

Karlsruher Elektroporationsanlage KEA – Die Erfolgsgeschichte eines Technologietransfers in die Industrie

G. Müller, W. Frey, M. Sack, C. Schultheiss, IHM; H.-G. Mayer, MAP; J. Sigler, Staatliches Weinbauinstitut Freiburg; M. Kern, KEA-TEC GmbH, Waghäusel; U. Günther, Beckers Bester GmbH & Co., Eislebener Fruchtsaft oHG, Eisleben

Einleitung

Die Extraktionen wertgebender flüssiger Inhaltsstoffe aus pflanzlichen Zellen erfordert das Öffnen der Zellmembrane. Der durch mechanische Mühlen erreichbare Zellaufschlussgrad reicht oftmals nicht für eine optimale Extraktion der Inhaltsstoffe aus. Für den Zellaufschluss werden auch zusätzlich thermische und/oder enzymatische Zellaufschlussverfahren eingesetzt. Damit sind das Erhitzen der Maische auf ca. 80 °C und der Einsatz von Enzymen gemeint. Diese Standardverfahren haben einen mehr oder weniger negativen Einfluss auf Produktionskosten, Energieverbrauch, Geschmack und Ernährungsphysiologie.

Eine echte Alternative zu den oben genannten Verfahren ist die Maischeporation, bei der Spannungsimpulse an die Maische abgegeben werden. Hierbei handelt es sich um ein physikalisch wirkendes Zellaufschlussverfahren, das nicht nur die Nachteile der beschriebenen Standardverfahren vermeidet, sondern eine zusätzliche Steigerung der Saftausbeute und wertgebender Inhaltsstoffe hervorruft.

Historie, Wirkprinzip

Die Elektroporation ist Gegenstand von Arbeiten an Universitäten und landwirtschaftlichen Forschungsstellen wie dem Forschungszentrum Karlsruhe, der Technischen Universität Berlin, dem DIL Quakenbrück, der Universität Hohenheim, der Forschungsanstalt Geisenheim und der Universität Hamburg Harburg. Ziel der Arbeiten ist die wissenschaftliche Untersuchung der Elektroporation am Bei-

spiel verschiedener Früchte wie zum Beispiel Hackfrüchte, Karotten, Rüben, Obst, Äpfel und Beeren eingeschlossen Weinbeeren. Es wurden in Zusammenarbeit mit der Lebensmittelindustrie auch Förderprogramme in Anspruch genommen, die die industrielle Umsetzbarkeit dieses Verfahrens zeigen sollten. Im Rahmen einer solchen Ausschreibung wurde das Forschungszentrum Karlsruhe kontaktiert, seine Kompetenz bezüglich des Baus und des Betriebs von elektrischen Pulsgeneratoren (Marxgenerator) einzubringen. Es erwies sich sehr schnell, dass die Marxgeneratortechnologie, wie sie ursprünglich für die FRANKA-Anlagen (Fragmentieren von Gestein, Keramik und Glas durch Unterwasser-Funkenentladungen) entwickelt wurde, ein Vehikel ist, um industrielle Mengen von biologischem Material zu porieren. Gemeint sind Durchsätze pro Anlage von ein bis zehn Tonnen Maische oder Früchte in der Stunde, mit der Option solche Anlagen auch zur Massedurchsatzhöhung zu bündeln, wie es zum Beispiel in der Zuckerindustrie in Erwägung gezogen wird [1, 2]. Über das weite Feld der mögliche Applikationen ist bereits im Magazin „Nachrichten“ des Forschungszentrums Karlsruhe vom Mai 2003 berichtet worden [3], so dass hier im Wesentlichen nur von den neu hinzugekommenen Verfahren, Technologien und Aspekten berichtet werden soll.

Zum elektrophysikalischen Wirkprinzip der Porenbildung gibt es folgende Modellvorstellung: Die 5–7 nm dicke Zellmembran wird als Isolator betrachtet. Die äußere Suspension und das Cytoplasma im

Zellinneren dagegen besitzen eine vergleichsweise hohe elektrische Leitfähigkeit, so dass sich beim Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes die Potenzialdifferenz entlang der Zelle in die Membran verlagert. Die Feldstärken an der Zellmembran sind enorm und bewegen sich im Bereich von 2×10^6 Volt/cm [4, 5]. Aufgrund der Kraftwirkung des elektrischen Feldes kommt es bei genügend hoher Membranspannung zur Porenbildung [6]. Es zeigt sich, dass die Potenzialdifferenz ΔV_M ca. 1 V über der Membran betragen muss. Wird die Potenzialdifferenz über der Membran genügend lange aufrechterhalten nimmt der Durchmesser der Pore soweit zu, dass laut Modellrechnungen ein kritischer Durchmesser von 36 nm überschritten wird. An diesem Punkt kann sich die Pore nicht mehr alleine verschließen. Die Poren bleiben dauerhaft offen und es findet ein Konzentrationsaustausch der Inhaltsstoffe mit dem umgebenden Medium statt – man spricht vom Zellaufschluss.

Anlagentechnik

KEA-Anlagen bestehen aus einem Pulserzeuger und einem Zellaufschlussreaktor (KEA: Karlsruher Elektroporationsanlage). Als Pulserzeuger werden Marxgeneratoren eingesetzt, die im Prinzip aus einer Anzahl elektrischer Kondensatoren bestehen (bei KEA sechs Stück), die im schnellen Takt (20 Hz) parallel aufgeladen (auf 50 kV) und dann seriell in den mit Elektroden versehenen Zellaufschlussreaktor entladen werden (300 kV-Pulse). In Abb. 1 ist die mobile Anlage KEA-Wein zu sehen, deren Mobilität es erlaubt in den

Produktionsstätten der Lebensmittelindustrie eingesetzt zu werden. Insbesondere wurde diese Anlage gebaut, um bei Winzern und Winzergenossenschaften an Ort und Stelle Beerenmaische zu porieren (s. Kapitel „Poration von Weinbeerenmaische“).

In Abb. 2 ist schließlich die stationäre Version der Maischeporationsanlage der Firma KEA-TEC abgebildet, wie sie seit Anfang 2006 in der Apfelsaftindustrie eingesetzt wird und über die im Folgenden ausführlich berichtet wird. Die Integration einer Porationsanlage in bestehende Keltereien ist einfach, da sie an beliebiger Stelle zwischen Mühle und Bandpresse bzw. Dekanter in die maischeführende Rohrleitung eingebaut werden kann.

Maischen aus unterschiedlichen Früchten und Gemüse sind aufgrund ihrer Konsistenz oftmals



Abb. 1: Mobile Maischeporationsanlage KEA-Wein.

schwierig mit Fördertechnik zu bewegen und zu verarbeiten, zumal die Förderleistung meist hoch sein muss. Aus diesem Grund ist bei den industriellen KEA-Anlagen ein ausreichend dimensionierter Leitungs- und Reaktorquerschnitt vor-

gesehen, der bei Fließgeschwindigkeiten von ca. 30 cm/s Durchsätze von bis zu 10 t/h erlaubt. Bei einer Anschlussleistung des Marxgenerators von typisch 20 kW wird die Maische im Mittel sechsmal mit 300kV/6kA-Pulsen beaufschlagt. Daraus errechnet sich die spezifische Energie zu 4–5 kJ/kg bzw. 1,5 kWh pro Tonne Apfelsaisch. Die Maische erwärmt sich dabei nur um ca. 1 K.



Abb. 2: Maischeporationsanlage KEA-Apfel der KEA-TEC GmbH; Durchsatz 10 t/h.

Technologische Vorteile der Maischeporation und Vermarktungsfähigkeit der Saftprodukte

Die in Vorversuchen bei verschiedensten Früchten ermittelten Vorteile der Elektroporation sind der verbesserte Zugang zum Saftinhalt der Frucht, der ohne Zugabe von membranwirksamen Zusatzstoffen (Enzymen etc.) erfolgt. Dabei tritt keine thermische Schädigung der Zellmatrix auf, die unter Umständen zu Kochgeschmack führen kann. Die subjektive Geschmacksverbesserung, sowie

analytische Messungen weisen oft auf eine verbesserte Extraktion von werthaltigen Inhaltsstoffen hin. Messungen haben auch gezeigt, dass die Entsaftung zu einer reduzierten Restfeuchte im Trester führt und bei Vermeidung von Enzymzugaben selbst der Trester noch zur Pektinherstellung verwendet werden kann.

Die wichtigsten Kriterien dieser neuen Technologie sind Verbrauchersicherheit und die Vermarktungsfähigkeit der erzeugten Saftprodukte. Ein vom Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI) finanziertes Forschungsvorhaben zeigte, dass die über physikalisch/chemische und sensorische Analysen ermittelten Inhaltsstoffkonzentrationen im porierten Apfelsaft normal sind und der Saft als uneingeschränkt verkehrsfähig eingestuft werden kann.

Betriebserfahrung mit der Maischeporation in der Apfelsaftindustrie

Der Einsatz der mobilen Porationanlage KEA-WEIN des Forschungszentrums (s. Abb.1) zeigt, dass der druckbeaufschlagte

Strom von Apfelmaische mit 10 t/h durch die Anlage gefahren und sukzessive der Pulsgenerator zugeschaltet werden konnte. Anschließend wurden zwei große Experimente gefahren, wobei jeweils 20 bis 30 t Apfelmaische ohne, und eine jeweils gleiche Menge mit eingeschalteter Bepulung durch die Anlage gefördert wurden.

Dabei wurde streng darauf geachtet, dass erstens es sich um identische Rohware handelt, d. h. gleicher Lieferant, gleiche Sorten und Erntezeitpunkt, gleiches Lieferdatum, zweitens identische Einstellung der Maschinen und Anlagen gewährleistet war, drittens, um Messfehler auszuschließen, die Rohware gewogen wurde, und Saftmengen in dem gleichen Tank mit Standanzeige ermittelt wurden (keine elektronische Mengenmessung), viertens Batchgrößen zwischen 25 und 30 t je Testfahrt betragen, und schließlich fünftens eine fachliche Versuchsüberwachung während der Kampagnen gewährleistet war. Das eine Experiment wurde mit frischen Äpfeln, das andere mit Lagerware durchgeführt, die meist reif bis überreif war. In beiden Fällen wurde ein

Anstieg der Direktsaftausbeute von fünf bis sieben Prozent ermittelt.

Die daraufhin installierte stationäre Anlage KEA-Apfel (s. Abb.2) ist seit Anfang 2006 ununterbrochen in einer Produktionslinie eingesetzt. In Tab. 1 sind Experimente aufgelistet, die im Laufe des Jahres mit dieser Anlage durchgeführt wurden. Auffallend ist, dass die Erstsftausbeute an wertigem, naturtrüben Direktsaft in allen Fällen stabil um fünf bis sieben Prozent erhöht ist.

Aus den Ergebnissen von Tab. 1 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Ausbeutesteigerung bei der wertgebenden Erstpresung erhöht sich stabil um 5–7%.
- Der Feuchtigkeitsgehalt des Tresters ist reduziert. Damit reduzieren sich auch die unvermeidlichen Trocknungskosten für die Herstellung von Tierfutter.
- Die Viskositätsreduktion der porierten Maische führt auch zur Erhöhung Durchsatzleis-

Experiment vom:	16.03.2006		05.04.2006		05.04.2006		13.03.2007		Mittelwerte	
Poration	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja
Energieeintrag [kJ/kg]	0	6	0	3,5	0	4	0	3,8	0	4,3
Menge Rohware [kg]	28.880	28.930	30.940	21.950	25.490	24.680	28.510	28.490	28.455	26.013
Menge Erstsft [l]	21.500	23.500	14.600	11.620	18.200	18.350	21.300	22.700	18.900	19.043
Menge Zweftsft [l]	10.000	10.200	15.000	11.400	11.000	12.200			12.000	11.267
Erstsftausbeute l/kg	74,5 %	81,2 %	47,2 %	52,9 %	71,4 %	74,4 %	74,7 %	79,7 %	66,4 %	73,2 %
Zweftsftausbeute l/kg	16,1 %	15,3 %	29,5 %	28,2 %	16,0 %	19,4 %			20,5 %	21,0 %
Gesamtausbeute l/kg	90,5 %	96,6 %	76,7 %	81,1 %	87,4 %	93,8 %			84,9 %	90,5 %

Tab. 1: Ergebnisse der Poration von Apfelmalsche bei 10 m³/h Durchsatz.

tion, da der Saft bei der Pressung besser abfließt.

- Der Saft zeigt keinerlei qualitative Beeinflussung.
- Durch die Installation von KEA-Äpfel ergeben sich insgesamt geringere Betriebskosten und ein geringerer technologischer Aufwand (z. B. durch das verbesserte Fließverhalten des Saftes).

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Herstellung von Äpfeldirektsaft

Es wurde eine Wirtschaftlichkeitsrechnung zur Herstellung von naturtrübem Äpfeldirektsaft aus der 10 t/h Maischeverarbeitung auf Basis eines einjährigen Anlagenbetriebs erstellt:

Während einer Betriebsdauer von einem Jahr (2000 Stunden) wurden 20.000 t Maische poriert. Bei einer Ausbeuteerhöhung von fünf Pro-

zent wurden zusätzlich 1000 t Saft produziert, bzw. bei einem Erlös von geschätzt 0,18 € pro Liter ergibt sich ein jährlicher Mehrertrag von 180.000 €. Andererseits treten bei einer Nutzungsdauer von geschätzt 7 Jahren und einem Zinssatz von 5 % jährliche Fixkosten in Höhe von 42.000 € auf, zu denen noch variable Kosten (Strom, Wasser etc.) von 7.000 € hinzukommen, sodass ein Nettogewinn von 130.000 € verbleibt. Rein rechnerisch sind die Investitionskosten von 180.000 € nach 1,5 Jahren amortisiert. Nicht gerechnet sind Einsparungen bei der Trocknung des feuchtigkeitsreduzierten Tresters.

Poration von Weinbeerenmaische

Der Aufschluss von Zellen durch Zellporation ist ein in der Weinbereitung völlig neuartiges Verfahren der Trauben- und Maischebehandlung. Bei der Bereitung von

Rotmost ist je nach Rebsorte eine Farbextraktion ggf. ohne Erhitzung innerhalb weniger Stunden möglich. Im Unterschied zu den etablierten Verfahren der Rotweinbereitung ist die Maischeporation gekennzeichnet durch nichtthermisch-wässrige Extraktionsbedingungen. Bei optimalen Bedingungen ist ein signifikanter Unterschied zwischen dem solchermaßen hergestellten Rotwein und der durch Maischeerhitzung bereiteten Kontrollvariante analytisch wie sensorisch kaum festzustellen (Tab.2). Damit werden auch Ansatzpunkte gesehen, im Vergleich zur Maischeerhitzung Energiekosten einzusparen. Im Vorfeld der herkömmlichen Maischegärung erlaubt die unterstützende durchgeführte Maischeporation einen effizienteren Zellaufschluss und damit kürzere Maischekontaktzeiten.

In der Weißweinbereitung von gewichtigem Interesse ist die Freisetzung von Aromastoffen oder deren Vorstufen, vor allem aus den

	Most			Wein						
	Mostgewicht [°Oe]	Gerbstoffe [g/l]	Gesamtsäure [g/l]	Alkohol [g/l]	Gesamtsäure [g/l]	freie SO ₂ [mg/l]	gesamte SO ₂ [mg/l]	Gerbstoffe [mg/l]	Farbintensität	Qualitätszahl **
Kontrolle (ME*)	96,5	2,8	8,3	98,5	4,7	48	131	2,1	2,47	2,17
Maischeporation	96,0	2,3	6,9	104,2	4,1	51	121	2,0	2,33	2,15

*) Maischeerhitzung
 **) Blindverkostung durch 48 fachkundige Personen (Kellermeister etc.). Beide Varianten sind gleichrangig: 23 Mal wurde die Zellporation auf Rang 1 gesetzt, 25 Mal die Kontrolle.

Tab. 2: Maischeporation zur Rotweinbereitung (Spätburgunder Rotwein).

Beerenhäuten. Die Maischeporation erbringt eine deutliche Steigerung. Überlange Maischestandzeiten können damit ebenso entfallen wie eine zusätzliche Enzymbehandlung

Vorteile sind außerdem gegeben im Hinblick auf die Vermeidung der Untypischen Alterungsnote (UTA). Bei entsprechend kritischem Lesegut haben Versuche mit zellporierter Maische gezeigt und 50 Prüfer in vergleichender Verkostung bestätigt, dass infolge verbesserter Extraktion ein signifikanter Qualitätsvorsprung gegenüber den Kontrollvarianten beobachtet werden kann (Tab. 3). Bemerkenswert ist auch der deutlich höhere Kalium-Wert der maischeporierten Variante, was auf einen sehr effektiven Aufschluss hinweist.

Dieses „Maischeporation“ genannte Verfahren eignet sich so-

wohl als Alternative zur Maischerhitzung bei der Rotweinerzeugung als auch zur Unterstützung der Maischegärung sowie zur Gewinnung von Weißmost. Neben verfahrenstechnischen Vorteilen wie verringerten Stand- und Verarbeitungszeiten, ggf. auch geringeren Energiekosten, lässt das bislang nicht zugelassene Verfahren einen effizienteren Aufschluss der Beeren sowie eine verbesserte Weinqualität erwarten.

Ausblick

Die Entwicklung der KEA-Technologie am IHM, die Förderung und die Vermarktungsstrategie durch die Stabsabteilung MAP und schließlich die industrielle Umsetzung der Methode durch den industriellen Kooperationspartner KEA-TEC hat diese Technologie auf einen erfolgreichen Weg ge-

bracht. Mit der Erstellung einer ersten großen Anlage und der einjährigen Bewährungsprobe ist ein Anfang gemacht worden, dem weitere Anwendungen folgen sollen.

Der Poration von Frucht- und Gemüsemaischen wird große Aufmerksamkeit geschenkt. Die Untersuchungen erstrecken sich auch auf ganze Hackfrüchte, die durch ein drehendes Förderrad in ein Wasserbad transportiert und dort poriert werden. Hintergrund sind Energiekosteneinsparungen, die anstelle einer thermischen von einer „kalten“ Extraktion von Inhaltsstoffen erwartet werden.

Zusammenfassung

Am IHM wurde in Zusammenarbeit mit unserem Lizenznehmer eine Anlage zur Elektroporation bzw. Zellporation von Fruchtmaischen entwickelt, die nach einjähriger

	Most (vorgeklärt)			Wein					Rangziffer**
	Mostgewicht [°Oe]	Gesamtsäure [g/l]	Gerbstoffe [g/l]	Alkohol [g/l]	Gesamtsäure [g/l]	Gesamt SO ₂ [mg/l]	Gerbstoffe [g/l]	Kalium [mg/l]	
Vergleich (GTP*)	82	11,1	0,22	99,0	6,7	85	0,26	498	2,3
Kontrolle (Maische gepumpt)	77	9,2	0,33	96,2	6,7	83	0,33	585	2,5
Maischeporation (Maische gepumpt)	79	8,6	0,57	98,9	6,8	92	0,38	776	1,3

*) Ganztraubenpressung
 **) Von den meisten Prüfern muss Rang 1 für die maischeporierte Variante vergeben worden sein

Tab.3: Maischeporation zur Weißweinerzeugung (Riesling).

Bewährungsprobe in einer Apfelsaftkellerei in technischer und ökonomischer Hinsicht alle Erwartungen erfüllt hat. Mit Hilfe schnell repetierender hoher elektrischer Felder wird in einem patentierten Verfahren biologisches Zellgewebe effektiver geöffnet und auf diese Weise mit höherer Ausbeute (5–7 %) entsaftet.

Dies war nur mit der Entwicklung von speziellen Hochspannungs-

pulsanlagen hoher Leistung und Durchflussreaktoren möglich, die eine kontinuierliche Zellporation gestatten. Dabei wird die Maische mit bis zu 20-mal pro Sekunde einem Mikrosekunden langen elektrischen Puls von ca. 300 kV und 6 kA ausgesetzt. Die Maische erwärmt sich dadurch im Schnitt um wenige Kelvin, weswegen das Verfahren als nicht-thermisches bezeichnet werden kann. Es gelingt

meist eine bessere Entsaftung und eine effektivere Gewinnung wertvoller Inhaltsstoffe der Früchte, wie das auch in einer Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Weinbauinstitut in Freiburg für die Weinbeerenmaischen gezeigt werden konnte.

Literatur

- [1] C. Schultheiss, H. Bluhm, H.-G. Mayer, M. Kern, T. Michelberger, G. Witte, *Plasma Science, IEEE Transactionson*, Vol. 30 Issue 4, 1547–1551, 2002
- [2] M. Sack, C. Schultheiss, H. Bluhm, *IEEE Trans. Industry Applications*, 2005, pp. 725–733
- [3] H. Bluhm, W. Frey, C. Gusbeth, M. Sack, C. Schultheiss, *Nachrichten Forschungszentrum Karlsruhe*, Jahrg. 35, S. 105-110, Karlsruhe,3/2003
- [4] J.C. Weaver, Yu.A. Chizmadzhev, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* Vol. 41, 135–160, 1996
- [5] R.P. Joshi, K.H. Schoenbach, *Phys. Rev. Vol. 62, No.1,1025–1033*, 2000
- [6] J.C. Neu, W. Krassowska, *Phys. Rev. E, Vol. 59, No. 3, 1999*, 3471–3482