

# Kühlen und Gefrieren von Lebensmitteln

**Volker Gaukel**

Kühl- und Tiefkühlprodukte nehmen in der heutigen Ernährung einen immer größeren Raum ein. Kühlen und Tiefgefrieren von Lebensmitteln werden als die Konservierungsverfahren angesehen, bei denen die sensorisch und ernährungsphysiologisch wichtigen Eigenschaften eines Lebensmittels am besten erhalten bleiben. Gekühlte und tiefgefrorenen Lebensmittel sind jedoch keine »Sterilprodukte«. Ihre mikrobiologische, ernährungsphysiologische und sensorische Qualität und damit ihre Haltbarkeit hängt vom Produkt selbst, von der Vorbehandlung, den Kühl- und Gefrierbedingungen und den Lagerbedingungen ab. Beim Kühlen und Gefrieren werden die meisten Verderbsvorgänge durch die Temperaturabsenkung lediglich verlangsamt. Beim Gefrieren kommt es außerdem zu strukturellen Veränderungen im Produkt. Die Beschreibung der Wirkungen des Kühlens und Gefrierens auf Lebensmittel und deren Qualität ist Inhalt dieses Beitrages.

## **Begriffliches**

Grundsätzlich kann man ein Lebensmittel als gekühlt bezeichnen, wenn es auf eine Temperatur abgekühlt ist, die (deutlich) unter der Raumtemperatur liegt, ohne dass eine Phasenänderung (Eiskristallbildung) eintritt. Wird die Temperatur soweit abgesenkt, dass sich im Produkt Eiskristalle bilden, kann das Lebensmittel als gefroren bezeichnet werden.

In der Lebensmitteltechnik existieren die Begriffe Kühlen, Gefrieren, Tiefkühlen und Tiefgefrieren. Diese Begriffe sollen die unterschiedlichen Temperaturbereiche

in denen die Lebensmittel gelagert werden verdeutlichen und finden sich auch im allgemeinen Sprachgebrauch wieder.

## **Veränderungen in Lebensmitteln beim Kühlen und Gefrieren**

Kühlen und Tiefgefrieren von Lebensmitteln werden als die Konservierungsverfahren angesehen, bei denen die sensorisch und ernährungsphysiologisch wichtigen Eigenschaften eines Lebensmittels am besten erhalten bleiben. Beiden Verfahren ist gemeinsam, dass die Temperaturniedrigung zur Verlangsamung der physikalischen, chemischen und biochemischen Vorgänge führt und dadurch die Haltbarkeit der Lebensmittel verlängert wird. Da die Geschwindigkeit mit der die meisten qualitätsmindernden Vorgänge ablaufen mit sinkender Temperatur abnimmt, sind tiefgefrorene Lebensmittel in der Regel länger haltbar als gekühlte Lebensmittel. Eine Erniedrigung der Temperatur bewirkt im Allgemeinen eine Verlangsamung folgender Vorgänge:

- ▶ Mikroorganismenwachstum
- ▶ Biochemische und chemische Prozesse (z.B. Reifen von Fleisch, Oxidation von Fett, Stoffwechselfvorgänge, Farbveränderungen, Texturveränderungen)
- ▶ Physikalische Prozesse (z.B. Austrocknung, Kristallisation, Farbveränderungen, Texturveränderungen). Eine Ausnahme bildet z.B. die Fettoxidation, die durch die verminderte Wasseraktivität bei Temperaturen im Gefrierbereich schneller abläuft.

## **Gekühlte Lebensmittel**

Von gekühlten Lebensmitteln spricht man im Allgemeinen, wenn diese bei einer Temperatur zwischen +15 °C und der Temperatur des Gefrierbeginns des jeweiligen Lebensmittels (in der Regel -0,5 bis -2 °C) aufbewahrt werden. Diese Einteilung ist unabhängig von den vom BgVV empfohlenen oder durch Rechtsvorschriften geforderten Aufbewahrungstemperaturen für gekühlte Lebensmittel zu sehen. Je nach Produkt liegen diese zwischen +10 °C und 0 °C siehe Tabelle 5.

## **Gefrorene Lebensmittel**

Der Bereich des Gefrierens liegt zwischen der Temperatur des Gefrierbeginns des jeweiligen Lebensmittels (in der Regel -0,5 bis -2 °C) und -18 °C. Zu den Empfehlungen des BgVV und den von Rechtsvorschriften geforderten Temperaturen gibt Tabelle 6 Auskunft.

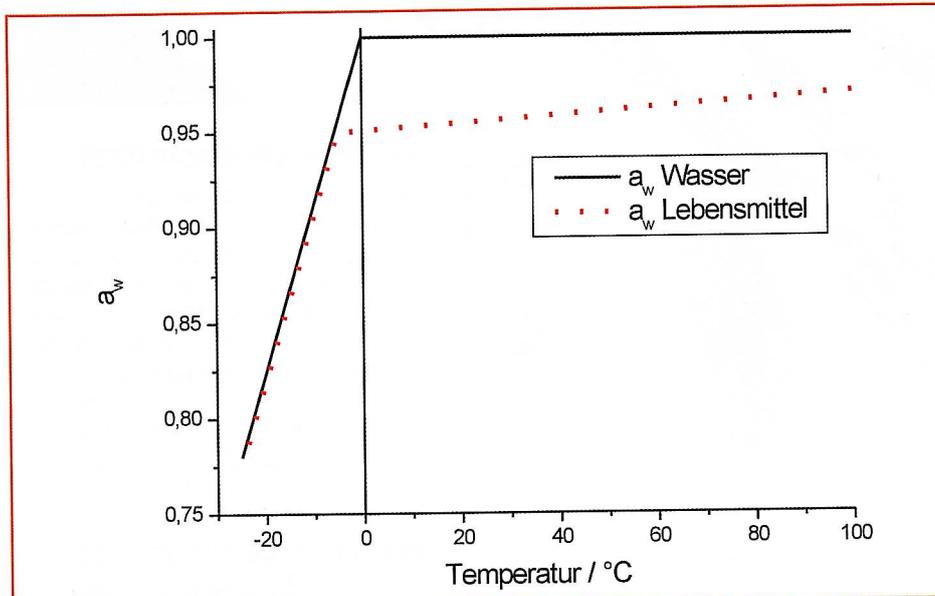
## **Tiefgefrorene bzw. tiefgekühlte Lebensmittel**

Als tiefgefrorene oder tiefgekühlte Lebensmittel werden Lebensmittel bezeichnet, die in der Regel bei oder unterhalb von -18 °C gelagert werden. Die gesetzlichen Regelungen hierzu sind in der Verordnung für tiefgefrorene Lebensmittel (TLMV) festgehalten. Diese gilt für alle Lebensmittel außer für Speiseeis. Daher kann Speiseeis sowohl gefroren als auch tiefgefroren angeboten werden. In der Regel wird verpacktes Speiseeis im Einzelhandel bei Temperaturen unter -18 °C, also tiefgefroren angeboten. Im offenen Verkauf hingegen ist Speiseeis bei -18 °C zu fest und nicht gut portionierbar und wird daher im gefrorenen Zustand angeboten. Die vom BgVV empfohlenen Höchsttemperaturen sind in Tabelle 6 dargestellt.

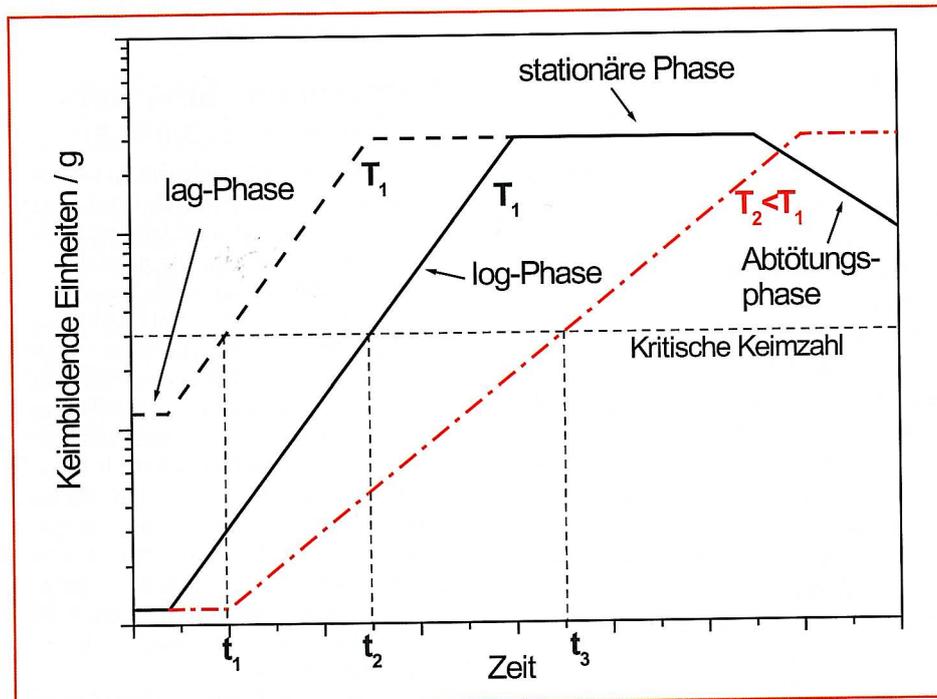
Sowohl gefrorene als auch in tiefgefrorene Produkte enthalten Eiskristalle. Die unterschiedliche Bezeichnung grenzt lediglich die Temperaturbereiche voneinander ab. Tiefgefrorene Lebensmittel werden jedoch häufig auch als tiefgekühlt bezeichnet. Dies ist nach TLMV möglich und im allgemeinen Sprachgebrauch üblich. Allerdings führt diese Bezeichnung manchmal in die Irre, da der Bereich für gekühlte Lebensmittel nur bis zum Gefrierbeginn des Lebensmittels reicht.

**Tab. 1: Temperaturabhängige Wachstumsgruppen von MO**

Gruppe	Temperaturbereich für das Wachstum / °C		
	minimal	optimal	maximal
Psychrophile MO	-15	15 - 20	30
Mesophile MO	10	30 - 35	45
Thermophile MO	45	50 - 65	80



**Abb. 1: Schematische Darstellung der Wasseraktivität eines Lebensmittels in Abhängigkeit von der Temperatur**



**Abb. 2: Schematische Darstellung typischer Wachstumskurven von MO und Zeit bis zum Erreichen einer kritischen Keimzahl**

## Mikrobiologische Veränderungen

Zu den Mikroorganismen (=MO) zählen Bakterien, Schimmelpilze und Hefen. Für den Verderb eines Lebensmittels kann der MO selbst (z.B. Salmonellen oder die beim Stoffwechsel entstehenden Toxine der MO (z.B. clostridium botulinum, sowie die

meisten Schimmelpilze und Hefen) verantwortlich sein. Das Wachstum der MO hängt von vielen Faktoren wie Zusammensetzung des Lebensmittels, Temperatur, Wasseraktivität, pH-Wert, Art und physiologischer Zustand der MO ab. Unter der Voraussetzung, dass alle anderen Faktoren für das MO-Wachstum optimal sind,

kann man MO in drei Temperaturgruppen einteilen (Tabelle 1).

Ein in Zusammenhang mit dem Kühlen und Gefrieren wichtiger Einflussfaktor ist auch die Wasseraktivität. Die Wasseraktivität eines Lebensmittels ist definiert als der Quotient des Wasserdampfdruckes über der Oberfläche des Lebensmittels  $p_{LM}$  und des Wasserdampfdruckes von reinem Wasser  $p_0$  bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen:

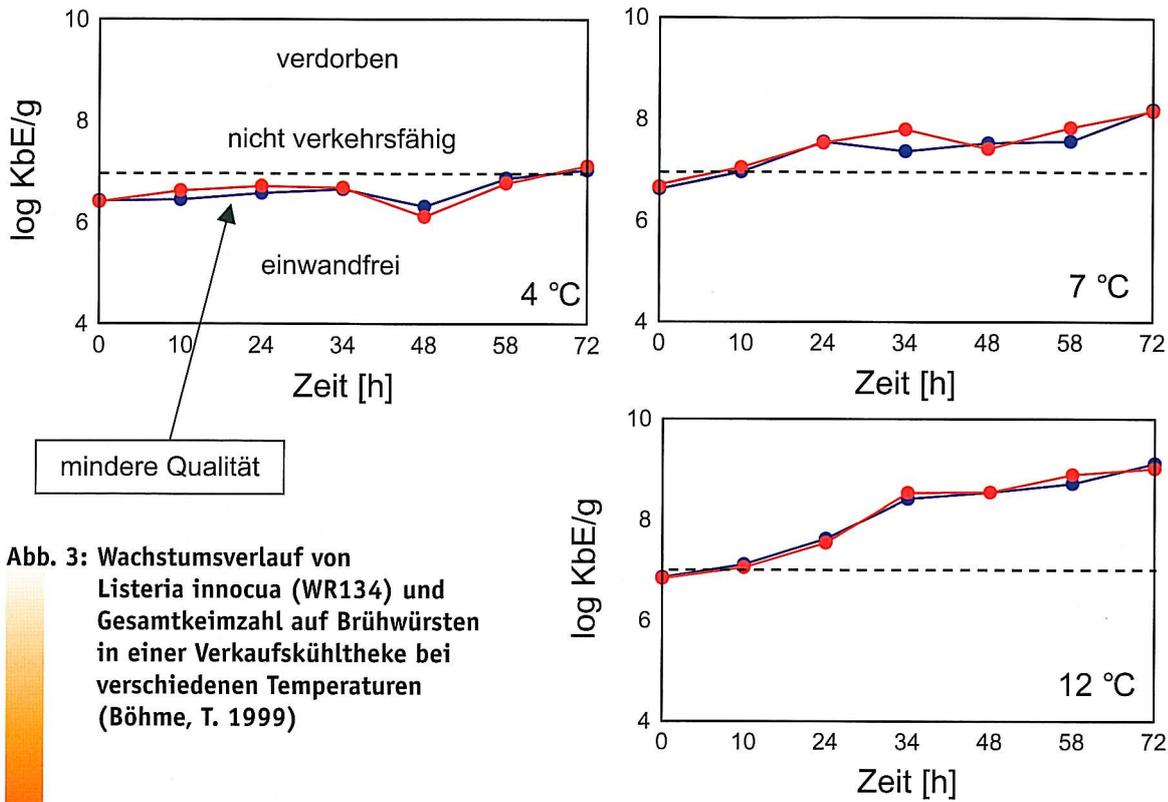
$$a_w = p_{LM}/p_0 \quad (1)$$

MO wachsen in einem  $a_w$ -Bereich zwischen 0,6 und 1. Die Wachstumsgeschwindigkeit nimmt mit fallendem  $a_w$  ab. Bei ansonsten optimalen Lebensbedingungen können die meisten Schimmelpilze noch bis zu einem  $a_w$  von 0,7, Hefen bis 0,8 und Bakterien bis 0,9 wachsen. Letztere sind jedoch lediglich Richtwerte, von denen einige Ausnahmen existieren.

In gefrorenem Zustand ist der Wasserdampfdruck über der Lebensmitteloberfläche gleich dem Wasserdampfdruck des Eises und somit der  $a_w$  nur noch abhängig von der Temperatur (Abb. 1). Daraus ergibt sich z. B. bei -18 °C temperaturbedingt ein  $a_w$  von ca 0,8.

Das MO-Wachstum verläuft typischerweise in vier Phasen. Zunächst eine Phase ohne Wachstum, die sogenannte lag-Phase. Die Länge der lag-Phase ist bedingt durch die Wachstumsbedingungen (Temperatur, pH,  $a_w$ , ...). Typischerweise ist die lag-Phase länger bei niedrigeren Temperaturen. Der lag-Phase folgt die logarithmische Wachstumsphase auch log-Phase genannt. Dies ist die eigentliche Wachstumsphase der MO. Die Wachstumsgeschwindigkeit ist auch in dieser Phase von den Wachstumsbedingungen abhängig und nimmt mit sinkender Temperatur ab. Dies gilt natürlich nur für Temperaturen unterhalb der optimalen Wachstumstemperatur (siehe Tabelle 1), wie sie üblicherweise bei gekühlten und gefrorenen Lebensmitteln vorliegen. Nach dieser Phase folgt eine stationäre Phase in der aufgrund von Nährstoffmangel kein weiteres Wachstum mehr möglich ist, Stoffwechselprodukte wie Toxine jedoch weiter angereichert werden. Dies erfolgt solange bis eine sogenannte Abtötungsphase beginnt, in der die MO-Zahl aufgrund der durch die MO selbst verursachten Änderung der Wachstumsbedingungen zurückgeht (Abb. 2).

Bei kühlgelagerten Lebensmitteln spielt daher die hygienische Herstellung (niedrige Anfangskeimzahl) der Produkte und die dauerhafte Einhaltung der geforderten Kühltemperatur eine wichtige Rolle. Bei



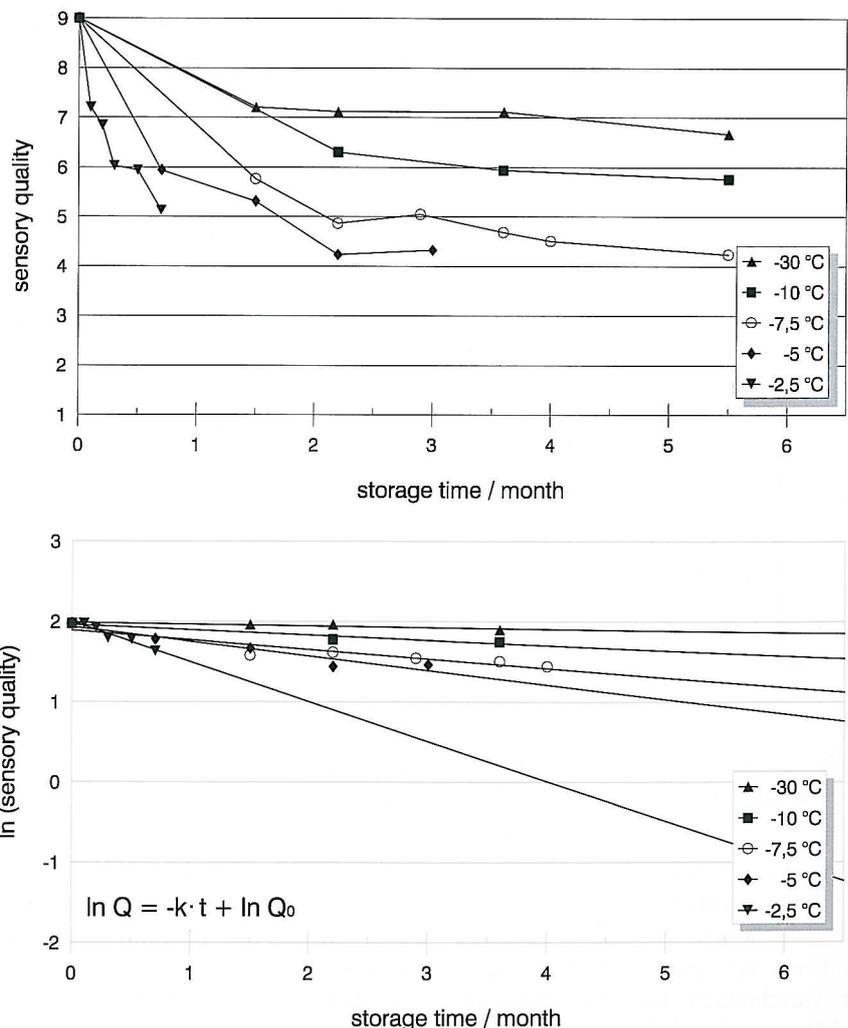
**Abb. 3: Wachstumsverlauf von *Listeria innocua* (WR134) und Gesamtkeimzahl auf Brühwürsten in einer Verkaufskühltheke bei verschiedenen Temperaturen (Böhme, T. 1999)**

einer niedrigen Anfangskeimbelastung ist die Zeit bis zum Erreichen einer bestimmten (kritischen) Keimzahl ( $t_2$ ) länger als bei höheren Anfangskeimzahlen ( $t_1$ ). Gleiches gilt für niedrigere Temperaturen ( $t_2 < t_3$ ). Die dauerhafte Einhaltung der Temperatur ist daher wichtig um einen niedrigen Keimgehalt beizubehalten. Bei einer Erhöhung der Temperatur für 24 h von 4 °C auf 7 °C erhöhte sich z. B. die Gesamtkeimzahl auf einer Brühwurst um etwa eine Zehnerpotenz von ca. 106,4 auf 107,4 KbE/g (Abb. 3) [BÖHME / TRIERWEILER / FECHLER, 1999]. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch für verpackte Schnittsalate gefunden.

Im Gegensatz zum Kühlen werden beim Gefrieren MO teilweise abgetötet. Die Zahl der Überlebenden MO ist jedoch groß, in der Regel sterben 10 bis max. 50 % der MO ab.

**Biochemische und chemische Veränderungen**

Zu den chemischen und biochemischen Veränderungen zählen unter anderem durch Enzyme katalysierte Reaktionen (Fettoxidation, Bräunungsreaktionen, Zucker- und Stärkeabbau) und der Abbau der meisten ernährungsphysiologisch wertvollen Inhaltsstoffen wie z.B. Vitamine (in der Regel durch Oxidation). Für die meisten dieser Prozesse gilt im Temperaturbereich zwischen 30 und -30 °C die Regel von Van't Hoff. Sie besagt, dass eine Temperaturabsenkung um 10 °C die Reaktionsge-



**Abb. 4: Einfluss von Lagertemperatur und Zeit auf die sensorische Qualität von tiefgefrorenen grünen Bohnen. Oben: Originaldaten; Unten: Anpassung an Pseudo- Reaktion 1. Ordnung (Spieß, W.E.L. 1998)**

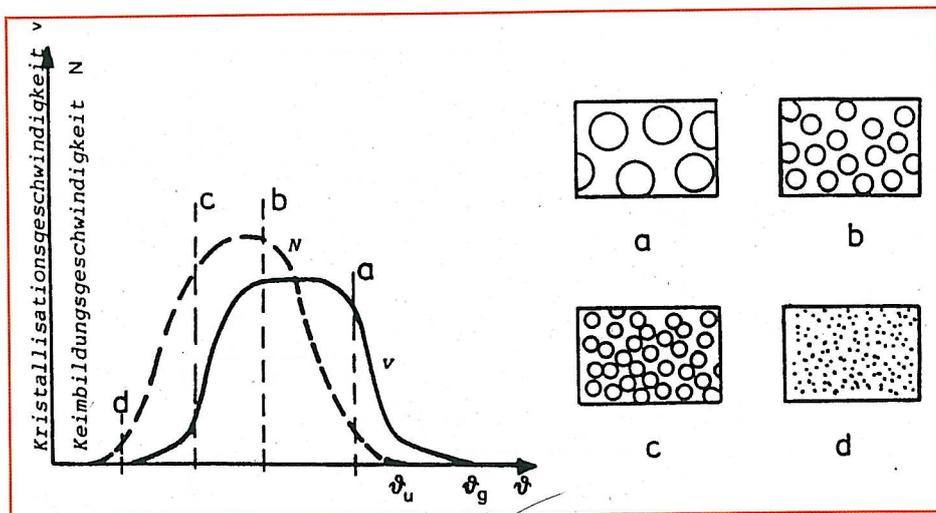


Abb. 5: Links: Kristallisationsgeschwindigkeit und Keimbildungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Unterkühlung; Rechts: Schematische Darstellung der Eiskristallgrößen (nach Tamman, G. 1903)

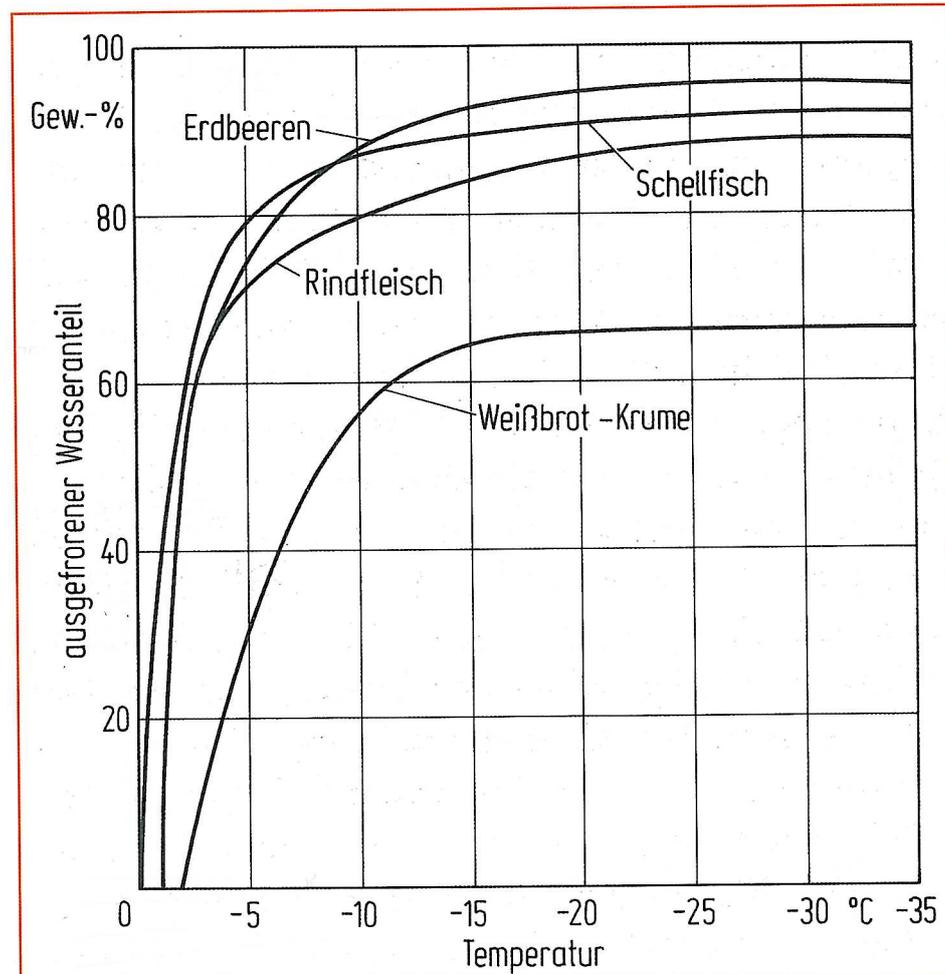


Abb. 6: Ausgefrorener Wasseranteil in Abhängigkeit von der Temperatur für verschiedene Lebensmittel (Heiss, R. 1994)

schwindigkeit etwa um die Hälfte bis ein Drittel senkt. Im Umkehrschluss wird hierdurch die mögliche Lagerdauer eines Lebensmittels verdoppelt bis verdreifacht. Durch Verschiebung der Reaktionsgleichgewichte entstehen bei gekühlten pflanzlichen Lebensmitteln viele der sogenannten Kaltlagerkrankheiten (z.B. Süßwerden von Kartoffeln).

Diese Regel gilt aber nicht uneingeschränkt. So können sich im Gefrierbereich durch das Aufkonzentrieren der Restlösung Reaktionsgeschwindigkeiten erhöhen. Auch im Kühlbereich gibt es Reaktionen die bei bestimmten Temperaturen ihre Maximalgeschwindigkeit erreichen (z.B. Stärkeretrogradation). Auch solche Reaktionen führen zu Kalt-

lagerkrankheiten. Weiterhin gibt es keine eindeutige Grenze ab der solche Prozesse nicht mehr ablaufen. So sind z.B. Lipasen und Lipoxidasen (Fettoxidation) noch bis -30 °C aktiv. Um speziell die Enzymtätigkeit in tiefgefrorenen Produkten zu vermindern werden diese daher häufig vor dem Einfrieren blanchiert, was zu einer Inaktivierung der Enzyme führt.

Da die sensorische Qualität eines Lebensmittels meist durch die Geschwindigkeit chemischer und biochemischer Prozesse bestimmt wird, kann man in Analogie zu der Reaktionsgeschwindigkeit dieser Reaktionen (meist Reaktionen 1. Ordnung) die Abhängigkeit der sensorischen Qualität von der Temperatur beschreiben als [SPIESS / BOEHME / WOLF, 1998]:

$$Q = Q_0 \cdot \exp(-k^* \cdot \exp(-\frac{E_a}{R \cdot T}) \cdot t) \Rightarrow \ln Q = -k \cdot t + \ln Q_0 \quad (2)$$

Hierin ist Q die Qualität, Q<sub>0</sub> die Ausgangsqualität, E<sub>a</sub> die Aktivierungsenergie, R die universelle Gaskonstante, T die Temperatur, k\* bzw. k die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante und t die Verweilzeit.

Am Beispiel von grünen Bohnen ist in Abb. 4 oben der Qualitätsverlust bei unterschiedlichen Lagertemperaturen dargestellt. Insgesamt kann in den ersten 2 Monaten ein etwas größer Qualitätsverlust festgestellt werden, als während der restlichen Lagerzeit. Die sensorische Qualität wurde in dem Beispiel nach der »Karlsruher Bewertungsskala« ermittelt. Die optimale Qualität ist hier Stufe 9, die minimale Stufe 1. Sinkt der Qualitätswert unter 6 ist der PSL-Bereich (Practical-Storage-Life) unterschritten. Bei einer Lagerung bei -10 °C ist dies bereits nach 3,5 Monaten der Fall. Mit steigender Lagertemperatur verkürzt sich diese Zeit deutlich. Die Anwendung der Qualitätsfunktion (2) auf diese Daten zeigt eine gute Übereinstimmung (Abb. 4 unten) [SPIESS / BOEHME / WOLF, 1998].

### Physikalische Veränderungen

#### Austrocknung

Sowohl gekühlte als auch gefrorene Lebensmittel erfahren während der Lagerung einen Masseverlust durch Austrocknen der Oberfläche. Der Wasserverlust (dm) pro Zeit (dt) kann beschrieben werden durch:

$$dm/dt = A \cdot \beta^* (p_{LM} - p_R) \quad (3)$$

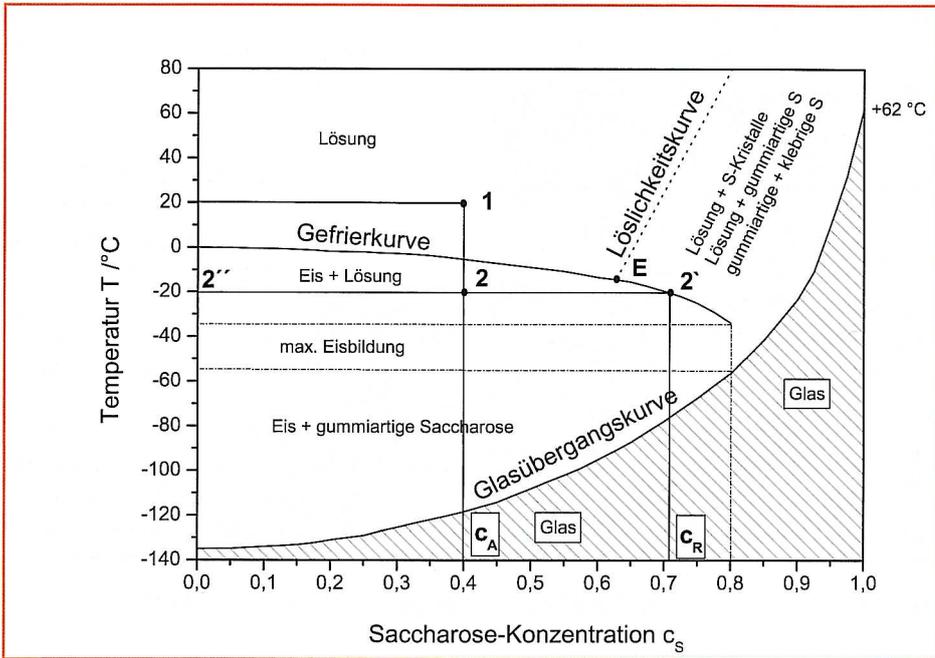


Abb. 7: Zustandsdiagramm Saccharose/Wasser

Hierin ist A die äußere Oberfläche des Produktes, ( der Stoffübergangskoeffizient,  $p_{LM}$  der Wasserdampfdruck an der Oberfläche A und  $p_R$  der Wasserdampfdruck der Raumluft. Demnach ist der Wasserverlust umso größer je größer die Oberfläche des Produktes ist, je größer die Wasserdampfdruckdifferenz und je größer der Stoffübergangskoeffizient ist. Durch ein gezieltes Befeuchten der Raumluft lässt sich die Wasserdampfdruckdifferenz reduzieren. Eine zu hohe Luftfeuchtigkeit beschleunigt allerdings den mikrobiologischen Verderb. Der Stoffübergangskoeffizient ist im Wesentlichen abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit der Raumluft und steigt

mit dieser an. Besonders unerwünscht ist die Austrocknung der Oberfläche während der Gefrierlagerung von Fleisch und Fisch, da hier mit der Austrocknung eine Denaturierung der Proteine erfolgt, was zum sogenannten Gefrierbrand führt. Aus diesem Grund sollten gekühlte und gefrorene Lebensmittel verpackt gelagert werden. Liegt allerdings bei gefrorenen Produkten die Verpackung nicht direkt am Lebensmittel an, kommt es aufgrund von unvermeidlichen Temperaturschwankungen auch hier zur Sublimation von Eis und damit zur Austrocknung sich in Verpackungshohlräumen nieder.

Anzeige

**Kristallisation**

Die Temperatur des Gefrierbeginns liegt für die meisten Lebensmittel aufgrund gelöster Salze, Kohlenhydrate und Proteine unter dem Gefrierpunkt des reinen Wassers zwischen  $-0,5$  und  $-2$  °C. Wird ein Lebensmittel unter die Temperatur des Gefrierbeginns gekühlt bilden sich Kristallisationskeime. Diese Keime wachsen dann zu Eiskristallen heran. Dies ist die eigentliche Kristallisation. Sowohl die Keimbildungsgeschwindigkeit als auch die Kristallisationsgeschwindigkeit sind von der Temperatur abhängig (Abb. 5 links). Bei niedrigen Unterkühlungen bilden sich wenig Kristallisationskeime, die dann weiter zu Eiskristallen anwachsen. Bei höheren Unterkühlungen bilden sich sehr viele Keime, die je nach Unterkühlung schneller oder langsamer weiterwachsen (Abb. 5 rechts). Zu Eiskristallen erstarrt jedoch nur das »freie« Wasser, also der Teil, der nicht an Proteine oder Kohlenhydrate gebunden ist. Der ausfrierbare Wasseranteil erstarrt außerdem nicht bei einer bestimmten Temperatur sondern über einen Temperaturbereich hinweg, wobei sich in der Regel die größte Eismenge bis ca.  $-5$  °C bildet (Abb. 6). Die sich bildenden Eiskristalle bestehen aus reinem Wasser, d.h. in der restlichen Gewebeflüssigkeit reichern sich die gelösten Stoffe an. Abb. 7 zeigt dies an der Zustandsänderung einer Saccharoselösung exemplarisch. Wird eine Lösung mit der Anfangskonzentration  $c_A$  und der Anfangstemperatur  $T_1$  (Zustand 1) auf die Temperatur  $T_2$  (Zustand 2) abgekühlt, so entsteht eine reine Eisphase und eine aufkonzentrierte Rest-

**TRANSVIENNA**  
INTERNATIONALE FACHMESSE  
FÜR TRANSPORT UND LOGISTIK

**PACKVIENNA**  
INTERNATIONALE FACHMESSE  
FÜR VERPACKUNG

**WORAUF WARTEN SIE?**

**16.09.2003...19.09.2003**

**Messezentrum Wien Neu**

auf [www.transvienna.at](http://www.transvienna.at)  
**ERMÄSSIGTE TICKETS**  
 auf [www.packvienna.at](http://www.packvienna.at)

**Jänner 2004:**  
Roadpricing auf allen Autobahnen.

**Jänner 2004:**  
Neue Transitregelung.

**Mai 2004:**  
EU-Osterweiterung.

**September 2003:**  
TransVienna, der neue Fachevent.

**TransVienna**  
bringt alles auf den Tisch, was sich in den Transport- und Speditionsbranchen ändern wird.

Rechtzeitig. Umfassend. International.  
Länger sollten Sie nicht warten!

[www.transvienna.at](http://www.transvienna.at)

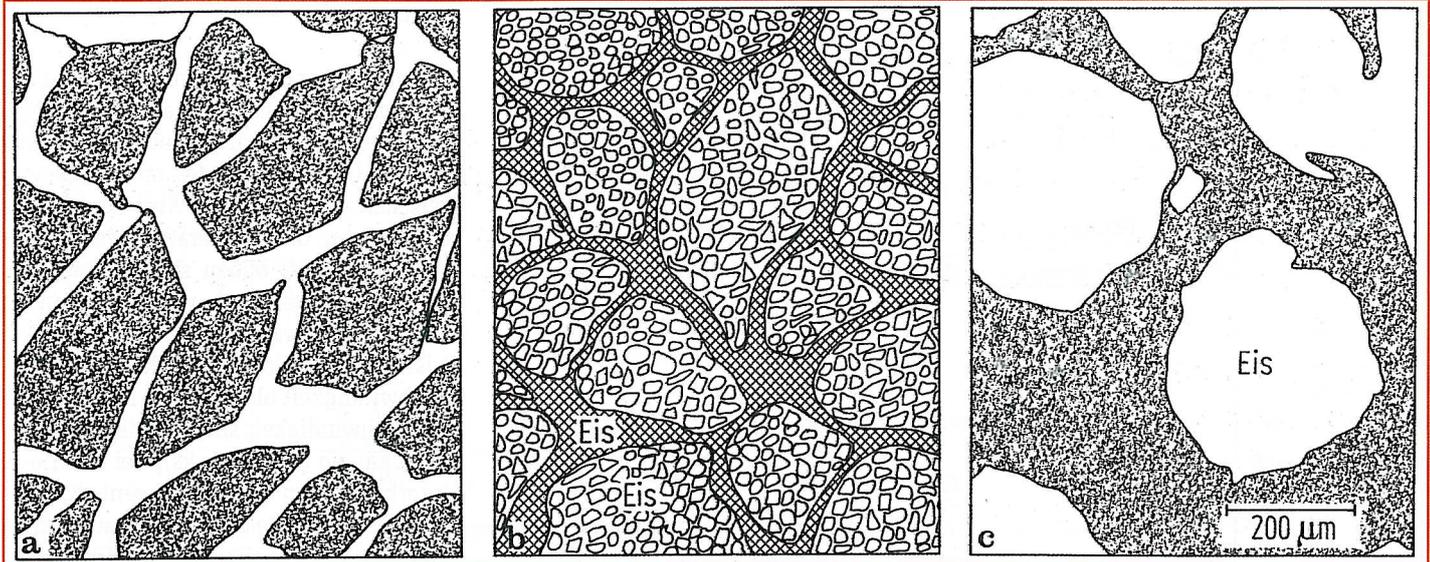


Abb. 8: Schematische Darstellung des Einflusses der Gefriereschwindigkeit auf Muskelgewebe (Fisch), a: ungefroren, b: schnell gefroren, c: langsam gefroren (Heiss, R. 1994)

lösung mit der Konzentration  $c_R$  (Zustand 2'). Unabhängig von der Konzentration der Ausgangslösung ist die Konzentration der Restlösung bei einer bestimmten Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes der Lösung immer gleich. Zur Ermittlung des Eisanteils (wird das sogenannte Hebelgesetz verwendet:

$$\epsilon = \frac{m_{\text{Eis}}}{m_R} = \frac{C_R - C_A}{C_A - C_2'} \quad (4)$$

Bei hinreichender Abkühlung wird die Konzentration der Restlösung so hoch, dass die Lösung in einen glasartigen Zustand übergeht. Im Glaszustand finden in einem für Lebensmittel relevanten Zeit-

rahmen keine Veränderungen im Produkt statt. Allerdings erreichen die meisten Produkte diesen Zustand erst bei Temperaturen von  $-40\text{ °C}$  und darunter. Außerdem sind solche Produkte extrem spröde und damit sehr bruchanfällig.

Um während des Gefrierens ein Entmischen von Lösungen zu vermeiden, muss möglichst schnell eingefroren werden. Besonders deutlich wird dies beim Gefrieren von pflanzlichem oder tierischem Gewebe. Die ersten Eiskristalle bilden sich dabei außerhalb der Zelle in den Zellzwischenräumen, da hier die Temperatur des Gefrierbeginns höher ist als in den Zellen. Dadurch nimmt die Konzentration ge-

löster Stoffe in der Gewebeflüssigkeit der Zellzwischenräume zu. Dies führt zu einem osmotischen Druckgefälle zwischen Zellen und Zellzwischenräumen. Beim langsamen Einfrieren bleibt dem Zellwasser ausreichend Zeit, um in die Zellzwischenräume zu diffundieren. Dieses Wasser steht dann für das weitere Wachstum der Eiskristalle in den Zellzwischenräumen zur Verfügung. Dadurch dehnen sich die Zellzwischenräume aus und die Zellen schrumpfen. Schreitet dieser Vorgang weiter fort, werden die Zellmembranen geschädigt und teilweise zerstört. Beim Auftauen kann dann das Zellwasser nicht resorbieren und läuft als Tropfsaft ab. Bei empfindlichen Produkten (z.B. Erdbeeren) resultiert eine zerstörte Gewebestruktur. Beim schnellen Einfrieren hingegen ist bei der Eiskristallkeimbildung die Unterkühlung ausreichend groß, sodass sich auch innerhalb der Zelle Eiskristalle bilden. Dies führt zu einer gleichmäßigen Kristallisation im Gewebe. Abb. 8 zeigt die Unterschiede schematisch. Nach dem Auftauen bleibt die Textur weitgehend erhalten und der Tropfsaftverlust ist geringer.

Mit der Eisbildung ist außerdem eine Volumenausdehnung verbunden. Diese reicht bei Lebensmitteln im Allgemeinen bis etwa 6%. Da der Wärmeentzug in der Regel von außen erfolgt, sind die Randschichten der Produkte bereits erstarrt, wenn die Ausdehnung aufgrund des Gefrierens des Kerns erfolgt. Ob ein Produkt in diesem Fall bricht, hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Die Sprödigkeit der Randschicht hängt im Allgemeinen von der Temperatur des Gefriermediums ab. Insbesondere beim Tauchen in flüssigen Stickstoff erstarren die Randschichten im Glaszustand, was häufig zu Rissen an der



Abb. 9: Vergrößerung des Eiskristallgefüges in einer 40 %-igen Saccharoselösung mit Zusatz von 0,2 % Na-alginat während der Lagerung bei sinusförmig schwankenden Temperaturen: Temperaturamplitude =  $4\text{ °C}$ , Periodendauer =  $1,5\text{ h}$ ,  $T_{\text{Mitte}} = -12\text{ °C}$ . (Gaukel, V. 1997)

Oberfläche oder zum Brechen des Produktes führt. Wichtig ist auch die Gesamtgröße des Produktes und das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, da der entstehende Innendruck umso höher ist, je größer die Dimensionen des Produktes sind.

**Rekristallisation**

Die Rekristallisation ist ein physikalischer Vorgang der während der Lagerung gefrorener Lebensmittel abläuft. Man versteht darunter das Wachstum der großen Eiskristalle auf Kosten der Kleinen. Treibende Kraft der Rekristallisation sind Wasserdampfpartialdruckunterschiede innerhalb der gefrorenen Matrix, aufgrund derer Wassermoleküle von kleineren zu größeren Eiskristallen diffundieren und sich berührende Kristalle schnell zusammenwachsen (koaleszieren). Diese Wasserdampfpartialdruckunterschiede äußern sich auch darin, dass kleinere Kristalle einen höheren Schmelzpunkt haben als größere Kristalle. Die Schmelztemperatur  $T_r$  für einen Kristall mit dem Radius  $r$  ist [KAHLWEIT, 1975]:

$$T_R = T_\infty - \frac{2 \cdot \sigma \cdot T_\infty}{\rho_{\text{Eis}} \cdot \Delta H_f \cdot r} \quad (5)$$

Hierin ist  $T$  (die Schmelztemperatur eines Kristalls mit ebener Oberfläche und ( $H_f$  die Schmelzenthalpie des Eises und ( $\rho_{\text{Eis}}$  dessen Dichte.

Ist die Temperatur während der Lagerung nicht konstant, so treten zusätzlich zu den bereits erwähnten Mechanismen sogenannte Gefrier-Tau-Prozesse auf. Hierbei überlagern sich zwei Vorgänge. Nimmt die Temperatur im gefrorenen System zu, so werden aufgrund der damit verbunde-

**Tabelle 2: Wärmeleitfähigkeiten einiger Materialien im Vergleich**

Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ / (W/mK) bei 0°C							
PE	Pappe	Luft	Wasser	Eis	Erbsen	Rindfleisch (mager)	Aluminium
0,3	0,15	0,02	0,56	2,2	0,3	0,5	220

nen Abnahme des Eisanteils alle Kristalle kleiner. Einige der kleinen Kristalle verschwinden dabei. Sinkt die Temperatur wieder, so reicht die geringe Unterkühlung nicht aus, um neue Kristalle zu bilden. Das ausfrierende Wasser lagert sich daher an bereits bestehende Eiskristalle an. Bei einem durch den Wärmeübergang begrenzten Eiskristallwachstum ist die Wachstumsgeschwindigkeit  $r$  proportional zur Differenz zwischen der Temperatur an der Kristalloberfläche  $T_r$  und der Temperatur in der Lösung  $T_{Lsg}$  [DONHOWE, 1993]:

$$r \propto (T_r - T_{Lsg})^\gamma \quad (6)$$

wobei  $\gamma$  eine empirische Konstante ist. Kombiniert man Gleichung (5) und (6) wird deutlich, dass bei einem Temperaturanstieg in der Lösung ( $T_{Lsg} > T_r$ ) die treibende Kraft für das Schmelzen ( $T_{Lsg} - T_r$ ) für kleine Kristalle größer ist als für große Kristalle. Sinkt die Temperatur in der Lösung wieder ( $T_{Lsg} < T_r$ ), ist jetzt die treibende Kraft für das Wachstum ( $T_r - T_{Lsg}$ ) für große Kristalle größer als für kleine Kristalle. Daraus folgt eine Beschleunigung der Rekristallisationsvorgänge durch Temperaturschwankungen.

An den in Abb. 9 dargestellten Bildern sind die auftretenden Rekristallisationsvorgänge besonders deutlich zu erkennen. Die Bilder zeigen beispielhaft einen Ausschnitt aus der Lagerung einer Saccharoselösung bei schwankenden Lagertempe-

raturen. Die nach 74 h Lagerung relativ kleinen Kristalle 1, 2 und 3 werden im Verlauf der Lagerung aufgrund von Diffusionsprozessen immer kleiner und sind nach 240 h verschwunden. Der nach 74 h bereits relativ große Kristall 6 hingegen wächst kontinuierlich. Zwischen den Kristallen 4 und 5 findet ein Koaleszenzvorgang statt [GAUKEL / MIN / SPIß, 1997].

Das Wachstum der Eiskristalle durch Rekristallisation während der Lagerung (Rekristallisationsgeschwindigkeit) ist langsamer bei niedrigeren Temperaturen, konstanten Temperaturen und kleineren Eisanteilen. Da die beschriebenen Gefrier-Tau-Prozesse die Rekristallisationsgeschwindigkeit erheblich erhöhen, ist für die Qualität des Produktes immer der Temperatur-Zeit-Verlauf ausschlaggebend. Die Kenntnis einer mittleren Lagertemperatur ist nicht ausreichend, wie Abb. 10 verdeutlicht.

Es ist zu erkennen, dass bei allen Lagerbedingungen der mittlere Durchmesser mit der Lagerzeit zunimmt. Nach gleicher Lagerzeit sind die mittleren Durchmesser bei größeren Temperaturamplituden bzw. kürzeren Periodendauern größer als bei kleineren Temperaturamplituden bzw. längeren Periodendauern. Dieser Effekt nimmt mit steigender Lagerzeit zu. Wie rekristallisationsbeschleunigend Gefrier-Tau-Mechanismen sind, wird im Vergleich der Lagerung bei konst. -8 °C deutlich. Die bei einer Temperaturamplitude von 4 °C

Anzeige

**TRANSVIENNA**  
INTERNATIONALE FACHMESSE  
FÜR TRANSPORT UND LOGISTIK



**PACKVIENNA**  
INTERNATIONALE FACHMESSE  
FÜR VERPACKUNG

- >>>> Transportverpackung
- >>>> Konsumverpackung
- >>>> Etikettierung
- >>>> Kennzeichnung
- >>>> Verpackung und Gefahrgut
- >>>> Normierung
- >>>> Standardisierung

JETZT AN-PACKEN

| 6.09.2003... | 9.09.2003

Messezentrum Wien Neu



www.packvienna.at

auf [www.transvienna.at](http://www.transvienna.at)

ERMÄSSIGTE  
TICKETS

auf [www.packvienna.at](http://www.packvienna.at)

PackVienna

Rund 200 Aussteller auf Österreichs einziger integrierter Plattform für Verpackung, Transport, Lagerwirtschaft und Fördertechnik.

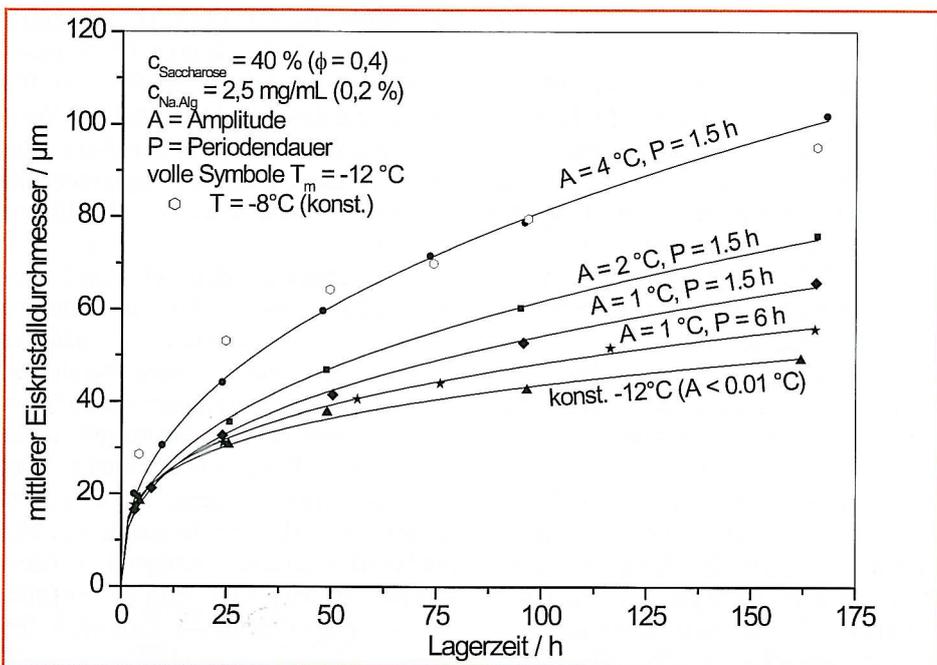
Nur für Profis.

**Tabelle 3: Einteilung der Gefriereschwindigkeitsbereiche**

Bezeichnung	Gefriereschwindigkeit (cm / h)
Sehr langsames Gefrieren	<0,1
Langsames Gefrieren	0,1 bis 0,5
Schnelles Gefrieren	0,5 bis 5
Sehr schnelles Gefrieren	>5

**Tabelle 4: Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Gefrierverfahren**

Wärmeübergangsmechanismus	Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$ (W/m <sup>2</sup> K)
Freie Konvektion Luft	6 - 20
Erzwungene Konvektion Gas	20 - 60
Kontaktplatten	200 - 500
Sole (Tauchgefrieren)	60 - 600
siedender Stickstoff, Blasensieden	1300 - 8000 ( $\Delta T = 100 - 300$ K)
siedender Stickstoff, Filmsieden	500 - 700 ( $\Delta T = 8 - 20$ K)



**Abb. 10: Einfluss der Temperaturamplitude und der Periodendauer auf die Rekristallisationsgeschwindigkeit**

um  $T_m = -12^\circ\text{C}$  mit einer Schwankungszeit von  $P = 1,5$  h gelagerte Lösung, war im Mittel bei  $-12^\circ\text{C}$  gelagert und nie wärmer als  $-8^\circ\text{C}$ . Dennoch ist die Rekristallisation in vergleichbarem Maße fortgeschritten wie bei der Lagerung bei konstant  $-8^\circ\text{C}$ . Dies macht deutlich, dass bei Temperaturschwankungen die mittlere Lagertemperatur keine Aussagen über den Zustand des Kristallgefüges und damit über die Qualität des Produktes zulässt [GAUKEL / MIN / SPIES, 1997].

### Grundsätzliches zum Wärmeentzug (Kühl- und Gefrierzeit)

Zur Berechnung der Abkühl- bzw. Gefrierzeit und des Temperaturverlaufs in Lebensmitteln beim Abkühlen und Gefrieren existiert eine Vielzahl von Modellen auf

die hier nicht näher eingegangen werden kann. Dennoch sollen zum besseren Verständnis die grundlegenden Überlegungen dazu erläutert werden. Zunächst unterscheidet man zwei unterschiedliche Problemstellungen:

Die Berechnung der Wärmemenge, die dem Produkt entzogen werden muss, um es von seiner Anfangstemperatur auf die gewünschte Endtemperatur abzukühlen ( $Q_{\text{ges}}$ ).

Die Zeit, die nötig ist, um diese Wärmemenge aus dem Produkt abzuführen (Berechnung mit  $t$ ).

Zur Berechnung dieser Parameter ist die Kenntnis der thermischen Eigenschaften des Produktes nötig. Die Wärmemenge  $Q_{\text{ges}}$ , die dem Produkt entzogen werden muss, setzt sich aus verschiedenen Teilen zusammen. Zunächst die Wärme-

menge  $Q_{\text{vorkühl}}$ , die nötig ist, um das Produkt von seiner Anfangstemperatur  $T_A$  auf die Temperatur des Gefrierbeginns  $T_G$  (bzw. beim Kühlen die Lagerendtemperatur) abzukühlen, dann die Wärmemenge  $Q_{\text{gefz}}$  zur Umwandlung des vorhandenen Wassers in Eis und zuletzt die Wärmemenge  $Q_{\text{nachkühl}}$  zum weiteren Abkühlen des gefrorenen Produktes auf die gewünschte Endtemperatur  $T_E$ . Bei der Anlagenkonstruktion müssen auch Wärmeverluste der Kühl- und Gefrierräume sowie die durch Ventilatoren eingetragene Leistung mitberücksichtigt werden. Für den Kühl- und Gefrierprozess selbst werden diese Parameter nicht betrachtet. Die Gesamtwärme berechnet sich zu:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{ges}} &= Q_{\text{vorkühl}} + Q_{\text{gefz}} + Q_{\text{nachkühl}} \\
 &= (m \cdot c_p)_{\text{ungefr.}} \cdot (T_A - T_G) \\
 &\quad + m_{\text{Eis}} \cdot \Delta h_{\text{schm}} + (m \cdot c_p)_{\text{gefz.}} \cdot (T_E - T_G) \quad (7)
 \end{aligned}$$

Hierin sind  $m \cdot c_p$  die Produkte von Masse und Wärmekapazität des jeweils betrachteten Produktteils, ( $h_{\text{schm}}$  die Schmelzenthalpie des Eises. Die Wärmekapazitäten und die Masse des Eises sind jedoch bei genauer Betrachtung temperaturabhängig, was die Berechnung von  $Q_{\text{ges}}$  erschwert. Außerdem sind die Wärmekapazitäten abhängig von der Produktzusammensetzung. Oft reichen jedoch vereinfachte Annahmen zur Berechnung aus.

Abb. 11 illustriert welche Parameter zur Berechnung des Wärmestroms ( $=dQ/dt$ ) also dem Wärmefluss pro Zeit nötig sind. Die Kenntnis des Wärmestroms lässt die Berechnung der Gefrierzeit zu. Dargestellt ist schematisch die Hälfte einer Platte der auf der rechten Seite Wärme entzogen wird. Hier spielen vor allem der Wärmeübergangskoeffizient an der Produktoberfläche ( $\alpha$ ) und die Wärmeleitungskoeffizienten im Produkt ( $\lambda$ ) und die Dicke des Produktes eine Rolle. Allgemein gilt, je größer diese Koeffizienten, desto kleiner ist der Temperaturunterschied zwischen den durch sie bestimmten Phasengrenzflächen. Je größer z. B. ( $\alpha$ ), desto kleiner ist der Unterschied zwischen der Umgebungstemperatur und der Oberflächentemperatur des Produktes. Wird auf der Oberfläche Wärme entzogen, so wird diese bestimmt durch die Wärmeleitungskoeffizienten und die Produktdicke aus dem Produktinnern nachgeliefert. Die Größe der Wärmeleitungskoeffizienten ist durch die Produktzusammensetzung festgelegt und daher kaum zu beeinflussen. Je dünner jedoch das Produkt ist, umso kürzer sind die Wege der Wärmenachlieferung und desto schneller kann das Produkt abgekühlt werden.

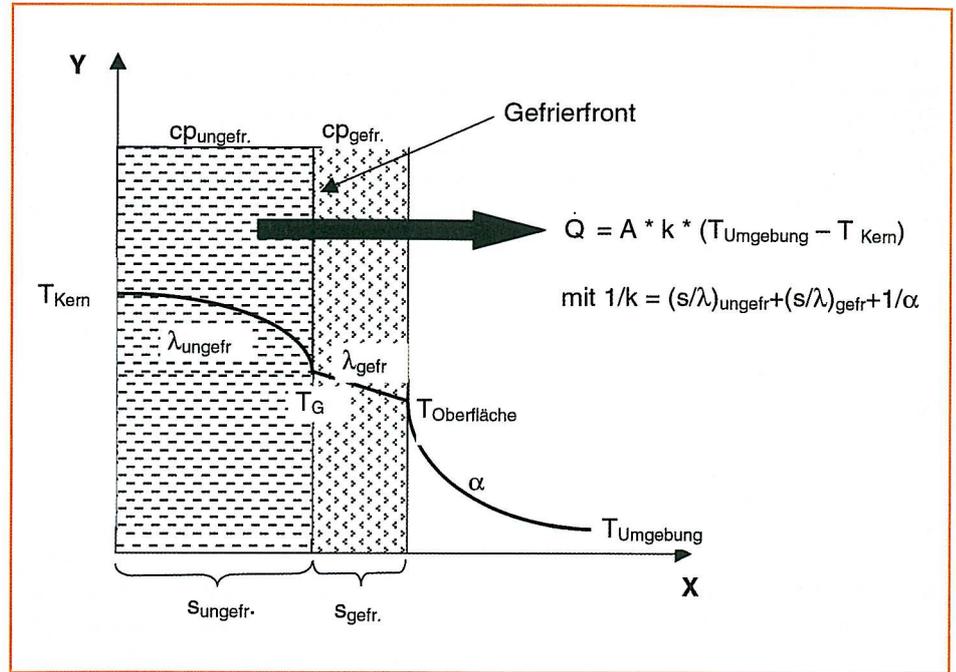
Um ein Produkt schnell abkühlen zu können kommt es also im Wesentlichen auf den Wärmeübergangskoeffizienten und die Dicke des Produktes an. Der Wärmeübergangskoeffizient ( kann z. B. durch hohe Luftgeschwindigkeiten verbessert werden (siehe Tabelle 4). Mit zunehmender Produktdicke spielt ( nur noch eine untergeordnete Rolle, da die Wärme aus dem Produktinnern nicht mehr schnell genug an die Oberfläche transportiert werden kann und damit der Hauptwärmewiderstand im Innern des Produktes liegt. Es ergibt sich dann keine wesentliche Gefrierzeitverkürzung durch eine Verbesserung von (. Abb. 12 zeigt die anhand einer Modellrechnung der Gefrierzeit für ein Fruchtmark (90 % Wasser) bei unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten. Außerdem hat insbesondere bei kleineren Produkten die Umgebungstemperatur einen merklichen Einfluss auf die Gefrierzeit. Bei dem in Abb. 12 dargestellten Produkt (2 cm) halbiert sich die Gefrierzeit bei einer Absenkung der Umgebungstemperatur von -30 °C auf -60 °C.

**Einfluss der Verpackung**

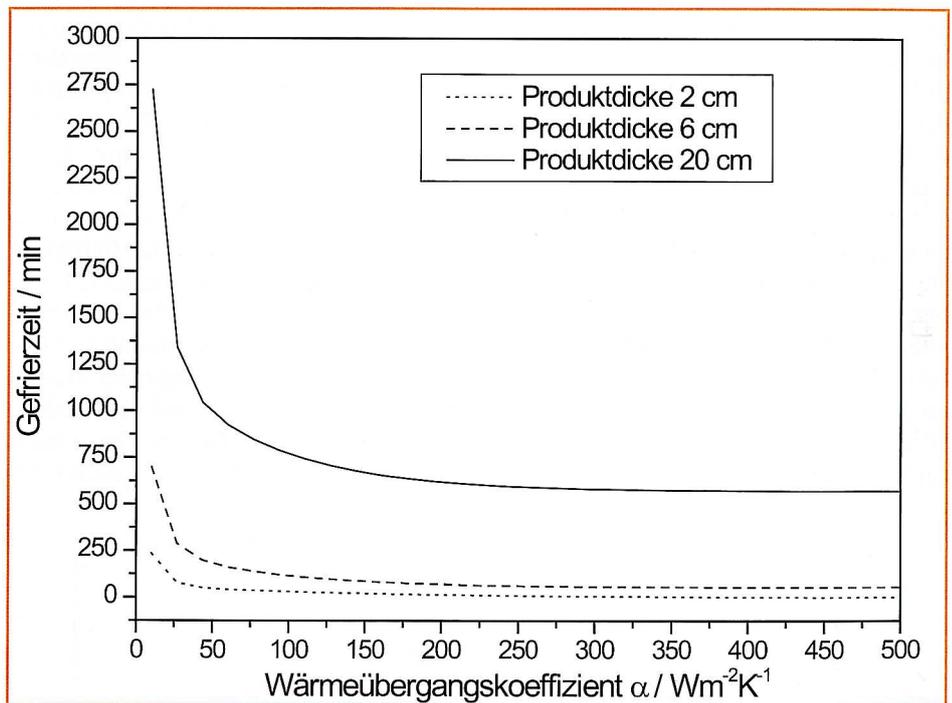
Werden Produkte vor dem Einfrieren verpackt, so verringert sich zwar der Wasserverlust, aber die Einfrierzeiten steigen erheblich an. Dies liegt vor allem an den schlechten Wärmeleitfähigkeiten der Verpackungsmaterialien wie Pappe und Kunststoffe. Ergeben sich beim Verpacken Luftspalte innerhalb der Verpackung sinkt die Wärmeleitfähigkeit dramatisch ab. Tabelle 2 zeigt einige Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich.

Werden z.B. größere Gebinde (hier: Höhe: 70 cm, Breite 100 cm, Tiefe 150 cm) von Gefriergut (hier: verpackt in Kartons zu 20 kg) ungefroren in einen Gefrierraum verbracht, so kann aufgrund der erheblichen Isolationswirkung der Luftspalte selbst bei gutem äußeren Wärmeübertragungskoeffizient (hier ca. 50 W/m<sup>2</sup>K) eine Gefrierzeit für das im thermischen Zentrum befindliche Gut von 6 bis 7 Tagen resultieren. Abgesehen von der äußerst langsamen Gefriereschwindigkeit und den damit verbundenen Produktschädigungen finden in dieser Zeit auch die in Kap. 0 besprochenen qualitätsmindernden Veränderungen statt. Verpackte Produkte sollten daher zunächst in der kleinsten Verpackungseinheit eingefroren und erst anschließend zu größeren Gebinden zusammengestellt und gelagert werden.

Grundsätzlich ist je nach Produkt abzuwägen, ob eine Verpackung vor dem Gefrieren sinnvoll ist oder ob das Produkt



**Abb. 11: Temperaturverlauf beim Einfrieren eines einfachen Körpers (hier: Platte)**

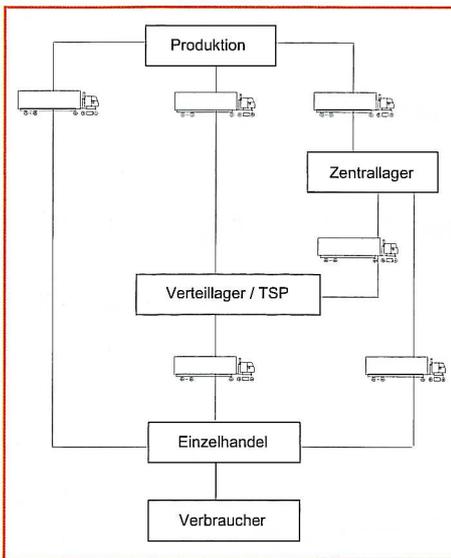


**Abb. 12: Modellrechnung der Gefrierzeit für ein Fruchtmark (90 % Wasser), T<sub>A</sub> = 20 °C T<sub>E</sub> = -20 °C T<sub>U</sub> = -30 °C**

besser unverpackt eingefroren wird. Hier gilt im Allgemeinen je kürzer die Gefrierzeit (d.h. je kleiner die Produkte) und je empfindlicher die Produkte z. B. Früchte und Gemüse, desto besser ist es die Produkte unverpackt einzufrieren. Bei großen Produkten z. B. Rinderhälften, Truthähnen spielt der Gewinn an Gefrierzeit nur eine untergeordnete Rolle und wiegt der Vorteil des geringeren Wasserverlustes durch eine Verpackung mehr. Außerdem spielt bei dieser Entscheidung auch das Handling der Produkte und die Kosten eine Rolle.

**Kühlverfahren**

Man unterscheidet das Abkühlen von flüssigen und festen Lebensmitteln. Für die absatzweise Kühlung flüssiger Lebensmittel stehen unterschiedliche Bauformen von Tanks und Behältern zur Auswahl, die sich im Wesentlichen durch die Art des Rührers unterscheiden. Hier gibt es Turbinenrührer, Propellerrührer, Blattrührer, usw. Das kontinuierliche Abkühlen von fluiden Lebensmittel geschieht in der Regel in Bündelrohrwärmetauschern, Riesel-



**Abb. 13: Schematische Darstellung der Kühl- und Gefrierkette**

kühlern, Kratzkühlern und Plattenwärmeaustauschern. Welches Verfahren für den jeweiligen Anwendungsfall geeignet ist hängt unter anderem von der Viskosität des Lebensmittels, von der anfallenden Menge und der mechanischen Belastbarkeit ab.

Feste Lebensmittel werden meist in Luft, seltener in Wasser gekühlt. Hier kommen Kammer- oder Tunnelkühler zum Einsatz. Für abriebfeste Produkte werden wegen des günstigen Wärmeübergangs häufig Fließbettkühler eingesetzt. In besonderen Fällen z.B. bei Salat kann eine Verdunstungskühlung angewendet werden. Zu Einzelheiten wird auf die einschlägige Grundlagenliteratur verwiesen.

## Gefrierverfahren

Das schnelle Gefrieren ist wie bereits besprochen aufgrund der besseren Produkteigenschaften dem langsamen Gefrieren vorzuziehen. Man unterscheidet wie in Tabelle 3 dargestellt verschiedene Gefriergeschwindigkeitsbereiche. Die Gefriereschwindigkeit ist hier die pro Zeiteinheit zurückgelegte Strecke der Gefrierfront. Nach dem Kühlmedium und der Art der Wärmeübertragung unterscheidet man zwischen folgenden Gefrierverfahren:

- ▶ Luftstromgefrieren
- ▶ Kontaktplattengefrieren
- ▶ Tauchgefrieren
- ▶ Sprühgefrieren mit Flüssiggasen

Bei den unterschiedlichen Gefrierverfahren können unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten erreicht werden (Tabelle 4). Das Gefrieren in Luft ist wegen seiner guten Anpassungsmöglichkeiten an das Produkt das am häufigsten eingesetzte Gefrierverfahren. Zu den Luftgefrierverfahren zählen u.a. Bandfroster, Hordenwagenfroster, Spiralfroster, Fließbettfroster. In Fließbettfroster werden praktisch ausschließlich unverpackte Produkte gefroren. Bei Bandfroster wird häufig neben dem Kontakt mit der kalten Luft, der Kontakt zu kalten Flächen genutzt. Bei Kontaktfroster befindet sich das Gefriergut zwischen waagrecht oder senkrecht stehenden Platten, die über eine Direktverdampfung oder eine Sole gekühlt werden. Für einen guten Wärmeübergang müssen die Platten in der Regel auf das Produkt gepresst werden. Das Tauchgefrieren kann in gekühlter Sole oder in einer tiefsieden-

den Flüssigkeit z. B. flüssigem Stickstoff stattfinden. Je nach Strömungsintensität der Sole variiert der Wärmeübergangskoeffizient. In siedenden Flüssigkeiten werden die höchsten Wärmeübergangskoeffizienten erreicht. Hierbei wird häufig das entstehende kalte Gas zum Vorkühlen verwendet. Es werden auch Kombinationen der Verfahren eingesetzt.

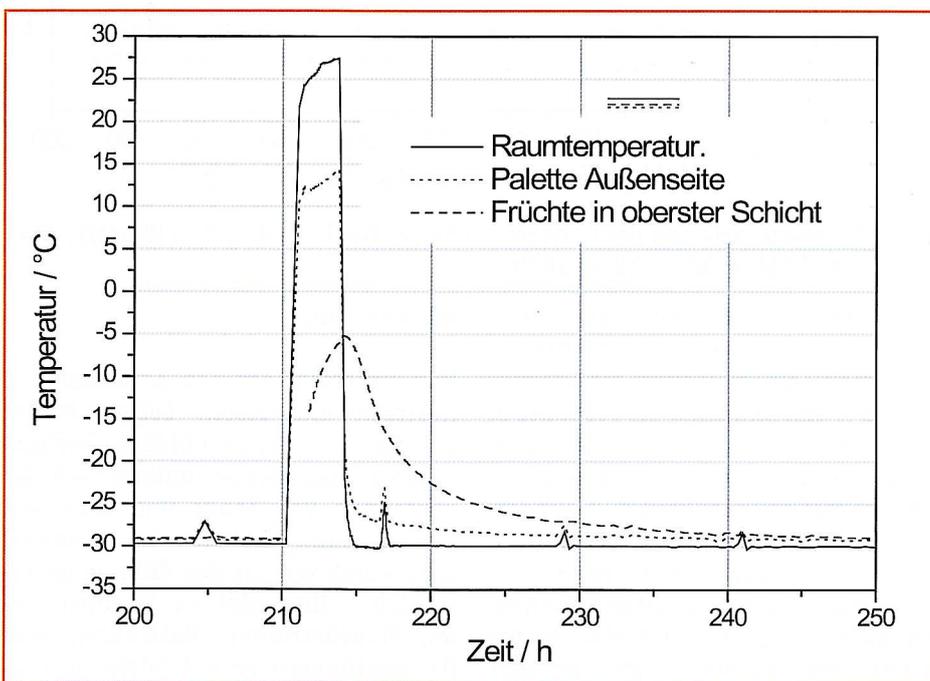
Wie bereits beschrieben nimmt die Gefriereschwindigkeit zum thermischen Zentrum hin ab. Die bei einem Gefrierverfahren letztendlich erreichbare mittlere Gefriereschwindigkeit hängt daher erheblich von der Produktgeometrie ab.

## Lagerung und Transport

Abb. 13 zeigt schematisch den Lager und Verteilungsweg gekühlter und gefrorener Produkte. Für alle Produkte gilt, dass die empfohlenen bzw. vorgeschriebenen Temperaturen bei der Lagerung und dem Transport einzuhalten sind. Bei tiefgefrorenen Lebensmitteln kann die Temperatur auch unter  $-18\text{ °C}$  liegen, sie sollte aufgrund der eintretenden Texturveränderungen bei Temperaturschwankungen außerdem möglichst konstant sein. Die meisten Temperaturabweichungen treten an den Verladestellen und während des Transports selbst auf. Zwei Punkte sollten insbesondere an diesen Stellen beachtet werden:

- ▶ Gekühlte und tiefgefrorene Lebensmittel sind keine sterilen Produkte. Sie sind auf Dauer nur genießbar wenn die vorgegebenen Temperaturen eingehalten werden.
- ▶ Lagerräume und Transportfahrzeuge sind nicht dafür konstruiert und auch nicht in der Lage, die transportierten Produkte abzukühlen. Sie können nur die erreichte Temperatur aufrechterhalten. Zur Verdeutlichung: Der Energiebedarf um 1 Tonne Eis (ca. 1,3 Tonnen Fleisch) innerhalb von drei Stunden um  $5\text{ °C}$  abzukühlen beträgt ca. 1 kW. Um die gleiche Menge einzufrieren sind ca. 30 kW Leistung nötig. Dies kann kein LkW Laderaum aber auch kein Verteilungslager und keine Verkaufskühltheke leisten.

Abb. 14 zeigt beispielhaft die Erwärmung der obersten Schicht einer Palette (beladen 20 kg Kartons Früchten), die von  $-30\text{ °C}$  kommend ca. 4 h bei  $25\text{ °C}$  stehen gelassen wird. Deutlich ist der rasche Temperaturanstieg der Verpackungsoberseite zu erkennen. Nach 4 h hat sich die oberste Schicht auf  $-5\text{ °C}$  erwärmt. Wird die Palette wieder in einen Kühlraum gebracht vergehen ca. 24 h bis die Anfangstempera-



**Abb. 14: Temperatur-Zeit Verlauf der Erwärmung in der obersten Schicht einer Palette durch eine Temperaturbelastung**

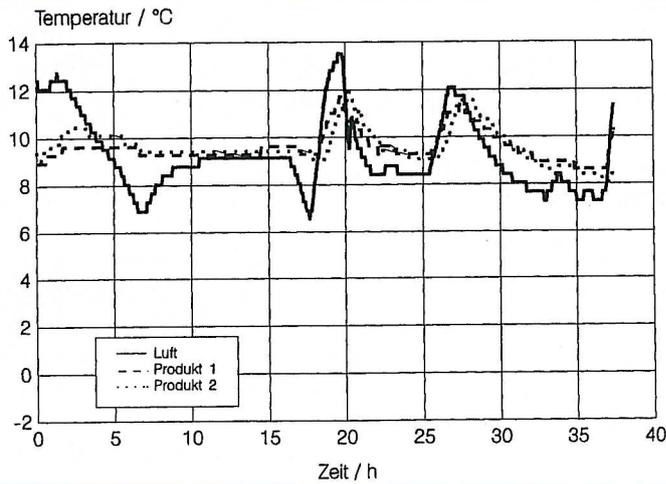


Abb. 15: Temperatur-Zeit Verlauf in einem Lkw Laderaum während des Transportes wenn ungekühlte Produkte zugeladen werden. (Spieß, W.E.L. 1991)

tur wieder erreicht ist. Bei Produkten mit geringerem Wasseranteil ist die Temperaturerhöhung noch stärker ausgeprägt. Beim gemeinsamen Transport von gekühlten und ungekühlten Waren, stellen die ungekühlten Produkte eine erhebliche Wärmebelastung für die gekühlten Produkte dar. Abb. 15 zeigt den Zeit-Temperaturverlauf in einem Kühl-Lkw [Spieß / Wolf / Jung / Wolf, 1991]. Während des Transportes werden immer wieder ungekühlte Lebensmittel eingestellt, was zu deutlichen Temperaturanstiegen in den gekühlten Produkten führt. Aus diesem Grund sollen ungekühlte Lebensmittel nicht zusammen mit gekühlten transportiert werden. Zur Vermeidung von Temperaturbelastungen wird eine lückenlose Temperaturüberwachung in der gesamten Kühl- und Gefrierkette angestrebt. Eine Möglichkeit dieser Temperaturüberwachung sind sogenannte Zeit-Temperaturindikatoren (=TTI, time-temperature-indicator). Diese werden auf der Verpackungsoberfläche angebracht und zeigen je nach Typ z.B. durch eine Farbskala an, wie stark die Temperaturbelastungen dieses Produktes war. Da TTI nur die Oberflächentemperatur der Verpackung und nicht die Produkttemperatur selbst messen, muss der TTI auf das jeweilige Produkt und die Verpackung abgestimmt sein. Für einen flächendeckenden Einsatz sind die heute angebotenen TTI allerdings noch zu fehleranfällig und zu in den meisten Lebensmittelbereichen zu teuer.

**Berechnung der Qualitätsveränderung**

Mit Hilfe der in Kap. 0 dargestellten Qualitätsfunktion und der Kenntnis der Temperaturbelastung kann die resultierende Qualität berechnet werden. Abb. 16 zeigt

exemplarisch Anfangs- und Endqualität für Magerfisch nach zwei Zeit-Temperatur-Belastungen (Lager und Einzelhandel). Die Zeit-Temperatur-Belastung ist durch einen Rührreaktor symbolisiert [Spieß / Boehme / Wolf, 1998]. Es ist deutlich zu erkennen wie die Qualität von Stufe 9 (beste Qualität) aufgrund der Zeit-Temperatur-Belastung auf das Produkt am Ende der Handelskette zwischen 5 und 9 liegt.

**Kühl- und Transport pflanzlicher Lebensmittel**

Eine Besonderheit von pflanzlichen Lebensmitteln wie Obst und Gemüse ist, dass sie während der Kühlung weiter Stoffwechsel betreiben, sie »atmen«. Bei der Atmung wird wie beim Menschen unter Abgabe von Energie Sauerstoff in Kohlendioxid verwandelt. Neben der reinen Abkühlung des Lagerraums muss da-

her auch die Atmungsenergie abgeführt werden. Bezüglich der Atmungsaktivität unterscheidet man zwei unterschiedliche Gruppen von pflanzlichen Lebensmitteln:

- ▶ Produkte, bei denen die Atmungsgeschwindigkeit während der Lagerung kontinuierlich abnimmt. Dies sind z. B. Zitrusfrüchte, Ananas, Erdbeeren, Spargel und Blattgemüse. Diese Pflanzen reifen während der Kühlung nicht nach und müssen daher reif geerntet werden.
- ▶ Produkte, bei denen die Atmungsgeschwindigkeit während der Lagerung zunächst ein Minimum und dann ein Maximum (Klimakterium) durchläuft. Man nennt diese auch klimakterische Pflanzen. Dies sind z. B. Äpfel, Birnen, Bananen, Tomaten und Steinfrüchte. Diese Pflanzen erreichen am Klimakterium (höchste Atmungsgeschwindigkeit) in der Regel ihre Vollreife. Sie können also während der Kühlung reifen. Bei einigen dieser Pflanzen wird der Anstieg der Atmungsgeschwindigkeit durch den Ethylengehalt der Luft gesteuert. Da diese Pflanzen selbst Ethylen produzieren ist zur Kontrolle der Reifung während der Kühlung auch eine Kontrolle der Luftzusammensetzung bzw. eine ausreichende Belüftung nötig.

Außerdem können pflanzliche Lebensmittel bei bestimmten Temperaturen sogenannte Kaltlagerkrankheiten entwickeln. Daher können nicht alle pflanzlichen Lebensmittel in der Nähe des Gefrierpunktes gelagert werden, was zur Verminderung des mikrobiologischen Verderbs am günstigsten wäre. Die Einhaltung der vorgegebenen Temperaturen während der Lagerung und dem Transport ist hier besonders wichtig. ◀

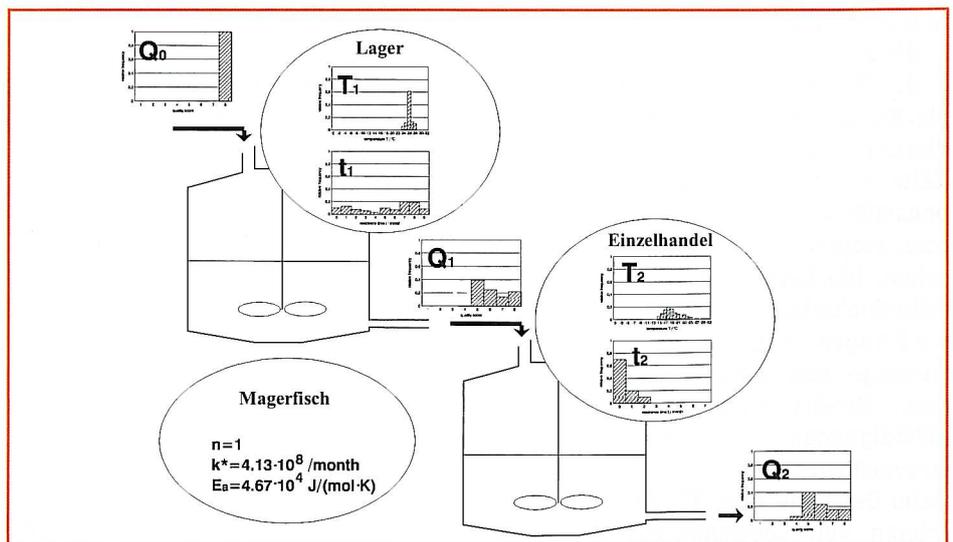


Abb. 16: Reaktor-Modell für schrittweise Faltung zur Berechnung der Endqualität von tiefgefrorenem Magerfisch (Spieß, W.E.L. 1998)