

Dynamik des Gastransfers durch den Wein

ULRICH HÖCHLI¹ und KONRAD BERNATH²

¹ CH-8820 Wädenswil, Palmenweg 7

² Hochschule Wädenswil
CH-8820 Wädenswil, Grüental, Postfach 335

Es werden Grundlagen erarbeitet, die den Eintritt und Austritt von Gasen in einem Modellwein beschreiben. Insbesondere wird die Dynamik von Blasen aus Fritten in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Gases und des flüssigen Mediums berechnet. Die Parameter, die den Austausch von Gasen zwischen Wein und Kopfraum beschreiben, werden experimentell bestimmt und daraus auf Veränderungen im Bukett des Weins geschlossen. Aus diesen Erkenntnissen ergeben sich optimale Praktiken, um den Wein effizient und schonend zu belüften.

Schlagwörter: Wein, Gasaustausch, Sauerstoff, Mikrooxidation

Dynamics of gas transfer in wine. Basics for the description of the gas transfer into and out of a model wine are developed and the dynamics of bubbles from diffusers in dependency of gas composition and the liquid medium are calculated. The parameters which describe the gas exchange between wine and head space are determined experimentally and its influences on the wine bouquet are discussed. These findings result in optimum practices for an efficient and careful aeration of wine.

Key words: Wine, gas exchange, oxygen, micro-oxygenation

La dynamique du transfert de gaz à travers le vin. Dans le présent article, les bases pour la description de l'entrée et de la sortie des gaz dans un vin modèle sont élaborées. En particulier, la dynamique des bulles de frites en fonction de la composition du gaz et du médium liquide est calculée. Les paramètres décrivant l'échange de gaz entre le vin et l'espace vide sont déterminés par voie expérimentale pour en déduire les modifications du bouquet du vin. Ces connaissances permettent de développer des pratiques optimales pour aérer le vin de manière efficace et avec ménagement.

Mots clés : vin, échange de gaz, oxygène, micro-oxygénation

Im Wein gelöste Gase spielen beim Ausbau eine zentrale Rolle: Einerseits können sie mit anderen Inhaltsstoffen des Weins chemisch reagieren, andererseits können sie die Oberfläche des Weins zum Kopfraum queren, ein physikalischer Vorgang, der auch in Gegenrichtung abläuft. Vor allem im Zusammenhang mit dem Ausbau im Barrique-Fass wurde erkannt, dass Sauerstoff die Polymerisation von Tanninen unterstützt. Es lag nahe, diese chemische Reaktion auch in Stahlfässern durch Zugabe von Sauerstoff zu fördern. Unabhängig davon, wie das geschieht, verbindet sich mit der Sauerstoffzufuhr ein Gasaustausch, der andere im Wein gelöste Stoffe mit einbezieht. Von vorrangigem Interesse sind Aromastoffe, die hier ungeachtet ihres Siedepunktes als Gase betrachtet werden, da ihr Stofftransport durch die Oberfläche in Form von einzelnen Molekülen, also in der Gasphase, stattfindet. Gezielte Oxida-

tion des Weins im Stahlfass, die bewirken soll, dass allzu aggressive Tannine in eine mildere Form umgewandelt werden, bedingt, dass der Stofftransport quantitativ erfasst wird. Wesentlich ist dabei die Kenntnis der im Wein verbleibenden Menge Sauerstoff und die Menge und Zusammensetzung der bei der Belüftung unvermeidbar austretenden Gase.

Der Weg eines Gases aus der Gasphase zum Bindungspartner führt über drei Hindernisse. Erst muss das Gas, meist Sauerstoff, von der Oberfläche absorbiert werden, dann muss es zum Bindungspartner diffundieren oder durch Konvektion hingetragen werden, und schließlich soll es reagieren. Entsprechendes gilt für den umgekehrten Weg. Während die Chemie der Reaktionen recht gut bekannt ist (RIBÉREAU-GAYON et al., 1998; WÜRDIG und WOLLER, 1989; BOULTON et al., 1995), wurde über die Physik des Gastransfers bis jetzt

nur sporadisch berichtet (RIBA, 1990). Neue Erkenntnisse, die vor allem im Gebiet der Verfahrenstechnik gewonnen wurden, lassen sich mit einigen Modifikationen auf die Oenologie anwenden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, festzulegen, wie viel Sauerstoff bei Belüftung mit Blasen tatsächlich vom Wein absorbiert wird und was die aus dem Wein austretenden Blasen an Sauerstoff, möglicherweise Stickstoff und Kohlendioxid, aber auch an Aromastoffen, in die Atmosphäre tragen. Dabei sind folgende Punkte von Bedeutung: die Größe des Transferkoeffizienten für Sauerstoff in Wein, die vorhandenen effektiven Blasenoberflächen und die Aufstiegs geschwindigkeit der Blasen in der Flüssigkeit. Diese Größen werden zunächst in Modellwein experimentell bestimmt. Die aus der Verfahrenstechnik bekannte Dynamik der Absorption von Gasen an einer ebenen oder gekrümmten Oberfläche einer Flüssigkeit erlaubt es, die vom Wein aufgenommene Sauerstoffmenge zu bestimmen. Ebenso lässt sich der Austritt derjenigen Aromen berechnen, für welche die relevanten thermodynamischen Parameter bekannt sind. Es wird sich dabei zeigen, dass der Belüftungs- und Entlüftungsvorgang kritisch von der Blasengröße, vom Sauerstoffgehalt des zur Belüftung verwendeten Gases und vom angewandten Gasfluss abhängt. Um das Verhältnis von erwünschten zu unerwünschten Prozessen zu optimieren, werden quantitative Angaben über die kritischen Größen erarbeitet. Schließlich wird auf gewisse Unterschiede in den physikalischen Vorgängen zwischen Modellwein und Wein eingegangen.

Material und Methoden

Experimente

Gastransport durch die ebene Oberfläche

Im Kontakt mit Wein werden Gase, insbesondere Sauerstoff, zunächst an der Oberfläche absorbiert, diffundieren dann weiter in den Wein und können dann mit allfälligen Bindungspartnern chemisch reagieren. Die physikalischen Vorgänge können getrennt von den chemischen Vorgängen beobachtet werden, wenn Sauerstoff einmal mit einem Modellwein (Wasser, Ethanol 12 %vol, pH-Wert = 3,5) in Kontakt gebracht wird und einmal mit realem Wein. Zu Messzwecken wird in einer Druckflasche (GÉTAZ et FABRE, 1990) entgaster Modellwein mit reinem oder atmosphärischem Sauerstoff überschichtet. Nach Verschluss der Flasche dringt Sauerstoff in den Modellwein ein, dadurch entsteht ein

Druckabfall, der mit der Sauerstoffadsorption korreliert. In Abbildung 1 sind die Daten für die Sauerstoffadsorption während einiger Stunden aufgezeichnet.

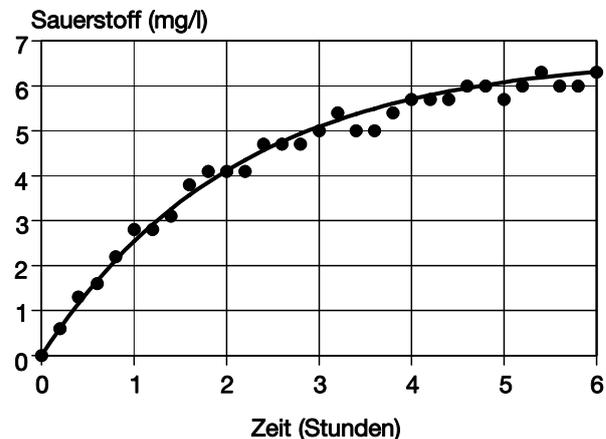


Abb. 1: Sauerstoffaufnahme in der Druckflasche als Funktion der Zeit; fit mit Zeitkonstanten von 2,2 h; daraus Transferkonstante $t = 0,0007 \text{ cm/sec}$

Allgemeine Erkenntnisse über Stofftransport (IOFFE et al., 1984; GRASSMANN, 1983) erlauben eine quantitative Analyse der Daten. Durch eine Oberfläche, die einen Modellwein, bestehend aus Wasser, Ethanol und Säure, von einem überlagerten Gas abtrennt, fließt ein Massenstrom dm/dt , gegeben durch

$$dm/dt = v_g * dg/dt = -F * T * g(t) \quad (1)$$

Hier ist v_g das Volumen des Gas enthaltenden Kopfraums, $g(t)$ die zeitabhängige Dichte, F die Kontaktfläche des Weins mit der Gasphase, T die experimentell zu bestimmende Transferkonstante und t die Zeit.

Enthält der Wein bereits Sauerstoff, so findet ein Rückfluss statt, der proportional ist seiner Konzentration f . Die Transferkonstante ist für den Rückfluss verschieden. Es sei $T_r = T * H$, woraus folgt, dass

$$dm/dt = v_g * dg/dt = -F * T * (g - f * H) \quad (2)$$

Aus der Gleichgewichtsbedingung $dg/dt = 0$ folgt $H = g_\infty/f_\infty$, H ist also das Verhältnis der Sauerstoffkonzentrationen von Gas zum Wein, nach seinem Entdecker Henrykonstante benannt (GRASSMANN et al., 1997). In der Verfahrenstechnik heißt sie, gemäß ihrer technologischen Bedeutung, Trennfaktor. Für das System Sauerstoff-Wasser ist $H = 35$. Aus den Anfangsbedingungen

$g(0)$ und $f(0)$ lassen sich g und f berechnen: Aus der Erhaltung der Masse M folgt

$$M = g_{\infty} \cdot v_g + f_{\infty} \cdot v_f = g(0) \cdot v_g + f(0) \cdot v_f = g(t) \cdot v_g + f(t) \cdot v_f \quad (3)$$

und mit Hilfe der Bedingung für Gleichgewicht, $H = g_{\infty}/f_{\infty}$, wird

$$g_{\infty} = (g(0) \cdot v_g + f(0) \cdot v_f) / (v_g + v_f / H) \quad (4)$$

Die Differenzialgleichung (2) lautet demnach

$$v_g \cdot dg/dt = -F \cdot T \cdot (g \cdot (1 - H \cdot v_g/v_f) - H \cdot M/v_f) \quad (5)$$

M ist die totale im Gasvolumen und in der Flüssigkeit enthaltene Menge O_2 . Die Lösung lautet

$$g(t) = (g(0) - g_{\infty}) \cdot \exp(-\alpha t) + g_{\infty} \quad (6)$$

und analog gilt

$$f(t) = (f(0) - f_{\infty}) \cdot \exp(-\alpha t) + f_{\infty} \quad (7)$$

wo die Zeitkonstante

$$\alpha = v_f \cdot v_g / T \cdot F \cdot (v_f + H \cdot v_g) \quad (8)$$

beträgt.

Das im Modellwein gelöste Gas erreicht im Gleichgewicht mit dem Gas im Kopfraum die Konzentration von f_{∞} und braucht bis zum Erreichen der halben Endkonzentration die Zeit $t_{1/2} = \ln(2)/\alpha$. Eine Angleichung der Funktion an die Daten, fit genannt, bestimmt f_{∞} und t_0 . Daraus lässt sich auf Grund von Gleichung (8) des Anhangs die Transferfunktion für Sauerstoff in Modellwein, T , bestimmen, die besagt, wie viel g Gas pro Sekunde und cm^2 Kontaktfläche übertragen werden. Aus dem fit für Abbildung 1 folgt für Sauerstoff $T = 7 \cdot 10^{-4}$ cm/sec. Aus 5 Replica folgt $T = (6 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ cm/sec. Dieser Wert ist mit älteren Daten (RIBA, 1990) kompatibel. Dank der Messung mit der Druckmethode ist die Genauigkeit jedoch gegenüber älteren Messungen erhöht. Die Werte für CO_2 , und N_2 sind $13 \cdot 10^{-4}$ cm/sec und $5 \cdot 10^{-4}$ cm/sec.

Für einen offenen Behälter gilt $v_g = \infty$, was erlaubt, in der Gleichung (8) v_f in der Klammer zu vernachlässigen. Nach Kürzen mit v_g folgt

$$\alpha = v_f / (H \cdot T \cdot F) = h / (H \cdot T) \quad (9)$$

Ein Fass mit der Höhe $h = 1$ m würde zur Hälfte mit Sauerstoff gesättigt innerhalb $2 \cdot 10^4$ sec, d.h. in ca. sechs Stunden. Das erlaubt eine Abschätzung des O_2 -Eintrags bei Umzügen.

Während für den Stoffaustausch im Barrique die Annahme der ebenen Oberfläche genügt, ist bei forcierter Belüftung von Wein in Stahlfässern etwa mittels einer Fritte die Form der Oberfläche zu berücksichtigen. Findet ein Stofftransport nicht durch eine ebene, ruhende Oberfläche statt, sondern auch durch aufsteigende Blasen, so ist die Oberfläche erheblich vergrößert und bewegt sich gegenüber der Flüssigkeit. Kürzlich hat PEDERSON (2000) gezeigt, dass die Transferfunktion nur unwesentlich von der Geschwindigkeit der anströmenden Flüssigkeit, aber von der Blasengröße und ihrem Gehalt an Stickstoff abhängt. Dazu wurden die an einer Düse erzeugten ortsfesten Blasen mittels eines Lasers abgetastet. Dieses Vorgehen bietet sich für aufsteigende Blasen nicht an.

Sauerstofftransport durch aufsteigende Blasen

Die Dynamik der Blasen und damit deren Sauerstofftransport stützt sich auf zwei Erkenntnisse: Erstens auf den von Stokes gefundenen Zusammenhang zwischen der Aufstiegs geschwindigkeit v der Blase in Modellwein, $v = S \cdot r^2$, wo $S = 2,2 \cdot 10^4$ (cm \cdot sec) $^{-1}$ und der Größe der Blase, wobei r deren Radius ist. Zweitens gilt, dass das Gas in der Blase dazu tendiert, mit der Flüssigkeit ins Gleichgewicht zu kommen, das heisst, dass ein Gasaustausch zwischen der Blase und der Flüssigkeit stattfindet. Wie für ebene Oberfläche gilt, analog Gleichung (1),

$$dm/dt = d/dt (v_g \cdot g) = -F \cdot T \cdot (g - f \cdot k) \quad (10)$$

Solange die Blase nur aus O_2 besteht, ist ihre Massendichte bei Normaldruck 1 Mol/22400 cm^3 , also ist g konstant. Wird ein sauerstoffarmer Wein belüftet, so gilt ferner, dass $f \ll g/k$, woraus folgt, dass

$$d/dt (v_g) \cdot g = -F \cdot T \cdot g \quad (11)$$

und damit nach Anwendung der Kettenregel und nach Kürzen mit g

$$d/dt (v_g(r)) = d/dt (r) \cdot dv_g/dr = -F \cdot T \quad (12)$$

Daraus folgt

$$dr/dt = -T \text{ und } r = r(0) - T \cdot t \quad (13)$$

Die Blase verliert an Größe und verschwindet in der Zeit $r(0)/T$. Ist v ihre Geschwindigkeit nach der Stokes'schen Gleichung

$$v = S * r^2 \tag{14}$$

wo die Stokes'sche Konstante $S = 2 * \text{Erdbeschleunigung} * \text{Dichte des Weins} / (9 * \text{Viskosität}) = 2,2 * 10^4 \text{ (cm} * \text{sec)}^{-1}$ beträgt, so legt sie in dieser Zeit den Weg

$$h_0 = \int_0^{R(0)/v} v(t) dt = S * (r(t))^3 = S * T^2 * ((t - r/T)^3 + (r/T)^3) / 3 \tag{15}$$

zurück. In Abbildung 2 ist der Weg für zwei Blasen im Fass mit verschiedener Anfangsgröße und Zusammensetzung dargestellt. Ein Betrachter, der sein Augenmerk auf eine Höhe h_0 richtet, wird also zuerst die Blase mit großem Anfangsradius, dann diejenige mit kleinem Radius sehen.

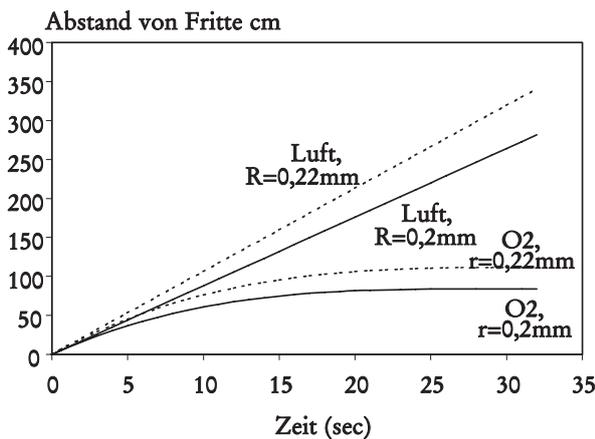


Abb. 2: Berechnung der Blasenposition im Fass auf Grund von Gleichung (15)

Damit sind die Bedingungen für die Bestimmung der Blasengröße definiert.

Im Experiment (Abb. 3) wurde in einem 2 m hohen Glaszylinder ein kurzer Puls von Blasen am Boden erzeugt. Die auf verschiedenen Höhen installierten Lichtquellen (L) und Photozellen (P) registrierten den beim Durchgang von Blasen erzeugten Abfall der Lichtintensität, der von einem Voltmeter (V) aufgezeichnet wird.

In der Fritte F wird ein Blasenimpuls von 1 sec Dauer erzeugt. Die auf verschiedenen Distanzen von der Fritte beobachteten Lichtabsorptionen zeigen den

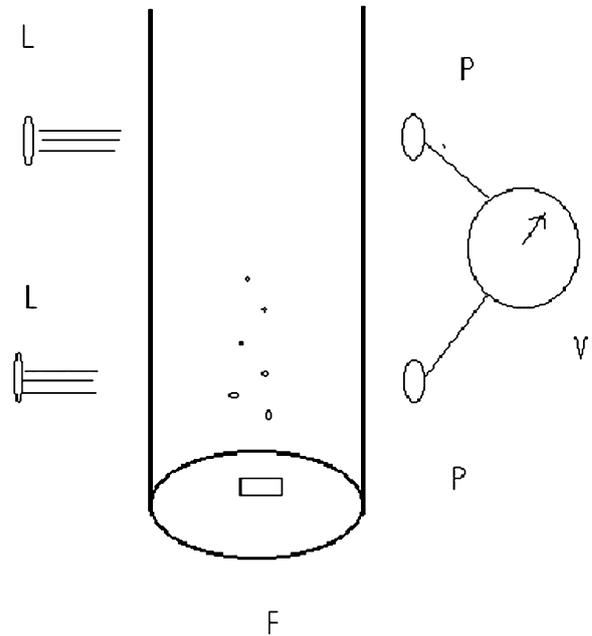


Abb. 3: Experiment zur Bestimmung der Blasendynamik

Durchgang der Blasen an. In erster Näherung gibt die Durchgangszeit an den Beobachtungspositionen eine Angabe über ihre Geschwindigkeit und ihre Transferkonstante.

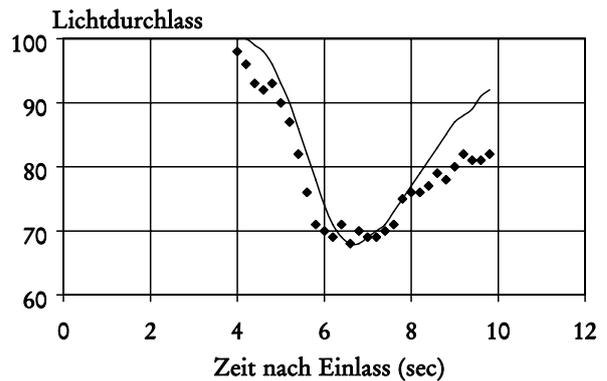


Abb. 4a: Lichtabsorption in Funktion der Zeit auf 40 cm Höhe; Datenpunkte werden gefittet unter der Annahme, dass der Blasenradius beim Austritt aus der Fritte $r = 0,02 \text{ cm}$, seine Standardabweichung $\Delta = 0,0016 \text{ cm}$ und die Transferkonstante $T = 0,0007 \text{ cm/sec}$ beträgt.

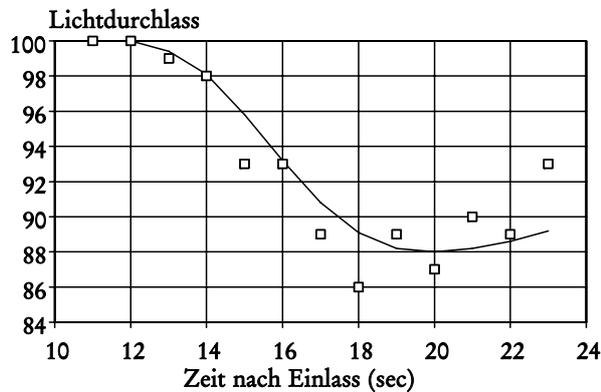


Abb. 4b: Lichtabsorption in Funktion der Zeit auf 80 cm Höhe; Datenpunkte werden gefittet unter der Annahme, dass der Blasenradius beim Austritt aus der Fritte $r = 0,02$ cm, seine Standardabweichung $\Delta = 0,0016$ cm und die Transferkonstante $T = 0,0007$ cm/sec beträgt.

Die in den Abbildungen 4a und 4b aufgetragenen Daten zeigen zunächst, dass die Geschwindigkeit der Blasen mit der Höhe abnimmt: Für die doppelte Distanz (80 cm gegen 40 cm) wird die dreifache Zeit benötigt (20 gegen 6,5 sec). Außerdem ist die ursprüngliche Pulsform, ein Rechteck mit einer Breite von 1 sec, erheblich verbreitert. Das legt den Schluss nahe, dass beim Austritt aus der Fritte nicht alle Blasen dieselbe Größe aufweisen.

Um die Daten an einen das Modell beschreibenden Ausdruck zu fitten, wurde deshalb angenommen, der Blasenradius sei nach Gauss verteilt, also

$$G(r_0) = \text{const} * \exp(-((r_0 - r_{0m})^2 / \Delta r_0)$$

Hier ist r_{0m} der mittlere Radius und Δr_0 die Standardabweichung. Dann wurde für jede dieser Blasen mit Radius r_0 die Ankunftszeit berechnet. Die Lichtabsorption ist proportional der Auftretenswahrscheinlichkeit $G(r_0)$ und lässt sich, nach Auflösung von Gleichung (15) nach t für festes h_0 , als Funktion der Zeit ausdrücken. Daraus können die im Modell durch den Lichtstrahl wandernden Blasen abgezählt und mit den effektiv gemessenen verglichen werden. Durch Variation von r_0 , Δr_0 und T wurde der bestmögliche Fit für den Beobachtungsposten auf 40 cm Höhe gefunden und in die Abbildung 4a eingetragen. Es zeigt sich, dass auch die Daten am Beobachtungsposten auf 80 cm Höhe mit den gleichen Parametern, wenn auch mit etwas größerer Abweichung, beschrieben werden können. Damit ist das Modell widerspruchsfrei. Auf Grund der bestimm-

ten Parameter ($r_0 = 0,0192$ cm, $\Delta r_0 = 0,0016$ cm und $T = 6 * 10^{-4}$ cm/sec) ist die Maximalhöhe für die „Durchschnittsblase“ 98 cm. Damit im Einklang steht die Beobachtung auf der Höhe von 120 cm, die nur eine marginale, nicht auswertbare Lichtabsorption zeigte. Die Transferkonstante hängt also nicht von der Geschwindigkeit der Blase ab. Ebenso ist die so bestimmte mittlere Blasengröße von ca. 0,02 cm im Einklang mit dem Radius der Löcher (1 Mikron) in der Fritte, wie GRASSMANN et al. (1997) ihn abschätzen.

$$R_{\text{Blase}} = \text{const} * R_{\text{Fritte}}^{1/3}, \text{const} = 200, \text{wenn } R \text{ in Mikrons. (16)}$$

Die Modellkurven weichen in einigen Belangen von den Daten ab:

1. Die Unregelmäßigkeit des Blasenaustritts führt zu einer gewissen Streuung, die das Modell nicht berücksichtigt.
2. Die Verbreiterung des Impulses entspricht nicht genau einer Gauss'schen Verteilung: Es ist etwas Asymmetrie vorhanden, was darauf hinweist, dass die Verteilung der Blasengröße ein Moment dritter Ordnung aufweist.
3. Auch recht lange nach dem Schließen des Ventils, das den Impuls beenden soll, steigen noch einige Blasen auf, die an der Fritte hafteten.

Beschickt man einen O_2 -freien Modellwein mit Sauerstoff, so bleibt der Eintrag auf das Volumen beschränkt, das durch die Blasen bestrichen wird. In diesem Bereich ist einerseits dm/dt proportional F (Gleichung 10), andererseits ist die Aufenthaltsdauer der Blase dt in einem Volumenelement nach Stokes umgekehrt proportional zu r^2 , also zu F . Daraus folgt, dass der Eintrag von Sauerstoff im bestrichenen Bereich homogen ist. Während im Fall von Sauerstoffzufuhr eine wohlumschriebene Zone in Zylinderform gleichmäßig beschickt wird, ist im Falle von Luftzufuhr die Beschickung bei der Fritte am größten und erstreckt sich bis an die Oberfläche, wo sowohl Sauerstoff wie Stickstoff austritt (Abb. 5a). Nach Beendigung des Eintrags diffundiert Sauerstoff aus den beschickten Zonen, so wie in Abbildung 5b dargestellt.

Der Weg, den ein Sauerstoffmolekül in der Zeit t zurücklegt, beträgt dabei $\text{Weg} = (2 * D * t)^{0.5}$. Das ergibt mit der Diffusionskonstante von $2 * 10^{-5}$ cm²/sec einen Weg von $2 * 10^{-5}$ cm in der ersten Sekunde, $2 * 10^{-4}$ cm nach 100 Sekunden, $2 * 10^{-3}$ cm nach 10.000 Sekunden und so weiter. Diffusion reicht nicht, um in einem Fass bei einer punktförmigen Sauerstoffzufuhr den im Wein gelösten Sauerstoff homogen zu verteilen.

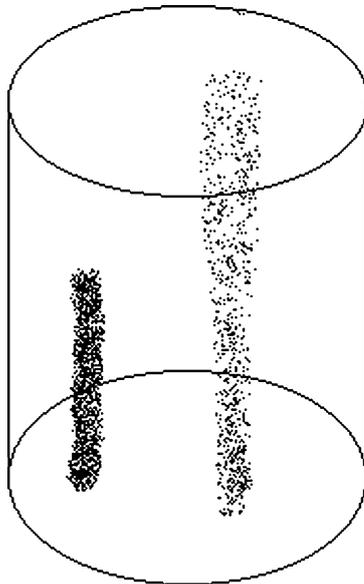


Abb. 5a: Sauerstoffeintrag
Links: reiner Sauerstoff; rechts atmosphärischer Sauerstoff (80 % Stickstoff)

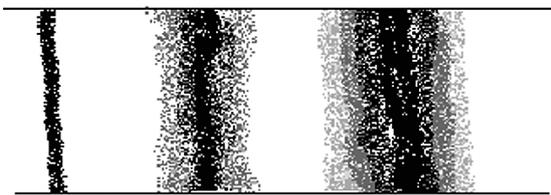


Abb. 5b: Diffusion des Sauerstoffs aus der Zone des Eintrags gleich nach Beendigung der Belüftung mit O₂

Aromasubstanzen sind ebenfalls am Transport beteiligt. Während im Falle von Sauerstoffzufuhr lediglich ein Transport innerhalb des Weins stattfindet, der sich mit der Zeit wieder ausgleicht, findet im Falle von Luftzufuhr ein Transport in die Atmosphäre statt (Abbildung 5c), den es zu beachten gilt.

Enthält der Modellwein CO₂, so findet gleichzeitig ein Austausch von O₂ und CO₂ statt. Der Eintritt von CO₂ in die Blase kann bewirken, dass sie bis zum Austritt aus der Oberfläche erhalten bleibt. Das hat für die Beschickung mit O₂ einen gewissen Einfluss. Die Berechnungsgrundlagen für den gekoppelten Gasaustausch sind dieselben wie für den Gasaustausch von

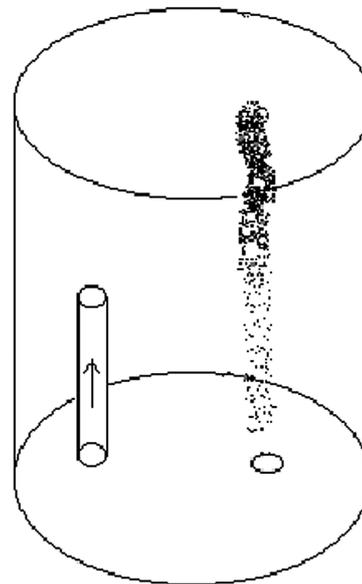


Abbildung 5c: Aromatransport
Links: Bei reiner O₂-Zufuhr wird Aroma innerhalb der O₂-Zone transportiert, das Aroma bleibt im Wein. Rechts: Bei Luftzufuhr entweicht ein Teil des Aromas.

O₂, führen aber zu Systemen von Differenzialgleichungen, die besser numerisch gelöst werden.

Blasendynamik bei CO₂-haltigem Modellwein

Bei Belüftung eines CO₂-haltigen Mediums wird die Abnahme des Blasenradius durch Aufnahme von CO₂ verzögert. Ist S die Masse O₂ in der Blase und C diejenige von CO₂, beide in Mol, so gilt

$$dS/dt = -F \cdot T_s \cdot S/V, \quad (17)$$

$$dC/dt = -F \cdot T_c \cdot (C - C_\infty)/V \quad (18)$$

$$V = (S + C) \cdot \text{Molvolumen}. \quad (19)$$

Hier sind T die Transferkonstanten und V das Blasenvolumen. Die Lösung der Gleichung erfolgt numerisch. Die Größe der Blasen auf verschiedenen Steighöhen ist in Tabelle 1 eingetragen.

Daraus folgt, dass in einer Fasshöhe von 1 m bereits bei einem CO₂-Gehalt von 0,25 g/l Sauerstoff verloren geht, während in einem 4 m hohen Fass bis 0,5g/l kein Verlust entsteht. Das wird in Abbildung 6 noch weiter detailliert.

Tabelle 1:
Blasengröße in 1 m und 4 m Höhe bei Sauerstoffzufuhr in CO₂-haltigen Wein mit Fritte als Funktion des CO₂-Gehaltes (Blasengröße beim Austritt aus der Fritte: 0,02 cm)

CO ₂ -Gehalt	Höhe 1 m	Höhe 4 m
g/l	cm	cm
0	0	0
0,25	0,13	0
0,5	0,17	0
0,75	0,21	0,11
1	0,27	0,24
1,25	0,35	0,26
1,5	0,43	0,26

Stofftransport durch aufsteigende Blasen, Luft

Es ist aus praktischen Gründen nahe liegend, den Wein mit atmosphärischem Sauerstoff, also mit einem Sauerstoff-Stickstoffgemisch zu belüften, da chemische Reaktionen des Stickstoffs im Wein zu vernachlässigen sind. Ein erheblicher Unterschied besteht jedoch: Das Volumen der Blasen, die einen Teil ihres Sauerstoffs an den Wein abgeben, sinkt höchstens bis auf etwa 80 % des Anfangsvolumens, der Radius sinkt entsprechend dem Partialdruck p von N₂ um etwa $1 - p(N_2)^{0,33} = 7\%$. Kommen die Blasen beim Aufstieg ins Gleichgewicht mit dem viel größeren Fassvolumen, so enthalten sie möglicherweise fast keinen Sauerstoff mehr, wohl aber Stickstoff.

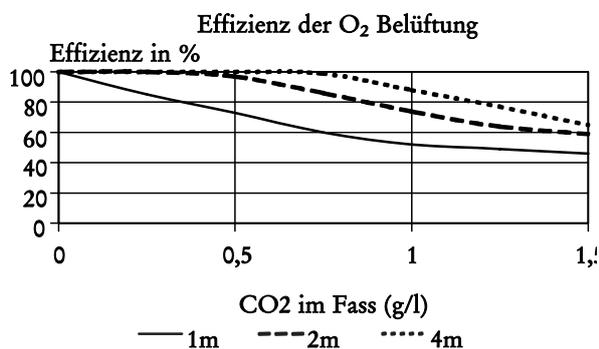


Abb. 6: Menge Sauerstoff, die im Fass bleibt, in Abhängigkeit vom CO₂-Gehalt im Fass und dessen Höhe

Da r , und damit die Stokes'sche Geschwindigkeit, annähernd konstant bleibt, erreicht die Blase die Oberfläche des Weins in der Zeit $t = h/v = h/S * r^2$. Auf Grund der Gleichungen (7) und (8) und unter Berücksichtigung, dass das Verhältnis von Blasenoberfläche zu Volumen $F/v_g = 3/r$ beträgt, errechnet sich die Sauerstoffkonzentration in der Blase an der Stelle h zu

$$g(h) = (g(0) - g_\infty) * \exp(-3 T h / (S * r^3)) + g_\infty \quad (20)$$

Der Betrag, den sie in die Atmosphäre hinausträgt, beträgt demnach

$$g(0) - g(h) = (g_\infty - g(0)) * (1 - \exp(-3 T h / (S * r^3))) \quad (21)$$

Während der kurzen Aufstiegsdauer der Blase bleibt die O₂-Konzentration im Fass konstant, und es gilt mit Gleichung 4 für $v_g \ll v_f$,

$$g_\infty = f * H \quad (22)$$

Die dem Wein zugeführte Menge Sauerstoff ist zu multiplizieren mit der Anzahl der erzeugten Blasen pro Sekunde und deren Volumen. Daraus folgt

$$dm/dt = -dN/dt * v_g * (f * H - g) * (1 - \exp(-3 T h / (S * r^3))) \quad (23)$$

Da die aus der Fritte austretende Gasmenge pro Sekunde, also der Fluss,

$$\Delta = dN/dt * v_g \quad (24)$$

beträgt, so wird nach Division von Gleichung (23) durch das Fassvolumen Vol,

$$df/dt = (\Delta * H * (1 - \exp(-3 T h / (S * r^3))) / Vol) * (f(t) - g/H) \quad (25)$$

Daraus folgt im Vergleich mit Gleichung (8), dass die Zeitkonstante für die Fassbelüftung

$$\alpha_{O_2} = \Delta * H * (1 - \exp(-3 T h / (S * r^3))) / Vol \quad (26)$$

wird und die Gleichgewichtskonzentration

$$f_\infty = g/H \quad (27)$$

Aus der Zeitkonstante berechnet sich die Halbwertszeit, also die Zeit, in der die Flüssigkeit im Fass zur Hälfte gesättigt ist, falls kein O₂ verbraucht wird, gemäß

$$t_{1/2} = \ln 2 / \alpha = 0,69 / \alpha \quad (28)$$

Falls die Zufuhr so langsam erfolgt, dass infolge Verbrauch die Konzentration weit unterhalb der Sättigung bleibt, so wird während der Zeit $t_0 = 1/\alpha$ die Menge Sauerstoff zugeführt, die einer einmaligen Sättigung, also 8 mg/l entspricht.

Nebeneffekt der Belüftung: Aromaverlust

Belüftung mit reinem Sauerstoff

Eine Sauerstoffblase, die am Fassboden in einen sauerstofffreien Wein oder Modellwein eintritt, verliert auf ihrem Weg Richtung Oberfläche dauernd an Sauerstoff und damit an Volumen. Ist das Fass höher als der in Gleichung (15) gegebene Ausdruck, so verschwindet die Blase vollständig und kann damit kein Aroma austragen. Bei Belüftung mit reinem Sauerstoff kann Aromaverlust vermieden werden, wenn der CO_2 -Gehalt niedrig und das Fass hoch ist. Wird mit reinem Sauerstoff ein CO_2 -haltiger Modellwein belüftet, so ändert sich der Radius der Blase mit dem Abstand zur Fritte. Ein Maß für den Aromaaustrag ist der Radius der Blase an der Oberfläche. Die Berechnung ist einfach, wenn, wie im Falle von Luftzufuhr, der Radius nahezu konstant bleibt.

Belüftung mit Sauerstoff aus der Luft

Der Austrag von Aromen berechnet sich in analoger Weise wie die Aufnahme von Sauerstoff bei Belüftung. Ist a der Aromagehalt der Blase, so gilt analog Gleichung (20), aber mit $a(0) = 0$

$$a(h) = a_\infty * (1 - \exp(-3 T_a h / (S * r^3))) \quad (29)$$

Das dem Fass entzogene Aroma beträgt, da der Term $f_a(\infty) = 0$ ist,

$$df_a/dt = (\Delta * H_a * (1 - \exp(-3 T_a h / (S * r^3))) / \text{Vol}) * f_a(t) \quad (30)$$

woraus folgt, dass die Zeitkonstante für Aromaentzug

$$\alpha_a = (\Delta * H_a * (1 - \exp(-3 T_a h / (S * r^3))) / \text{Vol}) \quad (31)$$

formell der Zeitkonstante für Belüftung nach Gleichung (26) entspricht.

Eine Grobabschätzung des Aromaerhalts nach Belüftung ergibt sich unter folgenden Voraussetzungen:

1. Die Belüftungsdauer sei = t_0 , es sollen also, so wie im Zusammenhang mit Gleichung (28) erläutert, 8 mg/l O_2 durch das Fass geblasen werden.
2. Sowohl die Henrykonstante des Aromas wie auch dessen Transferrate sind gleich den entsprechenden Werten für O_2 . Dann wird $(\alpha_a / \alpha_0) = 1$ und $f_a = \exp(-1) = 0,37$. Für diesen Normfall (aber nicht Normalfall) gehen 63 % des Aromas verloren. Für den allgemeinen Fall gilt

$$f_a = \exp(-\alpha_a / \alpha_0) \quad (32)$$

wo (α_a / α_0) aus den Gleichungen (26) und (31) errechnet wird.

Aus der Vielzahl von Aromagehalten, die im Wein bestimmt wurden (GUTH, 1997; FERREIRA et al., 2000), gibt es nur wenige, deren Henrykonstanten bekannt sind. Die Henrykonstante ist gleich dem Produkt aus der Aktivität des Gases bei unendlicher Verdünnung (GMEHLING et al., 1994) und dem Sättigungsdampfdruck bei der Arbeitstemperatur (GRASSMANN et al., 1997; LEAHY et al., 1984). Aus dieser Literatur gewonnene Werte sind für einige Aromen in der zweitletzten Kolonne der Tabelle 2 angegeben.

Die Transferkonstanten sind nicht bekannt, lassen sich aber durch die Zweifilm-Theorie (SATTLER, 2001) und durch den Vergleich mit den hier für Sauerstoff gemessenen Konstanten abschätzen. Die Transferkonstante hängt linear von der Diffusionskonstante in der Flüssigkeit ab, die wiederum umgekehrt proportional der Wurzel aus dem Molekulargewicht ist. Aus $T(\text{O}_2) = 6 * 10^{-4}$ ergeben sich nach Korrektur mit dem Molekulargewicht $M^{-1/2}$ die Werte für die Aromen, die in der letzten Kolonne eingetragen sind.

Die Aromaerhaltung bei Belüftung wurde auf Grund der „Normaldauer“ t_0 berechnet, während der dem Wein 8 mg/l Sauerstoff zugeführt wurden. Bereits bei einer einmaligen Sättigung des Modellweins mit Luft (erste beiden Kolonnen) treten merkbare Aromaverluste auf. Der Blasenradius (0,2 oder 0,4 mm) ist von sekundärer Bedeutung. Werden 40 mg/l Sauerstoff zugefügt (Kolonnen 3 und 4), so sinkt der Grad der Aromaerhaltung meist unter 50 %, was umso bedenklicher ist, als der Hauptanteil vom eher unerwünschten Isoamyl-Alkohol geliefert wird.

Bei Belüftung mit reinem Sauerstoff in CO_2 -haltigem Modellwein gehen ebenfalls Aromen verloren. Bei einer CO_2 -Konzentration von 1g/l im Fass ist der Radius der austretenden Blase vergleichbar mit r_0 . Dann lässt sich Tabelle 2 verwenden: Der Eintrag 8 mg/l bedeutet

Tabelle 2:

Aromaerhalt in Prozent nach Zufuhr von atmosphärischem Sauerstoff oder, alternativ, nach Gärung und biologischem Säureabbau (BSA) bei einer Fasshöhe von 4 m

Aroma-Komponenten	Zufuhr von Luft aus Fritte				Gärung		BSA		Henry-konst.	Transfer-konst.
	O ₂ mg/l	8	8	40	40					
Blase mm	0,2	0,4	0,2	0,4	2	4	0,8	2		
Ethylacetat	84	84	75	48	18	81	60	97	10	5,0E-04
Isoamylalkohol	99	99	99	97	94	99	98	100	0,51	3,6E-04
Ethylhexanoat	59	57	26	10	1	55	23	83	50	2,8E-04
Ethyl octanoat	0	0	0	0	0	0	0	7	789	2,5E-04
Linalol	87	86	69	54	27	85	67	95	14	2,7E-04
Beta-Ionon	70	67	36	20	4	67	37	88	39	2,4E-04

dann infolge der fünffachen Konzentration eine effektive Zufuhr von 40 mg/l Sauerstoff. Der dabei entstehende Aromaverlust ist eher tolerierbar.

Alkoholische Gärung und biologischer Säureabbau (BSA)

Bei beiden Prozessen entsteht CO₂, das sich bis zur Sättigung im Wein löst, bei weiterer Produktion von CO₂ bilden sich Blasen. Analoge Vorgänge wurden bei der Erzeugung von Wasserdampfblasen oberhalb des Siedepunkts von Wasser untersucht: Blasen entstehen erst bei einem Dampfdruck von 1,35 bar, entsprechend einer Übertemperatur von 8 °C. Der Grund dafür ist der durch die Krümmung der Oberfläche reduzierte Dampfdruck der Blase, welcher der Oberflächenspannung beim Siedepunkt nicht standhält. Die Blase hat bei ihrer Entstehung eine Mindestgröße von ca. 10 Mikron und wächst sehr rasch an, da ja die Umgebung eine überkritische Konzentration aufweist. Auf Grund der Schwerkraft löst sie sich innerhalb von Sekunden vom Keim ab und steigt an die Oberfläche. Da die Oberflächenspannung von Wein bei 20 °C nicht sehr von derjenigen in Wasser bei 100 °C verschieden ist, spielt sich Blasenbildung im Wein ähnlich ab. Es ist also davon auszugehen, dass CO₂-Blasen sich explosionsartig bilden und, sobald sie den Ablöse-Radius in der Größenordnung von Millimetern erreicht haben, zur Oberfläche aufsteigen. Das auf ihrem Weg zur Oberfläche aufgenommene Aroma berechnet sich dem-

nach näherungsweise aus der Gleichung (32). Für einen CO₂-Gesamtdurchfluss vom 50-fachen Fassvolumen ergibt sich ein Bruttoverlust von 75 % bei r = 2 mm und 44 % bei r = 4 mm. Die recht großen Blasen können bei sehr grosser CO₂-Produktion, also bei stürmischer Gärung, auch Blasenketten bilden, deren Geschwindigkeit nach GRASSMANN (1997) lediglich 30 cm/sec beträgt, deren Oberfläche aber im Vergleich zu Einzelblasen stark reduziert ist. Dieser Fall vermindert den Aromaverlust, entzieht sich aber der Berechnung.

Der Aromaerhalt ist für die alkoholische Gärung und den biologischen Säureabbau ebenfalls in Tabelle 2 eingetragen.

Der so abgeschätzte Verlust in der Größenordnung von 40 % bei der Gärung stimmt mit dem Aromaverlust überein, der von MIRANDE (1993) festgestellt wurde. Solche Verluste fallen für die sensorische Bewertung des abgefüllten Weines nicht sehr ins Gewicht: Zwar werden die ausgetriebenen Gäraromen nicht wieder ersetzt, aber die hauptsächlich für das Rotweinaroma verantwortlichen Aromaverbindungen entstehen erst während des Ausbaus. Im Most schon vorhandene Primäraromen können durch Nachlieferung aus Precursoren wieder ersetzt werden. Dies scheint insbesondere für Ethyl octanoat der Fall zu sein, das durch die Gärung ausgewaschen wird, aber im Wein vorkommt (WÜRDIG und WOLLER, 1989).

Der biologische Säureabbau hat infolge der schwachen Blasenentwicklung keinen direkten Einfluss auf den

Aromaverlust. Da sie aber den Wein mit CO₂ sättigt, vermehrt sich der Aromaverlust bei Sauerstoffzufuhr während oder nach dem BSA, wie in Tabelle 1 angegeben.

Einfluss von Makromolekülen auf die Transferkonstanten

Aromabindende Makromoleküle beeinflussen den Gasaustausch. Stehen die Makromoleküle mit Konzentration c_M mit den Aromen im Gleichgewicht, so wird die Henrykonstante um den Faktor $1+c_M \cdot K_M$ herabgesetzt, wo K_M die Bindungskonstante nach dem Massenwirkungsgesetz ist. (HARRISON and HILLS, 1997). Sind die Reaktionszeiten jedoch lang, so wird das System bestehend aus Head Space, gelöstem Gas und Makromolekül durch gekoppelte Differenzialgleichungen beschrieben. Die effektiven für den Wein massgebenden Transferkonstanten sind von den Reaktionspartnern abhängig und im Allgemeinen kleiner als die für Modellwein bestimmten Daten. Dafür gibt es auch experimentelle Evidenz (LUBBERS et al., 1994). Die Reduktion der Transferkonstanten hat einen Einfluss auf die Belüftung (Tab. 3).

Stark geruchswirksame Aromen sind häufig wenig wasserlöslich und haben demgemäß hohe Henrykonstanten, etwa im Bereich von 10 bis 50. Liegt ihre Transferkonstante im Bereich der Trägergase, O₂, CO₂ und N₂, also bei $5 \cdot 10^{-4}$, so sind sie sehr anfällig für Verlust durch Manipulationen. Aufgrund von Harrisons Mo-

dell (HARRISON and HILLS, 1997) und gestützt auf die Erfahrung ist davon auszugehen, dass der Transfer durch Makromoleküle gebremst wird. In der Tat wird der Aromaverlust durch eine Reduktion des Transfers um eine Größenordnung auf 10 bis 20 % beschränkt. Dies gilt für eine einmalige Sättigung mit Sauerstoff aus Luft.

Technik der Belüftung

Ist eine Sauerstoffschönung vorgesehen, so richtet sich die Zufuhr nach dem vorab bestimmten Verbrauch. Die zur Messung des Sauerstoffverbrauchs benützten Druckflaschen sind für den Gebrauch für Abwasser bestimmt. Dort wird eine mit der Atmosphäre im Gleichgewicht stehende Probe mit atmosphärischer Luft überschichtet. Damit ergibt sich für den Stofftransport zwischen der Trägerflüssigkeit, Wasser und der überschichteten Luft die Bilanz 0. Lediglich der Verbrauch durch die Belastung wird registriert. Wein steht nicht im Gleichgewicht mit der Atmosphäre: Sein CO₂-Gehalt ist um Größenordnungen überhöht, während sein Sauerstoffgehalt nahezu verschwindet. Zum Zwecke der Messung ist die Probe vorab mit der geplanten Überschichtung ins Gleichgewicht zu bringen. Wird etwa CO₂ mit N₂ ausgetrieben, so fehlt dem Wein nachher auch O₂, während er mit N₂ von 1 bar Druck gesättigt ist. Das bedingt Korrekturen der Ablesung. Die physikalische Art des Austreibens, Kochen, kommt

Tabelle 3:

Aromaerhalt in % bei Luftzufuhr im Ausmaß von 8 mg/l in Abhängigkeit von der Henrykonstante und der Transferkonstante (Fasshöhe 4 m, Blasenradius 0,02 cm)

Henry- konstante	Transferkonstante (cm/sec)					
	2,00E-05	5,00E-05	1,00E-04	2,00E-04	5,00E-04	1,00E-03
4	99	97	94	92	89	89
8	97	94	89	84	80	79
12	96	90	84	77	71	71
16	94	87	79	71	64	63
20	93	85	75	65	57	56
24	91	82	71	60	51	50
28	90	79	57	55	46	44
32	89	76	63	50	41	40
36	88	74	60	46	36	35
40	86	71	56	42	33	31

wegen der Veränderung der Tannine im reellen Wein nicht in Frage. Fehlt eine Messung, so kann als Grobabschätzung für eine kontinuierliche Zufuhr die Größenordnung von 40 mg/(Liter * Jahr) Sauerstoff dienen.

Wird mittels einer Fritte und reinem Sauerstoff belüftet, so ist auf Grund ihrer Kenndaten, wie Fluss und Blasengröße, ebenso auf Grund der Fasshöhe die Zufuhr zu bestimmen. Dies geschieht mit Hilfe der Gleichung (26) und der Abbildung 6. Zur Vermeidung von Verlusten beim Eintrag sollte der Blasenradius auf einem Minimum gehalten werden. Empfohlen ist nach jetziger Kenntnis der Aktivitäten von Aromen ein Verhältnis des Blasenradius zur Fasshöhe von $r^3/h < 4 \cdot 10^{-8}$, also etwa $r = 0,02$ cm für $h = 200$ cm. Bei Begasung mittels eines Silikonschlauchs fällt diese Einschränkung weg, andererseits ist dem Problem der möglicherweise ungenügenden Konvektion Beachtung zu schenken.

Silikonschläuche haben feinere Poren. Es ist ohne weiteres möglich, durch Einstellen des Drucks den Austritt von O₂ der Aufnahme durch den Wein anzupassen. Dann entsteht kein Verlust und auch kein Ausgasen von Aromen. Da dann die Beschickung mit Sauerstoff visuell nicht überprüft werden kann, ist für eine Kontrolle des Flusses mittels Flussmeter zu sorgen, und die Zufuhrleitungen sind auf Dichtheit zu überprüfen.

Im Bereich der Fritte oder des Silikonschlauchs können Sauerstoffkonzentrationen erzeugt werden, die natürlicherweise im Wein nicht vorkommen. Damit können auf Grund der Massenwirkung chemische Prozesse beschleunigt werden, die den Charakter des Weins auf unvorhersehbare Art verändern. Da die Diffusion mit Sicherheit den zugeführten Sauerstoff zu langsam verbreitet, ist es angezeigt, mit einem Rührwerk für angemessene Konvektion zu sorgen, es sei denn, die Unbedenklichkeit der lokal überhöhten Sauerstoffkonzentration ist erwiesen.

Während offener Umzüge, beim Pumpen und Filtern wird Sauerstoff aufgenommen, der zu einem Bruchteil der momentanen Sättigung des Weins führt. (RIBÉREAU-GAYON et al., 1998). Daraus folgt, dass während einer gewissen Zeit dem Wein eine Oberfläche zur Verfügung steht um Aromen abzugeben. Sei der Bruchteil 25 %, also 2 mg/l, so führt dies für die meisten Aromen zu einem Erhalt in der Größenordnung von 80 %. Nach Einbezug von Reservestoffen, die den Transfer bremsen (Tab. 3), dürfte der Erhalt erheblich über 90 % liegen, sodass der Aromaverlust durch nicht-exzessive Manipulationen im Allgemeinen vernachlässigt werden kann.

Nach jetzigen Kenntnissen ist eine Begasung mit Luft nicht zu empfehlen: Die Aromaverluste bei andauernder Begasung übersteigen jene bei kurzandauernden Manipulationen wie Pumpen und Umzug. Ein Versuch, das Problem mit Belüftung durch Silikonschläuche zu umgehen, scheiterte am ungenügenden Sauerstoffeintrag.

Diskussion

Die Wirkung von Gasen, die einem Modellwein zugefügt werden, hängt von der Zusammensetzung und der Blasengröße des Gases, vom CO₂-Gehalt des Modellweines und von der Fasshöhe ab. Lediglich reiner Sauerstoff in Form von Blasen mit einem Radius von höchstens 0,02 cm bleibt quantitativ im CO₂-freien Modellwein, und das nur, wenn das Fass mindestens 1 m hoch ist. In allen anderen Fällen treten Sauerstoff und andere Gase zum Teil wieder aus. Das Verhalten dieser Gase wird bestimmt durch ihre Henrykonstante, die den maximal möglichen Transfer zwischen Gas und gelöster Substanz bestimmt, und der Transferkonstante, die den Bruchteil an Gas berechnen lässt, der auf dem Weg von der Fritte zur Oberfläche tatsächlich transferiert wird. Damit ist eine Handhabe gegeben für eine quantitative und reproduzierbare Belüftung. Außerdem lässt sich auch die chemische Zusammensetzung der aus dem Modellwein austretenden Blasen bestimmen.

Für den Modellwein ist die Abluft ohne Bedeutung, wohl aber für den Wein: Es treten nicht nur O₂, CO₂, und N₂ aus, sondern die ganze Palette von im Wein gelösten Stoffen, also Aromen. Für einige wenige dieser Aromen sind die physikalischen Parameter bekannt und erlauben eine Voraussage über die Menge an Aroma, die von den vorbeiziehenden Blasen aufgenommen wird und in den Kopfraum des Fasses transportiert wird. Für den mit Aromen angereicherten Modellwein ergeben sich recht hohe Aromaverluste, welche die im Wein wahrscheinlichen entsprechenden Werte übersteigen: Im Gegensatz zum Modellwein enthält reeller Wein Makromoleküle, die in der Lage sind, andere gelöste Stoffe an sich zu binden. Dabei zeigt sich, dass für langsame Reaktionen zwischen Aroma und Makromolekül die effektive Transferrate um das Verhältnis von gebundenem zu freiem Aroma vermindert wird. Sind effektive Transferraten bekannt, so lässt sich der Aromaverlust von Wein für jede Manipulation voraussagen. Außerdem ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen den Transferraten von Modellwein und reellem Wein die Menge der relevanten Bindungspartner für

das entsprechende Aroma, ein Thema, das weitere Experimente voraussetzt.

Gärung treibt zwar eine große Menge Aromen aus, es scheint aber, dass im Rotwein ohnehin solche Aromen von Bedeutung sind, die im Gleichgewicht mit einem wasser- oder ethanollöslichen Precursor stehen. Nach der Entstehung des Buketts sind jedoch Lüftungen aromawirksam, und das erklärt die alte Keller-Regel, wonach Eingriffe möglichst in einem frühen Stadium erfolgen sollen. Bekanntlich verliert Wein auch bei der Abfüllung einen Teil des Buketts, was als offenbar heilbare ‚maladie de la bouteille‘ benannt wird. Außerdem zeigt in vielen Fällen ein mehrjähriger Wein mehr Aromen als ein Jungwein. Das erklärt auch, weshalb der Versuch, Aromen bei der Gärung abzufangen und dem Wein nachher zuzufügen, von beschränktem Erfolg gekrönt war: Die Reservestoffe erledigen diese Arbeit weitgehend und auf natürliche Weise.

Als optimale Vorstellung für Belüftung gilt die passive kontinuierliche Gaszufuhr im Barrique. Bei Stahlbehältern ist hingegen zu beachten, dass beim Monate dauernden Austritt von Gasen aus dem Wein nicht nur Aromastoffe, sondern auch deren Precursoren mit ausgetrieben werden, da sie während der langsamen Belüftung im Gleichgewicht mit ihren erzeugten Aromen bleiben. Um diesen Aromaverlust zu minimieren, ist es angezeigt, mit reinem Sauerstoff zu belüften und, insbesondere bei kleinen Behältern, eine Fritte zu wählen, die kleine Blasen erzeugt. Ebenso geeignet erscheinen Silikonschläuche, deren Installation aber etwas anspruchsvoller ist. Keine Imitation des Gasaustausches im Barrique durch Belüftung im Stahlfass ist jedoch perfekt. Insbesondere ist wegen des CO₂-Gehalts eine Bildung von austretenden Blasen bei Belüftung auch mit großer Sorgfalt kaum zu vermeiden. Umso wichtiger ist die Abschätzung der Belüftungseffizienz und des Aromaverlusts auf Grund der Kenntnis der Gasdynamik.

Danksagung

Für kompetente Hilfe bei den Experimenten danken wir FRANK MÄNNLE und FRITZ RUDNICKI.

Literatur

- BOULTON, R.B., SINGLETON, V.L., BISSON, L.F. and KUNKEE, R.E. (1995): Principles and practices of winemaking, p. 412. - New York: Chapman and Hall, 1995
- FERREIRA, V., ORTEGA, L., ESCUDERO, A. and CACHO, F. 2000: A comparative study of the ability of different solvents and absorbents to extract aroma compounds from alcoholic beverages. *J. Chromatogr. Sci.* 38: 469-476
- GÉTAZ, J. et FABRE, S. 1990: Mesure de l'absorption d'oxygène dans les moûts par la méthode D.B.O. *Revue Française Oenol.* (124): 21-26
- GMEHLING, J., MENKE, J. and SCHILLER, M. (1994): Activity coefficients at infinite dilution. Part 4. - Frankfurt a. M.: Dechema, 1994 (Dechema Chemistry Data Series, IX)
- GRASSMANN, P., WIDMER, F. und SINN, H. (1997): Einführung in die thermische Verfahrenstechnik, p 169. 3. Aufl. - Berlin: De Gruyter, 1997
- GRASSMANN, P. (1983): Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik. - Frankfurt: Salle, 1983
- GUTH, H. 1997: Quantitation and sensory studies of character impact odorants of different white wine varieties. *J. Agric. Food Chem.* 45: 3027-3032
- HARRISON, M. and HILLS, B.P. 1997. Mathematical model of flavor release from liquids containing aroma-binding macromolecules. *J. Agric. Food Chem.* 45: 1883-1890
- IOFFE, B.V., VITENBERG, A.G. and MANATOV, I.A. (1984): Head-space analysis and related methods in gas chromatography. - New York: Wiley, 1984
- LEAHY, M.M. and REINECCIUS, G.A. (1984): Comparison of methods for the analysis of volatile compounds from aqueous model systems. In: Schreier, P. (Ed.): Analysis of volatiles : New methods and their application. - Berlin: De Gruyter, 1984
- LUBBERS, S., CHARPENTIER, C., FEULLAT, M. and VOILLEY, A. 1994: Influence of yeast walls on the behavior of aroma compounds in a model wine. *Am. J. Enol. Vitic.* 45: 29-33
- MIRANDE, H. (1993): Piégeage aromatique fermentaire. Symp. Int. Connaissance Aromatique des Cépages et Qualité du vin. - Montpellier, 1993
- RIBA, J. P. 1990: L'oxygène en solution : solubilité et transfert. *Revue Française Oenol.* (124): 14-19
- RIBÉREAU-GAYON, P., GLORIES, Y., MAUJEAN, A. et DUBOURDIEU, D. (1998): *Traité d'œnologie. 2. Chimie du vin: Stabilisation et traitements.* - Paris: Dunod, 1998
- SÄTTLER, K. (2001): *Thermische Trennverfahren : Grundlagen, Auslegung, Apparate.* 3. Aufl. - Weinheim: VCH, 2001
- PEDERSEN, T. 2000: Oxygen absorption into moving water and tenside solutions. *Water Research* 34(9): 2569-2581
- WÜRDIG, G. und WOLLER, R. (1989): *Chemie des Weines.* - Stuttgart: Ulmer, 1989

Manuskript eingelangt am 26. Juli 2002