

Drehzahlregulierung von Kälteverdichtern mit intelligenten Frequenzumrichtern

Kostensenkung durch Energieeinsparung und Kühlgutqualitätsverbesserung

In einer Zeit allgemeiner Energieverteuerung und steigender Umweltauflagen ist es um so bedeutsamer geworden, Energie einzusparen.

Im Gegensatz zum Stufenschaltwerk ist die stufenlose Leistungsanpassung im Kältekreislauf durch Regelung der Verdichterdrehzahl mittels FU die optimale Lösung.

3.1 Einleitung

Die Verdichterleistung wird exakt an die erforderliche Kälteleistung angepasst, ohne den optimalen und gewünschten Arbeitspunkt zu verlassen. In Folge steigt die Leistungszahl der Kälteanlage und somit ihre energetische Effizienz.

Beim Einsatz von intelligenten Frequenzumrichtern (FU) werden durch die, auch bei Lastschwankungen der Kälteanlagen nahezu konstanten Systemdrücke u.a. folgende Vorteile erreicht.

Energieeinsparung durch:

- Anhebung der Verdampfungstemperatur
- Optimierung der Kondensationstemperatur
- Reduzierung des Vereisungsgrads des Verdampfers und verlängerte Abtauintervalle

Kühlgutqualitätsverbesserung

- Reduzierung von Temperaturschwankungen an den Kühlstellen
- Höhere und konstante relative Luftfeuchtigkeit
- Verbesserte Kühlgutqualität durch Gewichtsverlustreduzierung

Alle neuen Entwicklungen in der Kältetechnik sollten zum Ziel haben:

Energieoptimierte und qualitativ hochwertige Kälteanlagen zu bauen, um ein stabileres sowie reproduzierbares Raumklima zu schaffen, um die Lagerung von qualitativ hochwertiger Ware ohne Verlust und Qualitätsminderung zu ermöglichen.

Eine moderne drehzahlgeregelte Kälteerzeugung erfüllt weitgehendst diese Erwartungen.

Behandelt wird hier im Speziellen die Betriebskostensenkung.

Besonders zu nennen sind folgende Vorteile:

- Energieverbrauch wird deutlich gesenkt
- Kälteerzeugung wird sicher und stabil gehalten
- Gewichtsverluste der gelagerten Waren werden gemindert
- Kurze Amortisationsdauer

3.2 Betriebskostensenkung

Unter Betriebskostensenkung verstehen wir Energieverbrauchsreduzierung und Gewichtsverlustminderung des Kühlgutes.

Die Energieverbrauchssenkung teilt sich in zwei Arten:

- *Primäre* Energiekostensparnisse verbunden mit einer direkten Energieverbrauchssenkung bei der Kälteerzeugung
- *Sekundäre* Energiekostensparnisse durch eine Wirkungsgraderhöhung der Wärmetauscher an der Kühlstelle

3.3 Primäre Energiekostensparnisse

Der Einsatz von intelligenten Frequenzumrichtern (FU) in der modernen Kälteerzeugung ermöglicht im Gegensatz zu Einzelanlagen mit Ein/Aus Steuerverhalten oder Verbundanlagen mit Stufenschaltwerksteuerung eine genaue Anpassung der Kälteerzeugnisse an den aktuellen Kältebedarf. Anlagen mit einem Verdichter (Zweipunktsteuerung) oder Verbundanlagen mit mehreren Verdichtern (Stufenschaltwerksteuerung) verursachen durch das Zuschalten oder Abschalten von Verdichtern erhebliche Saugdruckschwankungen.

Kälteanlagen werden überwiegend zwischen 75 und 80 % des Jahres im Teillastbereich betrieben. Häufige Zu- und

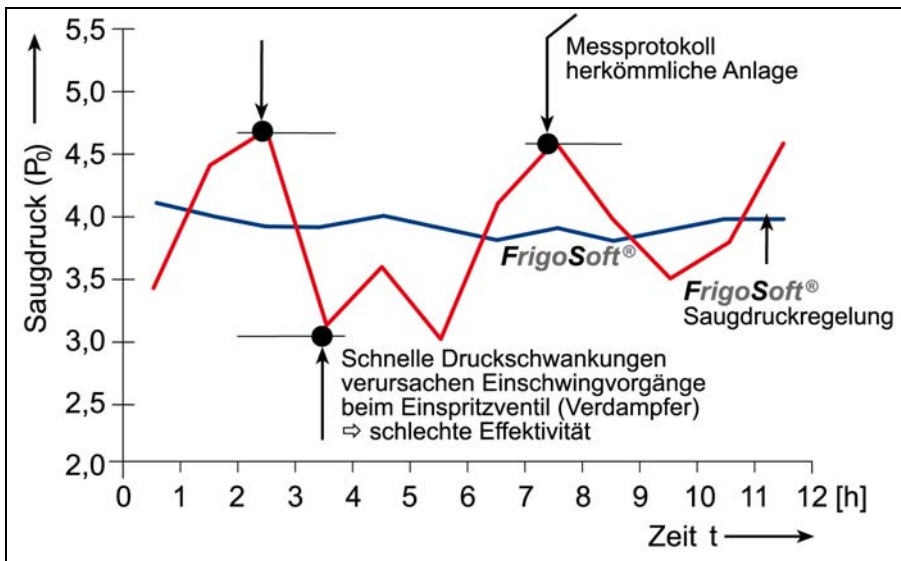


Bild 3.1: Druckverhältnisse in einer Anlage mit drei Kompressoren und einer Stufenschaltwerksteuerung und einer Anlage mit zwei Verdichtern und FU geregelt mit KIMO Frequenzumrichter

Abschaltungen von Kompressorstufen in einer Verbundanlage haben einen sehr negativen Einfluss auf die Energiebilanz. Durch das Zuschalten einer weiteren Stufe in einer Verbundanlage mit Stufenschaltwerksteuerung wird in den meisten Fällen eine unnötig große Überleistung erzeugt, welche eine große Regelabweichung des Verdampfungsdrucks verursacht, siehe Bild 3.1.

Durch den Einsatz von intelligenten Frequenzumrichtern (FU) wird eine große Regelgenauigkeit erreicht. Die Verdampfungstemperaturabweichungen können im Vergleich zur Stufenschaltwerksteuerung um etwa 4-6 K verringert werden. Durch diese kleinere Regelbreite des Verdampfungsdrucks können im Teillastbetrieb ca. 16 - 25 % Energieersparnisse realisiert werden. Hier gilt

der Grundsatz 1 K höhere Verdampfungstemperatur bedeutet 3 - 4 % Energieersparnis.

Eine Erhöhung der Verdampfungstemperatur bedeutet eine Verbesserung des Verdichterwirkungsgrades durch Anhebung des Saugdruckes. Die resultierende Überleistung wird durch Drehzahlreduzierung ausgeglichen. Infolge dessen verringern sich die Kondensationsleistung und die Ventilatorleistung durch Reduzierung der Antriebsenergie.

Die sich ergebenden kleineren Druckdifferenzen im Verdichtungsprozess sind die Gründe für die deutliche energetische Verbesserung, welche Energieersparnisse im Bereich von 16-25 % ermöglichen.

Der Hauptgrund der Energieeinsparung

einer Kälteanlage liegt bei der besseren Ausnutzung durch Drehzahlregelung der Verdichterleistung.

Mit dem Frequenzumrichter und einer speziellen Software wird durch Lüfter-Drehzahlsteuerung ein konstanter Kondensationsdruck gehalten, der wiederum zusätzliche Energieeinsparungen durch konstanten Vordruck am Einspritzventil bringt, siehe Bilder 3.2 und 3.3.

Bei der Verflüssigerauswahl ist zu beachten, dass auch hier der Grundsatz 1 K niedrigere Kondensationstemperatur bedeutet 3-4 % Energieersparnis gilt.

Vorteile:

- Höhere Verdampfungstemperatur
- Niedrigere Kondensationstemperatur
- Steigende Leistungszahl der Kälteanlage

3.4 Sekundäre Energieersparnisse

Mit konstantem Verdampfungsdruck und Kondensationsdruck wird die Druckpendelung der thermischen Expansionsventile weitgehendst reduziert und eine optimale Verdampferfüllung mit Kältemittel erreicht. Die Verdampfer bringen ihre volle Leistung.

Die Temperaturdifferenz $\Delta t_{L1} - t_0$ verringert sich und der Vereisungsgrad der Verdampfer ist geringer. Es werden längere Kühlabstände erzielt und die Abtauhäufigkeit wird deutlich reduziert. Es empfiehlt sich zur weiteren Energieoptimierung der Einsatz eines adaptiven Abtaureglers, der eine Abtaunotwendigkeit erkennt und somit den Energieeintrag durch Abtaung wesentlich reduziert.

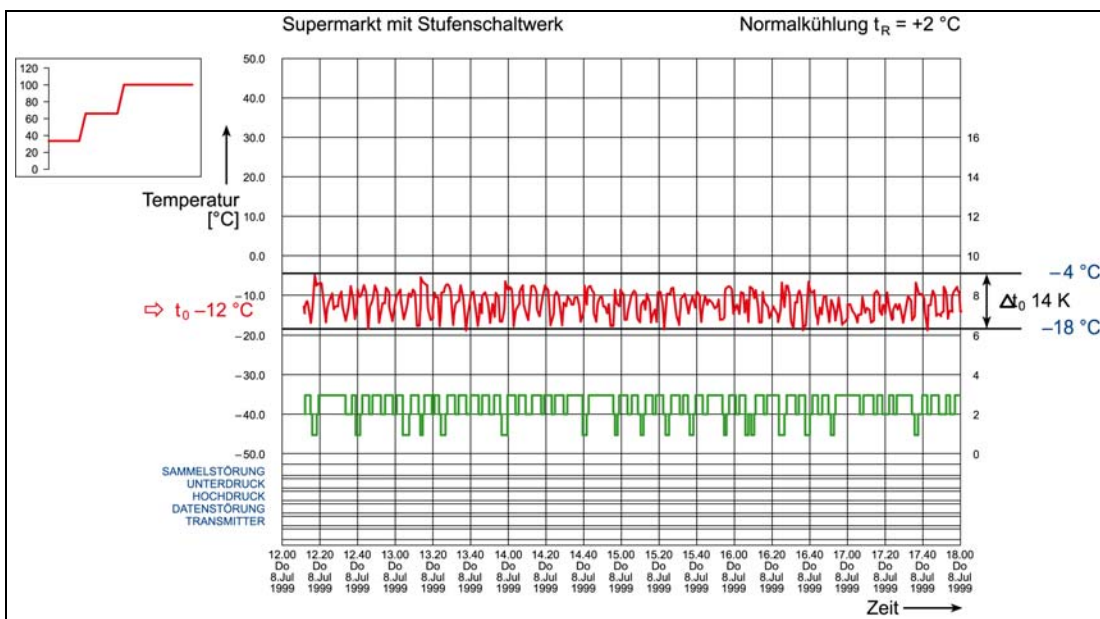


Bild 3.2: Saugdruckschwankung gemessen an einem Verbund in einem Supermarkt mit vier Verdichtern und einer Stufenschaltwerksteuerung

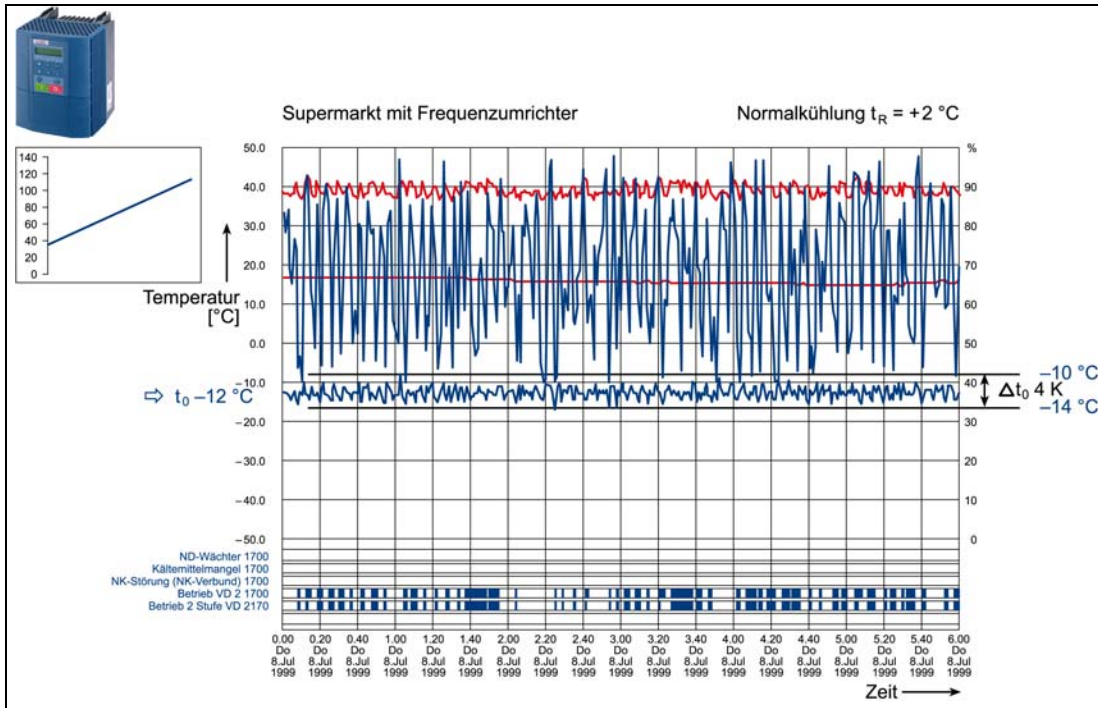


Bild 3.3:
Saugdruckschwankung
gemessen an einem
Verbund in einer großen
Gaststätte am
Hauptbahnhof Karlsruhe
mit zwei Verdichtern mit
KIMO FU geregelt

Unabhängig von der Bauart des Verdampfers, von wechselnden Betriebsbedingungen und vom Beschickungsgrad der Kühlstellen wird in jedem Betriebszustand selbstständig die optimale notwendige Kälteleistung ermittelt und der Kälteanlage zur Verfügung gestellt. Selbst Verbundanlagen mit einer größeren Anzahl von Verdichtern mit einer Stufenschaltwerksteuerung können nicht annähernd die Ergebnisse eines Verbundes mit zwei Kompressoren und intelligenten FUs erreichen, siehe Bilder 3.4 und 3.5.

Vorteile:

- Höherer Verdampferwirkungsgrad durch optimale Füllung des Verdampfers
- Geringere Vereisung des Verdampfers
- Verlängerte Abtauintervalle

3.5 Verbesserung der Kühlgutqualität

Für die meisten Obst- und Gemüsesorten wird eine Temperatur zwischen 0 °C und 3 °C je nach Einlagerungsware bei hoher Luftfeuchte und geringeren Temperaturschwankungen gefordert.

Zur Verlustminderung und Qualitätsverbesserung von empfindlichem Kühlgut wie Obst, Gemüse, Fleischwaren werden im Kühlraum (bzw. am Wärmeaustauscher) kleinere Temperaturdifferenzen gefordert. Am Lagergut dürfen keine wesentlichen Veränderungen auftreten wie z.B. Wasserverlust.

Wasserverluste sind Gewichtsverluste und damit von großer ökonomischer Wichtigkeit, sie können schnell zur Unverkäuflichkeit eines Produktes führen. 10 % Wasserverlust bei Möhren bedeu-

tet 100 % kommerziellen Verlust [1].

Eine der wichtigsten Ursachen für die Qualitätsminderung bei der Lagerung ist Wasserverlust des Lagergutes, der durch Diffusion von Wasserdampf aus der gelagerten Ware (wie Obst, Gemüse, Fleisch, Fisch, ...) in die Lagerluft entsteht. Treibende Kraft für Wasserverluste von Obst und Gemüse ist ein zu großes Dampfdruckdefizit zwischen dem Lagerraum und dem Inneren des Lagergutes [2].

Dampfdruckdefizite entstehen zum größten Teil durch Temperaturschwankungen im Lagerraum. Temperaturschwankungen sind wiederum das Ergebnis von unstabilem Saugdruck.

Temperatur und relative Feuchte im Lagerraum sind beide physikalische Größen, die nicht getrennt voneinander betrachtet werden können, weil sie sich

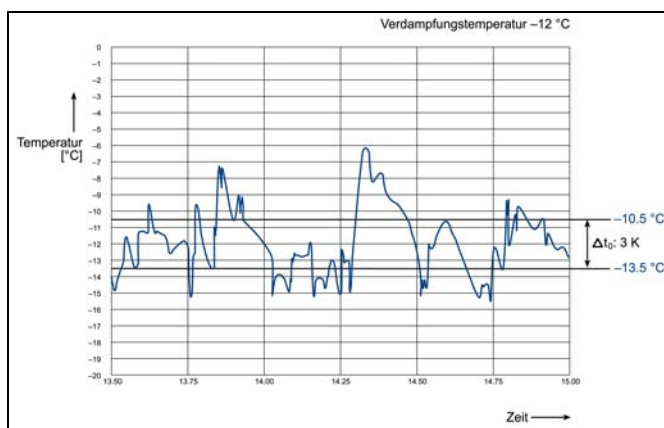


Bild 3.4: Saugdruckschwankungen gemessen an einem Verbund mit vier asymmetrischen Verdichtern und zehn binär geschalteten Stufen

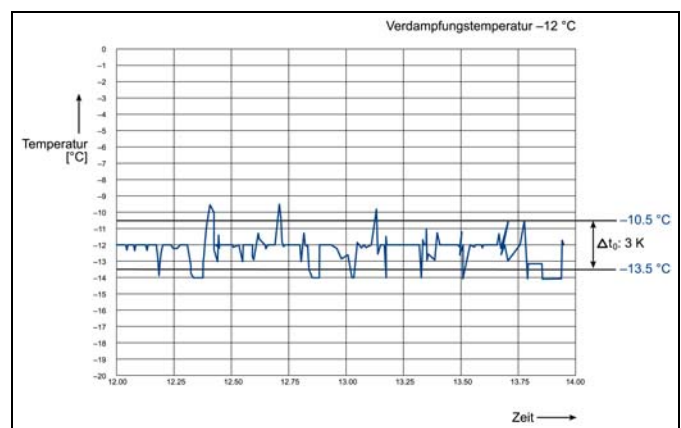


Bild 3.5: Saugdruckschwankungen gemessen an einem Verbund mit zwei Verdichtern mit KIMO FU geregelt

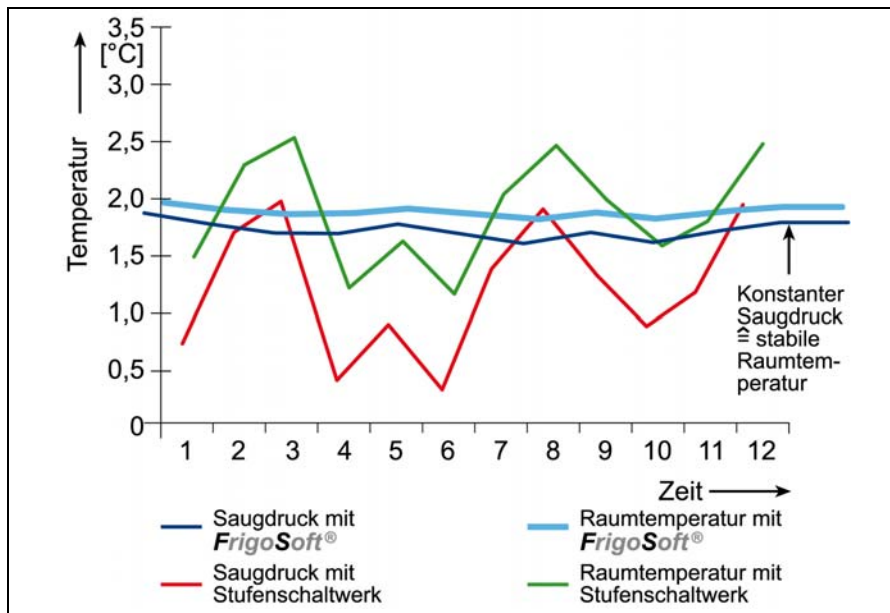


Bild 3.6: Temperaturverhältnisse::

- A) In einer Anlage mit einem Verbund mit drei Verdichtern und Stufenschaltwerksteuerung
 B) In einer Anlage mit einem Verbund mit zwei Verdichtern und mit KIMO FU geregelt

gegenseitig beeinflussen.

Raumtemperaturschwankungen bewirken zwangsläufig Schwankungen der relativen Feuchte. Sie sind in erster Linie von der Schalthysterese der Kälteerzeugung (Verbund) abhängig.

Starke Schwankungen der Verdampfungstemperatur t_0 sowie zu große Überhitzungswerte haben negative Auswirkungen auf die verdampferabhängigen Größen Temperatur und Luftfeuchte. Während des Kühlprozesses kondensiert das dem Lagergut entzogene Wasser an den Lamellenoberflächen des Verdampfers und gefriert bei tieferen Verdampfungstemperaturen t_0 . Die wieder in den Raum geblasene Kaltluft ist dem-

nach trocken und bereit, dem Lagergut erneut Feuchtigkeit zu entziehen. Dieser Effekt ist umso größer je größer die Temperaturdifferenz zwischen der Verdampfungstemperatur und dem zu kühlenden Lagergut ist.

Deshalb ist es notwendig, eine Kälteanlage mit geringstmöglichem Delta $t_{L1} - t_0$ zu betreiben.

Durch den nahezu konstanten Saugdruck beim FU-Einsatz verringert sich die Temperaturdifferenz Delta $t_{L1} - t_0$ eine höhere Luftfeuchtigkeit wird erzielt und somit eine geringere Austrocknung der gelagerten Ware, siehe Bild 3.6 und 3.7.

Mit FU betriebene Verbundanlagen sind in der Lage, sich selbständig adaptiv den

Laständerungen in Kühlräumen anzupassen. Aber kleine Temperaturdifferenzen sind nicht nur eine Frage eines stabilen Saugdrucks sondern auch eine Frage der Verdampferauswahl. Um den höchstmöglichen Nutzen der konstanten Saugdruckregelung mittels FU zu erzielen, sollten Verdampfer mit ausreichender Fläche und guter Raumlufteverteilung eingesetzt werden.

Der Einsatz von FU ist auch für die Nachrüstung bereits vorhandener Anlagen empfehlenswert und bringt folgende Vorteile:

- Reduzierung von Temperaturschwankungen an den Kühlstellen
- Höhere relative Luftfeuchtigkeit
- Verbesserte Kühlgutqualität
- Gewichtsverlustminderung

3.6 Amortisation

Es gibt unterschiedlichste Arten von Amortisationsrechnungen. In den meisten Fällen handelt es sich um die Dauer der Rückzahlung von Mehrinvestitionskosten bei Kälteanlagen.

Beim Einsatz von FU können wir nicht mehr von Investitionskosten sprechen.

Werden für einen klassischen Verbund mit Stufenschaltwerk drei bis vier Verdichter benötigt, reichen für einen mit FU geregelten Verbund zwei Verdichter. Die Verdichter werden nur geringfügig größer dimensioniert, weil die Leistung eines mit FU geregelten Kolbenverdichters sich bei 60 Hz Betrieb um ca. 20 % erhöht, und die eines Schraubenverdichters gar um 50 % bei z.B. 75 Hz Betrieb [3].

Es entstehen somit keine Mehrinvestitionskosten für FU geregelte Anlagen. Man kann davon ausgehen, dass die Investitionskosten gleich bzw. geringer ausfallen als bei Stufenschaltwerk gesteuerten Anlagen.

FU geregelte Anlagen ermöglichen nicht nur beachtliche Energieersparnisse von 16 - 25 % gegenüber Stufenschaltwerk gesteuerten Anlagen [4] und bis zu 40 % gegenüber Einzelverdichtern mit Zweipunktsteuerung (Ein/Aus). Sie ermöglichen beträchtliche wirtschaftliche Gewinne durch Gewichtsverlustminderungen, die wir in unserer Folgerung näher erläutern.

3.7 Schlussfolgerung

Ob für Kurzzeitzlagerung, Langzeitzlagerung oder auch für Supermärkte oder sonstige Kälteanlagen, 16-25 % Energieersparnisse wirken sich angesichts konstant steigender Energiekosten sehr positiv auf den wirtschaftlichen Betrieb einer Kühlanlage aus.

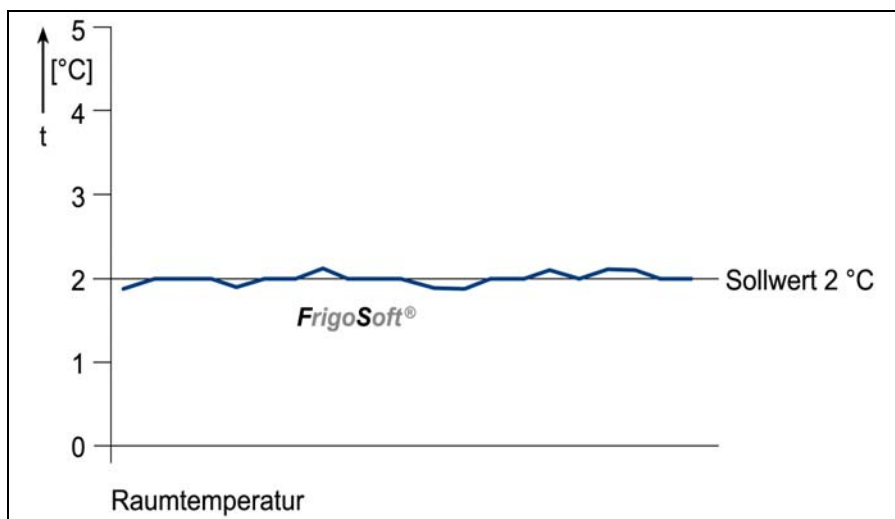


Bild 3.7: Raumtemperaturprofil in einer Anlage mit einem Verbund mit zwei Verdichtern und mit KIMO FU geregelt

Lager A: Starke Saugdruckschwankungen (z. B. Verbund mit Stufenschaltwerksteuerung)			
Lager B: Nahezu konstanter Saugdruck (z. B. Verbund mit Frequenzumrichterregelung)			
		Lager A	Lager B
Wert bei Einlagerung	€/t	253,00	253,00
Warenschwund	%	18	3
Kosten bei Auslagerung	€/t	308,53	260,82
Realisierter Marktpreis	€/t	300,00	300,00
Gewinn/Verlust	€/t	-8,53	+39,18

Tabelle 1: Auswirkung des Lagerklimas auf die Wirtschaftlichkeit

Gewichtsverlustminderungen von empfindlichem Kühlgut wie Obst, Gemüse, Fleischwaren, haben eine vielfache positive Auswirkung auf die Betriebswirtschaftlichkeit einer Unternehmung. Unterschiedliche Versuche und Berichte aus der Praxis zeigen, dass Kälteanlagen mit großen Saugdruckschwankungen Lagerschwund durch Warenaustrocknung von bis zu 18 % verursachen können [1].

Dagegen wird in Anlagen mit konstant gehaltenem Saugdruck, (wie z.B. bei **FU** geregelten Anlagen), der Lagerschwund auf 3 % reduziert [1].

Am Beispiel eines Gemüselagers mit fünf Räumen á je 200 Tonnen Fassungsvermögen (insgesamt 1000 Ton-

nen) wollen wir in der nachstehenden Berechnung den wirtschaftlichen Einfluss auf die Warenaustrocknung aufzeigen, siehe Tabelle 1.

Dem Beispiel zufolge würden in einem Lager mit 1000 Tonnen Gemüse aus Warenverlusten folgende Betriebsergebnisse erzielt:

Im Lager A ein *negatives* Betriebsergebnis von: $1000 \text{ t} \times (-8,53 \text{ €/t}) = -8.530,00 \text{ €}$

Im Lager B ein *positives* Betriebsergebnis von: $1000 \text{ t} \times (+39,18 \text{ €/t}) = +39.180,00 \text{ €}$

Würde beim Einsatz von Frequenzumrichtern zusätzlich 25 % Energie gespart, würde sich das bereits positive Betriebs-

ergebnis für das Lager B um ca. 12,66 % erhöhen, siehe Tabelle 2.

Bei 25 % Energieeinsparung wird der betriebswirtschaftliche Erfolg deutlich gesteigert, erst recht bei konstanten Energiepreissteigerungen in der Zukunft.

3.8 Literatur

- [1] Weichmann, J.: Kühlräume für Obst und Gemüse - Einfluss des Raumklimas auf die Kühlqualität. Küba Symposium (1992)
- [2] Seisenberger, M.: Untersuchung zur Verbesserung des Lagerklimas für Gemüse. Dissertation (1996) TU München
- [3] Bouchareb, M., Gibson, J., Lubich, F.: Drehzahlregelung von Kälteverdichtern mit intelligenten Frequenzumrichtern - Auslegungskriterien und Erfahrungen, KI Luft- und Kältetechnik 39 (2003) 1, S. 25
- [4] Bouchareb, M., Gibson, J., Lubich, F.: Drehzahlregelung von Kälteverdichtern mit intelligenten Frequenzumrichtern - Planung und Ausführung, KI Luft- und Kältetechnik 39 (2003) 4, S. 180

3.9 Schlüsselwörter

Kälte
Verdichter
Frequenzumrichter
Regelung
Energie

Lager B: Nahezu konstanter Saugdruck (z.B. Verbund mit Frequenzumrichter-Regelung)							
Energieersparnis		0%	5%	10%	15%	20%	25%
Einlagerungskosten	€/t	253,00	252,05	251,09	250,12	249,15	248,18
Kosten/Preis bei Auslagerung							
Kosten (bei 3% Verlust)	€/t	260,82	259,85	258,86	257,86	256,86	255,86
Realisierter Marktpreis	€/t	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
Gewinn	€/t	39,18	40,15	41,14	42,14	43,14	44,14

Tabelle 2: Auswirkung der Energieeinsparung im Lager B auf die Wirtschaftlichkeit