

Strategien für ein schnelles analytisches Monitoring bei der Apfelweinherstellung: chemische und präventive Maßnahmen gegen mikrobiologische Veränderungen

Dr. Simone Bellasai -Chemiker und Önologe, Experte für chemische Analysen von Lebensmitteln und Getränken – Abteilungsleiter
CDR FoodLab® P2623

1. Einleitung: Biochemische Herausforderungen und technologische Vulnerabilität von Apfelmost

Die Herstellung von hochwertigem Apfelwein erfordert eine strenge Kontrolle der komplexen biochemischen und enzymatischen Prozesse, welche die Umwandlung des Rohmaterials steuern. Im Vergleich zu Traubenmost weist Apfelsaft eine ausgeprägte Anfälligkeit gegenüber oxidativen Vorgängen sowie eine häufig limitierende Konzentration an stickstoffhaltigen Nährstoffen für den Hefestoffwechsel auf. Diese technologischen Herausforderungen treten im Profil des Hardanger-Ciders besonders deutlich hervor: Der Einsatz von Tafelapfelsorten wie *Summerred*, *Aroma*, *Discovery* und *Gravenstein* zielt darauf ab, ein frisches und leichtes Endprodukt zu erzeugen, bringt jedoch aufgrund der reduzierten phenolischen Konzentration und mitunter erhöhter Säurewerte strenge chemische Anforderungen mit sich.

In diesem Kontext erfordert die Effizienzsteigerung des Prozesses eine Abkehr von einer Ex-post-Interventionslogik, die zwangsläufig auf die Korrektur bereits manifestierter organoleptischer Veränderungen beschränkt ist, hin zu einer prädiktiven und präventiven analytischen Strategie. Ein systematisches analytisches Monitoring ermöglicht es, metabolische Abweichungen frühzeitig zu erkennen, bevor sie sich in irreversible Fehler niederschlagen. Sowohl bei geführter Fermentation als auch unter semi-natürlichen Bedingungen stellt die kontinuierliche Analyse chemischer Parameter ein grundlegendes Instrument dar, um die chemisch-physikalische Stabilität des Ciders zu gewährleisten. Heute wird der Übergang zu diesem prädiktiven Modell durch die Einführung optimierter Analysensysteme wie **CDR CiderLab** erleichtert, die multiparametrische Screenings direkt in der Produktionslinie ermöglichen und damit die Wartezeiten externer Laboranalysen eliminieren.

Parameter	Kritischer Schwellenwert	Risiko	Korrekturmaßnahme	Empfohlener Zeitpunkt
Hefe-assimilierbarer Stickstoff (YAN)	100 mg/L	Verlangsamung oder Stillstand der Fermentation; Bildung von Schwefelwasserstoff (H ₂ S) mit reduktivem Fehleroma, typischerweise Geruch nach faulen Eiern.	Kalibrierte Zugabe von Ammoniumsalzen (DAP) oder komplexen organischen Nährstoffen.	Präfermentative Phase, vor der Inokulation.
Essigsäure (flüchtige Säure)	0.6 g/L	Essigstich; Bildung von Ethylacetat mit Lösungsmittel- bzw. Klebstoffgeruch.	Vermeidung von Kopfraum in den Tanks durch Auffüllen; gezielte Ergänzung freier SO ₂ .	Lagerungs- oder Keeving-Phase; Monitoring zur frühzeitigen Erkennung ansteigender Trends.
Schwefeldioxid (SO ₂) und pH-Wert	pH > 3.8	Verminderte Wirksamkeit von SO ₂ ; Entwicklung von <i>Brettanomyces spp.</i> und <i>Saccharomyces ludwigii</i> mit Bildung von Zellagglomeraten.	Vorläufige Säurekorrektur mit Äpfelsäure, um den pH-Wert vor der Sulfitierung wieder auf < 3,8 zu senken.	Vor der Sulfitierung und während der Lagerung.
L-Äpfelsäure	< 0.5 g/L am Ende der Fermentation; frische/nordische Cider: 4,0–6,0 g/L	Spontane malolaktische Fermentation (MLF) nach der Abfüllung mit Trübung und Überdruck; Verlust an Frische bei Sorten mit geringer Säure.	Abstiche; Stabilisierung mit Schwefeldioxid (SO ₂); gegebenenfalls exogene Säuerung bei pH > 3,8.	Während des Abbaus der Äpfelsäure und vor der Abfüllung.
Restzucker	Stilabhängig, von < 2,0 g/L bei trockenem Cider bis 40,0 g/L bei süßem Cider	Überattenuierung mit Verlust an Körper oder sekundäre Flaschengärungen mit Überkarbonisierung bzw. Berstgefahr.	Abstiche zur Unterbrechung der Fermentation; Chaptalisation mit Saccharose zur Erzeugung einer alkoholischen Barriere von 6–7 % vol.	Späte Fermentationsphase und vor der Abfüllung.

Tabelle 1 - Übersicht der kritischen Parameter für die Prozesskontrolle von Apfelwein

2. Hefe-assimilierbarer Stickstoff (YAN): Regulierung der Fermentationskinetik

Der hefe-assimilierbare Stickstoff (APA, YAN)

stellt im Apfelmost den wichtigsten limitierenden Faktor für die Fermentationskinetik dar. Eine unzureichende Verfügbarkeit dieser Nährstofffraktion führt nicht nur zu Verlangsamungen oder Stillständen der alkoholischen Gärung, sondern wirkt auch als biochemischer Auslöser für erhebliche Abweichungen im Aromaprofil. Ein Mangel an APA beeinträchtigt die Proteinsynthese, einschließlich der Synthese der enzymatischen Komplexe der Zellbiomasse. Unter nährstoffbedingtem Stress aktiviert der Hefestoffwechsel den Reduktionsweg von Sulfaten und Sulfiten, wodurch Schwefelwasserstoff (H₂S) gebildet und freigesetzt wird. Dabei handelt es sich um eine flüchtige Verbindung, die dem Apfelwein unangenehme schwefelige Noten verleiht, die an den Geruch fauler Eier erinnern und Ausdruck eines reduktiven Fehltons sind. Darüber hinaus verlängert eine übermäßig schwache Fermentationskinetik die Verweilzeit des Mosts, wodurch das Risiko frühzeitiger Oxidationen und der Entwicklung kontaminierender Mikroorganismen exponentiell zunimmt.

Das analytische Monitoring erfordert die quantitative Bestimmung des gesamten APA, ausgedrückt als Summe aus ammoniakalischem Stickstoff (anorganisch) und freiem Aminostickstoff (organisch, bzw. FAN), die zwingend in der präfermentativen Phase durchzuführen ist. Mithilfe der schnellen enzymatischen Methode von CDR CiderLab wird dieser Wert innerhalb weniger Minuten und ohne komplexe Vorbehandlung der Probe ermittelt. Dadurch kann der Technologie die tatsächliche Nährstoffverfügbarkeit der jeweiligen Charge in Echtzeit erfassen. Analysen der Apfelsorten aus der Hardanger-Region zeigen eine starke Variabilität und häufig unzureichende Gehalte: Die Werte reichen von einem Minimum von 0,8 mg/L bei der Sorte *Discovery* bis zu einem Maximum von 101 mg/L bei der Sorte *Summerred*. Der technische Sicherheitswert zur Gewährleistung des basalen Hefestoffwechsels und einer regulären Fermentationskinetik wird auf 100 mg/L APA geschätzt. Zeigt die analytische Untersuchung eine Konzentration unterhalb dieses Grenzwerts, ist vor der Inokulation eine kalibrierte Zugabe von Ammoniumsalzen, wie Diammoniumphosphat (DAP), oder komplexen organischen Nährstoffen erforderlich.

3. L-Äpfelsäure und L-Milchsäure: Kontrolle der malolaktischen Fermentation (MLF)

L-Äpfelsäure bildet die zentrale Säule der fixen Säure im Apfelmost, mit Spitzenwerten von bis zu

22,1 g/L bei der Sorte *Aroma*. Das Monitoring ihres Abbaus und der gleichzeitigen Umwandlung in L-Milchsäure im Rahmen der malolaktischen Fermentation (MLF) ist eine kritische Voraussetzung für die Produktstabilität. Eine spontane MLF nach der Abfüllung beeinträchtigt den Cider erheblich, da sie Trübungen, unerwünschte Aromen und einen gefährlichen CO₂-Überdruck verursacht. Wird sie hingegen bei Sorten mit bereits geringer Säure unkontrolliert zugelassen, kann sie die Frische des Produkts deutlich mindern.

Die quantitative Bestimmung der Äpfelsäure

mithilfe enzymatischer und fotometrischer Tests, die auf der Plattform CDR CiderLab optimiert wurden, ermöglicht es, die Abbaukinetik mit analytischer Präzision und unmittelbaren Reaktionszeiten zu erfassen. Das Monitoring dieses Parameters ist aufgrund der ausgeprägten Unterschiede zwischen den Sorten essenziell: Bei *Gravenstein* sinkt der Äpfelsäuregehalt um 70 %, während er bei *Summerred* lediglich um 9 % abnimmt. Eine zeitnahe Analyse unterstützt den Produzenten bei entscheidenden Prozessentscheidungen: wann Abstiche durchgeführt werden sollten und wann der Prozess mit Schwefeldioxid (SO₂) zu stoppen ist. Darüber hinaus wirkt die exogene Säuerung mit Äpfelsäure bei Mosten mit einem pH-Wert > 3,8 als präventive Maßnahme, indem sie das organoleptische Gleichgewicht wiederherstellt und den Anteil der molekularen, gegen mikrobielle Kontaminationen wirksamen SO₂-Fraktion erhöht.

4. Flüchtige Säure (Essigsäure): Präventives Monitoring des Essigstichs

Essigsäure ist der wichtigste Indikator für die flüchtige Säure: Sie spiegelt die hygienische Qualität der Produktionslinie und das korrekte Sauerstoffmanagement wider, insbesondere während sensibler Phasen wie der Lagerung oder des *Keevings*. Steigt dieser Wert unkontrolliert an, besteht für den Cider das Risiko eines Essigstichs. Diese Veränderung geht häufig mit der Bildung von Ethylacetat einher, das das Produkt durch unangenehme Gerüche nach Lösungsmittel und Klebstoff beeinträchtigt. Dieser Fehler steht in engem Zusammenhang mit der frühen metabolischen Aktivität von Essigsäurebakterien oder opportunistischen apiculaten Hefen, darunter *Hanseniaspora valbyensis* (Syn. *Kloeckera apiculata*), deren Vermehrung durch die Anwesenheit von Sauerstoff und durch Konzentrationen von Schwefeldioxid (SO₂) unterhalb der minimalen Hemmschwelle begünstigt wird.

Das quantitative analytische Monitoring dient als Frühwarnsystem, da es ermöglicht, kinetische

Abweichungen zu erkennen, bevor der Fehler olfaktorisch wahrnehmbar wird. Mit dem System CDR CiderLab kann die **Quantifizierung der Essigsäure** innerhalb von **10 Minuten** über eine enzymatische Reaktion an einer sehr kleinen Probenmenge durchgeführt werden. Obwohl der technische Akzeptanzgrenzwert bei maximal 0,6 g/L liegt, weisen Cider mit hohem Qualitätsstandard stabile Werte nahe der instrumentellen Bestimmungsgrenze auf. Der präventive Ansatz basiert auf der Identifizierung jedes Wachstumstrends. Der analytische Nachweis eines Anstiegs macht die sofortige Umsetzung von Gegenmaßnahmen erforderlich, wie etwa die Eliminierung des Kopfraums in den Tanks durch Auffüllen sowie die gezielte Ergänzung freier SO₂.

5. Schwefeldioxid (SO₂): Die Chemie des selektiven Schutzes

Schwefeldioxid (SO₂) stellt im Sidrifikationsprozess den wichtigsten Wirkstoff zur mikrobiologischen Selektion und zum antioxidativen Schutz dar. Die Wirksamkeit dieses Zusatzstoffs hängt eng vom pH-Wert des Mediums ab, der das chemische Gleichgewicht in Lösung steuert. In schwach sauren Milieus (pH > 3,8), wie sie für Moste aus *Bittersweet-Apfelsorten* typisch sind und Werte bis pH 4,2 erreichen können, nimmt der Anteil der aktiven schwefligen Säure drastisch ab. Diese Bedingung setzt das Produkt während der Lagerung schwerwiegenden Veränderungen durch resistente kontaminierende Hefen aus, darunter *Brettanomyces spp.* und *Saccharomyces ludwigii*. Letztere ist für ihre Fähigkeit bekannt, dichte Zellagglomerate am Flaschenboden zu bilden und damit die visuelle Stabilität des Ciders zu beeinträchtigen.

Das Kontrollprotokoll muss sich auf das gekoppelte analytische Monitoring der **freien SO₂** und **gesamten SO₂**, sowie des **pH-Werts** konzentrieren. Mit steigendem pH-Wert verschiebt sich das Gleichgewicht der schwefligen Säure hin zur Bisulfit- und Sulfitform, wodurch die Fraktion der molekularen SO₂ abnimmt. Diese ist die einzige Form, die die Zellmembran von Mikroorganismen durchdringen und eine biozide Wirkung ausüben kann. Bei einem pH-Wert von 4,2 ist eine Standarddosierung von 150 mg/L biologisch ineffizient. Der präventive Ansatz erfordert daher eine vorläufige Säurekorrektur durch exogene Zugabe von Äpfelsäure, um den Most vor der Sulfitierung auf Werte unter pH 3,8 zurückzuführen.

6. Restzucker und Dichte: Steuerung der Flaschenstabilität

Die Bestimmung der relativen Dichte (*Specific Gravity, SG*) und das analytische Monitoring des Glucose/Fructose-Verhältnisses stellen

grundlegende Parameter dar, um den endgültigen volumetrischen Alkoholgehalt abzuschätzen und den endogenen CO₂-Partialdruck im abgefüllten Produkt zu kontrollieren. Stämme von *Saccharomyces cerevisiae* verstoffwechseln bevorzugt Glucose und lassen Fructose als Hauptbestandteil der späten Kohlenhydratfraktion zurück. Ein unkontrollierter Fermentationsverlauf mit vollständigem Zuckerabbau, also Überattenuierung, nimmt dem Apfelwein Körper und geschmackliche Rundheit. Umgekehrt setzt das Vorhandensein biologisch nicht stabiler Restzucker die Charge dem Risiko später sekundärer Gärkinetiken nach der Abfüllung aus. Dieses Phänomen führt zu Fehlern durch unkontrollierte Überkarbonisierung und erhöht den Innendruck. Aus analytischer Sicht erfordert die Bewertung der relativen Dichte die Integration mit der quantitativen Erfassung des verbleibenden Zuckerprofils. Die **schnelle Bestimmung der einzelnen Kohlenhydratfraktionen, also Glucose, Fructose und Saccharose**, die mit CDR CiderLab durchgeführt werden kann, ermöglicht die Validierung des densimetrischen Messwerts und steuert präzise die für den Fermentationsstopp erforderlichen Abstichvorgänge, das sogenannte *Racking*. An dieser Stelle kommt die Chaptalisation ins Spiel: Die Zugabe von Saccharose zur Anhebung des Alkoholgehalts auf 6–7 % vol dient dazu, eine echte mikrobiologische Barriere zu schaffen. Der zusätzliche Alkohol schützt in Kombination mit dem sauren pH-Wert und der SO₂ die in der Flasche verbleibenden Zucker vor unerwünschten Fermentationen und gewährleistet so die Stabilität des Produkts.

7. Schlussfolgerung

Im modernen *Cidermaking* sind Analysen direkt an der Produktionslinie weder ein Kostenfaktor noch eine Komplikation, sondern eine strategische und unverzichtbare Entscheidung, um das Produkt zu schützen und jede einzelne Charge optimal zu nutzen. Die Fähigkeit, handwerkliche Intuition in quantifizierbare wissenschaftliche Präzision zu überführen, stellt das entscheidende Mittel dar, um den teilweisen oder vollständigen Verlust von Produktionschargen zu vermeiden und zugleich die vom globalen Markt geforderte Qualitätskonstanz und sensorische Wiedererkennbarkeit zu gewährleisten.

In diesem Rahmen methodischer Weiterentwicklung präsentiert sich das System **CDR CiderLab** als **eine für die Prozesskontrolle optimierte analytische Lösung**. Dank fotometrischer Tests in vorgefüllten Küvetten überwindet das System die operativen Einschränkungen des traditionellen chemischen

Labors: Es macht komplexe Kalibrierungen überflüssig, reduziert die Handhabung von Reagenzien drastisch und benötigt ausschließlich Mikrovolumina der Probe, wodurch aufwendige vorgeschaltete Filtrations- oder

Zentrifugationsschritte entfallen. Die ausgeprägte Schnelligkeit der Durchführung ermöglicht unmittelbare Korrekturmaßnahmen direkt im Produktionsumfeld.

Bibliographie und internationale institutionelle Ressourcen

Diese Links verweisen auf die wichtigsten Forschungsplattformen, universitären Beratungsdienste und technischen Institute, die sich mit der Wissenschaft der Apfelweinherstellung befassen:

- **ScienceDirect Topics – Cider (*Agricultural and Biological Sciences*)** Enzyklopädische und wissenschaftliche Ressource zur Konsultation von Buchkapiteln und Übersichtsarbeiten zur Biochemie von Apfelwein.

Link: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/cider>

- **Cornell AgriTech (Cornell University) – Hard Cider Products & Research** Akademisches Exzellenzzentrum für die Untersuchung von Apfelsorten, Fermentation und technologischer Entwicklung der Apfelwein-Wertschöpfungskette.

Link: <https://cals.cornell.edu/cornell-agritech/products-we-research/hard-cider>

- **Agriculture Institute – Industrial Cider Production Techniques & Technology** Technisches Portal mit Schwerpunkt auf Lebensmittelchemie, Physiologie von Mikroorganismen und modernen Kellerpraktiken im industriellen Maßstab.

Link: <https://agriculture.institute/food-chemistry-and-physiology/industrial-cider-production-techniques-technology/>

- **The Wittenham Hill Cider Pages (Andrew Lea) – Cider and Perry Making** Eine der historischen und technischen wissenschaftlichen Referenzressourcen für traditionelle und moderne Sidrifikationsprotokolle.

Link: <https://www.cider.org.uk/frameset.htm>

- **Washington State University (WSU) – Cider Research & Extension** Universitäres Programm, spezialisiert auf die Analyse fruchtbasierter Matrices, Vinifikationsversuche und die mikrobiologische Stabilität von Apfelwein.

Link: <https://cider.wsu.edu/>

- **Cider Institute of North America (CINA)** Referenzorganisation für berufliche Weiterbildung, Standardisierung chemisch-physikalischer Parameter und Zertifizierungen im Cidermaking.

Link: <https://www.ciderinstitute.com/>