beim Schüren des Kaminfeuers. Die Bilder 31 bis 49 helfen, aus der Flamme lesen zu lernen.



**Luftzahl zu
niedrig
 $\lambda \approx 1,2$
Entgasungsphase**

Bild 31: Luftzahl bei Durchbrand viel zu niedrig: rötliche Flammenfärbung, viele dunkle Flächen in der Flamme, starke Rußbildung, Rußbeschlag an der Feuerraumwand, grauer Schornsteinrauch, hohe CO-Konzentration, jedoch mittlerer bis hoher Wirkungsgrad. Luftzahl bei oberem Abbrand etwas zu niedrig oder grenzwertig.



**niedrigste
Luftzahl im
optimalen
Luftzahlbereich
 $\lambda \approx 1,7$
Entgasungsphase**

Bild 32: Die untere Grenze (niedrigste Luftzahl) bei Durchbrand, optimal bei oberem Abbrand. Schön leuchtende, goldgelbe Flamme. Mittlere bis hohe Rußbildung, niedrige bis mittlere CO-Bildung, hoher Wirkungsgrad.



**Luftzahl im
optimalen
Luftzahlbereich
 $\lambda \approx 2,2$
Entgasungsphase**

Bild 33: Optimale Luftzahl. Halbtransparente goldgelbe Flamme. Geringe Rußbildung, niedrige bis mittlere CO-Bildung, mittlerer bis hoher Wirkungsgrad.



**höchste Luftzahl
im optimalen
Luftzahlbereich
 $\lambda \approx 3$
Vergasungsphase**

Bild 34: Die obere Grenze (höchste Luftzahl) im optimalen Luftzahlbereich. Kaum Rußbildung, mittlere bis hohe CO-Bildung, mäßiger bis mittlerer Wirkungsgrad. Mit Stochern kann die Luftzahl reduziert und der Wirkungsgrad erhöht werden. In wenigen Minuten kann Holz nachgelegt werden.



**Luftzahl zu hoch
 $\lambda \approx 4$
Ende der
Vergasungsphase**

Bild 35: Flamme zu klein, Luftzahl zu hoch. Keine Rußbildung, viel CO, niedriger Wirkungsgrad. Wenn weiter gefeuert werden soll, kann jetzt Holz nachgelegt werden. Nur so viel Holz nachlegen, dass nach Aufleben der Flamme die Luftzahl $\lambda \approx 1,7$ nicht unterschritten wird (Flammenbild Abb. 32). Wenn nicht weiter gefeuert werden soll, stochern und Luft drosseln!



**Luftzahl viel
zu hoch
 $\lambda \approx 5$
Glutphase**

Bild 36: Flamme viel zu klein, Luftzahl viel zu hoch. Keine Rußbildung, über 1 % CO im unverdünnten Abgas, Wirkungsgrad unter 50 %.

Flammenbetrachtung durch die Spektralbrille



Bild 37: Kerzenflamme durch eine Spektralbrille (Regenbogenbrille) betrachtet. Eine Spektralbrille kann für 1 - 2 € unter anderem in Online-Shops erworben werden (Suchwörter: „Spektralbrille“, „Regenbogenbrille“ usw.).

In Bild 37 ist eine Kerzenflamme zu sehen, die durch eine Spektralfolie fotografiert wurde. Die Spektralfolie ist ein Reflexions-Linien-Gitter, welches das weiße Licht in sein Farbspektrum zerlegt. Durch die Reflexion entsteht eine Vielzahl von regenbogenfarbenen Bildern. Die Flamme in der Mitte des Bildes entsteht ohne Reflexion: in der optischen Physik wird dies als Reflexion nullter Ordnung bezeichnet. Die weißen Flammenbilder oben und unten und die regenbogenfarbenen Bilder links und rechts stammen aus der Reflexion erster Ordnung. Die pastellfarbenen Bilder oben, unten, links und rechts sind ebenfalls Reflexionen erster Ordnung; hier ist die Lichtquelle nicht die Flamme selbst, sondern das von der Flamme beleuchtete Wachs. Die regenbogenfarbenen Bilder auf der Diagonallinie sind ebenfalls durch die Reflexion erster Ordnung entstanden, wobei die Reflexion nicht durch die Linien, sondern durch die Knoten verursacht wird.

Leuchtende Rußpartikel strahlen elektromagnetische Wellen nach dem Planckschen Strahlungsgesetz ab und geben durch ihr Farbspektrum Hinweis auf die Flammentemperatur. Das Leuchten rußfreier Flammen wird in der Regel durch die Flammenfärbung aufgrund des Natrium- und Kaliumgehalts der Asche verursacht. Die Intensität der Farben zeigt die Neigung der Flamme zur Rußbildung an. Starke Rußbildung erzeugt kräftige Spektralfarben, schwache führt zu Pastellfarben. Bei rußfreien Flammen ist die Flammenfarbe der Reflexionen nullter und erster Ordnung gleich, wie z.B. in Bild 20, 29, 46-49. Bei „punktförmigen“ Flammen, wie bei der hier gezeigten Kerzenflamme, verrät die Farbzusammensetzung der Spektralbilder die Flammentemperatur. Wenn die Spektralfarben viel Rot, wenig Grün und kaum Blau enthalten, ist die Flamme etwa 1000 – 1100 °C heiß. Erscheint fast so viel Grün wie Rot und Blau, ist die Flamme etwa 1100 – 1200 °C heiß. Bei der in Bild 37 gezeigten Kerzenflamme ist der heißeste Punkt etwa 1280 °C. Bei „flächenförmigen“ Flammen, wie die in Bildern 38 bis 49, ist die Flammentemperatur aus den Spektralbildern schwer ablesbar.

Die spektrale Bilderserie (Bilder 38 – 49) beschreibt den Ablauf der Verbrennung einer Holzladung mit oberem Abbrand. Unten liegen die großen Holzscheite, oben die kleinen, das Feuer wird oben angezündet. Nach jedem Bild werden die Luftzahl λ , die CO-Bildung und der Wirkungsgrad η angegeben. In der Entgasungsphase (Bilder 38 bis 43) zeigen die Flammenbilder der Reflexion erster Ordnung eine Mischung aus Rot, Gelb und Grün. Dies deutet auf hohe Rußbildung in der Flamme hin. In der Verbrennungsphase (Bilder 44 bis 46) zeigen die Bilder der Reflexion erster Ordnung vorwiegend Pastellfarben. Das Fehlen der kräftigen rot-gelb-grünen Farben deutet darauf hin, dass die Rußbildung stark abnimmt. In der Glutphase (Bilder 47 bis 49) sind die Flammenfarben der Bilder nullter und erster Ordnung gleich, da in dieser Phase kein Ruß bei der Verbrennung entsteht (siehe Bild 18).



Bild 38: Entgasungsphase, 1 Minute nach Zünden;
 $\lambda = 22$, $\text{CO}_{13\% \text{ O}_2} = 0,38\%$, $\eta = 89 \%$



Bild 39: Entgasungsphase, $\lambda = 2,8$, $\text{CO}_{13\% \text{ O}_2} = 0,044\%$, $\eta = 79 \%$



Bild 40: Entgasungsphase, $\lambda = 2,5$, $\text{CO}_{13\% \text{ O}_2} = 0,04\%$, $\eta = 75 \%$



Bild 41: Entgasungsphase, $\lambda = 1,8$, $\text{CO}_{13\% \text{ O}_2} = 0,042\%$, $\eta = 80,4 \%$



Bild 42: Entgasungsphase, $\lambda = 1,7$, $\text{CO}_{13\% \text{O}_2} = 0,1\%$, $\eta = 81 \%$



Bild 43: Ende der Entgasungsphase, $\lambda = 1,9$, $\text{CO}_{13\% \text{O}_2} = 0,11\%$, $\eta = 80 \%$



Bild 44: Vergasungsphase, $\lambda = 2,6$, $\text{CO}_{13\% \text{O}_2} = 0,22\%$, $\eta = 77 \%$



Bild 45: Vergasungsphase, $\lambda = 3,4$, $\text{CO}_{13\% \text{O}_2} = 0,06\%$, $\eta = 75 \%$



Bild 46: Übergang Vergasungsphase/Glutphase, $\lambda = 2,6$, $\text{CO}_{13\% \text{O}_2} = 0,11\%$, $\eta = 79 \%$



Bild 47: Glutphase, $\lambda = 2,4$, $\text{CO}_{13\% \text{O}_2} = 0,21\%$, $\eta = 81 \%$



Bild 48: Glutphase, $\lambda = 3,5$, $\text{CO}_{13\% \text{O}_2} = 0,82\%$, $\eta = 72 \%$



Bild 49: Glutphase, $\lambda = 4,5$, $\text{CO}_{13\% \text{O}_2} = 0,91\%$, $\eta = 70 \%$