

Joghurtherstellung

- Verfolgung der Säureentwicklung -



Sophia Betzler
Carl-Orff-Gymnasium Unterschleißheim
am 26.01.2007

GLIEDERUNG

I.) Geschichte des Joghurts	- 5 -
II.) Verfolgung der Säureentwicklung während der Joghurtherstellung	- 6 -
II.1.) <u>Beschreibung der Joghurtherstellung</u>	- 6 -
II.1.1.) <u>Grundlage der Joghurtherstellung</u>	- 6 -
II.1.2.) <u>Die Joghurtherstellung</u>	- 6 -
II.1.3.) <u>Eigenschaften der verwendeten Milch</u>	- 7 -
II.1.2.1.) <u>Abtöten unerwünschter Bakterien</u>	- 7 -
II.1.2.2.) <u>Homogenisierung</u>	- 7 -
II.2.) <u>Versuche zur Analyse der Entwicklung des Säuregehalts während der Joghurtherstellung</u>	- 7 -
II.2.1.) <u>Messung der Änderungen des pH-Werts mit einem pH-Meter</u>	- 7 -
II.2.1.1.) <u>Versuchsdurchführung</u>	- 7 -
II.2.1.2.) <u>Graphische Darstellung der Ergebnisse</u>	- 8 -
II.2.1.3.) <u>Bezug zu den verschiedenen Phasen des Bakterienwachstums</u>	- 8 -
II.2.1.3.1.) <u>1.Phase: Lag-Phase</u>	- 9 -
II.2.1.3.2.) <u>2.Phase: Log-Phase</u>	- 9 -
II.2.1.3.3.) <u>3.Phase: Stationäre Phase</u>	- 9 -
II.2.1.3.4.) <u>4.Phase: Absterbephase</u>	- 10 -
II.2.2.) <u>Messung der Änderung des PH-Wertes mit Hilfe einer Säure-Base-Titration</u>	- 10 -
II.2.2.1.) <u>Begründung der Auswahl des Indikators</u>	- 10 -
II.2.2.2.) <u>Erleichtern des Erkennens des Farbumschlags</u>	- 11 -
II.2.2.3.) <u>Auswertung der Messergebnisse</u>	- 11 -
II.2.2.3.1.) <u>Der Einfluss der Aminosäuren auf die Messwerte</u>	- 11 -
II.2.2.3.2.) <u>Vergleich der 3 Grafiken</u>	- 12 -
II.2.2.4.) <u>pH-Wert-Berechnung</u>	- 13 -
II.2.2.5.) <u>Neutralisationskurve der Joghurtprobe</u>	- 14 -
II.2.2.5.1.) <u>Pufferbereich</u>	- 15 -
II.2.2.5.2.) <u>Äquivalenzpunkt</u>	- 15 -
II.2.2.5.3.) <u>Schlussfolgerung</u>	- 16 -
II.2.3.) <u>Ergebnis der Auswertung der 4 Grafiken</u>	- 16 -

II.3.) <u>Theoretischer Hintergrund der Messungen</u>	- 17 -
II.3.1.) <u>Milchsäurebakterien</u>	- 17 -
II.3.1.1.) Charakteristische Merkmale	- 17 -
II.3.1.2.) Zur Ordnung der Milchsäurebakterien gehörende Bakterienfamilien	- 18 -
II.3.1.3.) Unterschiede zwischen den Milchsäurebakterien	- 18 -
II.3.1.4.) Bei der Joghurtherstellung verwendete Milchsäurebakterien	- 18 -
II.3.1.5.) Probiotische Bakterien	- 19 -
II.3.2.) <u>Lactose</u>	- 19 -
II.3.3.) <u>Milchsäure</u>	- 20 -
II.3.3.1.) Beschreibung der Hydroxysäuren	- 20 -
II.3.3.2.) Enantiomere der Milchsäure	- 20 -
II.3.3.3.) Vorkommen der beiden Enantiomere	- 21 -
II.3.3.4.) Milchsäure im Joghurt	- 21 -
II.3.4.) <u>Milchsäuregärung</u>	- 21 -
II.3.4.1.) Gärung im Allgemeinen	- 21 -
II.3.4.2.) Heterofermentative Milchsäuregärung	- 21 -
II.3.4.3.) Homofermentative Milchsäuregärung	- 22 -
II.3.4.4.) Umwandlung von Lactose zu Milchsäure	- 22 -
II.3.4.4.1.) Spaltung der Lactose	- 22 -
II.3.4.4.2.) Glycolyse	- 23 -
II.3.4.4.3.) Reduktion von Brenztraubensäure zu Milchsäure	- 23 -
II.3.4.4.4.) Bruttogleichung der Milchsäuregärung	- 23 -
II.3.5.) <u>Denaturierung des Caseins</u>	- 24 -
II.3.5.1.) Bestandteile der Caseinmicellen	- 24 -
II.3.5.2.) Coat-Core-Model & Subunit Model	- 24 -
II.3.5.3.) Säuregerinnung des Caseins	- 25 -
II.3.5.3.1.) Isoelektrische Fällung des Caseins	- 25 -
II.3.5.3.2.) Strukturbildung während der Säuregerinnung	- 26 -
III. Résumé	- 27 -
Bibliographie	- 28 -
Anhang	- 31 -

I.) Geschichte des Joghurts

Joghurt ist ein wichtiger Bestandteil unserer Ernährung. Wir verwenden ihn zum Kochen oder als schmackhafte Zwischenmahlzeit. Entstanden ist er bereits im 6. Jahrhundert vor Christus, als sich die Tharkern – die Urbevölkerung der Balkanhalbinsel – ein mit Milch gefülltes Lammfell-Säckchen um den Bauch banden. Die Kombination der im Lammsack enthaltenen Mikroflora mit der Körpertemperatur führte zur Milchsäuregärung und somit zur Joghurtentstehung.¹

In Westeuropa lässt sich die Verbreitung des Joghurts mit dem Jahr 1906 sicher verbinden. In diesem Jahr führte Ilja M'etchinkoff – Professor am Pasteur-Institut in Paris und Nobelpreisträger – die hohe Lebenserwartung der bulgarischen Bauern auf ihren hohen Joghurtkonsum zurück. Er entdeckte, dass der Bakterienstamm des “Lactobacillus bulgaricus”, den er aus dem Joghurt isolierte, auch in einem gesunden menschlichen Darm vorkommt. Er vermutete nun, dass die Menschen nicht wegen des körperlichen Verfalls, sondern wegen einer langsam voranschreitenden Vergiftung, auf Grund eines Fäulnisprozesses im Darm, sterben. Zu dieser Zeit war bereits bekannt, dass Milchsäure das Faulwerden des Kohls bei der Sauerkrautherstellung verhindert. Deshalb vermutete M'etchinkoff, dass sie im Darm die gleiche Wirkung hat und erklärte damit die hohe Lebenserwartung der Bulgaren.²

Diese These wurde bereits 1918 von amerikanischen Forschern widerlegt, die nachweisen konnten, dass der “Lactobacillus bulgaricus” von der Magensäure zerstört wird, bevor er die Darmflora verbessern kann. Der hohe Joghurtkonsum kann also nicht der Grund für die hohe Lebenserwartung der Bulgaren sein. Heute weiß man außerdem, dass die Laktobacillen im menschlichen Darm nicht mit dem Laktobacillus bulgaricus identisch sind.³

In den Kriegsjahren – 1939 bis 1945 - stieg der Joghurtkonsum stark an, seinen absoluten Durchbruch hatte er jedoch erst in den späten 60er Jahren, als er als Diätspeise den Markt eroberte.

Heutzutage beläuft sich der Joghurtkonsum pro Jahr auf 13 kg pro Person.⁴ Doch wie kommt es zur Bildung des Joghurts aus der Milch? Bei der Joghurtherstellung spielt die Milchsäure eine entscheidende Rolle. Im Folgenden soll ihre Entstehung und Wirkung

1 vgl. [Wikipedia.org/Joghurt](https://de.wikipedia.org/wiki/Joghurt); vgl. uni-protokolle.de;

2 vgl. Joghurt, S.7; vgl. alp.admin.ch/2.1 Allgemeines

3 vgl. [Wikipedia.org/Joghurt](https://de.wikipedia.org/wiki/Joghurt); vgl. Joghurt, S.8

4 vgl. [Wikipedia.org/Joghurt](https://de.wikipedia.org/wiki/Joghurt)

mit Hilfe einiger Versuche zur Verfolgung der Säureentwicklung während der Joghurtherstellung geklärt werden.

II.) Verfolgung der Säureentwicklung während der Joghurtherstellung

II.1.) Beschreibung der Joghurtherstellung

II.1.1.) Grundlage der Joghurtherstellung

Die Herstellung des Joghurts basiert auf der Vermehrung der Milchsäurebakterien, die bei der Fermentation, einem biochemischen Vorgang, bei welchem biologisches Material mit Hilfe von Enzymen und Mikroorganismen umgewandelt wird, Milchzucker in Milchsäure umbauen.⁵

Das Produkt der Milchsäuregärung, die Milchsäure, führt zur Denaturierung des Caseins und somit zur Gerinnung der Milch. Casein, ein Phosphorprotein, macht 80% der Gesamtproteinmenge der Milch aus.⁶ Wie genau es zur Denaturierung dieses Proteins und somit zur Gerinnung der Milch kommt, darauf werde ich im Gliederungspunkt II.3.5.) genauer eingehen.

II.1.2.) Die Joghurtherstellung

Die Milchsäure produzierenden Milchsäurebakterien vermehren sich bei einer Temperatur von 40°C besonders gut. Die Milch wird deshalb auf 40°C erwärmt,



Abbildung 1: Joghurt-Zubereitungsmaschine

anschließend werden ihr die für die Joghurtherstellung geeigneten Bakterienkulturen, zum Beispiel in Form von fertigem Joghurt, zugegeben. Die Milch wird nun bei 40°C 3 bis 6 Stunden bebrütet. Die Bebrütung kann durch die Verwendung einer Joghurt-Zubereitungsmaschine erleichtert werden, da diese die Temperatur der Milch konstant bei 40°C hält. Die

Fermentation wird nach ungefähr 5 bis 6 Stunden unterbrochen,⁷ da zu diesem Zeitpunkt der gewünschte pH-Wert von 4,4 erreicht wurde. Die genaue Dauer der Fermentation ist allerdings von der Temperatur und den verwendeten Bakterienkulturen abhängig.⁸

5 vgl. Schülerduden Chemie, S.140

6 vgl. 2.psu.ac/1.1 Casein

7 vgl. Joghurt, S.14

8 vgl. Lebensmittelmeister.de

II.1.3.) Eigenschaften der verwendeten Milch

Bei der Joghurtherstellung ist zu beachten, dass man homogenisierte Milch verwenden sollte. Heutzutage ist normale Trinkmilch in der Regel homogenisiert, sie eignet sich somit hervorragend für die Joghurtherstellung. Falls es sich bei ihr allerdings nicht um ultrahocherhitze Milch handelt, muss sie vor Beginn der Joghurtherstellung abgekocht werden, da durch die Hitze alle unerwünschten Bakterien abgetötet werden.⁸

Die Verwendung von homogenisierter Milch hat positive Auswirkungen auf den gebildeten Joghurt, da es durch die Zerkleinerung der Fettkugeln zu einer besseren Verteilung des Fettes kommt. Dadurch wird das Aufrahmen – die Bildung einer Fettschicht an der Oberfläche - und die Synärese – das Abscheiden von Flüssigkeit aus dem Joghurt - vermindert. Außerdem ist das Fett in dieser Form leichter verdaulich. Des Weiteren erhöht sich die Gelfestigkeit des Joghurts, da die Fettkugeln auf Grund der Homogenisierung eine caseinhaltige Sekundärfettkugelmembran ausbilden. Dadurch können sie besser in das Caseinmicellengerüst - auf dieses werde ich im Gliederungspunkt II.3.5.) genauer eingehen - eingebaut werden und stören seine homogene Struktur nicht.⁹

II.2.) Versuche zur Analyse der Entwicklung des Säuregehalts während der Joghurtherstellung

II.2.1.) Messung der Änderungen des pH-Werts mit einem PH-Meter

II.2.1.1.) Versuchsdurchführung

Bei der Joghurtherstellung wandeln Milchsäurebakterien Milchzucker fermentativ zu Milchsäure um. Die Säurekonzentration im Joghurt verändert sich während der Joghurtherstellung also ständig. Bei meinen ersten Messungen, mit welchen ich diese Änderungen der Säurekonzentration während der Milchsäuregärung bestimmen werde, verwende ich ein pH-Meter.



Abbildung 2: pH-Meter

Der Joghurt wird, wie bereits beschrieben, hergestellt. Bei der ersten Versuchsdurchführung messe ich den pH-Wert in einem Zeitintervall von 30 Minuten. Ich führe den Versuch anschließend ein zweites Mal durch, zum einen, um die gemessenen Werte zu überprüfen und zum anderen, um das Zeitintervall an signifikanten Stellen des Graphen auf 15 Minuten zu verkürzen.

⁹ vgl. Untersuchungen bei Fermentation und Processing von Rührjoghurt; vgl. Lebensmittelmeister.de

II.2.1.2.) Graphische Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der beiden Messungen können dem Anhang A) entnommen werden und sind in folgender Abbildung graphisch dargestellt, wobei der rote Graph die erste und der blaue Graph die zweite Messung beschreibt.

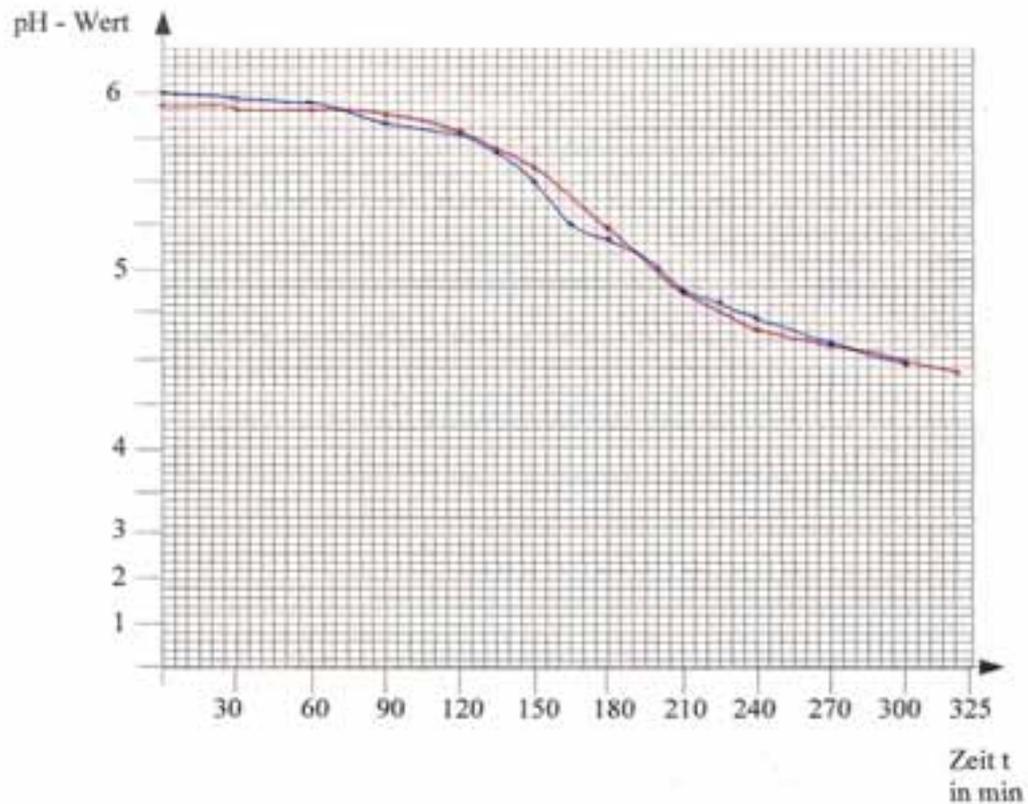


Abbildung 3: pH-Wertentwicklung im Verlauf der Joghurtherstellung

Die Graphen zeigen, dass die Ergebnisse der zweiten Messungen weitestgehend mit den Ergebnissen der ersten Messung übereinstimmen. Die kleinen Abweichungen, die sich im Bereich von 0,01 bis 0,16 bewegen, können durch unvermeidliche Messungenauigkeiten erklärt werden.

II.2.1.3.) Bezug zu den verschiedenen Phasen des Bakterienwachstums

Da der Joghurtherstellung eine anaerobe Gärungsreaktion zu Grunde liegt, die von Milchsäurebakterien durchgeführt wird, hängt die Konzentration der entstehenden Säure von der Anzahl, der in der Joghurtprobe vorhandenen, Milchsäurebakterien ab.

Dass sich die in diesem Diagramm dargestellten Phasen des Bakterienwachstums auch in der Veränderung des pH-Werts im Verlauf der Milchsäuregärung erkennen lassen, werde ich im Folgenden genauer erklären.

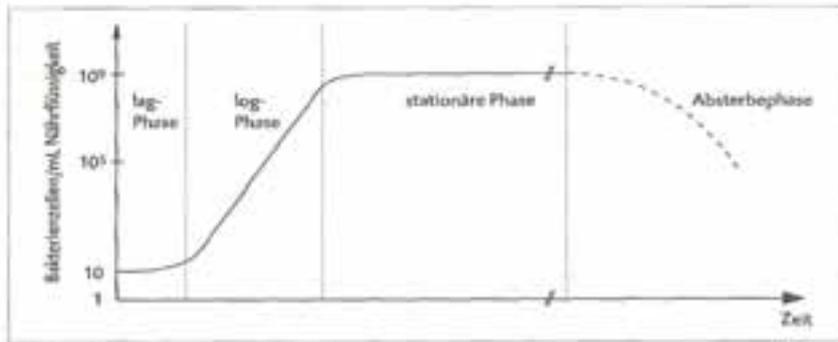


Abb. 21: Phasen des Bakterienwachstums

Abbildung 4: Phasen des Bakterienwachstums¹⁰

Die Bakterien befinden sich zu Beginn ihrer Entwicklung in einer so genannten lag-Phase – auch Anlaufphase genannt – in welcher sie sich auf die neuen Lebensbedingungen einstellen. Ihre Dauer ist von der Bakterienart, dem Alter der Bakterien, der Art der Vorkultur und der Zusammensetzung der Nährlösung abhängig. In dem Graphen, der die Säureentwicklung während der Milchsäuregärung beschreibt, erkennt man diese Phase an dem kaum veränderten pH-Wert der ersten 60 bis 90 Minuten. Da sich die Milchsäurebakterien in der lag-Phase nicht vermehren und auch kaum Lactose in Milchsäure umwandeln, sinkt der pH-Wert nur minimal.

Auf die lag-Phase folgt die logarithmische Phase, in welcher die maximale und konstante Teilungsrates der Milchsäurebakterien erreicht wird. Auf den pH-Wert während der Milchsäuregärung wirkt sich das folgendermaßen aus: Der pH-Wert beginnt erst leicht, dann immer stärker zu fallen. Innerhalb von ungefähr zwei Stunden sinkt der pH-Wert so von 5,8 auf 4,7. Dass der pH-Wert zu Beginn der logarithmischen Phase nicht so stark abnimmt wie am Ende, erklärt sich durch das exponentielle Wachstum der Bakterien.¹¹ Aus 100 Bakterien entstehen 200 Bakterien, da sich Bakterien durch Zweiteilung¹² vermehren. 1000 Bakterien vermehren sich bereits zu 2000 Bakterien und 2000 Bakterien wandeln logischer Weise mehr Lactose in Milchsäure um als 200, daraus folgt wiederum die steigende Abnahme des pH-Werts.

Die Vermehrung der Milchsäurebakterien wird gehemmt so bald sich das Nahrungsmittelangebot dem Ende zuneigt, die hohe Zellzahl zu einem Mangel an Raum führt, oder hemmende Stoffwechselprodukte angehäuft werden. Das Bakterienwachstum geht nun in die stationäre Phase über, in welcher keine weiteren Milchsäurebakterien mehr gebildet werden. Diese Phase, die durch den Stillstand bei der Vermehrung der Milchsäurebakterien gekennzeichnet ist, führt zu einem Abflachen des Graphen, der die

¹⁰ Genetik, Stoffwechsel, Ökologie, S.61 [ähnliche Grafik in "kleine Enzyklopädie Biologie, S.489"]

¹¹ vgl. kleine Enzyklopädie Biologie, S.489/490; vgl. Bakterien und Viren, S.18/19

¹² vgl. meb.uni-bonn.de

pH-Wertentwicklung während der Milchsäuregärung beschreibt. Da das Nährstoffangebot abnimmt, können die Milchsäurebakterien nicht mehr so viel Lactose in Milchsäure umwandeln. Die Zunahme der Säurekonzentration geht folglich zurück und nähert sich einem konstanten Wert an.¹³

Am Ende der Fermentation wird der Stoffwechsel der an der Gärung beteiligten Bakterien durch das Herabsetzen der Temperatur stark reduziert. Es kommt allerdings nicht zu einem völligen Stillstand des Stoffwechsels, da Milchsäurebakterien auch bei Lagertemperaturen von 4°- 5°C weiter säuern. Wie stark die Abnahme des pH-Wertes während der Nachsäuerung ist, hängt von der Lagertemperatur und dem Anfangs-pH ab. Die letzte Phase des Bakterienwachstums - die Absterbephase - wird bei der Joghurtherstellung also nicht erreicht, da die Milchsäurebakterien auch bei niedrigen Temperaturen überleben.¹⁴

Da die ersten drei Phasen des Bakterienwachstums im Graphen, der die pH-Wert-Veränderung während der Joghurtherstellung beschreibt, deutlich zu erkennen sind, folgere ich, dass die Veränderung der Säurekonzentration in der Joghurtprobe vom Wachstum der Milchsäurebakterien abhängt.

II.2.2) Messung der Änderungen des PH-Wertes mit Hilfe einer Säure-Base-Titration

Bei der zweiten Methode, mit der ich den Verlauf der Säureentwicklung während der Joghurtherstellung bestimmen möchte, handelt es sich um eine Säure-Base-Titration. (Der Versuchsaufbau kann dem Anhang C) entnommen werden.)

II.2.2.1.) Begründung der Auswahl des Indikators

Für eine Säure-Base-Titration ist ein geeigneter Indikator von zentraler Bedeutung. Bei seiner Auswahl ist zu beachten, dass es sich bei der Titration von Milchsäure mit Natronlauge um die Titration einer starken Base mit einer schwachen Säure handelt. Der Äquivalenzpunkt liegt folglich im Basischen, da die gleiche Menge Milchsäure mit der gleichen Menge an Natronlauge leicht alkalisch reagiert.¹⁵ Deshalb wählt man für diese Titration Phenolphthalein als Indikator, dieser schlägt im pH-Bereich von 8,4 bis 10 von farblos



Abbildung 5: Joghurtprobe mit Phenolphthalein

13 vgl. kleine Enzyklopädie Biologie, S.489/490; vgl. Bakterien und Viren, S.18/19

14 vgl. alp.admin.ch /2.3.1. Herstellung

15 vgl. Wikipedia.org/Äquivalenzpunkt

zu rot-lila um.¹⁶

II.2.2.2.) Erleichtern des Erkennens des Farbumschlags

Entscheidend bei dieser Messmethode ist vor allem das frühe Erkennen des Farbumschlags. Das wird allerdings durch die milchig-weiße Färbung der Joghurtprobe erschwert. Man verdünnt diese deshalb mit destilliertem Wasser auf ein Mengenverhältnis von 1:10. Dadurch wird die Färbung der Joghurtprobe aufgehellt. Zusätzlich stellt man die Joghurtprobe auf ein weißes Blatt; der Farbumschlag ist nun noch etwas deutlicher zu erkennen. Die bei der Titration bestimmten Werte können im Anhang D) eingesehen werden.

II.2.2.3.) Auswertung der Messergebnisse

Die Berechnung der Massenkonzentrationen und der Stoffmengenkonzentrationen können dem Anhang E), F), G) und H) entnommen werden. Außerdem sind in den in II.2.2.3.1.) und II.2.2.3.2.) enthaltenen Grafiken graphisch dargestellt.

II.2.2.3.1.) Der Einfluss der Aminosäuren auf die Messwerte

Milch setzt sich aus Milchfett, Lactose, Mineralstoffen - Kalzium, Kalium und Phosphor -, Proteinen und Aminosäuren – zum Beispiel Leucin, Isoleucin, Serin, Tyrosin und Lysin – zusammen.¹⁷ Der pH-Wert von Milch liegt bei 6,5,¹⁸ dieser im Sauren liegende pH-Wert kann auf die in ihr enthaltenen Aminosäuren zurückgeführt werden. Die Säurewirkung der Aminosäuren spielt auch bei der Titration der Joghurtprobe eine wichtige Rolle, da beachtet werden muss, dass die Natronlauge nicht ausschließlich von der Milchsäure, sondern auch von den Aminosäuren neutralisiert wird. Die Stoffmengenkonzentration der Aminosäuren bleibt während der Joghurtherstellung konstant. Da die Aminosäuren der Joghurtprobe größtenteils aus der für die Joghurtherstellung verwendeten Milch stammen, kann die Stoffmengenkonzentration der Aminosäuren der Milch mit der Stoffmengenkonzentration der Aminosäuren des Joghurts gleichgesetzt werden. Folglich ist die Stoffmengenkonzentration der Aminosäuren gleich der Stoffmengenkonzentration der Säure in der Joghurtprobe zu Beginn der Joghurtherstellung, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Milchsäure gebildet wurde. Milch bildet die Basis des Joghurts, deshalb enthält der Joghurt außer der Milchsäure – die Milchsäurebakterien ausgenommen - keine Bestandteile, die nicht auch bereits in der Milch vorhanden sind. Die Aminosäuren und

¹⁶ vgl. Uni-Paderborn.de

¹⁷ vgl. Baecker.org

¹⁸ vgl. Medizinfo.org

die Milchsäure sind also auch die einzigen “sauren” Gruppen, die er enthält. Daraus folgt, dass die Stoffmengenkonzentration der Milchsäure die Differenz aus der Stoffmengenkonzentration der Säure des Joghurts und der Stoffmengenkonzentration der Aminosäuren ist.

Die berechneten Werte für die Veränderung der Stoffmengenkonzentrationen der Säure im Joghurt, der Aminosäuren und der Milchsäure während der Joghurtherstellung sind in folgender Grafik dargestellt:

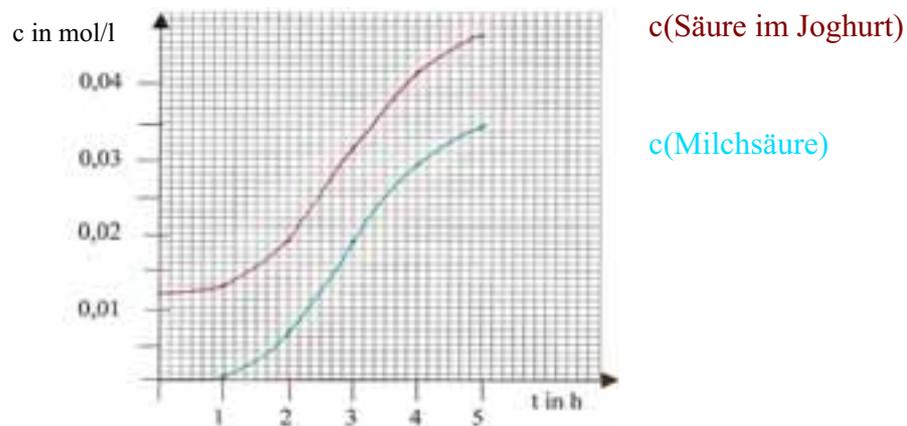


Abbildung 6: Veränderung der Stoffmengenkonzentrationen im Verlauf der Joghurtherstellung

Die Milchsäure und die Aminosäuren sind wie gesagt die einzigen im Joghurt enthaltenen “sauren” Gruppen. Da die Konzentration der Aminosäuren gleich bleibt, wird der Verlauf des Graphen von der Milchsäure geprägt. Deshalb verlaufen die beiden Graphen, die die Veränderung der Stoffmengenkonzentrationen der Milchsäure und der Säure im Joghurt beschreiben, parallel. Die gleichbleibende Stoffmengenkonzentration der Aminosäuren verursacht die Verschiebung des Graphen, der die Veränderung der Stoffmengenkonzentration der Säure im Joghurt beschreibt, an der Y-Achse. Dieser ist genau um den Wert der Stoffmengenkonzentration der Aminosäuren – $0,0125 \text{ mol/l}$ - verschoben.

II.2.2.3.2.) Vergleich der drei Grafiken

Vergleicht man nun den hier abgebildeten Graphen, der die Veränderung der Massenkonzentration der Milchsäure während der Joghurtherstellung darstellt, mit den Graphen, die die Veränderung der Stoffmengenkonzentrationen und die Veränderung des pH-Werts im Verlauf der Joghurtherstellung beschreiben, so ergeben sich folgende Übereinstimmungen:

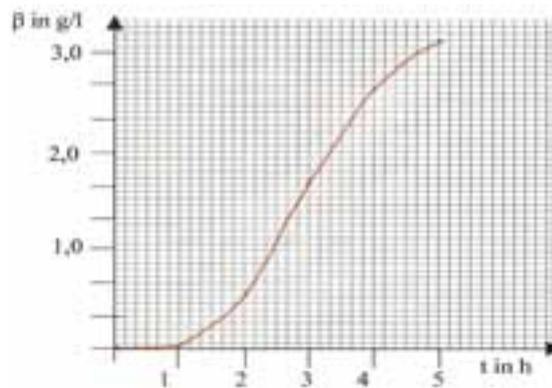


Abbildung 7: Änderung der Massenkonzentration während der Joghurtherstellung

Der Verlauf der beiden Graphen, die die Änderung der Stoffmengenkonzentration der Säuren und die Änderung der Massenkonzentration der Milchsäure während der Joghurtherstellung beschreiben, sind identisch, da sowohl die Massenkonzentration als auch die Stoffmengenkonzentration auf der bei der Titration ermittelten Stoffmenge basieren. Sie zeigen beide deutlich, dass in den ersten 90 Minuten kaum Milchsäure entsteht. Danach steigt die Milchsäurekonzentration bzw. Massekonzentration sprunghaft an. Gegen Ende der Joghurtherstellung – nach ungefähr 4 Stunden - entsteht weniger Milchsäure; der Graph flacht ab. Vergleicht man den Verlauf dieser Graphen mit dem Verlauf des Graphen, der die pH-Wert-Änderung während der Joghurtherstellung beschreibt, erkennt man die Ähnlichkeit seines graphischen Verlaufs: Der pH-Wert nimmt ebenfalls die ersten 90 Minuten kaum, anschließend aber sprunghaft ab. Nach 240 Minuten der Fermentation nähert sich auch der pH-Wert einem konstanten Wert an.

II.2.2.4.) pH-Wert-Berechnung

Will man den pH-Wert der Joghurtprobe aus den gemessenen Werten errechnen, so stellt man fest, dass man für den Verbrauch von 0,0038 l Natronlauge auf einen pH-Wert von 3,02 kommt. (Die Berechnung der angegebenen Werte kann im Anhang I) und J) eingesehen werden.) Dieser pH-Wert weicht von dem mit dem pH-Meter gemessenen Wert um 2,76 ab. Betrachtet man nun den für das Ende der Titration berechneten Wert – er liegt bei 2,66 - so erkennt man auf den ersten Blick, dass dieser zu weit im Sauern liegt. Hätte Joghurt wirklich diesen pH-Wert, dann würde man sich bei seinem Genuss die Speiseröhre verätzen.

Ich berechnete nun rein hypothetisch wieviel Natronlauge verbraucht werden müsste,

um einen pH von 5,5 zu erhalten und erhielt als Ergebnis das verschwindend kleine Natronlaugenvolumen von 0,000014466 ml. Dieses Volumen ist bei der Säure-Base-Titration nicht messbar, außerdem widerspricht es dem von mir gemessenen Wert, der für diesen pH ungefähr bei 5,05ml liegt. Es stellt sich nun also die Frage ob der pH-Wert der Joghurtprobe überhaupt berechenbar ist.

Die Rechnung wird durch die in der Milch enthaltenen Stoffe stark beeinflusst. Die puffernde Wirkung der Aminosäuren habe ich bereits beschrieben. Des weiteren könnte die starke Verdünnung der Joghurtprobe die Messergebnisse beeinflusst haben. Sie ist unvermeidbar, da der Farbumschlag in einer unverdünnten Joghurtprobe schwer erkennbar ist, dadurch würden die Messergebnisse noch stärker beeinflusst werden. In wie weit die weiteren Bestandteile der Milch, obwohl sie keine Säurewirkung besitzen, die Messung und die Berechnung beeinflussen, ist für mich an dieser Stelle schwer einzuschätzen.

Zusammenfassend sind vermutlich die vielen verschiedenen Bestandteile der Milch, dafür verantwortlich, dass der pH-Wert nicht berechenbar ist.

II.2.2.5.) Neutralisationskurve der Joghurtprobe

Nach 160 Minuten der Fermentation erstellte ich eine Neutralisationskurve der Joghurtprobe. (Die hierfür gemessenen Werte können dem Anhang B) entnommen werden.) Der Vergleich dieser Neutralisationskurve mit der charakteristischen Neutralisationskurve einer schwachen Säure ergibt folgende Gemeinsamkeiten:

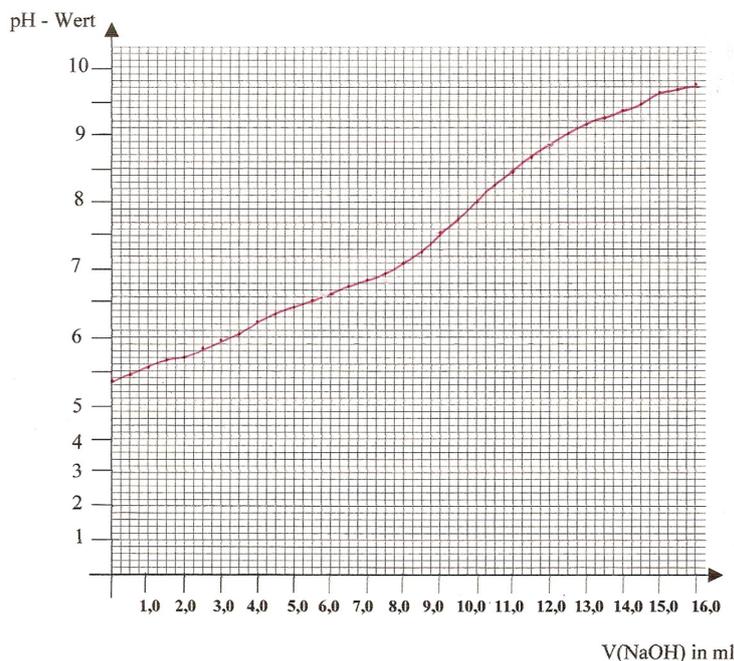
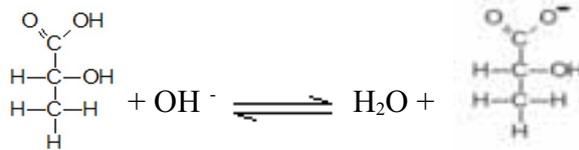


Abbildung 8: Neutralisationskurve der Joghurtprobe

II.2.2.5.1.) Pufferbereich

Zu Beginn der Neutralisationskurve kann man einen so genannten Pufferbereich – im pH-Wertbereich zwischen 5,5 und 6,5 - erkennen, dieser ist ein typisches Merkmal für die Neutralisationskurve einer schwachen Säure mit einer starken Base. Im Pufferbereich ändert sich der pH-Wert der Joghurtprobe bei der Zugabe von Natronlauge wesentlich weniger stark als in den ungepufferten Bereichen der Neutralisationskurve, da die Natronlauge von der Pufferlösung – der Milchsäure – abgefangen und neutralisiert wird:

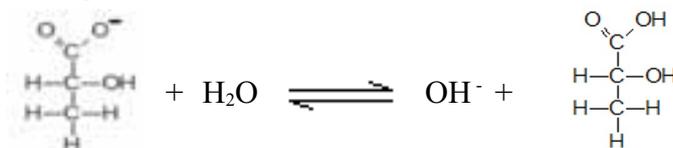


Da es sich bei der Milchsäure um eine schwache Säure handelt, enthält die Joghurtprobe sehr viele Milchsäuremoleküle. Diese können die zugegebene Natronlauge neutralisieren, da das oben beschriebene Gleichgewicht auf der rechten Seite liegt. Dadurch können die zugegebenen Hydroxid-Ionen weitestgehend von der Milchsäure neutralisiert werden.¹⁹

II.2.2.5.2.) Äquivalenzpunkt

Der Zeitpunkt an dem die Milchsäure vollständig dissoziiert ist, wird als Äquivalenzpunkt bezeichnet. An ihm ist die in der Joghurtprobe enthaltene Menge an Milchsäure äquivalent zur zugegebenen Menge an Natronlauge.²⁰ Er liegt bei der Titration einer schwachen Säure mit einer starken Base im Alkalischen, da die konjugierte Base der schwachen Säure mit dem Wasser alkalisch reagiert.²¹

Der Äquivalenzpunkt ist in der Neutralisationskurve der Punkt mit der größten Steigung. An ihm ist sowohl die Konzentration der Oxonium-Ionen als auch die der Hydroxid-Ionen außerordentlich klein, so dass selbst die kleinste Zugabe einer Lauge oder Säure zu einem großen pH-Sprung führt.²² Der Äquivalenzpunkt der Joghurtprobe liegt ungefähr beim pH-Wert 8, also deutlich im Alkalischen, da das Lactat-Ion mit dem Wasser reagiert:



¹⁹ vgl. Rechnen in der Chemie, S.54

²⁰ vgl. Quivalenzpunkt.know-library.net

²¹ vgl. Wikipedia.org/Äquivalenzpunkt

²² vgl. Rechnen in der Chemie, S.59

II.2.2.5.3.) Schlussfolgerung

Die von mir erstellte Neutralisationskurve kann nicht mit der Neutralisationskurve der Milchsäure gleichgesetzt werden, da in der Joghurtprobe zusätzlich auch Aminosäuren enthalten sind. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Neutralisationskurve ist die Stoffmengenkonzentration der Milchsäure bereits etwas größer als die Stoffmengenkonzentration der Aminosäuren. Daraus kann man schließen, dass der Verlauf der Neutralisation von der Milchsäure geprägt wird. Die Neutralisationskurve zeigt deshalb trotz der in der Joghurtprobe enthaltenen Aminosäuren, dass es sich bei der Milchsäure um eine schwache Säure handelt.

II.2.3.) Ergebnis der Auswertung der 4 Grafiken

Bei der Auswertung der Grafik, die die Änderung der Stoffmengenkonzentrationen während der Joghurtherstellung beschreibt, und der Neutralisationskurve wurde der Einfluss der Aminosäuren auf den pH-Wert besonders deutlich. Nun stellt sich natürlich die Frage, ob die Aminosäuren die Messungen mit dem pH-Meter beeinflussen. Auch in diesen Messungen spiegeln sich die Aminosäuren wieder, da bereits vor Beginn der Fermentation ein pH-Wert von 6,0 vorliegt. Dieser ist auf die in der Milch enthaltenen Aminosäuren zurückzuführen. Dass der von mir gemessene pH-Wert der Milch etwas niedriger ist als der in der Literatur angegeben (pH=6,5)²³, kann zum einen darauf zurückgeführt werden, dass ich keine Frischmilch für die Joghurtherstellung verwendete. Zum anderen enthält die Milch zum Zeitpunkt der Messung bereits einen Esslöffel fertigen Joghurts, der natürlich etwas Milchsäure enthält. Der weitere Verlauf des Graphen, der die mit dem pH-Meter gemessenen Werte beschreibt, wird von den Aminosäuren nicht beeinflusst, da ihre Konzentration und damit ihre Säurewirkung konstant bleibt.

Wie bereits beschrieben bestätigen die Verläufe der Graphen, die die Änderung der Massenkonzentration und der Stoffmengenkonzentration der Milchsäure während der Joghurtherstellung beschreiben, den Verlauf des Graphen, der die pH-Wert-Veränderung darstellt. Auch in ihnen erkennt man also, dass der Verlauf der Säureentwicklung von den Phasen des Bakterienwachstums abhängig ist. Es stellt sich nun also nur noch die Frage, was das für Bakterien sind und wie genau sie Milchzucker in Milchsäure umwandeln. Dies soll im Folgenden geklärt werden.

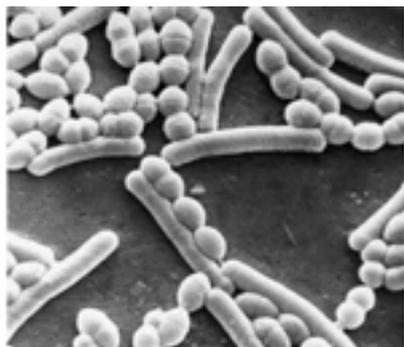
23 vgl. Medizinfo.org

II.3.) Theoretischer Hintergrund der Messungen

II.3.1.) Milchsäurebakterien

II.3.1.1.) Charakteristische Merkmale

Es ist schwer zu glauben, aber wir verdanken unseren Joghurt Bakterien, den Lactobacillen oder Milchsäurebakterien. Über den fermentativen Stoffwechsel wandeln sie Milchzucker in Milchsäure, ihrem charakteristischsten aber nicht einzigem Stoffwechselprodukt um. Im Unterschied zu anderen milchsäureproduzierenden



Bakterien tun sie dies allerdings ausschließlich über den Weg der Gärung.

Da sie sich auf das Wachstum in der Milch oder ähnlich nährstoffreichen Umgebungen spezialisiert haben, haben sie die Fähigkeit zur Synthese vieler lebensnotwendiger Stoffe – zum Beispiel der Aminosäuren – verloren. Deshalb benötigen sie für ihre Entwicklung Umgebungen, die Glucose, ein Mineral-

Abbildung 9: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Milchsäurebakterien²⁵

salzgemisch, verschiedene Vitamine und Aminosäuren beinhalten. Dementsprechend sind sie zum Beispiel in der menschlichen Darm- und Vaginalflora, den Schleimhäuten, und in Pflanzen zu finden.²⁴

Bei den Milchsäurebakterien handelt sich um stäbchen- und kokkenförmige unbewegliche, nicht-sporenbildende Bakterien, die, da sie keine Häme besitzen Kohlenhydrate, nur anaerob abbauen können, trotzdem aber meist aerotolerant sind. Ungewöhnlich ist, dass sie, obwohl sie aerotolerant sind, keine Katalase besitzen, mit Hilfe derer sie Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff spalten könnten. Taxonomisch werden sie in die Gruppe der Gram-positiven Bakterien (vgl. Anhang K) eingeordnet.²⁶

Milchsäurebakterien können sich gegen andere Mikroorganismen besonders gut durchsetzen, da sie säuretolerant²⁷ sind und selbst Milchsäure produzieren. Die Säure unterdrückt viele Mikroorganismen, insbesondere Fäulnisbakterien; die Milch wird durch die Milchsäure also konserviert.²⁸

24 vgl. Grundlagen der Biochemie, S.43/45; vgl. Wikipedia.org/Milchsäurebakterien

25 DB-Alp.admin.ch

26 vgl. Wikipedia.org/Milchsäurebakterien; vgl. Grundlagen der Biochemie, S.43/45; vgl. Isolierung und Charakterisierung von Milchsäurebakterien

27 vgl. Isolierung und Charakterisierung von Milchsäurebakterien

28 vgl. Kleine Enzyklopädie der Biologie, S.200

II.3.1.2.) Zur Ordnung der Milchsäurebakterien gehörende Bakterienfamilien

Zur Ordnung der Lactobacillen gehören mehrere Bakterienfamilien, die Lactobacillaceae, die Aerococcaceae, die Carnobacteriaceae, die Enterococcaceae, die Leuconostocaceae, die Streptococcaceae und weitere Isolate. Wobei zu beachten ist, dass die genaue Systematik der Milchsäurebakterien teilweise umstritten ist.²⁹

II.3.1.3.) Unterschiede zwischen den Milchsäurebakterien

Die einzelnen Milchsäurebakterienarten unterscheiden sich, zum einen da sie den Milchzucker entweder homofermentativ oder heterofermentativ abbauen können. (Was das genau bedeutet, werde ich in II.3.4.1) und II.3.4.2.) erklären.) Und zum anderen durch die Fähigkeit zur Bildung von entweder D- oder L-Milchsäure. Außerdem hat jedes Bakterium eine bestimmte Temperatur, bei der es sich besonders gut vermehrt. Diese reicht bei den einzelnen Milchsäurebakterienarten von 15° über 30° bis 45°C.³⁰ Verdeutlicht kann dies mit folgenden Beispielen werden: beim Streptococcus lactis – oder auch Lactococcus lactis ssp. lactis genannt – liegt diese Idealtemperatur bei 20° bis 30°C, beim Lactobacillus acidophilus hingegen liegt sie bei 35° bis 40°C.³¹

II.3.1.4.) Bei der Joghurtherstellung verwendete Milchsäurebakterien

Nun stellt sich natürlich die Frage welchem Milchsäurebakterium wir unseren Joghurt zu verdanken haben. Eine wichtige Rolle bei der Joghurtherstellung spielen der Lactobacillus bulgaricus³² – auch Lactobacillus delbrueckii ssp. bulgaricus genannt³³ -, er vermehrt sich am besten bei einer Temperatur von 40° bis 45°C und wandelt Milchzucker in D-Milchsäure und Acetaldehyd um. Außerdem spielen der Streptococcus thermophilus³² – auch Streptococcus salivarius ssp. thermophilus genannt³³ - der Lactose zu L-Milchsäure umbaut und der Streptococcus lactis eine wichtige Rolle.³² Diese Bakterienarten wurden bei der traditionellen Joghurtherstellung verwendet, da sie allerdings nicht gallensalzresistent sind, überleben sie die Magen-Darm-Passage kaum.³⁴

29 vgl. Isolierung und Charakterisierung von Milchsäurebakterien;
vgl. Wikipedia.org/Milchsäurebakterien

30 vgl. Isolierung und Charakterisierung von Milchsäurebakterien

31 vgl. Lebensmittelmeister.de

32 vgl. kleine Enzyklopädie Biologie, S.200; vgl. Lebensmittelmeister.de; vgl. Joghurt, S.10
vgl. Alp.admin.ch/2.3.5. Kulturen und Fermentation

33 vgl. DB-Alp.admin.ch

34 vgl. Wikipedia.org/Joghurt

II.3.1.5.) Probiotische Bakterien

Deshalb verwendet man für die Joghurtherstellung heutzutage probiotische Bakterien. Bei ihnen handelt es sich um Milchsäurebakterien, die den Magen-Darmtrakt überleben, da sie den Verdauungssäften standhalten können, und somit im Darm ihre gesundheitsfördernde Wirkung entfalten. Es sind zwar nicht alle ihrer Wirkungen wissenschaftlich belegt, gesichert ist allerdings, dass sie den Darm positiv beeinflussen, da sie in Nahrungskonkurrenz zu krankheitserregenden Bakterien stehen und diese so unterdrücken. Zusätzlich geben sie antimikrobielle Substanzen ab, dadurch wird die Häufigkeit und Dauer von Durchfallerkrankungen herabgesetzt. Des Weiteren fördern probiotische Bakterien die Lactoseverdauung und beeinflussen das Immunsystem positiv. Zusätzlich zu den hier aufgeführten werden den probiotischen Bakterien noch weitere gesundheitsfördernde Wirkungen nachgesagt. Beispiele für probiotische Milchsäurebakterien sind unter anderem: *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei* und *Lactobacillus rhamnosus*. Sie wurden aus Sauermilchprodukten und menschlichen Fäkalien isoliert. Es handelt sich also um natürlich im menschlichen Darm vorkommende Bakterien.³⁵

II.3.2.) Lactose

Bei der Milchsäuregärung wandeln diese Bakterien Milchzucker in Milchsäure um. Milchzucker macht ungefähr 4,8% der Kuhmilch, aber je nach Sorte nur 2,5% bis 3,1% des Joghurts aus.³⁶ Milchzucker wird auch mit dem vom Lateinischen “lac, lactis” - “Milch” - abgeleiteten Begriff Lactose bezeichnet.³⁷

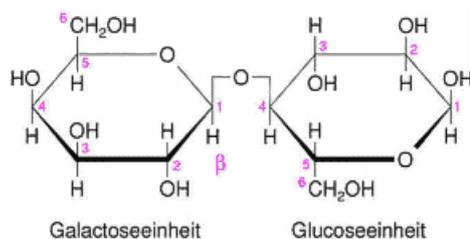


Abbildung 10: Lactose-Molekül

Bei Lactose handelt es sich um ein Disaccharid mit der Summenformel $C_{12}H_{22}O_{11}$. Es setzt sich aus einer β -D-Galactopyranose und einer D-Glucopyranose zusammen, welche 1-4-glykosidisch verbunden sind. Deshalb trägt die Lactose auch den Namen: 4-(β -D-Galactopyranosyl)-D-glucopyranose.³⁸

Lactose ist ein weißes, kristallines Pulver, das ein Viertel der Süßkraft von Saccharose besitzt. In der älteren Literatur wird sie häufig als Sandzucker bezeichnet, da ihre Löslichkeit in Wasser im Vergleich zu anderen Zuckern relativ gering ist, dadurch

35 vgl. bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2006

36 vgl. VIS.de

37 vgl. Wikipedia.de/Milchzucker

38 vgl. Grundlagen der Biochemie, S.86

erscheint sie ungelöst auf der Zunge oft sandig. Mittlerweile enthält eine ganze Reihe von Lebensmitteln Lactose, zum Beispiel Senf, Ketchup, Müsli, Fleisch- und Wurstwaren, Dressings, Eiscremes usw.³⁹

II.3.3.)Milchsäure

Als Endprodukt der Milchsäuregärung entsteht eine farblose Hydroxysäure: Milchsäure – 2-Hydroxypropansäure mit der Formel $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$, deren Salze Lactate genannt werden.⁴⁰

II.3.3.1.)Beschreibung der Hydroxysäuren

Unter Hydroxysäuren versteht man Säuren, die neben der Carboxylgruppe eine oder mehrere Hydroxygruppen enthalten. Deshalb zeigen Hydroxysäuren Reaktionen, die entweder typisch für einen Alkohol, oder typisch für eine Carbonsäure sein können.



Abbildung 11:
2-Hydroxypropansäure⁴²

Hydroxysäuren reagieren stärker sauer als die entsprechenden Carbonsäuren, da die Hydroxygruppe einen negativen induktiven Effekt auf das an der Carboxylgruppe beteiligte Kohlenstoffatom ausübt.⁴¹ Trotzdem handelt es sich bei der Milchsäure natürlich um

eine schwache Säure. Deshalb hat sie auch einen verhältnismäßig hohen pK_s -Wert: Er liegt bei 3,86.⁴⁰

II.3.3.2.) Enantiomere der Milchsäure

2-Hydroxypropansäure ist in der Lage zwei Enantiomere zu bilden: die rechtsdrehende

L - (+) - Milchsäure und die linksdrehende D - (-) -Milchsäure.⁴³

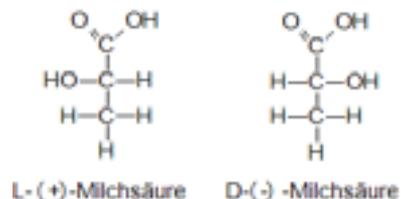


Abbildung 12: Enantiomere der 2-Hydroxypropansäure⁴⁴

39 vgl. VIS.de; vgl. Laktose.net

40 vgl. Wikipedia.org/Milchsäure

41 vgl. Schülerduden Chemie, S.179;

42 lmp.uni-sb.de

43 vgl. Seilnacht.com

44 Wikipedia.org/Milchsäure-Isomere

II.3.3.3.) Vorkommen der beiden Enantiomere

Die L-(+)- Milchsäure kommt im menschlichen und tierischen Blut, in der Muskulatur und in den Organen vor, während die D-(-)-Milchsäure von einigen Bakterien aus Glucose erzeugt wird.⁴⁵

Die rechtsdrehende L-(+)-Milchsäure wird vom menschlichen Körper produziert, sie kann vom Organismus deshalb problemloser und schneller abgebaut werden, als die "körperfremde" linksdrehende D-(-)-Milchsäure, letztere stellt für den menschlichen Organismus allerdings trotzdem keine Belastung dar.⁴⁶

II.3.3.4.) Milchsäure im Joghurt

Welche Milchsäure bei der Milchsäuregärung gebildet wird, hängt von den verwendeten Mikroorganismen ab. Der *Lactobacillus bulgaricus* bildet zu 100% die linksdrehende D-Milchsäure, während der *Streptococcus thermophilus* zu 100% die rechtsdrehende L-Milchsäure bildet. Da, wie bereits erwähnt, beide Bakterienarten für die traditionelle Joghurtherstellung verwendet werden, muss es sich bei der Milchsäure, der wir unseren Joghurt zu verdanken haben, also um eine (\pm)-Milchsäure – ein Racemat – handeln.⁴⁶

II.3.4.) Milchsäuregärung

II.3.4.1.) Gärung im Allgemeinen

Der Abbau des Milchzuckers zur Milchsäure erfolgt über den Prozess der Milchsäuregärung. Bei der Gärung im Allgemeinen handelt es sich um einen anaeroben, dissimilativen Stoffwechselfvorgang. In ihm werden Kohlenhydrate unter Energiegewinnung zu organischen Verbindungen wie Ethanol und Milchsäure abgebaut.⁴⁷

II.3.4.2.) Heterofermentative Milchsäuregärung

Es wird zwischen der heterofermentativen und der homofermentativen Milchsäuregärung unterschieden. Die heterofermentativen Milchsäurebakterien bauen Glucose über einen alternativen Abbauweg ab - den Phosphogluconat-Weg - da ihnen die Glycolyseenzyme Fructose-1,6-bisphosphat-Aldolase und Triosephosphat-Isomerase fehlen. Dabei wird 1 Mol ATP, 1 Mol Ethanol, 1 Mol Lactat und 1 Mol CO₂ pro 1 Mol Glucose gewonnen.⁴⁸

45 vgl. Seilnacht.com; vgl. Wikipedia.org/ Milchsäure; vgl. lebensmittelmeister.de

46 vgl. Joghurt, S.9/10

47 vgl. kleine Enzyklopädie Biologie, S.198; vgl. Schülerduden Chemie, S.155

48 vgl. Grundstudium Biologie, S. 8.31; vgl. Wikipedia.org/Milchsäuregärung

II.3.4.3.) Homofermentative Milchsäuregärung

Bei der homofermentativen Milchsäuregärung besitzen die sie betreibenden Milchsäurebakterien alle notwendigen Glycolyseenzyme, deshalb entstehen bei ihr pro 1 Mol Glucose 2 Mol Lactat sowie 2 Mol ATP.⁴⁹

Die für die traditionelle Joghurtherstellung verwendeten Milchsäurebakterien *Lactobacillus bulgaricus* und *Lactobacillus thermophilus* gehören zum Stamm der homofermentativen Milchsäurebakterien.⁵⁰ Dies zeigt, dass sich homofermentative Milchsäurebakterien beispielsweise für die Joghurtherstellung eignen, da bei der homofermentativen Milchsäuregärung kaum Nebenprodukte gebildet werden.

Es existieren noch weitere Gärungstypen der Milchsäuregärung auf die ich hier aber nicht weiter eingehen möchte.⁴⁹

II.3.4.4.) Umwandlung von Lactose zu Milchsäure

Da für die Joghurtherstellung homofermentative Bakterienstämme verwendet werden, beschreibe ich im Folgenden nur die homofermentative Milchsäuregärung.

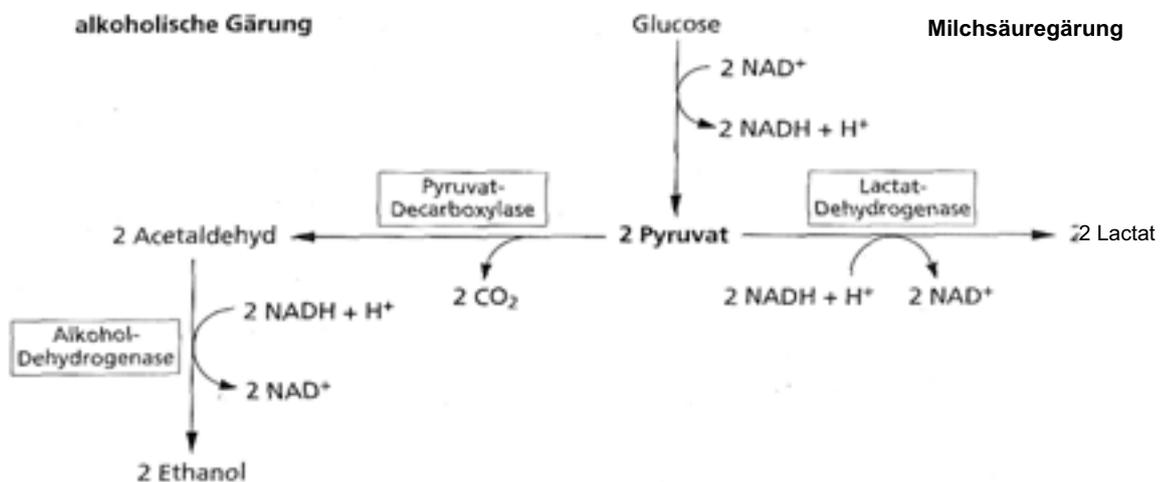


Abbildung 13: Der Verlauf der alkoholischen Gärung und der Milchsäuregärung⁵¹

II.3.4.4.1.) Spaltung der Lactose

Diese Grafik stellt dar, über welche Schritte die Milchsäurebakterien Glucose in Lactat umbauen. Um Glucose, den Ausgangsstoff der Gärung, bereitstellen zu können, müssen vor jeder Gärung Milch-, Rohrzucker, Stärke, oder Glycogen durch Enzyme gespalten werden.⁵² Milchzucker wird durch das Enzym Lactase in Glucose und Galactose

49 vgl. Grundstudium Biologie, S.8.30; vgl. Wikipedia.org/Milchsäuregärung

50 vgl. DP-Alp.admin.ch

51 Grundstudium Biologie, S. 8.30

52 vgl. Biomoleküle, Stoffwechsel, Organische Chemie des Alltags, S.125

gespalten.⁵³

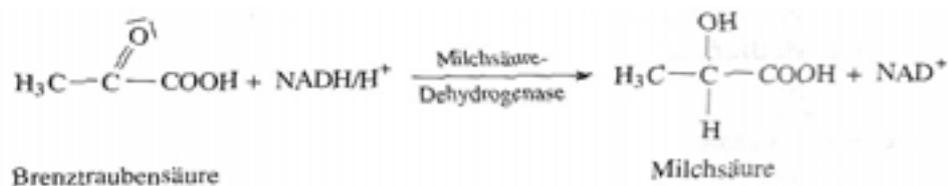
II.3.4.4.2.) Glycolyse

Die Glucose wird in der Glycolyse zu Brenztraubensäure – Pyruvat - umgebaut. Bei der Glycolyse handelt es sich um einen komplexen Stoffwechselfvorgang, bei dem 2 Mol ATP pro Mol Glucose und 2 Mol NADH/H⁺ gewonnen werden. Für die Glycolyse kann deshalb folgende Stoffbilanz aufgestellt werden:



II.3.4.4.3.) Reduktion von Brenztraubensäure zu Milchsäure

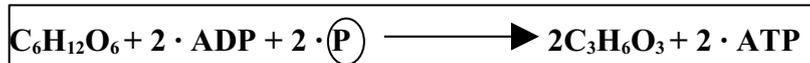
Die entstandene Brenztraubensäure wird durch das bei der Glycolyse freigewordene Coenzym NADH/H⁺ zu Milchsäure reduziert. Das Coenzym wird dabei zu NAD⁺ oxidiert und steht in dieser Form wieder für die Glycolyse zur Verfügung. Die Umwandlung von Brenztraubensäure zu Milchsäure wird von der Lactat-Dehydrogenase katalysiert:⁵⁵



54

II. 3.4.4.4.) Bruttogleichung der Milchsäuregärung

Fasst man die beschriebenen Teilreaktionen in einer Gleichung zusammen, erhält man folgende Bruttogleichung der Milchsäuregärung:



Aus dieser Gleichung wird deutlich, dass der Wirkungsgrad der Milchsäuregärung äußerst gering ist. Es werden 2 Mol ATP frei, dies entspricht $2 \cdot 29 \text{ kJ/mol}$, das sind etwa 2% der Ausbeute des vollständigen oxidativen Glucoseabbaus. Bei ihm werden 2825 kJ/mol frei.⁵⁴

53 vgl. Joghurt S.13

54 vgl. Biomoleküle, Stoffwechsel, Organische Chemie des Alltags, S.130/131

55 vgl. Grundstudium Biologie, S.8.30; Biologie, S.112;

vgl. Biomoleküle, Stoffwechsel, Organische Chemie des Alltags, S.131

II.3.5.) Denaturierung des Caseins

Milchzucker wird von Milchsäurebakterien während der Milchsäuregärung zu Milchsäure umgebaut. Aber warum führt diese Säure zur Gerinnung des Caseins? Mit dieser Frage werde ich mich im Folgenden beschäftigen:

II.3.5.1.) Bestandteile der Caseinmicellen

Eine Caseinfraktion lässt sich in drei Hauptkomponente, das α_s -, β - und κ -Casein unterteilen. Der größte Teil des Caseins liegt jedoch nicht als Monomer vor, sondern

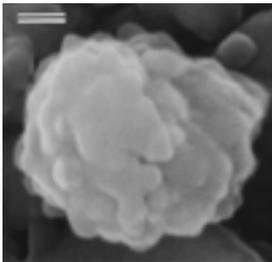


Abbildung 14:
Elektronenmikroskopische
Caseinmicellen-Aufnahme⁵⁷

aggregiert zu Caseinmicellen und -komplexen. Diese werden durch elektrostatische Wechselwirkungen zwischen sauren Gruppen und Ca^{2+} - und Mg^{2+} - Ionen, sowie durch hydrophobe Bindungen zusammengehalten. Außerdem wird die Caseinmicelle zusätzlich durch Wasserstoffbrückenbindungen stabilisiert. Die genaue Struktur des Caseins ist bisher nicht geklärt, es existieren allerdings verschiedene Modelle, diese werden in drei verschiedene Kategorien eingeteilt: die

“Coat-Core-Models”, die “Internal Structure Models” und die “Subunit Models”.⁵⁶

II.3.5.2.) Coat-Core-Model & Subunit Model

Das erste “Coat-Core-Model” wurde von Waugh und Talbot 1971 entwickelt. Vereinfacht gesagt besteht bei diesem Modell der Kern - “core” - einer Micelle aus α_s - und β -Caseinmonomeren, κ -Caseine bilden den ihn umschließenden Mantel – “coach”.⁵⁸

Dieses Modell wurde weiterentwickelt und von Walstra und Jenness 1984 als Modellsystem von Webb et al. - einem Subunit Model - vorgeschlagen.

⁵⁶ vgl. Doktorarbeit, S.5/6; vgl 2.psu.ac

⁵⁷ jds.fass.de (bearbeitet)

⁵⁸ vgl. Doktorarbeit S.5 ff; vgl. 2.psu.ac/2.1.Coat-Core Models

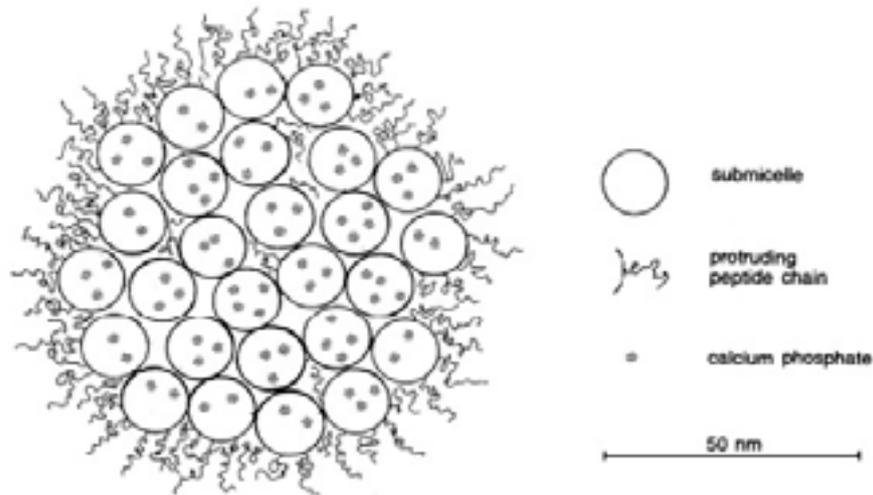


Abbildung 15: Die Struktur der Caseinmicellen - wie sie von Walstra vorgeschlagen wurde - ⁵⁹

In ihm setzten sich Micellen aus Submicellen zusammen die wiederum aus Caseinmonomeren bestehen. Die Submicellen aggregieren durch Calciumbrücken zu Caseinmicellen, dabei werden zwei verschiedene Typen von Submicellen unterschieden, wobei die eine hydrophiler als die andere ist. Dieser Unterschied wird durch das κ -Casein verursacht. Es hat auf Grund seines hohen Kohlenhydrat-Anteils einen hydrophileren Charakter als das α_s - und β -Casein. Seine hydrophilen Enden befinden sich wie Haare an der Oberfläche der Submicelle, wobei das α_s - und β -Casein in ihr Inneres gedrängt werden. Die Submicellen, die κ -Casein enthalten, sind deshalb hydrophiler als die Submicellen, die ausschließlich α_s - und β -Casein enthalten. Die Aggregation der Submicellen verhindert das Ausfallen der calciumempfindlichen α_s - und β -Caseine. Sie schreitet nun so lange fort, bis die gesamte Micellenoberfläche mit κ -Casein-Haaren bedeckt ist.

Die von mir vorgestellten Modelle sind nur zwei Beispiele der vielen verschiedenen Caseinmicellen-Modelle. Für die Beschreibung der Strukturbildung während der Säuregerinnung verwende ich die hier vorgestellten Modelle als Grundlage.⁶⁰

II.3.5.3.) Säuregerinnung des Caseins

II.3.5.3.1.) Isoelektrische Fällung des Caseins

Bei einem pH-Wert von 6,6 sind die meisten auf der Caseinmicellenoberfläche liegenden Carboxylgruppen dissoziiert. Dadurch befinden sich auf der Caseinmicellenoberfläche mehr negative wie positive Ladungen, sie hat also eine negative

⁵⁹ 2.psu.ac

⁶⁰ vgl. Doktorarbeit S.5 ff; vgl. 2.psu.ac/2.2 Sub-micelle (subunit) models
vgl. Uni Bielefeld.de

Nettoladung. Auf Grund des Dipolcharakters des Wassers kommt es nun zur Bildung einer Hydrathülle. An diese lagern sich positiv geladenen Calcium-Ionen an, da die negativen elektrostatischen Kräfte der Caseinmicellenoberfläche über den Bereich der inneren Hydrathülle hinaus wirken. Die einzelnen Caseinmicellen können nicht aggregieren, da sie sich wegen ihrer gleichsinnigen Ladung gegenseitig abstoßen. Die Gerinnung des Caseins ist also nur möglich, wenn die Oberflächenladung der Caseinmicellen vermindert wird.⁶¹

Der isoelektrische Punkt der Caseinmicellen liegt bei pH 4,6, an ihm ist die Anzahl der positiven und negativen Ladungen auf der Micellenoberfläche gleich. Durch die Säurezugabe wird die Dissoziation der sich auf der Micellenoberfläche befindlichen Carboxylgruppen soweit zurückgedrängt bis schließlich genauso viele negativ geladene Carboxylgruppen wie positiv geladene Aminogruppen auf der Oberfläche vorhanden sind.⁶² Am isoelektrischen Punkt ist die Oberfläche der Caseinmicellen also neutral geladen. Es kommt zur Aggregation der Caseinmicellen, da sich die einzelnen Micellen nicht mehr abstoßen, außerdem werden zusätzlich hydrophobe Wechselwirkungen wirksam.⁶¹

Wie genau es zur Strukturbindung während der Säuregerinnung kommt, werde ich im Folgenden genauer erklären.

II.3.5.3.2.) Strukturbildung während der Säuregerinnung

Die Strukturbildung des Caseins während der Säuregerinnung wird allgemein als 4-Phasen-Prozess beschrieben. (“Eine schematische Darstellung der micellaren Veränderung während der Säuregerinnung” kann im Anhang L) eingesehen werden.) Die bei dieser Beschreibung verwendeten pH-Werte hängen von der Gerinnungstemperatur ab, sie beziehen sich hier auf eine Temperatur von 30°C.

Am Anfang der Strukturbildung während der Säuregerinnung steht die Induktionsphase, in welcher es ab einem pH-Wert von 5,6 zum Kollaps der äußeren Haarschicht kommt. Bis zum pH 5,6 sind jedoch keine nennenswerten Änderungen der Micellen zu beobachten. In der Induktionsphase kommt es noch nicht zu einer Strukturbildung, dies ist erst in der Flockulationsphase der Fall, da es in ihr zur Aggregation der Caseinpartikel kommt. In diesem Stadium kommt es zwar bereits zum Aufbau eines Netzwerkes aus sich berührenden Aggregaten, eine durchgehende Strukturierung wird allerdings erst in der 3. Phase – der Gelbildungsphase – ausgebildet. Durch die weitere

61 vgl. opus.kobv.de

62 vgl. Untersuchungen bei Fermentation und Processing von Rührjoghurt/2.2

Erniedrigung des pH-Werts auf den isoelektrischen Punkt des Caseins – pH 4,6-4,5 – kommt es in ihr zu einer Annäherung der Partikel. Diese bilden zunächst lose poröse Stränge aus, die sich im weiteren Verlauf verzweigen und ein dreidimensionales Netzwerk ausbilden. Dieses zieht sich schließlich durch den ganzen Joghurt; die Strukturbildung ist somit fast abgeschlossen. In der letzten Phase kommt es zu einem sigmoiden Anstieg der Prozessviskosität, außerdem wird die Strukturbildung abgeschlossen. Im Anschluss an diese Phase beginnt die Synäresephase, die auch als Dicklegung bezeichnet wird.⁶³

III.) Résumé

Die Ergebnisse der Versuche, zeigen die Abhängigkeit der Milchsäurekonzentration in der Joghurtprobe von den Wachstumsphasen der Milchsäurebakterien. In der log-Phase haben die Milchsäurebakterien die höchste Stoffwechselaktivität, die Milchsäurekonzentration nimmt stark zu. Sowohl in der lag-Phase als auch in der stationären Phase ist die Stoffwechselaktivität der Milchsäurebakterien um einiges geringer als in der log-Phase. Die Milchsäurekonzentration im Joghurt nähert sich in diesen Phasen deshalb einem konstanten Wert an.

Die Säure-Base-Titration ergab des Weiteren, dass die Aminosäuren den pH-Wert zwar beeinflussen, am Verlauf der Säureentwicklung allerdings nicht beteiligt sind, da ihre Konzentration konstant bleibt.

Folglich führt die von den Milchsäurebakterien produzierte Milchsäure und nicht die Aminosäuren zur Gerinnung der Milch. In der log-Phase ihres Wachstums wandeln die Milchsäurebakterien so viel Lactose in Milchsäure um, dass der pH-Wert der Joghurtprobe auf den isoelektrischen Punkt des Caseins gesenkt wird. Durch die Änderung des Ionenmilieus kommt es zur isoelektrischen Fällung des Caseins, dabei verliert es seine Hydrathülle und fällt aus; die Milch gerinnt.

Der Joghurtherstellung liegt also eine komplexe Stoffwechselreaktion, die von Lactobacillen ausgeführt wird, zu Grunde. Die dabei entstehende Milchsäure führt zur Gerinnung der Milch und somit zur Joghurtentstehung.

63 vgl. Untersuchungen bei Fermentation und Processing von Rührjoghurt; vgl. opus.kobv.de

Bibliographie

- ◆ **Bakterien und Viren:**
Rudolf Gross; Bakterien und Viren; Deutsches Institut für Fernstudien an der Universität Tübingen; (o.O.); 1977
- ◆ **Biologie:**
G. Czihak, H. Langer, H. Ziegler; Biologie; Springer-Verlag; Heidelberg; 1981
- ◆ **Biomoleküle, Stoffwechsel, Organische Chemie des Alltags:**
Harald Becker; Abitur-Training Biomoleküle, Stoffwechsel, Organische Chemie des Alltags; Stark Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG; (o.O.); 1998
- ◆ **Genetik, Stoffwechsel, Ökologie:**
Meinhard, Moisl; Abitur-Training Biologie1 Genetik, Stoffwechsel, Ökologie, Leistungskurs; Stark Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG; (o.O.); 1995
- ◆ **Grundlagen der Biochemie:**
Otto Müller; Grundlagen der BiochemieII Stoffwechsel der Organismen; Georg Thieme Verlag; Stuttgart; 1978
- ◆ **Grundstudium Biologie:**
Katharina Munk; Biochemie, Grundstudium Biologie, Zellbiologie, Ökologie, Evolution; Spektrum Akademischer Verlag GmbH; (o.O.);2000
- ◆ **Joghurt:**
Stefanie Roediger-Streubel; Joghurt; Mosaik Verlag GmbH; München; 1989
- ◆ **kleine Enzyklopädie Biologie:**
Prof. Dr. Erhard Geissler, Prof. Dr. Eike Libbert, Prof. Dr. Joachim Nitschmann, Dipl.-Biol. Gudrun Thomas-Petersein; kleine Enzyklopädie Biologie; Verlag Harri Deutsch; Leipzig(DDR); 1977
- ◆ **Rechnen in der Chemie:**
Karl Kanz; Abitur-Training Chemie, Rechnen in der Chemie; Stark Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG; (o.O.); 2000
- ◆ **Schülerduden Chemie:**
Schülerduden Chemie; Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG; Mannheim; 2004

Internetquellen:

- ◆ **2.psu.ac:** [englisch]
<http://www2.psu.ac.th/PresidentOffice/EduService/journal/27-1-pdf/19casein-micelle.pdf>
Autor: Chanokphat Phadungath
[letzter Zugriff: 12.01.2007]

- ◆ **Alp.admin.ch:**
www.alp.admin.ch/themen/00625/00681/index.html?lang=de&download=MP3wBUQCu/8ulmKDu36WenojQ1NTTjaXZnqWfV
[letzter Zugriff: 21.01.2007]
- ◆ **Baecker.org:**
<http://www.baecker.org/seiten/rohstoffe/milch.htm>
[letzter Zugriff: 21.01.2007]
- ◆ **bayrisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz 2006:**
<http://www.vis.bayern.de/ernaehrung/fachinformationen/lebensmittel/gruppen/propaebiotika.htm>
Autor: Dr. Vera Lander, Dipl. oec. troph. Claudia Eberl
[letzter Zugriff 21.01.2007]
- ◆ **DB-Alp.admin.ch:**
http://www.db-alp.admin.ch/de/publikationen/docs/pub_LindbergC_2002_16017.pdf
[letzter Zugriff 21.01.2007]
- ◆ **Doktorarbeit:**
http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=973493283&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=973493283
Autor: Juliane Koch
[letzter Zugriff: 04.01.2007]
- ◆ **Isolierung und Charakterisierung von Milchsäurebakterien:**
http://www.radioisotope.de/pdf/LMP/Imp_06.pdf
[letzter Zugriff: 21.01.2007]
- ◆ **jds.fass.de:**
<http://jds.fass.org/cgi/reprint/81/11/2985.pdf>
[letzter Zugriff: 22.01.2007]
- ◆ **Laktose.net:**
<http://www.laktose.net>
[letzter Zugriff: 04.01.2007]
- ◆ **Lebensmittelmeister.de:**
<http://www.lebensmittelmeister.de/Lebensmittel/joghurt.htm>
Autor: Michael Janker
[letzter Zugriff: 20.11.2006]
- ◆ **Imp.uni-sb.de:**
http://www.lpm.uni-sb.de/Chemie/spartan_Pub/Alkansre_ester/2-Hydroxypropans%C3%A4ure.htm
[letzter Zugriff: 21.01.2007]
- ◆ **meb.uni-bonn.de:**
<http://www.meb.uni-bonn.de/giftzentrale/slexikon/bakterie.html>
[letzter Zugriff: 22.01.2007]
- ◆ **Medizinfo.de:**
<http://www.medizinfo.de/gastro/magen/pH-wert.shtml>
[letzter Zugriff: 21.01.2007]

- ◆ **opus.kobv.de:**
http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2006/1193/pdf/badarani_abdulah.pdf
[letzter Zugriff: 21.01.2007]
- ◆ **Quivalenzpunkt.know-library.net:**
<http://quivalenzpunkt.know-library.net/>
[letzter Zugriff: 21.01.2007]
- ◆ **Seilnacht.com:**
http://www.seilnacht.com/Chemie/ch_milch.htm
[letzter Zugriff: 21.01.2007]
- ◆ **Uni Bielefeld.de:**
<http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/milch/micellen.htm>
[letzter Zugriff: 04.01.2007]
- ◆ **Uni-Paderborn.de:**
http://cc.uni-paderborn.de/lehrveranstaltungen/_aac/prakt/ind_11.html
[letzter Zugriff: 20.01.2007]
- ◆ **Uni-protokolle.de:**
<http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Yoghurt.html>
[letzter Zugriff: 04.01.2007]
- ◆ **Untersuchungen bei Fermentation und Processing von Rührjoghurt:**
<http://www.tu-berlin.de/~foodrheology/download/joghurtdmz.pdf>
Autor: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Senge & Dipl.- Ing.Ulf Tabel
& Meister Hermann Hegemann
Veröffentlicht in: DMZ Deutsche Molkereizeitung, 124. Jahrgang 2003
[letzter Zugriff: 04.01.2007]
- ◆ **VIS.de:**
<http://www.vis.bayern.de/ernaehrung/fachinformationen/lebensmittel/gruppen/milchzucker.htm>
[letzter Zugriff: 22.01.2007]
- ◆ **Wikipedia.org** :[letzter Zugriff: 28.12.2006]
 - **Joghurt:** http://de.wikipedia.org/wiki/Joghurt_1
 - **Milchzucker:** <http://de.wikipedia.org/wiki/Milchzucker>
 - **Milchsäure:**http://de.wikipedia.org/wiki/Milchs%C3%A4ure_1
 - **Milchsäuregärung:**
<http://de.wikipedia.org/wiki/Milchs%C3%A4ureg%C3%A4rung>
 - **Milchsäurebakterien:**
<http://wikipedia.org/wiki/Milchs%C3%A4urebakterien1>
 - **Äquivalenzpunkt:** <http://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84quivalenzpunkt>
 - **Milchsäure-Isomere:**
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/b/b2/Milchs%C3%A4ure_Iso mere.PNG

Anhang

Gliederung:

- A) Messung der pH-Wertveränderung mit dem pH-Meter
- B) Messwerte für die Erstellung der Neutralisationskurve
- C) Versuchsaufbau: Säure-Base-Titration
- D) Messwerte der Säure-Base-Titration
- E) Berechnung der Stoffmengenkonzentration
- F) Berechnung der Massenkonzentration
- G) Stoffmengenkonzentration der Milchsäure und der Säure in der Joghurtprobe
- H) Massenkonzentration der Milchsäure
- I) Beispiel für die Berechnung des pH-Werts
- J) Hypothetische Berechnung des Natronlaugenvolumens
- K) Gram-Färbung
- L) Mechanismus der Strukturbildung bei der Säuregerinnung

A) Messung der pH-Wertänderung mit dem pH-Meter:

1. Messung (rot):

Zeit in min	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	320
pH-Wert	5,93	5,9	5,9	5,88	5,79	5,58	5,24	4,87	4,66	4,56	4,48	4,42

2. Messung (blau):

Zeit in min	0	30	60	90	120	135	150	165	180	200	210	225	240	270	300
pH-Wert	6,00	5,97	5,94	5,83	5,78	5,67	5,50	5,25	5,17	5,00	4,88	4,83	4,72	4,58	4,47

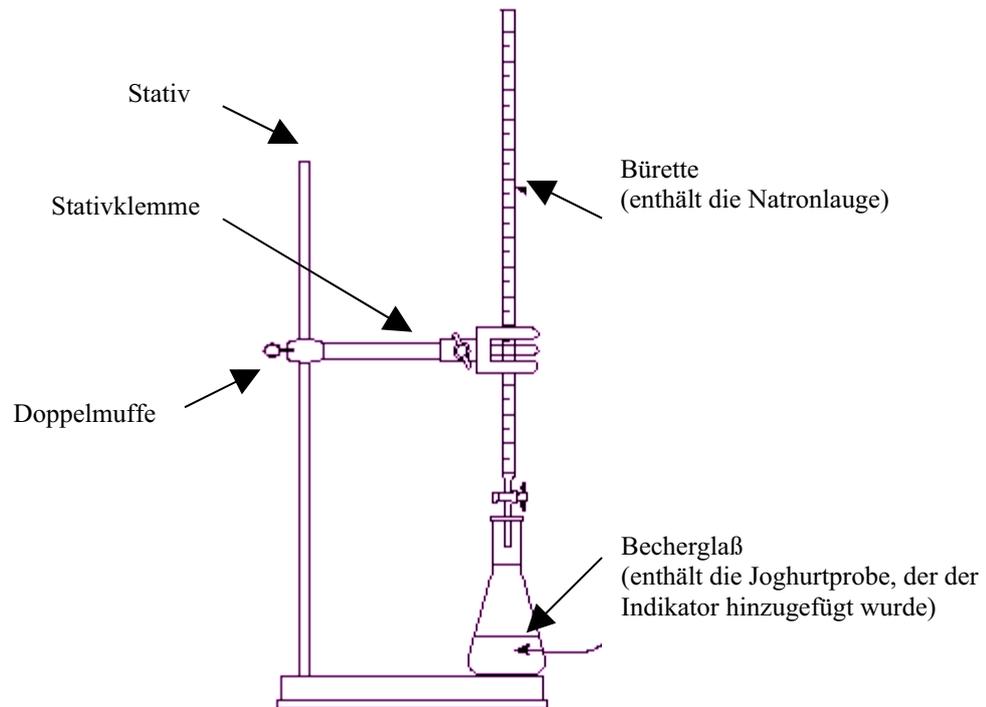
B) Messwerte für die Erstellung der Neutralisationskurve:

V(NaOH) in ml	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
pH-Wert	5,36	5,47	5,57	5,67	5,71	5,85	5,98	6,05	6,22	6,32	6,43

V(NaOH) in ml	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5
pH-Wert	6,55	6,66	6,78	6,87	6,96	7,10	7,27	7,57	7,74	8,00	8,26

V(NaOH) in ml	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0
pH-Wert	8,43	8,67	8,82	9,01	9,15	9,26	9,38	9,48	9,61	9,67	9,74

C) Versuchsaufbau: Säure-Base-Titration:

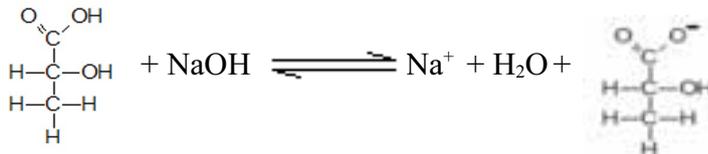


D) Messwerte der Säure-Base-Titration:

Zeit in min	0	60	120	180	240	300
$c(\text{NaOH})$ in mol/l	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$V(\text{NaOH})$ in ml	2,5	2,6	3,8	6,3	8,4	9,4
$V(\text{Joghurtprobe})$ in l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

E) Berechnung der Stoffmengenkonzentration

Bei der Titration von Milchsäure mit Natronlauge, wird die Milchsäure durch die Natronlauge neutralisiert. Diese Reaktionsgleichung beschreibt die Reaktion der Carboxylgruppe mit den Hydroxid-Ionen:



Das Stoffmengenverhältnis von den in der Joghurtprobe enthaltenen Säure und der Natronlauge kann aus der Reaktionsgleichung abgelesen werden:

$$\frac{n(\text{NaOH})}{n(\text{Säure})} = \frac{1}{1}$$

Aus diesem kann man die Konzentration der Säuren berechnen, da: $n = c \cdot V$

Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$c(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH}) = c(\text{Säure}) \cdot V(\text{Joghurtprobe})$$

Da auf Grund der Titration, sowohl das Volumen und die Konzentration der Natronlauge, als auch das Volumen der Joghurtprobe bekannt sind, kann man die Konzentration der Säuren errechnen:

$$c(\text{Säure}) = \frac{c(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH})}{V(\text{Joghurtprobe})}$$

Zusätzlich zur Milchsäure beinhaltet die Joghurtprobe Protein, die aus Aminosäuren bestehen. Im Gegensatz zur Konzentration der Milchsäure verändert sich die Konzentration der Aminosäuren während der Joghurtherstellung nicht. Um die Veränderung der Konzentration der Milchsäure während der Joghurtherstellung zu berechnen, muss die konstant bleibende Konzentration der Aminosäuren von ihr abgezogen werden. Sie kann mit der errechneten Säurekonzentration vor Beginn der Joghurtherstellung gleichgesetzt werden, da zu diesem Zeitpunkt fast keine Milchsäure in der Milch vorhanden ist.

$$c(\text{Milchsäure}) = c(\text{Säure}) - c_0(\text{Säure})$$

[Quelle: Rechnen in der Chemie]

F) Berechnung der Massenkonzentration

Aus der berechneten Konzentration der Milchsäure, kann ihre Stoffmenge errechnet werden:

$$n (\text{Milchsäure}) = c (\text{Milchsäure}) \cdot V (\text{Joghurtprobe})$$

Wenn die Stoffmenge der Milchsäure bekannt ist, kann man aus ihr die Masse der in der Lösung enthaltenen Milchsäure berechnen:

$$m (\text{Milchsäure}) = M (\text{Milchsäure}) \cdot n (\text{Milchsäure})$$

Die molare Masse der Milchsäure kann aus dem Periodensystem abgelesen werden. Milchsäure besteht aus drei Kohlenstoffatomen, drei Sauerstoffatomen und sechs Wasserstoffatomen. Sie hat also eine molare Masse von 90,0786 g/mol. Ist die Masse der Milchsäure bekannt, dann kann ihre Massenkonzentration in der Joghurtprobe problemlos berechnet werden:

$$\beta (\text{Milchsäure}) = \frac{m (\text{Milchsäure})}{V (\text{Joghurtprobe})}$$

[Quelle: Rechnen in der Chemie]

G) Stoffmengenkonzentration der Milchsäure und der Säure in der Joghurtprobe

V(NaOH) in l	0,0025	0,0026	0,0038	0,0063	0,0084	0,0094
c (NaOH) in mol/l	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
V(Joghurtprobe) in l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
c (Säure) in mol/l	0,0125	0,013	0,019	0,0315	0,042	0,047
c(Milchsäure) in mol/l	0	0,0005	0,0065	0,019	0,0295	0,0345

H) Massenkonzentration der Milchsäure

V(NaOH) in l	0,0025	0,0026	0,0038	0,0063	0,0084	0,0094
c(Milchsäure) in mol/l	0	0,0005	0,0065	0,019	0,0295	0,0345
n(Milchsäure) in mol	0	0,000001	0,00013	0,00038	0,00059	0,00069
M(Milchsäure) in g/mol	90,0786	90,0786	90,0786	90,0786	90,0786	90,0786
m(Milchsäure) in g	0	0,00009	0,0117	0,034	0,053	0,062
V(Joghurtprobe) in l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
β(Milchsäure) in g/l	0	0,005	0,59	1,7	2,66	3,10

I) Beispiel für die Berechnung des pH-Werts

Grundlage für die Berechnung des pH-Werts ist der pK_s -Wert. Aus ihm kann man den K_s -Wert berechnen.

$$K_s = 10^{-pK_s}$$

Bei der Milchsäure: $pK_s = 3,86$; $K_s = 10^{-3,86} = 1,38 \cdot 10^{-4}$

Stoffmengenkonzentration der Milchsäure hat man bereits errechnet, sie wird einfach aus der oben angegebenen Tabelle abgelesen und in folgende Formel eingesetzt.

$$c(\text{H}_3\text{O}^+) = \sqrt{K_s \cdot c(\text{Milchsäure})}$$

Aus der Stoffmengenkonzentration der Oxonium-Ionen kann man den pH-Wert der Joghurtprobe berechnen.

$$\text{pH} = -\lg c(\text{H}_3\text{O}^+)$$

[Quelle: Rechnen in der Chemie]

Errechnete Werte:

c(Milchsäure)	0,0005	0,0065	0,019	0,0295	0,0345
K_s -Wert	$1,38 \cdot 10^{-4}$				
errechneter pH	3,58	3,02	2,79	2,695	2,66
gemessener pH	5,9 / 5,94	5,79 / 5,78	5,24 / 5,17	4,66 / 4,72	4,48 / 4,47

J) Hypothetische Berechnung des Natronlaugenvolumens

angenommener pH = 5,5

$$c(\text{H}_3\text{O}^+) = 10^{-5,5} = 3,16 \cdot 10^{-6}$$

Löst man nun die Formel: $c(\text{H}_3\text{O}^+) = \sqrt{[K_s \cdot c(\text{Milchsäure})]}$ nach der Stoffmengenkonzentration der Milchsäure auf so erhält man folgende Formel:

$$c(\text{Milchsäure}) = \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+)^2}{K_s}$$

Setzt man nun die errechnete Stoffmengenkonzentration der Oxonium-Ionen in diese Formel ein, so kommt man zu folgendem Ergebnis:

$$c(\text{Milchsäure}) = 7,233 \cdot 10^{-8} \text{ mol/l}$$

Daraus kann man nun das Volumen der Natronlauge berechnen:

$$V(\text{NaOH}) = \frac{c(\text{Milchsäure}) \cdot V(\text{Milchsäure})}{c(\text{NaOH})}$$

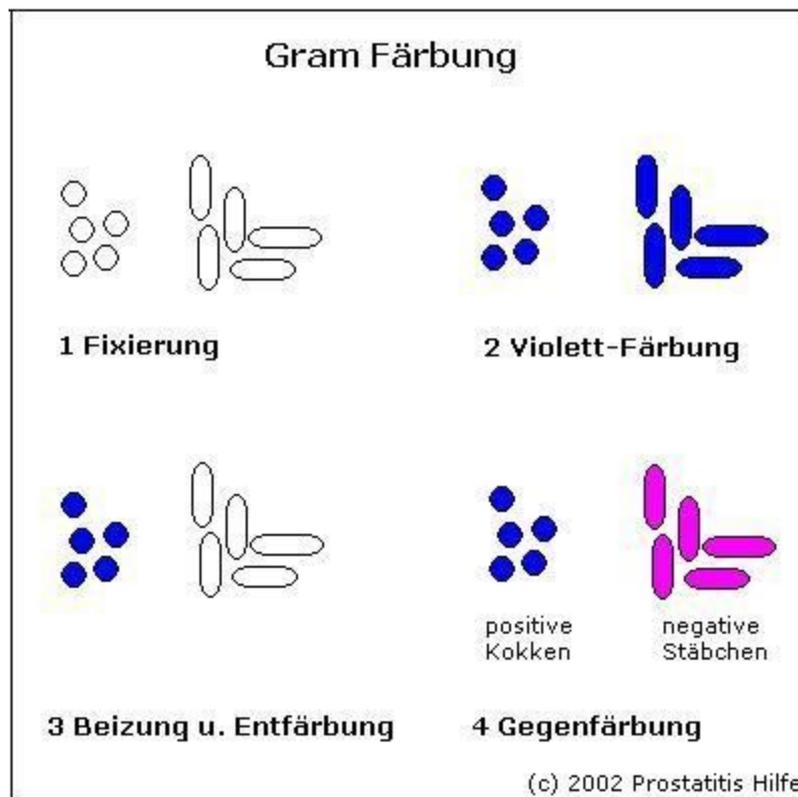
Wird die Konzentration der Milchsäure, sowie ihr Volumen – 0,02 l – und die Stoffmengenkonzentration der Natronlauge – 0,1 mol/l – eingesetzt, so kommt man zu folgendem Volumen der Natronlauge:

$$\underline{V(\text{NaOH}) = 1,4466 \cdot 10^{-9} \text{ l} = 0,000014466 \text{ ml}}$$

[Quelle: Rechnen in der Chemie]

K) Gram-Färbung von Bakterien

Bakterien sind in unterschiedlichem Maße in der Lage, Gentianaviolett nach Auswaschen mit Jod-Jodkalium-Lösung und Alkohol zurückzuhalten. Dies hängt mit der Dicke ihrer Zellwand zusammen. Bei der Gram-Färbung werden Bakterien also anhand ihrer Zellwanddicke unterschieden: Bakterien mit einer dicken Zellwand färben sich blau, während sich Bakterien mit einer dünnen Zellwand rot färben. Letztere werden als gram-negative Bakterien bezeichnet.



(1) Die Bakterien werden auf dem Objektträger durch Hitzeeinwirkung fixiert. In diesem Zustand sind sie mikroskopisch noch nicht (gut) sichtbar.

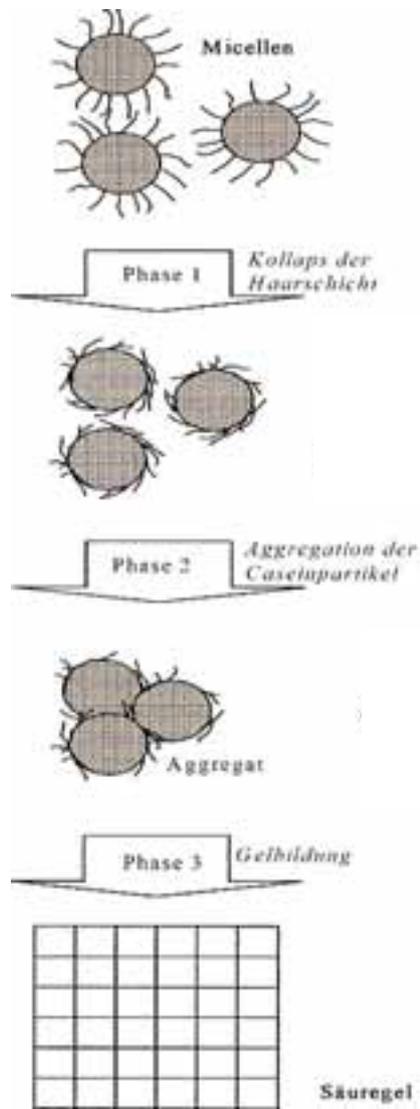
(2) Danach erfolgt eine Färbung mit Kristallviolett, durch die alle vorhandenen Bakterien blau gefärbt werden (n.b. es gibt Ausnahmen, die den Farbstoff nicht oder nur schlecht aufnehmen, z.B. Mykobakterien).

(3) Nach Beizung mit Jod-Kaliumjodid und Entfärbung (Differenzierung) mit Alkohol halten nur die Bakterien mit mehrschichtigem Murein den Farbstoff zurück, die mit einschichtigem Murein geben ihn wieder ab.

(4) Um auch diese Bakterien sichtbar zu machen, verwendet man eine Gegenfärbung (Safranin, Fuchsin).

[Quelle: <http://www.medizin-forum.de/prostatitis/gramstain-d.html> (letzter Zugriff: 21.01.2007)]

L) Mechanismus der Strukturbildung bei der Säuregerinnung



[Quelle: Untersuchungen bei Fermentation und Processing von Joghurt (bearbeitet)]

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

_____, den _____

Ort

Datum

Unterschrift