

Anwendung des Sterilisationswertes (F-Wertes) für die Berechnung hitzeinduzierter Veränderungen in wärmebehandelter Milch

Von C. Kiesner

Institut für Chemie und Technologie der Milch der Bundesanstalt für Milchwissenschaft, Postfach 6069, 24121 Kiel

1. Einleitung

Für die Berechnung von Umsätzen hitzeinduzierter Veränderungen in Milch bei einer Wärmebehandlung ist es notwendig einen formalkinetischen Ansatz für den Reaktionsablauf zu benutzen. Ein solcher Ansatz spiegelt aber das im molekularen Bereich ablaufende Reaktionsgeschehen nicht wider und er kann nur eine beschränkte Gültigkeit auf bestimmte Bereiche der Systemvariablen haben.

Unter Formalkinetik versteht man im engeren Sinne das Zeitgesetz, in dem die Systemvariablen (Menge, Zeit und Temperatur) der Reaktionen korreliert sind. Unter der Menge ist beispielsweise die Anzahl von Mikroorganismen N oder die Konzentration C_j eines Stoffes „j“ pro Massen- oder Volumeneinheit zu verstehen. Mit der Kenntnis des Zeitgesetzes läßt sich der zeitliche Ablauf der Abbau- oder Bildungsvorgänge berechnen. Das Gesetz sagt nichts aus über den physikalisch-chemischen Reaktionsmechanismus, der im Molekülbereich abläuft, oder über die stöchiometrische Gleichung, durch welche der Reaktionsablauf beschrieben ist. Für das Zeitgesetz, in dem die Systemvariablen korreliert sind, kann für Reaktionen beliebiger Ordnung n die Geschwindigkeit der Veränderung eines Merkmals $\frac{dC_j}{d\tau}$ mit Hilfe einer Differentialgleichung in der Form

$$-\frac{dC_j}{d\tau} = kC_j^n \quad (1)$$

beschrieben werden (1-5). Darin stellt k die von der Temperatur abhängige Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante (RGK) dar. Für einfache Reaktionen vom Typ $C_{j0} \Rightarrow C_{jt}$ ergeben sich entsprechend der Reaktionsordnung n folgende Lösungen der Differentialgleichung Gl. (1):

für nicht 1. Ordnung $\frac{C_{j0}^{1-n} - C_{jt}^{1-n}}{1-n} = k\tau \quad (2)$

($n \neq 1$, s. auch Gl. (7) und Gl. (8))

und für 1. Ordnung ($n=1$) $\ln \frac{C_{j0}}{C_{jt}} = k\tau \quad (3)$

Die Gleichungen (2) und (3) stellen eine lineare funktionelle Abhängigkeit zwischen der Konzentration eines Merkmals zu Beginn und am Ende der Wärmebehandlung, C_0 und C_{τ} , von der Zeit τ mit einem Proportionalitätsfaktor k als Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante (RGK) dar.

Die Bestimmung der Reaktionsordnung n und der (RGK) k erfolgt durch die Auswertung nach Gl. (2) oder Gl. (3) der in Erhitzungsversuchen gemessenen Konzentrationen bzw. der ermittelten Anzahl von Mikroorganismen.

2. Ableitung der Formel für den Sterilisationswert (F-Wert) nach der Reaktion 1. Ordnung ($n = 1$)

Der Sterilisationswert, der in der Sterilisationstechnik als F-Wert bekannt ist, wird auf der Basis einer Reaktion 1. Ordnung abgeleitet und bietet die Möglichkeit unterschiedliche Wärmebehandlungsprozesse miteinander zu vergleichen bzw. für diese Grenzwerte aufzustellen (2, 4, 5). Da die meisten einfachen hitzeinduzierten chemischen Abbau- oder Bildungsreaktionen sowie überwiegend auch die Abtötung von Mikroorganismen sich mit der Reaktion 1. Ordnung beschreiben lassen, findet der Sterilisationswert eine breite Anwendung in der Optimierung von Wärmebehandlungsverfahren. Ableitungsschritte, die zur Formel für den Sterilisationswert führen, sind ausgehend von der Differentialgleichung Gl. (1) für $n=1$ im Anhang dargestellt. Sie sind in der Literatur (1-5) ausführlich beschrieben. Die Formel für den F-Wert hat entsprechend die Form:

$$F = \int_0^{\infty} 10^{\frac{\vartheta(\tau) - \vartheta_B}{z}} d\tau \quad (4)$$

Sie enthält die Funktion $\vartheta(\tau)$, den z -Wert sowie eine Bezugstemperatur ϑ_B . $\vartheta(\tau)$ stellt den resultierenden Temperatur-Zeit-Verlauf einer Wärmebehandlung dar. Die Bezugstemperatur ϑ_B ist eine frei gewählte Temperatur. Sie wird aus dem Temperaturbereich $\vartheta \in (\vartheta_{\min}, \vartheta_{\max})$ festgelegt, in dem die Erhitzungsversuche durchgeführt worden sind, s. Anhang. Aus den ermittelten Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten k werden die s. g. D-Werte ermittelt, die ebenso von der Temperatur abhängig sind. Weiterhin wird aus dem in der Regel linearen Verlauf der Funktion des D-Wertes von der Temperatur ϑ in der Form $\lg D = f(\vartheta)$, aus dem Neigungswinkel der Geraden der z -Wert ermittelt. Die Funktion der Geraden $\lg D = f(\vartheta)$ lässt sich durch das Festlegen eines Bezugspunktes ϑ_B , D_B und das Heranziehen des z -Wertes in folgender Form

$$D = D_B 10^{\frac{\vartheta - \vartheta_B}{z}} \quad (5)$$

beschreiben (s. Anhang).

Liegt kein linearer Verlauf der Funktion $\lg D = f(\vartheta)$ vor, so kann der untersuchte Temperaturbereich in kleinere Intervalle eines konstanten z -Wertes unterteilt werden. Bei der Berechnung des F-Wertes für einen vorliegenden Temperatur-Zeit-Verlauf einer Wärmebehandlung muß die Abhängigkeit des z -Wertes im jeweiligen Temperaturbereich entsprechend berücksichtigt werden. Im weiteren soll die Formel für den Sterilisationswert, F-Wert, für Reaktionen nicht 1. Ordnung ($n \neq 1$) abgeleitet werden.

3. Ableitung der Formel für den Sterilisationswert bei Reaktionen nicht 1. Ordnung ($n \neq 1$)

Einige hitzeinduzierte Veränderungen in Milch, beispielweise die Denaturierung von Molkenproteinen, lassen sich nicht mit der Reaktion 1. Ordnung beschreiben. Nachfolgenden wird für solche Reaktionen die Ableitung des Sterilisationswertes aufgezeigt.

Ausgehend von der bereits beschriebenen Differentialgleichung, Gl. (1), in der Form:

$$-\frac{dC_j}{C_j^n} = k d\tau \quad (1),$$

ergibt sich für Reaktionen nicht 1. Ordnung ($n \neq 1$) durch Integration beider Seiten der Gl. (1) der Ausdruck,

$$-\int_{C_{j0}}^{C_{jr}} C_j^{-n} dC_j = k \int_0^\tau d\tau \quad \text{für } \vartheta = \text{const.} \Rightarrow k = \text{const.} \quad (6).$$

Die Lösung beider Integrale in den vorgegebenen Integralgrenzen in Gl. (6) führt zu dem Ergebnis:

$$\left(\frac{C_{jr}}{C_{j0}} \right)^{1-n} = 1 + (n-1)k_n \tau \quad (7),$$

mit

$$k_n = k C_{j0}^{n-1} \quad (8).$$

Werden beide Seiten der Gl. (7) logarithmiert, so erhält man,

$$\lg \frac{C_{j0}}{C_{jr}} = -\frac{1}{1-n} \lg[1 + (n-1)k_n \tau] \quad (9).$$

Setzt man die Definition für den Dezimalreduktionswert (D-Wert) ein, wonach der D-Wert bei einer konstanten Temperatur die Zeit τ ($D = \tau$) ist, in der die Ausgangskonzentration C_{j0} oder die Ausgangszahl von Mikroorganismen N_0 auf $1/10$ gesenkt bzw.

um das 10-fache erhöht wird $\left(\frac{C_{j0}}{C_{jr}} = \frac{10}{1}; \frac{N_0}{N_\tau} = \frac{10}{1} \right)$, so erhält man nach Gl. (9) für den D-Wert,

$$D = \frac{1}{k_n} \frac{10^{n-1} - 1}{n-1} \quad (12)$$

und entsprechend für die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante k

$$k = \frac{10^{n-1} - 1}{n-1} \left(\frac{C_{j0}^{1-n}}{D} \right) \quad (13).$$

Entsprechende Gleichung für den D-Wert bei Reaktionen 1. Ordnung hat die Form:

$$D = \frac{2,303}{k} \quad (\text{s. Anhang}).$$

Liegen Meßergebnisse aus Untersuchungen für ein bestimmtes Merkmal „j“ vor, so lassen sich analog wie bei Reaktion 1. Ordnung, aus der linearen Abhängigkeit von

$\frac{C_{j0}^{1-n} - C_{jr}^{1-n}}{1-n} = k\tau$ nach Gl. (7) (das Zeitgesetz) die Reaktionsordnung n und die

Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante k für die jeweilige Temperatur bestimmen, Abb. 1. Daraus kann auch die Abhängigkeit des D-Wertes (Gl. (13)) von der Temperatur ermittelt werden.

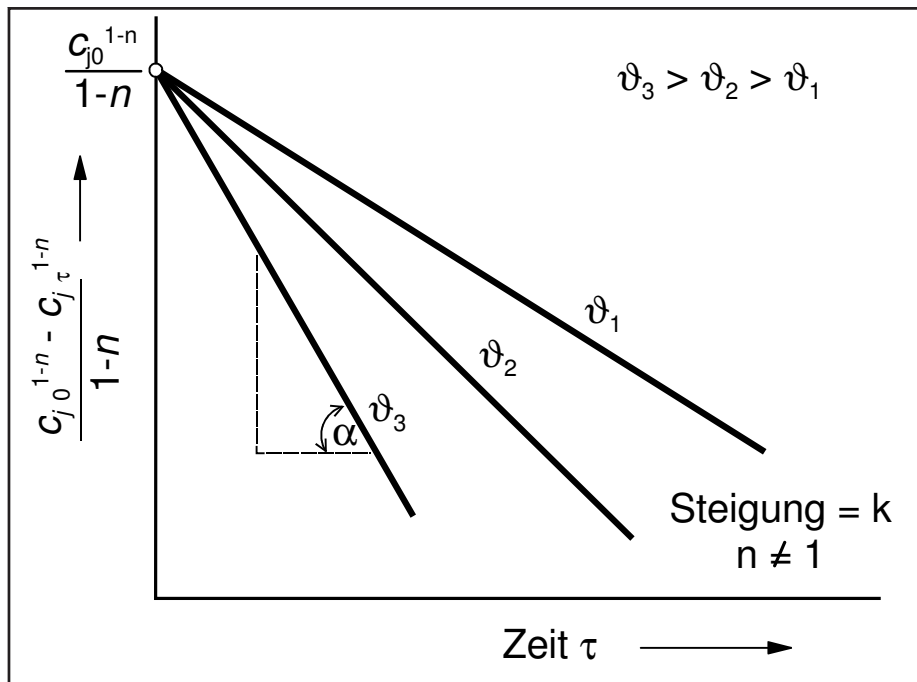


Abb.1: Bestimmung der (RGK) k aus den gemessenen Konzentrationen C_{j_t} und C_{j_0} für Reaktionen nicht 1. Ordnung

Für die Berechnung von hitzeinduzierten Umsätzen eines Merkmals C_j bei realen Wärmebehandlungsverfahren, d. h. bei Verfahren mit konkretem Temperatur-Zeit-Verlauf $\vartheta(\tau)$, muß die hierfür benötigte Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten k von der Temperatur ermittelt werden. An dieser Stelle wird bewußt auf die Ermittlung der Abhängigkeit $k = f(1/T)$ nach Arrhenius wegen der unklaren physikalischen Bedeutung der Arrhenius-Konstanten (1) verzichtet und die Auswertung über die Abhängigkeit des D -Wertes von der Temperatur in der Form $\lg D = f(\vartheta)$ im Temperaturbereich der Untersuchungen zwischen ϑ_{min} bis ϑ_{max} vorgenommen. Der D -Wert wird für Reaktionen nicht 1. Ordnung über Gl. (13) ermittelt. Die Bestimmung des z -Wertes aus der Abhängigkeit $\lg D = f(\vartheta)$ erfolgt analog wie bei der Reaktion 1. Ordnung (1). Liegt ein linearer Verlauf der Funktion $\lg D = f(\vartheta)$ im untersuchten Temperaturbereich zwischen ϑ_{min} bis ϑ_{max} vor, so ist der ermittelte z -Wert von der Temperatur in dem Bereich unabhängig. Für den Fall, daß kein linearer Verlauf der Funktion über den gesamten Temperaturbereich vorliegt, können auch hier durch Unterteilung des Temperaturbereiches mit recht guter Genauigkeit Bereiche des konstanten z -Wertes ermittelt werden.

Die Aufstellung der Geradenfunktion $\lg D = f(\vartheta)$ erfolgt durch die Festlegung einer Bezugstemperatur ϑ_B aus dem gemessenen Temperaturbereich und dem dazugehörigen D_B -Wert sowie unter der Annahme des ermittelten z -Wertes (Neigung der Geraden). Demnach läßt sich die Funktion $\lg D = f(\vartheta)$ als Geradengleichung:

$$\lg D = \lg D_B - \frac{1}{z}(\vartheta - \vartheta_B)$$

oder

$$D = D_B 10^{\frac{\vartheta_0 - \vartheta}{z}} \quad (14)$$

beschreiben.

Setzt man in Gl. (14) für den D-Wert den Ausdruck nach Gl. (12) für Reaktionen nicht 1. Ordnung ein, so erhält man für die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten k_n und k die Ausdrücke:

$$k_n = \frac{10^{n-1} - 1}{(n-1)D_B} \left(10^{\frac{\vartheta - \vartheta_0}{z}} \right) \quad (15)$$

und

$$k = \frac{10^{n-1} - 1}{(n-1)D_B} C_{j0}^{1-n} \left(10^{\frac{\vartheta - \vartheta_0}{z}} \right) \quad (16).$$

Für reale Wärmebehandlungsprozesse liegt immer ein resultierender Temperatur-Zeit-Verlauf $\vartheta(\tau)$ vor und damit auch mittelbar über die Temperatur eine Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeits-Konstanten k von der Zeit in der Form:

$$k(\tau) = \frac{10^{n-1} - 1}{(n-1)D_B} C_{j0}^{1-n} \left(10^{\frac{\vartheta(\tau) - \vartheta_0}{z}} \right) \quad (17).$$

Für einen solchen Fall, muß bei der Lösung der Differentialgleichung (Gl. (6)) die Reaktionsgeschwindigkeits-Konstante k hinter das Integralzeichen gesetzt werden. Daraus resultiert ein Ausdruck:

$$- \int_{C_{j0}}^{C_j} C_j^{-n} dC_j = \int_0^\infty k d\tau$$

und weiter

$$- \int_{C_{j0}}^{C_j} C_j^{-n} dC_j = \int_0^\infty \frac{10^{n-1} - 1}{(n-1)D_B} C_{j0}^{1-n} \left(10^{\frac{\vartheta(\tau) - \vartheta_0}{z}} \right) d\tau \quad (18).$$

Da sowohl die Reaktionsordnung n , die Dezimalreduktionszeit D_B bei einer festgelegten Bezugstemperatur als auch die Ausgangskonzentration C_{j0} für ein bestimmtes Merkmal konstante und von der Temperatur unabhängige Werte sind, verändert sich der Ausdruck in Gl. (18) in die Form:

$$- \int_{C_{j0}}^{C_j} C_j^{-n} dC_j = \frac{10^{n-1} - 1}{(n-1)D_B} C_{j0}^{1-n} \int_0^\infty \left(10^{\frac{\vartheta(\tau) - \vartheta_0}{z}} \right) d\tau \quad (19).$$

Die Lösung des Integrals auf der linken Seite der Gl. (19) ergibt in den vorgegebenen Integrationsgrenzen den Ausdruck:

$$- \frac{1}{1-n} (C_j^{1-n} - C_{j0}^{1-n}) = \frac{10^{n-1} - 1}{(n-1)D_B} C_{j0}^{1-n} \int_0^\infty \left(10^{\frac{\vartheta(\tau) - \vartheta_0}{z}} \right) d\tau \quad (20),$$

der in der Endform den Ausdruck

$$\frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = \left[1 + (10^{n-1} - 1) \frac{1}{D_B} \int_0^\infty \left(10^{\frac{\theta(\tau) - \theta_0}{z}} \right) d\tau \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (21)$$

annimmt.

Das Integral $\int_0^\infty 10^{\frac{\theta(\tau) - \theta_0}{z}} d\tau$ in Gl. (21) stellt den schon bekannten Ausdruck für den Sterilisationswert, F-Wert, dar. Danach lassen sich auch für Reaktionen nicht 1. Ordnung die hitzeinduzierten Umsätze mit Hilfe des Sterilisationswertes berechnen. Die allgemeine Formel für $n \neq 1$ hat die Form:

$$\frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = \left[1 + (10^{n-1} - 1) \frac{1}{D_B} F \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (22).$$

Demnach gilt für die jeweiligen Reaktionsordnungen:

0. Ordnung $\frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = \left(1 - \frac{0,9}{D_B} F \right)$

1,5. Ordnung $\frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = \left(1 + \frac{2,16}{D_B} F \right)^{-2}$

2. Ordnung $\frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = \left(1 + \frac{9}{D_B} F \right)^{-1}$

usw. und für die Reaktion 1. Ordnung

$$\frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = 10^{-\frac{F}{D_0}} \quad (\text{s. Ausdruck in (1) und Anhang}).$$

Für den Sterilisationswert, F-Wert, je nach ermittelter Reaktionsordnung, kann man entsprechend schreiben:

$n = 1$ $F = -\lg \frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} D_B$ und

für $n \neq 1$ $F = \frac{\left[\left(\frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} \right)^{1-n} - 1 \right] D_B}{10^{n-1} - 1} \quad (23).$

Formelzeichen:

C_j	Konzentration einer Stoffkomponenten „j“	[mol l ⁻¹]
C_{jt}	Konzentration einer Stoffkomponenten „j“ nach einer Wärmebehandlungszeit τ	[mol l ⁻¹]
C_{j0}	Ausgangskonzentration einer Stoffkomponenten „j“	[mol l ⁻¹]
D	D -Wert (Dezimalreduktionszeit)	[s]
D_B	D -Wert bei einer Bezugstemperatur ϑ_B	[s]
F	F -Wert, Sterilisationswert	[s, min]
k	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	[(mol l ⁻¹) ¹⁻ⁿ s ⁻¹]
$k_n = kC_{j0}^{n-1}$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante, für $n=1 \Rightarrow k_n = k$	[s ⁻¹]
n	Reaktionsordnung	
N_0	Anfangskeimzahl	
N	Keimzahl nach der Wärmebehandlung	
T	Temperatur	[K]
τ	Zeit	[s]
ϑ	Temperatur	[°C]
ϑ_B	Bezugstemperatur	[°C]
z	z -Wert	[°C]

4. Literatur

- (1) Kiesner, C., Martin, D., Buchheim, W., Schlimme, E.: Anlagen- und verfahrenstechnische Aspekte bei der Wärmebehandlung von Milch, Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsberichte 48 49-62 (1996)
- (2) Ball, C. O.: Bull. National Research Council, Vol. 7, Part 1, No. 37, 76 (1923)
- (3) Deindoerfer, F.H., Humphrey, A. E.: Appl. Microbiology 7 256-263 (1959)
- (4) Reuter, H.: Deutsche Molkerei-Zeitung 101 362-370 (1980)
- (5) Burton, H.: Ultra-High-Temperature Processing of Milk and Milk Products, Elsevier Applied Science London and New York (1988)

5. Zusammenfassung

C. Kiesner: **Anwendung des Sterilisationswertes (F-Wertes) für die Berechnung hitzeinduzierter Veränderungen in wärmebehandelter Milch.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsbereiche **55** (1) 61-72 (2003)

21 Milchwirtschaftliche Technologie (Sterilisationswert, F-Wert)

Der Sterilisationswert, der in der Sterilisationstechnik als F -Wert bekannt ist, wird auf der Basis einer Reaktion der 1. Ordnung abgeleitet und bietet die Möglichkeit unterschiedliche Wärmebehandlungsprozesse miteinander zu vergleichen bzw. für diese Grenzwerte aufzustellen. Da die meisten einfachen hitzeinduzierten chemischen Abbau- oder Bildungsreaktionen sowie auch die Abtötung von Mikroorganismen sich mit der

Reaktion 1. Ordnung beschreiben lassen, findet der Sterilisationswert eine breite Anwendung in der Optimierung von Wärmebehandlungsverfahren. Für die hitzeinduzierten Veränderungen die sich nach der Reaktion 1. Ordnung nicht beschreiben lassen wurde deren Abhängigkeit vom Sterilisationswert abgeleitet. Damit kann er, wie bisher für Reaktionen 1. Ordnung, auch bei anderen Reaktionsordnungen zur Beurteilung von Wärmebehandlungsprozessen herangezogen werden. Die grundlegende Gleichung hat die Form:

$$F = \frac{\left[\left(\frac{C_{jr}}{C_{j0}} \right)^{1-n} - 1 \right] D_B}{10^{n-1} - 1}$$

für chemische Reaktionen. Für die Abtötung von Mikroorganismen, die nicht einer Reaktion 1. Ordnung folgt, kann man schreiben:

$$F = \frac{\left[\left(\frac{N}{N_0} \right)^{1-n} - 1 \right] D_B}{10^{n-1} - 1}$$

Summary

C. Kiesner: **Application of the *F*-value for calculating heat-induced modifications in heat-treated milk.** Kieler Milchwirtschaftliche Forschungsbereiche **55** (1) 61-72 (2003)

21 Dairy technology (sterilization value, *F*-value)

The sterilization value, called *F*-value in the sterilization technique, is derived on the basis of a first-order reaction, and offers the possibility to compare different heat treatment processes, and/or to determine the corresponding threshold values. As most of the simple, heat-induced chemical reactions of degradation and formation, as well as the killing of microorganisms can be described with the first-reaction order, the sterilization value is much applied for optimizing heat treatment processes. The dependence of heat-induced modifications, which cannot be described with the first-order reaction, was derived from the sterilization value. Thus, the sterilization value can also be applied for other reaction orders to assess heat treatment processes. The basic equation for chemical reactions is

$$F = \frac{\left[\left(\frac{C_{jr}}{C_{j0}} \right)^{1-n} - 1 \right] D_B}{10^{n-1} - 1}$$

For the killing of microorganisms, which does not follow a first order reaction, the equation may be:

$$F = \frac{\left[\left(\frac{N}{N_0} \right)^{1-n} - 1 \right] D_B}{10^{n-1} - 1}$$

Résumé

C. Kiesner: **Application de la valeur de stérilisation (valeur «F₀») pour calculer les modifications causées par du lait soumis à un traitement thermique.** Kieler Milch-wirtschaftliche Forschungsbereiche **55** (1) 61-72 (2003)

21 Technologie laitière (valeur de stérilisation, valeur)

La valeur de stérilisation, appelée valeur «F₀» dans la technique de stérilisation, est dérivée à partir d'une réaction de 1^{er} ordre et permet à comparer différentes procédures de traitement thermique, et/ou à déterminer les valeurs limites correspondantes. Comme la plupart des réactions chimiques simples de dégradation et de formation, causées par la chaleur, comme la destruction de microorganismes, peuvent être décrites par la réaction de 1^{er} ordre, la valeur de stérilisation est souvent employée pour optimiser les procédures de traitement thermique. La dépendance des modifications causées par la chaleur, ne pouvant pas être décrites par la réaction de 1^{er} ordre, est dérivée de la valeur de stérilisation. Ainsi, la valeur de stérilisation peut également être employée pour des réactions d'ordre différent afin d'évaluer des procédures de traitement thermique. L'équation de base pour des réactions chimiques est:

$$F = \frac{\left[\left(\frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} \right)^{1-n} - 1 \right] D_B}{10^{n-1} - 1}$$

Pour la destruction de microorganismes, qui ne suit pas la réaction de 1^{er} ordre, l'équation pourrait être:

$$F = \frac{\left[\left(\frac{N}{N_0} \right)^{1-n} - 1 \right] D_B}{10^{n-1} - 1}$$

Anhang

Ableitungsschritte für die Bestimmung des F-Wertes nach der Reaktion 1. Ordnung (1).

Die Änderungsgeschwindigkeit der Menge eines bestimmten Merkmals C_j in der Zeit τ

infolge der Hitzeeinwirkung, kann allgemein mathematisch mit Hilfe einer Differentialgleichung in der Form:

$$\boxed{-\frac{dC_i}{d\tau} = k C_i^n} \text{ beschrieben werden,}$$

dabei sind: n die Reaktionsordnung und k die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante.

Für konstante Temperatur und für $n = 1$ ergibt sich folgende Lösung der Differentialgleichung:

$$\lg \frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = -\frac{k}{2,303} \int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau$$

$$\lg \frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = -\frac{k}{2,303} (\tau_2 - \tau_1) = -\frac{1}{2,303} k\tau$$

Die Zeit τ , in der die Ausgangsmenge eines Merkmals auf 1/10 reduziert wird, wird als Dezimalreduktionszeit „D-Wert“ definiert (s. Abb. 2), danach ist

$$D = 2,303 / k$$

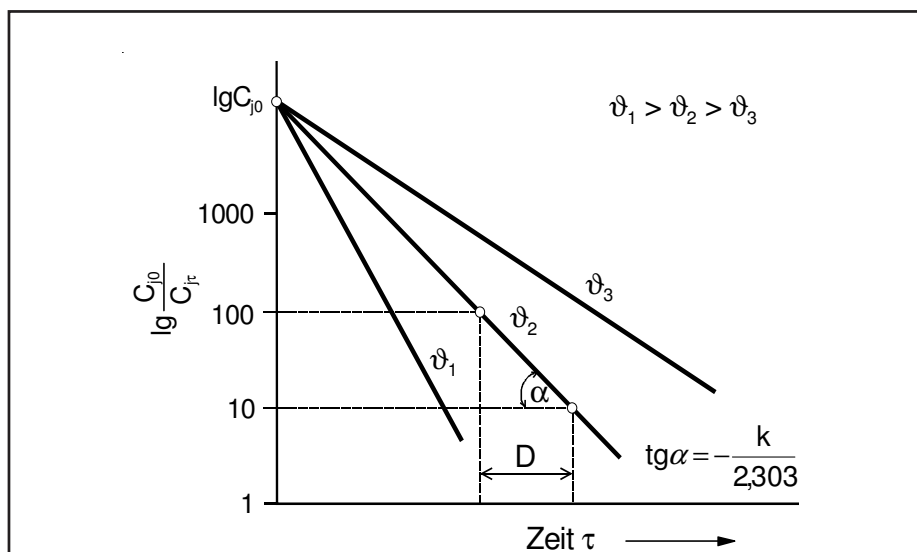


Abb. 2: Bestimmung des D-Wertes aus dem experimentell ermitteltem Zeitgesetz

Liegt eine lineare Abhängigkeit des D-Wertes von der Temperatur in der Form $\lg D = f(\vartheta)$ vor (Abb.3), so kann unter Festlegung eines Bezugspunktes (ϑ_B, D_B) sowie der Neigung der Geraden, die durch den z-Wert beschrieben wird, eine Geradenformel in der Form

$$\lg D = \lg D_B - \frac{1}{z}(\vartheta - \vartheta_B)$$



$D = D_B 10^{\frac{\vartheta_B - \vartheta}{z}}$ aufgestellt werden.

Daraus resultiert für die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k,

$$k = \frac{2,303}{D_B 10^{\frac{\vartheta_B - \vartheta}{z}}}$$

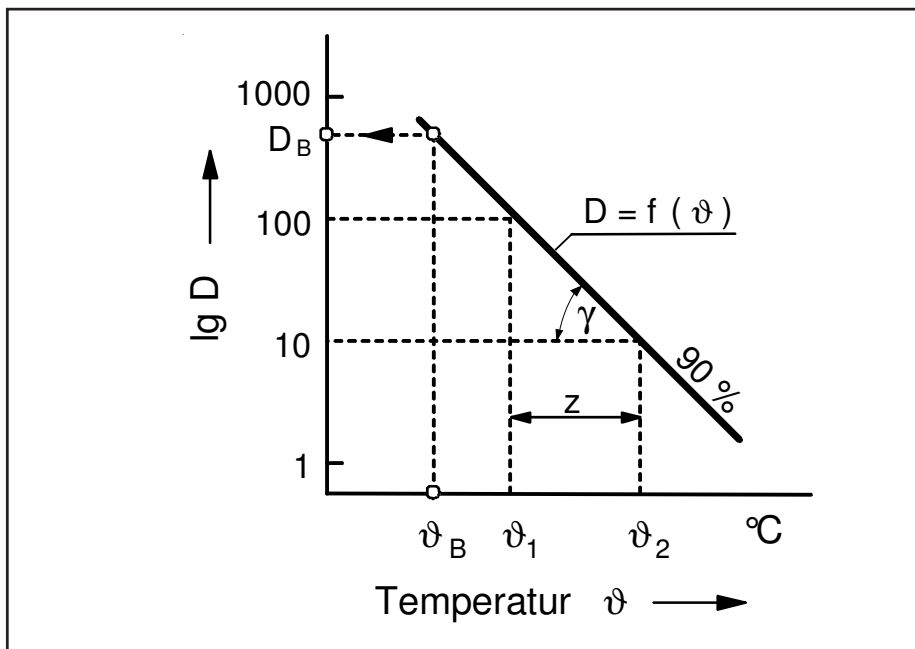


Abb. 3: Bestimmung des z-Wertes aus der Abhängigkeit $\lg D = f(\vartheta)$

Bei realen Wärmebehandlungsverfahren liegt immer ein resultierender Temperatur-Zeit-Verlauf $\vartheta(\tau)$ vor. Danach ist die temperaturabhängige Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k auch von der Zeit abhängig. Die Lösung der Differentialgleichung nimmt dann die Form:

$$\lg \frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = -\frac{1}{2,303} \int_0^{\infty} k d\tau \quad \text{an.}$$

Setzt man für k die oben abgeleitete Formel ein, so erhält man für die hitzebedingte Veränderung eines Merkmals C_j ,

$$\lg \frac{C_{j\tau}}{C_{j0}} = -\frac{1}{D_B} \int_0^{\infty} 10^{\frac{\vartheta(\tau) - \vartheta_0}{z}} d\tau$$

Dabei stellt das Integral $\int_0^{\infty} 10^{\frac{\vartheta(\tau) - \vartheta_0}{z}} d\tau$ den Sterilisationswert (F-Wert) in der Form

$$F = \int_0^{\infty} 10^{\frac{\vartheta(\tau) - \vartheta_0}{z}} d\tau \quad \text{dar.}$$