

Aufnahme von Sauerstoff

Konsequenzen für den Wein Jeder Winzer ist mit dem Einsatz von SO₂ vertraut. Er weiß die vorliegenden Gehalte zu interpretieren, um die Haltbarkeit seiner Weine sicherzustellen. Weniger sicher ist man sich in der Bewertung der Menge des vom Wein aufgenommenen Sauerstoffs und seiner Konsequenzen. Volker Schneider, Bingen, befasst sich mit Fragen des Sauerstoffmanagements vor allem im Bereich der oxidationssensiblen Weißweine und zeigt Zusammenhänge mit SO₂-Stabilität und Sensorik auf.

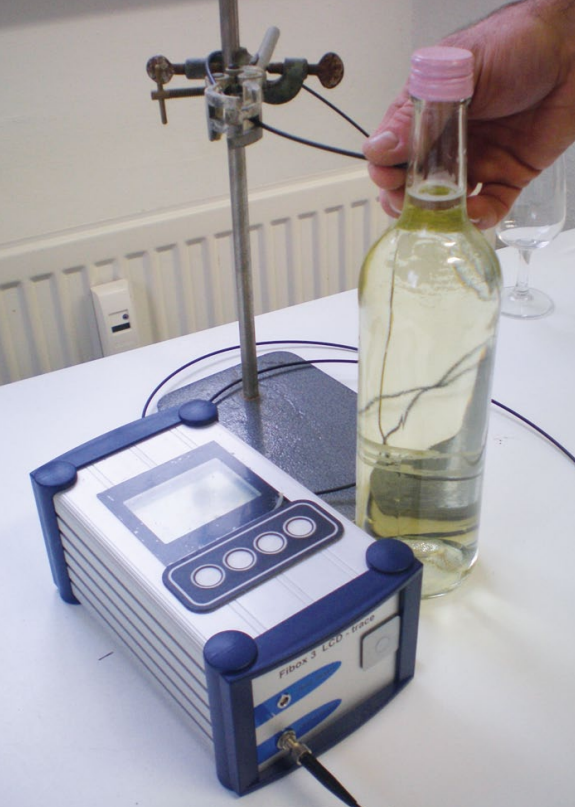


Foto: Volker Schneider

Abb. 1: Vorrichtung zur nicht-invasiven Bestimmung des Sauerstoffgehalts im abgefüllten Wein

Der Sauerstoff ist ein elementares Stilmittel in der Weinbereitung. Da er omnipräsent ist, kann er aber auch zu einem kritischen Faktor für die Haltbarkeit des Weins werden. In Abhängigkeit von seiner Menge sowie der Art und dem momentanen Zustand des Weins führt er zu den unterschiedlichsten Konsequenzen chemischer, mikrobiologischer und sensorischer Art. Ebenso unterschiedlich ist deren Bewertung unter dem Einfluss des Zeitgeistes, dem subjektiven Qualitätsempfinden und der vorherrschenden Lehrmeinung. Zwangsläufig hat sich das Sauerstoffmanagement längst zu einem eigenständigen Forschungsgebiet in der Oenologie mit höchst praktischen Folgen für die Kellertechnik entwickelt. Eine seiner wesentlichen Erkenntnisse besteht darin, dass der Sauerstoff nicht immer mit einer Oxidation gleichzusetzen ist.

Unterschiedliche Wirkungen von Sauerstoff

Bereits in den 70er Jahren hatte man sich intensiv mit den nachteiligen Folgen unkontrollierter Sauerstoffaufnahme bei der Abfüllung von Weißweinen beschäftigt. In den 1980er Jahren wurde die gezielte Mostoxidation entwickelt. Sie mündete in die Erkenntnis, dass die Oxidation von Most nichts mit der Oxidation von Wein zu tun hat und dieser sogar entgegenwirkt, weil oxidierbare phenolische Substanzen bereits vor der Gärung ausgefällt und abgetrennt werden. Die erhaltenen Weißweine sind frei von Gerbstoffen, während sich die befürchteten Aromaverluste auf Sauvignon blanc und wenige andere Rebsorten beschränken, bei denen flüchtige Thiol-Verbindungen eine signifikante Rolle in der Aromatik spielen.

Die 90er Jahre sahen die Entwicklung des gezielten Einsatzes von Sauerstoff zur Versorgung der Hefe während der Gärung. Die gärende Hefe verarbeitet den zugeführten Sauerstoff vollständig, sodass er zur Oxidation von Weininhaltsstoffen nicht mehr zur Verfügung steht. Innerhalb der Hefezellen wird der Sauerstoff zur Synthese von Überlebensfaktoren herangezogen, welche den Stofftransport durch die Zellmembran kontrollieren und die Endvergärung unter schwierigen Gärbedingungen sicherstellen oder zumindest verbessern.

Die 2000er Jahre verhalfen der Mikro-Oxygenierung von Rotwein zu einem weltweiten Durchbruch. Mittels dieser Technik werden tanninreichen Rotweinen über einen längeren Zeitraum genau definierte Mengen von Sauerstoff zugeführt mit dem Ziel einer chemischen Veränderung und geschmacklichen Verbesserung ihres Tannins. Damit soll im großtechnischen Maßstab die natürliche Sauerstoffaufnahme der Weine während ihrer Reifung in Holz imitiert werden. Dieser Vorgang kann nach der Abfüllung eine Fortsetzung finden, wenn über den Flaschenverschluss wesentliche Mengen zusätzlichen Sauerstoffs aufgenommen werden.

Sauerstoffzufuhr durch Flaschenverschlüsse

Ab dem Jahr 2010 erreichte die globale Diskussion über die ideale Sauerstoffzufuhr durch den Flaschenverschluss einen vorläufigen Höhepunkt. Sie ist auch vor dem Hintergrund eines Kampfes um Marktanteile zu sehen, in dem sich mächtige Unternehmen der Verschlussindustrie gegenüber stehen. Sie repräsentieren im Wesentlichen drei unter-

schiedliche Verschlussarten: Naturkork, synthetischer Kork und Schraubverschluss. Jede dieser Verschlussarten sah und sieht sich dem Vorwurf ausgesetzt, entweder zu viel oder zu wenig Sauerstoff dem Wein während der Flaschenlagerung zuzuführen. Zu viel Sauerstoff fördert den Verlust der Fruchtigkeit, während zu wenig Sauerstoff die Ausbildung von Reduktionsnoten beziehungsweise Lagerböckern begünstigt. Naturgemäß stehen dabei die redoxsensiblen Weißweine im Vordergrund.

In der Folge setzte das Bestreben ein, innerhalb einer Verschlussart unterschiedliche Produktlinien mit genau definierter Sauerstoffdurchlässigkeit zu schaffen. In direktem Zusammenhang damit steht auch die Frage, wie viel Sauerstoff der Wein bereits vor oder beim Abfüllen aufgenommen hat und welche Mengen sich aus dem Kopfraum dazu addieren. Der durch den Verschluss als solches eintretende Sauerstoff ist nur ein Baustein in dem komplexen Mosaik, welches als Sauerstoffbelastung oder auch Sauerstoffmanagement beschrieben wird.

Solange der Wein hefetribig ist, ist er vor einer Oxidation durch zutretenden Sauerstoff weitgehend geschützt. In den ersten Monaten nach der Gärung ist die in Schwebelage befindliche Hefe in der Lage, beachtliche Mengen an Sauerstoff zu konsumieren und ihn so der Reaktion mit Weininhaltsstoffen zu entziehen. Der in die Hefezelle aufgenommene Sauerstoff wird enzymatisch entsorgt, indem er zur Oxidation von Fettsäuren verwendet wird. Das Ausmaß dieses Effektes ist vom biochemischen Status der Hefe, ihrem Alter, ihrer Menge, der Lagerdauer des Weins und seinem Gehalt an freier SO₂ abhängig. Zunehmende Gehalte an

freier SO₂, besonders solche über 30 mg/l, mindern die Sauerstoffzehrung der Feinhefe im unfiltrierten Wein.

Filtrierte Weißweine sind oxidationsempfindlich

Die Problematik einer unzulässig hohen Sauerstoffaufnahme stellt sich in erster Linie nach der Filtration der oxidationssensiblen Weißweine. Im Gegensatz zu Rotweinen fehlen ihnen Tannine und Anthocyane, welche Sauerstoff schadlos zu binden vermögen. Die Aufnahme von Sauerstoff durch Weißweine führt naturgemäß zu einer Minderung ihres Gehaltes an schwefeliger Säure durch Oxidation zu Sulfat. In einer weiteren Phase stellt sich eine Minderung der gesuchten, fruchtig-floralen oder gar mineralischen Sortenaromatik ein, welche schließlich durch eine zunehmende Altersfirne überlagert werden kann.

Die durch Sauerstoff ausgelösten Alterungsvorgänge laufen auch in Weißweinen ab, welche durchaus normale bis leicht erhöhte Gehalte an freier SO₂ aufweisen. Daraus geht hervor, dass schwefelige Säure zutretenden Sauerstoff nicht spurlos zum Verschwinden bringt und nur teilweise vor Oxidation schützt. Der Verlust an Fruchtaroma bis hin zur Entwicklung von Altersfirne wird in erster Linie durch die Menge des nach der Filtration zutretenden Sauerstoffs, die Temperatur im Flaschenlager und die phenolische Zusammensetzung des einzelnen Weins kontrolliert.

Abbildung 2 zeigt am Beispiel sechs handelsüblicher, abgefüllter Weißweine, dass eine Zunahme der Sauerstoffbelastung von nur 10 mg/l O₂ die Fruchtaromatik erheblich beeinträchtigen kann, während 20 mg/l O₂ in allen Fällen absolut schädlich waren. Naturgemäß hängen die Differenzschwellenwerte von der Weinmatrix und der Vorgeschichte des Weins ab. Der Sauerstoff wurde in diesem Fall über einen variablen Kopfraum nach kurzfristigem Öffnen der Flaschen zudosiert. Die sensorische Auswertung erfolgte zwei Monate später, nachdem der zugesetzte Sauerstoff vollständig abreagiert, gebunden und verschwunden war.

Sauerstoffaufnahme durch verschiedene Werkstoffe

Im Behälterbau kommen Werkstoffe unterschiedlicher Gasdurchlässigkeit zum Einsatz. Damit kann dem variablen Sauerstoffbedarf der Weine bewusst Rechnung getragen werden. Häufiger sind jedoch die Fälle, in denen Behälter in Unkenntnis ihrer hohen Sauerstoffdurchlässigkeit allzu sorglos eingesetzt werden.

Holz in der Größe eines Barriques versorgt den darin enthaltenen Wein mit 10 bis 30 mg/l Sauerstoff pro Jahr. Absolut gasundurchlässige Materialien wie Stahl und Glas nehmen eine Extremposition ein, die sie zur sauerstofffreien Langzeitlagerung geeignet macht. Die verschiedenen Kunststoffe zeigen große Unterschiede in der Permeation von Sauerstoff,

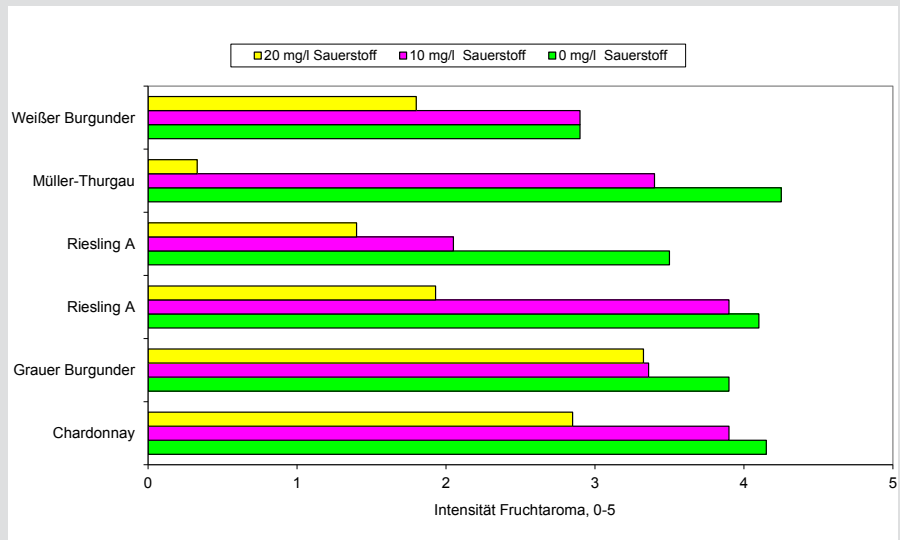


Abb. 2: Intensität (0 bis 5) des Fruchtaromas in Abhängigkeit von der Sauerstoffaufnahme (mg/l) in abgefüllten Weißweinen

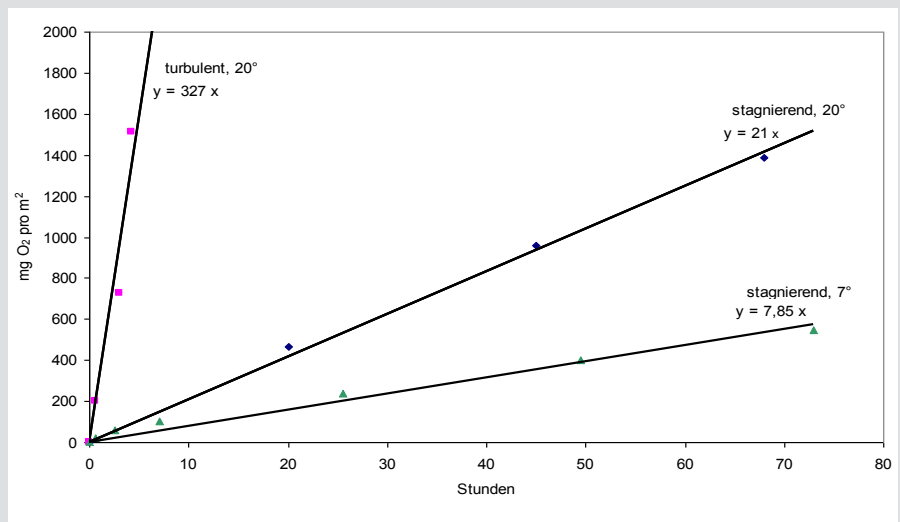


Abb. 3: Diffusion von atmosphärischem Sauerstoff über die stagnierende beziehungsweise turbulente Oberfläche einer weinähnlichen Modelllösung bei Normaldruck

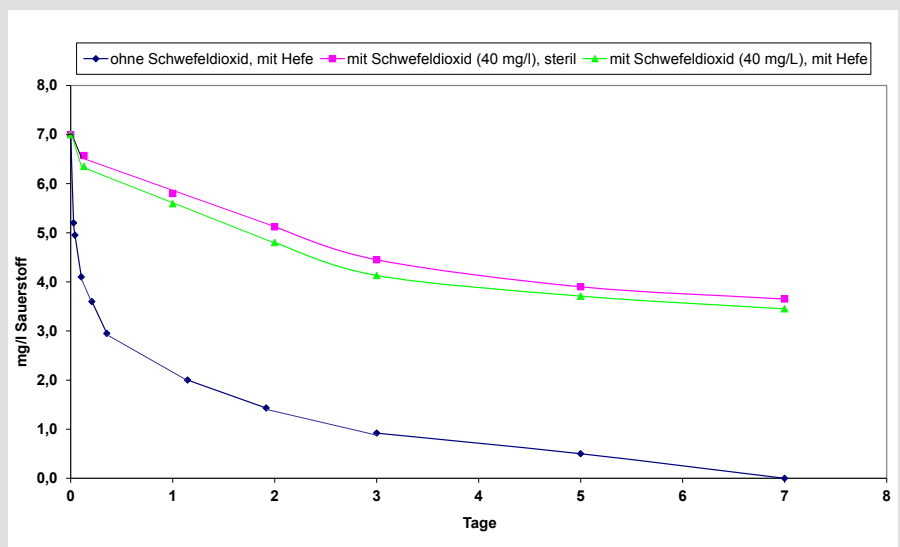


Abb. 4: Einfluss der Hefe auf den Abbau gelösten Sauerstoffs in Weißwein ohne Kopfraum

Tab. 1: Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Kunststoffe bei 20° C und 0 % rel. Feuchte

Kunststoffolie mit 100 µm Dicke	Sauerstoffdurchlässigkeit in cm ³ / (m ² · d · bar)
Polyethylen niedriger Dichte (LD-PE)	1 350,0
Polypropylen	628,0
Polyethylen hoher Dichte (HD-PE)	505,0
Polyvinylchlorid (PVC)	19,0
Polyethylenterephthalat (PET)	8,6
Polyvinylidenchlorid (PVDC)	1,4

wie in Tabelle 1 dargestellt ist. Hochgradig sauerstoffdurchlässig sind die diversen Polyethylene (PE), während der Gasdurchgang von Barrierekunststoffen wie PVDC um einen Faktor von 1 000 geringer ist.

Diese Verhältnisse werden in der Praxis oft nicht beachtet, wenn kleine Weinmengen in den weit verbreiteten Kunststoffbehältern aus weißem PE gelagert werden. Die hohe Sauerstoffdurchlässigkeit dieses Materials führt, in Verbindung mit den darin gelagerten beschränkten Mengen, besonders bei Weißweinen innerhalb kurzer Zeit zu Oxidationsschäden. Andererseits werden solche Behälter, aus HD-PE gefertigt und als Flextanks vermarktet, auch zur Reifung von Rotweinen durch gezielte Sauerstoffzufuhr eingesetzt. GFK-Tanks weisen, trotz ihres schlechten Rufs, nur einen geringen Sauerstoffdurchgang auf.

Ausschlaggebend für die Sauerstoffaufnahme ist in allen Fällen die Fläche der Tankwandung, durch die der Sauerstoff migriert, im Verhältnis zum Weinvolumen, auf das er einwirkt.

Sauerstoffaufnahme über die Oberfläche

Eine unkontrollierte Sauerstoffaufnahme ergibt sich häufig über die Weinoberfläche, die statischer oder turbulenter Natur sein kann. Statische Oberflächen liegen in nicht vollständig befüllten Gebinden vor. Werden solche gerührt, entsteht eine turbulente Oberfläche,

die ebenso beim Fließen des Weins durch schlecht entlüftete Leitungen, Filter oder Pumpen zu finden ist.

Bezogen auf Normaldruck, sind im Wein 9 mg/l O₂ bei 20° C und sogar 11 mg/l O₂ bei 10° C löslich. Obgleich ein Wein bei niedriger Temperatur mehr Sauerstoff in Lösung halten kann als bei hoher Temperatur, lässt sich daraus keine Information ableiten über die Geschwindigkeit, mit der er ihn aus der Atmosphäre aufnimmt. Über diese essentielle Größe ist in der Literatur nur eine vage Schätzung aus den 1930er Jahren zu finden.

Um das Ausmaß der Sauerstoffaufnahme über die Oberfläche exakt zu erfassen, wurde eine weinähnliche Modelllösung (12 % Ethanol, pH 3,5) durch Begasung mit Inertgas vom gelösten Sauerstoff befreit, mit 200 mg/l Ascorbinsäure versetzt und bei verschiedenen Temperaturen in Breithalsflaschen von einem Liter und einer definierten Flüssigkeitsoberfläche von 95 cm² gelagert. Zutretender Sauerstoff reagiert stöchiometrisch mit Ascorbinsäure und wird dabei gebunden analog zu den Verhältnissen im Wein. Aus der Abnahme der Ascorbinsäure über die Zeit kann so direkt auf die Menge des über die Oberfläche aufgenommenen Sauerstoffs (in mg O₂ / m² / h) umgerechnet werden. Abbildung 3 gibt die Ergebnisse wieder.

Vergleicht man die beiden bei 20° C gelagerten Varianten, ergibt sich für die ruhende Flüssigkeit eine Sauerstoffaufnahme von 21 mg O₂ / m² / h beziehungsweise 504 mg / m² / Tag. Erfährt die gleiche Lösung durch konstantes Rühren eine turbulente Oberfläche, erhöht sich dieser Wert um das annähernd Fünfeinfache auf 327 mg O₂ / m² / h. Naturgemäß variiert dieser Wert mit der Intensität der Turbulenz. Turbulente Oberflächen liegen in der Praxis nicht nur beim Rühren, sondern auch beim Fließen des Weins durch schlecht entlüftete Leitungen, Filter und Pumpen vor.

Tab. 2: Sauerstoffaufnahme aus der Atmosphäre über die Oberfläche der Flüssigkeit*

	20° C	7° C
ruhende Oberfläche	21	7,9
turbulente Oberfläche	~ 327	~ 950

* 12 % Ethanol, pH 3,5 in mg O₂ / m² · h

(~: Genauer Wert abhängig von der Intensität der Turbulenz)

Tab. 3: Berechnung der Gesamtmenge an Sauerstoff (TPO) in Flaschen unterschiedlicher Größe bei gleichem Kopfraum (15 ml) mit Luft und 3 mg/l O₂ im Wein gelöst

Nennvolumen der Flasche (ml)	375	750	1 000	1 500
Sauerstoff (mg O ₂) im Kopfraum bei 15 ml Kopfraum	2,20	2,20	2,20	2,20
Menge des im Weinvolumen gelösten Sauerstoffs bei 3,0 mg/l O ₂	1,13	2,25	3,00	4,50
Gesamtmenge (mg O ₂) an Sauerstoff in der Flasche (TPO)	3,33	4,45	5,20	6,70
Gesamtmenge an Sauerstoff umgerechnet auf mg/l	8,00	5,93	5,20	4,47

Einfluss der Temperatur

Auch der Einfluss der Temperatur ist erheblich. Die bessere Löslichkeit des Sauerstoffs bei niedrigen Temperaturen mag zu der leichtfertigen Annahme führen, dass unter diesen Bedingungen auch seine Diffusion aus der Atmosphäre in die Flüssigkeit zunimmt. Der Vergleich der Diffusion in die stagnierende Flüssigkeit bei jeweils 20° C und 7° C belegt das Gegenteil (Abb. 3): Bei 7° C mindert sich die Diffusionsgeschwindigkeit um das 2,7-fache von 21 auf nur 7,9 mg O₂ / m² / h. Dieses zunächst verblüffende Verhalten hat eine physikalische Erklärung.

Der Transport eines Gases ins Flüssigkeitsinnere erfolgt in zwei Stufen:

- Die Diffusion über die Oberfläche in die Flüssigkeitsoberfläche. Dieser Vorgang ist annähernd spontan, nur über eine kurze Strecke aktiv und bei gegebenem Druck abhängig von der Temperatur, der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, dem Sättigungsgrad des Gases in der Flüssigkeit sowie dem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen.

- Der Transport des Gases in das Innere der flüssigen Phase, seinerseits abhängig vom Stoffübergangswiderstand der Flüssigkeit und der Temperatur. Die treibende Kraft dabei ist die ständige Erneuerung der Grenzschicht. Diese kann durch Wärme Konvektion oder mechanisch herbeigeführte Turbulenz erfolgen. In beiden Fällen wird sauerstoffarmer Wein an die Oberfläche transportiert. Mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche wird dieser Faktor zum geschwindigkeitsbestimmenden Schritt.

Grundsätzlich nimmt die Diffusion eines Gases innerhalb der Flüssigkeit mit der Temperatur ab. Obwohl die theoretische Löslichkeit des Sauerstoffs im Wein in der Kälte besser ist, hemmt die Kälte seine Verteilung im ruhenden Wein und damit auch alle nachgelagerten Reaktionen der Oxidation. Kommt es jedoch zur Zusammenwirkung von Kälte und Turbulenz, erreicht die Sauerstoffaufnahme extreme Werte.

Die Werte für die Sauerstoffaufnahme über die Weinoberfläche sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Weinoberfläche ist von Bedeutung

Für den Praktiker ist wichtig, dass über nicht konsequent begefüllte Lagerbehälter unkontrolliert hohe Mengen an Sauerstoff in den Wein gelangen können. Sorgfalt und Qualität des Beifüllens ergeben sich keineswegs aus der Höhe des Kopfraums oder dem fehlenden Weinvolumen bis zum Überlaufen des Behälters, sondern ausschließlich aus der Größe der Oberfläche (in m²) und ihrem Verhältnis zum Weinvolumen (in Ltr.). Auf den Liter umgerechnet, werden kleine Gebinde durch das Vorliegen einer Oberfläche oder technische Behandlungsmaßnahmen ungleich stärker mit Sauerstoff belastet als solche größeren Weinvolumens. Konkret: Eine Oberfläche von

1 m² bei 10 hl belastet den Wein zehnmals stärker mit Sauerstoff als bei einem Weinvolumen von 100 hl. Ein weiter verbreiteter Einsatz von Inertgasen wäre wünschenswert.

Reaktionen des Sauerstoffs

Die Oxidation von Wein läuft in drei Phasen ab:

- Die Aufnahme von Sauerstoff aus der Atmosphäre sowie die Lösung und Verteilung dieses Gases im Wein bis zu einer maximal möglichen Konzentration von etwa 10 mg/l O₂ bei Normaldruck. Diese Menge entspricht der Sättigungskonzentration, das heißt, der Wein ist mit Sauerstoff gesättigt derart, dass er nicht mehr davon aufnehmen kann. Der Vorgang ist rein physikalischer Natur und wird durch die oben beschriebenen Parameter wie Oberfläche, Turbulenz, Temperatur und Druck kontrolliert. Der im Wein als Gas gelöste Sauerstoff kann gemessen werden.
- Im Zeitraum von einigen Tagen oder Wochen verbindet sich der gelöste Sauerstoff mit leicht oxidierbaren Weininhaltsstoffen wie Metallen und Phenolen. Der gebundene Sauerstoff ist verschwunden und messtechnisch nicht mehr zugänglich. In dem Maße, wie gelöster Sauerstoff gebunden wird, kann der Wein erneut Sauerstoff aufnehmen, sofern er mit Luft in Kontakt kommt. Der gemessene Sauerstoffgehalt ist nur ein momentaner Nettowert, der sich aus der Differenz zwischen aufgenommenem und zwischenzeitlich gebundener Menge ergibt.
- Bei der Bindung des Sauerstoffs an leicht oxidierbare Weinbestandteile entstehen Sauerstoffradikale und Peroxyde. Diese werden auf Inhaltsstoffe übertragen, welche nicht direkt mit Sauerstoff reagieren können. Erst sie führen zu den bekannten Folgen der Oxidation, wie sie sensorisch oder analytisch als SO₂-Verlust wahrnehmbar sind.

SO₂-Verluste durch Oxidation

Eine der entscheidenden Fragen vor der Abfüllung ist die nach dem idealen Gehalt an freier SO₂. Es ist allgemein bekannt, dass er sich nach der Abfüllung mehr oder weniger stark vermindert. Dieser Verlust an freier SO₂ erklärt sich durch ihre Oxidation zu Sulfat durch den im Wein vorliegenden Sauerstoff. Da freie SO₂ ein Bestandteil der Gesamtschwefeligen Säure ist, mindert sich letztere im gleichen Ausmaß. Das entstehende Sulfat scheidet aus der SO₂-Bilanz aus.

Natürgemäß kann eine solche Reaktion auch vor der Abfüllung ablaufen, wann immer Sauerstoff Zutritt. Sie ist oft mehr für die Instabilität der freien SO₂ verantwortlich als deren Bindung an Weininhaltsstoffe. Erst wenn der im Wein gelöste Sauerstoff vollständig verbraucht ist, kommt die Reaktion zum Stillstand. Ihre Geschwindigkeit unter den verschiedensten Bedingungen wurde daher näher untersucht.

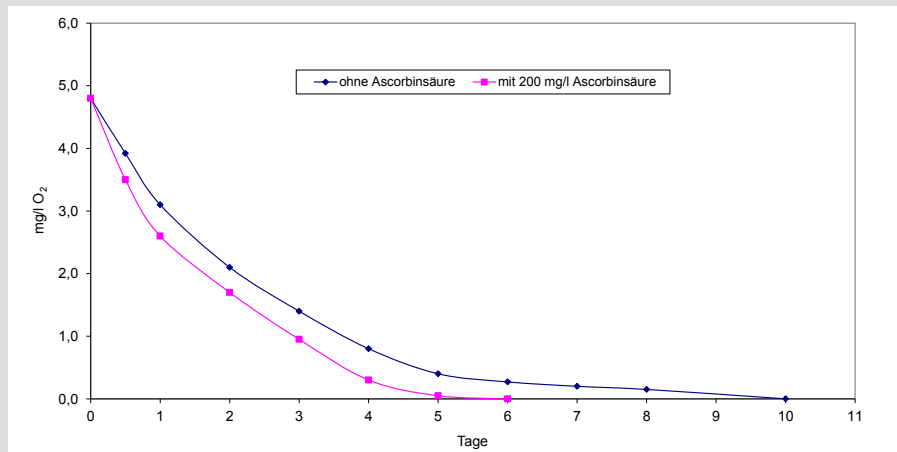


Abb. 5: Einfluss von Ascorbinsäure auf die Bindung gelösten Sauerstoffs in Weißwein ohne Kopfraum

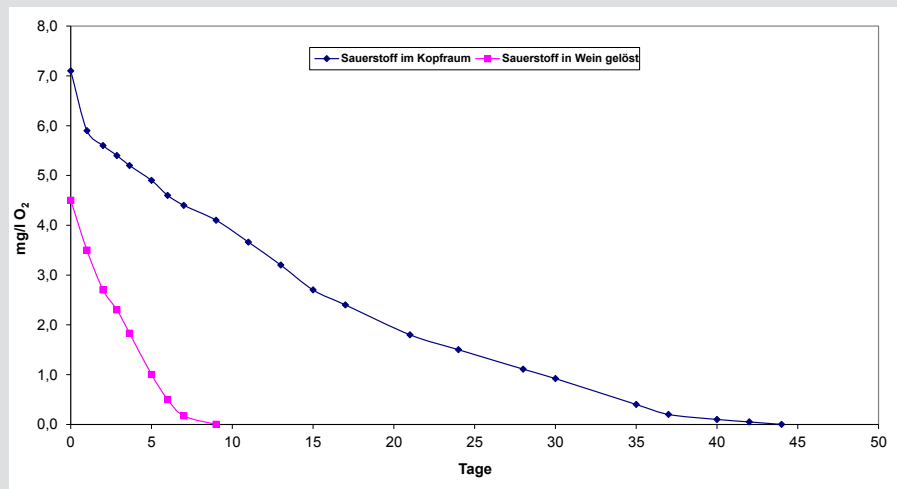


Abb. 6: Abbau des Sauerstoffs nach der Abfüllung eines handelsüblichen Weißweins, differenziert nach gelöstem Sauerstoff und Kopfraumsauerstoff

Wie schnell reagiert der Sauerstoff?

Die Messung des Sauerstoffgehalts in verschlossenen Flaschen erfolgte mittels Fluoreszenzmessung auf zerstörungsfreiem Wege. Dazu wird das Flascheninnere vor dem Befüllen mit sauerstoffsensitiven Sensoren in Form klebbarer Spots ausgestattet. Ein Spot wird im späteren Kopfraum der Flaschen angeklebt, der andere im Bereich der Flüssigkeit. Das eigentliche Messgerät bestrahlt die Sensorspots mittels eines Glasfaserkabels mit einem definierten Lichtstrahl von außen (Abb. 1). In Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt entsteht eine Lumineszenz, die gemessen und auf mg/l O₂ umgerechnet wird. Die Entwicklung dieser hoch sensiblen, nicht-invasiven Technik erlaubt erstmals die Bestimmung des im abgefüllten Wein vorliegenden Sauerstoffs, ohne dass die Werte durch Luftzutritt beim Öffnen der Flaschen verfälscht werden.

Abb. 4 zeigt den Verlauf der Sauerstoffbindung eines jungen Weißweins, der mit 7 mg/l O₂ versetzt und in drei verschiedenen Varianten ohne Kopfraum luftdicht verschlossen bei 20° C gelagert wurde. Im ungeschwefelten, noch he-

fetriben Jungwein kommt der Sauerstoff innerhalb einer Woche zum Verschwinden. Suspensierte Feinhefe im unfiltrierten Wein ist bekannt für ihre Fähigkeit, Sauerstoff zu binden und so der Reaktion mit Weininhaltsstoffen zu entziehen. Diese Reduktionskraft der Hefe kommt zum Erliegen, nachdem der Wein auf 40 mg/l freie SO₂ eingestellt wird. In diesem Fall ist die Umsetzung des gelösten Sauerstoffs nicht viel schneller als im steril filtrierten Wein.

Ascorbinsäure hat den Ruf eines Reduktionsmittels, welches gelösten Sauerstoff abfängt, zu Wasserstoffperoxyd reduziert und als solches auf SO₂ oder andere Weinbestandteile überträgt. Dabei oxidiert die Ascorbinsäure selbst zur wirkungslosen Dehydro-Ascorbinsäure. Abb. 5 illustriert am Beispiel eines handelsüblichen Weißweins nach Zusatz von 5 mg/l O₂, dass in Anwesenheit von Ascorbinsäure die Umsetzung des Sauerstoffs geringfügig beschleunigt und schneller zu Ende gebracht wird. Auf keinen Fall ist die Reaktion zwischen Ascorbinsäure und Sauerstoff spontan, noch kann sie aufgenommenen Sauerstoff schadlos zum Verschwinden bringen.

Ähnliches gilt für erhöhte Gehalte an Kupfer oder Eisen. Sie beschleunigen die Umsetzung gelösten Sauerstoffs, sofern solcher vorliegt. Ihre oft beschriebene Funktion als Katalysatoren der Oxidation büßen sie jedoch ein, wenn die Sauerstoffaufnahme begrenzt wird. Ohne Sauerstoff gibt es keine Oxidation. Das maximal mögliche Ausmaß der Oxidation wird allein durch die Menge des verfügbaren Sauerstoffs vorgegeben, während ihre Geschwindigkeit von der Weinzusammensetzung abhängt.

Sauerstoffaufnahme beim Abfüllen

Bevor die Weine auf die Flasche gelangen, enthalten sie bereits gelösten Sauerstoff, dessen Menge von der handwerklichen Fähigkeit zur schonenden Weinbehandlung im Keller abhängt. Eine Schwachstelle dabei ist die Filtration, denn alle Schläuche, Pumpen, Armaturen und Filter sind zu ihrem Beginn voll mit Luft. Große Oberflächen, turbulente Strömungen und Überdruck begünstigen die Sauerstoffaufnahme. Besonders zu Anfang, bevor das System entlüftet ist, ist sie beachtlich, um sich bei weiterem Fortgang der Filtration zu mindern.

Während des Abfüllprozesses nimmt der Wein weiteren Sauerstoff im Füllkessel und beim Einlaufen in die Flaschen auf. Diese Menge schwankt zwischen 0,5 und 5 mg/l O₂. Sie hängt von der eingesetzten Fülltechnik ab und kann durch Vorevakuierung und/oder Inertgasspülung der Flaschen erheblich reduziert werden. Nach dem Verschließen liegt noch ein variabler Kopfraum vor, der entweder aus Luft besteht und zu einem weiteren Sauerstoffeintrag führt oder durch Kopfraumspülung mit Inertgas mehr oder weniger stark von Sauerstoff befreit wurde.

Nicht zuletzt können ungeeignete Flaschenverschlüsse dem Wein während seiner gesamten Lagerdauer unzulässig hohe Sauerstoffmengen zuführen.

Bedeutung des Kopfraums

In der Summe liegt im frisch abgefüllten Wein der Sauerstoff sowohl in der Flüssigkeit gelöst als auch gasförmig im Kopfraum vor. Die gesamte, in einer Flasche enthaltene Sauerstoffmenge wird inzwischen als TPO oder „total package oxygen“ bezeichnet.

Der Sauerstoff im Kopfraum löst sich langsam im Wein. Ein für Schraubverschlüsse typischer Kopfraum von 5 cm Höhe enthält etwa 15 ml Luft. Darin sind wiederum 3,1 ml oder 2,2 mg O₂ enthalten. Je nach Flaschengröße belastet diese Sauerstoffmenge den Wein unterschiedlich stark, bei einem Füllvolumen von 1,0 Ltr. mit 2,2 mg/l O₂ und bei einem Füllvolumen von nur 500 ml mit 4,4 mg/l O₂. Dazu addiert sich der im Wein gelöste Sauerstoff. Diese Verhältnisse stehen in Tabelle 3. Bei vergleichbarem Kopfraum sind kleine Flaschen benachteiligt. Mit zunehmender Flaschengröße wird der Einfluss des Kopfraums auf die Gesamtsauerstoffmenge (TPO) geringer.

Unter dem Schraubverschluss ist der Kopfraum deutlich größer als bei der Verwendung von Natur- oder synthetischen Korken. Wird in diesem Fall auf eine Kopfraumspülung verzichtet, kann der verbleibende Sauerstoff die gute Sauerstoffdichtigkeit der gängigen Schraubverschlüsse aufwiegen. Zumindest bei Weißweinen kommt dem Sauerstoffmanagement im Kopfraum eine erhebliche Bedeutung zu.

Der Sauerstoff nach der Abfüllung

Der im Wein gelöste Sauerstoff reagiert mit Weinhaltstoffen, wobei er allmählich abnimmt. Gleichzeitig strömt Sauerstoff aus dem Kopfraum in den Wein nach. Verantwortlich dafür ist die oben beschriebene Kinetik der Sauerstoffdiffusion durch die Weinoberfläche. Unter der Bedingung, dass der Flaschenverschluss eine absolute Sauerstoffbarriere darstellt, ist der TPO nach einige Zeit vollständig verschwunden; das Flascheninnere ist frei von Sauerstoff. Ab diesem Momentan kommt auch der durch Oxidation bedingte SO₂-Verlust zum Stillstand. Schrauber mit Saran- oder Zinn-Saran-Einlage, richtig angebracht, kommen den Verhältnissen einer absoluten Sauerstoffbarriere sehr nahe (O₂ < 1 mg / Jahr).

Abbildung 6 zeigt exemplarisch den Abbau des Sauerstoffs in einem handelsüblichen Weißwein von 20° C nach der Abfüllung in Flaschen von 0,75 l mit Schraubverschluss. Der anfänglich im Wein gelöste Sauerstoff war hier nach neun Tagen gebunden, während der im Kopfraum befindliche Sauerstoff erst nach 44 Tagen vollständig verschwunden war. Erst nach Ablauf dieser Frist war ein TPO von Null erreicht und der SO₂-Verlust zum Stillstand gekommen.

Die Diffusion des Kopfraumsauerstoffs in den Wein wird durch die geringe Weinoberfläche begrenzt. Sie ist langsamer als die Bindung gelösten Sauerstoffs und kontrolliert die Geschwindigkeit des TPO-Abbaus.

Mit einer gewissen Schwankungsbreite ist der gesamte in der Flasche eingeschlossene Sauerstoff nach einer Lagerung von ungefähr eineinhalb Monaten bei 20° C abreagiert und verschwunden, wobei niedrigere Temperaturen verzögernd wirken. Etwa genau so lange währt die sogenannte Füllkrankheit. Es ist eine verführerische Spekulation, ihre Ursache in den durch die Umsetzung des Sauerstoffs induzierten Reaktionen zu suchen.

1 mg O₂ führt theoretisch zur Oxidation von 4 mg SO₂. In Wein ist der aus der Reaktion mit Sauerstoff resultierende Verlust an SO₂ jedoch stets kleiner als dieser stöchiometrische Wert. Ein beachtlicher Teil des Sauerstoffs von 5 bis 50 % verbleibt somit als Reaktionspartner bei anderen Inhaltsstoffen. Dabei handelt es sich in großen Rotweinen überwiegend um Tannine, woraus qualitative Verbesserungen resultieren können. In fruchtigen Weißweinen geht der verbleibende Sauerstoff überwiegend zu Lasten der Aromatik und wird tendenziell negativ bewertet (Abb. 2).

Weine mit wenig freier SO₂ und hohem Sauerstoffeintrag können die freie SO₂ vollständig verlieren und danach oxidativ wirken. Nur wenn die Sauerstoffaufnahme beim Abfüllen unter Kontrolle gehalten wird, können stabile SO₂-Gehalte erreicht werden.

Zusammenfassung

Die Sauerstoffaufnahme des Weins erfolgt in der Praxis meist unkontrolliert, hat jedoch erhebliche Folgen für die SO₂-Stabilität und Sensorik. Mit dem Ziel eines besseren Sauerstoffmanagements wird dargestellt, an welchen Stellen im Keller und beim Abfüllen der Wein Sauerstoff aufnimmt. Die Sauerstoffbelastung wird quantifiziert in Abhängigkeit von Weinoberfläche, Temperatur, Turbulenzen und Weinvolumen. Für oxidationssensible Weißweine ergeben sich Schwachstellen durch ungenügendes Beifüllen der Behälter, beim Filtrieren und Abfüllen, aus dem Kopfraum der Flaschen und durch ungeeignete Verschlüsse. ■

WAS BEWIRKT SAUERSTOFF BEIM DEKANTIEREN?

Es ist ein weit verbreiteter Usus, große Rotweine vor ihrem Genuss zu dekantieren oder zumindest in breitbauchigen Gläsern zu schwenken. Das Ziel ist ihre Belüftung. Aus den beschriebenen Messungen wissen wir, dass der Wein über seine ruhende Oberfläche bei Zimmertemperatur etwa 500 mg Sauerstoff pro m² und Tag aufnimmt. Für ein gängiges Glas von 8 cm Durchmesser und einer Flüssigkeitsoberfläche von 50 cm² nach Befüllung mit 50 ml Wein ergibt sich so nach einigen Umrechnungen eine Sauerstoffaufnahme von 5 mg/l innerhalb von 15 Minuten. Schwenkt man den Wein, ist er in noch kürzerer Zeit annähernd mit Sauerstoff gesättigt. Andererseits sieht man in den Abbildungen 4 bis 6, dass ein durchschnittlicher Wein nicht mehr als 0,5 bis 1,0 mg/l gelösten Sauerstoff pro Tag chemisch umsetzen kann. Der Beispielwein wird also mehrere Tage benötigen, um seinen Sauerstoff vollständig zu verwerten. Dabei käme es zu weit reichenden Veränderungen am Gaumen, weil sich die Qualität des Tannins durch den Sauerstoff verändert. Tannin liegt in Rotweinen aber im Konzentrationsbereich von einigen 1 000 mg/l vor und muss deshalb auch mit einer beachtlichen Menge von 10 mg/l Sauerstoff in Reaktion treten, damit seine qualitative Verbesserung geschmacklich signifikant ausfällt. Vorher fällt der Wein jedoch oft der Genussucht zum Opfer. Bis dahin hat er nur einen Bruchteil des gelösten Sauerstoffs verarbeitet – einige µg/l, die zur Reaktion mit den Aromastoffen genügen und auch Böckser verursachende Mercaptane beseitigen können. Mit anderen Worten: Belüften vor Genuss macht harte Rotweine am Gaumen keineswegs weicher, öffnet wohl aber ihre Aromatik.