

Energetisch optimierte Aufkonzentrierung von Fruchtsäften

| Aromagewinnung | Energiekosten | MVR | TVR | Verdampferanlagen |

1 Einleitung

Wie in anderen Industrien sind auch für die Fruchtsaftindustrie steigende Energiekosten und die Forderung nach Reduktion des Primärenergieverbrauchs aktuelle Herausforderungen. Auch wenn die Preise für fossile Brennstoffe erfreulicherweise in den letzten Monaten vergleichsweise niedrig waren, so ist der mittel- und langfristige Trend eindeutig durch einen kontinuierlichen Anstieg gekennzeichnet. Bei der Verarbeitung von Früchten zu Fruchtsaftkonzentraten ist die Verdampfung der Prozessschritt mit dem mit Abstand höchsten Energieverbrauch. Für die nachhaltige Entwicklung eines Unternehmens sind deshalb mögliche Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs der Verdampferanlagen stets zu prüfen.

Damit sich die Investitionen in energiesparende Verdampfer lohnen, sind ausreichende jährliche Anlagenlaufzeiten erforderlich. Das erfordert flexible Anlagen, welche die Verarbeitung von verschiedenen Früchten je nach saisonaler Verfügbarkeit erlauben und deren Kapazität an die verfügbare Rohwarenmenge angepasst werden kann.

Im Folgenden werden Verdampferkonzepte vorgestellt, welche die besonderen Anforderungen der Fruchtsaftkonzentratherstellung (Vor- und Endverdampfung, Aromagewinnung, hohe Flexibilität) bei sehr hoher Energieeffizienz erfüllen. Insbesondere ist es gelungen, die energetisch hoch effiziente Technologie der mechanischen Brüdenverdichtung (MVR) für die Fruchtsaftkonzentratherstellung sinnvoll einzusetzen.

2 Verdampferkonzepte in der Fruchtsaftverarbeitung

Bei der Herstellung von Fruchtsaftkonzentraten werden die Saftinhaltsstoffe durch Abtrennung der entsprechenden Menge Wasser z.B. von 12 auf 70 % Trockensubstanz (Brix) aufkonzentriert. Dazu kommen nahezu ausschließlich Eindampfanlagen zum Einsatz. Da beim Verdampfungsprozess neben Wasser auch die wertvollen, leicht flüchtigen Aromastoffe praktisch vollständig abgetrennt

werden, müssen diese in geeigneten Aromaanlagen aus dem abgedampften Brüden möglichst vollständig aufgefangen, aufkonzentriert und als Aromakonzentrat separat abgeführt werden.

Alternative Verfahren, wie Gefrierkonzentrierung und Umkehrosmose, erreichen nicht die geforderten Endkonzentrationen und werden deshalb kaum eingesetzt.

2.1 Mehrstufige Verdampferanlagen

Grundsätzlich wird zur Verdampfung eines kg Wassers bei Siedetemperatur immer eine feste Energiemenge benötigt (2257 kJ/kg bei 100 °C). Diese Energie ist um ein Vielfaches höher, als zur Vorwärmung der Flüssigkeit auf Siedetemperatur benötigt wird. Bei Kondensation des Wasserdampfs wird diese Energie wieder abgegeben, sodass mit dem kondensierenden Dampf erneut ca. 1 kg Wasser verdampft werden kann, sofern eine für die Kondensation erforderliche Temperaturdifferenz zur Verfügung steht.

Dieses Prinzip macht man sich bei den weit verbreiteten mehrstufigen Verdampferanlagen zu Nutze: Nur die erste Stufe wird mit Kesseldampf beheizt und dabei ein Teil des Wassers aus dem Saft verdampft. Dieser Brüden wird zur Beheizung auf die zweite Stufe geleitet, wo er kondensiert und dadurch die Abdampfung einer ähnlich großen Wassermenge bewirkt. Damit die erforderliche Temperaturdifferenz zum Wärmeübergang vom kondensierenden Brüden auf den Saft gegeben ist, muss die zweite Stufe mit niedrigerem Druck und damit bei einer niedrigeren Verdampfungstemperatur betrieben werden. Dieses Prinzip kann über weitere Stufen fortgesetzt werden. Die mögliche Anzahl Stufen wird physikalisch durch die maximal zulässige Produkttemperatur in der ersten Stufe und erforderliche Temperaturdifferenzen zwischen den Stufen begrenzt, wobei die Erhöhung der Siedetemperatur durch die steigende Zuckerkonzentration ebenfalls zu beachten ist (ca. 6 °C bei 70 Brix). In der Praxis werden am häufigsten 4- bis 6-stufige Anlagen eingesetzt, bei sehr

großen Verdampfungsleistungen auch 7-stufige (Abb. 1). Der Brüden der letzten Stufe muss zur Aufrechterhaltung des Vakuums an einem üblicherweise mit Kühlturm- wasser gekühlten Kondensator niederge- schlagen werden. Unter Vernachlässigung des Dampfverbrauchs für eine eventuelle Vorwärmung des Produkts entspricht die Kondensatmenge ungefähr der gesamten Wasserverdampfung dividiert durch die Anzahl Stufen. Kondensatorgröße und Kühl- turmleistung sind entsprechend auszulegen.

Abb. 2 zeigt den Dampfverbrauch für Anlagen mit verschiedenen Stufenzahlen. Die letzte Stufe wird üblicherweise bei 100-150 mbar betrieben. Der niedrigste erreichbare spezifische Dampfverbrauch für mehrstufige Fruchtsaftverdampfer (7 Stufen) beträgt ca. 0,18 kg/kg. Diese Anlagen sind Stand der Technik und ermöglichen eine einfache Kom- bination von Vor- und Endkonzentrierung so- wie Aromagewinnung in einer Anlage.



Abb. 1: 6-stufige und 7-stufige Verdampferanlagen zur Herstellung von Apfelsaftkonzentrat mit einer Wasserverdampfung von 25 bzw. 50 t/h

2.2 Anlagen mit thermischer Brüdenverdichtung (TVR)

Eine einfache und kostengünstige Möglichkeit zur Ver- besserung der Energieeffizienz sind thermische Dampf- strahlverdichter. Dabei wird Brüden in einen Dampfstrahl- verdichter eingesaugt und mit Frischdampf z.B. im Verhält- nis 1:1,5 auf einen höheren Druck und damit eine höhere Heiztemperatur gebracht. Das verdichtete Brüden-/Dampf- gemisch wird dann wieder zur Beheizung der gleichen oder einer vorgeschalteten Stufe verwendet (Abb. 3). Auf diese Weise wird mit einer vergleichsweise geringen Investition eine Energieeinsparung erzielt, die der von ein bis zwei zusätzlichen Verdampferstufen entspricht.

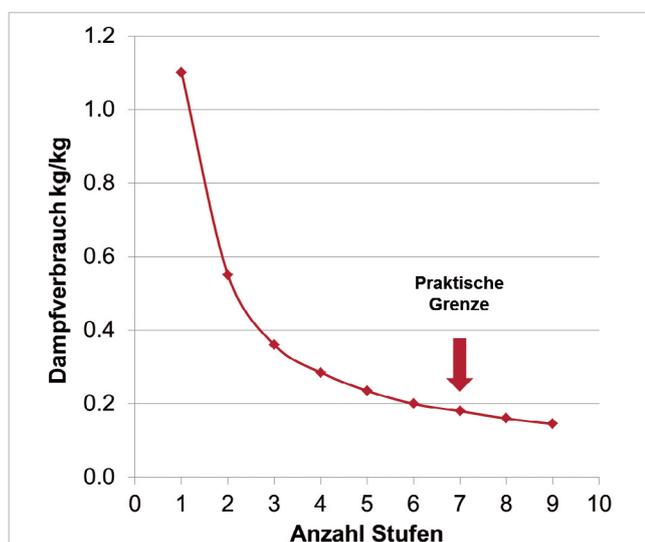


Abb. 2: Dampfverbrauch mehrstufige Verdampferanlagen

Den Vorteilen stehen aber gravierende Nachteile gegenüber:

Durch das Vermischen von Frischdampf mit Brüden entsteht ein Kondensat, welches nur bei Verwendung von "Lebensmitteldampf " im Produktionsprozess, z.B. zur Tresterextraktion oder Diafiltration, eingesetzt werden kann. Auch kann das Frischdampfkondensat i.d.R. nicht mehr zum Dampfkessel zurückgeführt werden und muss durch (teures) Kesselspeisewasser ersetzt werden. Soll während des Eindampfprozesses Aroma gewonnen werden, bedarf es zudem spezieller Prozessführungen. Aufgrund des Funktionsprinzips können Dampfstrahler nur in einem engen Bereich um den Auslegungspunkt betrieben werden. Dadurch wird der Betrieb der Anlage unflexibel, Mindermengenfahrweisen sind nur sehr begrenzt möglich. Thermische Brüdenverdichter sind außerdem extrem laut.

2.3 Anlagen mit mechanischer Brüdenverdichtung (MVR)

Bei der MVR-Technologie werden die Brüden mit einem mechanisch angetriebenen Kompressor auf ein höheres Druckniveau verdichtet.

Das Arbeitsprinzip der mechanischen Brüdenverdichtung kann anhand des Mollierdiagramms erklärt werden (Abb. 4):

1. Der gesättigte Brüden wird mechanisch verdichtet zu einem überhitzten Dampf mit erhöhter Temperatur und Enthalpie

2. Wasser (Kondensat) wird eingespritzt bis zur Sättigung → der Dampf kühlt ab, hat aber immer noch eine höhere Temperatur und Enthalpie als vor der Verdichtung
3. Der verdichtete und gesättigte Dampf wird zur Heizseite des Verdampferkörpers geleitet, wo er kondensiert und die Verdampfung einer ähnlich großen Menge Wasser aus dem Saft auf der Produktseite bewirkt; der gebildete Brüden mit gleicher Temperatur und Enthalpie wie der ursprüngliche Brüden wird in den mechanischen Verdichter gesaugt, wodurch sich der energetische Kreislauf schließt.

Mechanische Brüdenverdichter werden in der Fruchtsaftindustrie im Gegensatz zu anderen Anwendungen, z.B. in der Milch- oder chemischen Industrie, bisher noch relativ



Abb. 3: Verdampferstufe mit TVR (thermal vapour recompression)

selten eingesetzt. Die Gründe hierfür sind die erforderliche Aufteilung in Vor- und Endverdampfung, der oftmals nur saisonale Betrieb der Anlagen und technische Komplikationen, die sich aus der Gewinnung der wertvollen Fruchtaromen ergeben.

Die ersten MVR-Verdampfer für Fruchtsaft wurden zu Beginn der 1980er Jahre mit schnellrotierenden Turboverdichtern (15000-20000 UpM) ausgeführt. Seit 10-15 Jahren kommen für diese Applikation praktisch nur noch direkt angetriebene Radialverdichter (Ventilatoren) zum Einsatz

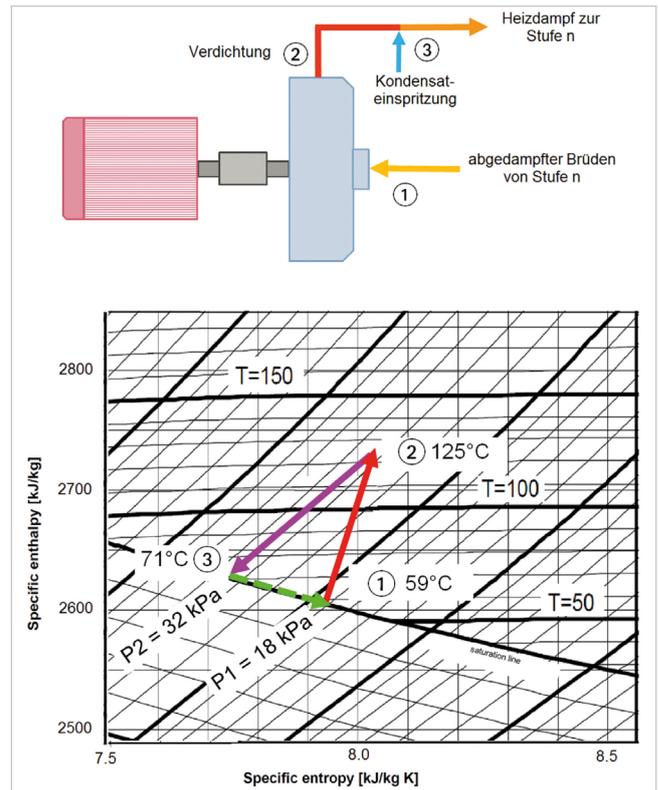


Abb. 4: Prinzip der mechanischen Brüdenverdichtung (MVR: mechanical vapour recompression)

(Abb. 5), weil sie sehr zuverlässig arbeiten, günstiger in Anschaffung und Wartung sind, eine höhere Energieeffizienz aufweisen und einfacher zu regeln sind.

Moderne Ventilatorverdichter haben energetische Wirkungsgrade von ca. 82 %. Einstufig erreichen sie nur eine Temperaturerhöhung (dT) von max. 8.5 °C, was zur Endkonzentrierung i.d.R. nicht ausreicht. Deshalb werden sie bis heute fast ausschließlich für reine Vorverdampfer eingesetzt. Bei erforderlichem höheren dT können 2 oder 3 Ventilatorverdichter seriell hintereinandergeschaltet werden (Tabelle 1).



Abb. 5: Ventilatorverdichter in einer Verdampferanlage

Tabelle 1: Typische Erhöhung Dampftemperatur mit mechanischer Verdichtung

Turboverdichter	12 - 18 °C
Ventilator, 1-stufig	6 - 8,5 °C
Ventilator, 2-stufig	12 - 17 °C
Ventilator, 3-stufig	18 - 25 °C

MVR-Anlagen haben den niedrigsten Energieverbrauch und damit auch die geringsten Betriebskosten aller Verdampfertypen. Durch die geringe Temperaturdifferenz zwischen Heizdampf und Produkt erfolgt die Verdampfung sehr produktschonend. Die Anpassung an Teillastbetrieb und Konzentration kann sehr einfach durch Regelung der Motordrehzahl erfolgen.

Nachteilig bei MVR-Anlagen ist, dass empfindliche Aromastoffe bei der Überhitzung des Dampfes während der Kompression z.T. zerstört werden können. Deshalb müssen diese vorgängig abgetrennt werden, z.B. in einer Stripkolonne. Endkonzentrationen >60 Brix erfordern zusätzliche Maßnahmen, um eine ausreichende Temperaturdifferenz zu erzielen, z.B. eine dampfbeheizte Endstufe oder mehrstufige Ventilatorverdichter. Schließlich werden aufgrund der geringen Temperaturdifferenz zwischen Heizdampf und Produkt relativ große Heizflächen benötigt.

3 Fruchtsaftverdampfer mit MVR: Fallbeispiele

Nachfolgend werden zwei Fallbeispiele von MVR-Verdampfern für unterschiedliche Anwendungen vorgestellt, die in den letzten Jahren realisiert wurden.

3.1 MVR-Vorverdampfer mit Stripkolonne zur Aromagewinnung

Abb. 6 zeigt die 3D-Ansicht eines MVR-Verdampfers zur Vorkonzentrierung von Saft mit integrierter Aromagewinnung.

Die Anlage nutzt eine Stripkolonne zur Aromaabtrennung. Der leicht vorkonzentrierte, aromafreie Saft wird in der MVR beheizten Hauptstufe in drei seriellen Durchläufen auf die gewünschte Ausgangskonzentration aufkonzentriert. Der sehr kleine Kondensator verdeutlicht die sehr hohe Energieeffizienz der Anlage, weil nur hier ein kleiner Teil der zugeführten Energie verloren geht.

Die Anlage ist sehr flexibel: sie kann mit 65-100 % der Nennleistung betrieben werden, mit/ohne Entgasung sowie mit/ohne Aromagewinnung. Sie ist ausgelegt zur Vorkonzentrierung von 36,4 t/h Saft von 11 auf 22 Brix. 87 % der Verdampfung wird durch die MVR-Hauptstufe erreicht, wobei der Ventilatorverdichter einen Stromverbrauch von ca. 300 kW aufweist. Zusätzlich werden nur 1,8 t/h Dampf zur Erzeugung der Stripbrüden und für die

**From nature to taste ...
... Ihr Spezialist in Getränketechnologie**



**Obst-Annahmen und
Maischebereitung**



Universal Früchtepresse HPX



Membranfilter



**Saftbehandlung
mittels Adsorption**



**Verdampfung und
Aromarückgewinnung**



**Vakuum und
Gefriertrocknung**

BUCHER
unipektin

Bucher Unipektin AG
CH-8166 Niederweningen
Tel: +41 44 857 23 00
Fax: +41 44 857 23 41
info@bucherunipektin.com
www.bucherunipektin.com

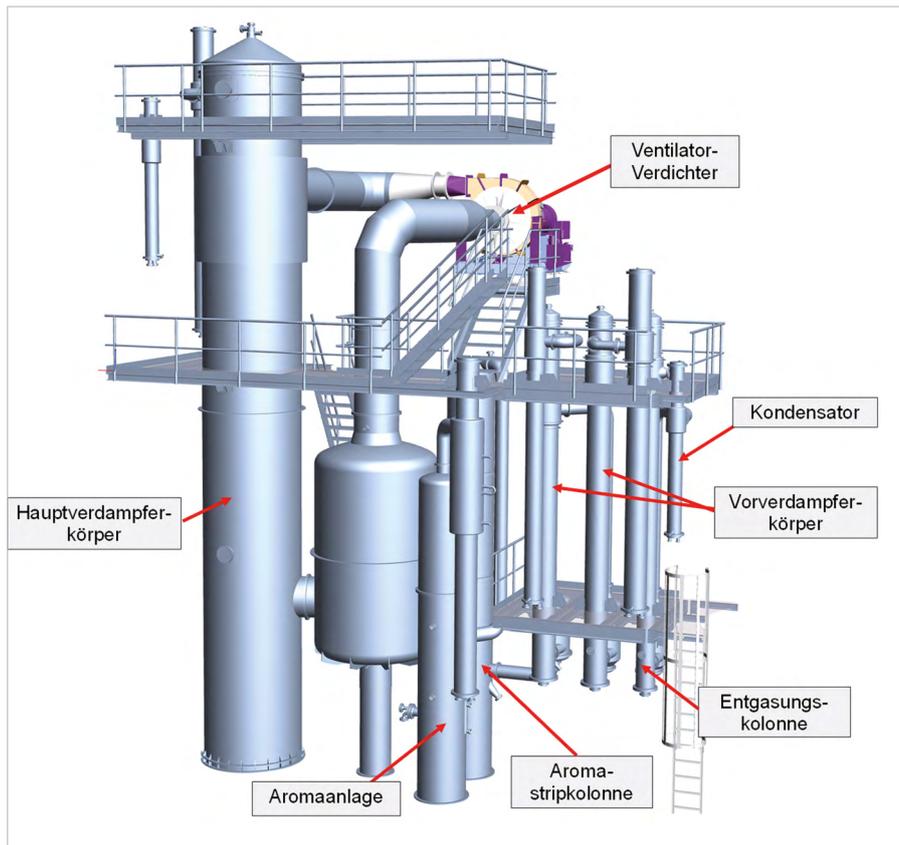


Abb. 6: Entaromatisierungs-/Vorkonzentrationsanlage mit 1-stufigem Ventilatorverdichter

Aromaanlage benötigt. Tabelle 2 fasst die Prozess- und Verbrauchsdaten zusammen.

Die Gesamtinstallation wird komplettiert durch einen 6-stufigen Endverdampfer (separate Anlage) zur finalen Aufkonzentrierung auf 70 Brix.

3.2 Kombierter Vor- und Endverdampfer mit MVR

Das folgende Fallbeispiel beschreibt eine kombinierte Anlage aus Vor- und Endverdampfer, welche mit einem mehrstufigen MVR nachgerüstet wurde.

Die ursprüngliche Anlage war eine kombinierte Anlage mit 1-stufigem Vorverdampfer, Stripkolonne zur Entölung, Aromaanlage, 3-stufigem Endverdampfer sowie thermischem Brüdenverdichter, eingesetzt zur Konzentrierung

Tabelle 2: Prozess- und Verbrauchsdaten Vorverdampfer Typ AS 3502 /180 Ve		
Zulauf	36,4 t/h	11 Bx
Ablauf	18,2 t/h	22 Bx
WVD Entaromatisierung	2,4 t/h	1,2 t/h Stripdampf
WVD Ventilatorstufe	16,8 t/h	
Dampfverbrauch	1,8 t/h	0,10 kg/kg
Stromverbrauch	320 kW	
Kühlturmleistung	256 MJ/h	

von Zitrusäften, Extrakten und Apfelsaft. Der Kunde suchte nach einer Möglichkeit zur Reduzierung des Energieverbrauchs, ohne die hohe Flexibilität der Anlage einzuschränken.

Erreicht wurde das Ziel durch den Einbau einer zusätzlichen Verdampferstufe und den Ersatz des TVR durch drei in Serie geschaltete Ventilatorverdichter. Ein 3-stufiger MVR war notwendig, um die erforderliche Temperaturerhöhung zwischen den Stufen 3 und Stufe 1 zu erzielen. Die Anlage ist damit nach unserem Wissen der erste Saftverdampfer, bei welchem ein 3-stufiger MVR eingesetzt wird.

In Tabelle 3 werden die Prozess- und Verbrauchsdaten vor und nach dem Umbau gegenübergestellt. Der Dampfverbrauch für die gesamte Wasserverdampfung von 30 t/h reduzierte sich von 5,8 t/h auf 1,7 t/h. Der spezifische Dampfverbrauch sank von 0,193 kg/kg auf extrem niedrige 0,057 kg/kg. Demgegenüber stieg der Stromverbrauch von 56 kW auf 590 kW. Die hohe Energieeffizienz zeigt sich insbesondere in der von 6700 MJ/h auf 250 MJ/h gesunkenen erforderlichen Kühlturmleistung.

Der spezifische Dampfverbrauch sank von 0,193 kg/kg auf extrem niedrige 0,057 kg/kg. Demgegenüber stieg der Stromverbrauch von 56 kW auf 590 kW. Die hohe Energieeffizienz zeigt sich insbesondere in der von 6700 MJ/h auf 250 MJ/h gesunkenen erforderlichen Kühlturmleistung.

Durch den erstmaligen Einsatz eines 3-stufigen Ventilatorverdichters ist es also gelungen, eine sehr flexible Anlage (unterschiedliche Produkte, variable Kapazität, Aromagewinnung mit/ohne Stripkolonne) zu bauen, welche die sehr hohe Energieeffizienz der MVR-Technologie über den gesamten Konzentrationsbereich (Vor- und Endverdampfung) nutzbar macht.

4 Wirtschaftlichkeit von MVR-Verdampfern

Im Vergleich zu klassischen 5- oder 6-stufigen Verdampfern erfordern MVR-Verdampfer eine um 20-80 % höhere

Tabelle 3: Prozess- und Verbrauchsdaten Kombiverdampfer vor/nach Umbau		
	vor Umbau	nach Umbau
WVD	30,0 t/h	30,0 t/h
Dampfverbrauch	5,8 t/h	1,7 t/h
Dampfverbrauch, spezifisch	0,193 kg/kg	0,057 kg/kg
Stromverbrauch	56 kW	590 kW
Kühlturmleistung	6700 MJ/h	250 MJ/h

Tabelle 4: Betriebskosten der Anlage aus Fallbeispiel 2; Betriebsdaten gemäß Tabelle 4

	vor Umbau	nach Umbau
Dampfkosten, spezifisch	30 EUR/t	30 EUR/t
Stromkosten, spezifisch	0,10 EUR/kWh	0,10 EUR/kWh
R (Dampf/Strom)	300	300
Betriebsstunden	6000 h/Jahr	6000 h/Jahr
Dampfkosten	1.044.000 EUR/Jahr	306.000 EUR/Jahr
Stromkosten	33.600 EUR/Jahr	354.000 EUR/Jahr
Summe Dampf+Strom	1.077.600 EUR/Jahr	660.000 EUR/Jahr
Einsparung		-417.600 EUR/Jahr

Investition. Damit sich diese Mehrinvestition wirtschaftlich lohnt, müssen die Einsparungen bei den Betriebskosten die höheren Kapitalkosten kompensieren.

Die Betriebskosten eines Verdampfers werden wesentlich durch die Energiekosten bestimmt. Andere variable Kosten (Wasser, Unterhalt, Personal, ...) sind weit weniger relevant und unterscheiden sich auch nicht stark zwischen den Technologien. Da bei der MVR-Technologie neben der Reduktion des absoluten Energieverbrauchs eine Verschiebung von Dampf- zu Stromverbrauch erfolgt, bestimmt das Kostenverhältnis dieser beiden Energiearten neben der jährlichen Betriebszeit entscheidend, ob die MVR-Technologie sich rechnet. Das Kostenverhältnis „R“ ist definiert als das Verhältnis der Kosten für 1 t Dampf dividiert durch die Kosten für 1 kWh Strom. Nach unseren Erfahrungen wird die MVR-Technologie wirtschaftlich interessant bei $R > 250$ und jährlichen Betriebszeiten von > 3000 h.

In Tabelle 4 werden die Betriebskosten der Anlage aus Fallbeispiel 2 vor und nach dem Umbau gegenübergestellt.

Das Energiekostenverhältnis R bei dem Kunden beträgt $R=300$ und die Anlage wird sehr hohe 6000 h pro Jahr betrieben. Mit den Betriebsdaten (Tabelle 4) ergibt sich damit eine Reduktion der Dampfkosten von EUR 1.044.000 auf EUR 306.000 und ein Anstieg der Stromkosten von EUR 33.600 auf EUR 354.000. In Summe beträgt die Energiekosteneinsparung EUR 417.600 pro Jahr. Mit einer Verzinsung von 6 % auf 50 % der Investition resultiert damit ein ROI für die Modifikation von nur 2 Jahren.

In diesem Fall resultiert die sehr kurze Amortisationszeit aus der sehr hohen jährlichen Betriebszeit von 6000 h. Für Neuanlagen ergeben sich akzeptable Amortisationszeiten i.d.R. aber bei wesentlich kürzeren jährlichen Betriebszeiten, z.B. ab 3000 h/Jahr, weil die Mehrinvestition für einen MVR-Verdampfer gegenüber einem konventionellen System relativ niedriger ist als die Nachrüstung einer bestehenden Anlage.

5 Zusammenfassung

Die Technologie der mechanischen Brüdenverdichtung hat das Potential, den Energieverbrauch von Fruchtsaftverdampfern signifikant zu senken. Der sinnvolle Einsatz dieser Technologie erfordert allerdings ein tiefes Verständnis der gesamten qualitativen und prozesstechnischen Anforderungen, die ein Verdampfer im Fruchtsaftprozess erfüllen muss. Insbesondere die Ausnutzung der hohen Energieeffizienz der MVR-Technik über den gesamten Konzentrationsbereich (Vor- und Endverdampfung) in Kombination mit der Gewinnung hochqualitativer Aromakonzentrate erfordert ausgefeilte, innovative Konzepte.

Der höheren Investitionen in einen MVR-Verdampfer stehen signifikant niedrigere Energiekosten gegenüber. Die Mehrinvestition amortisiert sich umso schneller, je höher das Verhältnis der spezifischen Kosten von Dampf zu Strom sowie die jährliche Betriebszeit ist.



Autoren:

Dr. Edgar Zimmer (links),
Leiter Technologie und Entwicklung

Dr. Hartmut Haverland,
Geschäftsführung

Michael Latz,
Leiter Konstruktion und Entwicklung
Bucher Unipektin AG