

Kupfer in der Weinbereitung: Vom Weinbergsmanagement zur analytischen Kontrolle im Keller

Dr. Francesca Bruni, Forscherin am CDR Chemielabor "Francesco Bonicolini"

P2611

Einleitung. Kupfer als kritischer Kontrollpunkt im Weinbereitungsprozess

In der modernen Önologie muss das Vorhandensein von Kupfer (Cu) nicht nur als Rückstand aus Pflanzenschutzbehandlungen im Weinberg betrachtet werden, sondern auch als kritischer Kontrollpunkt innerhalb des Qualitätssicherungsprotokolls der Kellerei.

Kupferhaltige Produkte gehören weiterhin zu den wirksamsten Lösungen zur Kontrolle des **Falschen Mehltaus** (*Plasmopara viticola*). Gleichzeitig kann ihre Persistenz die chemische und mikrobiologische Stabilität des Weins beeinflussen. Kupfer ist ein essentielles **Spurenelement** für den Stoffwechsel der Rebe. Gelangen jedoch übermäßige Rückstände in den Most und den Wein, wird dieses Metall zu einem technologisch kritischen Parameter, der die Gärkinetik, die oxidative Stabilität und das endgültige sensorische Profil beeinflussen kann. Traditionell folgten Pflanzenschutzmaßnahmen im Weinberg der sogenannten „**Drei-Zehner-Regel**“. Zehn Millimeter Niederschlag, zehn Zentimeter Triebwachstum und Temperaturen um 10 °C galten als günstige Bedingungen für eine Infektion. Aktuelle agronomische Erkenntnisse haben diese Regel jedoch revidiert. Studien zeigen, dass Infektionen bereits beginnen können, wenn Blätter nur 2 bis 3 cm Durchmesser erreichen, da die Stomata bereits vollständig funktionsfähig sind. Infolgedessen beginnen Behandlungen häufig früher und werden während der Saison öfter wiederholt. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Kupferrückstände auf den Trauben verbleiben und schließlich in den Most gelangen. Regulatorische Grenzwerte legen **maximale** Kupferkonzentrationen von **50 mg/kg** auf Trauben und **1 mg/L** im fertigen Wein fest. Aus technologischer Sicht betrachten jedoch viele Weingüter **0,5 mg/L** als **optimalen Schwellenwert**, um Stabilität zu gewährleisten und Qualitätsfehler zu vermeiden. Die Aufrechterhaltung von Kupferkonzentrationen unterhalb dieses Wertes reduziert das Risiko oxidativer Reaktionen und kolloidaler Instabilität erheblich.

Kupfertoxizität und Hefemetabolismus

Sobald Kupfer in die Kellerei gelangt, wird seine Entfernung schwierig. Übliche Klärungsprozesse, die auf Most angewendet werden, reduzieren normalerweise die Kupferkonzentration nicht wirklich. Der Großteil des Metalls bleibt bioverfügbar und kann direkt mit dem

Hefestoffwechsel interagieren. Die Reaktion der Hefe auf Kupfer hängt von dem während der Gärung eingesetzten Hefestamm ab.

Typische Resistenzwerte liegen bei etwa:

- Indigene oder nicht selektionierte Hefen: Toleranz bis etwa 8 mg/L
- Traditionelle *Saccharomyces cerevisiae*-Stämme: Toleranz bis etwa 12 mg/L
- *S. cerevisiae* / *S. bayanus*-Stämme: Toleranz bis etwa 19 mg/L
- Nicht-H₂S-produzierende Stämme: höhere Empfindlichkeit, etwa 6 mg/L.

Aufgrund dieser Unterschiede muss die Kupferkonzentration stets im Zusammenhang mit dem verwendeten Hefestamm im Gärmanagement bewertet werden.

Mechanismen des oxidativen Stresses

Die Toxizität von Kupfer ist hauptsächlich mit der Cu²⁺-Ionenform verbunden, die an Redoxreaktionen teilnehmen kann, bei denen reaktive Sauerstoffspezies (Reactive Oxygen Species, ROS) entstehen. Diese hochreaktiven Moleküle schädigen Zellstrukturen und beeinträchtigen wichtige enzymatische Systeme, die an der Gärung beteiligt sind.

Die wichtigsten Folgen sind:

1. **Oxidativer Stress und verlangsamte Gärkinetik**
ROS schädigen Zellmembranen und hemmen Enzyme der Glykolyse, wodurch die Hefetätigkeit verlangsamt wird.
2. **Erhöhte Acetaldehydproduktion**
Hefezellen unter oxidativem Stress neigen dazu, Acetaldehyd als Zwischenmetabolit anzureichern.
3. **Auswirkungen auf das Schwefeldioxid-Management**
Acetaldehyd ist die wichtigste Verbindung, die Schwefeldioxid (SO₂) bindet. Höhere Acetaldehydkonzentrationen erfordern daher höhere SO₂-Zugaben, um einen ausreichenden Anteil an freiem SO₂ zu erhalten. Das erhöht jedoch das Risiko die gesetzlichen Grenzwerte für Gesamt-SO₂ zu überschreiten.

Organoleptische Risiken: Oxidation und kolloidale Instabilität

Kupfer wirkt im Wein auch als starker Redoxkatalysator. Seine Anwesenheit beschleunigt den Sauerstoffverbrauch und erhöht oxidative Reaktionen um etwa 125 bis 190 %. Diese

Reaktionen können sowohl die Aromastabilität als auch die Farbentwicklung erheblich beeinflussen. Weißweine sind besonders empfindlich, da ihnen der polyphenolische Redoxpuffer fehlt, der typischerweise in Rotweinen vorhanden ist.

Das Kupfer-Paradoxon

In abgefüllten Weinen mit niedrigem Redoxpotenzial können **Cu⁺-Ionen** mit Proteinen und Sulfhydrylgruppen reagieren und instabile kolloidale Komplexe bilden, die schließlich als **rötlich-braune Ablagerungen** ausfallen können – ein Phänomen, das als **Kupfertrübung** (Schwarzer Bruch) bezeichnet wird.

Besonders anfällig sind Weine, die während der Weinbergbehandlungen oder Kellerarbeiten Kupfer akkumuliert haben. **Leichte Weißweine sind besonders gefährdet**, da sie häufig früh abgefüllt werden und nur begrenzte Zeit zur Stabilisierung während der Lagerung im Tank haben.

Kupfertrübung entwickelt sich typischerweise **nach der Abfüllung**, wenn die Weinmatrix aufgrund des begrenzten Sauerstoffs und der Anwesenheit von Verbindungen wie **Schwefeldioxid und Ascorbinsäure** sich reduziert. Diese Bedingungen begünstigen die Bildung unlöslicher Kupferkomplexe, die während der Flaschenlagerung ausfallen können.

Auch externe Faktoren können das Risiko erhöhen. **Lichteinwirkung**, insbesondere UV-Strahlung, kann das Phänomen fördern, weshalb Weißweine in Klarglasflaschen anfälliger sind (Zoecklein et al., 1995). **Hohe Lagertemperaturen** können ebenfalls das Auftreten kupferbedingter Ablagerungen beschleunigen, wenn weitere Instabilitätsbedingungen vorliegen.

Proteine können an der Bildung von Kupferkomplexen beteiligt sein, daher sind Weine mit höherem Proteingehalt anfälliger. In solchen Fällen kann eine sorgfältige **Bentonitschönung** helfen, den Proteingehalt zu reduzieren und das Risiko von Trübungen oder Ablagerungen zu begrenzen.

Aus diesem Grund ist die **präventive Überwachung der Kupferkonzentration** wirksamer als korrigierende Behandlungen wie Kaliumferrocyanid oder PVI-PVP-Copolymere, die das sensorische Profil des Weins beeinflussen können.

Die Aufrechterhaltung von Kupferkonzentrationen unter **0,5 mg/L** bleibt die zuverlässigste Strategie, um die kolloidale Stabilität und die visuelle Qualität während der gesamten Haltbarkeit des Weins zu gewährleisten.

Kupferüberwachung mit CDR WineLab®

Eine schnelle analytische Kontrolle ist entscheidend für das Management des **Kupfergehalts** während der Weinbereitung, da zeitnahe Messungen es Winzern ermöglichen, den Einfluss von Weinbergsbehandlungen zu bewerten, Klärungsprozesse zu überwachen und die Kupferkonzentration vor kritischen Phasen wie Gärung, Stabilisierung oder Abfüllung zu überprüfen.

Das System **CDR WineLab®** ermöglicht es Weingütern, Kupferanalysen direkt im Keller durchzuführen und liefert schnelle Ergebnisse, die Qualitätsentscheidungen in Echtzeit unterstützen, ohne auf externe Labore und deren Zeitaufwand angewiesen zu sein.

Die analytische Methode deckt die typischen Konzentrationsbereiche ab, die sowohl in Most als auch im fertigen Wein auftreten, und ermöglicht eine effektive Überwachung während des gesamten Produktionsprozesses. Zwei Messbereiche stehen zur Verfügung: ein **niedriger Bereich: 0,05–0,70 ppm** mit einer Auflösung von **0,01 ppm** und ein **hoher Bereich: 0,60–1,20 ppm** mit einer Auflösung von **0,01 ppm**. Dieser doppelte Messbereich ermöglicht die präzise Bestimmung von Kupferkonzentrationen in der Nähe des technologischen Stabilitätsschwellenwerts des Weins. Um zuverlässige photometrische Messungen zu gewährleisten, werden einfache Probenvorbereitungsschritte empfohlen. Mostproben sollten vor der Analyse zentrifugiert werden, um suspendierte Feststoffe zu entfernen, die die Messung beeinträchtigen könnten. Schaumweine oder gärende Proben sollten entgast werden, typischerweise mit einem Ultraschallbad, um gelöstes Kohlendioxid zu entfernen, das die optischen Messungen beeinflussen kann. Diese einfachen Vorbereitungsschritte gewährleisten **konstante analytische Leistung und zuverlässige Ergebnisse bei der routinemäßigen Überwachung im Keller**.

Vergleichende Analyse: CDR-Methode vs. offizielle OIV-Methode

In der modernen Weinbereitung ist es wichtig, zwischen Prozessüberwachung und offiziellen Zertifizierungsanalysen zu unterscheiden.

Kriterium	CDR WineLab® Methode	Offizielle Methode (OIV / Atomabsorptionsspektrometrie)
Strategischer Zweck	Procezzkontrolle und Qualitätssicherung	Gesetzliche Zertifizierung und Exportkonformität
Reaktionszeit	etwa 6 Minuten	Von mehreren Stunden bis zu Tagen
Operative Komplexität	Minimal, direkt im Keller einsetzbar	Hoch, erfordert spezialisiertes Laborpersonal
Probenvorbereitung	Schnelle Zentrifugation oder Entgasung	Komplexer Säureaufschluss
Präzision	Hervorragende Linearität in beider Messbereichen	Gesetzliche Referenzmethode
Betriebskosten	Niedrig, gebrauchsfertige Reagenzien stabil für 6 Monate	Höhere Kosten durch externe Laboranalysen

Schlussfolgerung. Kupferüberwachung als Schlüsselement der Qualitätskontrolle im Weinkeller

Das Management des **Kupfergehalts** stellt ein zentrales Element der modernen Qualitätssicherung im Weinkeller dar. Die Überwachung der Kupferkonzentration während des gesamten Weinbereitungsprozesses hilft, Gärprobleme, oxidative Instabilität und sensorische Defekte zu vermeiden, die erst nach der Abfüllung auftreten können.

Analytische Systeme wie **CDR WineLab®** ermöglichen es Weingütern, Konzentrationsänderungen von nur 0,01 ppm zu erkennen, wodurch rechtzeitige Eingriffe nach Weinbergbehandlungen, Flotationsprozessen oder korrigierenden Kellermaßnahmen möglich werden.

Während offizielle OIV-Methoden für regulatorische Zertifizierungen unverzichtbar bleiben, bietet die schnelle In-house-Analytik Winzern ein leistungsfähiges Instrument, um die aromatische Integrität, die Gäreffizienz und die langfristige Stabilität des Weins zu schützen.