

Institut für Landtechnik
Professur für Haushalts- und Verfahrenstechnik
Prof. Dr. rer. nat. Rainer Stamminger

**Distributions-, Transport- und Lagerungsmodell (DTL-Modell) zur Prognose des
Frischeverlustes kühlbedürftiger Lebensmittel**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt am: 31.05.2007

von

Dipl.-Ing. Thomas Lettmann

aus

Bonn

(D 98)

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Rainer Stamminger

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Benno Kunz

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Juli 2007

Erscheinungsjahr: 2007

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn

http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, Zusammenhänge zwischen Schwankungen der Umgebungstemperatur eines Produktes in der Kühlkette vom point of sale bis zur Kühlschranklagerung im Haushalt mit Hilfe eines Simulationsmodells abzubilden. Darüberhinaus galt es, auf Grundlage des Modells Auswirkungen auf die Haltbarkeit des Produktes zu prognostizieren. Der Modellbildung lagen aus der Literatur und eigenen Erhebungen bekannte Eckdaten bezüglich Lagerdauer und Lagerbedingungen sowie Erkenntnisse über den spezifischen Verderb der Lebensmittel zugrunde.

Im Mittelpunkt der eigenen Arbeit standen Ergebnisse aus Zeitreihenmessungen zur Ermittlung der Produkterwärmung sowie der Verderbskinetik von MAP-Schweinehackfleisch und Lachsforellen (*Oncorhynchus mykiss*). Ergänzt wurden die Untersuchungen durch empirische Studien zum Einkaufs- und Lagerungsverhalten der Konsumenten. Gemeinsam dienten diese Daten und Erfahrungswerte als Rahmendaten für ein dynamisches Distributions- Transport- und Lagerungsmodell (DTL-Modell), das dann in ein mathematisches Modell umgesetzt wurde.

Neben 12 isothermen Zeitreihen wurden insgesamt 26 DTL-Szenarien im Rahmen dynamischer Temperaturbedingungen nachgebildet. Die Messreihen lieferten insgesamt 2954 Frischedaten (= Einzeldaten) für das Simulationsmodell.

Die Temperaturabhängigkeit der ausgewählten Frischeparameter von MAP-Hackfleisch sowie der Lachsforellen wurde mit zwei unterschiedlichen Temperatur-Response-Funktionen dargestellt (O'Neill, Arrhenius). In Kombination mit unterschiedlichen Anpassungsfunktionen wurden verschiedene Frischeparameter-Modell-Kombinationen verglichen und die zuverlässigste Kombination als Basis für das Simulationsmodell ausgewählt.

Abstract

The ambition of this work was the description of the interrelationship between storage-temperatures of food products in the cold-chain from the point of sale to the storage in private homes with the application of a simulation-model.

Thereby it is essential to predict the impact of different storage conditions on products shelf-life. The model development is based upon information concerning storage temperatures and sojourn time for three different steps of the cold chain as well as the knowledge of the specific spoilage process of the food product.

In focus of the own approach were results from time-series to determine the effects concerning product-warming and the spoilage-kinetic from MA-packed (modified atmosphere) minced-pork and rainbow-trouts (*Oncorhynchus mykiss*) under isothermal and non-isothermal conditions. The time-series were completed by empirical studies concerning shopping and storage behaviour of the consumer. In combination these information are the framework of a dynamic Distribution-, Transport- and storage-model, which was transferred into a mathematical model.

Beside 12 isothermal time series 26 DTS-Szenarios (Distribution/Transport/Storage) were conducted in form of dynamic time series. The measurements delivered overall 2954 freshness-dates (=individual dates) for the simulation-model.

The temperature dependency of the measured freshness-parameters of MA-packed minced pork and rainbow-trouts were described with two different temperature-response-functions (O'Neill, Arrhenius). In combination with different adapted growth functions several freshnessparameter model combinations were compared and the best combination chosen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Haltbarkeit und Verderb kühlbedürftiger Lebensmittel	2
2.1.1	Definition des Begriffs Haltbarkeit	2
2.1.2	Beschreibung des Verderbs von Lebensmitteln	3
2.2	Modellierung des Frischeverlustes kühlbedürftiger Lebensmittel	8
2.2.1	Modellansätze zur Beschreibung der Verderbskinetik	8
2.2.2	Modellierung von Wärmeübergängen	18
2.3	Charakterisierung der Lagerbedingung kühlbedürftiger Lebensmittel ...	21
2.3.1	Stufen unterschiedlicher Kühlketten	21
2.3.2	Verderbsgrenzen kühlbedürftiger Lebensmittel	26
3	Ziel der Arbeit	30
4	Material und Methoden	31
4.1	Beschreibung eines Distributions-, Transports- und Lagermodells	31
4.1.1	Definition eines DTL-Prozessmodells	33
4.1.2	Charakterisierung Produkt-, Belastungsvarianten und Verbrauchertypen ...	34
4.1.3	Produktspezifische Ausrichtung der Modellkomponenten	38
4.1.4	Modell-Komponenten eines Systemmodells	39

4.2	Untersuchung von Frischeparametern und Temperaturverläufen	43
4.2.1	Probenmaterial	43
4.2.2	Probenvor-, -aufbereitung und Lagerung	44
4.2.3	Mikrobiologische Untersuchungen	45
4.2.4	Sensorische und physikalische Untersuchungen	47
5	Ergebnisse	53
5.1	Ergebnisse Hackfleisch	53
5.1.1	Veränderung der Parameter in den Zeitreihenmessungen	53
5.1.2	Anpassung produktspezifischer Zustandsgrößen an statische und dynamische Temperaturverläufe	65
5.1.3	Ergebnisse von Simulationsläufen auf Basis haushaltstypischer Szenarien ..	75
5.2	Ergebnisse Lachsforellen	81
5.2.1	Veränderung der Parameter in den Zeitreihenmessungen	81
5.2.2	Anpassung produktspezifischer Zustandsgrößen an statische und dynamische Temperaturverläufe	85
6	Diskussion	94
7	Zusammenfassung	106
	Literaturverzeichnis	109
	Abbildungsverzeichnis	128
	Tabellenverzeichnis	132
A	Anhang	136

1. Einleitung

Der Lebensmittelverderb bzw. Frischeverlust ist von zahlreichen Veränderungen des Produktes während der Herstellung, des Transports und der Lagerung geprägt. Neben den biologischen Abbauprozessen sind es Temperatur und Zeit, die den Verderb des Lebensmittels beeinflussen. Ungünstige Bedingungen im Umfeld des Produktes, wie Schwankungen der Lagertemperatur, verkürzen die Haltbarkeit eines Lebensmittels, in dem sie den natürlichen Verderb beschleunigen.

Kühlbedürftige Lebensmittel verlieren ihre Frische sowohl durch Unterbrechung der Kühlkette vor dem Kauf als auch im eigenen Haushalt. Der Konsument steht am Ende der Distributionskette und trägt durch sein Fehlverhalten im Umgang mit zu kühlenden Lebensmitteln wesentlich häufiger zu möglichen Gesundheitsrisiken bei. Besonders kritische Prozessschritte im Verantwortungsbereich des Verbrauchers sind vor allem die unsachgemäße Kühlung während des Transports vom Handel zum eigenen Kühlschrank und falsche Lagertemperaturen im Haushaltskühlschrank.

Bislang fehlen Modellansätze, die es erlauben die komplexen Zusammenhänge zwischen den Schwankungen der Umgebungstemperaturen eines Produktes in der Kühlkette vom point of sale¹ bis zur Kühlschranklagerung im Haushalt nachzubilden und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Haltbarkeit des Produktes zu prognostizieren. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Wärmeübergänge aus der Umwelt über die Verpackung zum Produkt. Die vorliegende Arbeit soll hierzu, auf der Grundlage einer Reihe eigener empirischer und experimenteller Studien, einen Beitrag zur Modellentwicklung leisten.

¹Unter dem point of sale versteht man den Zeitpunkt, an dem das Lebensmittel den Distributionsweg verlässt und in die Verantwortung des Kunden übergeht.

2. Grundlagen

2.1. Haltbarkeit und Verderb kühlbedürftiger Lebensmittel

2.1.1. Definition des Begriffs Haltbarkeit

Haltbarkeit lässt sich unter unterschiedlichen Aspekten betrachten. Beispielsweise unter dem Gesichtspunkt von Garantien, die der Hersteller von Lebensmitteln dem Konsumenten gibt. In Deutschland kann sich der Konsument nach dem Kauf eines Produktes am Mindesthaltbarkeitsdatum (MHD) orientieren. Es sagt jedoch nichts über die tatsächliche Frische des Produktes, sondern nur etwas über die Haltbarkeit bei empfohlenen Lagerbedingungen aus (§ 7 Lebensmittel-Kennzeichnungsverordnung (LMKV)). Fu u. a. (1991) betonen, dass die Temperaturhistorie eines Produktes dabei nicht berücksichtigt wird und es durch Unterbrechungen der Kühlkette, auch vor Ablauf des MHDs, zu einem frühzeitigem Qualitätsverlust kommen kann. Der Hersteller garantiert somit lediglich, dass mindestens bis zu diesem Stichtag die wertbestimmenden Eigenschaften des Lebensmittels, das sind z.B. Farbe, Geruch und Geschmack bei angemessener Lagerung erhalten bleiben. Nach Ablauf des vom Hersteller festgelegten MHD ist die Ware nicht automatisch verdorben. Sie darf noch verkauft werden, wenn sie einwandfrei ist. Neben dem MHD legte der Gesetzgeber für sehr leicht verderbliche Produkte wie z.B. Hackfleisch das so genannte Verbrauchsdatum rechtlich bindend fest. Diese Lebensmittel dürfen nach Ablauf des Verbrauchsdatums nicht mehr verkauft werden (§ 7a LMKV).

Der Lebensmittelhersteller definiert die Haltbarkeit auf der maximal tolerierbaren Summe von Qualitätseinbußen durch meist mikrobiologische Veränderungen vor dem Konsum. Aus Sicht von Akterian (1996) und Labuza (1994) ist zu berücksichtigen, dass zusätzlich aus Sicht des Verbrauchers der Zeitpunkt herangezogen wird, an dem senso-

rische Veränderungen wahrnehmbar sind. Andere Autoren definieren, vor technisch-organisatorischem Hintergrund, Haltbarkeit schlicht als Dauer der Lagerung nach der Produktion bis zum Verderb, bzw. zum bedenkenlosen Verzehr eines Lebensmittels (Upmann u. a. 2000; Taoukis u. a. 1997).

2.1.2. Beschreibung des Verderbs von Lebensmitteln

Bevor der Verderbsprozess eines Lebensmittels beschrieben werden kann, ist eine genaue Kenntnis über die Faktoren notwendig, die den Verderb beeinflussen (Walker 1994). Frische Lebensmittel sind in der Regel komplexe, aktive Systeme, die gleichzeitig *mikrobiologischen*, *enzymatischen* und *physikochemischen* Reaktionen unterworfen sind (Singh u. Cadwallader 2003). Diese Reaktionen rufen in der Regel ungewünschte sensorische Veränderungen hervor (Sutherland 2003). Dabei ist wohl bekannt, dass sowohl die enzymatische wie auch die mikrobiologische Aktivität stark von der Temperatur beeinflusst wird (Huss 1995). McKenna (2002) weist darauf hin, dass sich viele Lebensmittel durch technologische Massnahmen (z.B. Konservierungsverfahren, Verpackung usw.) in einen „pseudo-stabilen“ Zustand bringen lassen. Dies ist jedoch für Frischprodukte nur sehr eingeschränkt möglich. Dennoch ist der Einfluss der beschriebenen haltbarkeitsverlängernden Massnahmen bei der Beschreibung des Verderbs kühlbedürftiger Lebensmittel, neben produkt- und prozessbezogenen Kriterien, miteinzubeziehen. Eine schematische Übersicht über den komplexen Mechanismus des Lebensmittelverderbs gibt Abbildung 2-1.

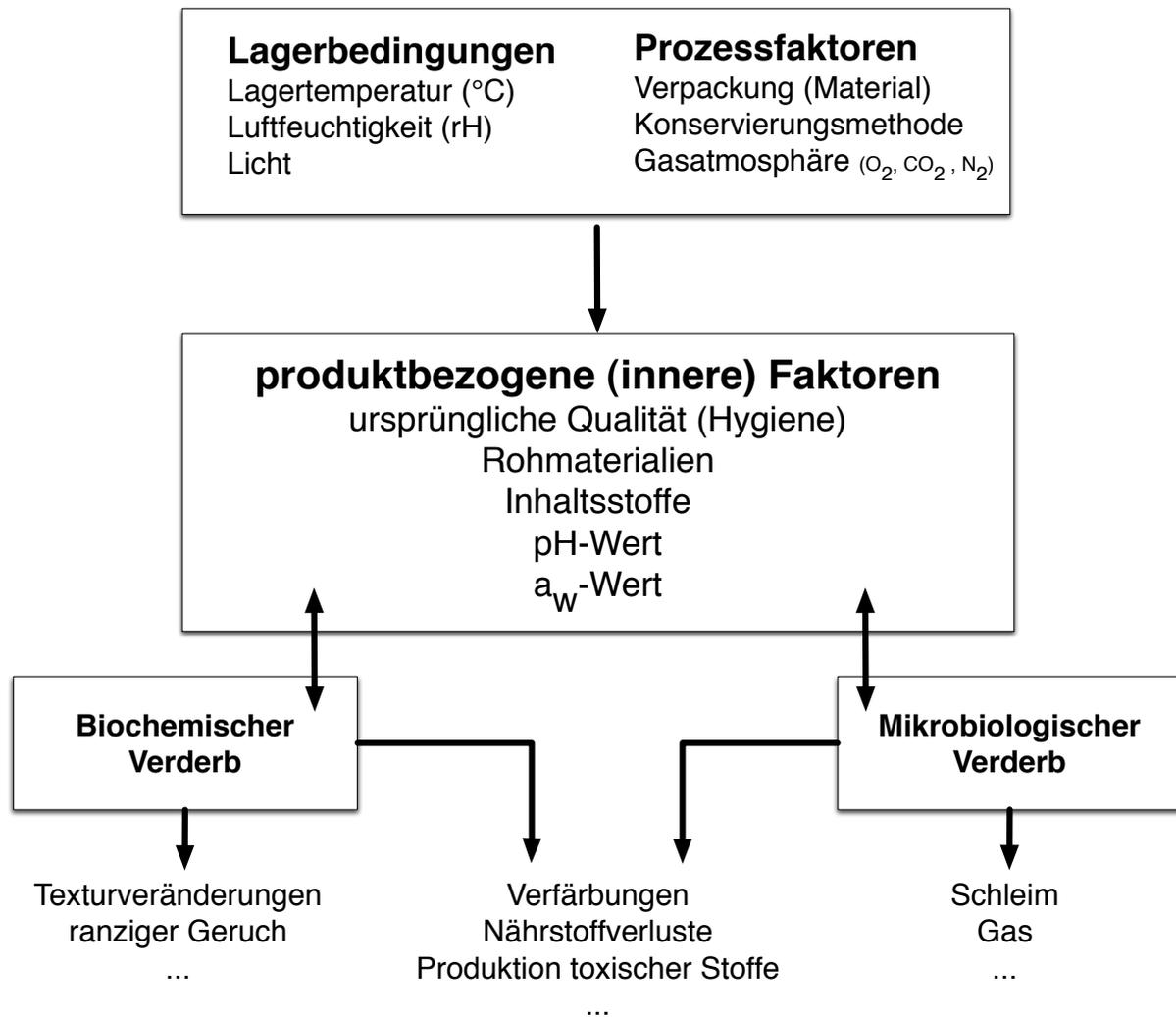


Abbildung 2-1.: Wechselwirkungen zwischen Lagerbedingungen und Prozessfaktoren mit dem LM-Verderb während der Lagerung (modifiziert nach in't Veld (1996))

Einflussfaktoren auf den Verderb

Die als Parameter messbaren Faktoren, die den Produktverderb auf unterschiedliche Art und Weise beeinflussen, lassen sich in in drei Kategorien einteilen (FDA 2001):

I. Produktbezogene Faktoren (innere Faktoren)

Zu den inneren Faktoren zählen alle Parameter, deren Veränderungen direkt am Lebensmittel messbar sind und die Qualität des Lebensmittels maßgeblich beeinflussen (Kilcast u. Subramaniam 2000).

Der pH-Wert ist ein wichtiger Faktor für das Wachstum von Mikroorganismen in Lebensmitteln (Lücke 2003). Im allgemeinen befindet sich der optimale pH-Wert

für lebensmittelverderbende und pathogene Mikroorganismen im Neutralbereich (pH 7) (Sinell 2004). Lücke (2003) spricht von einem pH-Bereich zwischen 5,6 und 5,8, der das Wachstum vieler säureempfindlicher Mikroorganismen auf Muskelfleisch (Fleisch-, Fisch- und Geflügelfleisch) verzögert. Ein pH-Wert von 4,5 stellt die untere Grenze der Vermehrungsfähigkeit von mit Fleisch assoziierten Mikroorganismen dar (Reuter 1999). Die meisten Fleischsorten sowie Fisch und Meeresfrüchte haben einen pH über 5,6. Daher können sowohl Bakterien als auch Schimmelpilze und Hefen auf diesen Lebensmitteln wachsen (Jay u. a. 2005). Somit hängt die mikrobiologische Beschaffenheit entscheidend vom pH-Wert ab, der durch native organische Säuren und organische Säuren, die durch Mikroorganismenkontamination gebildet werden, beeinflusst wird (Kunz 2003).

Die für den Lebensmittelverderb verantwortlichen Mikroorganismen bestehen überwiegend aus Wasser und benötigen es zur Zellerhaltung, zum Stoffwechsel und letztendlich zum Wachstum. Ihr Wachstumsvermögen ist dabei am höchsten, wenn der Anteil von verfügbarem Wasser einen für sie optimalen Wert erreicht (Jay u. a. 2005). Als Mass für das nichtgebundene und somit für Mikroorganismen verfügbare Wasser ist die Wasseraktivität bzw. der a_w -Wert eingeführt worden (activity of water). Die Wasseraktivität ist definiert als der Quotient des Wasserdampfdruckes vom Substrat (p) und vom Sättigungsdampfdruck von reinem Wasser (p_0) bei gleicher Temperatur (Alzamora u. a. 2003). Der a_w -Wert-Bereich, der das Wachstum der meisten Mikroorganismen begünstigt, liegt zwischen 0,90 und 0,99 (Kunz 2006; Leistner u. Wirth 1972).

$$a_w - \text{Wert} = \frac{p}{p_0}$$

II. Lagerbedingungen (äussere Faktoren)

Die Reaktions- und Wachstumsgeschwindigkeit der Mikroorganismen ist massgeblich von den Lagerbedingungen, wie z.B. Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoffgehalt der Umgebung abhängig. Unter den Faktoren, die den Lebensmittelverderb maßgeblich am stärksten beeinflusst, ist die Temperatur der wichtigste Faktor. Dabei muss zwischen Produkttemperatur (Kern und Oberflächentemperatur des Produktes) und Lagertemperatur (Umgebungsluft bei der Lagerung) unterschieden werden (BgVV 2000).

Obwohl die Wachstumsrate der Mikroorganismen mit zunehmender Temperatur in der Regel ansteigt, bestehen jedoch beträchtliche Unterschiede zwischen verschiedenen Bakterienarten (Upmann u. a. 2000). Mikroorganismen vermehren sich nur in einem bestimmten Temperaturbereich. Die Organismen haben eine optimale, eine minimale und eine maximale Wachstumstemperatur.

Neben der Temperatur hat auch die Luftfeuchte und damit zusammenhängend die Luftgeschwindigkeit der Umgebungsluft einen Einfluss auf die Frische der Lebensmittel. Mit Steuerung der relativen Luftfeuchtigkeit (rH) besteht die Möglichkeit zur Beeinflussung des a_w -Wertes der Lebensmittel (Upmann u. a. 2000). Grundsätzlich gilt, dass mit steigender Luftgeschwindigkeit auch die relative Luftfeuchtigkeit erhöht werden sollte, um übermäßige Gewichtsverluste und Austrocknung unverpackter Produkte zu verhindern. Bei Produkten, die nicht wasserdampfdicht verpackt sind, kommt der relativen Luftfeuchte im Kühlraum eine besondere Bedeutung zu. Zu hohe Feuchtigkeit begünstigt auch bei den geforderten Kühltemperaturen das Wachstum unerwünschter Mikroorganismen auf tierischen Produkten (Prändl u. a. 1988). Der damit verbundene Frischeverlust wird zusätzlich durch Austrocknung des Lebensmittel verstärkt. Um diese Abläufe zu verzögern und die Lebensmittel möglichst lange in bestem Zustand zu erhalten, bedarf es besonderer Anforderungen an Lagerung, Transport sowie Verpackung der Lebensmittel (Pichner 1999).

III. *Prozessfaktoren (Spezielle Lager- und Verpackungstechniken)*

Durch die Art der Verpackung bzw. durch Einsatz einer entsprechenden Verpackungstechnik kann die mikrobiologische Flora des Lebensmittels beeinflusst werden. Wird ein Lebensmittel verpackt, so ist dessen Mikroorganismenflora überwiegend von der umgebenden Gasatmosphäre und der Gasdurchlässigkeit des Verpackungsmaterial geprägt. Dabei kann zwischen Schutzgasverpackungen (Lagerung unter modifizierter Atmosphäre: MAP), Verpackungen in gasdurchlässigen Folien und Vakuumverpackungen unterschieden werden, die jeweils verschiedene Effekte bezüglich der Haltbarkeit erzielen (Smulders u. Upmann 2000).

Die Verpackung kühlbedürftiger Lebensmittel unter modifizierter Atmosphäre hat

es zum Ziel, oxidative Prozesse, enzymatische Veränderungen und die Aktivität von Mikroorganismen zu verzögern. Der Begriff der modifizierten Atmosphäre kennzeichnet im Prinzip jede veränderte Atmosphäre, die wesentlich von der Luftzusammensetzung abweicht. Dabei kann die Luft durch ein einzelnes Gas oder eine Gasmixtur ersetzt werden (Stanbridge u. Davies 1998). Dies geschieht meist durch Verdrängung des Luftsauerstoffs mit Hilfe von Stickstoff (N_2) und Kohlendioxid (CO_2) und deren Gemischen. Die Einstellungen der richtigen Gasmischung während des Verpackungsprozesses und die Aufrechterhaltung des Mischverhältnisses im verpackten Lebensmittel bis zum Konsum ist essentiell, um Produktqualität, Aussehen und Haltbarkeit sicherzustellen (Krämer 2004). Der Einsatz der Schutzgase unterstützt die Haltbarkeit der Lebensmittel u.a. dadurch, dass der von Mikroorganismen benötigte Sauerstoff nicht mehr im ausreichenden Maße vorhanden ist (Prüßmeier 2005). Dabei ist zu beachten, dass sich die Gasatmosphäre während der Lagerung kontinuierlich durch Respiration, biochemische Vorgänge und Permeation durch das Verpackungsmaterial verändert (Simpson u. Carevic 2004). Die MAP-Lagerung ist nicht zu verwechseln mit der CA¹-Lagerung. Bei der CA-Lagerung wird im Gegensatz zur MAP-Lagerung eine genau definierte Luftzusammensetzung konstant beibehalten (Fellows 2000).

Zurzeit werden in der Industrie vorwiegend SB-Frischfleischverpackungen mit hohem O_2 -Gehalten begast, um dem Verbraucherwunsch entsprechend die stabile rote Farbe zu gewährleisten. Dies ist aber unter bakteriologischen Gesichtspunkten problematisch, da die Haltbarkeit verkürzt wird. Begast man stattdessen mit hohem CO_2 -Gehalten, so wird das Fleisch grau und im Auge des Konsumenten unansehnlich (Klettner 2001). Eine Haltbarkeitsverlängerung von Fischprodukten durch Begasung der Verpackung hat einen geringeren Effekt als bei Fleischprodukten (Dalgaard u. a. 1993).

¹CA = controlled atmosphere

2.2. Modellierung des Frischeverlustes kühlbedürftiger Lebensmittel

2.2.1. Modellansätze zur Beschreibung der Verderbskinetik

Bei den verschiedenen, den Verderb beeinflussenden Faktoren, versucht man nicht nur eine Quantifizierung ihrer Wirkung, sondern gleichzeitig eine Modellierung ihrer Interaktion. Eine der wichtigsten Ansätze der Modellierung des Lebensmittelverderbs ist die Beschreibung des charakteristischen Wachstumsverhaltens produktspezifischer mikrobiologischer Indikatorkeime. Mit der Ermittlung der Auftretenswahrscheinlichkeiten bzw. der Wachstumsgeschwindigkeiten von produktspezifischen Verderbsorganismen, beschäftigt sich intensiv die „vorhersagenden Mikrobiologie“. Sie verbindet im interdisziplinären Ansatz Elemente Mikrobiologie, Mathematik und Statistik, um das Wachstum bzw. die Abtötung produktspezifischer Mikroorganismen unter definierten Umweltbedingungen durch mathematische Modelle zu beschreiben (McDonald u. Sun 1999; McMeekin u. a. 1997). Ziel der „vorhersagenden Mikrobiologie“ ist es, die Haltbarkeitsdauer, ohne aufwendige mikrobiologische Versuchsreihen, auf der Basis von Simulationsläufen vorherzusagen. Dies erleichtert die Abschätzung der mikrobiologischen Sicherheit und Stabilität von Lebensmitteln während der Herstellung, der Distribution, dem Transport und der Lagerung des Lebensmittels. Mit diesen Vorsätzen arbeiten derzeit weltweit eine Reihe von Forschergruppen, um hierzu die methodisch-theoretischen Grundlagen zu schaffen (Olafsdottir u. a. 2006; Smolander u. a. 2006; Kreyenschmidt u. a. 2006).

Es können zwei Basistypen von Modellansätzen unterschieden werden:

- A. *Kinetische Modellansätze* ermöglichen quantitative Aussagen über die mikrobiologische Qualität. Dadurch ist es möglich, den Verderb von Lebensmitteln zeitlich abzubilden und vorherzusagen. Als Qualitätsparameter für derartige Modelle dient üblicherweise ein produktspezifischer Verderbsorganismus, der die metabolische Aktivität widerspiegelt (Rosso u. a. 1995). Um diesen Organismus für ein bestimmtes Lebensmittel zu ermitteln, betont Kreyenschmidt (2003), dass es nach wie vor erforderlich ist, umfangreiche Untersuchungen durchzuführen.

- B. *Wahrscheinlichkeitsmodelle* beschreiben die Wahrscheinlichkeit des Wachstums bzw. der Toxinbildung unerwünschter Mikroorganismen unter definierten Lagerungsbedingungen. Schaffner u. a. (1998) sehen dabei nicht qualitative, sondern quantitative Aspekte im Vordergrund.

Die Zuverlässigkeit eines Modells ist abhängig vom Umfang des zur Verfügung stehenden Datenpools und der Qualität des Datenmaterials. Die Daten für den Modellinput können nach Dalgaard (1999) mit zwei unterschiedlichen Methoden gewonnen werden

1. Untersuchungen, die direkt am Lebensmittel durchgeführt werden. Als Nachteil geben McDonald u. Sun (1999) an, dass die Untersuchungen mit hohem Kosten- und Arbeitsaufwand verbunden sind.
2. Untersuchung des Wachstums produktspezifischer Mikroorganismen in Kulturmedien. Dadurch ist es möglich, die Umgebungsfaktoren (z.B. pH-Wert usw.) präzise einzustellen, um die Auswirkungen auf das mikrobiologische Wachstum zu analysieren. Kritisch ist jedoch die Einstellung der Kulturmedien mit Substanzen, die das Verhalten der Mikroorganismen beeinflussen können und somit nicht dem Verhalten des Lebensmittels entspricht. Ausserdem kann mit dieser Methode die Wechselwirkung mit anderen Keimen (kompetitiver Antagonismus) nicht immer vollständig erfasst werden (Kreyenschmidt 2003).

Im folgenden sollen nun die unterschiedlichen Schritte bei der Entwicklung kinetischer Wachstumsmodelle zur Bestimmung des Frischeverlusts näher beschrieben werden.

In einem ersten Schritt (*primäre Ebene*) gilt es, die Entwicklung des qualitätsbestimmenden Frischeparameters in Abhängigkeit von der Zeit darzustellen. Die meisten Autoren setzen den gesamten Wachstumsverlauf oder spezifische Abschnitte der Wachstumskurve in mathematischen Funktionen um (Nicolai u. a. 1995; Zwietering u. a. 1991; De Meesters u. a. 2001; Kreyenschmidt 2003).

Der typische Verlauf der Wachstumskurve von Mikroorganismen ist von sigmoidaler Gestalt und kann mit folgenden Kenngrößen beschrieben werden, die für die Ableitung der Funktionen notwendig sind:

- Anfangskeimgehalt N_{min}
- maximale Keimdichte bzw. asymptotische Kapazitätsgrenze N_{max}
- lag-Phase (τ)
- spezifische Wachstumsrate (μ_{max})

Abbildung 2-2 zeigt die typische Gestalt der Wachstumskurve von Mikroorganismen.

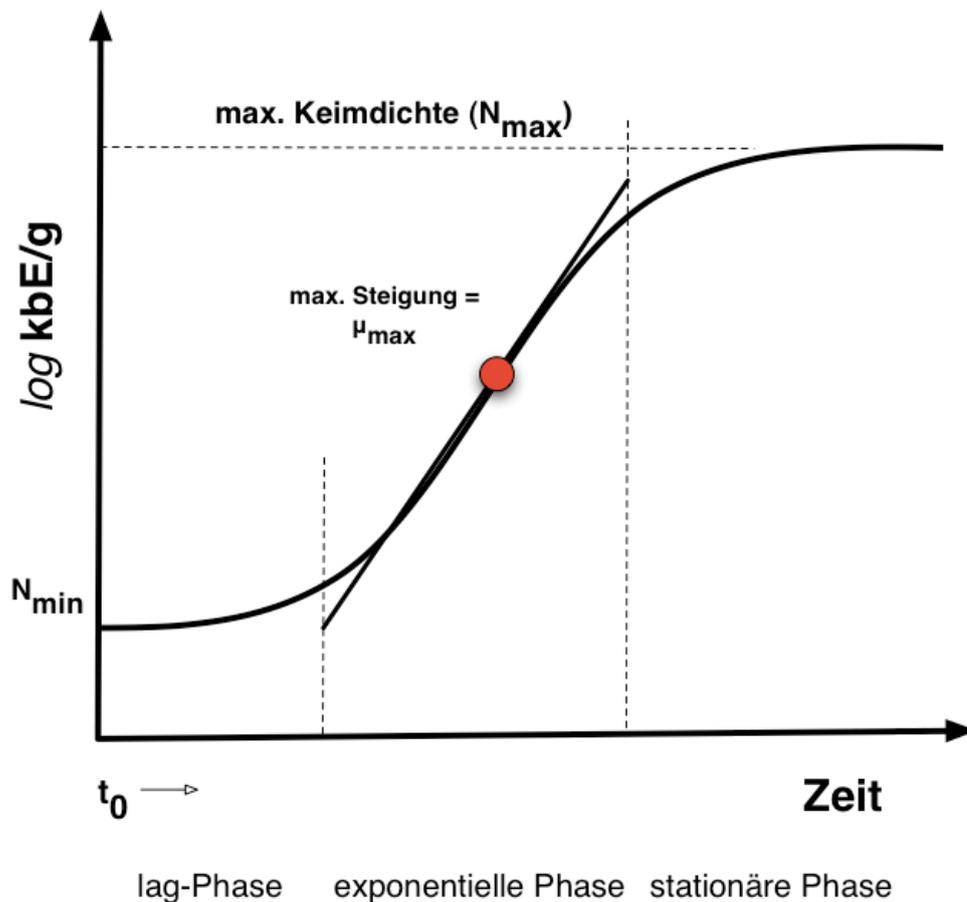


Abbildung 2-2.: Beispiel für eine sigmoide Wachstumskurve von Mikroorganismen

Eine häufig verwendete Funktion zur Beschreibung der Zellentwicklung ist die Gompertz-Funktion (Gompertz 1825), welche nach Ansicht mehrerer Autoren zu einer guten Bestimmung der Wachstumsparameter führt (Kreyenschmidt 2003; Zaritzky u. a. 1997; Zwietering u. a. 1990).

$$\log N(t) = \log N_{min} + N_{max}(-\exp(-\mu_{max}(t - M))) \quad (2.1)$$

t = Zeit in h, $N(t)$ = Keimdichte zur Zeit t in kbE/g, N_{min} = Anfangskeimdichte in kbE/g, N_{max} = Maximalkeimdichte in kbE/g, μ_{max} = spez. Wachstumsrate in h^{-1} , M = Zeit bei der Wachstumsrate maximal ist in h.

Labuza u. Fu (1995) kritisieren, dass diese Funktion ausschliesslich für konstante Temperaturen ausgelegt ist. Andere Autoren sprechen von unzuverlässigen Berechnungen der lag-Phase und Fehlschätzungen der Wachstumsrate. So verläuft die Kurve in der lag-Phase nicht wie in der Realität horizontal und in der exponentiellen Phase ändert sich die Steigung der Kurve kontinuierlich (Kleer u. Hildebrandt 2002).

Neben der Gompertz-Funktion gibt es weitere Möglichkeiten, um die Wachstumskurven von Mikroorganismen mathematisch zu beschreiben. Dabei sind vor allem die logistische Wachstumsgleichung und ein Differentialgleichungsansatz von Baranyi zu nennen (Baranyi u. a. 1993).

Gleichung 2.2 zeigt die Wachstumsfunktion für logistisches oder retardiertes Wachstum ohne Berücksichtigung der lag-Phase. Für $t \rightarrow \infty$ erreicht die Maximalpopulation, eine von der Umwelt vorgegebene Kapazität (hier: N_{max}) (Ebers 2005; Verhulst 1838).

$$\log(N(t)) = \log\left(\frac{N_{max} \cdot N_{min}}{N_{min} - (N_{min} - N_{max}) \cdot \exp(-\mu_{max} \cdot t)}\right) \quad (2.2)$$

t = Zeit in h, $N(t)$ = Keimdichte zur Zeit t in kbE/g, N_{min} = Anfangskeimdichte in kbE/g, N_{max} = Maximalkeimdichte in kbE/g, μ_{max} = spez. Wachstumsrate in h^{-1}

Der Nachteil dieses so genannten logistischen Wachstumsmodells nach Verhulst (1838) besteht darin, dass es sich bei der Grösse Maximalkeimdichte (N_{max}) um eine als konstant angenommene Grösse handelt, die für jedes untersuchte System durch Messungen neu ermittelt werden muss (Onigkeit 2006).

Obige Gleichung, erweitert um die lag-Phase, ergibt Formel 2.3 (Richter 1985).

$$\log(N(t)) = \log \left(N_{min} + \frac{N_{max} - N_{min}}{1 + \exp(-\mu_{max} \cdot (t - \tau_{lag}))} \right) \quad (2.3)$$

t = Zeit in h, N_t = Keimdichte zur Zeit t in kbE/g, N_{min} = Anfangskeimdichte in kbE/g, N_{max} = Maximalkeimdichte in kbE/g, μ_{max} = spez. Wachstumsrate in h^{-1} , τ_{lag} = lag-Phase in h

Auch Baranyi u. a. (1993) entwickelten einen Differentialgleichungsansatz, der eine zusätzliche Anpassungsfunktion für die lag-Phase beinhaltet. Die Erweiterung berücksichtigt, dass Zellen für ihre Vermehrung eine jeweilige Anpassungszeit an neue Umgebungsbedingungen benötigen. Unter dieser Anpassungszeit ist die Dauer der lag-Phase zu verstehen, in der ein wachstumslimitierendes Substrat q bis zur Wachstumsgrenze synthetisiert wird (McKellar u. Lu 2004). Es gilt:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{q(t)}{q(t) + 1} \cdot \mu_{max} \left(1 - \left(\frac{N(t)}{N_{max}} \right)^m \right) N(t) \quad (2.4)$$

Der Parameter m beschreibt die Biegung der Wachstumskurve vor der stationären Phase. Um das Modell zu vereinfachen, wird $m = 1$ gesetzt (auf einen logistischen Kurvenverlauf reduziert). Dabei ist N die Keimdichte zum Zeitpunkt t , μ_{max} ist die spez. Wachstumsrate und $q(t)$ ist die Konzentration des wachstumslimitierenden Substrats, welches von der Zeit abhängig ist:

$$\frac{dq}{dt} = \mu_{max} q(t) \quad (2.5)$$

Der Anfangswert von $q(q_0)$ ist ein Mass für den ursprünglichen physiologischen Zustand der Zellen. Weiterhin gilt:

$$h_0 = \ln \left(1 + \frac{1}{q_0} \right) = \mu_{max} \tau_{lag} \quad (2.6)$$

Eine detaillierte Darstellung der Modellparameter und die Beziehung zwischen h_0 , τ und μ_{max} zeigt Abbildung 2-3.

Somit hat das Modell vier Parameter: N_0 Anfangskeimdichte; h_0 ; N_{max} Maximalkeimdichte; μ_{max} spez. Wachstumsrate.

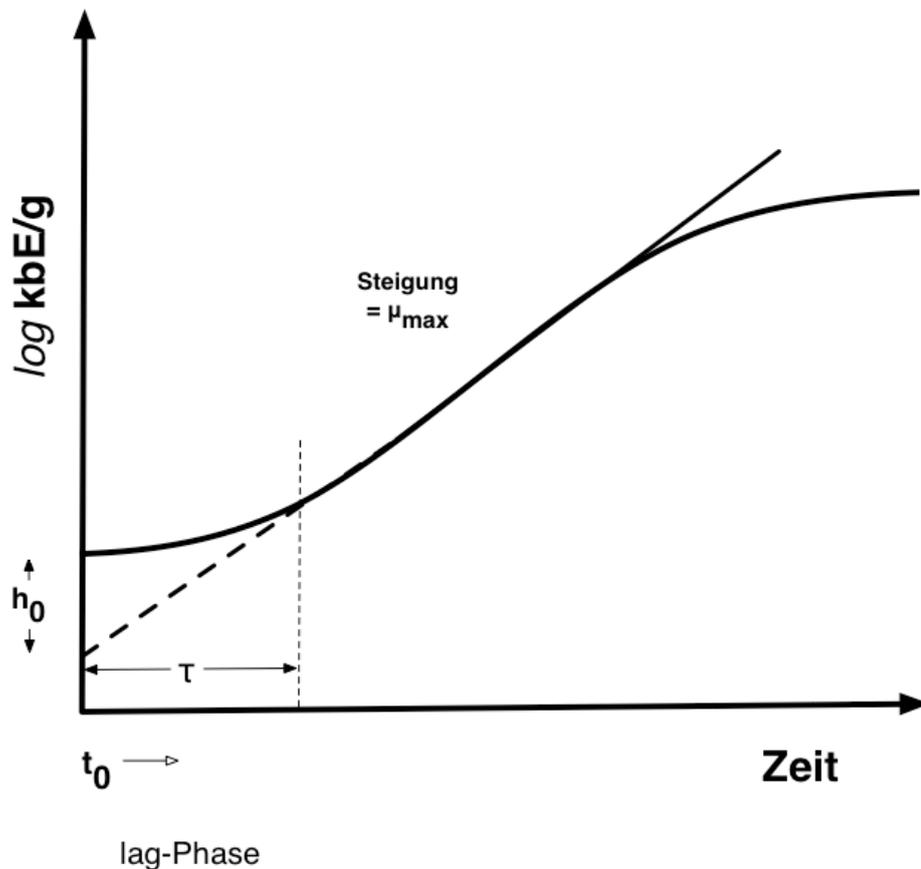


Abbildung 2-3.: Beispiel einer aus dem Baranyi-Modell abgeleiteten Wachstumskurve und Beschreibung der Parameter (McKellar u. Lu 2004)

Problematisch bei der Modellierung des mikrobiologischen Wachstums sind dynamische Umgebungstemperaturen. Koutsoumanis (2001) beschreibt, dass es dabei zu einem veränderten Wachstumsverhalten kommt, das von dem Verhalten unter statischen Bedingungen abweicht. Diese Tatsachen erklären Labuza u. a. (1992) und Kunz (1994) durch positive oder negative Historie- und Diauxieeffekte. Auch bei enzymatischen oder sensorischen Parametern sehen Taoukis u. a. (1997) und Labuza (2000) solche Einflüsse dynamischer Umgebungstemperaturen. Dabei sind mikrobieller Verderb und die messbaren Veränderungen enzymatischer und sensorischer Parameter oft eng miteinander korreliert. So beschreibt Koutsoumanis u. a. (2002), dass eine Belastung von 10^7 Keimen eines spezifischen Verderbskeims eng mit der sensorischen Zurückweisung eines Produktes korreliert und als Verderbskriterium verwendet werden kann. Kreyenschmidt (2003) definierte einen Sensorikindex (SI), der die Kriterien Farbe, Geruch und

Textur berücksichtigt und mit dem mikrobiologisch erfassten Verderb von Schweine- und Geflügelfleisch korreliert ist.

Im zweiten Schritt des Modellierungsprozesses (*sekundäre Ebene*) werden Zeit- wie auch Temperaturabhängigkeit der Wachstumsraten gemeinsam beschrieben. Bei der Überprüfung und Validierung der Modelle auf sekundärer Ebene ist es wichtig, dass die Verlässlichkeit der Anpassungen der individuellen Wachstumskurven (prim. Ebene) durch die Wahl geeigneter Funktionen gewährleistet ist (Betts u. Walker 2003). Der am häufigsten in der Literatur beschriebene Modellansatz auf sekundärer Ebene ist der von Arrhenius (Arrhenius 1884). Dieser Kinetikansatz aus der Chemie wurde von mehreren Autoren als Methode der Wahl für die Beschreibung des Temperatureinflusses auf den Frischeverlust von Lebensmitteln vorgeschlagen (Karel u. Lund 2003; Dolan 2003; Kreyenschmidt 2003; Roos 2001; Labuza u. Fu 1995; Whiting 1995; Taoukis u. Giannakourou 2003). Formel 2.7 zeigt den Arrhenius-Ansatz:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R\vartheta}\right) \quad (2.7)$$

k = Entwicklungsrate, k_0 = Konstante, die sich auf die Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Referenztemperatur ϑ_0 beziehen lässt. E_a = Aktivierungsenergie der Reaktion, die den Frischeverlust leitet, R = universelle Gaskonstante $8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$, ϑ = Temperatur

Diese Funktion kann als Gerade veranschaulicht werden, wenn man die logarithmierte (\ln) Wachstums- bzw. Entwicklungsrate gegen den Reziprokwert der absoluten Temperatur aufträgt. Aus dem sogenannten Arrhenius-Plot errechnet sich die Aktivierungsenergie, über die eine Einschätzung der Temperaturabhängigkeit des Frischeverlustes vorgenommen werden kann. Die Aktivierungsenergie für Reaktionen, die den Lebensmittelverderb verursachen, bewegt sich im Bereich zwischen 30 und 120 kJ/mol (Taoukis 2001). In Tabelle 2-1 sind die berechneten Aktivierungsenergien² ausgewählter Lebensmittel zusammengefasst.

Ein weiterer Ansatz, um die Temperaturabhängigkeit des Lebensmittelverderbs auszudrücken, ist der so genannte Q_{10} -Ansatz. Dieser beschreibt das Verhältnis der Re-

²Quellen: (1) Kreyenschmidt (2003) (2) Labuza (1982) (3) Gill (1986) (4) Hart u. a. (1991)

Tabelle 2-1.: Übersicht über ermittelte Aktivierungsenergien unterschiedlich gelagerter LM

Lebensmittel	Lagerungsumgebung	E_a (kcal · mol ⁻¹)	Quelle
Schweinefleisch	aerob	19,9	(1)
	n.b.	27	(2)
	vakuumverpackt	31,3	(2) (3)
	CO ₂	40,4	(2) (3)
Rindfleisch	Luft	15,8	(2)
	10 % CO ₂	20,3	(2)
	20% CO ₂	19,2	(2)
	30 % CO ₂	19,9	(2)
Fisch (generell)	n.b.	26	(2)
Heilbutt	n.b.	23	(2)
Lachs	n.b.	24	(2)
Geflügel	n.b.	20,2	(2)
	Luft	15,9	(4)
	30 % CO ₂ +Luft	23,5	(4)
	30 % CO ₂ + N ₂	23,5	(4)
Putenbrust	100 % CO ₂	27,1	(4)
	aerob	20,6	(1)

aktionsraten bei einer bestimmten Temperatur und einer um 10 °C erniedrigten Temperatur (Toledo 1999). Ein Q_{10} -Wert von 2 bedeutet, dass sich die Reaktionsrate bei einer Erhöhung um 10°C verdoppelt hat. Der Q_{10} -Ansatz ist jedoch nur in einem eingeschränkten Temperaturbereich gültig. Bei der Extrapolation über grosse Temperaturbereiche bringt nach Labuza (1994) der Ansatz von Arrhenius bessere Ergebnisse .

Dagegen basiert das Temperaturmodell nach O'Neill (1968) auf zwei Temperaturannahmen, einer Optimumtemperatur (ϑ_{opt}) und einer Letaltemperatur (ϑ_{max}). Gemeinsam betrachtet erlauben diese Parameter, den von biologischen Prozessen determinierten Verlauf des Verderbs in Abhängigkeit von der Temperatur nachzubilden. Die Funktion für die Wachstumsrate μ_{max} zeigt Formel 2.8.

$$\mu_{max} = \mu_{opt} \left(\frac{\vartheta_{max} - \vartheta}{\vartheta_{max} - \vartheta_{opt}} \right)^x \cdot \exp \left(\frac{x(\vartheta - \vartheta_{opt})}{\vartheta_{max} - \vartheta_{opt}} \right) \quad (2.8)$$

mit:

$$x = \frac{\left(b \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{40}{b}} \right) \right)^2}{400} \quad (2.9)$$

μ_{opt} = Rate bei der Optimumtemperatur, und:

$$b = (Q_{10} - 1)(\vartheta_{max} - \vartheta_{opt}) \quad (2.10)$$

Tabelle 2-2 zeigt eine Auswahl von Modellansätzen, die bereits in der Literatur zur Schätzung der Frische und Haltbarkeit von Lebensmitteln angewendet wurden.

Tabelle 2-2.: Übersicht über Modelle zur Prognose des Wachstums von Mikroorganismen unter isothermen Bedingungen modifiziert nach Ross u. Dalgaard (2004)

Modelltyp	Parameter	Temperatur	Mikroorganismus	Quelle
Arrhenius	μ_{max}	2-20 °C	<i>Enterobacteriaceae</i> <i>Pseudomonas ssp.</i>	(Kreyenschmidt 2003)
Arrhenius	μ_{max}	0-20 °C	<i>Br. thermosphacta</i>	(Koutsoumanis u. Nychas 2000)
Polynom	μ_{max} , lag	4-30 °C	<i>Pseudomonas ssp.</i>	(Membre u. Burlot 1994)
Arrhenius	μ_{max}	0-20 °C	<i>Pseudomonas ssp.</i>	(Koutsoumanis u. Nychas 2000)
Square-root	μ_{max} , lag	0-15 °C	<i>Pseudomonas ssp.</i>	(Koutsoumanis 2001)
Square-root	GZ	0-30 °C	<i>Pseudomonas ssp.</i>	(Neumeyer u. a. 1997)
Square-root	μ_{max}	0-35 °C	<i>Shewanella ssp.</i>	(Dalgaard u. a. 1993)
Arrhenius	μ_{max}	0-20 °C	<i>Shewanella ssp.</i>	(Koutsoumanis u. Nychas 2000)
Polynom	μ_{max} , lag	2-11 °C	<i>Enterobacteriaceae</i>	(Pin u. Baranyi 1998)

lag = lag-Phase; GZ = Generationszeit

Werden Modelle der primären und sekundären Ebene kombiniert (=tertiäre Ebene), sieht Whiting (1995) eine Möglichkeit, das Wachstum ausgewählter Bakterien unter bestimmten Bedingungen mit Hilfe von Softwareprogrammen vorherzusagen. Ein Teil der vorgestellten mathematischen Modelle gibt es bereits als Softwareprogramm auf dem Markt. Beispiele sind das Food Micromodel und das Pathogen Modelling Programme (PMP), mit denen das Verhalten vieler pathogener Bakterien in Lebensmitteln vorausgesagt werden kann (Koutsoumanis u. Nychas 2000).

In der Literatur werden weitere Ansätze beschrieben, die lediglich auf sensorischen Daten oder einer Kombination mehrerer Qualitätsparameter basieren. In einem europäischen Gemeinschaftsprojekt (FAIR CT97 9063) entstand eine Software (QIM³) zur Modellierung des Frischezustandes von Fisch, die ausschliesslich auf sensorischen Parametern basiert (Oehlenschläger 2004). Die Qualitätsindex-Methode hat den Vorteil, dass sie auf der Aufsummierung von Werten individueller Attribute (Merkmalseigenschaften) basiert (Daschner u. a. 2005; Bonilla 2004). Gibson (1985) beschreibt die organoleptische Bewertung bei Fisch als die zuverlässigste Referenzmethode zur Haltbarkeitsbestimmung.

Food Micro Model

Im Food Micro Model wurden mathematische Wachstumsmodelle pathogener Keime, die häufig für Lebensmittelvergiftungen verantwortlich gemacht werden können, in ein Softwarepaket zusammengefasst. Spezifische Verderbsorganismen wie z.B. *Lactobacillus plantarum*, *Br. thermosphacter*, *Saccharomyces cerevisiae* und *Zygosaccharomyces bailii* sind dort implementiert. Für einige Organismen sind sogar mehrere Modelle verfügbar, die unter jeweils veränderten Bedingungen abgeleitet wurden und verschiedene Lebensmittelzusammensetzungen reflektieren (Legan u. Vandeven 2002).

Pathogen Modelling Programm

Das „Pathogen Modelling Programm“ wurde von der USDA als Ergebnis von Untersuchungen zur vorhersagenden Mikrobiologie entwickelt. Das Softwareprogramm beinhaltet Wachstumsmodelle für *Aeromonas hydrophila*, *B. cereus*, *Clostridium perfringens*, *E. coli* O157:H7, *L. monocytogenes*, *Salmonella*, *Shigella flexneri*, *Staph. aureus* und

³QIM = Qualitätsindex-Methode

Y. enterocolita. Die Modelle wurden vor der Implentierung jedoch nicht validiert. Dennoch konnten Legan u. Vandeven (2002) in nachträglichen Untersuchungen grosse Übereinstimmungen zu den Laborergebnissen finden, was die grundsätzliche Nutzbarkeit dieser Simulationsansätze unterstreicht.

Pseudomonas Predictor

Der *Pseudomonas Predictor* ist eine Temperaturfunktions-Integrations-Software, die auf einem Wachstumsmodell psychrotoleranter Pseudomomaden basiert. Die Software simuliert das Wachstum für einen weiten Bereich proteinhaltiger Lebensmittel, die unter verschiedenen Bedingungen gelagert werden. Ausserdem können Temperaturdaten von Datenloggern direkt in die Software eingelesen und evaluiert werden. Die Software ist unter den Namen Food Spoilage Predictor erhältlich (Legan u. Vandeven 2002).

2.2.2. Modellierung von Wärmeübergängen

Entscheidend für die Verderbskinetik kühlbedürftiger Lebensmittel unter haushaltstypischen Bedingungen sind Temperaturveränderungen zwischen Produkt und Umgebung, die durch die physikalischen Wärmeübergangsmechanismen Leitung, Strahlung und Konvektion beschrieben werden können (Hallström u. a. 1998; Whälby 2002). Gutschmidt (1968) schlägt einen vereinfachten Ansatz zur Darstellung der Temperaturverläufe am sowie im Lebensmittel, das sich in einer Abkühlungs- bzw. Erwärmungsphase befindet, vor. Er geht von einer ab-/zunehmenden Exponentialfunktion aus. Die Abkühlgeschwindigkeit kann hierbei mit Hilfe einer Halbwertszeit (ω) ausgedrückt werden. Dieser Wert beschreibt die Zeit, die erforderlich ist, um die Temperaturdifferenz zwischen Lebensmittel (ϑ_{LM}) und Raumtemperatur (ϑ_U) zu Beginn des Abkühlvorgangs $\Delta\vartheta$ auf die Hälfte zu senken. Abbildung 2-4 gibt die grafische Darstellung der Modellannahmen wieder.

Bei seiner Modellannahme vernachlässigt Gutschmidt (1968) jedoch die im abkühlenden Lebensmittel auftretenden Temperaturunterschiede. Liegen die Kennzahlen ω , Ausgangstemperatur des Produktes sowie Lagertemperatur vor, lässt sich jeweils die erforderliche Zeit für die Abkühlung bzw. die Erwärmung des Produktes berechnen.

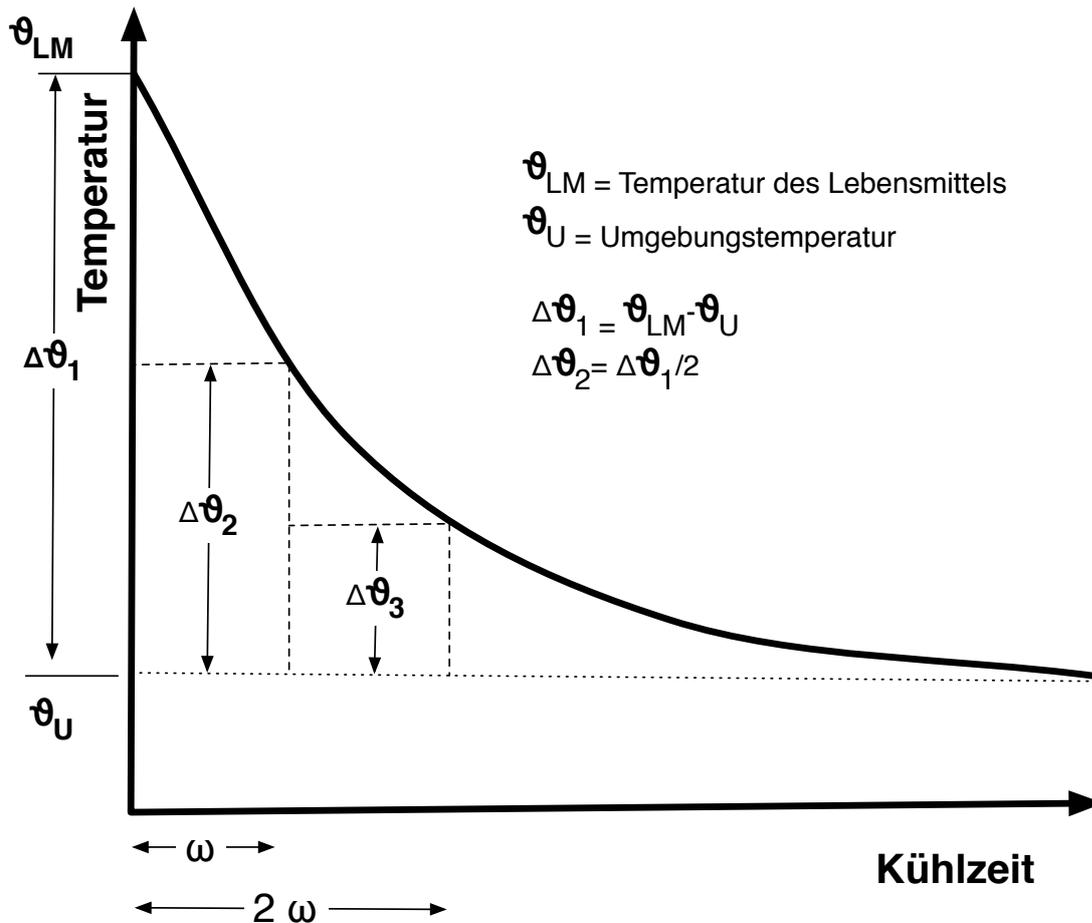


Abbildung 2-4.: Temperaturverlauf eines Lebensmittels bei der Abkühlung in einem Raum konstanter Temperatur bei Vernachlässigung von Temperaturunterschieden im Produkt

Der exponentielle Verlauf ergibt sich aus dem *NEWTON'schen Abkühlungsgesetz*. Danach kühlen sich LM durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion ab, wenn deren Eigentemperatur ϑ_{LM} höher als die Umgebungstemperatur ϑ_U ist und umgekehrt. Die Temperaturänderung mit der Zeit $\frac{d\vartheta}{dt}$ ist proportional zur Differenz der Temperatur ϑ_{LM} des Lebensmittels und der Umgebungstemperatur ϑ_U . Der Proportionalitätsfaktor bzw. HWZ ω richtet sich nach den speziellen materiellen und geometrischen Gegebenheiten des Abkühlungsvorgangs. Im folgenden ist die mathematische Herleitung des Ansatzes dargestellt (Snyder Jr. 1999; Spain 1982). 2.15 zeigt das Abkühlungsgesetz.

Aus der Differentialgleichung:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\omega \cdot (\vartheta - \vartheta_U) \quad (2.11)$$

ergibt sich nach folgenden Umformungen,

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta - \vartheta_U} = -\omega \cdot dt \quad (2.12)$$

(ϑ_A =Anfangstemperatur zur Zeit $t=0$, $\vartheta_A=\vartheta(t)$ =Temperatur zur Zeit t)

$$\ln \frac{\vartheta - \vartheta_U}{\vartheta_A - \vartheta_U} = -\omega t \quad (2.13)$$

und:

$$\frac{\vartheta - \vartheta_U}{\vartheta_A - \vartheta_U} = e^{-\omega t} \quad (2.14)$$

Das *Newton'sche Abkühlungsgesetz*:

$$\vartheta = (\vartheta_A - \vartheta_U) \cdot e^{-\omega t} + \vartheta_U \quad (2.15)$$

Kennt man die entsprechenden physikalischen Daten des Lebensmittels (spez. Wärme, Wärmeleitfähigkeit, Masse usw.) sowie der Verpackung, so lässt sich der insgesamt während der Abkühlung von Lebensmitteln auf die Kühlraumtemperatur aufzubringende Kältebedarf auch theoretisch berechnen. Dafür könnten sich Schichtenmodelle eignen, die auf Grundlage partieller Differentialgleichungen den Wärmetransport durch unterschiedliche Verpackungsmaterialien sowie des Lebensmittels beschreiben (Helfrich 2006; McMeekin u. a. 2006).

2.3. Charakterisierung der Lagerbedingung kühlbedürftiger Lebensmittel

2.3.1. Stufen unterschiedlicher Kühlketten

Kühlketten bestehen aus vielen einzelnen Stufen und je mehr Stufen in dieser Kühlkette vorhanden sind, desto mehr Schwachstellen können entstehen (Kreyenschmidt 2003). Deshalb erfordern alle Frischwaren wie Fleisch-, Fisch und Molkereiprodukte eine strikte Temperaturüberwachung von der Produktion bis zum Konsum. Temperaturschwankungen während des Transports und der Lagerung können zum vorzeitigen Verderb und somit zur Einschränkung der Haltbarkeit führen (Petersen u. Kreyenschmidt 2004). Die Folgen einer falschen Handhabung während der Distribution, des Transports oder der Lagerung können aufgrund von Beanstandungen oder auch Strafen für die Unternehmen sehr schwerwiegend und kostspielig sein (Sherlock u. Labuza 1992).

Die Verantwortung für die Lebensmittelsicherheit liegt bei allen Beteiligten der Nahrungskette, einschließlich des Konsumenten. Die kritischsten Prozessschritte bezüglich des Frischeverlusts sind insbesondere die Schritte, an denen der Konsument mit seinem Verhalten beteiligt ist, und zwar die Prozessschritte vom Transport des Lebensmittels in den privaten Haushalt bis zum Konsum. Untersuchungen der WHO zwischen 1986-1988 zeigten, dass etwa 62 % der Lebensmittelerkrankungen ihren Ursprung im haushaltsnahen Bereich haben (James u. James 2002). Die Autoren zählen hierzu den Umgang mit frischen Lebensmitteln, sowohl im Lebensmitteleinzelhandel als auch im Privathaushalt. Die Lagerungsbedingungen, denen ein Lebensmittel ausgesetzt ist, werden durch Gewohnheiten, Vorurteile und Kenntnisse des Konsumenten bestimmt (Flynn u. a. 1992).

Die Verantwortung des Verbrauchers beginnt unmittelbar nach der Auswahl des Lebensmittels am point of sale. Ab diesem Zeitpunkt fehlen systematische Kontrollen von Temperaturabweichungen, da der weitere Verbleib des Lebensmittels nach dem Kauf außerhalb der gesetzlichen Anforderungen liegt (Nauta u. a. 2003). Aber auch dem Rechtsgebern (via Gesetzesvorgaben, Gesundheitsaufklärung usw.) fällt Mitver-

antwortung zu (Griffith 2002).

Lagerbedingungen bei der Ein- und Zwischenlagerung im Lebensmitteleinzelhandel (LEH)

Im Rahmen der behördlichen Überwachung von Hackfleischprodukten in Supermärkten in NRW (2003) wurde die Produkt- und Lagertemperatur ermittelt. Bei 57 % der Proben wurde die vorgegebene Lager- und Kerntemperatur eingehalten. 4 % der Supermärkte überschritten die Lagertemperatur von 2 °C, wobei die Kerntemperaturen unter 2 °C blieb. In 27 % der Kontrollen wurden Kerntemperaturen im Hackfleisch von über 2 °C ermittelt. Insgesamt hielten 43 % der Supermärkte die vorgeschriebenen Temperaturen nicht ein. Der höchste Wert für die Produkttemperatur wurde mit 8,1 °C ermittelt. In Supermärkten, in denen die Lebensmittelüberwachung eine erhöhte Produkttemperatur feststellte, fielen überdurchschnittlich auch unsachgemässe Lagerbedingungen in der Zwischenlagerung auf (Kamphausen 2003). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Dustmann u. Weindlmeier (2004), die Ansatzpunkte zur Risikominimierung bei der Fleisch- und Fleischwarenvermarktung im LEH und bei Metzgereien untersuchten. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass die häufigsten Risiken im LEH aus einer unsachgemässen Handhabung der Ware, gefolgt von Mindesthaltbarkeitsüberschreitungen resultieren. Bei Untersuchungen von Bedienungskühltheken im LEH (Sommer/Winter) wurden bei der Lagerung in 52 % der Fälle Temperaturen oberhalb der empfohlenen ermittelt. In den Wintermonaten konnte insgesamt eine günstigere Temperatursituation festgestellt werden, während in den Sommermonaten mehr als 70 % der Proben Temperaturen über dem empfohlenen Richtwert aufwiesen (Trierweiler 2003).

Lagerbedingungen während des Lebensmitteltransports in den privaten Haushalt

Nach der Kaufentscheidung ist die Zeit, die der Verbraucher für den Einkauf und die Anfahrt benötigt, entscheidend für die Qualität und Sicherheit der Lebensmittel (Betts u. Everis 2000). Laufstudien (GfK Nürnberg) der Jahre 1991-1995 ergaben eine durchschnittliche Einkaufsdauer von 13 Minuten im Supermarkt und 21 Minuten im grossen Verbrauchermarkt. Andere Beobachtungen gehen von einer durchschnittlichen Einkaufsdauer von ca. 30 Minuten (gemessen von der Entnahme des Einkaufswagens bis zum Anstehen an der Kasse). Als Anstehzeiten an der Kasse wurden im Durchschnitt 2-5 Minuten gemessen. Eine weitere Studie ermittelte eine durchschnittliche Einkaufsdauer von 41 Minuten (Popai-Studie 1999). Eine Befragung in England ergab, dass 85 % der Kunden ihr Auto für den Transport der eingekauften Lebensmittel benutzen. Dieser Studie zu Folge benötigten die Konsumenten im Durchschnitt etwa 43 Minuten, um Fleischwaren, Fisch und Molkereiprodukte vom LEH bis zum Haushaltskühlschrank zu bringen (James u. Evans 1992).

Ungeschützte Kühlware erwärmt sich während des Transports stärker als verpackte Ware (James u. James 2002). Das Ansteigen der Produkttemperatur eines Lebensmittels während des Transports kann erheblich sein, wenn keine Schutzmaßnahmen während des Transports vorgenommen werden. Die Benutzung von Kühltaschen während des Einkaufs und des Heimtransports beläuft sich auf etwa 13 %, während 87 % der Konsumenten keine Kühltasche benutzen und ihre Lebensmittel ungekühlt lassen (Thomas 2006). James u. Evans (1992) geben an, dass die Temperatur kühlbedürftiger Lebensmittel bei einem Transport ohne Kühltasche im Auto innerhalb einer Stunde bis auf 38 °C ansteigen kann. Wie sich die Produkttemperaturen kritischer Lebensmitteln während einer Fahrt vom LEH bis zum Haushalt verändern, wurde in einer experimentellen Studie von James u. Evans (1992) gemessen. Die ursprünglichen Produkttemperaturen der Lebensmittel vor Erreichen des Autos gaben die Autoren in einem Bereich zwischen 4 °C und 20 °C an. Tabelle 2-3 zeigt die maximal gemessenen Temperaturen der untersuchten Lebensmittel nach einem 1 stündigen Transport im Kofferraum eines Autos ohne Kühlung, im Vergleich zum Transport in einer vollisolierten Kühlbox.

Tabelle 2-3.: Vergleich maximal gemessener Produkttemperaturen während eines 1 stündigen Transports ungeschützter und in einer Kühlbox gelagerter Lebensmittel (James u. Evans 1992)

Produkt	Art des Transports	
	ungeschützt	Kühlbox
Hackfleisch	18 °C	9 °C
Rohwurst	28 °C	15 °C
geräucherter Schinken	30 °C	14 °C
Fleischpastete	24 °C	7 °C
Lasagne	21 °C	6 °C

Die Einkaufshäufigkeit von Frischwaren beeinflusst die Verweildauer gekühlter LM im privaten Haushalt. So zeigte eine Erhebung, dass 99,2 % der beobachteten Konsumenten mindestens ein mal pro Woche einkaufen (James u. James 2002). Auch eine Studie der GfK Nürnberg (1995) untersuchte die Einkaufshäufigkeit. Demnach besucht ein Kunde durchschnittlich 8,4 mal pro Monat ein Geschäft des Lebensmitteleinzelhandels. Eine andere Studie zeigt, dass 83,2 % der befragten Verbraucher zwei Grosseinkäufe pro Woche tätigen. Weiterhin konnte ermittelt werden, dass viele Kunden bereit sind, längere Anfahrtswege auf sich zu nehmen, um zur Einkaufsstätte ihrer Wahl zu gelangen (Thomas 2007).

Lagerbedingungen im haushaltsnahe Bereich

Laguerre u. a. (2005) stellten in einer Erhebung fest, dass die höchsten Lagertemperaturen und häufigsten Abweichungen vom Idealwert, über die gesamte Kühlkette betrachtet, in Haushaltskühlschränken vorzufinden sind. Sie bewerten die Tatsache insofern als besonders kritisch für die Lebensmittelsicherheit, da die Produkte in der Regel die längste Zeit bis zum Konsum in Haushaltskühlschränken lagern.

In Deutschland konnten durchschnittliche Kühlraumfachttemperaturen von 6 °C gemessen werden, wobei 62 % der Geräte > 6 °C betrieben wurden (Thomas 2007). Bakalis u. a. (2003) zeigen, dass die Betriebstemperatur in Haushaltskühlschränken zwischen 2 und 12 °C schwanken kann.

Tabelle 2-4 fasst bisherige Studien zu Betriebstemperaturen in Haushaltskühlschränken zusammen.

Tabelle 2-4.: Übersicht über Ergebnisse von Messungen von Durchschnittstemperaturen (ϕ) in Haushaltskühlschränken (eigene Zusammenstellung)

Temperatur in °C			Überschreitung in %	Land	Quelle
<i>min</i>	ϕ	<i>max</i>			
0	6	12	62 % (T > 6 °C)	GER	Thomas (2007)
2		12		GR	Bakalis u. a. (2003)
			71 % (T > 6,1 °C)	POR	Azevedo u. a. (2005)
0,8	6,5	12,6	71 % (T > 5 °C)	NIRL	Flynn u. a. (1992)
-0,9	6	-11,4	23 % (T > 7 °C)	UK	James u. Evans (1992)
0		11	60 % (T > 4 °C)	NZL	O'Brien (1997)
2	5,5	12,5	-	USA	Labuza u. a. (2001)
0,9	6,6	11,4	26 % (T > 8 °C)	F	Laguerre u. a. (2002)
			55 % (T > 9 °C)	GR	Sergilidis u. a. (1997)
-6,6	4	21	37 % unakzeptabel	USA	AuditsInternational (1999)
0		13		USA	Beard III (1991)

In einer weiteren experimentellen Studie von Bakalis u. a. (2003) wurden Temperaturunterschiede zwischen den verschiedenen Messpunkten im Kühlschrank von bis zu 5 °C gemessen. Die höchsten Temperaturen (ca. 10 °C) konnten dabei in den Türen der Kühlschränke gemessen werden. Türöffnungen liessen die Temperatur bis auf 12 °C ansteigen, um innerhalb von 15 Minuten wieder auf die Ursprungstemperatur abzusinken.

In Schweden wurden 2004 die Lagertemperaturen und der Umgang des Konsumenten zu kühlender Lebensmittel im Haushalt untersucht. Dabei wurden keine signifikanten Zusammenhänge zwischen der Lagertemperatur und den charakterischen Prüfgrößen (Geschlecht, Alter, Alter des Kühlschranks usw.) nachgewiesen. Weiterhin wurde die Lagertemperatur der Lebensmittel im Haushaltskühlschrank gemessen. So betrug die Durchschnittstemperatur des Hackfleischs 6,2 °C. Fünf Prozent der Lebensmittel wurden bei Temperaturen oberhalb von 10 °C gelagert (Marklinder u. a. 2004).

Einer Befragung von Labuza u. a. (2001) zufolge sind besonders ältere Menschen durch nicht sachgemäßen Umgang mit Kühlwaren gefährdet. Laut dieser werden 70 % der Kühlschränke in den betreffenden Haushalten fehlerhaft eingestellt. Marklinder u. a. (2004) geben an, dass weniger als ein Viertel der Befragten die Temperatur in ihrem Kühlschrank kannten. Andere Autoren decken auf, dass 88 % der Konsumenten nicht wissen, in welchem Temperaturbereich ihr Kühlschrank betrieben wird (O'Brien 1997).

2.3.2. Verderbsgrenzen kühlbedürftiger Lebensmittel

Mikroorganismen lassen sich in pathogene Keime und Verderbniserreger einteilen. Während pathogene Keime Lebensmittelinfektionen und -intoxikationen hervorrufen können, bildet die Verderbsflora eher Stoffwechselprodukte, die das Lebensmittel für den Konsumenten abstoßend wirken lassen (Kreyenschmidt 2003). Mögliche Gefährdungspotentiale für den Verbraucher durch pathogene Mikroorganismen gehen unter anderem von dem Erreger des Botulismus (*Cl. botulinum*), der Listeriose (*L. Monocytogenes*) und der Salmonellose (*Salmonella ssp.*) aus (Sherlock u. Labuza 1992). Diese Form der Lebensmittelinfektionen treten aufgrund der günstigen Temperaturen für die Erreger besonders häufig in den Sommermonaten auf (Müller 1986). Einige Lebensmittelinfektionserreger sind sogar bei Kühltemperaturen $\leq 7\text{ °C}$ vermehrungsfähig und stellen eine potentielle Gefahr für den Verbraucher im haushaltsnahem Bereich dar (Hilbert u. Smulders 2000). Für Kühlwaren sind deshalb besonders die Mikroorganismen von Interesse, die auch in niedrigen Temperaturbereich wachsen können ($\leq 20\text{ °C}$).

Tabelle 2-5 zeigt die minimalen Wachstumstemperaturen ausgewählter Mikroorganismen (Upmann u. a. 2000).

Dabei stellt eine Temperatur von 10 °C eine erste Sicherheitsstufe dar. Temperaturen unter 10 °C unterbinden das Wachstum von Clostridien- und Campylobacter-Species. Eine Temperatur von 4 °C schließt eine Vermehrung fast aller pathogenen und toxinogenen Keimarten (z.B. *Salmonella*, *E. Coli*, *S. aureus*) aus und ist eine wesentliche zweite Sicherheitsstufe (Upmann u. a. 2000). Die Wirkung beruht auf der Verlangsamung des Wachstums von Mikroorganismen, deren Generationszeit und lag-Phase (Anpassungs-

Tabelle 2-5.: Minimale Wachstumstemperaturen ausgewählter Mikroorganismen nach Upmann u. a. (2000)

minimale Wachstumstemperatur	Art der Mikroorganismen	
	pathogene Keime	Verderbskeime
12 bis 10 °C	<i>C. botulinum</i> A, B, F	
9 °C	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	
8 bis 7 °C	Enteropathogene <i>E. coli</i>	
6,7 °C	<i>S. aureus</i>	
5,2 °C	<i>Salmonella</i> ssp. *	
5 °C		<i>Bacillus</i> ssp.
4 °C	<i>B. cereus</i>	
4 bis 0 °C	<i>Aeromonas</i> ssp.	
3,3 °C	<i>C. botulinum</i> E, B**, F**	
2 °C		Micrococccen
2 bis 0 °C		<i>Lactobacillen</i> , <i>Leuconostoc</i> ssp.
0 °C	<i>Yersinia enterocolitica</i>	<i>Br. thermospacta</i> , <i>Enterobacter</i> ssp., <i>Hafnia</i> ssp., <i>Klebsiella</i> ssp., <i>Enterococccen</i>
-0,4 °C	<i>Listeria monocytogenes</i>	
-5 °C		<i>Pseudomonas</i> ssp., <i>Acinetobacter</i> ssp., <i>Flavobacterium</i> ssp., <i>Psychrobacter</i> ssp.

* Die meisten Salmonellen wachsen unter 7 °C nicht mehr; ** einige Stämme

phase) sich verlängern, wenn die Temperatur unter das Optimum gesenkt wird.

Aufgrund möglicher Gesundheitsrisiken durch pathogene Mikroorganismen stieg in den letzten Jahren die Zahl gesetzlicher Regelungen deutlich an. Festgelegt sind die maximale Temperaturen während der Produktion, der Distribution und des Verkaufs von kühlbedürftigen Lebensmitteln (James u. James 2002). Darüberhinaus sind in der EU-Verordnung VO (EG) 2073/2005 mikrobiologische Kriterien bestimmt, anhand derer die Mikroorganismen oder deren Toxine oder Metaboliten bewertet werden, die ein Gesundheitsrisiko darstellen können.

Für die Herstellung und den Verkauf von Hackfleisch- und Fischprodukten hat der

Gesetzgeber in seinen Regelungen weitere Erläuterungen beigefügt. Darüber hinaus hat das EHI (Euro Handels Institut) als Branchenempfehlung für kühlbedürftige und leichtverderbliche Waren Richtwerte für den Handel veröffentlicht. Inhalt ist dabei u. a. die Forderung, dass die Regelanliefertemperatur 1 °C bzw. 2 °C (Strecken- oder Lagergeschäft) unterhalb der geforderten Temperaturobergrenze liegt, um somit einen zusätzlichen Kältepuffer für kurze Zeiten ohne aktive oder passive Kühlmöglichkeiten der Ware zu überbrücken (Möller 2000; Hallier 2001).

Besonders Hackfleisch ist ein aus mikrobiologischer Sicht sensibles Produkt. Während der Herstellung kommt es durch die Zerkleinerung des Fleisches zu einer starken Vergrößerung der Oberfläche. Diese ist offen für eine mikrobielle Kontamination und zwar durch den Kontakt mit Einrichtungen, Gerätschaften und dem Personal (Köpke 2002).

Stamatioua u. a. (2004) haben die mikrobiologischen und sensorischen Veränderungen von Hackfleisch unter isothermen Temperaturbedingungen untersucht. Das Hackfleisch wurde dabei unter aeroben Bedingungen im Temperaturbereich zwischen 0 °C und 15 °C gelagert. Aus den Lagerungsversuchen ergab sich für alle Temperaturbereiche ein dominantes Wachstum von *Pseudomonas ssp.* gefolgt von *Brochothrix thermosphacta*, Milchsäurebakterien und Keimen der Gattung *Enterobacteriaceae*. Die Untersuchungen zeigten weiterhin einen Zusammenhang zwischen dem Wachstum von *Pseudomonas* und der Verringerung der sensorischen Qualität. Das Ende der Haltbarkeit wurde mit 10^9 kbE/g des Keims *Pseudomonas* angegeben und gilt als Indikatorkeim zur Überprüfung kritischer Lagerungsbedingungen.

Die Arbeitsgruppe Lebensmittelmikrobiologie und -hygiene der DGHM hat Richt-⁴ und Warnwerte⁵ auf Handelsebene herausgegeben, um unterschiedliche Hackfleischprodukte einstufen zu können (DGHM 2006).

⁴Richtwerte geben eine Orientierung, welches produktspezifische Mikroorganismenspektrum zu erwarten und welche Mikroorganismengehalte in den jeweiligen Lebensmitteln, bei Einhaltung einer guten Hygienepaxis, akzeptabel sind. Proben mit Keimgehalten unter oder gleich dem Richtwert sind, sofern keine nicht-mikrobiellen Abweichungen vorliegen, verkehrsfähig (Müller 2004).

⁵Warnwerte geben Mikroorganismengehalte an, deren Überschreitung einen Hinweis darauf gibt, dass die Prinzipien einer guten Hygienepaxis verletzt wurden und zudem eine Gesundheitsgefährdung des Verbrauchers nicht auszuschließen ist (Müller 2004).

Tabelle 2-6.: Richt- und Warnwerte zur Beurteilung von ungewürztem und gewürztem Hackfleisch auf Handelsebene (DGHM 2006)

Untersuchungskriterium	Richtwert (kbE/g)	Warnwert (kbE/g)
Aerobe mesophile GKZ	5×10^6	–
Pseudomonaden	1×10^6	–
<i>Enterobacteriaceae</i>	1×10^4	1×10^5
<i>E. Coli</i> (ungewürztes H.)	1×10^2	1×10^3
<i>E. Coli</i> (gewürztes H.)	1×10^3	1×10^4
Koagulase-positive Staphylokokken	5×10^2	5×10^3
<i>L. Monocytogenes</i>	–	1×10^2
Salmonellen	–	n.n. in 25 g

Auch Fisch zählt aufgrund des hohen Gehalts an Proteinen, freien Aminosäuren und anderen löslichen Stickstoffverbindungen zu den leicht verderblichen Lebensmitteln. Die Proteine werden bakteriell unterschiedlich schnell je nach Lagerungsbedingungen unter anderem zu Trimethylamin, Ammoniak, Methylmercaptan und anderen flüchtigen geruchsintensiven Stickstoffverbindungen abgebaut (Kunz 1994). Als mikrobiologische Verderbsgrenze von Fisch werden von Gram u. a. (2002, 1987) Keimgehalte zwischen 10^7 kbE/g und 10^9 kbE/g genannt. Olafsdottir u. a. (1997) bringt gleichzeitig die oben genannten Keimgehalte mit der sensorischen Zurückweisung des Produktes in Verbindung. Nach Schätzungen der FAO gehen 25 % der gesamten Fischfänge aufgrund von Verderb verloren, bevor sie den Konsumenten erreichen (Dalgaard 2002).

3. Ziel der Arbeit

Bislang lag das Hauptaugenmerk für die Ausrichtung von Simulationsmodellen auf der Optimierung der Kühlkette innerhalb unterschiedlicher Stufen der Lebensmittelverarbeitung bis hin zum „point of sale“. Für die Folgestufen bis zur Lagerung im haushaltsnahen Bereich fand eine Entwicklung von Simulationsprogrammen zur Darstellung dynamischer Distributions-, Transport- und Lagerbedingungen noch wenig Beachtung. In dieser Arbeit geht es deshalb darum, die Lücke zu schliessen. Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht daher, in Laboruntersuchungen die Reaktion von ausgewählten Lebensmitteln (MAP-Hackfleisch/Lachsforellen) auf haushaltstypische Temperaturwechselbedingungen zu testen. In Zeitreihenmessungen gilt es zu prüfen, in welcher Weise sich Parameter zur Beschreibung eines Distributions-Transport- und Lagerungsmodells (*DTL-Modell*) unter konstanten und dynamischen Temperaturbedingungen verändern. Die Messergebnisse sowie die Erkenntnisse empirischer Studien zum Verhalten von Konsumenten im Umgang mit kühlpflichtigen Lebensmitteln stellen die Grundlage für die Entwicklung eines Simulationsmodells dar.

Bei der mathematischen Umsetzung des Modells sollen Temperaturveränderungen im Lebensmittel sowie die auftretenden Wärmeübergänge, in Abhängigkeit von der Verpackungsvariante, eine besondere Berücksichtigung finden. Mit Hilfe des Simulationsansatzes sollen unterschiedliche Szenarien der Kühlung von Lebensmitteln und Variationen in der Gestaltung des DTL-Prozesses abgebildet werden, um die jeweiligen Auswirkungen auf die Haltbarkeit des Produktes abschätzen zu können.

Schliesslich gilt es zu bewerten, wie realistisch das Simulationsmodell Auswirkungen der Einhaltung und Unterbrechung einer Kühlkette und damit Konsequenz des Fehlverhaltens von Verbrauchern prognostizieren könnte.

4. Material und Methoden

4.1. Beschreibung eines Distributions-, Transports- und Lagermodells

Die Modellierung des Frischeverlustes von Produkten tierischer Herkunft erfolgt sowohl unter statischen als auch dynamischen (wechselnden) Lagerungsbedingungen. Dabei lässt sich der Aufbau der empirischen und modellierenden Studie in fünf aufeinanderfolgende Schritte untergliedern, die in Abbildung 4-1 zusammenfassend dargestellt sind.

Zunächst wurde im *ersten Schritt* der Rahmen des Ansatzes auf der Grundlage empirischer Studien zum Einkaufsverhalten und Umgang mit kühlbedürftigen Lebensmitteln im Haushalt sowie die Produktvarianten festgelegt. Anschließend erfolgte die Beschreibung des Modells:

- Definition eines Distributions-, Transports- und Lager-Modells (DTL-Modell)
- Produktspezifische Festlegung (LM-Profile) von:
 - variablen Systemparametern (produkt-/prozessspezifisch) und
 - kontrollierten und nicht kontrollierbarem Input
- Beschreibung der Modellkomponenten eines Systemmodells

Im *zweiten Schritt* schloss sich die Parameterschätzung aus statischen und dynamischen Zeitreihenmessungen im Rahmen von experimentellen Untersuchungen (*Labormodell*) an. Hierzu gehörten Messungen der:

- Veränderung biologischer Frischeparameter (Mikrobiologie/Sensorik) zur Darstellung der Verderbskinetik bei MAP-Hackfleisch und Lachsforellen

- Veränderung des physikalischen Parameters (produktspez. Proportionalitätsfaktor ω) zur Darstellung von Wärmeübergängen

Das Schwergewicht der Arbeit lag im *dritten Schritt* auf der Auswahl von geeigneten mathematischen Modellgleichungen zur Abbildung der Kurvenverläufe der Messparameter. Es erfolgte im *vierten Schritt* die Anpassung an statische und dynamische Temperaturverläufe.

Im letzten *fünften Schritt* dienten die über den Simulationsansatz ermittelten Zeiten für die Haltbarkeit dazu, den Effekt von Maßnahmen zur Minimierung des Risikos der Kühlketteunterbrechung und damit bestimmtes Verbraucherverhalten zu verdeutlichen.

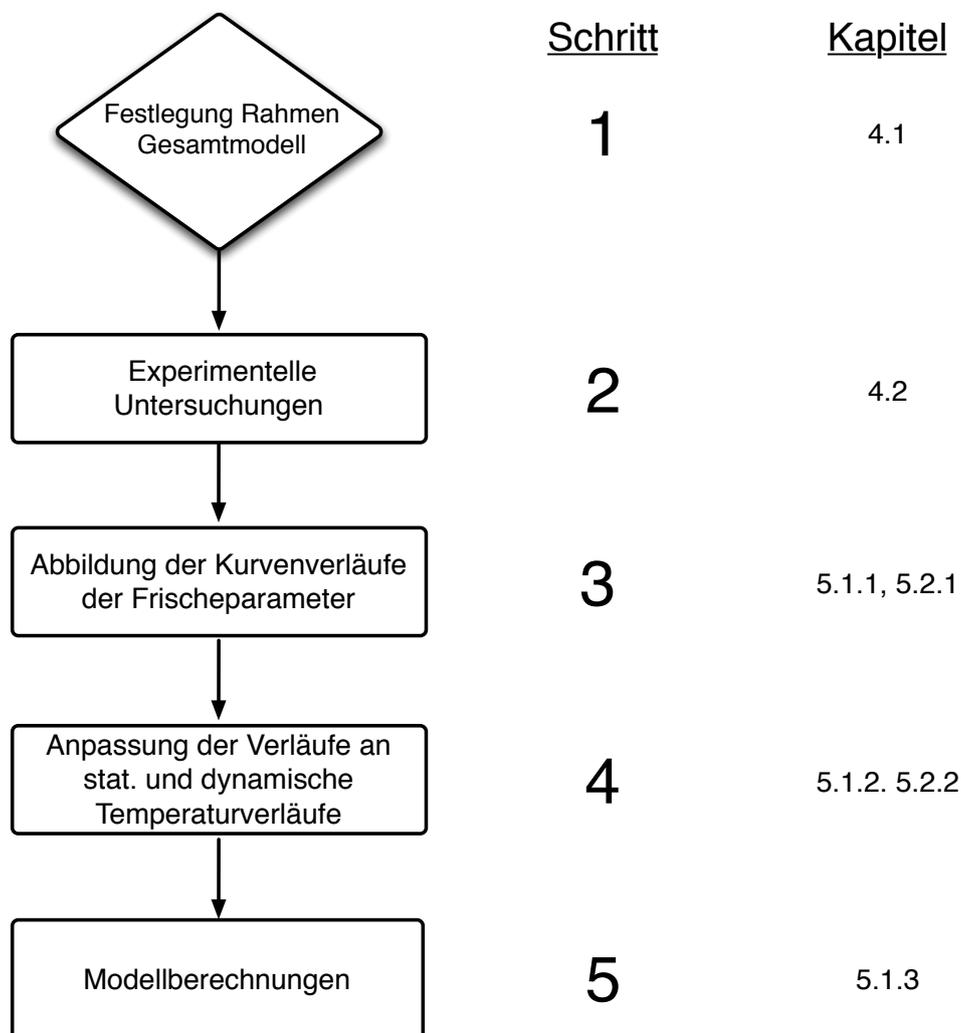


Abbildung 4-1.: Stufen der Modellentwicklung und -nutzung

4.1.1. Definition eines DTL-Prozessmodells

Das „DTL-Modell“ beschreibt einen diskreten Prozess, in dem n (3) Stufen voneinander abgegrenzt werden:

1. Distribution von kühlbedürftigen Lebensmitteln im Handel
2. Transport vom point of sale und
3. Lagerung im Haushaltskühlschrank

Abbildung 4-2 zeigt die Struktur und die einzelnen Stufen des DTL-Modells.

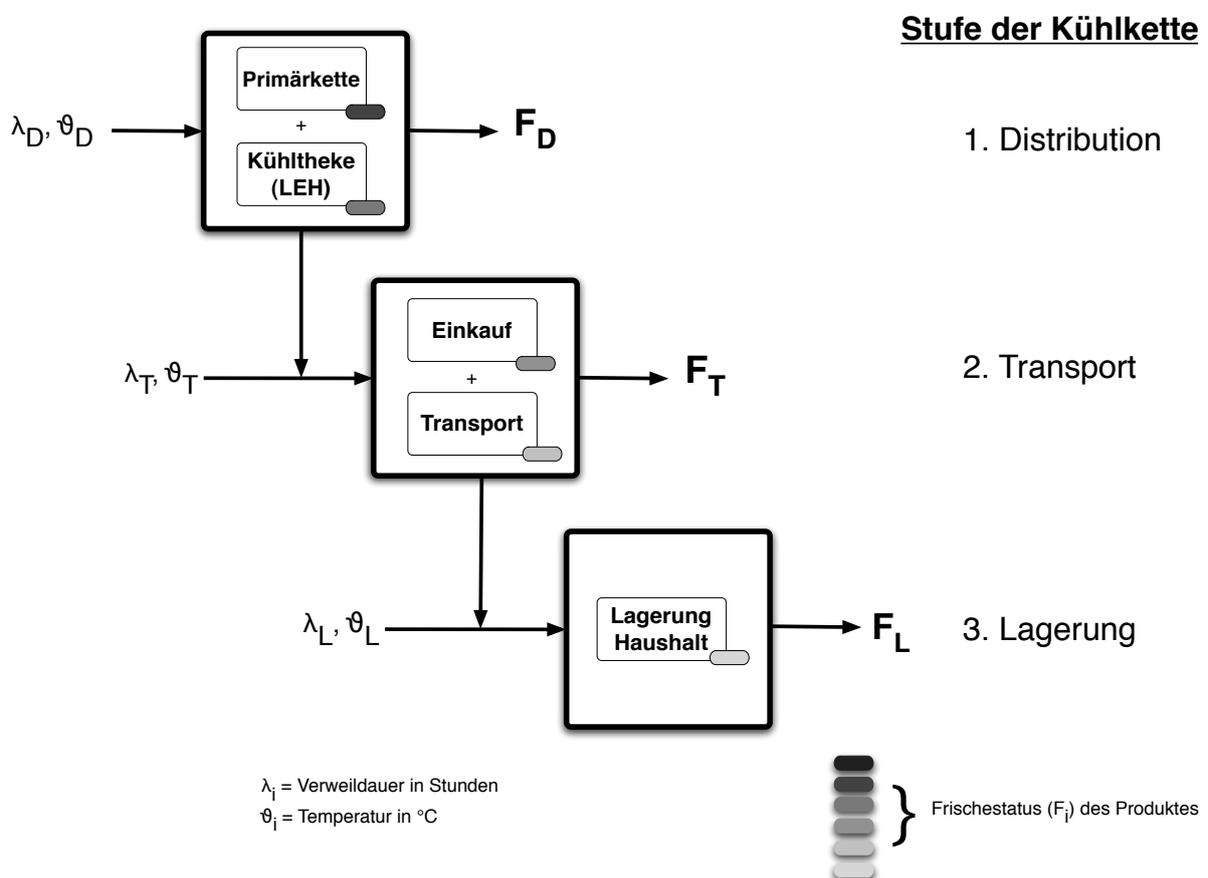


Abbildung 4-2.: Struktur und einzelne Stufen des DTL-Modells

Die Verweildauer λ_i in Stunden in den einzelnen Stufen ist eine empirische Größe. Die Verteilungen der Verweildauern (λ) und der Lagertemperaturen (ϑ) in °C basieren auf Daten aus Expertenbefragungen, Literatur und eigenen Messungen (Thomas

2007). Der jeweilige Frischestatus (F_i) ist abhängig von λ und ϑ und wird charakterisiert durch Veränderungen von produktspezifischen Qualitätsparametern (Mikrobiologie/Sensorik).

4.1.2. Charakterisierung von Produkt-, Wärmebelastungsvarianten und Konsumententypen

1. Produktvarianten

Die Bestimmung des Frischestatus erfolgte bei den in Tabelle 4-7 dargestellten Produktvarianten. Als Produkt gilt das Lebensmittel in seiner Schutzverpackung mit der dazugehörigen Produktinformation für den Konsumenten.

Tabelle 4-7.: Merkmale unterschiedlicher Produktvarianten

Produktvarianten	Merkmale		
	Art der Ware	Verpackung	Produktinformation
A (Hackfleisch)	SB-Ware	MAP	Etikett mit MHD/Verbrauchsdatum, Temperaturangabe
B (Hackfleisch)	lose Ware	foliengeschützt	s.o.
C (Lachsforelle)	lose Ware	foliengeschützt	mündliche Auskunft Verkäufer
D (Produkt+Kühltasche)	s.o.	s.o.	–

Mit den ausgewählten Produkten sind gleichzeitig zwei Arten von angebotenen Waren berücksichtigt worden: Kühlpflichtige Lebensmittel als lose Ware (foliengeschützt) und als SB-Ware (MA-verpackt).

2. Wärmebelastungsvarianten

In den experimentellen Untersuchungen sind die drei Produktvarianten unterschiedlichen Kombinationen von Wärmebelastungen in den drei Stufen für das DTL-Modell ausgesetzt worden. Als Referenzvariante ist eine ideale Kühlkette (IK) definiert worden, die von 2 °C-Lagertemperatur in der gesamten Kühlkette ausgeht.

Bei den in Tabelle 4-8 gezeigten Varianten handelt es sich um Beispiele von typischem Verbraucherverhalten vom point of sale bis zum Haushaltskühlschrank. Sie sind abgeleitet aus Erfahrungswerten empirischer Studien (s. Kapitel 2.3). Um

Tabelle 4-8.: Varianten von Wärmebelastungen für die drei Stufen des DTL-Modells

Wärmebelastung (WB)	Stufe des DTL-Modells		
	Distribution	Transport	Lagerung im Haushalt
ideale Kühlkette (IK)	geschlossene Kühlinsel mit Temperaturregelung (2 °C)	Kühltaschen mit aktiver oder passiver Kühlleistung (2 °C) von mindestens 3 Stunden	Kühlschrank mit produktspezifischen Lagerzonen (konstanter 2 °C-Bereich)
WB 1	offene Kühlinseln (4 °C)		
WB 2	offene Kühlinseln ohne Temperaturregelung (7 °C)		
WB 3		ohne Kühltasche bei 20 °C	
WB 4		ohne Kühltasche bei 30 °C	
WB 5		Autokofferraum bei 50 °C	
WB 6			niedrig eingestellter Kühlschrank (4 °C)
WB 7			gängiger Kühlschrank mit einer Lagerzone (6 °C)
WB 8			Altgerät ohne Temperaturregelung (12 °C)

das Verhalten bestimmter Verbraucher sowohl in den Zeitreihenmessungen als auch für die Simulationsläufe zu berücksichtigen, war es erforderlich, Kriterien festzulegen, nach denen Gruppen von Verbrauchern beschrieben und voneinander abgegrenzt werden können.

3. Konsumententypen

Tabelle 4-9 zeigt wie aus unterschiedlichen Charakterisierungsmerkmalen das spezifische Profil von drei Verbrauchertypen definiert worden ist. Die Typen sind jeweils durch vier Verhaltensvarianten charakterisiert: Wissenstand über Produktinformationen, Einkaufsverhalten, Umgang mit Lebensmitteln beim Einkauf und Transport sowie Umgang im Haushalt.

Tabelle 4-9.: Charakterisierungsmerkmale dreier Konsumententypen (Thomas 2007; Littek 2005; James u. James 2002)

Charakterisierungsmerkmal	Konsumententypen		
	I. <i>sorglos</i>	II. <i>inkonsequent</i>	III. <i>konsequent</i>
Wissenstand über Produkt	uninformiert über MHD und Temperaturangaben zur Lagerung	teilinformiert: achtet auf Angaben zum MHD und Temperaturangaben zur Lagerung	ausreichend informiert: kennt Zusammenhänge zwischen MHD und Temperaturangaben zur Lagerung
Käufertyp	unreflektierte Kaufentscheidung: Achtet nicht auf Frische.	reflektierte Kaufentscheidung: Kauft 1 mal wöchentlich Frischwaren	reflektierte Kaufentscheidung: Kauft Ware immer frisch.
Umgang mit Lebensmittel während Einkauf und Transport	achtet auf keinerlei Schutzmassnahmen vor Wärmeeinflüssen	achtet auf Kühlmassnahmen im Handel (z.B. Schutztüren und Thermometer bei Kühlmöbeln) aber nur eingeschränkt auf eigene Massnahmen zum Schutz vor Wärmeeinflüssen (Kühltasche bei Aussentemperaturen über 20 °C)	achtet auf eigene Massnahmen zum Schutz vor Wärmeeinflüssen
Umgang mit Lebensmittel im Haushalt	veraltete und nicht regulierbare Kühlgeräte und ungeschützte Lagerung	Lagerung in SB-Verpackung oder foliengeschützt aber erhöhte Lagertemperaturen	lagert in produktspezifischen Kühlzonen und beachtet MHD und sonstige Lagertemperaturinformationen

Belastungsmatrizen

In den durchgeführten Zeitreihenmessungen sind die Veränderungen der unterschiedlichen Frischeparameter gemessen worden. Die Bedingungen bei der Lagerung der Proben wurden dabei bezüglich der Temperatur und der Zeit, in Anlehnung an die in Kapitel 4.1.2 definierten Produkt-, Wärmebelastungsvarianten und Konsumententypen variiert. Tabelle 4-10 und 4-11 zeigen jeweils die Belastungsmatrizen für das MAP-Hackfleisch und die Lachsforellen.

Tabelle 4-10.: Belastungsmatrizen: MAP-Hackfleisch

Stufe	Variante	DTL-Varianten								
		H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9
Primärkette	WB	IK	IK	IK	IK	IK	IK	IK	IK	IK
	ϑ in °C	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	λ in h	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Kühltheke	WB	IK	IK	IK	IK	IK	IK	WB1	WB1	WB1
	ϑ in °C	2	2	2	2	2	2	4	4	4
	λ in h	72	72	48	48	96	192	96	192	24
Einkauf/ Transport	WB	WB4	WB4	WB5	WB5	WB3	WB3	WB3	WB3	WB3
	ϑ in °C	30	30	50	50	20	20	20	20	20
	λ in h	3	3	3	3	3	3	3	3	3
HH-Kühlschrank	WB	WB8	IK	WB8	IK	IK	IK	WB6	WB6	WB7
	ϑ in °C	12	2	12	2	2	2	4	4	6

Stufe	Variante	DTL-Varianten								
		H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18
Primärkette	WB	IK	IK	IK	IK	IK	IK	IK	IK	IK
	ϑ in °C	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	λ in h	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Kühltheke	WB	WB1	WB1	WB1	WB2	WB2	WB2	WB2	WB2	IK
	ϑ in °C	4	4	4	7	7	7	7	7	2
	λ in h	24	24	24	120	120	120	120	120	85
Einkauf/ Transport	WB	WB3	WB4	WB4	WB3	WB4	WB3	WB4	WB3	WB3
	ϑ in °C	20	30	30	20	50	20	50	20	20
	λ in h	3	3	3	3	3	3	3	3	3
HH-Kühlschrank	WB	WB7	WB7	WB8	WB7	WB7	WB8	WB8	WB8	WB7
	ϑ in °C	6	6	12	6	6	12	12	12	6

Tabelle 4-11.: Belastungsmatrizen: Foliengeschützte Lachsforellen

Stufe	Variante	DTL-Varianten							
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Primärkette	WB	IK	IK	IK	IK	IK	IK	IK	IK
	ϑ in °C	2	2	2	2	2	2	2	2
	λ in h	24	24	24	24	24	24	24	24
Kühltheke	WB	IK	IK	WB2	WB3	WB2	IK	IK	WB3
	ϑ in °C	2	2	4	7	4	2	2	7
	λ in h	24	48	48	48	48	24	72	48
Einkauf/ Transport	WB	WB3	WB3	WB3	WB3	WB4	WB5	WB3	WB5
	ϑ in °C	20	20	20	20	30	50	20	50
	λ in h	3	3	3	3	3	3	3	3
HH-Kühlschrank	WB	WB7	WB/	WB 7	WB7	WB7	WB7	IK	WB7
	ϑ in °C	6	6	6	6	6	6	2	6

4.1.3. Produktspezifische Ausrichtung der Modellkomponenten

Um eine Bewertung der Frische für verschiedene Lebensmittelgruppen vornehmen zu können, galt es zunächst produktspezifische Frischekriterien zu definieren. Für zwei Lebensmittel tierischer Herkunft wurden dazu jeweils Frischeparameter herangezogen, die sich bereits aus anderen Studien als geeignet erwiesen (Kreyenschmidt 2003). Die für die eigenen experimentellen Untersuchungen festgelegte Einstufungsmatrix für den Frischestatus der Produkte geht aus den Tabellen 4-12 und 4-13 hervor. Unterschieden wurden zwei Stadien: (1) Frisch und (2) Verdorben.

Fleischprodukt (MAP-Schweinehackfleisch)

Tabelle 4-12.: Matrix zur Einstufung des Frischestatus von MAP-Schweinehackfleisch

Frischeparameter	Frischestatus	
	Frisch	Verdorben
GKZ	$10^2 - 10^6$ kbE/g	$\geq 10^6$ kbE/g
<i>Pseudomonas ssp.</i>	$10^2 - 10^6$ kbE/g	$\geq 10^6$ kbE/g
SI	$\leq 1,5$	$\geq 1,5$

Die sensorische Beurteilung der Proben auf Grundlage der erfassbaren Merkmale Geruch, Textur und Farbe sieht als Bestnote 0 für ein „frisches Produkt“ und die Note 3 für ein „verdorbenes Produkt“ vor. Steigt der aus den Einzelnoten der drei Merkmale

gebildete Sensorikindex über die Grenze von 1,5, gilt das Ende der Haltbarkeit erreicht.

Weitere Modellannahmen:

- Der Verderb beginnt an der Oberfläche des Hackfleisches.
- Die Gaszusammensetzung der Verpackung wurde über die Zeit als konstant angenommen.

Fischprodukt (Lachsforelle)

Die Einstufung des Frischstatus der Lachsforellen erfolgte analog zur Einstufung des Hackfleisches. Auch hier ist ein Index von $\geq 1,5$ als Verderbskriterium festgelegt. Zusätzlich wird die Frische der Forellen mit der Qualitätsindex-Methode (QIM), bestimmt. Die Haltbarkeitsgrenze wird bei einem Index ≥ 10 angesetzt. Der Maximalpunktzahl beträgt 24 (Oehlenschläger 2004).

Tabelle 4-13.: Matrix zur Einstufung des Frischestatus von foliengeschützter Lachsforelle

Frischeparameter	Frischestatus	
	<i>Frisch</i>	<i>Verdorben</i>
Sensorikindex	$\leq 1,5$	$\geq 1,5$
QIM	0-9	≥ 10

Weitere Modellannahmen:

- Der ausgenommene Fisch wird unter aeroben Bedingungen (nur foliengeschützt) gelagert.
- Zum Untersuchungsbeginn ist der rigor mortis (ca. 24 h nach Schlachtung) abgeschlossen. Es gilt zu beachten, dass von dem empirisch bestimmten Haltbarkeitsendpunkt jeweils 24 h abgezogen werden müssen (bis zur Ausbildung des rigor mortis), um den tatsächlichen Haltbarkeitsendpunkt zu ermitteln.

4.1.4. Modell-Komponenten eines Systemmodells

Der Prozess der Veränderung der Produktfrische lässt sich als Systemmodell, bestehend aus einem biologischen und einem physikalischen Modellansatz darstellen. Das

physikalische Modell dient der Beschreibung der Temperaturdynamik zwischen Produkt und Produktumgebung. Das biologische Modell beschreibt die Verderbskinetik. Analog der Einteilung nach Berg u. Kuhlmann (1993) sind die Elemente des dynamischen Systems wie in Abbildung 4-3 ersichtlich zugeordnet worden.

Die Basis des Modells beinhaltet Daten, die in das Simulationsmodell hineinfließen (Input) und Daten, die nach dem Simulationslauf ausgegeben werden (Output). Dabei fließen als prozessbezogene Systemparameter die Umgebungstemperatur ϑ_U , sowie die jeweilige Verweildauer λ_i in Stunden in den unterschiedlichen Stufen ab dem point of sale bis in den Haushaltskühlschrank und produktbezogene Systemparameter, wie Verpackungsvariante und Art des Produktes (MAP-Hackfleisch/Lachsforelle) in das Modell ein. Als nicht kontrollierter Input gilt die Anfangskeimbelastung als Kriterium für die ursprüngliche Produktbeschaffenheit vor dem Einkauf. Als Output berechnet das physikalische Modell zunächst die Temperatur des Lebensmittels (ϑ_{LM}) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (ϑ_U). Diese Zustandsgröße (ϑ_{LM}) gilt als Grundlage, auf der die Simulation der Verderbskinetik unter Berücksichtigung dynamischer Zeit-Temperatur-Bedingungen erfolgen kann.

Für die Modellentwicklung steht die Beschreibung der Veränderung der Frischeparameter (mikrobiologisch/sensorisch) in Abhängigkeit von der Lagerdauer und -temperatur im Vordergrund. Die Verläufe der Frischeparameter in den unterschiedlichen Zeitreihen (stat./dyn.) werden im Folgenden durch unterschiedliche Wachstumsfunktionen beschrieben: (1) Wachstumsfunktion ohne Berücksichtigung einer Anpassungs-Phase (Gleichung 2.2), (2) Wachstumsfunktion unter Berücksichtigung einer Anpassungs-Phase (Gleichung 2.3), (3) Baranyi-Funktion (Gleichung 2.4).

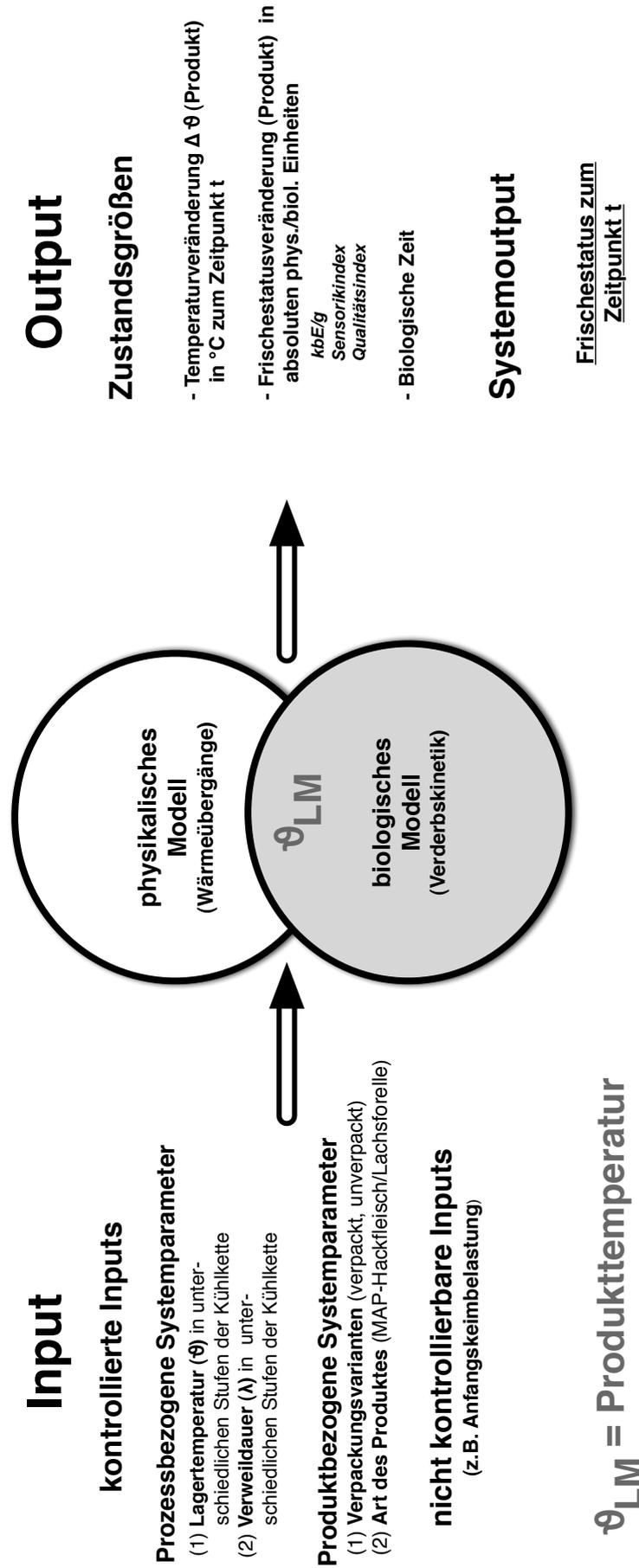


Abbildung 4-3.: Elemente des Systemmodells (modifiziert nach Berg u. Kuhlmann (1993))

Für die Abbildung des Temperatureinflusses auf die zeitliche Entwicklung der Frischeparameter (Mikrobiologie/Sensorik) der Lebensmittel werden die im Kapitel 2.2.1 beschriebenen Temperatur-Response-Funktionen von O'Neill (Gleichung 2.8) und Arrhenius (Gleichung 2.7) angewendet. Zur Ermittlung des charakteristischen Arrhenius-Parameters Aktivierungsenergie E_a wird die im Kapitel 2.2.1 dargestellte Schrittweise Berechnung vorgenommen. Die O'Neill-Funktion wird simultan sowohl an die stat. wie auch dyn. Messreihen angepasst. Dabei wird die O'Neill-Funktion in die log. Wachstumsfunktion zur Lösung des vertikalen¹ Regressionsproblems eingebettet und beide Funktionen simultan angepasst. Die Wachstumsrate μ_{max} wird hierbei durch die Rate der O'Neill-Funktion ersetzt, um die Frischestatusveränderungen vorherzusagen. Dazu werden die Zustandsgrößen kbE/g , SI und QI in Abhängigkeit von der Zeit berechnet.

Die Zustandsgrößen Biologische Zeit Φ ist ein integrierendes Maß dafür, wie weit die Entwicklung des untersuchten Frischeparameters (Mikrobiologie/Sensorik) unter einer Einfluss der Temperatur fortgeschritten ist (Jones 1992; Söndgerath 1987). Φ ergibt sich als das Integral über die durchschnittliche Entwicklungsrate d unter einer Temperatur ϑ über die Zeit. Die Biologische Zeit Φ ist somit zeitunabhängig und variiert mit der Temperatur.

Zur Ermittlung der Biologischen Zeit gilt folgende Gleichung nach Richter (1985):

$$\Phi = \int_t^{t_0} d_R(\vartheta) dt \quad (4.1)$$

wobei $d_R(\vartheta)$ die mittlere Entwicklungsrate bei einer gegebenen Temperatur ϑ ist. Für die Berechnung der Entwicklung des jeweiligen Frischeparameters wird die Rate (μ_{max}) der jeweiligen Wachstumsfunktion durch das oben beschriebene Integral ersetzt.

¹über alle Temperaturstufen

4.2. Untersuchung von Frischeparametern und Temperaturverläufen

4.2.1. Probenmaterial

Die Untersuchungen der Frischeparameter fanden bei insgesamt 779 Lebensmittelproben statt. Nachfolgende Tabelle 4-14 zeigt jeweils die Anzahl der Proben, sowie die Einzeldaten (Frischedaten), die aus statischen und dynamischen Versuchsreihen zur Verfügung standen.

Tabelle 4-14.: Übersicht über die Anzahl von Proben und Frischedaten aus Untersuchungen von MAP-Hackfleisch und Lachsforellen.

Art der Lebensmittel	Anzahl Proben		Frischedaten	
	<i>statisch</i>	<i>dynamisch</i>	Σ	Σ
MAP-Hackfleisch	377	321	698	2792
Lachsforellen	40	41	81	162
Σ	417	362	779	2954

- Probenmaterial MAP-Hackfleisch:

Als Probenmaterial für die Zeitreihenmessungen diente MAP-verpacktes Schweinehackfleisch. Die Proben wurden über einen lokalen Fleischhof bezogen. Die Masse des Probenmaterials betrug jeweils 500 g. Abbildung 4-4 zeigt den schematischen Aufbau der MAP-Verpackung mit den Messpunkten für die Temperaturfühler. Die verpackten Proben wurden jeweils ca. 12 h nach der Herstellung abgeholt bzw. angeliefert und zuvor bei +2 °C im Kühlhaus gelagert. Die Zusammensetzung des Gasgemisches des MAP-verpackten Schweinehackfleischs gab der Hersteller mit 30 % CO₂, 50 % N₂ und 20 % O₂ an. Die angegebene Haltbarkeit der Proben betrug jeweils 7 Tage ab Produktionsdatum bei einer empfohlenen Lagertemperatur von +2 °C.

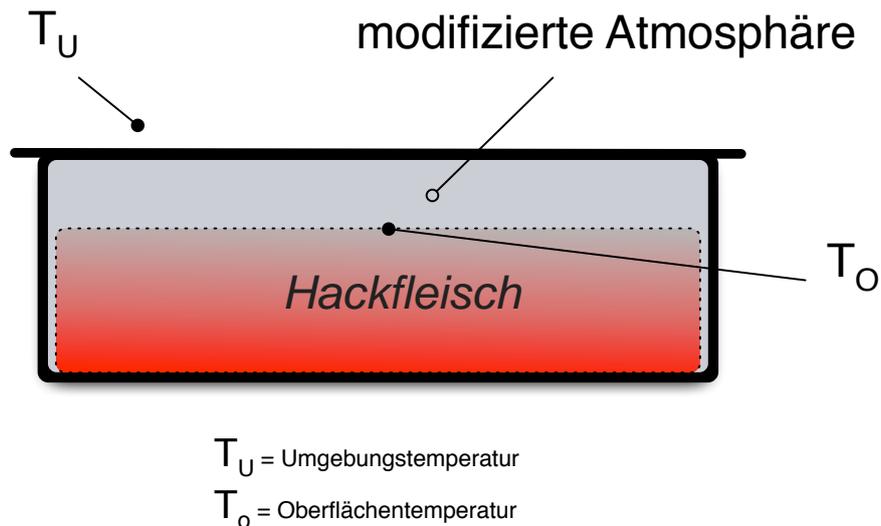


Abbildung 4-4.: Untersuchtes MAP-Hackfleisch

- Probenmaterial Fisch:

Bei dem untersuchten Fisch handelt es sich um sogenannte Lachsforellen (*Onchorhynchus mykiss*). Die Forellen wurden direkt nach der Schlachtung ausgenommen und vor der Einlagerung in mit steriler Alufolie ausgekleidete Plastikschaalen gelegt und mit Frischhaltefolie abgedeckt. Die Fische wurden vor Beginn der Untersuchungen 24 h bei 2°C im Kühlraum des Fischbetriebes bis zum Erreichen der Totenstarre (rigor mortis) gelagert. Abbildung 4-5 zeigt den Aufbau des Lagerungsversuches mit den Temperaturmesspunkten.

4.2.2. Probenvor-, -aufbereitung und Lagerung

Um bei den experimentellen Untersuchungen im Labormassstab eine ununterbrochene Kühlkette zu gewährleisten, wurde das zur Untersuchung bestimmte Probenmaterial während des Transports in Thermoboxen gelagert. Die Transportzeit vom Produktionsort zum Labor betrug jeweils etwa 20 Minuten. Die Proben konnten dann in einem auf die entsprechende Temperatur programmierten Klimaschrank (Inkubator) oder in ein entsprechend temperiertes Kühlhaus eingelagert werden. Dabei wurde vor allem auf eine zügige Arbeitsweise geachtet, um das Produkt nicht allzu grossen Temperaturschwankungen auszusetzen und dessen Verderb nicht zu beschleunigen.

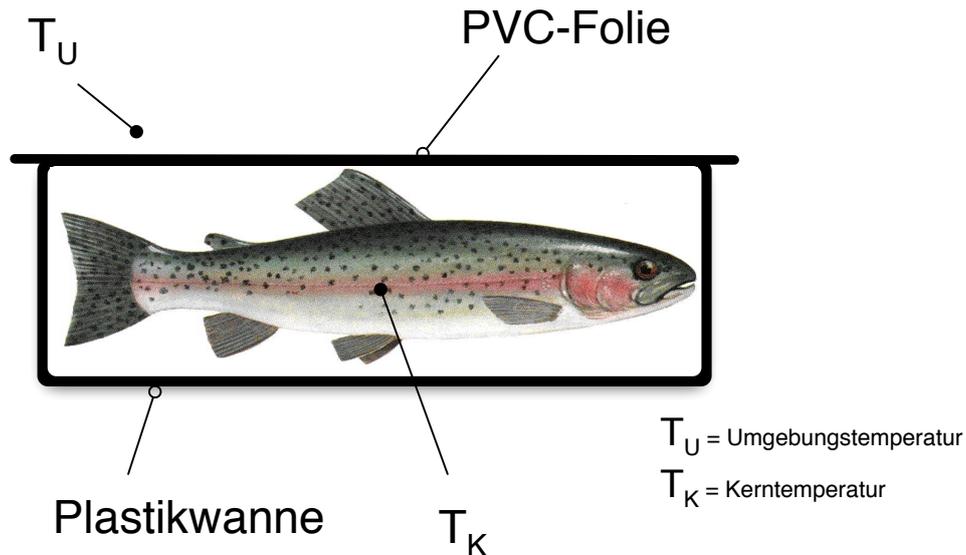


Abbildung 4-5.: Aufbau Lagerungsversuch Lachsforellen

4.2.3. Mikrobiologische Untersuchungen

Zum Zeitpunkt der jeweiligen Probennahme wurden von den jeweils 500 g schweren Hackfleisch-Proben 10 g mit einer Stanze steril entnommen und mit je 90 ml physiologischer Kochsalzlösung in einem Stomacherbeutel aufgefüllt. Die Verdünnung betrug 1:10. Die Homogenisierung erfolgte im Stomacher bei 60 Schlägen pro Minute. Aus der homogenisierten Probe wurde anschliessend eine Verdünnungsreihe mit 0,9 % iger NaCl-Lösung erstellt. Die Bestimmung der Keimzahl der einzelnen Bakterien erfolgte in Anlehnung an die amtliche Sammlung von Untersuchungsverfahren nach § 35 LMBG.

Nachweis der Gesamtkeimzahl (GKZ)

Die GKZ wurde mit Hilfe des Koch'schen Plattengussverfahrens ermittelt. Aus jeder Verdünnungsstufe wurden mittels Eppendorfpipette 1000 μ l entnommen, in eine Petrischale gegeben und mit ca. 20 ml flüssigem Plate-Count-Agar mit einer Temperatur von höchstens 45 °C übergossen. Zur gleichmässigen Verteilung der Probe im Agar wurden die Platten in acht-förmigen Bewegungen leicht geschwenkt. Nach Verfestigung des Agars wurden die Proben für 72 h \pm 2 h in einem auf 30 °C eingestellten Inkubationschrank bebrütet, um danach ausgezählt zu werden (amtliche Methodensammlung § 35 LMBG, L 06.00-18).

Nachweis von Pseudomonas ssp.

Das Verfahren zum Nachweis von *Pseudomonas ssp.* erfolgte durch Beimpfung im Doppelansatz unter Anwendung des Oberflächenspatelverfahrens (nach § 35 LMBG). Als Medium wurde Pseudomonas-Agar-Basis (pH $7,1 \pm 0,2$) unter Zugabe von Pseudomonas-C-F-C-Selektiv-Supplement verwendet. Der Nährboden wurde 15 Minuten bei 121 °C autoklaviert. Aus jeder Verdünnungsstufe wurden mit einer Eppendorfpipette 100 μl entnommen und ausgespatelt. Die Bebrütung erfolgte für 48 h bei 25 °C. Bezogen auf das Zählen der Kolonien und die Berechnung der Keimzahl galten die Bedingungen für das Spatelverfahren nach § 35 LMBG. Es wurden nach Möglichkeit nur Platten mit Koloniezahlen in der Größenordnung zwischen 20 und 300 Kolonien in die Auswertung miteinbezogen.

Berechnung der Keimzahl (kbE/g)

Die Berechnung der Keimzahlen erfolgte nach folgender Formel (Bast 1999):

$$m = \frac{10^x \sum c_x \sum c_{x+1}}{v \ n_x + 0,1n_{x+1}} \quad (4.2)$$

mit:

m = gewogener Mittelwert der Keimzahl in 1 ml der unverdünnten Probe

10^x = Verdünnungsfaktor für die niedrigste ausgewertete Verdünnungsstufe 10^{-x}

v = pro Platte eingesetztes Volumen der (verdünnten) Keimsuspension in ml

$\sum c_x$ = Zahl der Kolonien auf allen n_x Platten der niedrigsten ausgewerteten Verdünnungsstufe 10^{-x}

$\sum c_{x+1}$ = Zahl der Kolonien auf allen n_{x+1} Platten der nächsthöheren ausgewerteten Verdünnungsstufe $10^{-(x+1)}$

Impedanz-Keimzahl (IKZ)

Die Impedanz-Keimzahl (IKZ) wurde durch die Impedanz-Splitting-Methode, unter Verwendung des BACTRAC 4100 (Fa. SyLab, Österreich) ermittelt. Zur Bestimmung der IKZ wurden sterile BACTRAC-Messzellen mit jeweils 9 ml sterilem BiMedia 002a (Fa. SyLab, Österreich) abgefüllt und jeweils 1ml der homogenisierten Hackfleischprobe hinzugegeben. Die IKZ wurde spätestens nach 24 h bei einer Bebrütungstemperatur von 30 °C angezeigt.

4.2.4. Sensorische und physikalische Untersuchungen

Einfach beschreibende Prüfung (gewichteter Sensorikindex)

Die sensorische Beurteilung des Frischestatus erfolgte in Anlehnung an die amtliche Sammlung von Untersuchungsverfahren nach § 35 LMBG mittels einer einfach beschreibenden Prüfung der Merkmale Farbe, Geruch und Textur. Zur Bewertung der genannten Merkmale lag ein Bewertungsschema mit vier möglichen Noten zugrunde. Im folgenden ist das Bewertungsschema für MAP-Hackfleisch dargestellt:

Tabelle 4-15.: Zuordnung sensorisch ermittelbarer Merkmalseigenschaften von MAP-Hackfleisch zu einer Notenskala von 0-3

Note	Merkmalseigenschaften		
	Farbe	Geruch	Textur
0 = keine signifikanten Abweichungen erkennbar	rosa/rot, glänzende Oberfläche, kräftig	frisch, arteigen	feste, gleichförmige Wolfung
1 = Abweichungen erkennbar	leicht bräunlich, blass, marmoriert	leicht süsslich	wässrig, weich,
2 = nicht mehr akzeptabel	bräunlich, entfärbt	blass, nussig, sauer	süsslich, bruchig, wässrig, klebrig
3 = starke Mängel erkennbar	grau, verfärbt	stechend, faulig	streng, klebrig, schmierig, breiig, zerfallen

Die Prüfskala umfasst die für die Qualität des Produktes maßgebenden Merkmale (Farbe, Geruch, Textur) und die Merkmalsausprägungen. Dabei wurden die Merkmalsausprägungen bzw. -eigenschaften für jede Beurteilungsstufe (0-3) mit sensorischen Fachausdrücken beschrieben.

Die Ermittlung der Sensorikindices (SI) erfolgte jeweils durch unterschiedliche Gewichtung der Parameter:

Der Sensorikindex (SI_{HF}) für MAP-Hackfleisch:

$$SI_{HF} = \frac{2xFarbe + 2xGeruch + 1xTextur}{5} \quad (4.3)$$

Die Zusammensetzung des Index wurde für die Untersuchung der Lachsforellen angepasst. Dabei wurden die Textur und der Geruch zweifach sowie die Farbe einfach gewichtet. Für die visuelle Bewertung (Farbe) wurden die Ausprägungen des äußeren Erscheinungsbildes (v.a. Kiemen) zusammengefasst. Unter den Textureigenschaften fallen die Bewertungen des Fleisches (v.a. Festigkeit), der Kiemen (Schleim) und der Augen (Form) zusammen. Der Geruch ist der Gesamteindruck der Geruchsausprägung von Kiemen, Abdomen und der Haut des Fisches. Abbildung 4-6 zeigt beispielhaft die visuelle Kategorisierung der Kiemenbeschaffenheit.

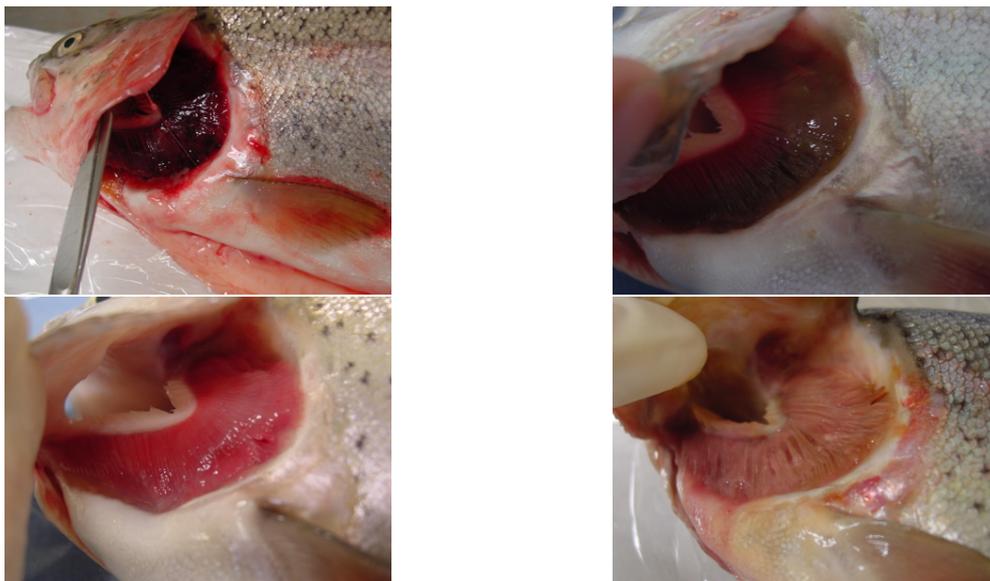


Abbildung 4-6.: Visuelle Kategorisierung des Frischeverlusts aufgrund der Kiemenbeschaffenheit

Der Sensorikindex (SI_{LF}) für Lachsforellen:

$$SI_{LF} = \frac{1xFarbe + 2xGeruch + 2xTextur}{5} \quad (4.4)$$

Tabelle 4-16.: Zuordnung sensorisch ermittelbarer Merkmalseigenschaften von Lachsforellen zu einer Notenskala von 0-3

Note	Merkmalseigenschaften		
	Farbe	Geruch	Textur
0 = keine signifikanten Abweichungen erkennbar	rosa/rote und blutige Kiemen, glänzende Oberfläche	frisch, arteigen	fest, Augen konvex
1 = Abweichungen erkennbar	blass, marmoriert	leicht süsslich	wässrig, weich
2 = nicht mehr akzeptabel	bräunlich, entfärbt	blass, nussig, sauer	süsslich, bruchig, wässrig, klebrig
3 = starke Mängel erkennbar	grau, verfärbt	stechend, faulig	streng, klebrig, schmierig, breiig, zerfallen

Qualitätsindexmethode (QIM) für Fisch:

Als weiteres Verfahren zur Objektivierung sensorisch erfassbarer Merkmale wurde die Qualitätsindexmethode (QIM) angewendet. Bei der QIM summiert man die Bewertungsergebnisse prägnanter Sensorikparameter auf, die auf einer Skala von 0 bis 3 je nach Parameter liegen können. Die Summe der Ausprägungen aller Sensorikparameter ist der Qualitätsindex (Bonilla 2004).

Qualitätsparameter für Frische		Beschreibung	QIM Punkte
Haut	Farbe/Aussehen	Perglanz auf gesamter Haut	0
		Haut mit weniger Perglanz	1
		Fisch ist gelblich, hauptsächlich nahe dem Abdomen	2
	Schleim	Klar, nicht verklumpt	0
		Milchig, verklumpt	1
		Gelb und verklumpt	2
	Geruch	Frisch nach Algen, neutral	0
		Gurke, metallisch, nach Heu	1
		Sauer, Wischlappen	2
		Verdorben	3
	Textur	In Totenstarre	0
		Fingereindruck verschwindet rasch	1
Fingereindruck bleibt mehr als 3 sec.		2	
Augen	Pupille	Klar und schwarz, Metallglanz	0
		Dunkelgrau	1
		Mattgrau	2
	Form	Konvex	0
		Flach	1
		Eingesunken	2
Kiemen	Farbe	Rot/dunkelbraun, Hellrot	0
		rosa/hellbraun	1
		Graubraun, braun, grau, grün	2
	Schleim	Durchsichtig	0
		Milchig, verklumpt	1
		Braun, verklumpt	2
	Geruch	Frisch (arteigen)	0
		Metallisch, Gurke	1
		Sauer, moderig	2
		Verdorben	3
Abdomen	Blut im Abdomen	Blut ist rot/kein Blut	0
		Blut ist bräunlich, gelblich	1
	Geruch	Neutral	0
		Gurke, Melone	1
		Sauer, erinnert an Gärung	2
		Verdorben/verdorbenener Kohl	3
QIM Gesamtfehlerpunkte			

Abbildung 4-7.: Kategorien von Qualitätsmerkmalen nach Kriterien der Qualitätsindexmethode (Oehlenschläger 2004)

Messungen von Wärmeübergängen

Bei den statischen und allen dynamischen Zeitreihen wurden jeweils die Lagertemperaturen des MAP-Schweinehackfleischs mit Datenloggern der Firma TESTO (Testostor 171) aufgezeichnet. Dabei wurden neben der Umgebungstemperatur auch die Temperatur des Kopfraums der Verpackung sowie die Kern- und Oberflächentemperaturen aufgezeichnet. Bei den Lagerungsversuchen Fisch wurden lediglich die Umgebungstemperaturen und die Kerntemperatur aufgezeichnet (s. Abb. 4-4 und 4-5).

pH-Wert-Messung

Die Messung der pH-Werte erfolgte bei jeder einzelnen Teilprobe, um einen Überblick über die Verderbsbereitschaft des Probenmaterials zu gewinnen. Sie wurde gemäss der Amtlichen Sammlung von Untersuchungsverfahren nach § 35 LMBG durchgeführt. Zu diesem Zweck musste die Elektrode des pH-Meters zunächst kalibriert werden. Die Einstellung erfolgte bei Raumtemperatur mit Standardpufferlösungen zunächst mit pH 4 und dann mit pH 7. Zur vollständigen Kalibrierung des Gerätes wurde zusätzlich die Temperatur der Fleischprobe ermittelt. Der pH-Wert wurde an drei verschiedenen Stellen der Fleischoberfläche gemessen und nach Erreichen einer Anzeigenkonstanz abgelesen und gemittelt.

Tabelle 4-17 zeigt, welche Frischeparameter für die Untersuchungen ermittelt und welche Methoden zur Untersuchung dabei herangezogen wurden.

Tabelle 4-17.: Übersicht über die untersuchten Frischeparameter von MAP-Hackfleisch sowie foliengeschützter Lachsforellen und die Art der angewandten Methode

Lebensmittel	Frischeparameter	Methode	Art der Untersuchung
Hackfleisch	GKZ	Plattenguss	mikrobiologisch
Hackfleisch	IKZ	Impedanz-Splitting-Methode	mikrobiologisch
Hackfleisch	<i>Pseudomonas ssp.</i>	Spatelverfahren	mikrobiologisch
Hackfleisch	pH-Wert	Einstechelektrode	physikalisch
Hackfleisch, Lachsforelle	Sensorikindex	beschreibende Prüfung mit Skale	sensorisch
Lachsforelle	Qualitätsindex	Beschreibung der Qualitätsmerkmale	sensorisch

Im Anhang (Kapitel A) sind die verwendeten Geräte und Materialien aufgelistet.

5. Ergebnisse

5.1. Ergebnisse Hackfleisch

5.1.1. Veränderung der Parameter in den Zeitreihenmessungen

Mikrobiologische Frischeparameter

Der Frischestatus von losem oder verpacktem Hackfleisch wird charakterisiert durch die Veränderung der Modellparameter Gesamtkeimzahl und Anzahl nachgewiesener *Pseudomonas ssp.*. Abb. 5-1 gibt die Varianz der Anfangskeimgehalte (N_{min}) in den definierten Grenzen für den Frischestatus in Form von Boxplots wieder. Dargestellt sind jeweils Median, 50 % Streuung und 95 % Perzentil (Quantumsoft 2007) der Gesamtkeimzahl, gemessen auf Grundlage des Plattengussverfahrens (GKZ), sowie der Impedanzmethode (IKZ) als auch die Ergebnisse von *Pseudomonas ssp.*. Der mittlere Anfangskeimgehalt der GKZ beträgt $\log 4,37 \text{ kbE/g}$ ($\pm 0,27$). Der Wert für die Impedanzkeimzahl (IKZ) liegt mit $\log 4,65 \text{ kbE/g}$ ($\pm 0,30$) leicht über dem der GKZ. Der Ausgangswert für den Indikatorkeim *Pseudomonas ssp.* ist mit $3,93 \text{ kbE/g}$ ($\pm 0,70$) erwartungsgemäss unter dem der GKZ und IKZ, besitzt aber die höchste Streuung aller mikrobiologischen Frischeparameter.

Abb. 5-2 verdeutlicht den charakteristischen Verlauf der Veränderung der Gesamtkeimzahl (GKZ) von MAP-Hackfleisch in Abhängigkeit von der Lagerzeit in Stunden, exemplarisch für die statische Versuchsreihe bei 7°C . In der Darstellung ist der typisch sigmoide Wachstumsverlauf mit ausgeprägten Wachstumsphasen deutlich erkennbar. Bei der Lagertemperatur von 7°C ist nach etwa 30 h die lag-Phase abgeschlossen und es kommt zum exponentiellen Wachstum. Nach etwa 150 h ist das Wachstum beendet und die stationäre Phase erreicht. Eine Übersicht über die Verläufe der statischen Zeitreihen gibt Abb. A-2 im Anhang.

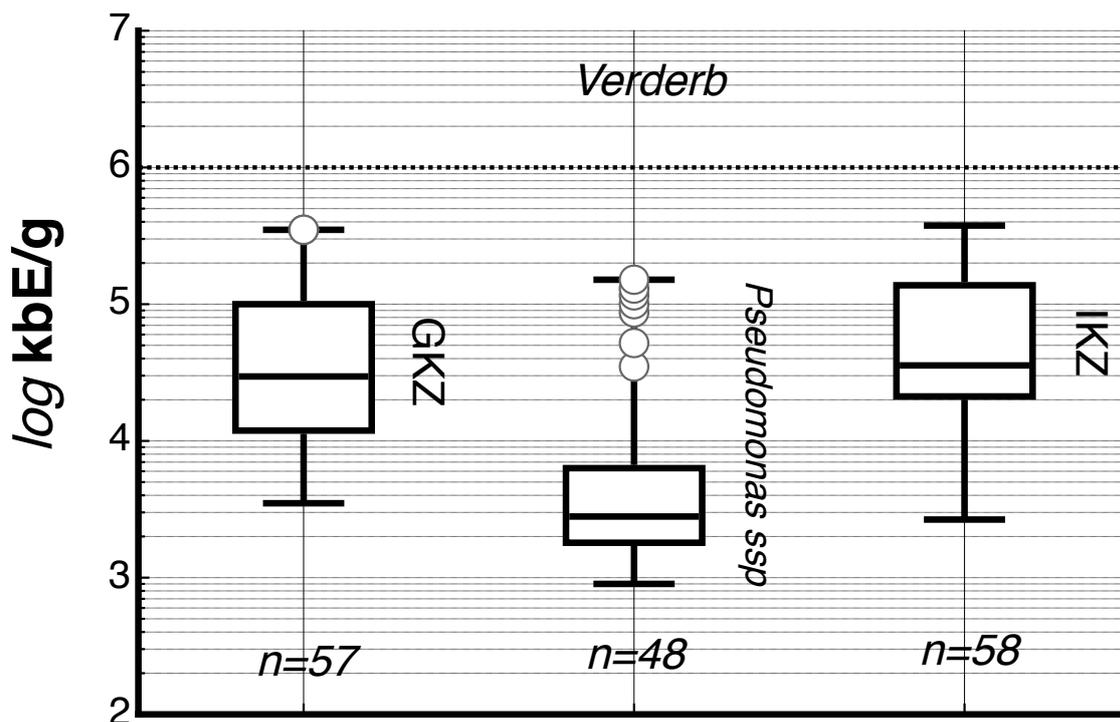


Abbildung 5-1.: Verteilung der Anfangskeimgehalte GKZ, *Pseudomonas ssp.*, IKZ

Die Ergebnisse der Impedanzkeimzahl (IKZ) weisen dagegen stärkere Schwankungen über den gesamten Untersuchungszeitraum als die Gesamtkeimzahl auf. Der maximale Keimgehalt (N_{max}) der einzelnen statischen Zeitreihen steigt bis zum Ende der Untersuchungen nicht auf ein gleiches Niveau. Während das Maximum der 15 °C-Messreihe zwischen log 7 und log 8 liegt, steigt die 7 °C-Reihe auf lediglich log 7 an (Abb. 5-3). Abb. A-3 im Anhang zeigt eine Gegenüberstellung der Verläufe der IKZ unter statischen Lagertemperaturen. Bei der 20 °C-Messreihe liegt der Maximalwert über log 8.

Ähnliche Ergebnisse zeigen die Messwerte von *Pseudomonas ssp.*. Im unteren Temperaturbereich (2-7 °C) steigt die maximale Keimzahl nicht über log 6 an. Weiterhin ist auch kein sigmoider Verlauf mit den typischen Wachstumsphasen zu erkennen. Für *Pseudomonas ssp.* konnten besonders in der 2 °C und 4 °C-Messreihe die grössten Schwankungen gemessen werden, die teilweise über zwei Zehnerpotenzen betragen. Abb. 5-4 zeigt die Entwicklung der Pseudomonaden exemplarisch für die statischen Messreihen bei 2 und 7 °C. Eine vollständige Übersicht über die Entwicklung von *Pseudomonas ssp.* unter statischen Bedingungen gibt Abb. A-4 im Anhang.

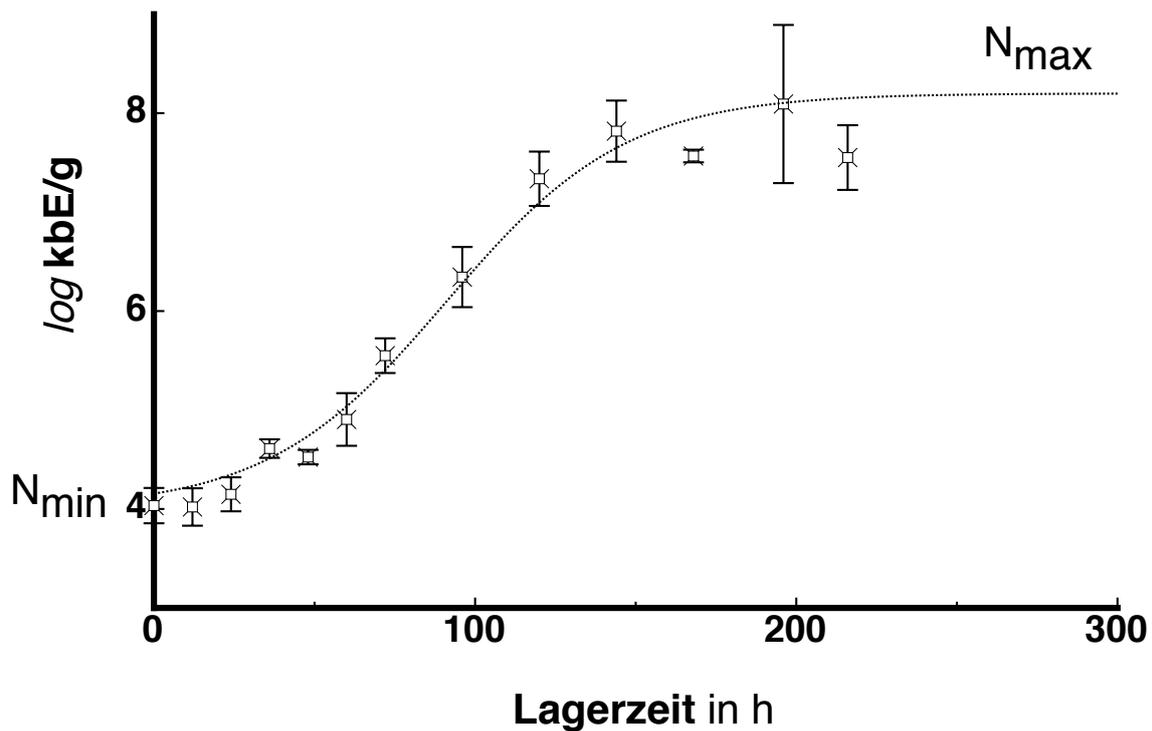


Abbildung 5-2.: Zeitliche Entwicklung der GKZ in MAP-Schweinehackfleisch am Beispiel der statischen Messreihen bei 2 und 7 °C und Anpassung mit log. Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3)

Wie mit steigender Lagertemperatur auch die maximalen Wachstumsraten (μ_{max}) für die einzelnen mikrobiologischen Frischeparameter steigen, verdeutlichen die in Tabelle 5-18 dargestellten Anpassungsparameter. Darin sind die mit der logistischen Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) geschätzten maximalen Raten $\mu_{max} h^{-1}$ für die Gesamtkeimzahl (GKZ), Impedanzkeimzahl (IKZ) und *Pseudomonas ssp.* dargestellt.

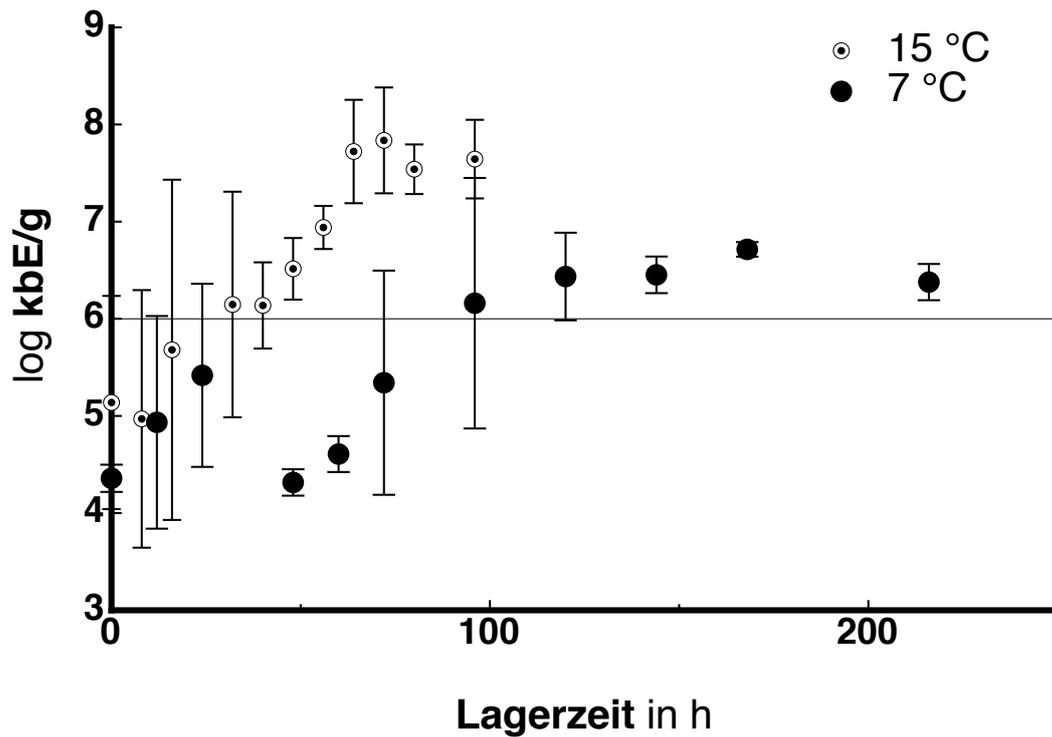


Abbildung 5-3.: Vergleich der Entwicklung der Impedanzkeimzahl in MAP-Hackfleisch am Beispiel der statischen Messreihen bei 7 und 15 °C

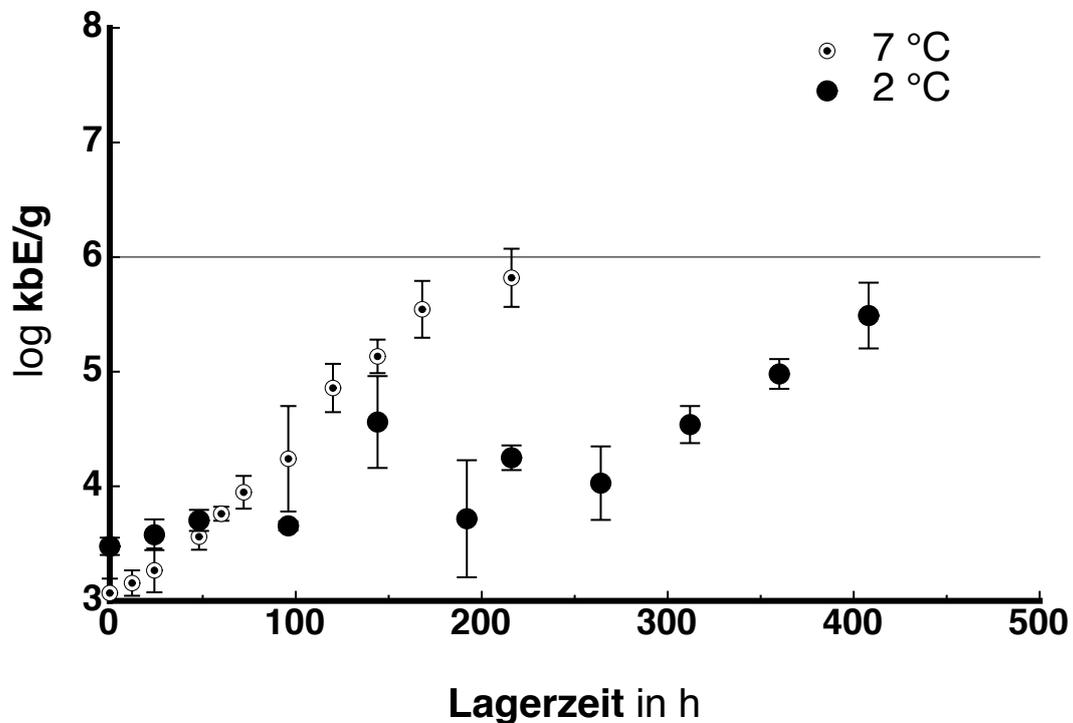


Abbildung 5-4.: Zeitliche Entwicklung von *Pseudomonas ssp.* in MAP-Schweinehackfleisch am Beispiel der statischen Messreihen bei 2 und 7 °C

Tabelle 5-18.: Übersicht über die mit Hilfe der logistischen Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) geschätzten Wachstumsraten ($\mu_{max} h^{-1}$) mit Bestimmtheitsmass (R^2) und Standardabweichung (s) für die mikrobiologischen Frischeparameter

Frishparameter	Temperatur in °C	$\mu_{max}h^{-1}$	s	R^2
<i>Gesamtkeimzahl (GKZ)</i>	2	0,0140	0,0026	0,89
	4	0,0048	0,0061	0,98
	7	0,0500	0,0068	0,96
	10	0,0506	0,0077	0,95
	15	0,0715	0,0010	0,96
	20	0,4177	0,0952	0,95
<i>Impedanzkeimzahl (IKZ)</i>	2	0,0150	0,0074	0,67
	4	0,0112	0,0101	0,82
	7	0,0780	0,0468	0,64
	10	0,1868	0,1556	0,45
	15	0,1066	0,0421	0,67
<i>Pseudomonas ssp.</i>	2	0,0057	0,0129	0,38
	4	0,0010	0,0651	0,89
	7	0,0076	0,0087	0,95
	10	0,0264	0,0082	0,94
	15	0,0215	0,0215	0,90

In Abb. 5-5 sind Wachstumsraten dargestellt, die mit den unterschiedlichen Wachstumsfunktionen geschätzt wurden. Für den Temperaturbereich zwischen 2 °C und 15 °C schätzen alle Funktionen (Gleichungen: 2.2, 2.3, 2.4) nahezu identische Raten. Die Wachstumsrate der 20 °C-Messreihe ist je nach verwendeter Wachstumsfunktion jedoch unterschiedlich geschätzt worden. Wird die lag-Phase in der Anpassungsfunktion nicht berücksichtigt (Gleichung 2.2), so liegt die Wachstumsrate bei 20 °C fast doppelt so hoch.

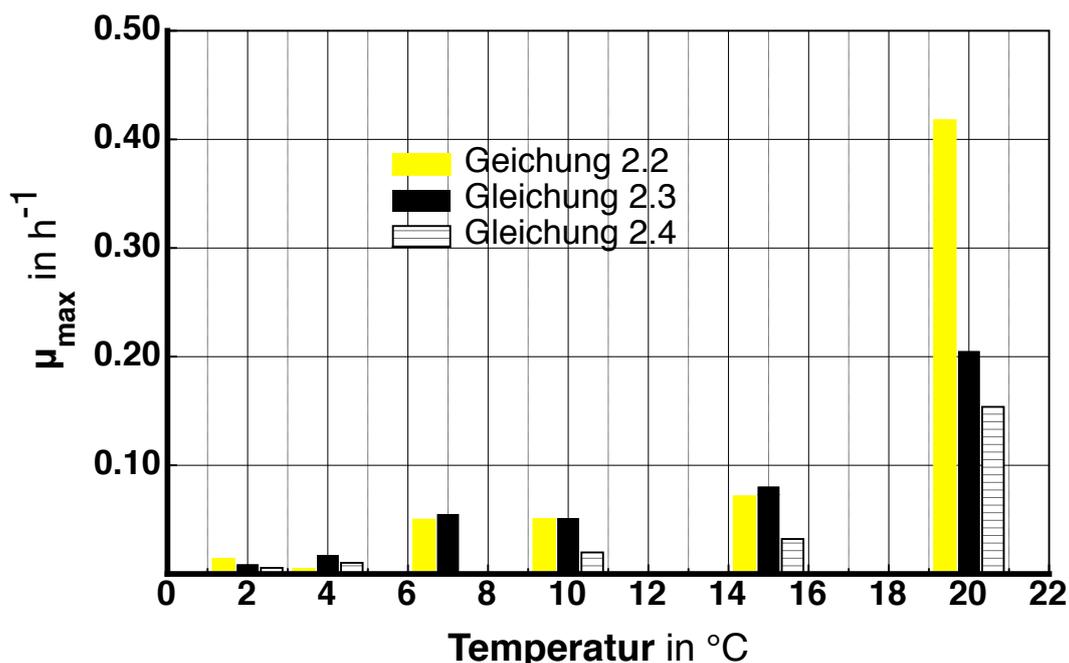


Abbildung 5-5.: Gegenüberstellung geschätzter Wachstumsraten μ_{max} in Abhängigkeit von der Lagertemperatur, unterschieden nach angewendeter Wachstumsfunktion

Sensorische Frischeparameter

Die Entwicklung der sensorisch ermittelten Frischeparameter über die Zeit zeigt ebenfalls einen sigmoiden Verlauf. Auch hier lassen sich Abschnitte mit Anpassungs- (lag-), exponentieller und stationärer Phase im Entwicklungsprozeß erkennen. Diese charakteristische Veränderung der sensorisch erfassbaren Veränderungen des Hackfleischs über die Zeit lässt sich ebenfalls mit Hilfe der logistischen Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) für alle Temperaturstufen beschreiben. Abb. 5-6 zeigt die mit der logistischen Wachstumsfunktion angepassten Kurvenverläufe für die Lagertemperaturen von 2 und 15 °C vergleichend in einem Diagramm.

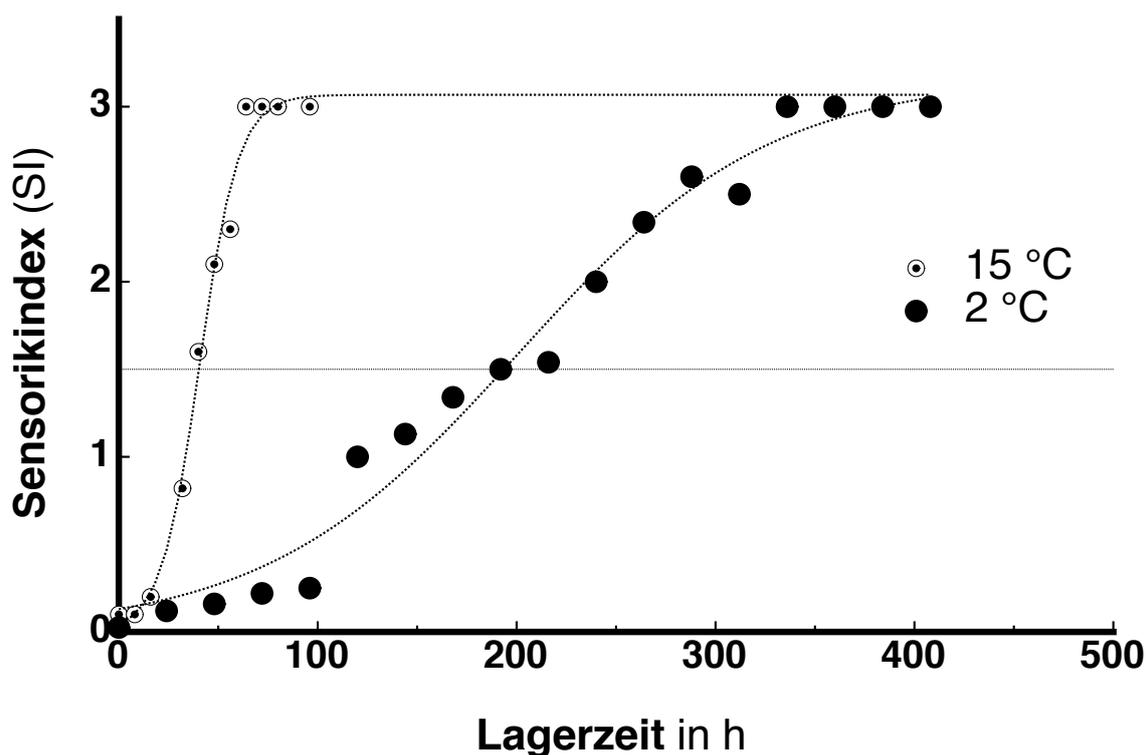


Abbildung 5-6.: Zeitliche Entwicklung des sensorisch ermittelten Frischeparameters SI (\bar{x}) bei Lagertemperaturen von 2 und 15 °C und Anpassung mit Gleichung 2.3

Wie aus Abb. 5-6 zu erkennen, bleibt der sensorisch erfassbare Qualitätsverlust des Hackfleischs bis zu einem bestimmten Zeitraum konstant auf gleichem Niveau und steigt anschließend bis zum Erreichen der Haltbarkeitsgrenze (3) exponentiell an. Die durchgehende Linie symbolisiert dabei jeweils das Ende der sensorisch definierten Haltbarkeit ($SI \geq 1,5$). Beim Vergleich der Messreihen aus dem unteren Temperaturbereich (2-7 °C) fiel auf, dass bis zu einer Lagerdauer von 100 h keine Differenzierung mit Hilfe sensorisch erfassbarer Merkmale festgemacht werden konnte. Abb. A-8 im Anhang vergleicht die statischen Messreihen.

Tabelle 5-19 zeigt die mit der logistischen Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) geschätzten Wachstumsraten, das Bestimmtheitsmass (R^2) und die Standardabweichung (s) des Sensorindex (SI).

Tabelle 5-19.: Mit logistischer Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) geschätzte Wachstumsraten, Standardabweichung (s) und Bestimmtheitsmass (R^2) des Sensorikindex von MAP-Hackfleisch

Temperatur in °C	Rate h^{-1}	s	R^2
2	0,0126	0,0029	0,98
4	0,0541	0,0124	0,98
7	0,0478	0,0068	0,99
10	0,0833	0,0186	0,98
15	0,1038	0,0163	0,99
20	0,1736	0,0321	0,99

Physikalische Frischeparameter

Abb. 5-7 zeigt beispielhaft die Entwicklung der pH-Werte von MAP-Hackfleisch im Verlauf der Lagerung bei Lagertemperaturen von 2 und 15 °C. Der Verlauf der pH-Werte kann dabei am besten mit einer logistischen Funktion beschrieben werden (gestrichelte Linie). Zu Untersuchungsbeginn (12 h nach Herstellung) lagen die durchschnittlichen pH-Werte des MAP-Hackfleischs bei 5,90 ($\pm 0,08$). Vergleicht man die jeweiligen Startwerte der einzelnen Zeitreihen, so können keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die gemessenen Werte aller Reihen bleiben zunächst stabil, um erst gegen Ende der Messung abzufallen. Stellt man den zeitlichen Verlauf des pH-Wertes der einzelnen Messungen den entsprechenden Wachstumskurven gegenüber, so fällt auf, dass der pH-Wert erst zu einem Zeitpunkt abfällt, an dem das Keimwachstums weit fortgeschritten ist. Die pH-Werte liegen am Ende der sensorisch definierten Haltbarkeit stabil um 5,90. Auch das sensorisch ermittelte Haltbarkeitsende steht somit in keinem Zusammenhang mit der pH-Wert-Änderung. Abb. A-5 im Anhang zeigt die Entwicklung der pH-Werte aller durchgeführten Versuchsreihen unter konstanten Temperaturen.

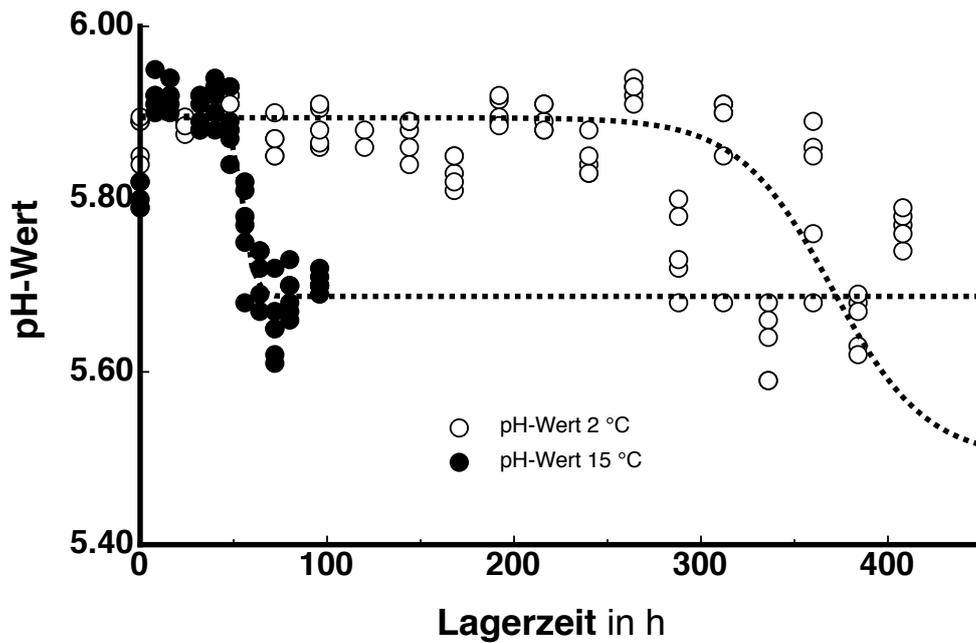


Abbildung 5-7.: Gegenüberstellung der pH-Werte in Abhängigkeit von der Lagerzeit bei Lager-temperaturen von 2 und 15 °C und Anpassung mit log. Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3)

Einfluss wechselnder Lagerungsbedingungen auf die Frischeparameter GKZ und SI

Wie sich die Frischeparameter nach Temperatursprüngen entwickeln zeigt exemplarisch für die DTL-Szenarien H3 und H5 Abb. 5.1.1. Dabei ist der Anstieg der kbE/g sowie des SI nach einem Temperatursprung jeweils deutlich zu erkennen. Empirisch ließ sich für das DTL-Szenario H5 ein Anstieg der kbE/g von log 5,1 auf log 5,6 ermitteln. Der Sensorikindex stieg in der selben Zeit von 0,8 auf 1,2.

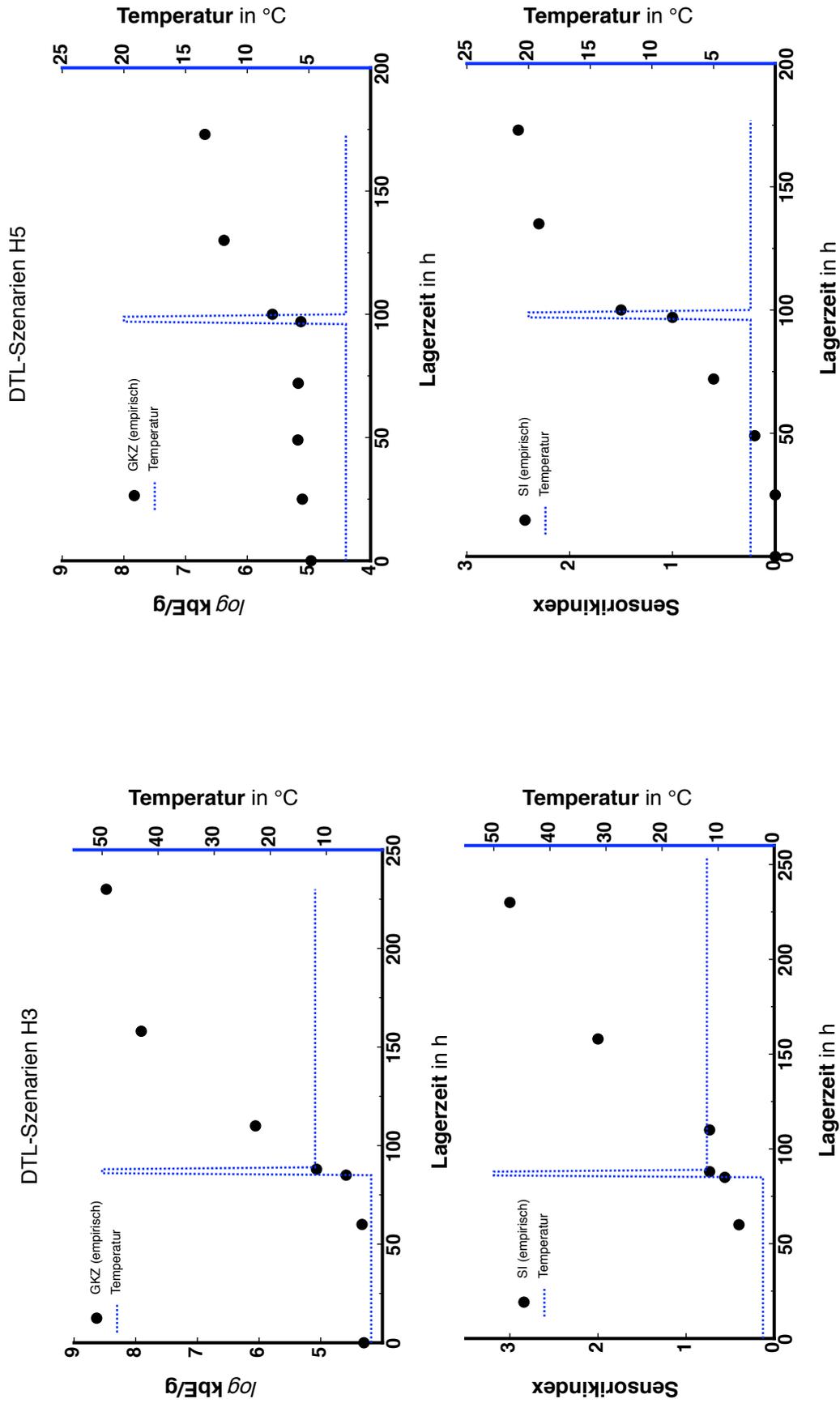


Abbildung 5-8.: Verlauf der Frischeparameter GKZ und SI nach Temperatursprünge am Beispiel der DTL-Szenarien H3 und H5

Einfluss wechselnder Lagerungsbedingungen auf die Zustandsgröße Produkttemperatur

Den Erwärmungs- bzw. Abkühlungsprozeß von Hackfleisch, in Abhängigkeit von unterschiedlichen Verpackungsvarianten, wird jeweils unter Anwendung von Gleichung 2.15 beschrieben. Die Anpassung der ermittelten Temperaturverläufe an der Oberfläche des Produktes mit dieser Funktion erlaubt es, den produktspezifischen Proportionalitätsfaktor ω für das MAP-Hackfleisch zu schätzen. Auf Grundlage von Untersuchungen mit wechselnden Lagerungsbedingungen (DTL-Szenarien) wurde ein mittlerer Proportionalitätsfaktor ω für das untersuchte Hackfleisch von $0,79 \text{ h}^{-1}$ ($\pm 0,02$) abgeleitet. Abb. 5-9 zeigt exemplarisch die Anpassung der Exponentialfunktion an die gemessenen Temperaturverläufe an der Oberfläche des Hackfleischs des DTL-Szenarios H3 (s. Kapitel 4.1.2). Dargestellt ist der Temperaturverlauf, die geschätzte Anpassungsfunktion und die tatsächliche Temperatur des MAP-Hackfleischs an der Produktoberfläche.

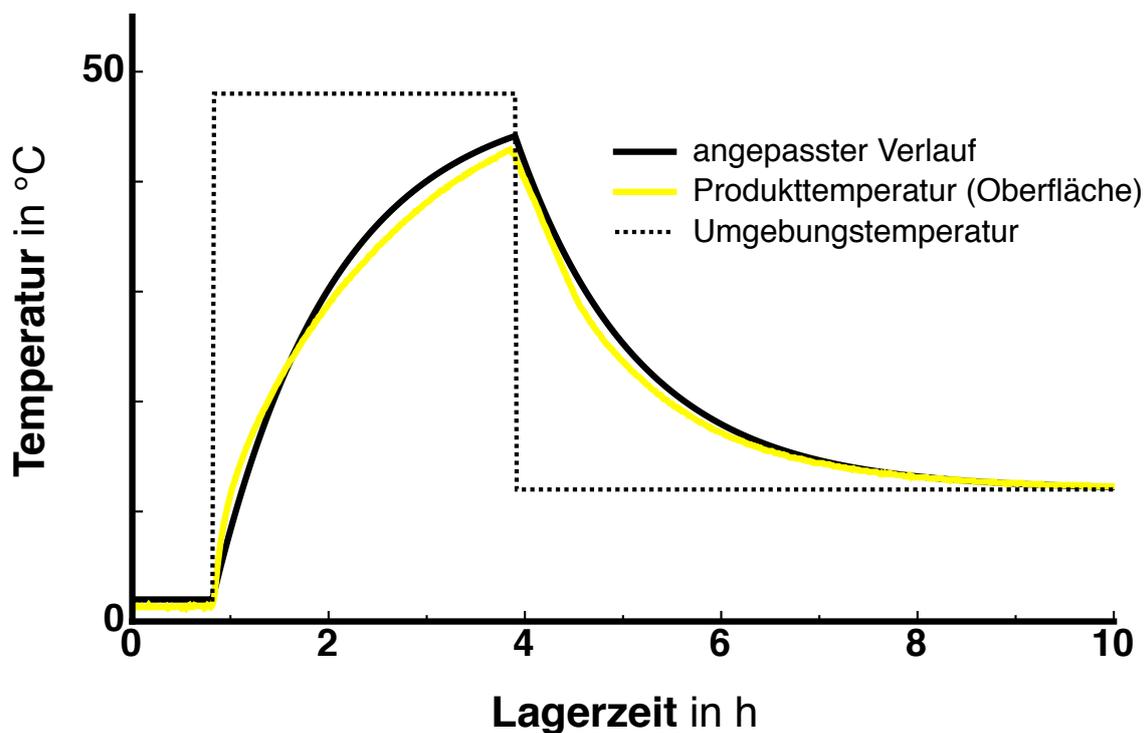


Abbildung 5-9.: Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der mit dem Abkühlungsgesetz berechneten und gemessenen Produkttemperaturen von MAP-Hackfleisch im DTL-Szenario H3

Abb. 5-10 und 5-11 zeigen die Anpassungen an die Temperaturverläufe der DTL-Szenarien H10 und H12 .

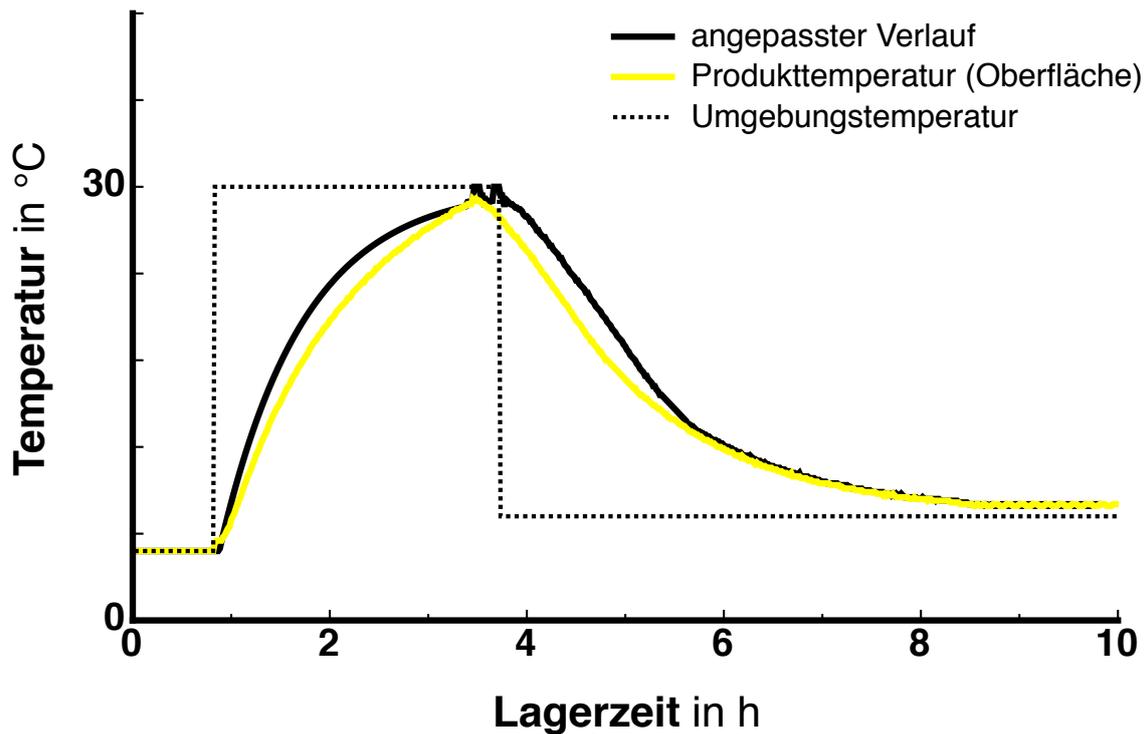


Abbildung 5-10.: Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der mit dem Abkühlungsgesetz berechneten und gemessenen Produkttemperaturen von MAP-Hackfleisch im DTL-Szenario H12

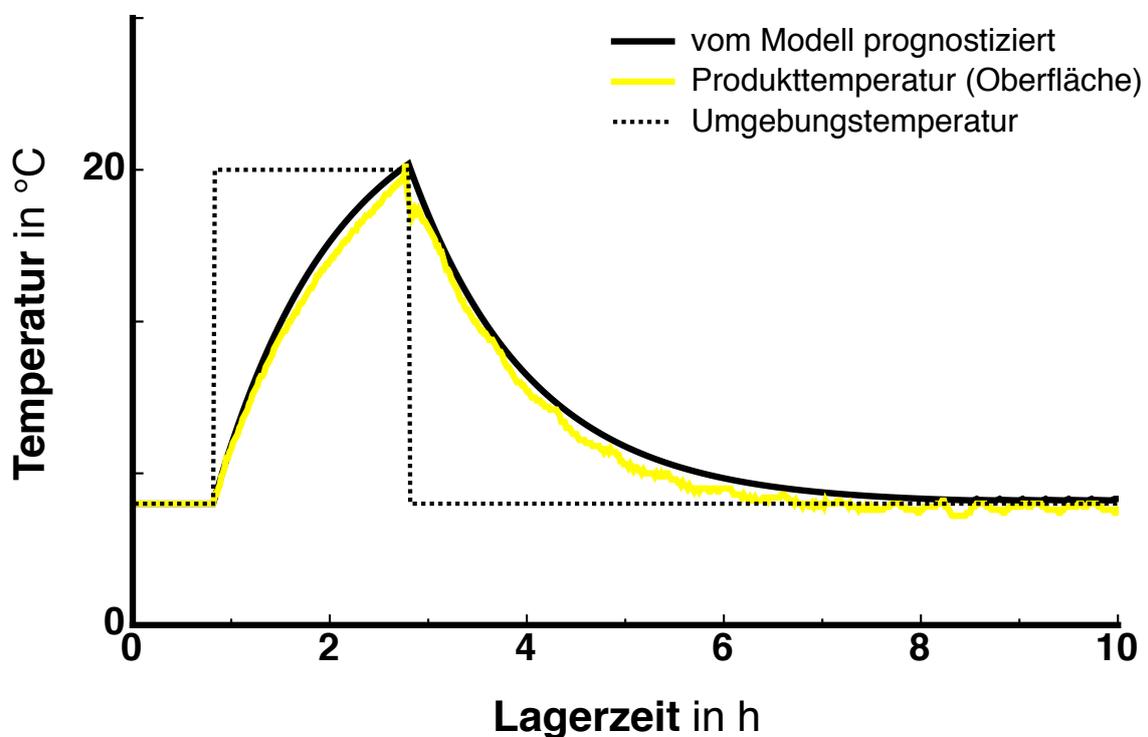


Abbildung 5-11.: Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der mit dem Abkühlungsgesetz berechneten und gemessenen Produkttemperaturen von MAP-Hackfleisch im DTL-Szenario H10

5.1.2. Anpassung produktspezifischer Zustandsgrößen an statische und dynamische Temperaturverläufe

Einfluss der Temperatur auf den Frischeverlust

Der Einfluss der Temperatur auf den Frischeverlusts von Hackfleisch wird im Folgenden zunächst aus den kinetischen Daten des Arrhenius-Ansatz (Gleichung 2.7) abgeleitet. Als Zielgröße zur Darstellung der Unterschiede zwischen den gewählten Parametern zur Frischebestimmung dient der charakteristische Arrhenius-Parameter Aktivierungsenergie (E_A). Zur Ermittlung der Aktivierungsenergie werden die logarithmierten Wachstums- bzw. Entwicklungsraten (s. Kapitel 5.1.1) gegen den Reziprokwert der Temperatur in Kelvin aufgetragen. Exemplarisch stellt Abb. 5-12 den Arrhenius-Plot der Frischeparameter GKZ und SI dar. Die aufgetragenen Entwicklungsraten wurden mit der log. Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) ermittelt.

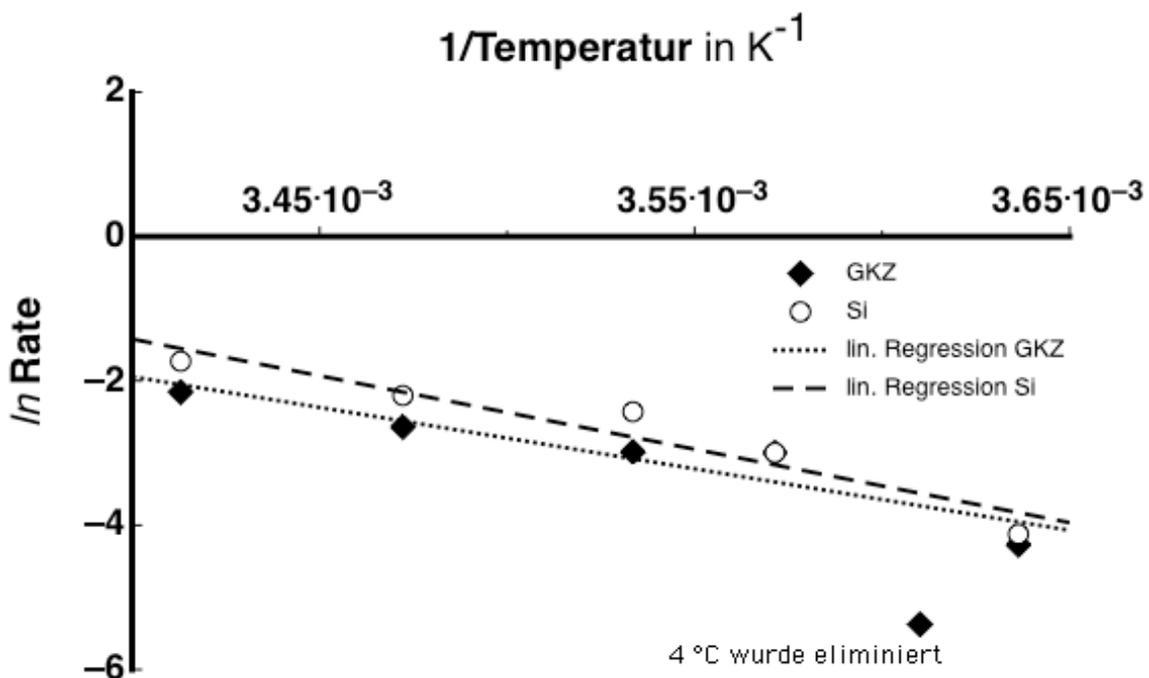


Abbildung 5-12.: Arrhenius-Plots der Frischeparameter GKZ und SI von MAP-Hackfleisch

Das Bestimmtheitsmass der Regressionsgeraden für die Werte der GKZ beträgt 0,88. Zur Berechnung der Aktivierungsenergie wird die ermittelte Steigung des Arrhenius-Plots (8511 K) mit der idealen Gaskonstante multipliziert. Somit ergibt sich für die GKZ folgende Berechnung:

$$8511 \text{ K} \cdot 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} = 70,76 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

bzw. 16,90 kcal/mol.

Die Entwicklungsrate der Sensorikindices (SI) zeigt ein ähnliches Verhalten im Arrhenius-Plot. Das Bestimmtheitsmass der Regressionsgeraden beträgt 0,91. Für den Sensorikindex ließ sich eine Aktivierungsenergie von 84,59 kJ/mol (20,20 kcal/mol) bestimmen. Diese liegt somit um ca. 4 kcal/mol höher als die Aktivierungsenergie der Gesamtkeimzahl. Tabelle 5-20 fasst die kinetischen Daten (Anpassungsparameter) der Frischeparameter des MAP-Hackfleischs zusammen. Dabei zeigen SI sowie GKZ und IKZ bessere R^2 -Werte¹ gegenüber der Einstufung aufgrund des Wachstums von *Pseudomonas ssp.* mit einem wesentlich niedrigeren R^2 -Wert von 0,68. Die Aktivierungsenergie der IKZ liegt mit 36,77 kcal/mol deutlich über den erwarteten Werten (s. Kapitel 2.2.1).

Tabelle 5-20.: Anpassungsparameter (Arrhenius-Parameter) für MAP-Hackfleisch

Frischeparameter	Kinetische Daten	
	E_a (kcal · mol ⁻¹)	R^2
Sensorikindex (SI)	20,20**	0,91
Gesamtkeimzahl (GKZ)	16,90**	0,88
Impedanzkeimzahl (IKZ)	36,77	0,87
<i>Pseudomonas ssp.</i>	29,24	0,68

**= 4 °C-Messreihe nicht miteinbezogen

Ergänzend zur Einstufung der Frischeparameter über die Aktivierungsenergie E_A wurde die Temperaturabhängigkeit der Wachstumsraten mit einer zweiten Temperatur-Response-Funktion (O'Neill-Funktion) beschrieben. Dabei wurden alle durchgeführten Versuchsreihen (statisch+dynamisch) unter Anwendung einer in die O'Neill-Funktion (Gleichung 2.8) eingebetteten logistischen Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) simultan angepasst. Abb. 5-13 zeigt die Simultanpassungen der statischen Messreihen.

Tabelle 5-21 fasst die kinetischen Daten (O'Neill-Parameter) für das MAP-Hackfleisch zusammen.

Abb. 5-14 stellt die über alle durchgeführten Versuchsreihen (statisch und dynamisch) kalibrierte O'Neill-Funktion, unterschieden nach Frischeparametern (GKZ und SI), gegenüber.

¹Bezieht sich auf Regressionsgerade

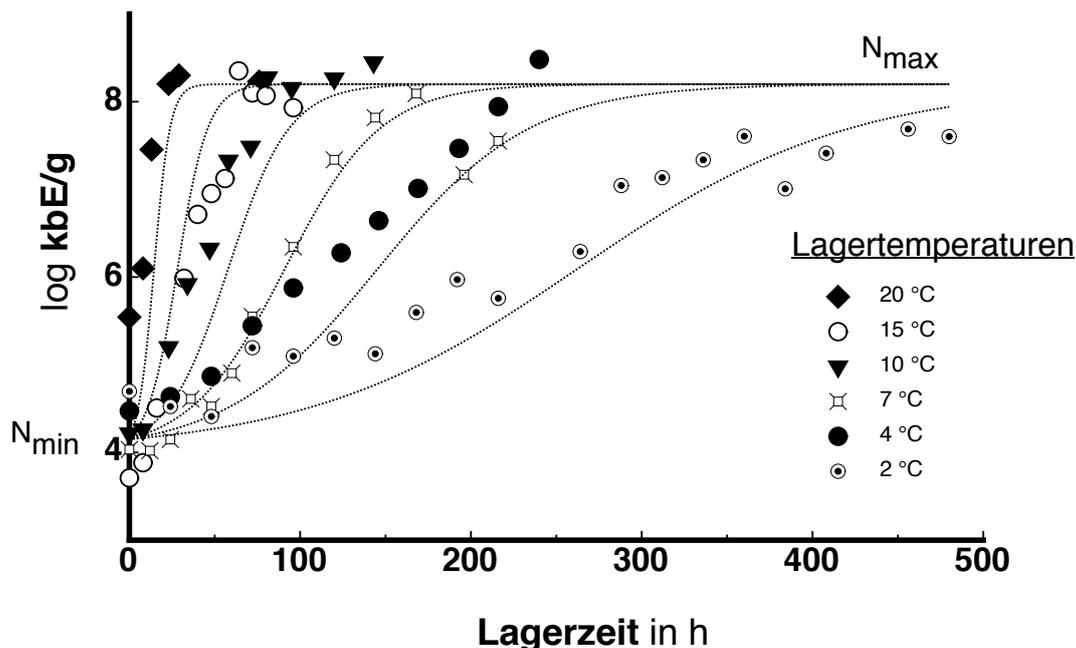


Abbildung 5-13.: Vergleich der Verläufe der GKZ (\bar{x}) von MAP-Schweinehackfleisch in statischen Messreihen (2 und 20 °C) mit Simultananpassungen

Tabelle 5-21.: Anpassungsparameter (O'Neill-Parameter) für MAP-Hackfleisch

Kinetische Daten	Frischeparameter	
	GKZ	SI
Q_{10}	1,93	1,68
ϑ_{max} in °C	68,41	88,7
ϑ_{opt} in °C	41,53	39,4
k	1	0,425

Vergleicht man die angewendeten Response-Funktionen, so ist deutlich zu erkennen, dass die Kurven, unabhängig ob sie mit dem O'Neill- oder dem Arrhenius-Ansatz berechnet wurden, in der Temperaturspanne zwischen 2 von 20 °C für die Frischeparameter GKZ und SI fast identisch verlaufen. Weiterhin wird auch deutlich, dass nicht nur die Wahl der Frischeparameter, sondern auch die Wahl der im Modell verwendeten Funktion, die Schätzung der Entwicklungsraten im Temperaturbereich über 20 °C deutlich beeinflussen. Über diesen Temperaturbereich hinaus steigen jedoch die über das Arrhenius-Modell ermittelten Raten exponentiell weiter an, während der Kurvenverlauf des O'Neill-Modells abgeschwächer verläuft und ein Maximum erreicht. Der Wendepunkt der Funktion entspricht dabei einem ϑ_{opt} von 41,5 °C für die GKZ

und 39,4 °C für den Frischeparameter SI.

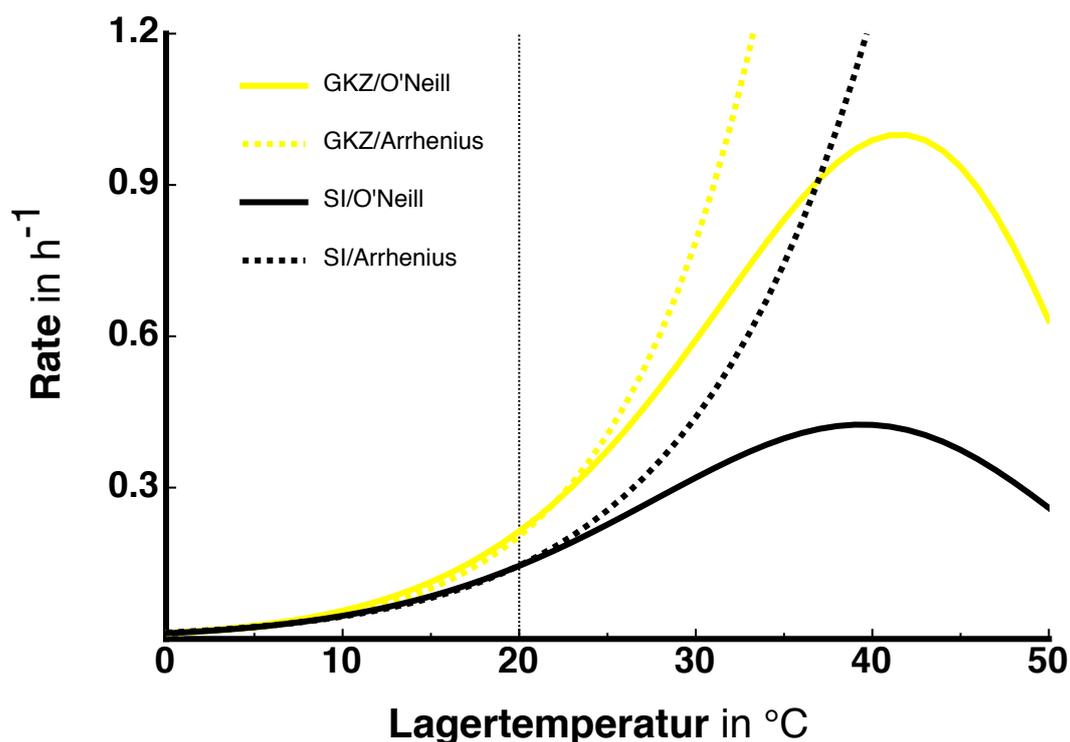


Abbildung 5-14.: Verlauf der mit der O'Neill-Funktion kalibrierten Entwicklungsraten der Frischeparameter (GKZ und SI) des Hackfleischs im Vergleich zum Verlauf der berechneten Raten der Arrhenius-Funktion

Zustandsgröße Haltbarkeitsdauer in Stunden unter statischen Lagerungsbedingungen

Für MAP-Hackfleisch, das unter statischen Temperaturbedingungen gelagert wird, verkürzt sich, wie aus Tabelle 5-22 zu erkennen, die Haltbarkeit umso mehr, je höher die Lagertemperatur ansteigt. Tabelle 5-22 stellt die jeweils aus den unterschiedlichen Temperatur-Response-Funktionen (O'Neill/Arrhenius) geschätzten Haltbarkeitsendzeiten des MAP-Hackfleischs unter Annahme einer Grenze von $\log 6$ dar. Gleichzeitig geht aus der Übersicht auch hervor, dass die geschätzten Zustandsgrößen sich nicht nur aufgrund der beiden verwendeten Modell-Funktionen, sondern auch aufgrund der beiden gewählten Frischeparameter unterscheiden. Auch wenn die Schätzergebnisse prinzipiell von der Tendenz her vergleichbar sind, treten Über- oder Unterschätzungen je nach Frischeparameter-Modellkombination zwischen -34 und + 16 h auf.

In Abb. 5-15 sind die in der Tabelle 5-22 dargestellten Haltbarkeitsendzeiten der unterschiedlichen Frischeparameter-Modell-Kombinationen gegen die Temperatur aufgetragen. Dabei nimmt die Haltbarkeit exponentiell mit der Lagertemperatur ab und

Tabelle 5-22.: Aus den Temperatur-Response-Funktionen geschätzte Haltbarkeitszeiten in Stunden für MAP-Hackfleisch auf Grundlage mikrobiologisch und sensorisch erfaßbarer Haltbarkeitsendpunkte

Temperatur in °C	TRF	HBK in Stunden		
		GKZ	SI	Δ
2	O'Neill	194	180	+14
	Arrhenius	178	172	+6
	Δ_2	+16	+8	
4	O'Neill	128	136	+8
	Arrhenius	141	130	+11
	Δ_4	-13	+6	
7	O'Neill	69	88	-19
	Arrhenius	101	86	+15
	Δ_7	-32	+2	
10	O'Neill	38	58	-20
	Arrhenius	72	59	+13
	Δ_{10}	-34	-1	
15	O'Neill	15	30	-15
	Arrhenius	42	30	+12
	Δ_{15}	-27	0	
20	O'Neill	6	18	-12
	Arrhenius	25	16	+9
	Δ_{20}	-19	+2	

folgt einer abnehmenden e-Funktion erster Ordnung (gestrichelte Linie). Die über das O'Neill-Modell und dem Frischeparameter GKZ ermittelten Haltbarkeitsendzeiten liegen (ausgenommen 2 °C) alle unter den übrigen Haltbarkeitsendzeiten.

Bezüglich der ermittelten Haltbarkeitszeiten besteht zwischen den mikrobiologischen und sensorischen Frischeparametern mit einem Korrelationskoeffizienten von jeweils $r=0,99$ ein signifikant enger Zusammenhang. Abb. 5-16 zeigt die Korrelation zwischen der Gesamtkeimzahl (GKZ) und dem Sensorikindex (SI) bezüglich der berechneten Haltbarkeitszeiten, unterschieden nach verwendeter Temperatur-Response-Funktion.

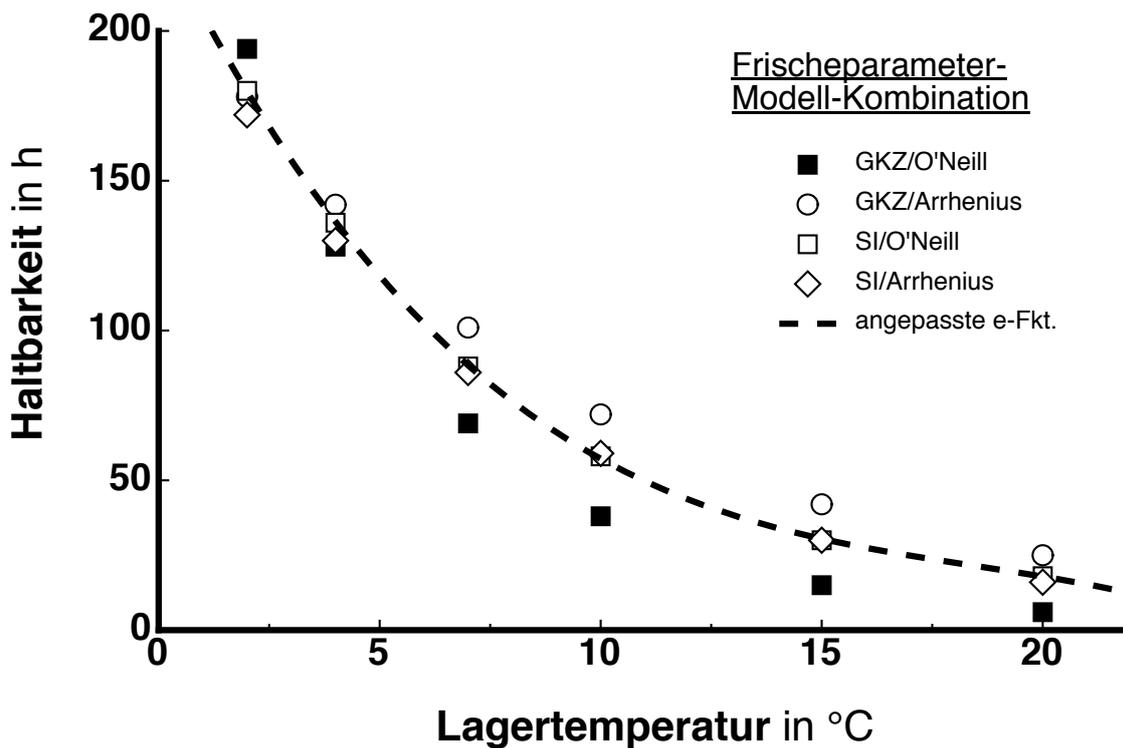


Abbildung 5-15.: Haltbarkeit von MAP-Hackfleisch, unterschieden nach verwendeter Frischeparameter-Modell-Kombination

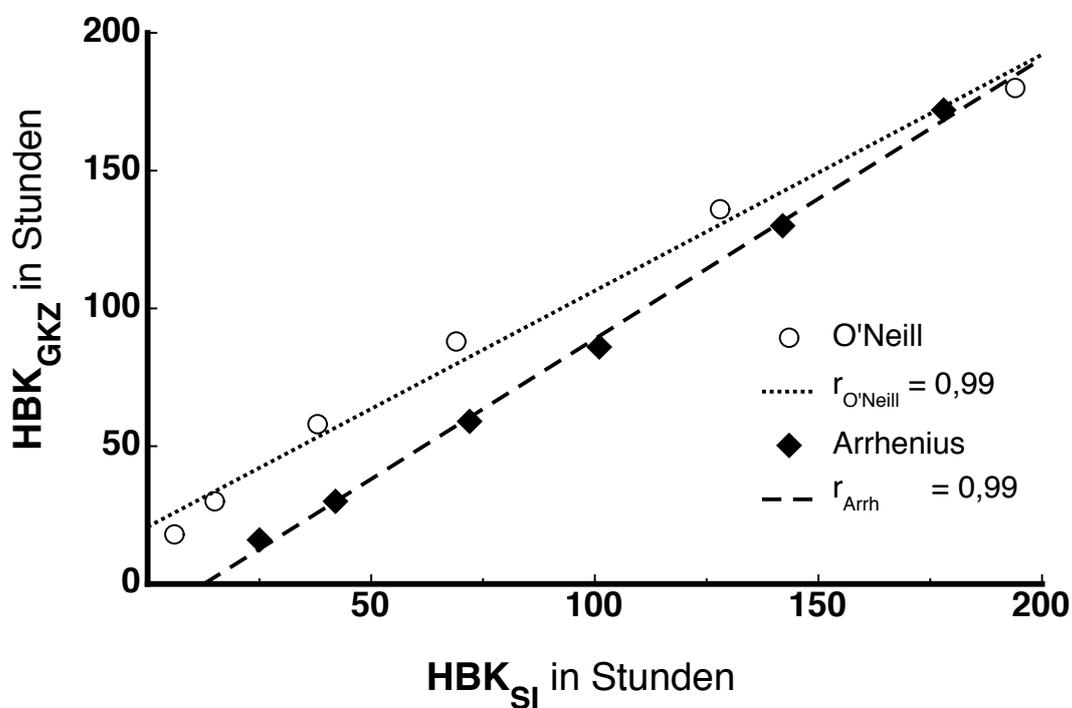


Abbildung 5-16.: Korrelation der prognostizierten Haltbarkeitsendpunkte von GKZ und SI, unterschieden nach verwendeter Temperatur-Response-Funktion

Haltbarkeitsdauer und Biologische Zeit unter wechselnden Lagerungsbedingungen

In Abb. 5.1.2 sind vier zur Charakterisierung der Art der Über- und Unterschätzung typische Verläufe dargestellt. Verglichen werden die vom Modell prognostizierten Entwicklungen der GKZ und der Meßgröße des Sensorikindex mit den empirisch gemessenen Werte am Beispiel der DTL-Szenarien H17 und H18. Die vom Modell geschätzten Verläufe zeigen deutlich, dass jeweils nach den Temperatursprüngen deutliche Anstiege der GKZ sowie des SI zu verzeichnen sind. Im Fall des DTL-Szenarios H18 werden die Veränderung der Frischeparameter nach dem Sprung auf 20 °C im Vergleich zu den tatsächlich gemessenen Werten sowohl vom mikrobiologischen wie auch sensorischen Modell deutlich überschätzt. Der Temperatursprung wird jedoch jeweils gut erfasst.

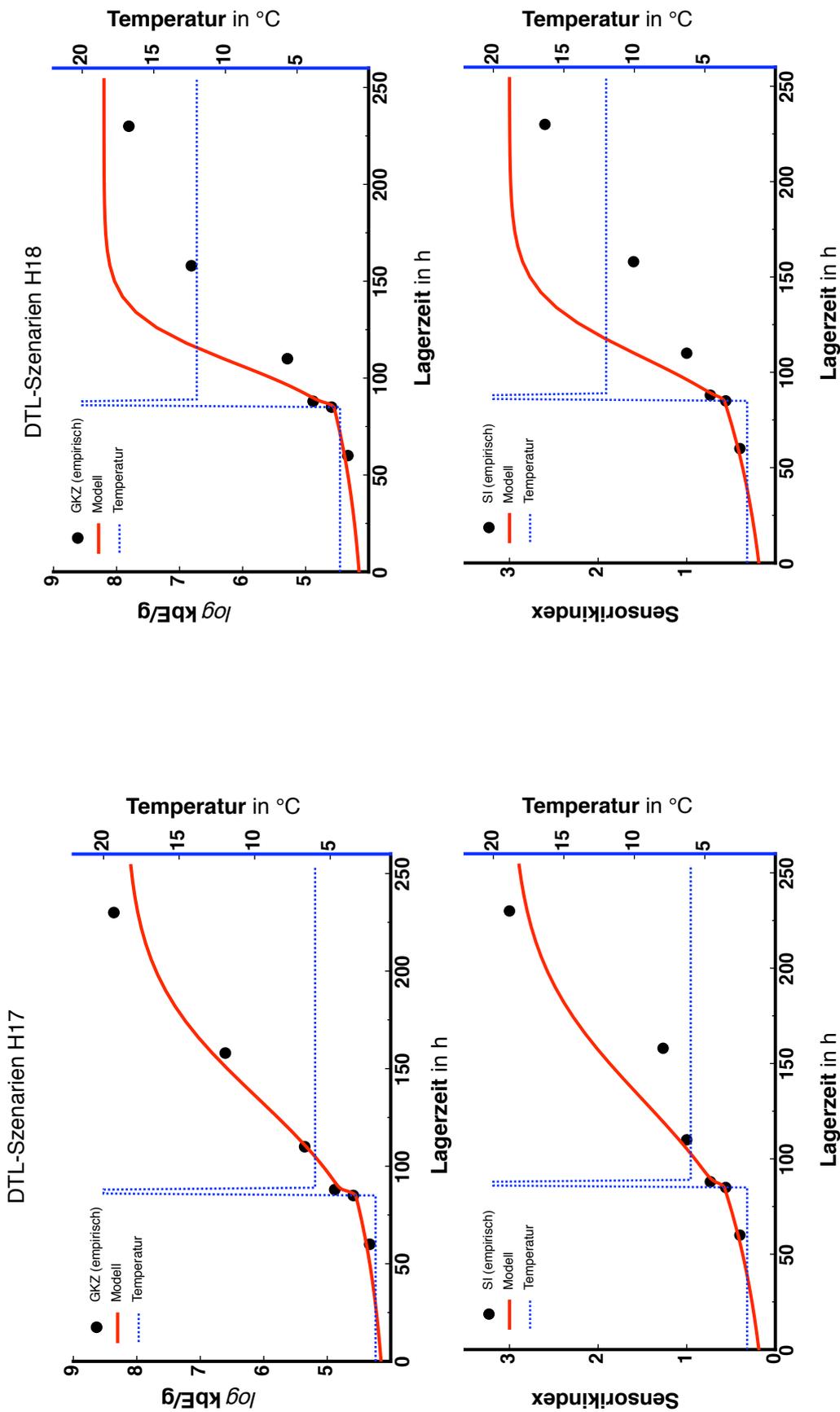


Abbildung 5-17.: Gegenüberstellung empirisch bestimmter und mit Hilfe des O'Neill geschätzter Veränderungen der Frischeparameter (GKZ/SI), in Abhängigkeit von der Lagerdauer, am Beispiel der DTL-Szenarien H17 und H18

Die prognostizierten Haltbarkeitszeiten, in Abhängigkeit von unterschiedlichen Varianten der Kühlkettenunterbrechung bezogen auf die im Kapitel 4-10 und 4-11 definierten DTL-Szenarien, gibt Tabelle 5-23 wieder.

Tabelle 5-23.: Gegenüberstellung der aus dem O'Neill-Modell geschätzten Haltbarkeitsendzeiten in Stunden für MAP-Hackfleisch ermittelt aus den Parametern GKZ und SI für die DTL-Szenarien H1-H18

DTL-Szenario	Frischeparameter		
	GKZ	SI	Δ
H1	90	93	-3
H2	156	154	+2
H3	54	62	-8
H4	52	97	-45
H5	172	165	+7
H6	193	185	+8
H7	130	125	+5
H8	145	140	+5
H9	115	99	+16
H10	93	94	-1
H11	58	60	-2
H12	50	54	-4
H13	134	132	+2
H14	122	122	-
H15	128	127	+1
H16	124	123	+1
H17	108	108	-
H18	134	130	+4

Tabelle 5-24 zeigt abschließend das adjustierte² (Bestimmtheitsmaß) R^2 der Temperatur-Response-Funktionen, unterteilt nach den beiden Frischeparametern GKZ und SI. Die ermittelten Kenngrößen verdeutlichen nochmals die relative Überlegenheit der Schätzwerte aus der O'Neill-Funktion gegenüber dem Arrhenius-Ansatz (0,81/0,62).

Den Grad der Über- oder Unterschätzung der Zustandsgröße Haltbarkeitsdauer unter dynamischen Lagerungsbedingungen läßt sich aus dem Verhältnis zwischen ermittelten Wachstumsraten und Biologischer Zeit ablesen. Abb. 5-18 zeigt die Entwicklung

²berücksichtigt die Anzahl der zu schätzenden Parameter

Tabelle 5-24.: Adjustiertes R^2 der Temperatur-Response-Funktionen unterteilt nach Frischeparametern GKZ und SI

Modell	Frischeparameter	
	GKZ	SI
O'Neill	0,81	0,88
Arrhenius	0,62	0,89

des Frischeparameters GKZ für die 18 im Labormaßstab abgebildeten DTL-Szenarien (H1-H18), aufgetragen gegen die Biologische Zeit Φ .

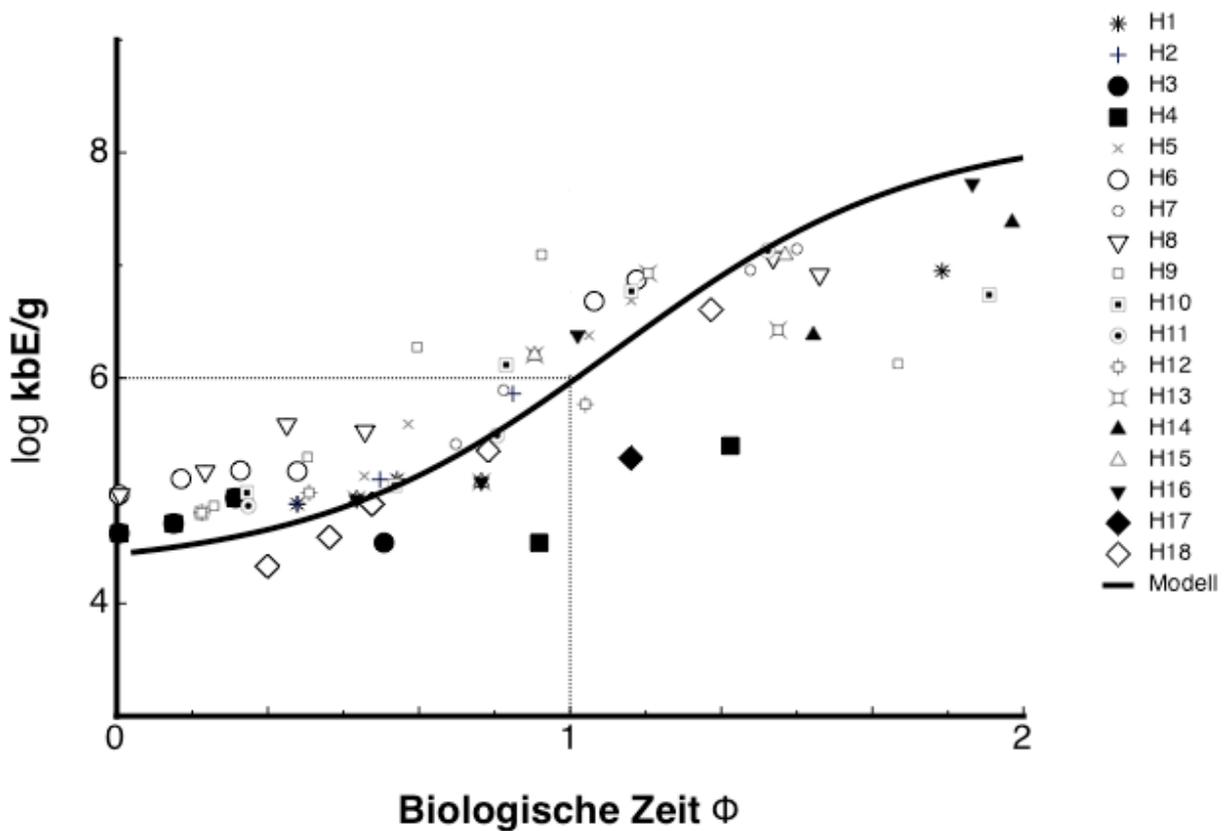


Abbildung 5-18.: Biologische Zeit aufgetragen gegen die Entwicklung der GKZ für die DTL-Szenarien H1-H18 (MAP-Hackfleisch)

Dabei entspricht nach der gewählten Parametrisierung das Haltbarkeitskriterium ($\log 6$) einer Biologischen Zeit Φ von 1 (=100 % Frischeverlust). Aus der Grafik ist weiterhin ersichtlich, dass die DTL-Szenarien mit hohen Temperatursprüngen (H1-H4) deutlich vom Modell abweichen und überschätzt werden.

5.1.3. Ergebnisse von Simulationsläufen auf Basis haushaltstypischer Szenarien

Der folgende Abschnitt beschreibt die Ergebnisse von Simulationsläufen auf Grundlage jener Anpassungsparameter, die aus den Messreihen zur Ermittlung des Qualitätsverlusts von Hackfleisch anhand des Frischeparameters GKZ geschätzt wurden. Um in den definierten Szenarien das Ende der Haltbarkeit bzw. den Frischeverlust für Hackfleisch zu prognostizieren, wird die Frischeparameter-Modell-Kombination O'Neill/GKZ gewählt. Aus der Fülle von möglichen Kühlkettenunterbrechungen sollen hier, anhand einiger Beispiele, die Konsequenzen von unterschiedlichem Einkaufs- und Lagerungsverhalten verschiedener Verbrauchertypen visualisiert werden. Die Zusammenstellung der Szenarien orientiert sich dabei an den in Kapitel 4.1.2 dargestellten Charakterisierungsmerkmalen definierter Verbrauchertypen sowie der definierten Verpackungsvarianten.

In den folgenden Abb. werden exemplarisch die Ergebnisse der in Tabelle 5-25 aufgeführten Simulationsläufe graphisch wiedergegeben. Dabei werden in einzelnen Abb. die Ergebnisse von zwei oder mehr Simulationsläufen vergleichend dargestellt. Ist die Ausgangssituation festgesetzt, verdeutlichen die Simulationsläufe, wie sich bereits die Veränderung eines einzigen Parameters auf das Gesamtsystem auswirkt.

Die produktspezifische und prozeßspezifische Variation der jeweiligen Simulationsszenarien sind aus Tabelle 5-25 ersichtlich.

Tabelle 5-25.: Zuordnung produktspezifischer und prozessspezifischer Kriterien bei der Variation von Simulationsläufen zu Konsumententypen

	produktspezifischer		Szenario Variation				prozessspezifischer		Konsumententyp
	N_{min}	PV	ϑ_D	λ_D	ϑ_T	λ_T	ϑ_L		
DTL-Simulationslauf									
Ia	log 4,3	D	$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	12 h	2°C (IK)	-	2°C (IK)	ideale Kühlkette	
Ib	log 4,3	A	$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	60 h	20°C (WB 3)	3 h	6°C (WB 7)	inkonsequent	
Ic	log 4,3	A	$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	120 h	20°C (WB 3)	3 h	6°C (WB 7)	sorglos	
IIa	log 4,3		$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	75 h	30°C (WB 4)	3 h	2°C (IK)	konsequent	
IIb	log 4,3	A	$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	75 h	30°C (WB 4)	3 h	6°C (WB 7)	inkonsequent	
IIc	log 4,3	B	$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	75 h	30°C (WB 4)	3 h	6°C (WB 7)	sorglos	
IIIa	log 5	D	$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	12 h	50°C (WB 5)	2 h	2°C (IK)	konsequent	
IIIb	log 4,3	A	$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	12 h	50°C (WB 5)	2 h	6°C (WB 7)	inkonsequent	
IIIc	log 5	D	$\leq 2^\circ\text{C (IK)}$	12 h	50°C (WB 5)	2 h	12°C (WB 8)	sorglos	
IVa	log 5	A	4°C (WB1)	12 h	2°C (IK)	-	4°C (WB 6)	konsequent	
IVb	log 4,3	D	4°C (WB1)	12 h	20°C (WB4)	3 h	6°C (WB 7)	inkonsequent	
IVc = worst-case	log 5	B	7°C (WB2)	12 h	30°C (WB 4)	1 h	12°C (WB 8)	sorglos	
PV = Produktvariante; λ =Verweildauer; ϑ = Temperatur; N_{min} = Anfangskeimgehalt									

Simulationsläufe Ia-Ic:

DTL-Simulationslauf Ia (ideale Kühlkette): Vorgeschriebene Temperatur von 2 °C wird in der gesamten Kühlkette eingehalten

DTL-Simulationslauf Ib (inkonsequenter Konsument): Schlecht informiert über MHD/Verbrauchsdatum und trifft unreflektierte Kaufentscheidung (noch 4 Tage haltbar $\rightarrow \lambda_D = 60 h$). Achtet nicht auf Schutzmaßnahmen vor Wärmeeinflüssen beim Transport (20 °C) und lagert in nicht regulierbarem Kühlgerät bei 6 °C

DTL-Simulationslauf Ic (sorgloser Konsument): Nicht informiert über MHD/Verbrauchsdatum und kauft Produkt kurz vor Ablauf des MHD $\rightarrow \lambda_D = 120 h$. Achtet weiterhin nicht auf Schutzmaßnahmen vor Wärmeeinflüssen beim Transport (20 °C) und lagert in nicht regulierbarem Kühlgerät bei 6 °C

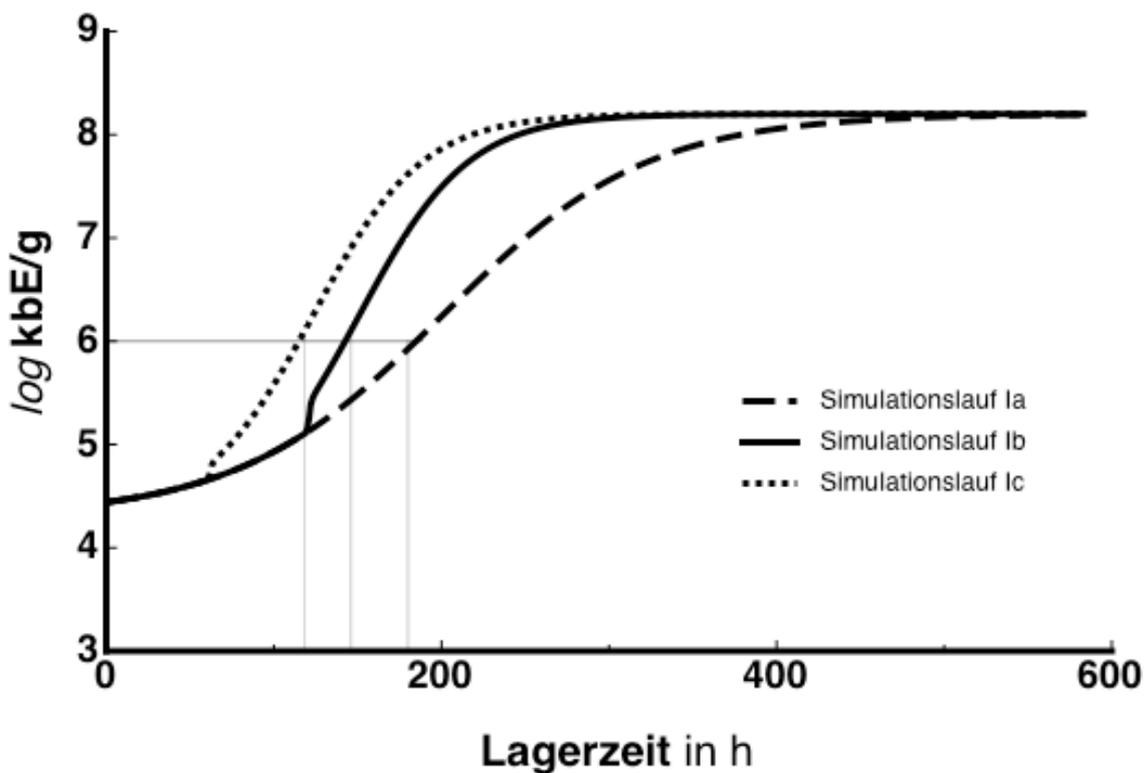


Abbildung 5-19.: Verläufe der Simulationsszenarien Ia-Ic

Aus den Simulationsläufen ist deutlich zu erkennen, dass der jeweilige Einkaufszeitpunkt und die damit verbundene Temperaturunterbrechung durch Entnahme aus dem Kühlfach im Handel und Heimtransport Auswirkungen auf den Frischeverlauf hat. Die Ausgabe-Größen des Modells zeigen den Effekt einer Kühlkettenunterbrechung

bei Hackfleisch, das erst 60 h im Handel bei 2 °C kühl lagert, schwächer ausgeprägt ist, als eine Unterbrechung zu einem späteren Zeitpunkt, wenn es dort bereits 5 Tage in der Kühltheke liegt. Es gilt: Je später eine Temperaturunterbrechung, desto stärker der Anstieg des Frischeverlust. Im Fall des Verlaufs der Simulationsdaten für das Szenario Ic (sorgloser Konsument) wird deutlich, dass das Haltbarkeitsende vor dem Einkauf zwar noch nicht erreicht war, doch trotz gleicher Temperatureinflüsse und gleicher Transportzeit wie in den beiden anderen Fällen steigt die Kurve für die GKZ steiler an und erreicht somit in wenigen Stunden bereits den eingezeichneten Wert. In beiden dargestellten Fällen wird ersichtlich, dass sich die Haltbarkeit des eingekauften MAP-Hackfleischs gegenüber der Lagerung bei idealen Temperaturen (IK) deutlich verkürzt.

Simulationsläufe Iia-IIc:

Bei den in Abb. 5-20 dargestellten Fällen handelt es sich um Szenarien, bei denen unterschiedliche Transport und Lagerbedingungen (Variation ω) im haushaltsnahen Bereich herrschen.

DTL-Simulationslauf Iia (konsequenter Konsument): Achtet auf Schutzmassnahmen (Kühltasche) während des Einkaufs sowie des Transports (30 °C) und lagert in produktspezifischen Kühlzonen bei 2 °C

DTL-Simulationslauf Iib (inkonsequenter Konsument): Kauft MAP-Hackfleisch und achtet unzureichend auf Schutzmassnahmen vor Wärmeeinflüssen beim Einkauf und Transport (30 °C) und lagert in einer falschen Kühlzone bei 6 °C

DTL-Simulationslauf Iic (sorgloser Konsument): Kauft foliengeschütztes Hackfleisch und achtet nicht auf Schutzmassnahmen vor Wärmeeinflüssen beim Einkauf und Transport (30 °C). Lagert bei stark erhöhten Temperaturen von 12 °C im HH-Kühlschrank

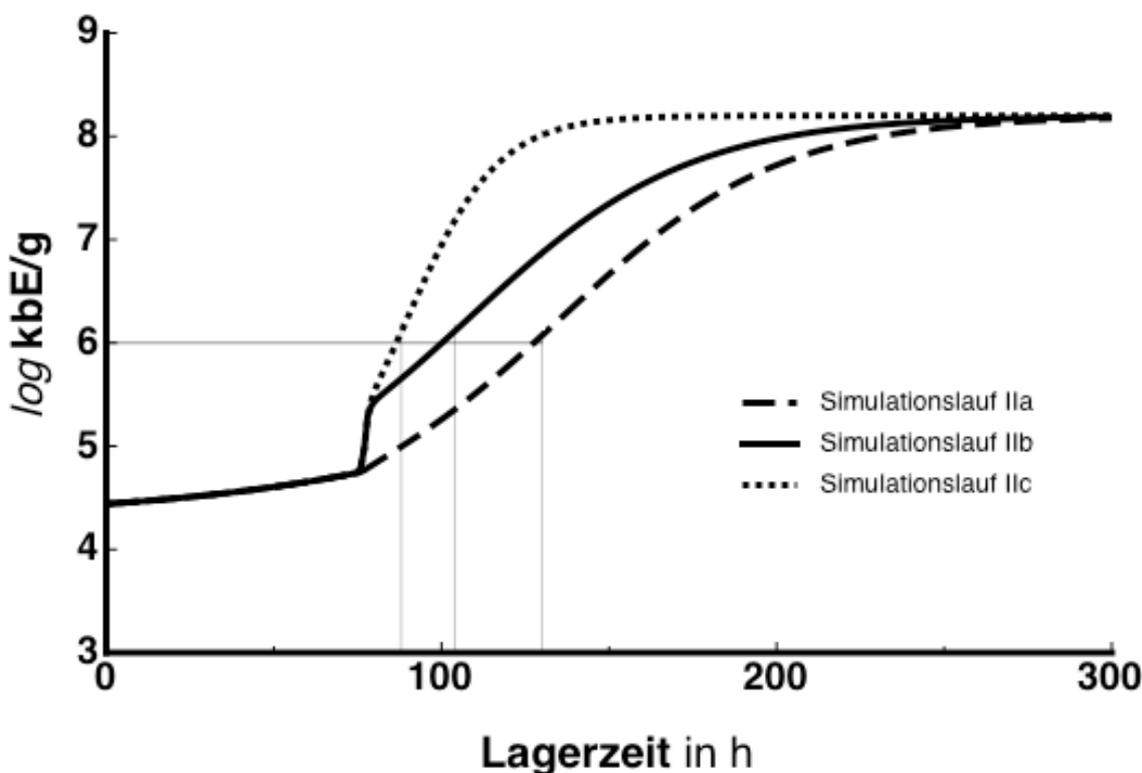


Abbildung 5-20.: Verläufe der Simulationsszenarien Iia-IIc

In Bezug auf die unterschiedlichen Verpackungsvarianten (MAP/foliengeschütztes Hackfleisch/Kühltasche) sind keine signifikanten Unterschiede in Hinblick auf die si-

mulierten Haltbarkeitsendzeiten festzumachen. Aus der Darstellung der drei Simulationsläufe kann jedoch demonstriert werden, dass die Benutzung einer Kühltasche (konsequenter Konsument) gegenüber einem ungeschützten Transport (inkonsequente Konsument) und einer Lagerung im Haushalt bei erhöhten Kühlschranktemperaturen (6 °C) einen Haltbarkeitsunterschied von ca. 70 h ausmacht.

Tabelle 5-26 stellt abschließend das jeweils aus den Simulationsläufen Ia-IVc geschätzte Ende der Haltbarkeit in Stunden dar. Außerdem ist die Biologische Zeit Φ in % angegeben. Erreicht Φ den Wert 1 (= 100 % Frischeverlust), so gilt das Produkt als Verdorben. $\Delta \Phi$ gibt somit die Restfrische in % an. Des Weiteren sind die simulierten, maximalen Produkttemperaturen (ϑ_{LM}) in den jeweiligen Prozessschritten (Distribution, Transport und Lagerung) angegeben.

Tabelle 5-26.: Geschätzte Haltbarkeitsendzeiten, Produkttemperaturen und Frische der DTL-Simulationsläufe Ia-IVc

Simulationslauf	D		T		L		HBK in h
	Φ_D	ϑ_{LM}	Φ_T	ϑ_{LM}	$\Delta \Phi$	ϑ_{LM}	
Ia (ideale Kühlkette)	-	-	-	-	-	-	168 h
Ib	32	2	44	18,4	56	6	118
Ic	62	2	72	18,4	28	6	146
IIa	40	2	44	9,2	56	6	130
IIb	40	2	70	27,5	30	6	104
IIc	40	2	76	27,5	24	6	88
IIIa	8	2	9	6,5	91	2	144
IIIb	8	2	23	28,4	77	6	87
IIIc	8	2	9	6,5	91	12	50
IVa	9	4	11	2	89	2	113
IVb	9	4	13	8,2	87	6	98
IVc	18	7	67	28,9	33	12	23

Die detaillierten Verläufe der DTL-Simulationsläufe IIIa-IVc sind dem Anhang (Kapitel A) zu entnehmen.

5.2. Ergebnisse Lachsforellen

5.2.1. Veränderung der Parameter in den Zeitreihenmessungen

Die aus den unterschiedlichen Methoden zur Frischebestimmung gewonnenen Messwerte zeigen analog der Kurvenverläufe des Frischeverlusts von Hackfleisch einen logistischen Charakter. Jedoch blieben die Werte der sensorisch erfassten Qualität anfangs nicht auf einem konstanten Niveau. Der Qualitätsverlust beginnt hier bereits unmittelbar nach der ersten Messung und steigt unterschiedlich steil auf einen Maximalwert (24) an. Eine ausgeprägte Anpassungs-Phase ist nicht zu erkennen. Abb. 5-21 zeigt die zeitliche Entwicklung der mit der Qualitätsindex-Methode bestimmten Indices exemplarisch für die Zeitreihenmessung bei 7 °C.

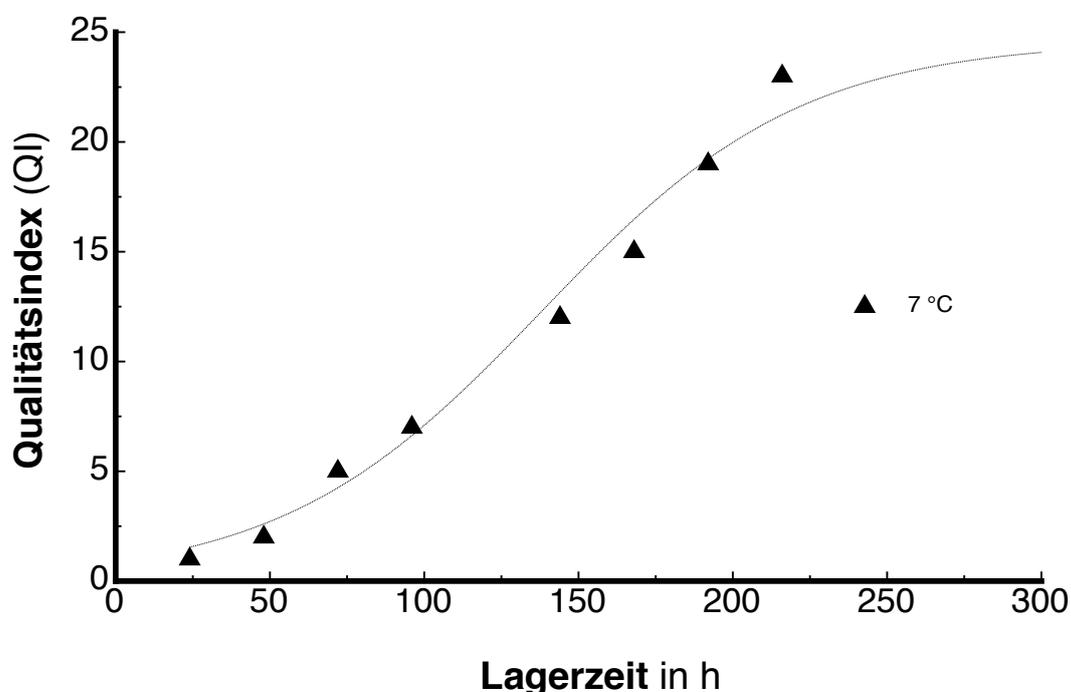


Abbildung 5-21.: Zeitliche Entwicklung des Qualitätsindex von Lachsforellen der statischen Messreihen bei 7 °C

Abb. 5-22 vergleicht beispielhaft die Entwicklung des Sensorikindex und des Qualitätsindex während der Lagerung von Lachsforellen bei einer Temperatur von 12 °C.

Die aus den beiden sensorischen Bewertungsmethoden gewonnenen Messwerte zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. So liegt der sensorisch erfasste Haltbarkeitsendpunkt bei 12 °C sowohl nach der Sensorik- wie auch nach der Qualitätsindexmethode bei etwa

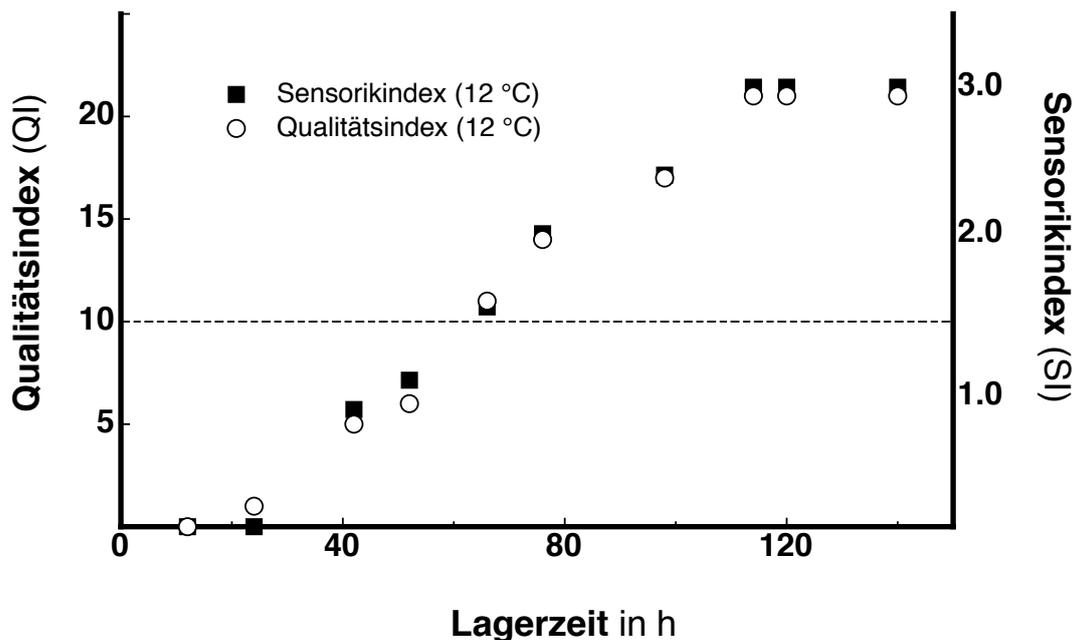


Abbildung 5-22.: Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Sensorikindex (SI) und des Qualitätsindex (QI) von Lachsforellen bei einer Lagertemperatur von 12 °C

65 h. Auch bei den übrigen statischen Messreihen konnte dieser enge Zusammenhang beobachtet werden. Deshalb wird im Folgenden auf eine weitere Darstellung beider Methoden verzichtet und lediglich die Qualitätsindexmethode in Verbindung mit der Schätzung des jeweiligen Endes der Haltbarkeit von Lachsforellen betrachtet.

Für die Beschreibung der Entwicklung des Qualitätsindex (QI) über die Zeit wurden analog den Hackfleischuntersuchungen- die Wachstumsfunktionen 2.2 und 2.3 herangezogen und die Werte für alle Temperaturstufen einzeln angepasst. Tabelle 5-27 fasst die durch die beiden unterschiedlichen Wachstumsfunktionen ermittelten Wachstumsraten, das Bestimmtheitsmass (R^2) und die Standardabweichung (s) zusammen und vergleicht diese.

In Abb. 5-23 sind die jeweils aus den Wachstumsfunktionen geschätzten Wachstumsraten gegen die Temperatur aufgetragen. Für den Temperaturbereich zwischen 2 °C und 12 °C werden nahezu identische Raten geschätzt. Die maximale Wachstumsrate der 20 °C Messreihe wird jedoch von beiden Funktionen unterschiedlich geschätzt.

Tabelle 5-27.: Übersicht über die geschätzten Wachstumsraten des Qualitätsindex von Lachsforellen ermittelt mit Gleichung 2.2 und 2.3

Temperatur in °C	Gleichung 2.3			Gleichung 2.2		
	Rate h^{-1}	s	R^2	Rate h^{-1}	s	R^2
2	0,0145	0,0005	0,96	0,0144	0,0006	0,95
4	0,0151	0,0011	0,99	0,0162	0,0004	0,98
7	0,0245	0,0023	0,98	0,0229	0,0007	0,97
12	0,0465	0,0044	0,98	0,0434	0,0012	0,98
20	0,1321	0,0178	0,98	0,0782	0,0063	0,85

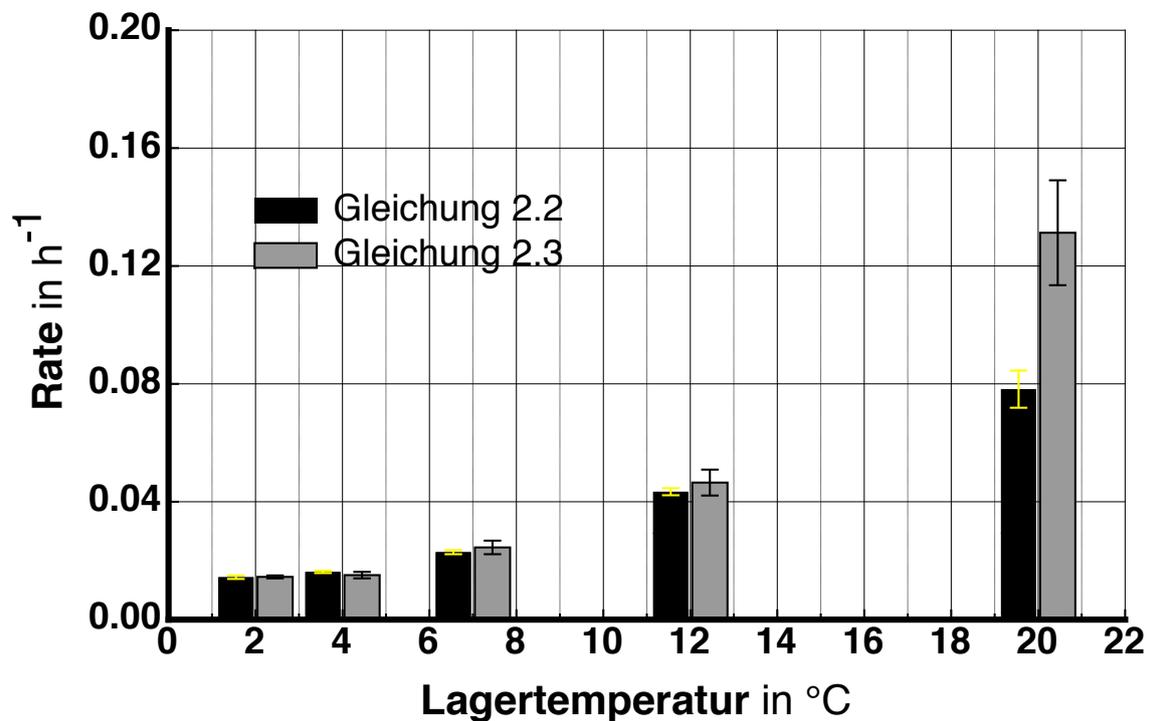


Abbildung 5-23.: Gegenüberstellung der Wachstumsraten in Abhängigkeit von der Temperatur unterschieden nach verwendeter Wachstumsfunktion

Einfluss wechselnder Lagerungsbedingungen auf die Frischeparameter

Wie sich die Frischeparameter nach Temperatursprüngen entwickeln zeigen exemplarisch für die DTL-Szenarien F7 und F5 Abb. 5-24 und 5-25.

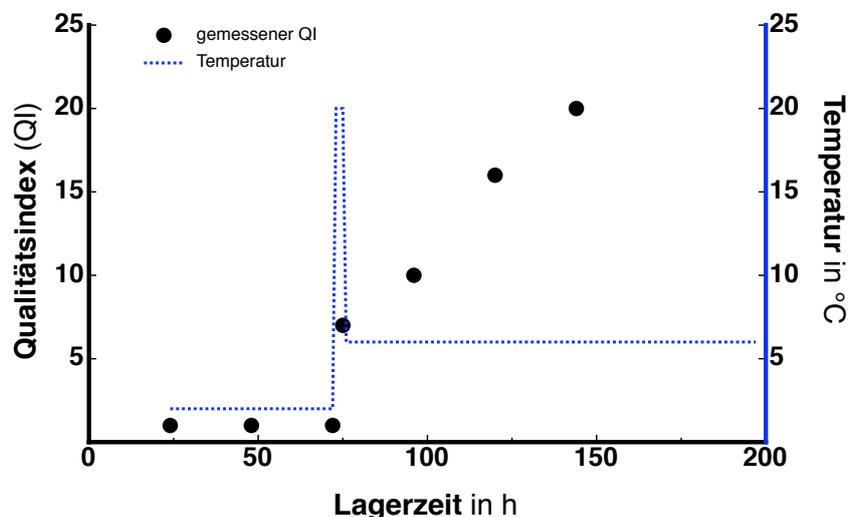


Abbildung 5-24.: Verlauf des Frischeparameters QI nach Temperatursprung auf 20 °C am Beispiel des DTL-Szenarios F5

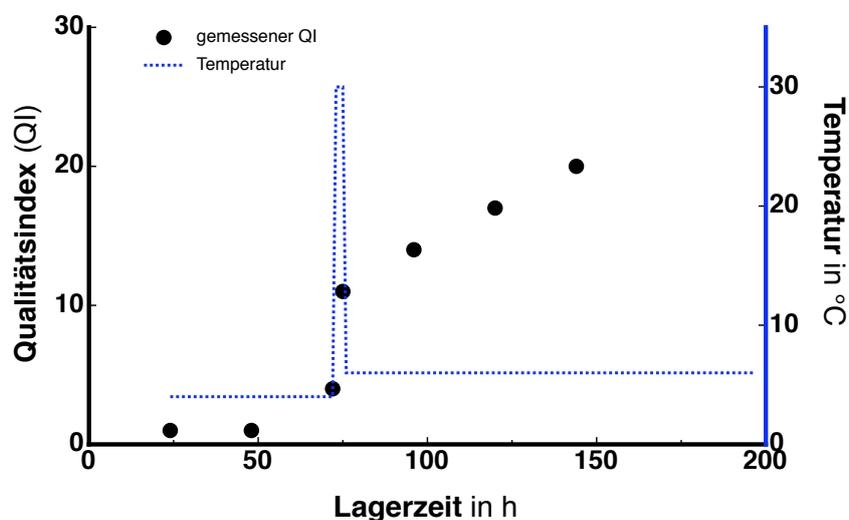


Abbildung 5-25.: Verlauf des Frischeparameters QI nach Temperatursprung auf 30 °C am Beispiel des DTL-Szenarios F7

Die Abb. zeigen deutlich die Auswirkungen von Kühlkettenunterbrechungen auf die Produktfrische. So steigt der Index beim DTL-Szenario F7 nach einer Transportphase bei 30 °C von 4 um 7 Einheiten auf 11 an. Das Produkt gilt somit nach dem Zwischentransport als Verdorben.

Einfluss wechselnder Lagerungsbedingungen auf die Zustandsgröße Produkttemperatur

Die produktspezifische Wärmeübergangsgeschwindigkeit für die foliengeschützten Lachsforellen wurde ebenfalls mit Hilfe des Newtonsch'schen Abkühlungsgesetzes (Gleichung 2.15) abgeleitet. Abb. 5-26 zeigt die gemessene und geschätzte und empirisch ermittelte Produkttemperatur der Lachsforellen (im Kern) beispielhaft am DTL-Szenario F3.

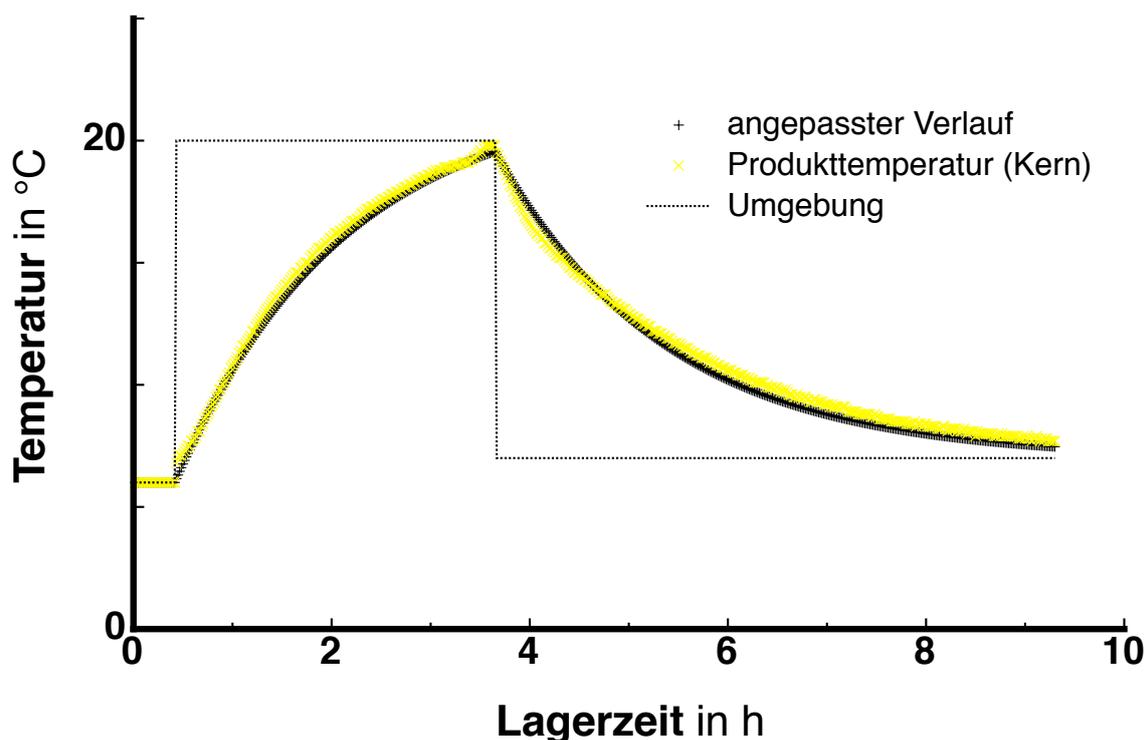


Abbildung 5-26.: Verlauf der gemessenen Produkttemperatur und Anpassung der Exponentialfunktion am Beispiel des DTL-Szenarios F3

Nach Anpassung der Exponentialfunktion an die einzelnen DTL-Szenarien konnte als produktspezifische Wärmeübergangsgeschwindigkeit (ω) für die foliengeschützten Lachsforellen das ω mit $0,58h^{-1}$ ($\pm 0,08$) ermittelt werden. Abb. 5-27 zeigt zusätzlich die Anpassungen an die Temperaturverläufe des DTL-Szenarios F5.

5.2.2. Anpassung produktspezifischer Zustandsgrößen an statische und dynamische Temperaturverläufe

Einfluss der Temperatur auf den Frischeverlust

Der Einfluss der Temperatur auf die Wachstumsraten des Frischeparameters Qualitätsindex (QI) wird analog der Vorgehensweise beim Hackfleisch mit Hilfe des O'Neill- und

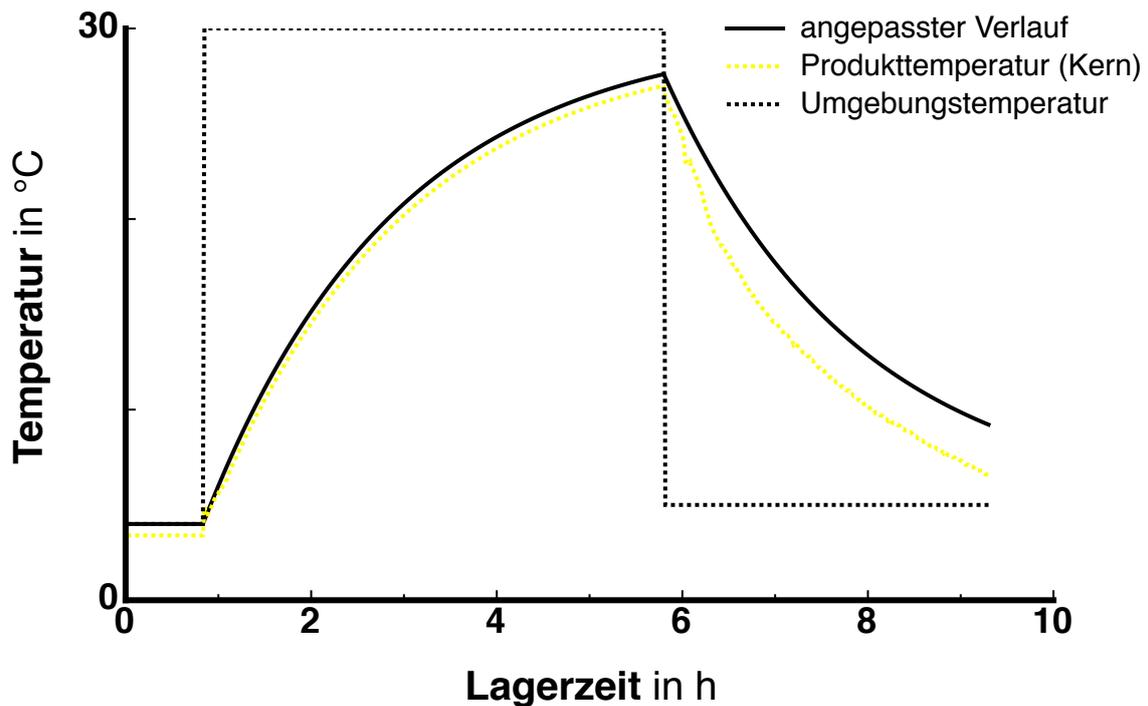


Abbildung 5-27.: Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der mit dem Abkühlungsgesetz berechneten und gemessenen Produkttemperaturen der Lachsforellen im DTL-Szenario F5

des Arrhenius-Modells beschrieben. Die Temperaturabhängigkeit des Qualitätsindex lässt sich auf Grundlage der jeweils geschätzten Raten für beide Anpassungsfunktionen sehr gut mit dem Arrhenius-Ansatz beschreiben. Das Bestimmtheitsmass der Regressionsgeraden beträgt jeweils $R^2 = 0,99$. Die Aktivierungsenergie berechnet sich aus dem Arrhenius-Plot zu $85,29 \text{ kJ/mol}$ ($20,37 \text{ kcal/mol}$) unter Berücksichtigung einer Anpassungs-Phase (Gleichung 2.3) und $65,84 \text{ kJ/mol}$ ($15,72 \text{ kcal/mol}$) unter Vernachlässigung einer Anpassungs-Phase (Gleichung 2.2).

Tabelle 5-28 zeigt zusammengefasst die kinetischen Daten (Arrheniusparameter)³ der Frischeparameter für die Lachsforellen.

Tabelle 5-28.: Kinetische Daten (Arrheniusparameter) für Lachsforellen

Frischeparameter	Kinetische Daten	
	$E_a \text{ (kcal} \cdot \text{mol}^{-1})$	R^2
QI mit Gleichung 2.3	20,37	0,99
QI mit Gleichung 2.2	15,72	0,99

³ R^2 bezieht sich auf Regressionsgerade

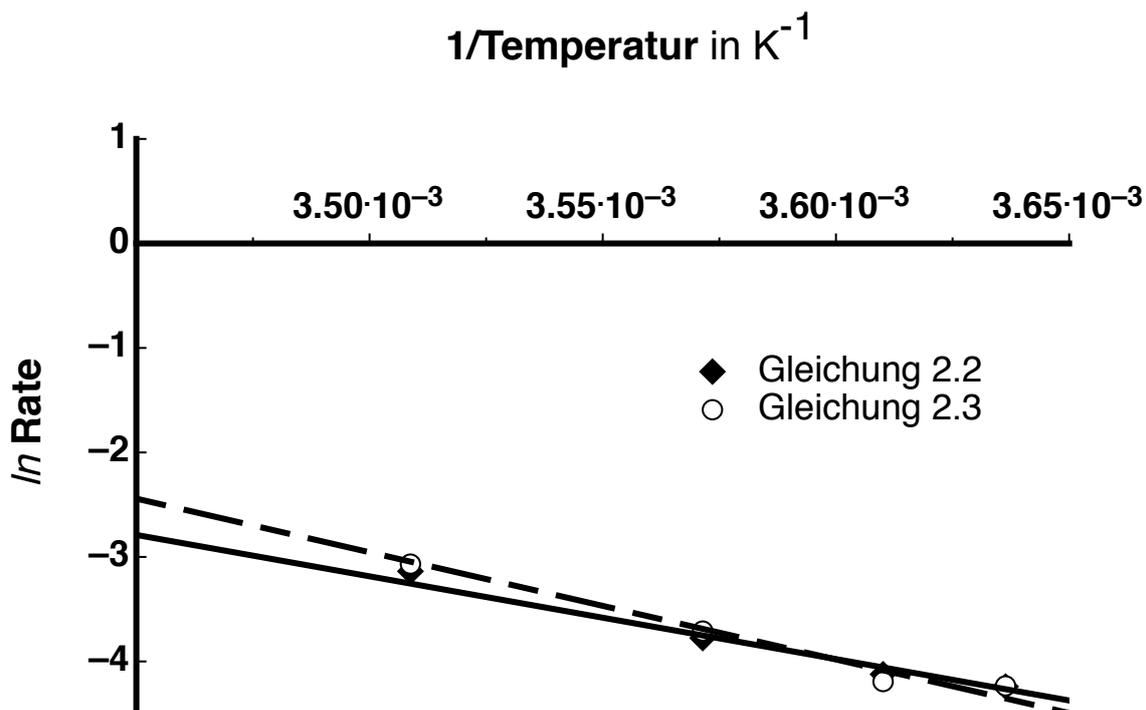


Abbildung 5-28.: Arrhenius Plots der Wachstumsraten des QI von Lachsforellen unterschieden nach angewandeter Wachstumsfunktion

Analog der Vorgehensweise beim MAP-Hackfleisch wurde die Entwicklung der Qualitätsindices über die Zeit simultan angepasst. Grundlage waren alle statischen (2-20 °C) und dynamischen Messreihen (F1-F8) (Abb. 5-29).

Abb. 5-30 zeigt die mit Hilfe des O'Neill-Modells geschätzten Entwicklungsraten für den Temperaturbereich zwischen 2 und 50 °C für den Frischeparameter QI im Vergleich zum Arrhenius-Modell. In der Temperaturspanne zwischen 2 und 20 °C zeigen beide Modelle ähnlich dem MAP-Hackfleisch nahezu identische Verläufe. Der Verlauf der mit dem Arrhenius-Modell geschätzten Wachstumsraten zeigt bei höheren Transporttemperaturen (≥ 30 °C) einen steileren Anstieg als die Schätzwerte auf der Grundlage des O'Neill-Modells.

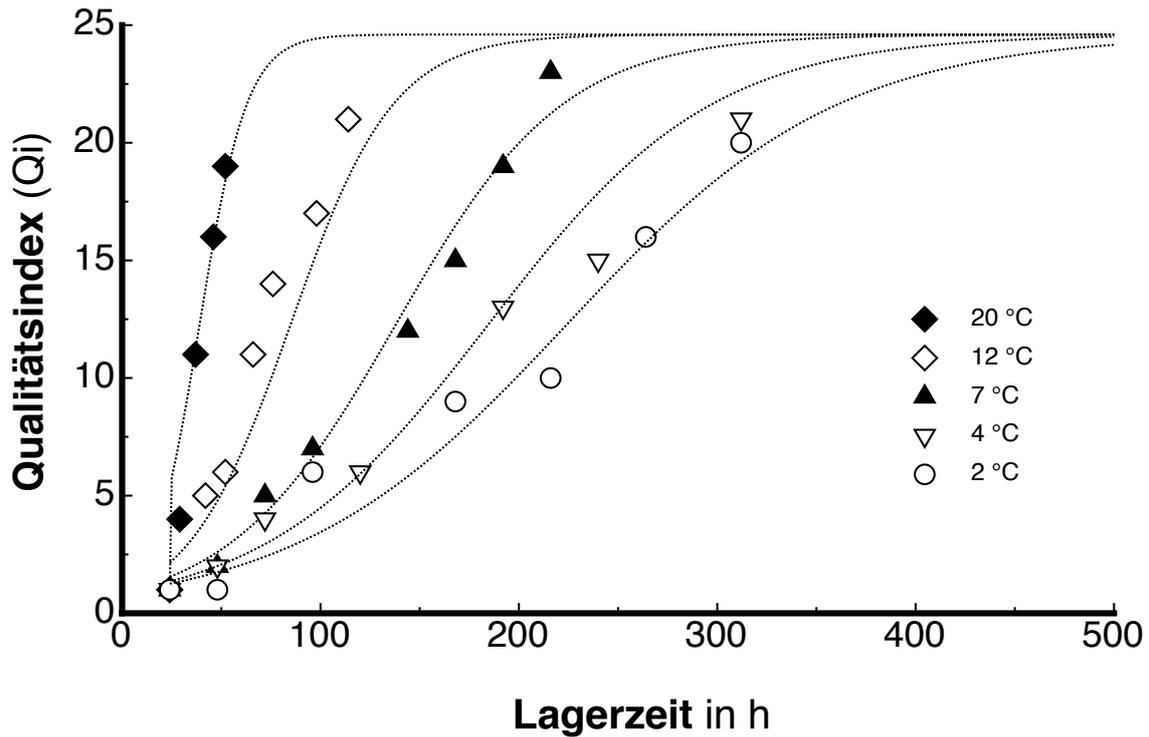


Abbildung 5-29.: Simultane Anpassung der zeitliche Entwicklung des Qualitätsindex von Lachsforellen der statischen Messreihen (2-20 °C)

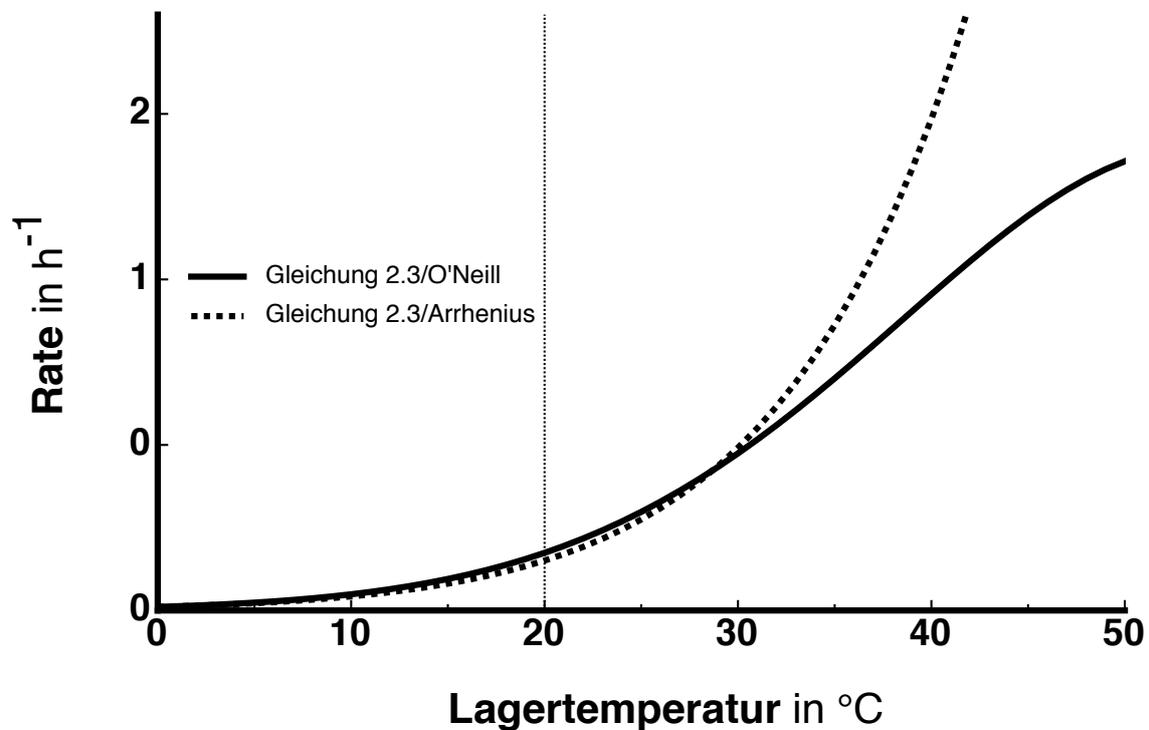


Abbildung 5-30.: Mit der O'Neill-Funktion kalibrierte Entwicklungsraten des Frischeparameters Qi der Lachsforellen und Vergleich mit Arrhenius-Modell

Tabelle 5-29 fasst die kinetischen Daten (O'Neill-Parameter) unterschieden nach verwendeter Wachstumsfunktion für die Lachsforellen zusammen.

Tabelle 5-29.: Anpassungsparameter (O'Neill-Parameter) für Lachsforellen

Kinetische Daten	Gleichung 2.3	Gleichung 2.2
Q_{10}	1,79	1,70
T_{max} (°C)	182,43	101,35
T_{opt} (°C)	53,87	56,56
k	1	1

Tabelle 5-30 zeigt abschließend das adjustierte R^2 der Temperatur-Response-Funktionen.

Tabelle 5-30.: Adjustierte R^2 der Temperatur-Response-Funktionen unterschieden nach angewandeter Wachstumsfunktion (mit und ohne Berücksichtigung einer Anpassungs-Phase

TRF	Gleichung 2.3	Gleichung 2.2
O'Neill	0,93	0,84
Arrhenius	0,91	0,92

Zustandsgröße Haltbarkeitsdauer in Stunden unter statischen Lagerungsbedingungen

Tabelle 5-31 zeigt die jeweils aus den unterschiedlichen Temperatur-Response-Funktionen (O'Neill/Arrhenius) geschätzten Haltbarkeitsendzeiten der Lachsforellen unter statischen Lagertemperaturen. Dabei geht aus der Übersicht hervor, dass die geschätzten Zustandsgrößen prinzipiell von der Tendenz her vergleichbar sind. Je nach verwendeter Response-Funktion treten Über- oder Unterschätzungen zwischen -13 und + 4 h auf.

Tabelle 5-31.: Aus den Temperatur-Response-Funktionen geschätzte Haltbarkeitszeiten in Stunden für Lachsforellen auf Grundlage sensorisch (QI) erfassbarer Haltbarkeitsendpunkte. Angepasst mit Gleichung 2.3

Temperatur in °C	HBK in Stunden		
	O'Neill	Arrhenius	Δ
2	194	207	-13
4	142	148	-6
7	90	91	-1
12	44	41	+3
20	16	12	+4

In Abb. 5-31 sind die in der Tabelle 5-31 dargestellten Haltbarkeitsendzeiten gegen die Temperatur aufgetragen. Dabei nimmt die Lagerdauer analog den Ergebnissen des Hackfleischs exponentiell mit der Lagerzeit ab. Vergleichend sind die ermittelten Haltbarkeitszeiten für die unterschiedlichen Frischeparameter-Modell-Kombinationen dargestellt.

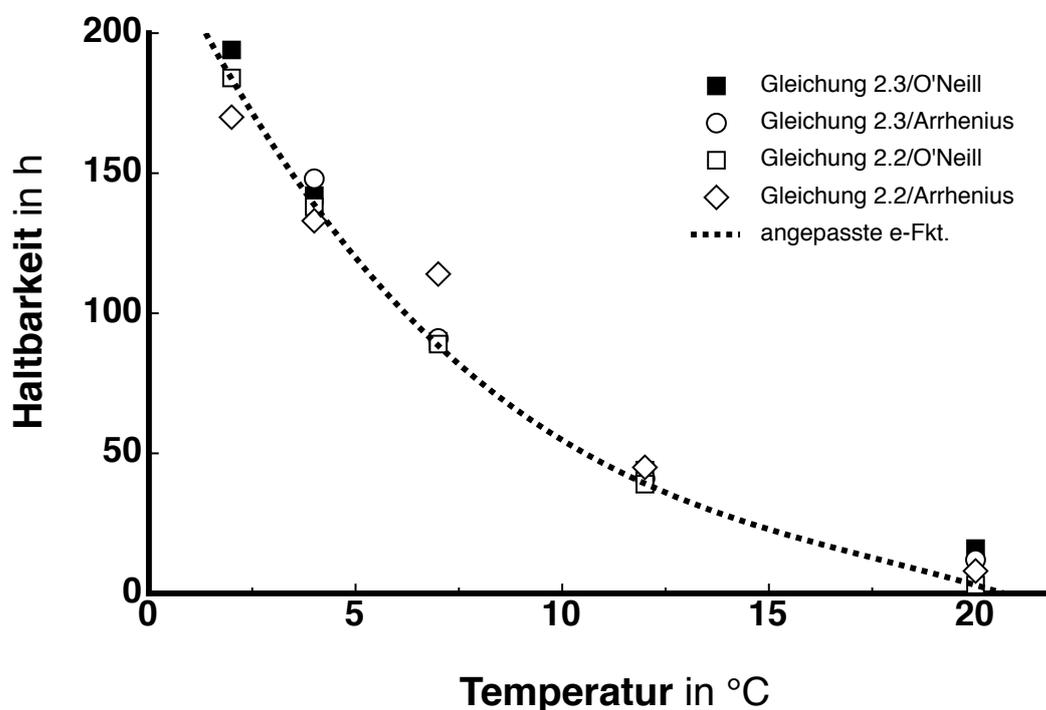


Abbildung 5-31.: Berechnete Haltbarkeitsendzeiten der unterschiedlichen Modellkombinationen (Lachsforellen)

Zustandsgröße Haltbarkeitsdauer und Biologischer Zeit unter dyn. Lagerungsbedingungen

Stellvertretend für alle überprüften Frischeparameter-Modell-Kombinationen wird nachfolgend die Veränderung der Haltbarkeit für die 8 DTL-Szenarien (s. Kapitel 4.1.2) grafisch dargestellt. Dafür werden die gemessenen Qualitätsindices der einzelnen DTL-Szenarien gegen die Biologische Zeit Φ aufgetragen. Bei einer Biologischen Zeit von 1 (=100 % Frischeverlust) gilt der Fisch als verdorben.

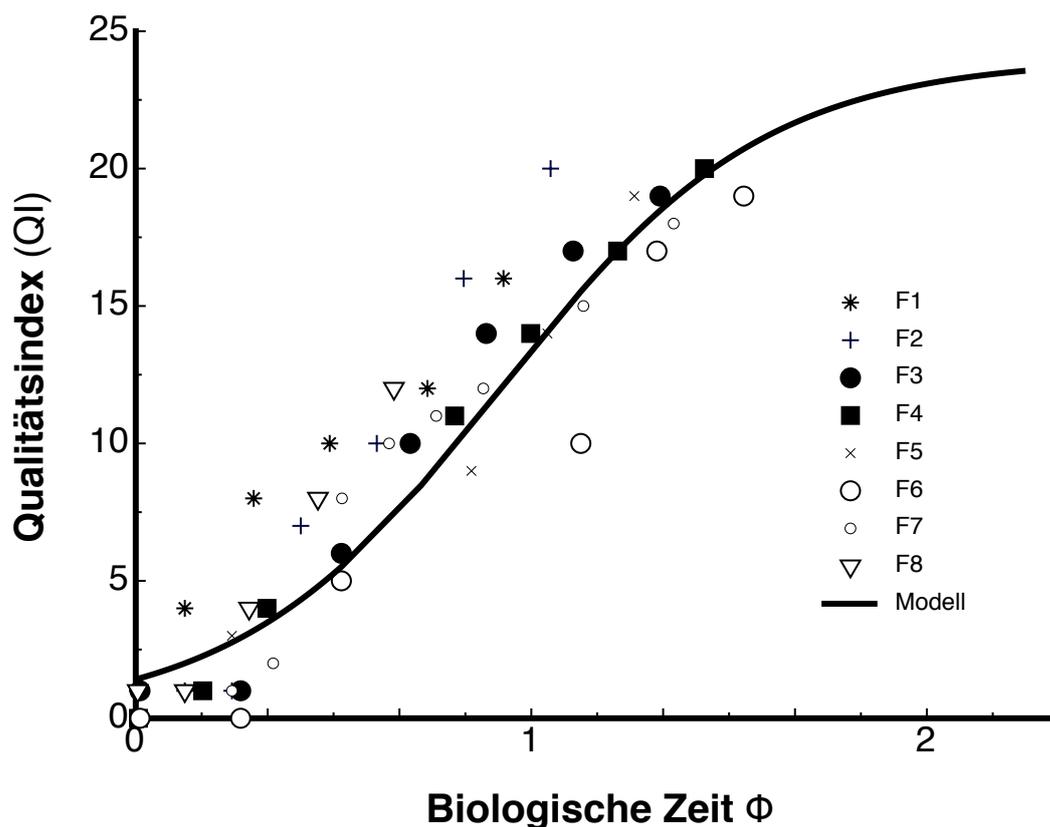


Abbildung 5-32.: Biologische Zeit aufgetragen gegen die Entwicklung des QI für die DTL-Szenarien F1-F8

Die Abb. 5-32 zeigt deutlich, dass abgesehen vom DTL-Szenario F6 alle empirisch bestimmten Qualitätsindices oberhalb der Modellkurve liegen. Das Modell unterschätzt tendenziell die DTL-Szenarien. Am Beispiel der Messwerte des DTL-Szenarios F7 soll in Abb. 5-33 die Grenzen der Modellanwendung näher erläutert werden.

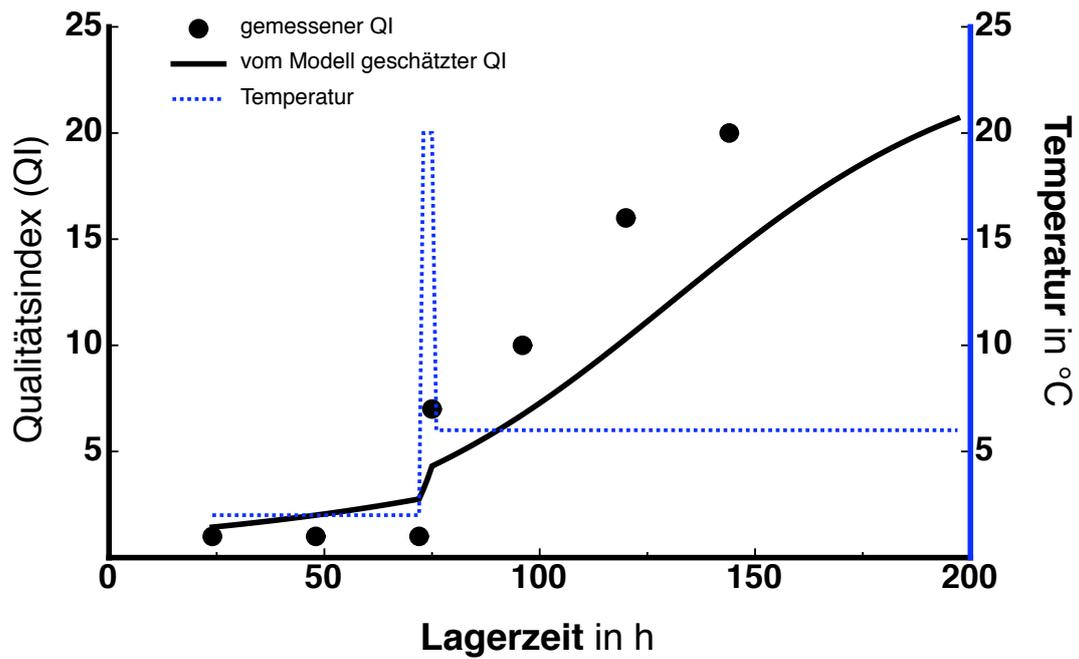


Abbildung 5-33.: Vergleich von empirisch gemessenen und simulierten Werten am Beispiel des DTL-Szenarios F7

Tabelle 5-32 zeigt abschließend die empirisch bestimmten und von der Frischeparameter-Modellkombination (O'Neill/QI) geschätzten Qualitätsindices jeweils vor und nach dem Temperatursprung für die DTL-Szenarien F1-F8. Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass - ausgenommen die DTL-Szenarien F5 und F6 - das Modell die Qualitätsindices nach dem Temperatursprung zum Teil sehr deutlich unterschätzt ($-4,8 \Delta_{F1}$). Die Szenarien mit sehr hohen (F5/F6) werden dagegen vom Modell überschätzt ($+5 \Delta_{F6}$).

Tabelle 5-32.: Übersicht der vor und nach Temperatursprüngen empirisch gemessenen und vom Modell geschätzten Qualitätsindizes

DTL-Szenario		Qualitätsindex		Δ
		vor Sprung	nach Sprung	
F1	empirisch	4	8	4
	Modell	2	3,2	1,2
	Δ_{F1}	-2	-4,8	
F2	empirisch	1	7	6
	Modell	3,2	4,3	1,2
	Δ_{F2}	+2,2	-2,7	
F3	empirisch	6	10	4
	Modell	5,5	8	2,5
	Δ_{F3}	-0,5	-2	
F4	empirisch	4	11	7
	Modell	3,5	9,9	6,4
	Δ_{F4}	-0,5	-1,1	
F5	empirisch	3	9	6
	Modell	2,7	10,7	8
	Δ_{F5}	-0,3	+1,7	
F6	empirisch	5	10	5
	Modell	5,5	15	9,5
	Δ_{F6}	+0,5	+5	
F7	empirisch	2	8	6
	Modell	3,6	5,4	1,8
	Δ_{F7}	+1,6	-2,6	
F8	empirisch	4	8	4
	Modell	3	4,7	1,7
	Δ_{F8}	-1	-3,3	

6. Diskussion

Voraussetzung für die Modellierung des Frischeverlusts kühlpflichtiger Lebensmittel ist die Wahl geeigneter Parameter für die Untersuchung im Labormaßstab. Denn unter standardisierten Bedingungen lassen sich bekannte Einflussgrößen wie Temperaturdynamik zwischen Umgebung, Verpackung und Lebensmittel variieren, um die Veränderung des Frischestatus eines Produktes zu messen. Aufgrund des hohen Untersuchungsaufwands und der entsprechenden Kosten muss es das Ziel sein, mit möglichst wenig Parametern die Haltbarkeitsstadien abzubilden.

Der methodische Ansatz der eigenen Studie stellt die Definition und die Simulation charakteristischer Verhaltensmuster von Verbrauchern von der Auswahl, dem Einkauf und Umgang mit kühlpflichtigen Lebensmitteln in den Vordergrund. Die Ergebnisse der eigenen experimentellen Untersuchungen und der Simulationsläufe bilden eine erste Grundlage für die Anwendung eines Distributions-, Transports- und Lagerungsmodells (*DTL-Modell*), zum einen in Hinblick auf die integrative Überwachung von Kühlketten bis in den haushaltsnahen Bereich und zum anderen für die Unterstützung der Beratung von Konsumenten.

Da nach Richter u. a. (1987) die praktische Anwendbarkeit eines Simulationsmodells in engem Zusammenhang mit der Güte der Modellparameter steht, werden im folgenden die Interaktionen der in der eigenen Arbeit definierten und ermittelten Frischeparameter diskutiert.

Ausgangsbeschaffenheit der Frischeparameter

Die Haltbarkeitsdauer eines Produktes wird massgeblich von der Ausgangsbeschaffenheit der Lebensmittel vor dem Kauf, dem Transport und der Einlagerung im Haushalt bestimmt. Im Sinne des zur Beschreibung des Modells gewählten Systemansatzes, stellt der Ausgangskeimgehalt allerdings eine nicht kontrollierbare Einflussgrösse dar. Zur Modellierung des Frischeverlusts ist daher die Kenntnis über Varianz und Spannweite

der untersuchten Frischeparameter von Bedeutung.

In der Literatur wird die Spannweite der Anfangskeimbelastung zwischen 10^4 und 10^6 kbE/g angegeben. Die Höhe der in den Laboruntersuchungen ermittelten mikrobiologischen Anfangskeimbelastung (N_{min}) der Hackfleischproben deckt sich mit den Untersuchungen von Hildebrand u. a. (2001), die für industriell hergestelltes Hackfleisch eine durchschnittliche Gesamtkeimzahl von $\log 4,73$ kbE/g angeben. Dieser Keimgehalt entspricht den eigenen sowohl durch das Plattenguss- (GKZ) wie auch durch das Impedanzverfahren (IKZ) ermittelten Gesamtkeimzahlen. Bezüglich der Messgröße Anfangskeimgehalt spiegelt das Probenmaterial somit die in der Literatur beschriebenen Variationsbreite wider (Hildebrand u. a. 2001). Die eigenen Ergebnisse bestätigen, dass die gemessenen mikrobiologischen Frischeparameter wie z.B. GKZ von MAP-Hackfleisch eine auffällige Varianz zu Beginn der Untersuchungen aufweisen. Mit der sensorischen Einstufung des Frischstatus konnten sowohl für das Hackfleisch als auch die Lachsforellen Abweichungen vom Idealzustand (Frisch) kaum wahrgenommen werden. In die experimentelle Arbeit gingen nur Produkte mit bekanntem Herstellungs- bzw. Schlachtdatum (Hackfleisch) und mündlicher Frischegarantie (Fisch) ein.

Es gilt zu beachten, dass das untersuchte Hackfleisch bereits 12 h (Nachts) vor Untersuchungsbeginn produziert und am nächsten Morgen vom Hersteller angeliefert wurde. Die gemessene Ausgangsbeschaffenheit der Proben entsprach im Laborversuch somit dem Zustand, in dem das Hackfleisch im LEH eingelagert würde.

Eignung der Frischeparameter für Modellentwicklung

Alle Ergebnisse der Lagerversuche entsprachen wie erwartet dem charakteristischen Bild der Verderbskinetik unter unterschiedlichem Temperatureinfluss. Die Verlaufsskurven der untersuchten Frischeparameter (Mikrobiologie/Sensorik) zeigten bei höheren Lagertemperaturen stets einen steileren Anstieg als bei niedrigeren. Die Dauer bis zum Erreichen eines sichtbaren Qualitätsverlustes verkürzte sich.

Bei den durchgeführten Lagerungsversuchen galt es für die mikrobiologischen Parameter zu klären, ob das Plattenverfahren (GKZ) und Spatelverfahren (*Pseudomonas ssp.*) sowie die Impedanzmessung (IKZ) zur Keimzahlbestimmung gleichermassen geeignet sind, den Frischeverlust in Abhängigkeit von Lagertemperatur und -zeit zu charakterisieren. Gegenüber dem zeitaufwendigerem Plattenverfahren erwies sich die IKZ jedoch

als weniger geeignet, da die Streuungen der gemessenen Keimzahlen über den gesamten Messzeitraum höher lagen als beim Plattenguss. Weiterhin konnten Unterschiede bezüglich der Maximalkeimzahl beobachtet werden. Dies entsprach in den eigenen Untersuchungen den von Borch u. a. (1996) angegebenen Maximalkeimgehalten, die bei gekühlter Lagerung von Fleisch eine Spanne zwischen 10^7 kbE/g und 10^9 kbE/g angeben. Die eigenen Ergebnisse ergaben für die GKZ ein gemitteltes N_{max} von $\log 8,2$. Für *Pseudomonas ssp.* war der sigmoide Wachstumsverlauf nur bei einigen Zeitreihen deutlich ausgeprägt. Vor allem im niedrigen Temperaturbereich (2-4 °C) konnten die typischen Wachstumsphasen nicht differenziert werden. Das führte zu Problemen bei der Anpassung der Kurven durch eine Wachstumsfunktion. Aufgrund der schlechten Schätzung der Modellparameter wurde auf einen Einsatz von *Pseudomonas ssp.* als Frischeparameter verzichtet. Der von mehreren Autoren (Sivertsvik u. a. 2002; Lambert u. a. 1991) gezogene Schluss, dass durch den Einsatz von MA-Verpackungen das Wachstum von *Pseudomonas ssp.* stark unterdrückt wird, konnte in den eigenen Untersuchungen jedoch nicht bestätigt werden. Auch eine Abnahme dieser Bakterienspezies mit zunehmender Lagertemperatur, wie sie von mehreren Autoren beschrieben wird, konnte nicht beobachtet werden. Als Grund wird diskutiert, dass *Pseudomonas ssp.* in der Lage ist, seinen Stoffwechsel dahingehend umzustellen, dass nicht nur Sauerstoff, sondern auch Stickstoff als Wachstumspromotor genutzt werden kann (Tortora u. a. 2001).

Die gemessenen pH-Werte des Hackfleischs lagen im Bereich der in der Literatur angegebenen Werte für Schweinefleisch (Lücke 2003; Krämer 2002). Der pH-Wert stellte sich jedoch als Parameter für die Beschreibung des Frischeverlusts als weniger geeignet heraus. Im Verlauf der Lagerung der Hackfleischproben konnte eine signifikante Veränderung des pH-Wertes erst gemessen werden, nachdem das Fleisch schon deutliche sensorische Abweichungen aufwies und der mikrobiologische Verderb bereits weit fortgeschritten war. Die Veränderung des pH-Wertes wurde daher im mathematischen Modell nicht berücksichtigt.

Da sowohl der Verderb von Fleisch als auch von Fisch ein komplexer Vorgang ist, reicht die mikrobielle Bewertung alleine nicht aus, um Rückschlüsse auf die Frische zu ziehen

(Martinsdottir 2002). Aus diesem Grund wurde zusätzlich in allen Untersuchungsreihen auch die Sensorik bei der Einstufung des Frischestatus herangezogen. Um den Qualitätsverlust bei Lachsforellen zu erfassen, sind gleichzeitig zwei Methoden (*Sensorikindex*, *Qualitätsindex*) gewählt worden. Im Einstufungsergebnis zeigten beide eine hohe Übereinstimmung. Deshalb beschränkte sich die Darstellung der Ergebnisse lediglich auf die Daten der Qualitätsindexmethode (QIM). Auch Oehlschläger (2004) schlägt die Anwendung der QIM als Methode der Wahl vor.

Der von Reuter (1996) beschriebene Zusammenhang, dass erst bei einer Gesamtkeimzahl von 10^7 kbE/g Geruchsabweichungen und ab 10^8 kbE/g Konsistenzabweichungen bei Schweinefleisch auftreten und das Fleisch als verdorben gilt, trifft nicht auf das untersuchte MAP-Schweinehackfleisch zu. Denn die eigenen Untersuchungen zeigen erste Geruchsentwicklungen und Texturveränderungen bereits unter einer GKZ von 10^6 kbE/g. Dabei konnte ein leicht süßlicher, z.T. auch leicht säuerlicher Geruch wahrgenommen werden. Stanbridge u. Davies (1998) sowie Taoukis (2006) machen dafür Milchsäurebakterien verantwortlich, die im Laufe der Lagerung unter MAP-Bedingungen dominieren.

Modellentwicklung

Das eigene entwickelte Systemmodell berücksichtigt zum einem die physikalischen Prozesse der Erwärmung und Abkühlung des Produktes, zum anderen die biologischen Prozesse des mikrobiologischen und enzymatisch bedingten Verderbs.

Das physikalische Modell beschreibt dabei die Interaktion zwischen der Lager- und der Produkttemperatur in Abhängigkeit von unterschiedlichen Produktvarianten. Der für das jeweilige Produkt ermittelte Proportionalitätsfaktor ω wurde mit Hilfe des exponentiellen Ansatzes (Newton'sche Abkühlungsgesetz) berechnet. Dabei konnten sehr gute Anpassungen sowohl für die Produktvarianten des Hackfleischs als auch der Lachsforellen ermittelt werden. Mit diesem Ansatz ließen sich sowohl der Erwärmungs- als auch der Abkühlungsprozess erfassen. Die Simulationsergebnisse liegen nahe den gemessenen Werten im Laborversuch.

Das biologische Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen Lagertemperatur, -zeit und Produktfrische. Um die Abhängigkeit der Frischeparameter von der Lager-

temperatur darzustellen, sind zwei unterschiedliche Ansätze gegenübergestellt worden. Da in der Literatur die Mehrzahl der Autoren die Temperaturabhängigkeit des Frischeverlusts mit Hilfe des Arrhenius-Modell darstellt, galt dieser Ansatz als Referenzmethode. Mit dieser ist die Response-Funktion von O'Neill (O'Neill 1968) als Kurvenverlauf grafisch verglichen worden.

Die Kenngröße Aktivierungsenergie stellt eine der wesentlichsten Parameter des Arrhenius-Modells dar. Denn der berechnete Wert sagt etwas über die Reaktionsgeschwindigkeit aus und eignet sich dazu, unterschiedliche Produktvarianten oder Produktarten miteinander zu vergleichen oder zu rangieren. Es gilt: Je höher die Aktivierungsenergie, desto langsamer die Reaktionsgeschwindigkeit. Demnach entspricht eine höhere Aktivierungsenergie einer längeren Haltbarkeit (Kreyenschmidt 2003).

Um die Aktivierungsenergie der einzelnen Frischeparameter zu ermitteln, musste jedoch zunächst die zeitliche Entwicklung der Parameter aus den einzelnen Versuchsreihen mit Hilfe einer Wachstumsfunktion angepasst werden. Probleme bestehen bei der Anpassung der Wachstumsfunktionen an die Entwicklung der jeweiligen Frischeparameter, wenn Daten über die lag-Phase fehlen. Dies ist in der Regel der Fall, da sich dieser kurze Entwicklungsabschnitt der Mikroorganismen kaum experimentell erfassen lässt. Bei der Umsetzung in das mathematische Modell gilt diese Lücke daher als nicht zu unterschätzende Fehlerquelle. Bei der Umsetzung der eigenen gemessenen Werte in das mathematische Modell haben die fehlenden Daten zur Beschreibung der lag-Phase teilweise ebenso zu einer Über- bzw. Unterschätzung der Wachstumsgeschwindigkeit und letztendlich der Haltbarkeitsendpunkte geführt. Auf dieses Problem wurde auch von McDonald u. Sun (1999) hingewiesen. Zwietering u. a. (1996) und Van Gerwen u. a. (2000) schlagen deshalb vor, auf die Berücksichtigung der lag-Phase ganz zu verzichten.

Aus diesem Grund wurden in der eigenen Arbeit unterschiedliche Wachstumsfunktionen (log. Wachstumsfunktion mit und ohne Berücksichtigung der lag-Phase; Baranyi-Funktion) für die Anpassung an die Verläufe der jeweiligen Frischeparameter herangezogen. Bei der Anpassung des Frischeparameters GKZ schätzte Gleichung 2.2 (ohne lag-Phase) gegenüber den weiteren verwendeten Anpassungsfunktionen lediglich die

Raten des 20 °C-Versuchs abweichend. Dieses Ergebnis erscheint plausibel, da bei 20 °C keine ausgeprägte lag-Phase zu erwarten war und die Wachstumsfunktionen wie bereits oben angesprochen die übrigen Wachstumsparameter über- bzw. unterschätzten. Die dynamischen Zeitreihen liessen sich am Besten mit der log. Wachstumsfunktion anpassen.

Der Verlauf der sensorischen Frischeparameter wurde für das Hackfleisch wie auch die Lachsforellen mit unterschiedlichen Anpassungsfunktionen mit und ohne Berücksichtigung einer Anpassungsphase (lag-Phase) beschrieben. Dabei kam es zu keiner unterschiedlichen Schätzung der Modellparameter. Beide Funktionen schätzten nahezu identische Raten. Deshalb wurde auf eine weitere Differenzierung verzichtet und jeweils die log. Wachstumsfunktion mit Berücksichtigung lag-Phase für die Modellentwicklung verwendet.

Bei der Anpassung durch die oben beschriebenen sigmoiden Wachstumsfunktionen gilt es jedoch zu beachten, dass der biologische Hintergrund dieser Ansätze nicht zwanghaft auf die Entwicklung der sensorischen Merkmalsausprägungen übertragbar ist. Die Ausprägung bzw. Benotung der Merkmalseigenschaften basiert auf subjektiven Eindrücken und der Entwicklungsverlauf ist sprunghaft, da es sich um diskrete Parameter handelt.

Bei der Modellentwicklung fiel auf, dass die eigenen Berechnungen für den Frischeverlust von Hackfleisch niedrigere Werte für die Aktivierungsenergien ergaben, als die in der Literatur (s. Tab. 2-1) für vakuumverpacktes und MAP-verpacktes Schweinefleisch angegebenen (Gill 1986; Labuza 1982). Die Aktivierungsenergie der Lachsforellen liegt bis zu 9 kcal/mol unter den Literaturangaben von Labuza (1982). Diese Abweichungen sollten jedoch nicht überbewertet werden, da die Autoren keine detaillierten Angaben über die Lagerungsbedingungen und zur Herkunft der untersuchten Lebensmittel geben, die sehr von den eigenen Versuchsbedingungen abweichen können. Beides beeinflusst die Haltbarkeitsdauer und erklärt die Unterschiede.

In genau diesem Zusammenhang sind auch die Nachteile des Arrhenius-Ansatzes anzu-

sprechen. Die wesentliche Stellgrösse Aktivierungsenergie E_a wird aus Einzelschritten berechnet. Somit werden alle Informationen der einzelnen Messreihen über einen einzigen kinetischen Parameter ausgedrückt bzw. sonstige Informationen ignoriert. Da sich die Aktivierungsenergie aus dem Produkt der Steigung der Regressiongeraden und der idealen Gaskonstanten berechnet, sind schlecht geschätzte Wachstums- bzw. Entwicklungsraten große Fehlerquellen. Beim eigenen Vorgehen sind daher einzelne geschätzte Raten für die Berechnung der Aktivierungsenergie nicht berücksichtigt worden, da sie sonst zu unzuverlässigen Ergebnissen geführt hätten (s. Abb. 5-12). Ross u. Dalgaard (2004) bemängeln weiterhin, dass die Stellgrösse E_a selbst temperaturabhängig ist.

Aus diesen Gründen wurde für die Modellentwicklung als zweite Response-Funktion die O'Neill-Funktion ausgewählt. Dabei wurde die Anpassungsfunktion in die O'Neill-Funktion eingebettet und simultan über alle Temperaturstufen angepasst. Der Vorteil der Simultananpassung gegenüber einem schrittweisen Verfahren (Arrhenius) besteht darin, dass alle Informationen aus den Messreihen gleichzeitig berücksichtigt werden. Auf diese Weise ließen sich die relativen Unterschiede zwischen einzelnen Temperaturbedingungen besser abbilden und bei der Simultananpassung auch die jeweiligen Temperaturprofile (DTL-Szenarien) einbinden.

Beide Response-Funktionen unterscheiden sich in der Schätzung der Zustandsgrösse Haltbarkeit in Stunden im Temperaturbereich zwischen 2 und 20 °C kaum. Allerdings ist bezogen auf die Schätzwerte für MAP-Hackfleisch im Temperaturbereich über 20 °C eine gewisse Überlegenheit der O'Neill-Funktion gegenüber dem Arrhenius-Ansatz zu verzeichnen. Für den Vergleich beider Methoden im Fall der Lachsforelle ist deutlich zu erkennen, dass mit beiden Methoden extreme Temperatursprünge nicht abgebildet werden können. Die geschätzten Werte liegen bei Szenarien mit Temperatursprüngen bis zu 50 °C regelmässig unterhalb der tatsächlich im Labormaßstab gemessenen Werte unter gleichen Temperaturschwankungen. Grund hierfür ist, dass die Modelle lediglich den Temperatureffekt auf den Frischeverlauf simulieren, in der Realität aber eine Reihe weiterer biologischer Interaktionen und Regelprozesse die tatsächliche Frischekinetik beeinflussen. Diese vermuteten Zusammenhänge fließen in das Modell nicht mit ein und können somit Ursache für Über- bzw. Unterschätzung sein.

Bestimmung der Haltbarkeitsendzeiten

Bei der über das Modell errechneten bzw. geschätzten Zustandsgrösse Haltbarkeit handelt es sich immer um eine Grösse mit einer zeitlichen Dimension wie Stunden oder Tage. Bei der Festlegung, wann das Haltbarkeitsende der untersuchten Produkte erreicht war, gingen u.a. auch Kriterien ein, die als Haltbarkeitsgrenze für Produkte rechtlich vorgeschrieben sind bzw. empfohlen werden, wie z.B. die GKZ für Hackfleisch. Wird der definierte Messwert nach einer bestimmten Lagerdauer erreicht, ist dies der Zeitpunkt, an dem das jeweilige Produkt als nicht mehr verkehrsfähig gilt.

Nach Zhang (1997) sollte die Lagertemperatur von Kühlgütern tierischen Ursprungs so nahe wie möglich über den Gefrierpunkt liegen, um eine möglichst lange Haltbarkeit zu garantieren. Daher gibt der Produzent des Hackfleischs eine Maximallagertemperatur von 2 °C verbunden mit einem Verbrauchsdatum von 7 Tagen für sein Produkt an. Die realistischsten Haltbarkeitsendzeiten konnten für das MAP-Hackfleisch mit Hilfe des O'Neill-Ansatzes und dem Frischeparameter GKZ ermittelt werden. Dazu wurden verschiedene Frischeparameter-Modell-Kombinationen getestet. Die HBK bei einer konstanten Lagertemperatur von 2 °C wird mit Hilfe dieses Ansatzes auf etwa 8 Tage (194 h) geschätzt. Berücksichtigt man dazu eine Zeitspanne von 24 h, so erscheint die vom diesem Modell geschätzte Haltbarkeitsangabe als zutreffend. Die Lagerfähigkeit des Hackfleischs wird bei Lagerung unter Raumtemperatur (20 °C) auf 6 h geschätzt. Die über des Arrhenius-Modell (GKZ/SI) sowie das O'Neill-Modell (SI) ermittelten Haltbarkeitsendpunkte lagen wesentlich höher (18 h).

Da Frischfisch vom Konsumenten entweder direkt vom Zuchtbetrieb (ab Hof) oder im Fachgeschäft als lose Ware bezogen wird, fehlen entsprechende Haltbarkeitsvorgaben sowie Hinweise auf angemessene Lagerungsbedingungen als Orientierung für den Verbraucher. Auch in der Literatur wird die Länge der Haltbarkeit von Fisch sehr unterschiedlich beurteilt. Banneke u. a. (2000) gibt für eine Lagertemperatur von 2 °C an, dass Fisch nach 11 Tagen nicht mehr verkehrsfähig ist und Saupe (1996) geht bei Süsswasserfischen von einer Genusstauglichkeit unter Eislagerung von einer Woche bis maximal 10 Tagen aus. Diese Angaben entsprechen den eigenen Ergebnissen, die je nach angewendetem Modell (Arrhenius/O'Neill) zwischen 170 h und 207 h liegt.

Dagegen spricht Krämer (2002) bei einer Lagertemperatur von 4 °C bis zur Zubereitung

von einer Haltbarkeitspanne von nur wenigen Stunden. Diese Einschätzung weicht jedoch deutlich von den eigenen Ergebnissen ab, wobei eine Haltbarkeit von etwa 140 h ermittelt wurde. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass das Modell nichts über die Sicherheit der Lebensmittel bzw. das Risiko, dass sich neben dem schnellen Verderb auch pathogene Mikroorganismen vermehrt haben könnten, aussagt. Giannakourou u. a. (2001) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass Fragen bezüglich der Lebensmittelsicherheit von besonderer Bedeutung sind, aber getrennt von qualitativen Haltbarkeitsaspekten gesehen werden sollten.

Im weiteren Vorgehen galt es zu überprüfen, in wie weit und in welchen Größenordnungen Ergebnisse zur Verderbskinetik unter „konstanten“ Lagerungsbedingungen auch auf „dynamische“ Lagerungsbedingungen übertragbar sind. Shimoni u. Labuza (2000) geben zu bedenken, dass es sehr schwierig ist, Daten über den Effekt von Temperaturschwankungen auf das Wachstum von Mikroorganismen zu ermitteln. Um diese Ausgangssituation zu berücksichtigen, wurden weitere Messungen für die Beschreibung des Frischeverlusts der Lebensmittel unter dynamischen Bedingungen wie sie beim Einkauf und Transport auftreten könnten, durchgeführt. Gerade ungünstige Lagerungsbedingungen beim Transport und im Verlauf der HH-Lagerung führten zu einer deutlich schnelleren Qualitätsbeeinträchtigung des Probenmaterials. Es kam beispielsweise nach hohen Temperatursprüngen (≥ 20 °C) bereits nach wenigen Stunden zu einer deutlichen Veränderung der sensorisch erfassbaren Frischemerkmale. Beim MA-verpacktem Hackfleisch wurde nach einem Temperatursprung (20 °C für 3 h) ein eher nussig/muffiger Geschmack wahrgenommen. Zu erklären ist diese Veränderung mit einer Umschichtung der Mikroorganismenflora zugunsten von Milchsäurebakterien, die für diesen Geruch verantwortlich gemacht werden können (Tortora u. a. 2001). Auch der über die QI-Methode ermittelte Index für die Beschreibung des Frischestatus der Lachsforellen stieg nach einer simulierten Temperaturunterbrechung (20 °C für 3h) in der Folgezeit deutlich an.

Simulationsszenarien

Als quantitative Methode liefert die Simulation zahlenmässige Ergebnisse aufgrund zahlenmässiger Eingaben, die in einer graphischen Aufbereitung die Zeitabhängigkeit

des dynamischen Prozessgeschehens wider spiegeln. Die Simulation erlaubt aufgrund der zahlenmässigen Ergebnisse als auch aufgrund der graphischen Darstellung qualitative Aussagen über das zu untersuchende reale System (Møller 1992).

Der Einordnung der Konsumenten in drei verschiedenen Verbrauchertypen (konsequent, inkonsequent und sorglos) und die Zusammenstellung der DTL-Szenarien liegen Zahlen aus der Literatur, aus eigenen Erhebungen sowie Erfahrungen der Arbeitsgruppe (Thomas 2006; Kreyenschmidt u. a. 2006) zugrunde. Vergleicht man diese Rahmendaten und Erkenntnisse mit den Ergebnissen der Simulationsläufe, so gibt das entwickelte mathematische Modell Werte für Haltbarkeitsdauern wieder, die durchaus im Rahmen tatsächlich gemessener Werte von Lebensmittelüberwachungsorganisationen liegen (Kamphausen 2003). Somit liefert das Modell Zusatzinformationen für Verbraucher mit unterschiedlichem Einkaufsverhalten. Dabei könnte das Modell genutzt werden, um Konsequenzen von Fehlverhalten im Umgang mit kühlbedürftigen Lebensmitteln zu visualisieren. Auch Hersteller von Kühlgeräten für den haushaltsnahen Bereich können somit die Simulationsdaten, bei Entscheidungen zur Gestaltung neuer Haushaltskühlschränke mit unterschiedlichen Temperaturzonen nutzen, um mögliche Vorteile für den Kunden quantifizieren zu können.

Modellweiterentwicklung

Die Auswirkungen von Veränderungen der prozess- und produktspezifischen Variation auf die Haltbarkeitsendpunkte werden in den einzelnen Simulationsszenarien sehr deutlich wiedergegeben. Um die Zusammenhänge zwischen Produkt, Verpackung und Lagerbedingungen detaillierter beschreiben zu können, sollten jedoch weitere experimentelle Arbeiten erfolgen.

Der hier vorliegende Ansatz könnte in folgenden Punkten verbessert/erweitert werden:

- für das biologische Modell:
 - Untersuchungen weiterer Frischeparameter (z.B.: a_w -Wert)
 - Erfassung weiterer Einflüsse auf die Keimentwicklung:
Veränderungen des Gasgemisches während der Lagerung und Kompetitiver Antagonismus, d.h. Wechselwirkungen zwischen Mikroorganismen
- für das physikalische Modell:
 - Entwicklung eines Schichtenmodells und Ableitung partieller Differentialgleichungen für die Wärmeübergänge und Abhängigkeit von unterschiedlichen Verpackungsmaterialien (Helfrich 2006; Hallström u. a. 1998)
 - Entwicklung eines Kühlindex (Temperatursummen) (McMeekin u. a. 2006)
- Verknüpfung mit stochastischen Modellen (Wahrscheinlichkeitsmodell) zur Schätzung eines möglichen Risikos bezüglich der Lebensmittelsicherheit (Kreyenschmidt u. a. 2006)
- Verknüpfung mit einer ökonomischen Modellkomponente (van der Gaag 2004)

Die Simualtionsergebnisse des Modells ließen sich auch von Herstellern von RFID's und TTIs verwenden. Auch sie müssten daran interessiert, unterschiedliches Einkaufs- und Lagerverhalten bei einer Reihe kühlpflichtiger Lebensmittel simulieren zu können, ohne teure experimentelle Versuchsreihen mit hohem Laboraufwand zu finanzieren. Sie wären mit einem solchem Simulationsmodell in der Lage, auch dem Handel gegenüber mögliche Vorteile von Zusatzinformationen zu demonstrieren. Hierzu zählen Smart-Labels (Lettmann u. a. 2003). Anhand von Zahlenwerten liess sich die über das Modell berechnete Haltbarkeitsdauer in Stunden beispielsweise mit einem zeit- und temperaturabhängigen Verfärbeverhalten von TTIs vergleichen. Somit kann ein an das jeweilige Produkt (LM+Verpackung) angepasstes TTI-Profil entwickelt werden. Auch im Haushalt könnten die Informationen über verbleibende Haltbarkeit und Temperaturhistorie wichtige Entscheidungshilfen liefern, wie beispielsweise Einkäufe geplant und durchgeführt werden (Wocheneinkauf) und Kühlkapazitäten vorgehalten werden müssen. Dabei könnten dem Verbraucher insbesondere die Auswirkungen von unangebrachten Lagerungsbedingungen, z.B. in der Kühlschranktür eine Gefährdung durch

evtl. frühzeitig verdorbene Ware verdeutlicht werden.

Als Entscheidungsmodell ist eine monetäre Bewertung des Frischeverlustes mit Hilfe einer ökonomischen Komponente vorstellbar, mit dessen Hilfe Strategien zur Verbesserung der Kühlkettenlogistik entwickelt werden könnten (van der Gaag 2004). Auf diese Weise erhielten sowohl Konsumenten, Hersteller kühlbedürftiger Lebensmittel als auch Hersteller von Kühlgeräten problemorientierte und zielgruppenspezifische Informationen über den Frischzustand des Lebensmittels, die als Entscheidungskriterium in der temperaturgeführten Logistik oder der Beratung herangezogen werden könnten.

7. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, Zusammenhänge zwischen Schwankungen der Umgebungstemperatur eines Produktes in der Kühlkette vom point of sale bis zur Kühl-schranklagerung im Haushalt mit Hilfe eines Simulationsmodells abzubilden. Darüber hinaus galt es, auf Grundlage des Modells Auswirkungen auf die Haltbarkeit des Produktes zu prognostizieren. Der Modellbildung lagen aus der Literatur und eigenen Erhebungen bekannte Eckdaten bezüglich Lagerdauer und Lagerbedingungen sowie Erkenntnisse über den spezifischen Verderb der Lebensmittel zugrunde.

Im Mittelpunkt der eigenen Arbeit standen Ergebnisse aus Zeitreihenmessungen zur Ermittlung der Verderbskinetik von MAP-Schweinehackfleisch und Lachsforellen (*Oncorhynchus mykiss*). Ergänzt wurden die Untersuchungen durch empirische Studien zum Einkaufs- und Lagerungsverhalten der Konsumenten. Gemeinsam dienten diese Daten und Erfahrungswerte der Definition eines dynamischen Distributions- Transport- und Lagerungsmodell (DTL-Modell), das dann in ein mathematisches Modell umgesetzt wurde.

Zunächst wurde der theoretische Rahmen des Simulationsmodells auf Grundlage empirischer Studien festgelegt, um die Einflussgrößen des Systems zu definieren. Die Einflussgrößen wurden in kontrollierte (z.B. Lagertemperatur, Lagerdauer) und nicht kontrollierbare (z.B. Anfangskeimbelastung) Systemparameter unterteilt.

Danach schloss sich die Parameterschätzung aus den einzelnen Zeitreihenmessungen bezüglich der Veränderung der biologischen Frischeparameter zur Darstellung der Verderbskinetik und physikalischen Parameter zur Darstellung der aktuellen Produkttemperatur an. Zur Charakterisierung der Veränderung unterschiedlicher Frischeparameter von MAP-Schweinehackfleisch und Lachsforellen und die Bewertung des Ein-

flusses der jeweiligen Verpackungsvariante in Abhängigkeit von der Lagertemperatur sind insgesamt 779 Lebensmittelproben untersucht worden. 26 DTL-Szenarien sind im Rahmen der Zeitreihenmessungen unter dynamischen Temperaturbedingungen nachgebildet worden. Die Messreihen lieferten insgesamt 2954 Frischedaten (Einzeldaten).

Die Ergebnisse des untersuchten MAP-Hackfleisches zeigten, dass sich sowohl der mikrobiologische Frischeparameter Gesamtkeimzahl (GKZ) als auch der sensorische Parameter Sensorikindex (SI) gut für die Modellentwicklung eigneten. Außerdem korrelierten beide Frischeparameter eng miteinander. Für die Lachsforellen erwiesen sich sowohl die Qualitätsindexmethode (QIM) wie auch der Sensorikindex (SI) als geeignete Methoden, um den Frischeverlust zu beschreiben. In den einzelnen DTL-Szenarien wurden parallel dazu Temperaturmessungen am Produkt durchgeführt. Dabei wurden bei den Untersuchungen des Hackfleisches und der Lachsforellen die Temperaturverläufe jeweils an der Oberfläche und im Kern des Produktes gemessen und mit Hilfe einer erweiterten Exponentialfunktion angepasst. Aus dieser Anpassung leitete sich der produktspezifische Proportionalitätsfaktor ab, um die tatsächliche Produkttemperatur bei bekannter Umgebungstemperatur zu jedem Zeitpunkt berechnen zu können.

Die Temperaturabhängigkeit der ausgewählten Frischeparameter wurde mit zwei unterschiedlichen Temperatur-Response-Funktionen dargestellt (O'Neill, Arrhenius). Anhand verschiedener Frischeparameter-Modell-Kombinationen wurden die Ergebnisse der vom Modell prognostizierten Frischeverläufe mit empirisch ermittelten Werten verglichen. Dabei lieferte die Frischeparameter-Modell-Kombination O'Neill/GKZ für das MAP-Hackfleisch die zuverlässigsten Ergebnisse. Für die Lachsforellen konnten lediglich realistische Haltbarkeitsendzeiten ermittelt werden, die in einem Temperaturbereich (2-20 °C) lagen. Beim Vergleich zwischen empirisch gemessenem und von jeweiliger Frischeparameter-Modell-Kombination prognostiziertem Frischeverlust in den einzelnen DTL-Szenarien, zeigte sich, dass alle Kombinationen den tatsächlichen Frischezustand unterschätzten.

Exemplarisch sind für drei zuvor definierte Konsumententypen (sorglos, inkonsequent und konsequent) Simulationsläufe analysiert worden, die durch typische Verhaltens-

merkmale im Umgang mit kühlbedürftigen Lebensmitteln charakterisiert waren. Diskutiert wurde, in wie weit mit Hilfe des Simulationsmodells ermittelte Zeiten für die Haltbarkeit es erlauben, den Effekt von Massnahmen zur Minimierung des Risikos der Unterbrechung der Kühlkette zu verdeutlichen. Vorgeschlagen wurde, das Modell schrittweise zu erweitern, um es in der Verbraucherberatung oder aber für Hersteller von Kühlgeräten oder Anbieter von Innovationen zur Kühlkettenüberwachung nutzbar zu machen.

Literaturverzeichnis

Akterian 1996

AKTERIAN, Stephan: Total Quality Index and Evaluation of the Multi-Factor Effect on Shelf-Life of Refrigerated Foods. In: *New Developments in Refrigeration for Food Safety and Quality*, 1996

Alzamora u. a. 2003

Kapitel 8 - The control of water activity. In: ALZAMORA, S.M. ; TAPIA, M.S. ; WELTI-CHANGES, Jorge: *Food preservations techniques*. CRC Press, 2003, S. 126–153

Arrhenius 1884

ARRHENIUS, Svante: *Recherches sur la conductibilite galvanique des electrolytes*, Diss., 1884

AuditsInternational 1999

AUDITSINTERNATIONAL: Audits International. 1999. U.S. cold temperature evaluation / www.foodriskclearinghouse.umd.edu/ (Stand: 15. August 2007). 1999. – Forschungsbericht

Azevedo u. a. 2005

AZEVEDO, Ines ; REGALO, Mafalda ; MENA, Cristina ; ALMEIDA, Goncalo ; CARNEIRO, Luisa ; TEIXEIRA, Paula ; HOOG, Tim ; GIBBS, Paul A.: Incidence of *Listeria* ssp. in domestic refrigerators in Portugal. In: *Food Control* 16 (2005), S. 121–124

Bakalis u. a. 2003

BAKALIS, S. ; GIANNAKOUREU, M.C. ; TAOUKIS, T.P.: Effect of domestic storage and cooking conditions on the risk ditributions in ready to cook meat products. In: *International Conference of Engeneering and Food* (2003)

Banneke u. a. 2000

BANNEKE ; BARTELT ; KOLB ; HENRION ; KARL ; MEYER ; OEHLenschLÄGER: Statuserhe-

bung zum Ausnehmen von Fischen, Prüfung gesundheitlicher-hygienischer und technisch-handelsrelevanter Erfordernisse für das Ausnehmen von Fischen. In: 53. Arbeitstagung des Arbeitskreises Lebensmittelhygienischer Tierärztlicher Sachverständiger (ALTS) 14.-15.06.2000, Berlin, 2000

Baranyi u. a. 1993

BARANYI, J. ; ROBERTS, T.A. ; McCLURE, P.J.: A non autonomous differential equation to model bacterial growth. In: *Food Microbiology* 10 (1993), S. 43–49

Bast 1999

BAST, Eckart: *Mikrobiologische Methoden*. Spektrum Akademischer Verlag, 1999

Beard III 1991

BEARD III, T.D.: HACCP and the Home: The Need for Consumer Education. In: *Food Technology* (1991)

Berg u. Kuhlmann 1993

BERG, Ernst ; KUHLMANN, Friedrich: *Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen*. Ulmer, 1993

Betts u. Everis 2000

Kapitel 4 - Shelf-life determination and challenge testing. In: BETTS, G ; EVERIS, L.: *Chilled Foods: A comprehensive guide, 2. Edition*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2000, S. 259–285

Betts u. Walker 2003

Kapitel 10 - Verification and validation of food spoilage models. In: BETTS, G.D. ; WALKER, S.J.: *Understanding and measuring the shelf-life of food*. CRC Press, 2003, S. 184–217

BgVV 2000

BgVV: Temperaturanforderungen und -empfehlungen für Lebensmittel / Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin (BgVV). 2000. – Forschungsbericht

Bonilla 2004

BONILLA, Alma C.: Development Of A Quality Index Method (QIM) Scheme For

Fresh Cod (*Gadus Morhua*) Fillets And Consumer Acceptance Of Different Cod Products / The United Nations University - Fisheries Training Programme. 2004. – Forschungsbericht

Borch u. a. 1996

BORCH, Elisabeth ; KANT-MUERMANS, Marie-Louise ; BLIXT, Ylva: Bacteria spoilage of meat and cured meat products. In: *International Journal of Food Microbiology* 33 (1996), S. 103–120

Dalgaard 1999

DALGAARD, P.: Modelling of Seafood Spoilage. In: *Predictive Microbiology Applied to chilled Food Preservation*, 1999

Dalgaard 2002

Kapitel 12 - Modeling and predicting the shelf-life of seafood. In: DALGAARD, P.: *Safety and Quality Issues in Fish Processing*. CRC Press, 2002, S. 191–213

Dalgaard u. a. 1993

DALGAARD, Paw ; GRAM, Lone ; HUSS, Hans H.: Spoilage and shelf-life of cod fillets packed in vacuum or modified atmospheres. In: *International Journal of Food Microbiology* 19 (1993), S. 283–294

Daschner u. a. 2005

Kapitel 8 - Results using the prototypes on chilled and frozen samples. In: DASCHNER, Frank ; FLOBERG, Per ; KENT, Michael: *Sequid - A new Method for Measurement of the Quality of Seafood*. Shaker Verlag, 2005, S. 141–156

De Meesters u. a. 2001

DE MEESTERS, C. ; LUZYANINA, T. ; ENGELBORGH, K. ; BERNAERTS, K. ; ROOSE, D. ; VAN IMPE, J.: New ODE and DDE models for bacterial growth / Katholieke Universiteit Leuven - Department of Computer Science. 2001. – Forschungsbericht

DGHM 2006

DGHM: Richt- und Warnwerte zur Beurteilung von ungewürztem und gewürztem Hackfleisch auf Handelsebene (Stand 15. August 2007: <http://www.lm-mibi.uni-bonn.de/DGHM.html>) / Deutsche Gesellschaft für Hygiene und Mikrobiologie. 2006. – Forschungsbericht

Dolan 2003

DOLAN, K.D.: Estimation of Kinetic Parameters for Nonisothermal Food Processes. In: *Journal of Food Science* 68 (2003), S. 728–741

Dustmann u. Weindlmeier 2004

DUSTMANN, H. ; WEINDLMEIER, H.: Ansatzpunkte zur Risikominimierung - Risiken der Fleisch- und Fleischwarenvermarktung im LEH und bei Metzgereien. In: *Fleischwirtschaft* (2004), S. 169–172

Ebers 2005

EBERS, Henrik: *Konzeption und Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems für das Integrierte Nematodenmanagement im Zuckerrübenanbau*, Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2005

FDA 2001

FDA: Evaluation and Definition of Potentially Hazardous Foods (Stand 15. August 2007: <http://www.cfsan.fda.gov/comm/ift4-toc.html>) / Institute of Food Technologists for the Food and Drug Administration of the U.S. Department of Health and Human Services. 2001. – Forschungsbericht

Fellows 2000

FELLOWS, P.J. ; FELLOWS, P.J. (Hrsg.): *Food processing technology*. CRC Press, 2000

Flynn u. a. 1992

FLYNN, O.M.J. ; BLAIR, I. ; McDOWELL, D.: The efficiency and consumer operation of domestic refrigerators. In: *Rev. Int. Froid* 15 (1992), Nr. 5, S. 307–312

Fu u. a. 1991

FU, Bin ; TAOUKIS, Petros S. ; LABUZA, Theodore P.: Predictive Microbiology for Monitoring Spoilage of Dairy Products with Time-Temperature Integrators. In: *Journal of Food Science* 56 (1991), S. 1209–1215

van der Gaag 2004

GAAG, Monique van d.: *Epidemiological and economic simulation of Salmonella control in the pork supply chain*, Wageningen Universiteit, Diss., 2004

Giannakourou u. a. 2001

GIANNAKOUROU, M.C. ; KOUTSOUMANIS, K. ; NYCHAS, G.J.E. ; TAOUKIS, P.S.: Development and Assessment of an Intelligent Shelf Life Decision System for Quality Optimization of the Food Chill Chain. In: *Journal of Food Protection* 64 (2001), S. 1051–107

Gibson 1985

GIBSON, D.M.: Predicting the shelf life of packaged fish from conductance measurements. In: *Journal of Applied Bacteriology* 58 (1985), S. 465–470

Gill 1986

GILL, C.O.: The microbiology of chilled meat storage. In: *24th Meat Industry Research Conference, Hamilton, New Zealand MIRINZ publication 852* (1986), S. 210–213

Gompertz 1825

GOMPERTZ, B.: , and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 115 (1825), S. 513–585

Gram u. a. 2002

GRAM, Lone ; RAVN, Lars ; RASCH, Maria ; BRUHN, Jesper B. ; CHRISTENSEN, Allan B. ; GIVSKOV, Michael: Food Spoilage - interactions between food spoilage bacteria. In: *International Journal of Food Microbiology* 78 (2002), S. 79–97

Gram u. a. 1987

GRAM, Lone ; TROLLE, Gunilla ; HUSS, Hans H.: Detection of specific spoilage bacteria from fish stored at low (0 °C) and high (20 °C) temperatures. In: *International Journal of Food Microbiology* 4 (1987), S. 65–72

Griffith 2002

Kapitel 9. In: GRIFFITH, C.: *Foodborne Pathogens - Hazards, Risk Analysis and Control*. CRC Press, 2002, S. 257–274

Gutschmidt 1968

Kapitel 4 - Das Haltbarmachen von Lebensmittel durch Kälte. In: GUTSCHMIDT, J.: *Lehrbuch der Kältetechnik Band 2*. Verlag C.F. Müller, 1968, S. 929–989

Hallier 2001

HALLIER, Bernd ; EHI (Hrsg.): *Praxisorientierte Handelsforschung*. EHI-EuroHandelsInstitut, 2001

Hallström u. a. 1998

HALLSTRÖM, B. ; SKJÖLDEBRAND, C. ; TRÄGARDH, C.: *Heat Transfer & Food Products*. Elsevier Applied Science, 1998

Hart u. a. 1991

HART, C.D. ; MEAD, G.C. ; NORRIS, A.P.: Effects of gaseous environment and temperature on the storage behaviour of *Listeria monocytogenes* on chicken breast meat. In: *J. Appl. Bacteriol.* 70 (1991), S. 42–46

Helfrich 2006

HELFRICH, H.-P.: *Persönliche Mitteilung*. 2006

Hilbert u. Smulders 2000

HILBERT, Frederike ; SMULDERS, Frans J.: Kälte ist kein vollständiger Schutz. In: *Fleischwirtschaft* 12 (2000), 12, S. 26–28

Hildebrand u. a. 2001

HILDEBRAND, Anja ; HILDEBRANDT, Goetz ; KLEER, Josef: Mikrobiologischer Status von Schweinehackfleisch. In: *Fleischwirtschaft* 8 (2001), S. 86–90

Huss 1995

Huss, H.H. (Hrsg.): *Quality and quality changes in fresh fish*. FAO Fisheries Technical Paper, 1995

James u. Evans 1992

JAMES, S.J. ; EVANS, J.: Consumer Handling of chilled Food: Temperature performance. In: *Rev. Int. Froid* 15 (1992), Nr. 52

James u. James 2002

JAMES, S.J. ; JAMES, C.: *Meat Refrigeration*. CRC Press, 2002

Jay u. a. 2005

JAY, J.M. ; LOESSNER, M.J. ; GOLDEN, D.A.: *Modern Food Microbiology, 7. Auflage*. Springer Science + Business Media, Inc., New York, 2005

Jones 1992

JONES, Hamlyn G. (Hrsg.): *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology: A Quantitative Approach to Plant Physiology*. Cambridge University Press, 1992

Kamphausen 2003

KAMPHAUSEN, Rolf: Monitoring: EG-Hackfleisch in SB-Supermärkten / Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein Westfalen. 2003. – Forschungsbericht

Karel u. Lund 2003

KAREL, Marcus ; LUND, Daryl B.: *Physical Principles of Food Preservation*. Marcel Dekker, Inc., 2003

Kilcast u. Subramaniam 2000

KILCAST, D. ; SUBRAMANIAM, P.: *The stability and shelf-life of food*. CRC Press, 2000

Kleer u. Hildebrandt 2002

KLEER, J. ; HILDEBRANDT, G.: Bedeutung der Predictive Microbiology zur Risikominimierung bei der Lebensmittelherstellung. In: *Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz* 45 (2002), S. 474–483

Klettner 2001

KLETTNER, Paul-Gerhard: Kohlenmonoxid als Schutzgas. In: *Lebensmitteltechnik* 3 (2001), S. 53–54

Köpke 2002

KÖPKE, Urte: *Zusammensetzung der psychrotrophen Hackfleischmikroflora industrieller Herstellung mit mikroökologischer und hygienischer Bewertung ihrer Hauptkomponenten*, FU Berlin, Diss., 2002

Koutsoumanis u. a. 2002

KOUTSOUMANIS, K. ; GIANNAKOUREU, M.C. ; TAOUKIS, P.S ; NYCHAS, G.J.E.: Application of shelf life decision system (SLDS) to marine cultured fish quality. In: *International Journal of Food Microbiology* 73 (2002), S. 375–382

Koutsoumanis 2001

KOUTSOUMANIS, Konstantinos: Predictive Modelling of the Shelf life of Fish under Nonisothermal Conditions. In: *Applied and Environmental Microbiology* 67 (2001), S. 1821–1829

Koutsoumanis u. Nychas 2000

KOUTSOUMANIS, Konstantinos ; NYCHAS, George-John E.: Application of a systematic experimental procedure to develop a microbial model for rapid fish shelf life predictions. In: *International Journal of Food Microbiology* 60 (2000), S. 171–184

Krämer 2002

KRÄMER, J.: *Lebensmittelmikrobiologie, 4. Auflage*. 3. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2002

Krämer 2004

KRÄMER, J.: Richt- und Warnwerte - Eine Orientierungshilfe bei der Beurteilung von Lebensmitteln. In: *Lebensmitteltechnik* (2004), 11, S. 70–71

Kreyenschmidt 2003

KREYENSCHMIDT, J.: *Modellierung des Frischeverlusts von Fleisch sowie des Entfärbeprozesses von Temperatur-Zeit-Integratoren zur Festlegung von Anforderungsprofilen für die produktbegleitende Temperaturüberwachung*, Universität Bonn, Diss., 2003

Kreyenschmidt u. a. 2006

KREYENSCHMIDT, J. ; AABO, Søren ; BEEK, Paul van ; CHRISTENSEN, Bjarke B. ; KOSTOV, IVO ; LETTMANN, Thomas ; PETERSEN, Brigitte ; STAMMINGER, Rainer: Development of a „Decision Support Tool“ using minced pork meat as a model. In: *Cold Chain-Management - 2nd International Workshop, Bonn 8-9 May 2006*, 2006

Kunz 1994

KUNZ, B.: *Grundriss der Lebensmittel-Mikrobiologie*. Behr's Verlag, 1994

Kunz 2006

KUNZ, B.: *Grundlagen der Lebensmittelbiotechnologie*. Behr's Verlag, 2006

Kunz 2003

KUNZ, Benno: *Rohmaterialien für die Herstellung von Bioprodukten*. CENA-Verlag, 2003

Labuza 1994

LABUZA, T. P.: *Active Packaging for High Quality Prepared Cuisine / University of Minnesota*. 1994. – Forschungsbericht

Labuza 2000

LABUZA, T. P.: *The Search for Shelf Life / University of Minnesota*. 2000. – Forschungsbericht

Labuza u. Fu 1995

LABUZA, Theodore P. ; FU, Bin: Use of time-temperature integrators, predictive microbiology, and related technologies for assessing the extent and impact of temperature abuse on meat and poultry products. In: *Journal of Food Safety* 15 (1995), S. 201–227

Labuza 1982

LABUZA, T.P.: *Shelf-Life Dating of Foods*. Food & Nutrition, Westport, CT, 1982

Labuza u. a. 1992

LABUZA, T.P. ; FU, B. ; TAOUKIS, P.S.: Prediction for shelf-life and safety of minimally processed CAP/MAP chilled foods. In: *J. Food Protection* 55 (1992), S. 741–750

Labuza u. a. 2001

LABUZA, T.P. ; SZYBIST, L.M. ; PECK, J.: *Perishable Refrigerated Products and Home Practices Survey / University of Minnesota*. 2001. – Forschungsbericht

Laguerre u. a. 2005

LAGUERRE, O. ; AMARA, S. B. ; FLICK, D.: Experimental study of heat transfer by natural convection in a closed cavity: application in a domestic refrigerator. In: *Journal of Food Engineering* 70 (2005), S. 523–537

Laguerre u. a. 2002

LAGUERRE, O. ; DERENS, E. ; PALAGOS, B.: Study of domestic refrigerator temperature and analysis of factors affecting temperature: a French survey. In: *International Journal of Refrigeration* (2002), S. 653–659

Lambert u. a. 1991

LAMBERT, A.D. ; SMITH, J.P. ; DODDS, K.L.: Shelf life extension and microbiological safety of fresh meat - a review. In: *Food Microbiology* 8 (1991), S. 267–297

Legan u. Vandeven 2002

Kapitel 3 - Modelling the Growth, survival and death of bacterial pathogens in food.
In: LEGAN, David ; VANDEVEN, Mark: *Foodborne Pathogens - Hazards, Risk Analysis and Control*. CRC Press, 2002, S. 53–95

Leistner u. Wirth 1972

LEISTNER, L. ; WIRTH, F.: Bedeutung und Messung der Wasseraktivität (aw-wert) von Fleisch und Fleischwaren. In: *Fleischwirtschaft* 52 (1972), S. 1335–1337

Lettmann u. a. 2003

LETTMANN, T. ; KREYENSCHMIDT, J. ; KUNZ, B. ; PETERSEN, B. ; HAARER, D.: Charakterisierung des Parameterspektrums von Zeit-Temperatur-Integratoren (TTIs) am Beispiel von verpacktem Frischfleisch. In: *Fleischwirtschaft* 5 oder 83 (2003), S. 106–110

Littek 2005

LITTEK, Frank (Hrsg.): *Kühltransporte - Temperaturgeführte Logistik und Transporttechnik*. Agrimedia, 2005

Lücke 2003

Kapitel 7 - The control of pH. In: LÜCKE, F.-K.: *Food Preservation techniques*. CRC Press, 2003, S. 110–125

Marklinder u. a. 2004

MARKLINDER, I.M. ; LINDBLAD, M. ; ERIKSSON, L.M. ; FINNISON, A.M. ; LINDQUIST, R.: Home Storage Temperatures and Consumer Handling of Refrigerated Foods in Sweden. In: *Journal of Food Protection* 67 (2004), Nr. 11, S. 2570–2577

Martinsdottir 2002

Kapitel 19 - Quality management of stored fish. In: MARTINSDOTTIR, E.: *Safety and quality issues in fish processing*. CRC Press, 2002, S. 360–378

McDonald u. Sun 1999

MCDONALD, Karl ; SUN, Da-Wen: Predictive food microbiology for the meat industry: a review. In: *International Journal of Food Microbiology* 52 (1999), S. 1–27

McKellar u. Lu 2004

Kapitel 2. In: MCKELLAR, Robin C. ; LU, Xuewen: *Modeling Microbial Responses in Food*. CRC Press, 2004, S. 21–62

McKenna 2002

Kapitel 37 - Shelf-Life Prediction of Minimally Processed Chilled Foods. In: MCKENNA, B.M.: *Engineering and Food for the 21st Century*. CRC Press, 2002, S. 607–614

McMeekin u. a. 1997

MCMEEKIN, T. A. ; BROWN, J. ; KRIST, K. ; MILES, D. ; NEUMEYER, K. ; NICHOLS, D. S. ; OLLEY, J. ; PRESSER, K. ; RATKOWSKY, D. A. ; ROSS, T. ; SALTER, M. ; SOONTRANON, S.: Quantitative Microbiology: A Basis for Food Safety. In: *Emerging Infectious Diseases* 3 (1997), S. 541–549

McMeekin u. a. 2006

MCMEEKIN, Tom ; SMALE, Nicholas ; JENSON, Ian ; ROSS, Tom ; TANNER, David: Combining microbial growth models with near real-time temperature monitoring technologies to estimate the shelf-life and safety of foods during processing and distribution. In: *Cold Chain-Management - 2nd International Workshop, Bonn 8-9 May 2006*, 2006

Membre u. Burlot 1994

MEMBRE, J.-M. ; BURLOT, P.M.: Effect of temperature, pH, and NaCl on growth and pectinolytic activity of *Pseudomonas marginalis*. In: *Appl. Environ. Microbiol.*, 60 (1994), S. 2017–2022

Møller 1992

MØLLER, Dietmar: *Modellbildung, Simulation und Identifikation dynamischer Systeme*. Springer-Lehrbuch, 1992

Möller 2000

MÖLLER, K.: *Frische erhalten und verbessern - Empfehlungen für kühlpflichtige und*

leicht verderbliche Fleischwaren, Fleisch und Wurst. In: *Fleischwirtschaft* (2000), 5, S. 39–42

Müller 1986

MÜLLER, Gunther: *Grundlagen der Lebensmittelmikrobiologie*. Steinkopf Verlag Darmstadt, 1986

Müller 2004

MÜLLER, W. D.: Chilled Food im Fokus - Verbesserungspotentiale bei der Schutzqualität von SB-Frischfleisch. In: *Lebensmitteltechnik* (2004), 11, S. 17–19

Nauta u. a. 2003

NAUTA, M.J. ; LITMAN, S. ; BARKER, M.J. ; CARLIN, F.: A retail and consumer phase model for exposure assessment of *Bacillus cereus*. In: *International Journal of Food Microbiology* 83 (2003), S. 205–218

Neumeyer u. a. 1997

NEUMEYER, K. ; ROSS, T. ; McMEEKIN, T.A.: Development of a predictive model to describe the effect of temperature and water activity on the growth of spoilage pseudomonads. In: *Int. J. Food Microbiol.* 38 (1997), S. 45–54

Nicolai u. a. 1995

NICOLAI, B.M. ; IMPE, J.F. van ; MARTENS, T. ; DE BAERDEMAEKERS, J.: A Probabilistic Model for Microbial Growth During Cold Storage Of Foods. In: *19th International Congress of Refrigeration*, 1995

O'Brien 1997

O'BRIEN, G.D.: Domestic refrigerator air temperatures and the public's awareness of refrigerator use. In: *International Journal of environmental Health Research* (1997), Nr. 7, S. 141–148

Oehlenschläger 2004

OEHLENSCHLÄGER, Jörg: Fisch als Lebensmittel - Die Qualitäts-Index-Methode (QIM), ein verlässliches Instrument zur sensorischen Beurteilung der Frische von Fisch. In: *Inf. Fischwirtsch. Fischerforsch.* 51 (2004), S. 27–31

Olafsdottir u. a. 1997

OLAFSDOTTIR, G ; MARTINSDOTTIR, E. ; OEHLenschLÄGER, J. ; DALGAARD, P. ; JENSEN, B. ; UNDELAND, I. ; MACKIE, I.M. ; HENEHAN, G. ; NIELSEN, J. ; NILSEN, H.: Methods to evaluate fish freshness in research and industry. In: *Trends in Food Science & Technology* 8 (1997), S. 258–265

Olafsdottir u. a. 2006

OLAFSDOTTIR, Gudrun ; LAUZON, Helene L. ; JONSDOTTIR, Rosa ; MARTINSDOTTIR, Emilia: Multivariate prediction of cod (*Gadgus morhua*) and haddock fillets (*Melanogrammus aeglefinus*) stored under superchilling and temperature abusive conditions. In: *Cold Chain-Management - 2nd International Workshop, Bonn 8-9 May 2006*, 2006

O'Neill 1968

O'NEILL, R.V.: Population energetics of a milipede, *Narceus Americanus* (Beavois). In: *Ecology* 49 (1968), S. 803–809

Onigkeit 2006

ONIGKEIT, Janina: *Ein Modell für Stickstoff- und Kohlenstoffumsätze im Boden von Agrarökosystemen unter besonderer Berücksichtigung der Variabilität der mikrobiellen Aktivität*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2006

Petersen u. Kreyenschmidt 2004

PETERSEN, B. ; KREYENSCHMIDT, J.: Kühllogistik: Ein viel versprechendes Hilfsmittel - Einsatzmöglichkeiten von Zeit-Temperatur-Indikatoren zur Überprüfung der Kühlkette. In: *Fleischwirtschaft* 10 (2004), S. 57–59

Pichner 1999

PICHNER, R.: *Untersuchungen an frischem und gelagertem Schweinefleisch zur Evaluierung geeigneter Frischeparameter*, TU München, Diss., 1999

Pin u. Baranyi 1998

PIN, C. ; BARANYI, J.: Predictive models as means to quantify the interactions of spoilage organisms. In: *Int. J. Food Microbiol.* 41 (1998), S. 59–72

Popai-Studie 1999

Prändl u. a. 1988

PRÄNDL ; FISCHER ; SCHMIDHOFER ; SINELL: *Handbuch der Lebensmitteltechnologie - Fleisch*. Ulmer, 1988

Prüßmeier 2005

PRÜSSMEIER, Thomas: „Jeder Tag zählt“ - Schutzgase für Lebensmittelverpackungen. In: *Fresenius Kongress - Lebensmittelverpackung (Technik, Trends und Innovationen)*, 5. und 6. April 2005 Darmstadt, 2005

Quantumsoft 2007

QUANTUMSOFT: <http://www.quansoft.com/man.html> (Stand: 08.04.2007). (2007)

Reuter 1996

Kapitel 1 - Mikrobiologie des Fleisches. In: REUTER, G.: *Mikrobiologie der Lebensmittel - Fleisch und Fleischerzeugnisse*. Behr' Verlag, 1996

Reuter 1999

Kapitel Handbuch Lebensmittelhygiene, Loseblattausgabe, Grundwerk 1994. In: REUTER, G.: *Mikroflora der tierischer Herkunft : Fleisch und Fleischerzeugnisse*. 9. Aktualisierungslieferung. Behr's Verlag, 1999, S. 1–12

Richter u. a. 1987

RICHTER, O ; PETERSEN, B. ; KÜNNEKEN, J.: Computersimulation als Hilfsmittel zur Abschätzung von Gesundheitsrisiken. In: *Forschung und Beratung - Reihe B- Wissenschaftliche Berichte der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn Heft 36*. Umweltverträgliche und standortgerechte Landwirtschaft - Forschungsschwerpunkte der Rheinischen Friedrich-Wilhelm-Universität, Bonn, 1987

Richter 1985

RICHTER, Otto: *Simulation des Verhaltens ökologischer Systeme - Mathematische Methoden und Modelle*. VCH, 1985

Roos 2001

Kapitel 1 - Water Activity and Plasticization. In: Roos, Yrjö: *Food Shelf Life Stability*. CRC Press, 2001, S. 3–36

Ross u. Dalgaard 2004

Kapitel 3 - Secondary Models. In: ROSS, THOMAS ; DALGAARD, PAW: *Modeling Microbial Responses in Food*. CRC, 2004, S. 63–150

Rosso u. a. 1995

ROSSO, L. ; LOBRY, J. R. ; BAJARD, S. ; FLANDROIS, J. P.: Convenient Model To Describe the Combined Effects of Temperature and pH on Microbial Growth. In: *Applied And Environmental Microbiology* 61 (1995), S. 610–616

Saupe 1996

SAUPE, C. ; WEBER, H. (Hrsg.): *Mikrobiologie der Fisch, Weich- und Krebstiere Fleisch und Fleischerzeugnisse*. Behr's Verlag, Hamburg, 1996

Schaffner u. a. 1998

SCHAFFNER, DONALD W. ; ROSS, WILLIAM H. ; MONTVILLE: Analysis of the Influence of Environmental Parameters on Clostridium botulinum Time-to-Toxicity by Using Three Modeling Approaches. In: *Applied and Environmental Microbiology* 64 (1998), S. 4416–4422

Sergilidis u. a. 1997

SERGILIDIS, D. ; ABRAHIM, A. ; SARIMVEI, A. ; PANOULIS, C. ; KARAIOANNOGLOU, PR. ; GENIGEORGIS, C.: Temperature distribution and prevalence of Listeria ssp. in domestic, retail and industrial refrigerators in Greece. In: *International Journal of Food Microbiology* (1997), Nr. 34, S. 171–177

Sherlock u. Labuza 1992

SHERLOCK, MIMI ; LABUZA, THEODORE P.: Consumer Perceptions of Consumer Type Time-Temperature Indicators for Use on Refrigerated Dairy Foods. In: *Dairy Food and Environmental Sanitation* 12 (1992), S. 559–565

Shimoni u. Labuza 2000

SHIMONI, E. ; LABUZA, T.P.: Modeling pathogen growth in meat products: future challenges. In: *Trends in Food Science & Technology* 11 (2000), S. 394–402

Simpson u. Carevic 2004

SIMPSON, R. ; CAREVIC, E.: Designing a Modified Atmosphere Packaging Sy-

stem for Foodservice Portions On Nonrespiring Foods: Optimal Gas Mixture And Food/Headspace Ratio. In: *Foodservice Research International* 14 (2004), S. 257–272

Sinell 2004

SINELL, H.J.: *Einführung in die Lebensmittelhygiene, 4., neu bearbeitete Auflage*. Parey Verlag, Stuttgart, 2004

Singh u. Cadwallader 2003

Kapitel 9 - Ways of measuring shelf-life and spoilage. In: SINGH, T.K. ; CADWALLADER, K.R.: *Understanding and measuring the shelf-life of food*. CRC Press, 2003, S. 165–183

Sivertsvik u. a. 2002

Kapitel 4 - Modified atmosphere packaging. In: SIVERTSVIK, M. ; ROSNES, J.T. ; BERGSLIEN, H.: *Minimal processing technologies in the food industry*. CRC PRESS, 2002, S. 61–87

Smolander u. a. 2006

SMOLANDER, Maria ; RAJAMÄKI, Tiina ; ALAKOMI, Hanna-Leena ; AHVENAINEN-RANTALA, Raija ; VAINIONPÄÄ ; ROKKA, Mervi ; EEROLA, Susanna: Monitoring of the quality of modified atmosphere packaged poultry with intelligent packaging concepts. In: *Cold Chain-Management - 2nd International Workshop, Bonn 8-9 May 2006*, 2006

Smulders u. Upmann 2000

SMULDERS, Frans J. ; UPMANN, Matthias: Verminderung der bakteriellen Belastung auf frischem Fleisch. In: *Fleischwirtschaft* 10 (2000), 10, S. 18–20

Snyder Jr. 1999

SNYDER JR., O. P.: *The Basics of Cooling Foods / Hospitality Institute of Technology and Management*. 1999. – Forschungsbericht

Söndgerath 1987

SÖNDGERATH, D.: *Eine Erweiterung des Lesliemodells für die Beschreibung populationsdynamischer Prozesse bei Spezies mit mehreren Entwicklungsstadien*, Universität Dortmund, Diss., 1987

Spain 1982

SPAIN, James D.: *BASIC Microcomputer Models in Biology*. Addison- Wesley Publishing Company, 1982

Stamatioua u. a. 2004

STAMATIOUA, A. ; TAOUKIS, P.S. ; NYCHAS, G.J. ; KOUTSOUMANIS, K.: Development and validation of a predictive model for microbial spoilage of ground meat/ Agricultural University of Athens ; Aristotle University of Thessaloniki. 2004. – Forschungsbericht

Stanbridge u. Davies 1998

Kapitel 6 - The microbiology of chill-stored meat. In: STANBRIDGE, L.H. ; DAVIES, A.R.: *Microbiology of Meat and Poultry*. CRC Press, 1998, S. 174–219

Sutherland 2003

Kapitel 20 - Modelling food spoilage. In: SUTHERLAND, J.: *Food preservations techniques*. CRC Press, 2003, S. 451–474

Taoukis 2006

TAOUKIS, Petros S.: Development and Experimental Validation of SMAS- A TTI-Based Chill Chain Management System. In: *Cold Chain-Management - 2nd International Workshop, Bonn 8-9 May 2006*, 2006

Taoukis u. a. 1997

Kapitel 9 - Kinetics of Food Deterioation and Shelf-Life Prediction. In: TAOUKIS, Petros S. ; LABUZA, Theodore P. ; SAGUY, Israel S.: *The Handbook of Food Engineering Practice*. CRC Press, 1997, S. 361–403

Taoukis 2001

Kapitel 19. In: TAOUKIS, P.S.: *Food Process Modeling*. CRC Press, 2001, S. 402–428

Taoukis u. Giannakourou 2003

Kapitel 3 - Temperature and food stability: analysis and control. In: TAOUKIS, P.S ; GIANNAKOUROU, M.C.: *Understanding and measuring the shelf-life of food*. CRC Press, 2003, S. 42–68

Thomas 2006

THOMAS, S.: Consumer insight on cooling of perishable goods in Germany. In: *Cold-Chain-Management - 2nd International Workshop, Bonn 8-9 May, 2006*

Thomas 2007

THOMAS, S.: *Erhebung des Verbraucherverhaltens bei der Lagerung verderblicher Lebensmittel im Haushalt*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2007

Toledo 1999

TOLEDO, Romeo T.: *Fundamentals of Food Process Engineering 2nd Edition*. AN Aspen Publication, 1999

Tortora u. a. 2001

TORTORA, Gerard J. (Hrsg.) ; FUNKE, Berdell R. (Hrsg.) ; CASE, Christine L. (Hrsg.): *Microbiology - An Introduction*. Benjamin Cummings - An imprint of Addison Wesley Longman, Inc., 2001

Trierweiler 2003

TRIERWEILER, Bernhard: Temperatur- und Hygienestatus von Lebensmitteln in Bedienungs-Kühltheben. In: *5. Frische Logistik Tagung, Kontrollierte Temperaturen und Atmosphären beim Kühlen, Lagern und Transportieren*, 2003

Upmann u. a. 2000

UPMANN, M. ; PAULSEN, P. ; JAMES, C. ; SMULDERS, F. J. M.: Die Mikrobiologie von Kälte behandeltem Fleisch. In: *Fleischwirtschaft* 8 (2000), 8, S. 90–97

Van Gerwen u. a. 2000

VAN GERWEN, S.J.C. ; GIFFEL, M.C. te ; RIET, K. van't ; BEUMER, R.R. ; ZWIETERING, M.H.: Stepwise quantitative risk assessment as a tool for characterization of microbiological food safety. In: *Journal of Applied Microbiology* 88 (2000), S. 938–951

in't Veld 1996

VELD, Jos H.J. H.: Microbial and biochemical spoilage of foods: an overview. In: *International Journal of Food Microbiology* 33 (1996), S. 1–18

Verhulst 1838

VERHULST, P-F: Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. In: *Corr. Math. Phys.* 10 (1838), S. 113–121

Walker 1994

Kapitel 3. In: WALKER, S.J.: *Shelf Life Evaluation of Foods*. Blackie Academic & Professional, 1994, S. 40–51

Whälby 2002

WHÄLBY, Urban: *Heat and Mass Transfer in Impingement Cooking*, Chalmers University of Technology, Göteborg, Diss., 2002

Whiting 1995

WHITING, Richard C.: Microbial Modeling in Foods. In: *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 35 (1995), Nr. 35, S. 467–494

Zaritzky u. a. 1997

ZARITZKY, N. ; GIANNUZZI, L. ; PINOTTI, A.: A predictive Model for microbial growth in beef stored at different refrigeration temperatures in plastic film. In: *Proc. of the international Symposium Quimper Froid'97* (1997), S. 56–63

Zhang 1997

ZHANG, Guimei: *Optimierung der Verteilungskette von gekühlten und gefrorenen Lebensmitteln in der Bundesrepublik Deutschland*, Universität Hohenheim, Diss., 1997

Zwietering u. a. 1991

ZWIETERING, M. H. ; DE KOOS, J. T. ; HASENACK, B. E. ; DE WIT, J. C. ; RIET, K. van't: Modeling of Bacterial Growth as a Function of Temperature. In: *Applied And Enviromental Microbiology* 57 (1991), S. 1094–1101

Zwietering u. a. 1990

ZWIETERING, M.H. ; JONGENBURGER, I. ; ROMBOUTS, F.M. ; RIET, K. van't: Modeling of the bacterial growth curve. In: *Applied and Enviromental Microbiology* 57 (1990), S. 1875–1881

Zwietering u. a. 1996

ZWIETERING, M.H. ; WIT, J.C. de ; NOTERMANS, S.: Application of predictive micro-

biology to estimate the number of *Bacillus cereus* in pasteurised milk at the point of consumption. In: *International Journal of Food Microbiology* 30 (1996), S. 55–70

Abbildungsverzeichnis

2-1	Wechselwirkungen zwischen Lagerbedingungen und Prozessfaktoren mit dem LM-Verderb während der Lagerung (modifiziert nach in't Veld (1996))	4
2-2	Beispiel für eine sigmoide Wachstumskurve von Mikroorganismen . . .	10
2-3	Beispiel einer aus dem Baranyi-Modell abgeleiteten Wachstumskurve und Beschreibung der Parameter (McKellar u. Lu 2004)	13
2-4	Temperaturverlauf eines Lebensmittels bei der Abkühlung in einem Raum konstanter Temperatur bei Vernachlässigung von Temperaturunterschieden im Produkt	19
4-1	Stufen der Modellentwicklung und -nutzung	32
4-2	Struktur und einzelne Stufen des DTL-Modells	33
4-3	Elemente des Systemmodells (modifiziert nach Berg u. Kuhlmann (1993))	41
4-4	Untersuchtes MAP-Hackfleisch	44
4-5	Aufbau Lagerungsversuch Lachsforellen	45
4-6	Visuelle Kategorisierung des Frischeverlusts aufgrund der Kiemenbeschaffenheit	48
4-7	Kategorien von Qualitätsmerkmalen nach Kriterien der Qualitätsindexmethode (Oehlenschläger 2004)	50
5-1	Verteilung der Anfangskeimgehalte GKZ, <i>Pseudomonas ssp.</i> , IKZ	54
5-2	Zeitliche Entwicklung der GKZ in MAP-Schweinehackfleisch am Beispiel der statischen Messreihen bei 2 und 7 °C und Anpassung mit log. Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3)	55
5-3	Vergleich der Entwicklung der Impedanzkeimzahl in MAP-Hackfleisch am Beispiel der statischen Messreihen bei 7 und 15 °C	56

5-4	Zeitliche Entwicklung von <i>Pseudomonas ssp.</i> in MAP-Schweinehackfleisch am Beispiel der statischen Messreihen bei 2 und 7 °C	56
5-5	Gegenüberstellung geschätzter Wachstumsraten μ_{max} in Abhängigkeit von der Lagertemperatur, unterschieden nach angewendeter Wachstumsfunktion	58
5-6	Zeitliche Entwicklung des sensorisch ermittelten Frischeparameters SI (\bar{x}) bei Lagertemperaturen von 2 und 15 °C und Anpassung mit Gleichung 2.3	59
5-7	Gegenüberstellung der pH-Werte in Abhängigkeit von der Lagerzeit bei Lagertemperaturen von 2 und 15 °C und Anpassung mit log. Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3)	61
5-8	Verlauf der Frischeparameter GKZ und SI nach Temperatursprüngen am Beispiel der DTL-Szenarien H3 und H5	62
5-9	Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der mit dem Abkühlungsgesetz berechneten und gemessenen Produkttemperaturen von MAP-Hackfleisch im DTL-Szenario H3	63
5-10	Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der mit dem Abkühlungsgesetz berechneten und gemessenen Produkttemperaturen von MAP-Hackfleisch im DTL-Szenario H12	64
5-11	Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der mit dem Abkühlungsgesetz berechneten und gemessenen Produkttemperaturen von MAP-Hackfleisch im DTL-Szenario H10	64
5-12	Arrhenius-Plots der Frischeparameter GKZ und SI von MAP-Hackfleisch	65
5-13	Vergleich der Verläufe der GKZ (\bar{x}) von MAP-Schweinehackfleisch in statischen Messreihen (2 und 20 °C) mit Simultananpassungen	67
5-14	Verlauf der mit der O'Neill-Funktion kalibrierten Entwicklungsraten der Frischeparameter (GKZ und SI) des Hackfleischs im Vergleich zum Verlauf der berechneten Raten der Arrhenius-Funktion	68
5-15	Haltbarkeit von MAP-Hackfleisch, unterschieden nach verwendeter Frischeparameter-Modell-Kombination	70
5-16	Korrelation der prognostizierten Haltbarkeitsendpunkte von GKZ und SI, unterschieden nach verwendeter Temperatur-Response-Funktion . .	70

5-17	Gegenüberstellung empirisch bestimmter und mit Hilfe des O'Neill geschätzter Veränderungen der Frischeparameter (GKZ/SI), in Abhängigkeit von der Lagerdauer, am Beispiel der DTL-Szenarien H17 und H18	72
5-18	Biologische Zeit aufgetragen gegen die Entwicklung der GKZ für die DTL-Szenarien H1-H18 (MAP-Hackfleisch)	74
5-19	Verläufe der Simulationsszenarien Ia-Ic	77
5-20	Verläufe der Simulationsszenarien IIa-IIc	79
5-21	Zeitliche Entwicklung des Qualitätsindex von Lachsforellen der statischen Messreihen bei 7 °C	81
5-22	Vergleich der zeitlichen Entwicklung des Sensorikindex (SI) und des Qualitätsindex (QI) von Lachsforellen bei einer Lagertemperatur von 12 °C	82
5-23	Gegenüberstellung der Wachstumsraten in Abhängigkeit von der Temperatur unterschieden nach verwendeter Wachstumsfunktion	83
5-24	Verlauf des Frischeparameters QI nach Temperatursprung auf 20 °C am Beispiel des DTL-Szenarios F5	84
5-25	Verlauf des Frischeparameters QI nach Temperatursprung auf 30 °C am Beispiel des DTL-Szenarios F7	84
5-26	Verlauf der gemessenen Produkttemperatur und Anpassung der Exponentialfunktion am Beispiel des DTL-Szenarios F3	85
5-27	Verlauf der Umgebungstemperatur sowie der mit dem Abkühlungsgesetz berechneten und gemessenen Produkttemperaturen der Lachsforellen im DTL-Szenario F5	86
5-28	Arrhenius Plots der Wachstumsraten des QI von Lachsforellen unterschieden nach angewendeter Wachstumsfunktion	87
5-29	Simultane Anpassung der zeitliche Entwicklung des Qualitätsindex von Lachsforellen der statischen Messreihen (2-20 °C)	88
5-30	Mit der O'Neill-Funktion kalibrierte Entwicklungsraten des Frischeparameters QI der Lachsforellen und Vergleich mit Arrhenius-Modell	88
5-31	Berechnete Haltbarkeitsendzeiten der unterschiedlichen Modellkombinationen (Lachsforellen)	90

5-32	Biologische Zeit aufgetragen gegen die Entwicklung des QI für die DTL-Szenarien F1-F8	91
5-33	Vergleich von empirisch gemessenen und simulierten Werten am Beispiel des DTL-Szenarios F7	92
A-1	Screenshot vom Simulationsmodell	137
A-2	Übersicht über Verläufe der GKZ in den statischen Zeitreihen (2-20 °C) .	140
A-3	Übersicht über Verläufe der IKZ in den statischen Zeitreihen (2-15 °C) .	140
A-4	Übersicht über Verläufe von <i>Pseudomonas ssp</i> in den statischen Zeitreihen (2-15 °C)	141
A-5	Übersicht über pH-Wert-Verläufe von <i>Pseudomonas ssp</i> in den statischen Zeitreihen (2-15 °C)	141
A-6	Verläufe der Simulationsszenarien IIIa-IIIc	142
A-7	Verläufe der Simulationsszenarien IVa-IVc	143
A-8	Biologische Zeit aufgetragen gegen die Entwicklung des QI für die statischen Zeitreihen	144

Tabellenverzeichnis

2-1	Übersicht über ermittelte Aktivierungsenergien unterschiedlich gelagerter LM	15
2-2	Übersicht über Modelle zur Prognose des Wachstums von Mikroorganismen unter isothermen Bedingungen modifiziert nach Ross u. Dalgaard (2004)	16
2-3	Vergleich maximal gemessener Produkttemperaturen während eines 1 stündigen Transports ungeschützter und in einer Kühlbox gelagerter Lebensmittel (James u. Evans 1992)	24
2-4	Übersicht über Ergebnisse von Messungen von Durchschnittstemperaturen (ϕ) in Haushaltskühlschränken (eigene Zusammenstellung)	25
2-5	Minimale Wachstumstemperaturen ausgewählter Mikroorganismen nach Upmann u. a. (2000)	27
2-6	Richt- und Warnwerte zur Beurteilung von ungewürztem und gewürztem Hackfleisch auf Handelsebene (DGHM 2006)	29
4-7	Merkmale unterschiedlicher Produktvarianten	34
4-8	Varianten von Wärmebelastungen für die drei Stufen des DTL-Modells .	35
4-9	Charakterisierungsmerkmale dreier Konsumententypen (Thomas 2007; Littek 2005; James u. James 2002)	36
4-10	Belastungsmatrizen: MAP-Hackfleisch	37
4-11	Belastungsmatrizen: Foliengeschützte Lachsforellen	38
4-12	Matrix zur Einstufung des Frischestatus von MAP-Schweinehackfleisch	38
4-13	Matrix zur Einstufung des Frischestatus von foliengeschützter Lachsforelle	39
4-14	Übersicht über die Anzahl von Proben und Frischedaten aus Untersuchungen von MAP-Hackfleisch und Lachsforellen.	43

4-15 Zuordnung sensorisch ermittelbarer Merkmalseigenschaften von MAP-Hackfleisch zu einer Notenskala von 0-3	47
4-16 Zuordnung sensorisch ermittelbarer Merkmalseigenschaften von Lachsforellen zu einer Notenskala von 0-3	49
4-17 Übersicht über die untersuchten Frischeparameter von MAP-Hackfleisch sowie foliengeschützter Lachsforellen und die Art der angewandten Methode	52
5-18 Übersicht über die mit Hilfe der logistischen Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) geschätzten Wachstumsraten ($\mu_{max} h^{-1}$) mit Bestimmtheitsmass (R^2) und Standardabweichung (s) für die mikrobiologischen Frischeparameter	57
5-19 Mit logistischer Wachstumsfunktion (Gleichung 2.3) geschätzte Wachstumsraten, Standardabweichung (s) und Bestimmtheitsmass (R^2) des Sensorikindex von MAP-Hackfleisch	60
5-20 Anpassungsparameter (Arrhenius-Parameter) für MAP-Hackfleisch	66
5-21 Anpassungsparameter (O'Neill-Parameter) für MAP-Hackfleisch	67
5-22 Aus den Temperatur-Response-Funktionen geschätzte Haltbarkeitszeiten in Stunden für MAP-Hackfleisch auf Grundlage mikrobiologisch und sensorisch erfaßbarer Haltbarkeitsendpunkte	69
5-23 Gegenüberstellung der aus dem O'Neill-Modell geschätzten Haltbarkeitsendzeiten in Stunden für MAP-Hackfleisch ermittelt aus den Parametern GKZ und SI für die DTL-Szenarien H1-H18	73
5-24 Adjustiertes R^2 der Temperatur-Response-Funktionen unterteilt nach Frischeparametern GKZ und SI	74
5-25 Zuordnung produktspezifischer und prozeßspezifischer Kriterien bei der Variation von Simulationsläufen zu Konsumententypen	76
5-26 Geschätzte Haltbarkeitsendzeiten, Produkttemperaturen und Frische der DTL-Simulationsläufe Ia-IVc	80
5-27 Übersicht über die geschätzten Wachstumsraten des Qualitätsindex von Lachsforellen ermittelt mit Gleichung 2.2 und 2.3	83
5-28 Kinetische Daten (Arrheniusparameter) für Lachsforellen	86
5-29 Anpassungsparameter (O'Neill-Parameter) für Lachsforellen	89

5-30	Adjustierte R^2 der Temperatur-Response-Funktionen unterschieden nach angewendeter Wachstumsfunktion (mit und ohne Berücksichtigung einer Anpassungs-Phase	89
5-31	Aus den Temperatur-Response-Funktionen geschätzte Haltbarkeitszeiten in Stunden für Lachsforellen auf Grundlage sensorisch (QI) erfassbarer Haltbarkeitsendpunkte. Angepasst mit Gleichung 2.3	90
5-32	Übersicht der vor und nach Temperatursprüngen empirisch gemessenen und vom Modell geschätzten Qualitätsindices	93
A-1	Aus den Temperatur-Response-Funktionen geschätzte Haltbarkeitszeiten (in Stunden) für Lachsforellen auf Grundlage sensorisch (QI) erfassbarer Haltbarkeitsendpunkte (angepasst mit Gleichung 2.2)	144

A. Anhang

Theoretische Grundlagen

Ausführliche Darstellung des Baranyi-Ansatzes

$$y(t) = y_0 + \mu_{max}A(t) - \frac{1}{m} \ln \left(1 + \frac{e^{m\mu_{max}A(t)} - 1}{e^{m(y_{max}-y_0)}} \right) \quad (\text{A.1})$$

$$A(t) = t + \frac{1}{v} \ln \left(\frac{e^{-vt} + q_0}{1 + q_0} \right) \quad (\text{A.2})$$

Dabei ist $y(t) = \ln N(t)$, $y_0 = \ln N_0$ und v die Wachstumsrate des limitierenden Substrats, das gleich μ_{max} angenommen wird (McKellar u. Lu 2004).

Material und Methoden

Verwendete Software

Für die Auswertung der Ergebnisse wurden die Programme QuickTTestX Version 1.1, Microsoft Excel X und proFit Version 6.0.5 für Mac OS X (Tiger) benutzt. Für die Modellerstellung dienten weiterhin die Programme c-Fit (Prof. H.-P. Helfrich, Bonn) und DM-Fit Version 2.0 (<http://www.ifr.bbsrc.ac.uk/>, Stand: 15. August 2007). Abb. A-1 zeigt das auf Excel basierende Simulationsmodell.

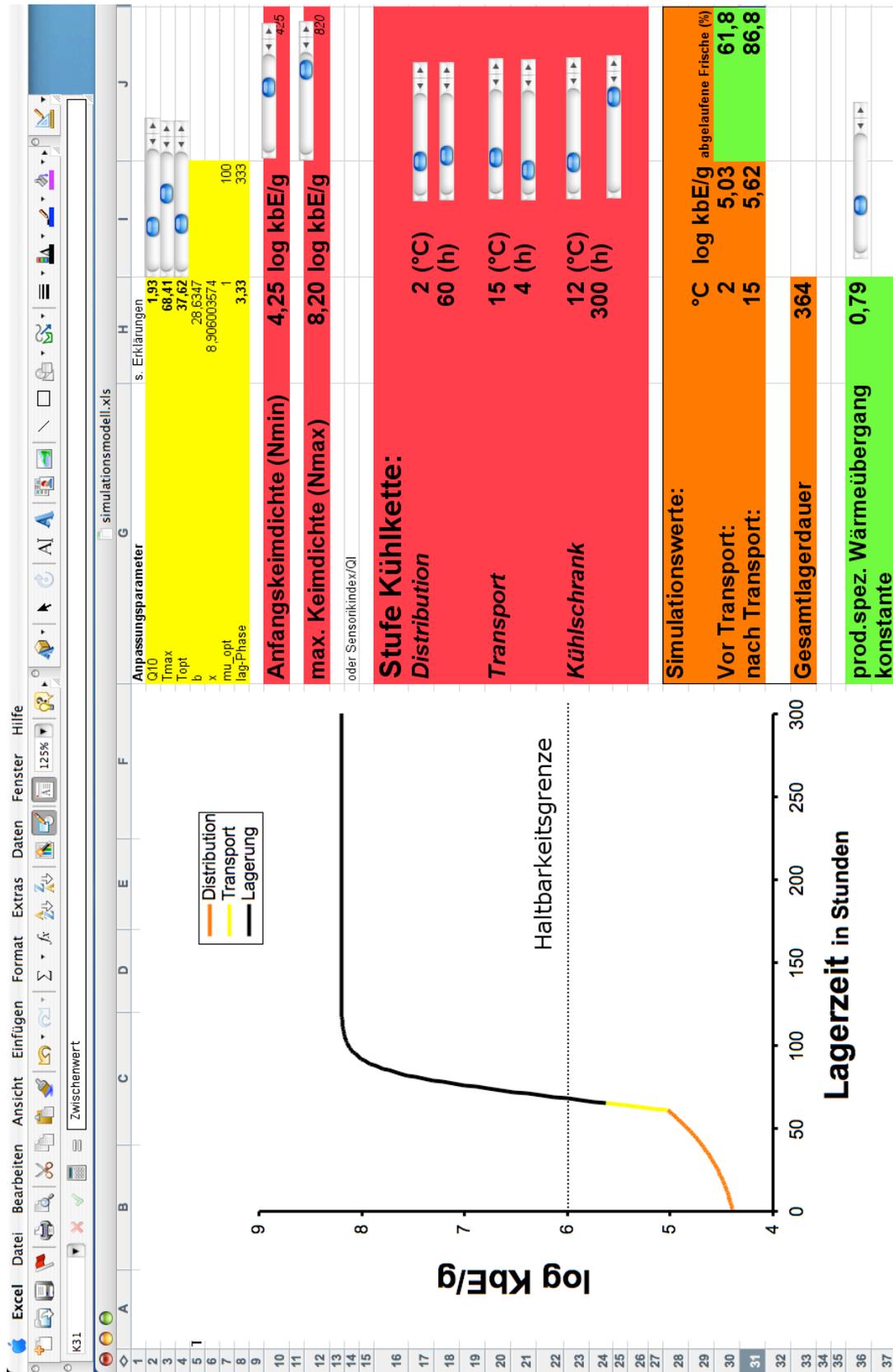


Abbildung A-1.: Screenshot vom Simulationsmodell

Verwendetes Material

Materialien und Geräte für die Lagerung:

- Datenlogger testostor® 175 für Temperatur [Fa. Testo]
- Comfort-Software V2.5 [Fa. Testo]
- Klimaprüfschrank, Incubator [Fa. Sanyo]
- Klimaprüfschrank, Incubator [Fa. Friocell]
- Plastikschaalen (60cm x 10cm)
- Alufolie
- Frischhaltefolie
- handelsübliche Thermobox

Materialien und Geräte für die Probenaufbereitung:

- Waage [Fa. Kern, 572 digital]
- Stomacherbeutel, 400ml mit Filtereinsatz
- Stomacher
- sterile Pinzetten und Scheren
- Physiologische Kochsalzlösung (0,9%-ig)

Materialien, Medien und Geräte für die mikrobiologische Untersuchung:

- BacTrac 4100 [Fa. SyLab]
- Software BacTrac [Fa. SyLab]
- Nährmedium 002A [Fa. SyLab] für MAP-Hackfleisch
- Nährmedium 001A [Fa. SyLab] für Fisch
- Messzellen 10ml [Fa. SyLab]
- Plate Count Agar (Caseinpepton-Glucose-Hefeextrakt-Agar) [Fa. Merck]

- Pseudomonas-Agar-Basis [Fa. Oxoid, Nr. CM 559]
- Pseudomonas-C-F-C-Selektiv-Supplement [Fa. Oxoid, Nr. SR 103]
- Glaspipetten (0,1 ml bis 10 ml)
- Eppendorf Pipetten (100 μ l und 1000 μ l)
- Eppendorf Spitzen (100 μ l und 1000 μ l)
- Reagenzröhrchen mit Kappen, Röhrchenständer, Metallkörbe
- Drigalskispatel
- Bechergläser, Messzylinder
- Schüttler VF2 Fa. [Janke & Kunker]
- Petrischalen
- Brutschränke (25°C, 30°C) [Fa. WTC Binder]
- Sterilautoklav
- Dampftopf
- Autoklav
- Heissluftsterilisator [Fa. Heraeus]
- Wasserbad

Materialien und Geräte für die chemische Untersuchung:

- pH-Meter pH-STAR CPU [Fa. Matthäus]
- Pufferlösung

Materialien und Geräte für die sensorische Untersuchung:

- Plastiköpfchen
- Plastiklöffel
- Bewertungsbogen

Ergebnisse

Veränderung der Parameter in den Zeitreihenmessungen

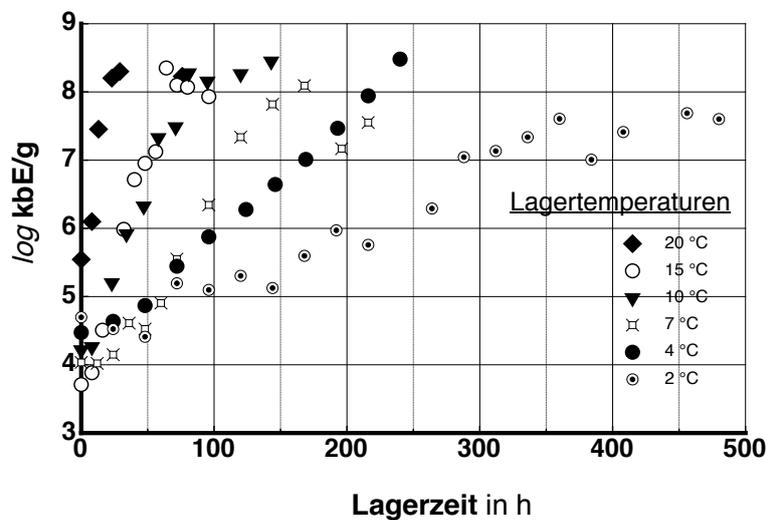


Abbildung A-2.: Übersicht über Verläufe der GKZ in den statischen Zeitreihen (2-20 °C)

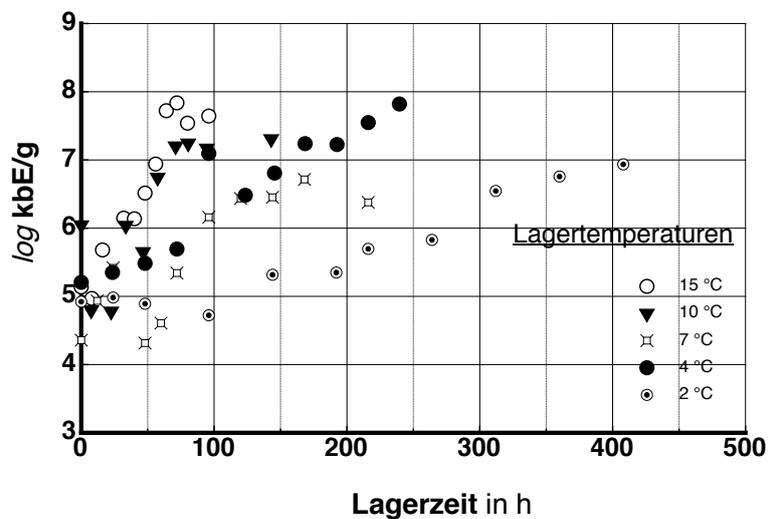


Abbildung A-3.: Übersicht über Verläufe der IKZ in den statischen Zeitreihen (2-15 °C)

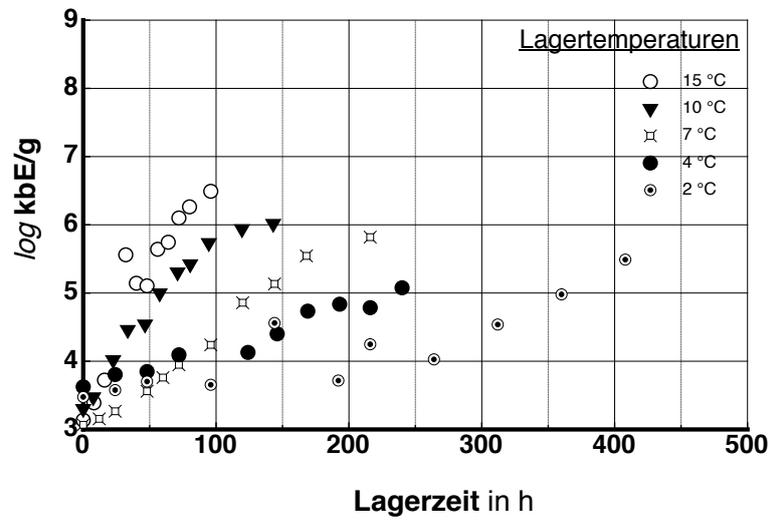


Abbildung A-4.: Übersicht über Verläufe von *Pseudomonas ssp* in den statischen Zeitreihen (2-15 °C)

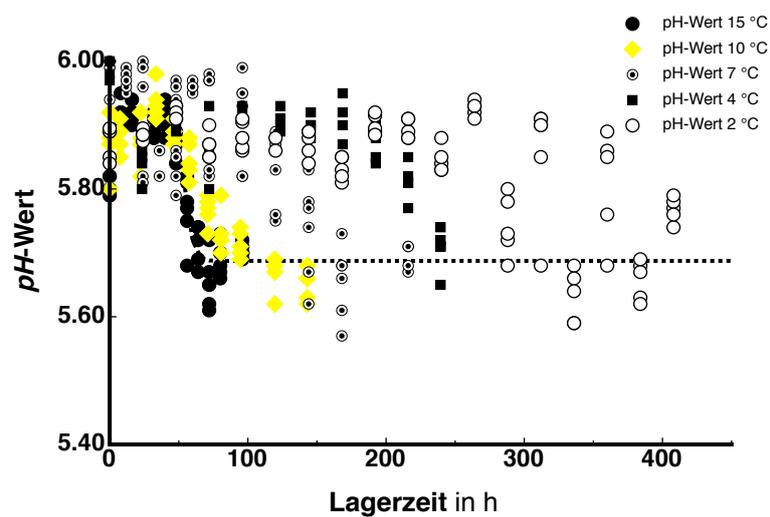


Abbildung A-5.: Übersicht über pH-Wert-Verläufe von *Pseudomonas ssp* in den statischen Zeitreihen (2-15 °C)

Simulationsläufe MAP-Hackfleisch

Annahmen Simulationsläufe IIIa-IIIc:

DTL-Simulationslauf IIIa (konsequenter Konsument): Achtet auf Schutzmassnahmen während des Einkaufs und des Transports und lagert in produktspezifischen Kühlzonen. Produkt hat jedoch erhöhten Anfangskeimgehalt

DTL-Simulationslauf IIIb (sorgloser Konsument): Achtet nicht auf Schutzmassnahmen vor Wärmeeinflüssen. Lagert bei erhöhten Lagertemperaturen

DTL-Simulationslauf IIIc (sorgloser Konsument): Benutzt eine Kühltasche während des Einkaufs und des Transports im Auto-Kofferraum. Lagert im Haushalt jedoch bei stark überhöhten Temperaturen. Produkt hat erhöhten Anfangskeimgehalt

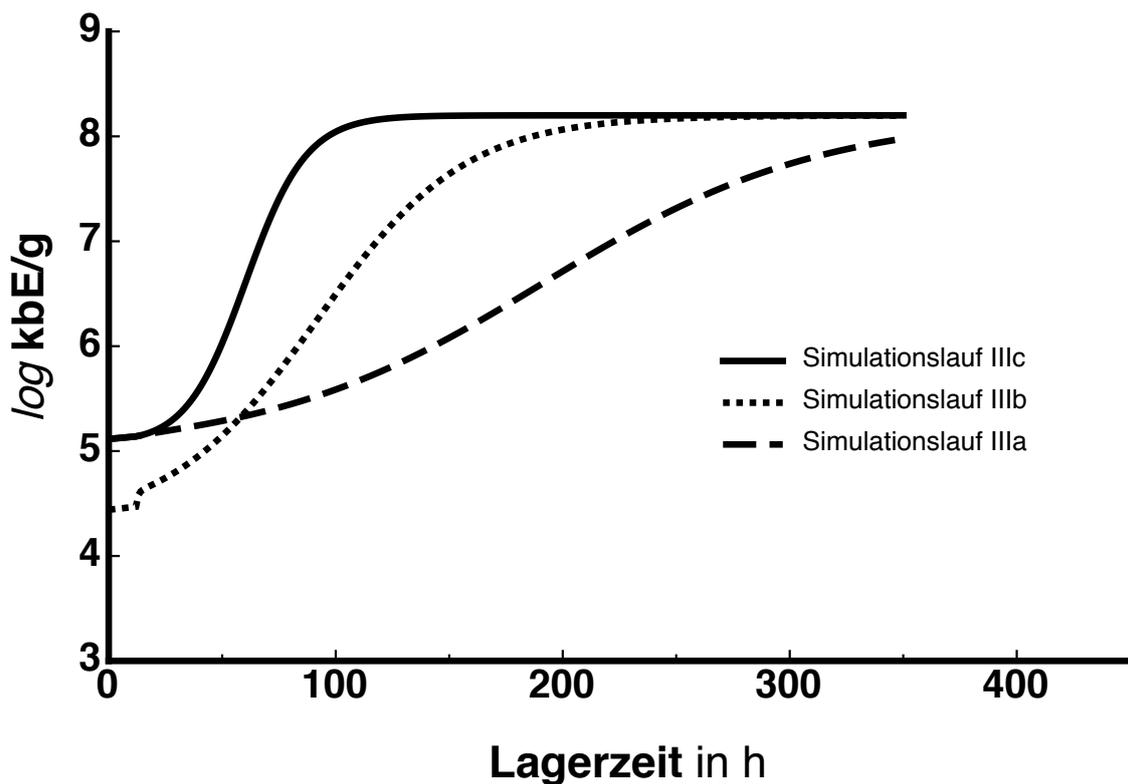


Abbildung A-6.: Verläufe der Simulationsszenarien IIIa-IIIc

Annahmen Simulationsläufe IVa-IVc:

DTL-Simulationslauf IVa (konsequenter Konsument): Produkt wird im LEH sowie im Haushalt in falscher Kühlzone gelagert, weist erhöhte Keimbelastung auf und wurde im LEH bei erhöhten Temperaturen gelagert

DTL-Simulationslauf IVb (inkonsequenter Konsument): Achtet auf Schutzmassnahmen vor Wärmeeinflüssen. Produkt wird jedoch im Haushalt und im LEH bei erhöhten Temperaturen gelagert

DTL-Simulationslauf IVc (worst-case): Konsument kauft beschädigte Verpackung und benutzt keine Kühltasche. Lagerung im LEH und Haushalt bei stark überhöhten Temperaturen

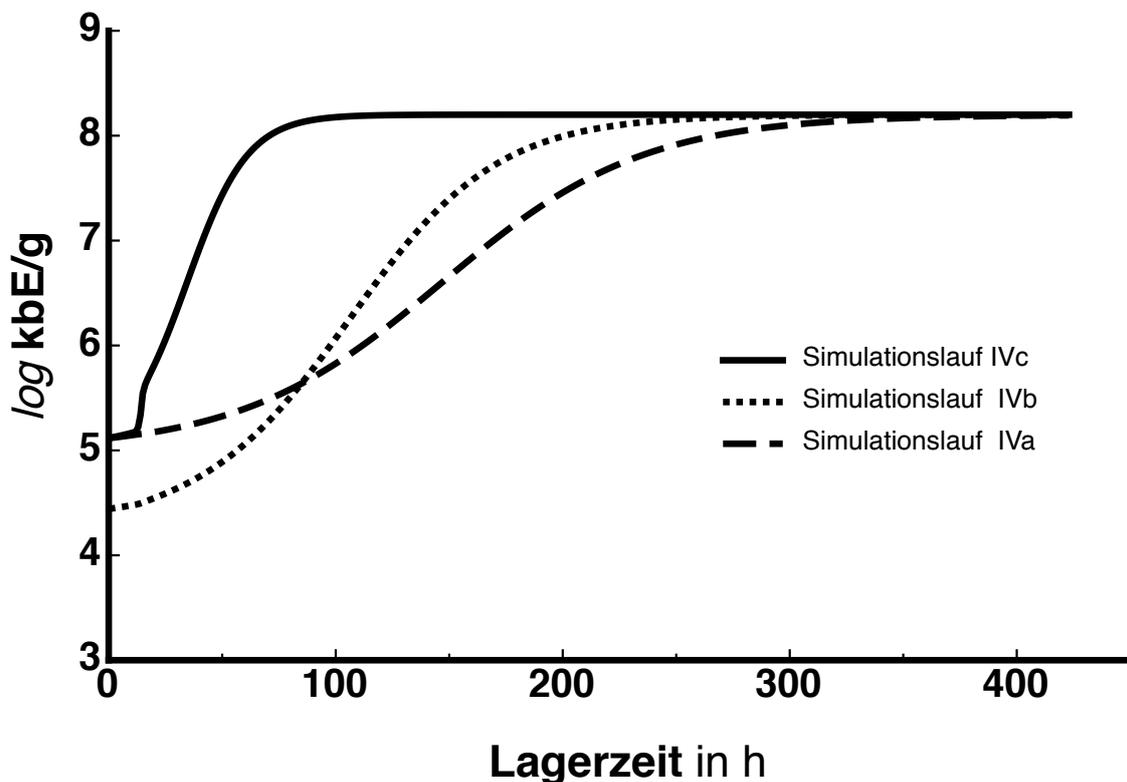


Abbildung A-7.: Verläufe der Simulationsszenarien IVa-IVc

Ergebnisse Lachsforellen

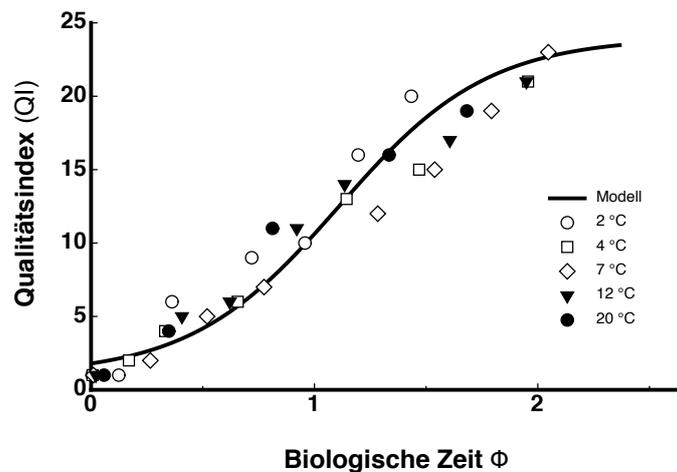


Abbildung A-8.: Biologische Zeit aufgetragen gegen die Entwicklung des QI für die statischen Zeitreihen

Tabelle A-1.: Aus den Temperatur-Response-Funktionen geschätzte Haltbarkeitszeiten (in Stunden) für Lachsforellen auf Grundlage sensorisch (QI) erfassbarer Haltbarkeitsendpunkte (angepasst mit Gleichung 2.2)

Temperatur in °C	TRF	HBK (Stunden)	Δ
2	O'Neill	184	+14
	Arrhenius	170	
4	O'Neill	138	+5
	Arrhenius	133	
7	O'Neill	89	-25
	Arrhenius	114	
12	O'Neill	39	-6
	Arrhenius	45	
20	O'Neill	3	-5
	Arrhenius	8	

TRF = Temperatur-Response-Funktionen

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BgVV	Bundesinstitut für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin
bzw.	beziehungsweise
DGHM	Deutsche Gesellschaft für Hygiene und Mikrobiologie
DTL	Distribution, Transport, Lagerung
dyn.	dynamisch
EHI	Eurohandelsinstitut
F	Frische
FAO	Food and Agricultural Organization der Vereinten Nationen
GKZ	Gesamtkeimzahl
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Point
HBK	Haltbarkeit
HWZ	Halbwertszeit
HH	Haushalt
IKZ	Impedanzkeimzahl
IK	ideale Kühlkette
K	Kelvin

kbE/g	koloniebildende Einheiten pro Gramm
kcal	Kilo Kalorie
kJ	Kilo Joule
KKU	Kühlkettenunterbrechung
KON	Konsument
LEH	Lebensmitteleinzelhandel
LM	Lebensmittel
ln	natürlicher Logarithmus
LMBG	Lebensmittel- und Bedarfsgegenstands-Gesetz
LMKV	Lebensmittelkennzeichnungsverordnung
log	dekadischer Logarithmus
MAP	modified atmosphere packaging
MHD	Mindesthaltbarkeitsdatum
NaCl	Natrium-Chlorid
n.n.	nicht nachweisbar
NRW	Nordrhein-Westfalen
p	Wasserdampfdruck
PK	Primärkette
PRO	Produzent
PVC	Polyvinylchlorid
q	wachstumslimitierendes substrat
QI	Qualitätsindex
QIM	Qualitätsindexmethode

r	Korrelationskoeffizient
RFID	Radio Frequency Identification
s	Standardabweichung
s.	siehe
SB-Ware	Selbstbedienungsware
SI	Sensorikindex
s.o.	siehe oben
spez.	spezifisch
stat.	statisch
Tab.	Tabelle
TRF	Temperatur-Response-Funktion
TTI	Temperatur-Zeit-Integrator
u.a.	unter anderem
USDA	Landwirtschaftsministerium der Vereinigten Staaten (amtl. United States Department of Agriculture)
WB	Wärmebelastungsvariante
WHO	World Health Organization
z.T.	zum Teil

Griechisch

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

\bar{x}	Mittelwert	
N_{max}	Maximalkeimdichte	kbE/g
N_{min}	Anfangskeimdichte	kbE/g
N_t	Keimdichte zur Zeit t	kbE/g
R	ideale Gaskonstante	$J \cdot mol^{-1}K^{-1}$
t	Zeit	h

Griechische Buchstaben

λ	Verweildauer	h
μ_{max}	max. Wachstumsrate	h^{-1}
ω	produktspez. Wärmeübergangskonstante	h^{-1}, min^{-1}
Φ	Biologische Zeit	dimensionslos
τ	lag-Phase	h
ϑ	Temperatur	°C

Indizes

0	Referenz
A	Anfang
D	Distribution
HF	Hackfleisch
L	Lagerung
LF	Lachsforelle

LM Lebensmittel
max Maximum
opt Optimum
T Transport
U Umgebung