

Beobachtungen zur Beziehung von Redoxpotential und Keimwachstum (Teil 2)

Findings on the relationship between redox potential and bacterial growth (part 2)

W. RÖDEL und R. SCHEUER

Zusammenfassung

Der zweite Teil der Veröffentlichung über die Beziehung von Redoxpotential und Keimwachstum schließt mit seinen Ergebnissen unmittelbar an die bereits im ersten Teil beschriebenen Beobachtungen an (RÖDEL und SCHEUER, 2003a). Im ersten Teil wurde über den Einfluss der Anfangskeimdicke, der Temperatur, der Wasseraktivität und des Säuregrades auf Redoxpotential und Keimwachstum berichtet. Im zweiten Teil sollen nun die Ergebnisse der Untersuchungen über den Einfluss des Redoxpotentialverlaufes selbst, der Zusatzstoffe Natriumnitrit, Natriumascorbat, Natriumlactat und des Nährstoffangebotes dargestellt werden. Bei dem Abschnitt „Material und Methoden“ folgt unsere Darstellung exakt den Angaben, die bereits im Teil 1 beschrieben worden sind.

Summary

Part 2 of the publication ‘Findings on the relationship between redox potential and bacterial growth’ is closely connected with part 1 (RÖDEL und SCHEUER, 2003a) which described the influence of the inoculation dose, temperature, water activity and pH-value on the redox potential and microbial growth. Part 2 reports results on the influence of the redox potential itself, the additives sodium nitrite, sodium ascorbate and sodium lactate, and the nutrient situation. The materials and methods used here are identical with those reported in part 1.

Schlüsselwörter Redoxpotential – Hürdenttechnologie – *Escherichia coli* – *Listeria innocua*

Key Words redox potential – hurdle technology – *Escherichia coli* – *Listeria innocua*

Hinsichtlich der in dieser Arbeit nicht ausgeführten Abschnitte „Einleitung“ sowie „Material und Methoden“ verweisen wir auf den Teil 1 unserer Publikationsreihe (RÖDEL und SCHEUER, 2003a).

Ergebnisse

Einfluss des Redoxpotentials. Wie bereits an den Abbildungen zu den Redoxpotentialverläufen im ersten Teil unserer Darstellung (RÖDEL und SCHEUER, 2003a) zu erkennen war, fallen die Redoxpotentialkurven nicht kontinuierlich ab. In allen Fällen war ein deutliches „Einknicken“ im Redoxpotentialverlauf (Wendepunkt) zu erkennen. Wir führen diese Beobachtung auf ein Anpassungsverhalten der Mikroorganismen auf die von ihnen selbst hervor-

gerufene Redoxpotentialabsenkung zurück. Ein weiteres Beispiel für eine Verlaufskurve mit einem deutlichen Wendepunkt ist in Abbildung 10 zu sehen (die in Teil 1 begonnene Numerierung der Abbildungen wird weiter fortgeführt). Die Rahmenbedingungen (a_w -Wert = 0,968; pH-Wert = 6,0; Temperatur = 37 °C), unter denen der Versuch durchgeführt wurde, sind von untergeordneter Bedeutung, da ähnliche Beobachtungen auch bei anderen Vorgaben gemacht werden konnten.

Die Messkurve der Keimzählungen zeigte bei drei Messungen innerhalb von 24 Stunden keinen auffälligen Verlauf und ließ somit keine Rückschlüsse auf die Ursache für den ungleichmäßigen Verlauf der Redoxpotentialkurve zu. Die Keimzahl erhöhte sich innerhalb von 24 Stunden

unspektakulär von etwa 40 Millionen Keimen/ml ($\log=7,6$) auf ca. 200 Millionen Keime/ml ($\log=8,3$).

Eine differenziertere Untersuchung der Keimentwicklung in enger Zeitfolge (20-min Intervall) im Bereich des Wendepunktes machte aber die eigentliche Ursache für diesen modulierten Redoxpotentialverlauf erkennbar (s. Abb. 11). In diesem Bereich ergaben sich erhebliche Schwankungen der Keimzahlhöhen. Nach anfänglicher Reduzierung der Keimzahl, die eine Anpassung der Keime an die relativ ungünstigen Milieubedingungen widerspiegeln könnte (a_w -Wert=0,968), tritt eine Vermehrungsphase mit einer Keimzahlerhöhung von ca. 32 auf 126 Millionen Keime/ml ein. Dadurch fällt das Redoxpotential sprunghaft um nahezu 300 mV ab (von etwa 100 mV auf ca. -200 mV). Die schnelle Absenkung des Redoxpotentialwertes hat offensichtlich einen Einfluss auf die Keimvermehrung. Die Keimzahlen schwanken in einem Bereich von ca. 40 Millionen bis zu 160 Millionen Keimen/ml ($\log=7,6$ bis zu $\log=8,2$). Die daraus resultierende zeitlich begrenzte Keimreduzierung (Anpassungsphase an veränderte Milieubedingungen) mit entsprechend geringerer Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen kann die Entstehung eines Plateaus in der Redoxpotentialkurve daher durchaus plausibel begründen.

Bei günstigeren Ausgangsbedingungen (a_w -Wert=0,980) wird der Wendepunkt in der Redoxpotentialkurve deutlich flacher (s. Abb. 12). Auch die Keimzahlen zeigen nun deutlich geringere Schwankungen im Bereich des Wendepunktes. Offensichtlich kann unter den günstigeren Rahmenbedingungen eines höheren Wasseraktivitätswertes die starke Absenkung des Redoxpotentials von den Keimen wesentlich besser kompensiert werden.

Einfluss von Natriumnitrit. Natriumnitrit wird Fleischerzeugnissen als Konservierungsmittel zugesetzt. Nitrite sind starke Zellgifte und wirken als solche auch auf Bakterien. Wir untersuchten den Einfluss von Natriumnitrit auf die Redoxpotentialverläufe in praxisüblichen Konzentrationen. Neben einer Kontrollprobe wurde

Natriumnitrit in Mengen von 60 mg/kg, 100 mg/kg und 160 mg/kg dem Nährmedium zugesetzt (s. Abb. 13). Das Nährmedium wurde auf $a_w=0,979$, auf pH-Wert 7,0 und die Temperatur auf 37 °C eingestellt und mit *Listeria innocua* beimpft (ca. 2 bis 2,5 Millionen Keime/ml; $\log=6,3-6,4$).

Überraschenderweise fielen alle Redoxkurven innerhalb der ersten 6 Stunden steil ab und zeigten untereinander und auch im Vergleich zur Kontrolle ohne Nitrit keine Unterschiede. Natriumnitrit hat also keinen wesentlichen Einfluss auf den Redoxverlauf der Proben zu Beginn der Messung und während der „Exponentialphase“ der Keime. Dies deutet auf eine ungebremste Keimvermehrung bzw. Keimaktivität der Listerien, auch bei entsprechend hohen Nitritzugaben, hin. Während sich Redoxpotentialverläufe in Abhängigkeit z. B. von Temperatur, Wasseraktivität oder Säuregrad auch dadurch auszeichnen, dass eine Intensitätserhöhung der entsprechenden Hürde die Zeitdauer für den ersten nahezu waagrecht verlaufenden Redoxkurvenabschnitt entsprechend verlängert (s. Teil 1, Abb. 5, Abb. 6 und Abb. 8), zeigten hier alle Kurven unabhängig von der Intensität der Hürde, d. h. also unabhängig von der eingesetzten Nitritmenge, einen fast identischen Verlauf bis zu einem Redoxpotentialwert von ca. -400 mV. Danach gingen die Kurven, die die Redoxpotentialverläufe bei Zugabe der höchsten Nitritmengen (160 mg/kg und 100 mg/kg) repräsentierten, in einen nahezu waagrechten Verlauf über. Die Kurve für 60 mg/kg Natriumnitrit sank unter einen Wert von -500 mV weiter ab und stieg danach relativ rasch wieder in einen Bereich von ca. -400 mV an. Der tiefste Messwert von etwa -600 mV wurde nur von der Kontrollprobe ohne Nitritzugabe erreicht.

Die entsprechenden Keimzahlmessungen nach 24 Stunden vermitteln folgendes Bild: Lediglich bei der Probe, der kein Nitrit zugegeben wurde, konnte eine deutliche Keimvermehrung um ca. zwei Zehnerpotenzen festgestellt werden. Dagegen zeigten alle Proben, denen Nitrit zugegeben wurde, kein oder nur ein geringes Keim-

wachstum. Aufgrund dieser Keimzahlmessungen wäre somit eine deutlich erkennbare keimhemmende Wirkung des Nitrits feststellbar.

Die ausgeprägte keimhemmende Wirkung des Nitrits, die aufgrund der Keimzahlmessungen beobachtet werden konnte, steht nun aber in einem scheinbaren Gegensatz zu den Ergebnissen, die bei der Beobachtung der Redoxpotentialverläufe gemacht werden konnten. Alle Redoxpotentialkurven deuten zumindest in den ersten 6 Stunden auf heftige Stoffwechselaktivitäten und eine nahezu ungebremste Keimvermehrung hin. Um eine Erklärung für dieses Phänomen zu finden, haben wir zunächst den Beobachtungszeitraum auf 46 Stunden erweitert (s. Abb. 14). Nach der wenig aktiven Phase in den ersten 24 Stunden nahmen plötzlich die Listerienzahlen in den nitrithaltigen Proben von etwa 2 Millionen Keimen/ml ($\log = 6,3$) im Verlauf von fast 24 Stunden auf etwa 40 bis 50 Millionen Keime/ml ($\log = 7,6$ bis $7,7$) zu.

Wir versuchen diese Beobachtung folgendermaßen zu erklären. Die stagnierenden Keimzahlen in den ersten 24 Stunden der Messung führen wir auf ein Gleichgewicht zwischen normaler Keimvermehrung der Mikroorganismen und Keimabtötung durch Natriumnitrit zurück. Erst wenn neue Keime durch Teilung hinzugekommen sind, können davon Anteile durch die Wirkung von Natriumnitrit abgetötet werden. Diese Annahme würde die hohe Stoffwechselaktivität der Keime mit stark sinkenden Redoxwerten bei gleichzeitig nahezu unveränderten Keimzahlhöhen in den ersten 24 Stunden der Untersuchung erklären. Danach lässt die Wirkung des Nitrits nach, da Nitrit relativ schnell abgebaut wird, und die Keimzahl steigt wieder an.

Unsere Beobachtungen mit einer wesentlich geringeren Anfangskeimdichte könnten diese Annahme bestätigen (s. Abb. 15). Unter sonst gleichen Rahmenbedingungen wurde eine Kontrollprobe und Proben mit 60 und 100 mg/kg Natriumnitrit mit ca. 6300 Keimen/g ($\log = 3,8$) beimpft. Aufgrund der geringeren An-

fangskeimdichte stellten sich in diesem Beispiel die minimalen Redoxpotentialwerte erst nach 21 bis 24 Stunden ein. Ansonsten zeigten die Redoxpotentialverläufe ein ähnliches Bild wie schon in Abbildung 14 gezeigt. Auch hier wiesen die Mikroorganismen, trotz des zugesetzten Natriumnitrits, eine hohe Stoffwechselaktivität auf.

Betrachtet man jedoch die Keimzahlen, so ist hier ein völlig anderes Verhalten zu beobachten. Aus der relativ niedrigen Anfangskeimzahl ($\log = 3,8$) entwickelten sich im Verlauf von etwa 24 Stunden Keimzahlhöhen von 2,5 Millionen Keime/ml ($\log = 6,4$) bei 100 mg/kg Nitrit im Nährmedium, 25 Millionen Keime/ml ($\log = 7,4$) bei 60 mg/kg Nitrit und 158 Millionen Keime/ml ($\log = 8,2$) in der Kontrolle. Nur die Kontrollprobe zeigte danach weiteres Keimwachstum. Bei allen anderen Proben stagnierten danach die Keimzahlhöhen völlig.

Die Keime müssen sich zunächst vermehren, um durch Natriumnitrit abgetötet werden zu können. Aufgrund der Statistik („Trefferquote des Nitrits mit einem Bakterium“) bildet sich erst bei einer bestimmten Keimzahlhöhe ein „Fließgleichgewicht“ zwischen Keimwachstum und Keimabtötung (durch Natriumnitrit) aus. Damit würde sich die ‚Hürde‘ Natriumnitrit im Ergebnis von den bisher beschriebenen anderen mikrobiologisch wirksamen Hürden sehr deutlich unterscheiden, da durch Natriumnitrit offensichtlich weder die „lag-Phase“ noch die „log-Phase“ der Listerien beeinflusst wird. Die offensichtlich auch unter Einwirkung von Natriumnitrit hohe Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen, bei gleichzeitig fast stabiler Zahl lebender Keime nach Erreichen einer bestimmten Keimzahlhöhe, könnte im Ergebnis auf eine hohe „Dunkelziffer“ abgestorbener Keime hindeuten. Dieser potentielle „Bakterienfriedhof“ dürfte z. B. bei der Risikobewertung eines nitrithaltigen Lebensmittels, abhängig von der Keimart, nicht ganz ohne Bedeutung sein.

Einfluss von Natriumascorbat. Natriumascorbat wird häufig gepökelten Fleischerzeugnissen zugesetzt, um eine schnelle

und gute Ausbildung der Pökelfarbe zu erreichen. Natriumascorbat wirkt reduzierend. Wir haben die Wirkung dieses Stoffes auf die Bakterienvermehrung und den Redoxpotentialverlauf untersucht (s. Abb. 16).

Der Nährbouillon wurde dazu Natriumascorbat in Mengen von 1000, 500 und 300 mg/kg zugefügt. Daneben wurde eine Kontrollprobe ohne Ascorbatzusatz untersucht. Bei allen geprüften Ascorbatmengen konnte eine sofortige Absenkung des Redoxpotentialwertes um 450 bis 500 mV beobachtet werden. Diese sehr schnelle Absenkung des Redoxpotentials kann nicht auf eine Wirkung von Mikroorganismen zurückgeführt werden, sondern ist eine Folge der Redoxpotential senkenden Wirkung des Ascorbats. Alle Redoxpotentialkurven zeigten einen ähnlichen Verlauf, sie sind jedoch im Vergleich zur Kontrollprobe durch die Wirkung des Ascorbats dosisabhängig parallel nach unten verschoben.

Hinsichtlich der Keimvermehrung hat das Natriumascorbat nur einen unwesentlichen - kaum nachweisbaren - Einfluss. Es liegt nahe, dass diese geringe Beeinträchtigung der Keimvermehrung durch die niedrigen Redoxpotentialwerte am Startpunkt der Messung verursacht worden ist. Diese Daten lassen in erster Linie den Schluss zu, dass ganz offensichtlich die Hürde Redoxpotential im Vergleich zu anderen Hürden von nachrangiger Bedeutung ist.

Einfluss von Natriumlactat. Natriumlactat ist ein Salz von relativ geringem Molekulargewicht, das in vergleichsweise hohen Mengen Fleischerzeugnissen zugesetzt werden kann. Es sollte daher einen merklichen Einfluss auf den Wasseraktivitätswert der Probe haben. So wird z. B. durch 3 g Natriumlactat der Ausgangs-Wasseraktivitätswert von 100 ml Fraser-Selektiv-Bouillon® von 0,979 auf einen Endwert von 0,969 abgesenkt. Ein Wasseraktivitätswert von 0,969 stellt für viele Mikroorganismen, insbesondere für gramnegative Keime, bereits eine beträchtliche Hürde dar. Vieles spricht dafür, dass - die häufig beschriebene - keimhemmende Wirkung von

Natriumlactat vor allem auch auf einer Absenkung des Wasseraktivitätswertes im Substrat beruht (HECHELMANN *et al.*, 1996; ALBERT *et al.*, 2002). Der Vorteil von Natriumlactat besteht dabei darin, dass der Wasseraktivitätswert, ähnlich wie durch Zugabe entsprechender Kochsalzmengen, abgesenkt wird, ohne jedoch den „Salzgeschmack“ zu beeinflussen.

Die Redoxpotentialverläufe zeigten folglich auch ein ganz ähnliches Verhalten wie bei entsprechender Kochsalzzugabe (s. Abb. 17). Die Zugabe von einem Gramm Natriumlactat/ 100 ml führte gegenüber der Kontrollprobe nur zu einem geringen Unterschied (a_w -Absenkung von 0,979 auf 0,976), während bei höheren Natriumlactatmengen deutlich zeitliche Verschiebungen der Redoxpotentialkurven beobachtet werden konnten. Ein vergleichbares Bild ergibt dann auch die Keimzählung. Kontrollprobe und Probe mit nur einem Gramm Natriumlactat zeigten kaum Unterschiede, während die Proben mit den höheren Lactatmengen reduzierte Keimzahlen aufwiesen.

Einfluss des Nährstoffangebotes. Eine Begrenzung des Nährstoffangebotes stellt auch für Bakterien eine elementare Hürde dar. Eine Verminderung der Nährstoffe führt, wie bei allen lebenden Zellen, auch bei Bakterien zur Reduzierung oder zum Stillstand der Aktivitäten und damit zur Einstellung der Keimvermehrung. Um zu demonstrieren, wie sich derartige Mangelerscheinungen auf das Keimwachstum und den Redoxpotentialverlauf auswirken, haben wir das Verhalten der Mikroorganismen in einer Nährbouillon bei üblicher Verdünnung mit dem Verhalten in einer Nährbouillon, die um den Faktor 100 verdünnt wurde, verglichen (s. Abb. 18).

Die Redoxpotentialkurven zeigten, dass eine Reduzierung des Nährstoffangebotes die „Adaptierungsphase“ der Listerien ganz offensichtlich verlängert. In unserem Beispiel betrug der Zeitunterschied zwischen beiden Proben vom waagrecht verlaufenden Kurventeil bis zum exponentiell abfallenden Kurventeil ca. 9 Stunden. Auch die maximal erreichbaren tiefsten Redoxwerte unterschieden sich für die

beiden Proben deutlich. Während die um den Faktor 100 verdünnte Probe nur einen Redoxwert von etwa -350 mV erreichte, fiel die Vergleichsprobe (ohne zusätzliche Verdünnung) auf einen Wert von unter -600 mV ab. Auch beim Keimwachstum zeigte sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Proben. Bei vollem Nährstoffangebot bildeten sich innerhalb von 20 Stunden ca. 1 Milliarde Keime/ml ($\log = 9$), während sich bei vermindertem Nährstoffangebot im gleichen Zeitraum lediglich ca. 50 Millionen Keime/ml ($\log = 7,7$) entwickeln konnten.

Diskussion

Die nachfolgende Diskussion umfasst sowohl den ersten Teil als auch den zweiten Teil unserer Publikationsreihe. Die Diskussion ist in wesentlichen Teilen bereits im Ergebnisteil durchgeführt worden. Nahezu alle Untersuchungen wurden mit dem „Testkeim“ *Listeria innocua* (Isolat Li 13 der Stammsammlung der Bundesanstalt für Fleischforschung) in Fraser-Bouillon mit Supplement[®] durchgeführt und nur in Einzelfällen ebenfalls mit *Escherichia coli* Isolaten (Stämme: E 162, E 163, E 164 der Stammsammlung der Bundesanstalt für Fleischforschung) in Standard-I-Nährbouillon[®]. Die Untersuchungen sollten im wesentlichen zu einem besseren Verständnis der Hürdentechnologie und insbesondere zu einer genaueren quantitativen Erfassung einzelner Hürden beitragen. Dazu wurden Testkeime unterschiedlichen Hürden ausgesetzt und über einen längeren Zeitraum die Redoxpotentialverlaufskurven und das Keimwachstum bestimmt.

Die Redoxpotentialverlaufskurven haben in allen Fällen den Charakter von „umgedrehten“ Wachstumskurven. Diese dürfen jedoch keineswegs gleichgesetzt werden, da die Redoxpotentialkurven völlig andere Eigenschaften haben. Die Redoxpotentialverläufe reagieren auf Stoffwechselprodukte und Umsetzungen der Keime, die in Wechselwirkung mit dem Nährmedium stattfinden. Die Redoxpotentialkurven „hinken“ daher von vornherein dem eigentlichen Keimwachstum zeitlich hinter-

her. Außerdem haben Redoxpotentiale eine gewisse „Grundempfindlichkeit“, d. h. erst ab einer bestimmten Keimzahlhöhe kommt es zu einem exponentiellen Abfall der Messkurven. Die Redoxpotentialkurven verlaufen daher zunächst über einen gewissen Zeitraum annähernd waagrecht, fallen dann bei höheren Keimzahlen exponentiell ab und gehen - bei geringeren Stoffwechselaktivitäten der Keime (Absterbephase) - wieder in einen linearen Teil über.

Wir führten Untersuchungen über folgende Hürden durch: Anfangskeimdichte, Wachstumstemperatur, Wasseraktivität, Säuregrad, Redoxpotential, verschiedene Zusatzstoffe (Natriumnitrit, Natriumascorbat, Natriumlactat) und die Höhe des Nährstoffangebotes. Die Redoxpotentialkurven lieferten in nahezu allen Fällen hinreichende Kriterien, um die Wirksamkeit der einzelnen Hürden quantitativ zu erfassen. Die Redoxpotentialmessung hat gegenüber den klassischen Keimzählungen darüber hinaus noch den entscheidenden Vorteil, dass sie einfach und ohne großen Aufwand durchzuführen ist und zeitnah erfolgt. Sie erlaubt also einen fast unmittelbaren Einblick in das aktuelle Geschehen in einem Nährmedium.

Komplexer zeigt sich jedoch der Wirkmechanismus des Zusatzstoffes Natriumnitrit. Natriumnitrit wird bestimmten Lebensmitteln als Konservierungsstoff zugesetzt. Zu erwarten wäre deshalb ein ähnliches Verhalten der Redoxpotentialkurven, wie wir dies bei den zahlreichen anderen Fällen unserer Untersuchung feststellen konnten. Natriumnitrit schien jedoch keinen Einfluss auf die Redoxpotentialverläufe zu haben. Die Redoxpotentialkurven deuteten vielmehr auf eine hohe Stoffwechselaktivität hin. Jedoch konnte bei zeitgleichen Keimzahlmessungen keine Keimvermehrung beobachtet werden. Wir führen diese Beobachtung auf eine Art „Fließgleichgewicht“ zwischen ständig neugebildeten Keimen und gleichzeitig durch Natriumnitrit abgetöteten Keimen zurück. So läge zwar eine hohe Stoffwechselaktivität vor, die Zahl der lebenden Keime bliebe aber relativ konstant. Unsere Ergebnisse könnten daher auf eine hohe „Dunkelziffer“

abgestorbener Keime durch die Wirksamkeit von Natriumnitrit hindeuten. Dieser potentielle „Bakterienfriedhof“ dürfte aus unserer Sicht z. B. bei der Risikobewertung eines nitrithaltigen Lebensmittels, abhängig von der Keimart, nicht ganz ohne Bedeutung sein.

Mit dem vorgestellten Messverfahren ist eine kontinuierliche Bestimmung des Redoxpotentialwertes in quasi Echtzeit (Echtzeitmonitoring des Keimverhaltens in Substraten) möglich. Diese Art der elektrischen Mikrobiologie ist aufgrund der guten Standardisierbarkeit der Methode als Grundlage für jede Art von Untersuchungen des Keimverhaltens einsetzbar.

Das vorgestellte Messverfahren bietet neben den generellen Zeit- und Kosteneinsparungen bei bestimmten Fragestellungen auch den Vorteil, auf die klassische

sehr arbeitsintensive Keimzählung verzichten zu können.

Da neben der reinen Anzahl der Keime auch ihre Leistungsfähigkeit durch Erfassung der Stoffwechselaktivität beurteilt werden kann, können Wirkmechanismen bestimmter Hürden beobachtet und interpretiert werden, was den Bereich der Lebensmittel-Risikobewertung sinnvoll unterstützen kann.

Daraus ließe sich für den Bereich der angewandten Lebensmittelmikrobiologie eine praxisnahe Methode ableiten, die die Möglichkeit eröffnet, lebensmittelrelevante Hürden und vor allem teilweise nur schwer in ihrer Wirkung abschätzbare Hürdenkombinationen an Mikroorganismen quantitativ vergleichend zu erfassen. An einer entsprechenden System-Entwicklung in dieser Richtung wird derzeit von uns gearbeitet.

Literatur

ALBERT, T., W. RÖDEL, H. HECHELMANN und M. GAREIS (2002): Untersuchungen über *Listeria monocytogenes* und die mikrobiologische Stabilität von streichfähiger Rohwurst. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Fleischforschung Kulmbach, Nr.156, 101-108.

BARBOSA-CÂNOVAS, G.V., U.R. POTHAKAMURY, PALOU, E. und B.G. SWANSON (1998): Nonthermal preservation of foods. Marcel Dekker, Inc., New York

GOULD, G.W. (1995): Homeostatic mechanisms during food preservation by combined methods. In: Food preservation by moisture control - fundamentals and applications (eds. G.V. Barbosa-Cánovas and J. Welti-Chanes) Technomic publishing company, Inc., Lancaster 397-410.

HECHELMANN, H., U. SCHMIDT und M. GAREIS (1996): Wirkung von Natriumlaktat (Purasal) auf die Mikroflora in vakuumverpacktem Brühwurstaufschnitt. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Fleischforschung Kulmbach, Nr.131, 17-26.

KNORR, D. (1998): Food technology – progress and trends. In: Food & Science – Wissenschaft im Dienste der Ernährung (ed. R. Stute), Bestfoods Europe, Euro R & D Center, Heilbronn, 137-152.

LEISTNER, L. (1995): Principles and applications of hurdle technology. In: New methods of food preservation (ed. G.W. Gould), Blackie academic & professional, London, 1-21.

LEISTNER, L. (1996): Konservierungsverfahren und Hürden-Technologie. In: Handbuch Fleisch und Fleischwaren (eds. F. Wirth, J. Barciaga und U.M. Krell) Behr's Verlag Hamburg, Kapitel 8.1-8.4.

LEISTNER, L. (1999): Combined methods for food preservation. In: Handbook of food preservation (ed. M.Shafiur Rahman), Marcel Dekker, Inc., New York, 457-485

RÖDEL, W. und R. SCHEUER (1998): Das Redoxpotential bei Fleisch und Fleischerzeugnissen. 1. Bedeutung, Messung und Berechnung des Redoxpotentialwertes. Fleischwirtsch. 78, 975-981.

RÖDEL, W. und R. SCHEUER (2003): Erfassung kinetischer Phänomene mit der Redoxpotentialmessung. Jahresbericht 2002 der Bundesanstalt für Fleischforschung Kulmbach, 61-62

RÖDEL, W. und R. SCHEUER (2003a): Beobachtungen zur Beziehung von Redoxpotential und Keimwachstum (Teil 1). Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Fleischforschung Kulmbach, Nr. 160, 115-122.

RÖDEL, W., R. SCHEUER und H. WAGNER (1989): Neues Verfahren zur Bestimmung der Wasseraktivität bei Fleischerzeugnissen. Fleischwirtsch. 69, 1396-1399.

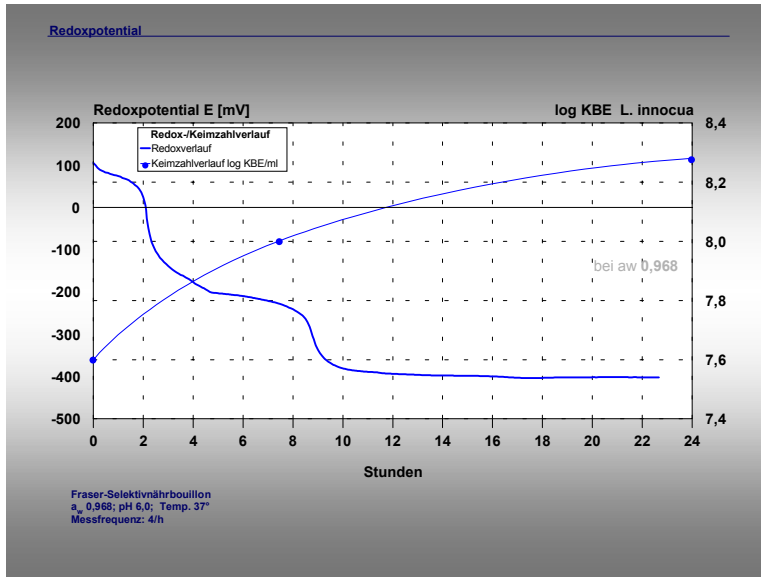


Abb. 10: Beeinflussung von Redoxpotential- und Keimzahlverlauf (Keimzählung im 8-h Intervall)

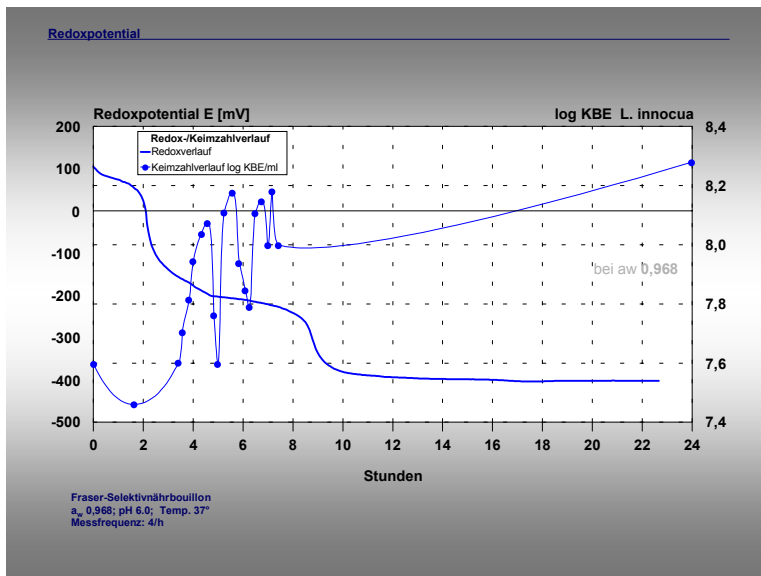


Abb. 11: Beeinflussung von Redoxpotential- und Keimzahlverlauf (Keimzählung im 20-min Intervall)

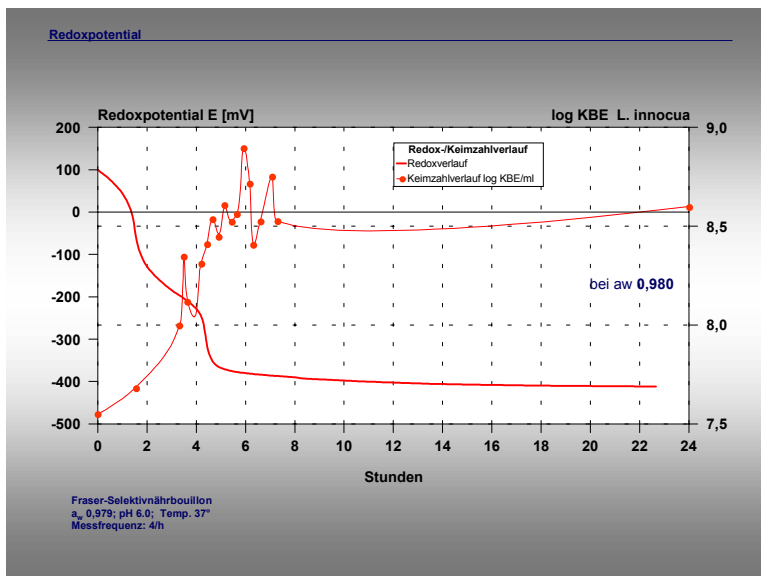


Abb. 12: Beeinflussung von Redoxpotential- und Keimzahlverlauf bei höheren Wasseraktivitätswerten (Keimzählung im 20-min Intervall)

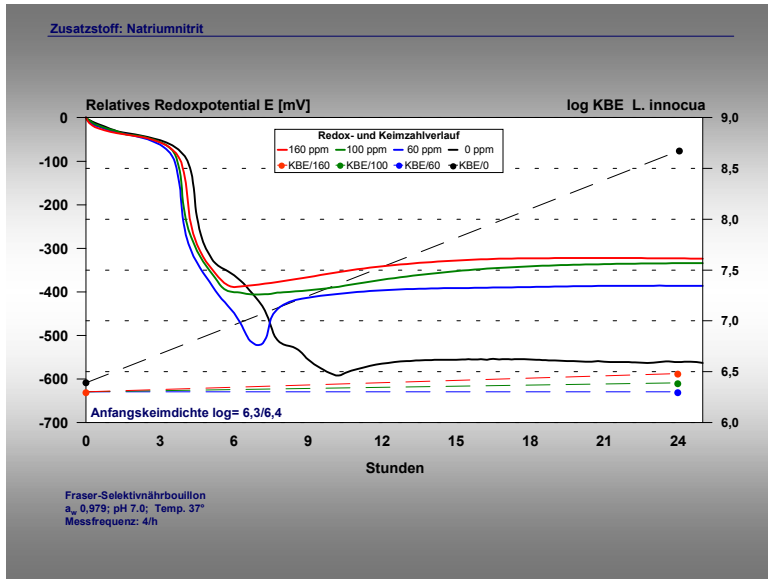


Abb. 13: Einfluss von Natriumnitrit auf das Redoxpotential und den Keimzahlverlauf über 24 h

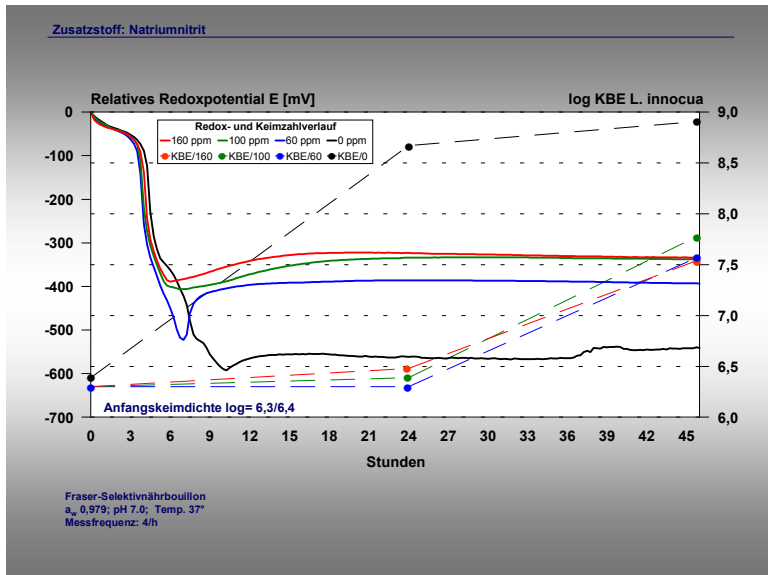


Abb. 14: Einfluss von Natriumnitrit auf das Redoxpotential und den Keimzahlverlauf über 48 h

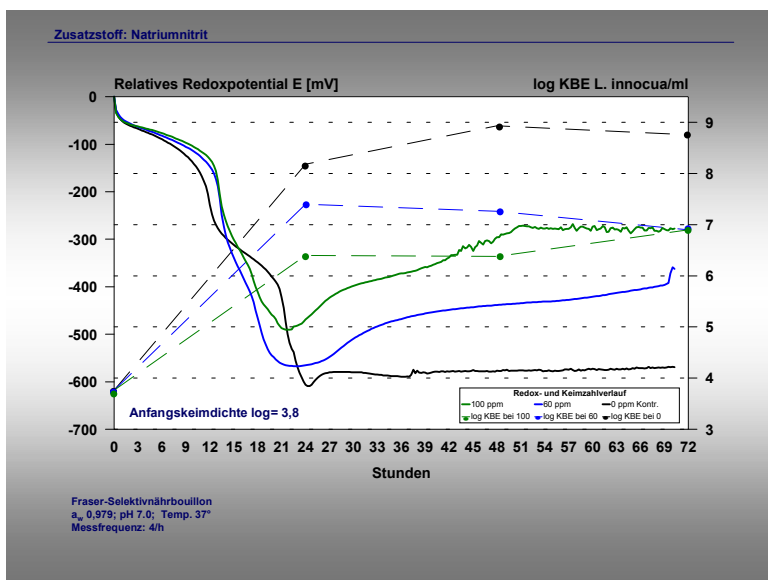


Abb. 15: Einfluss von Natriumnitrit auf das Redoxpotential bei geringer Anfangskeimdichte (Anfangskeimdichte: log KBE = 3,8)

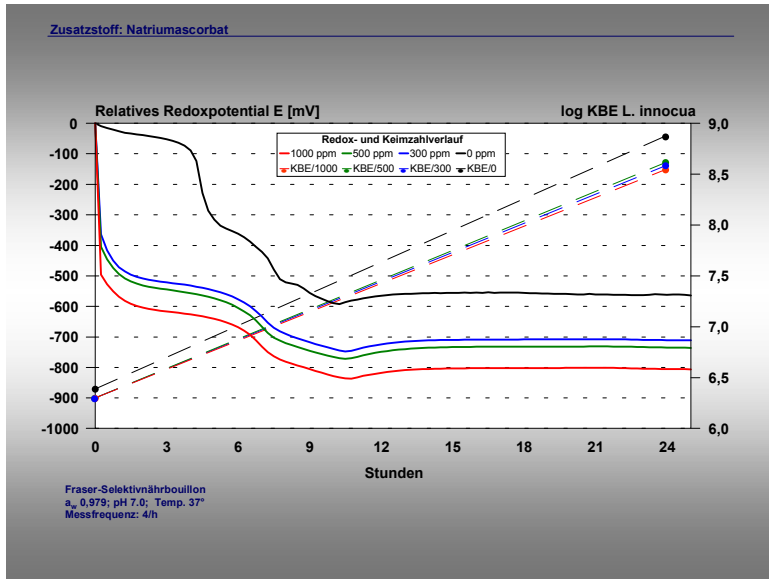


Abb. 16: Einfluss von Natriumascorbat auf das Redoxpotential und den Keimzahlverlauf

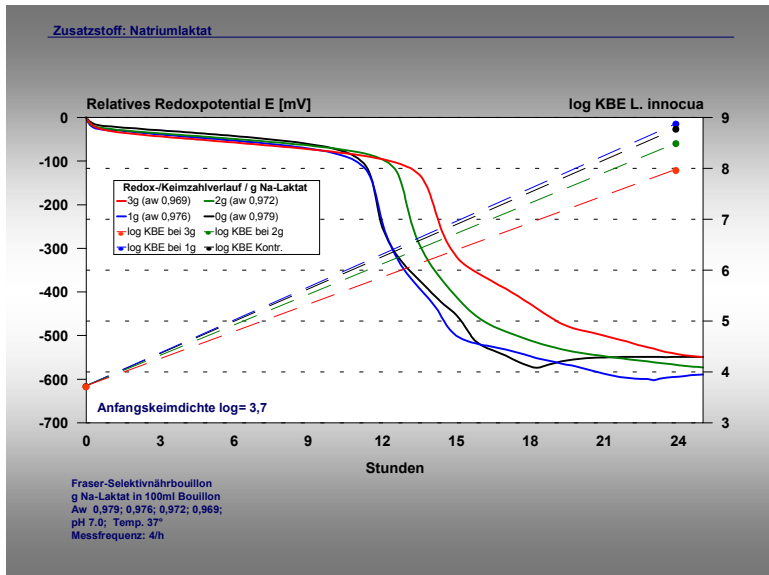


Abb. 17: Einfluss von Natriumlactat auf das Redoxpotential und den Keimzahlverlauf

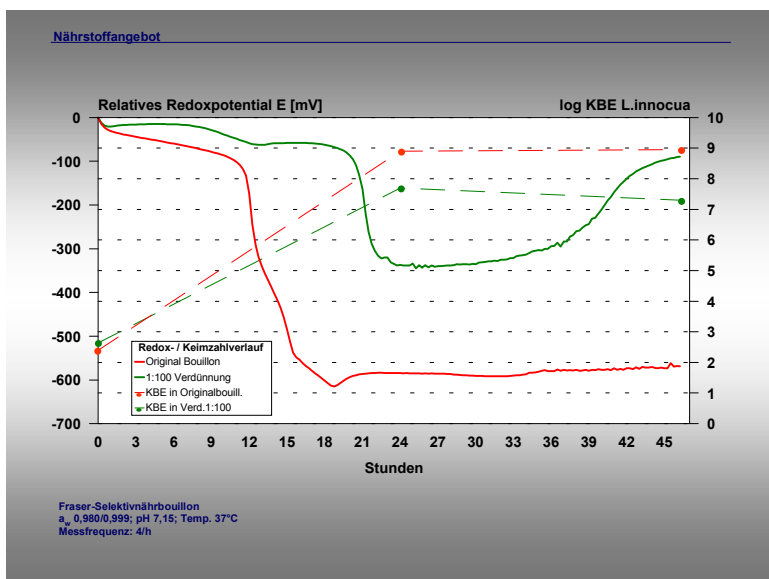


Abb. 18: Einfluss des Nährstoffangebotes auf das Redoxpotential und den Keimzahlverlauf

