

Betrachtung der rheologischen Eigenschaften von Eigelblösung unter Einfluss zunehmender Temperatur

von

Heike Enzmann

Bachelorarbeit in Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 04.Juni 2014

1. Gutachter: Prof. Dr. Palberg
2. Gutachter: Prof. Dr. Vilgis

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Eigelb	3
2.1.1	Aufbau	3
2.1.1.1	Granula	3
2.1.1.2	Plasma	4
2.1.2	Temperaturabhängigkeit	4
2.1.3	Punkt der Rose	4
2.2	Rheologie	5
2.2.1	Oszillationsversuche	5
3	Material und Methoden	8
3.1	Eier	8
3.2	Rheometer	8
3.2.1	RMS 800	8
3.2.2	Messsystem	9
3.3	Methoden	10
3.3.1	Trennung der Eier	10
3.3.2	Herstellung der Mischung	10
3.3.3	Rheologie	10
3.3.4	Mikroskopie	11
3.3.5	Bestimmung des Wassergehalts	11
3.3.6	Auswertung der Rheologie	12
4	Messergebnisse	13
4.1	Bestimmung der Messparameter	14
4.1.1	Fehlerbestimmung	14
4.1.2	Amplitudenabhängigkeit	14
4.1.3	Aufheizgeschwindigkeit	17
4.2	Eigelb	19
4.2.1	Verschiedene Eigelbe	19
4.2.2	Scherstabilität	21
4.3	Mischungen	22
4.3.1	Öl	22
4.3.2	Wasser	24

Inhaltsverzeichnis

5 Diskussion	26
6 Zusammenfassung und Ausblick	28
Literaturverzeichnis	29

1 Einleitung

Eier sind seit tausenden von Jahren ein wichtiger Bestandteil der menschlichen Ernährung. Dies liegt vor allem an ihrem hohen Nährwertgehalt sowie den enthaltenen Proteinen. Heutzutage ist das weltweit am meisten verwendete Ei das Hühnerei.

Das Hühnerei wird auf viele Arten verwendet: Hart gekocht, als Frühstücksei, als Rührei oder es wird mit anderen Zutaten weiterverarbeitet. Hierbei sind die Eigenschaften des Eis sehr wichtig. So entstehen zum Stoffen sowie den Einfluss der Temperatur genau zu kennen.

Während aufgeschlagene Buttersoßen ebenso wie aufgeschlagene Eiersüßspeisen sehr beliebt und weit verbreitet sind, gibt es erstaunlich wenig wissenschaftliche Studien darüber, welche Bedingungen hier wirklich eine Rolle spielen und wie das Eigelb sich beim Erhitzen verhält. Es ist auffällig, dass die Studien in erster Linie Eigelblösung mit Salz oder Säure betrachten.

Der Wunsch, einen bestimmten Punkt im Übergang von der flüssigen zur festen Konsistenz zu erreichen, besteht im kulinarischen Bereich seit langem. Es ist allgemein bekannt und wird in guten Kochbüchern ausführlich dargestellt, dass Eigelb seine Konsistenz unter Wärmeeinwirkung von flüssig zu fest verändert [1]. Es ist auch allgemein bekannt, dass dabei eine Vielzahl von Zwischenstadien durchlaufen werden (was beispielweise die Basis für die individuell unterschiedlichen Ansprüche an die Konsistenz des Dotters im Frühstücksei ist). Mit dem "Punkt der Rose" wird ein Zwischenstadium beim Übergang von flüssiger zu fester Konsistenz von Eigelbzubereitungen beschrieben. Nur am "Punkt der Rose" ist demnach eine optimale Sauce Hollandaise herstellbar.

Mit dem Punkt der Rose liegt somit eine erstaunlich exakte empirische Bestimmungsmethode vor, um den gesuchten Grad an Konsistenzänderung zu erhalten, der zur Herstellung einer entsprechenden Soße geeignet (und vermutlich optimal) ist. Allerdings wird dabei nur eine einzelne punktuelle Bestimmung der Konsistenz einbezogen, eben der Nachweis, dass der Punkt der Rose erreicht ist. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, den Konsistenzübergang des Eigelbs quantitativ zu beschreiben. Hierbei wird vor allem auf den Gelpunkt (Übergang vom flüssigen in den festen Zustand) und den Punkt der Rose eingegangen.

Dabei wurde außerdem der Einfluss von Öl und Wasser auf den Gelpunkt und den Punkt der Rose untersucht. Beispiel Soßen, Gebäck und Süßspeisen unter verschiedenen Bedingungen, bei denen die Bindungseigenschaften sowie die Konsistenz des Eis genutzt werden.

Bei der Weiterverarbeitung spielt häufig das Eigelb eine wichtige Rolle, da es sehr hilfreiche Bindungseigenschaften aufweist. Es wird daher häufig ganz bewusst ohne das Eiweiß verwendet. Bei Süßspeisen ist wichtig, dass Eigelb sich aufschlagen lässt und sich außerdem gut mit Fett und Zucker verbindet, bei Gebäck ist zusätzlich erforderlich,

1 Einleitung

dass Eigelb fest wird. Bei all diesen Verarbeitungen ist außerdem die Emulgierfähigkeit des Eigelbs notwendig oder zumindest hilfreich. Ganz besonders für Mayonnaise und aufgeschlagene Buttersoßen, wie z.B. die Sauce Hollandaise, sind die Emulsionseigenschaften des Eigelbs und sein Verhalten unter Temperatureinfluss wichtig. Nur unter Rühren und mit Temperaturerhöhung lässt sich die gewünschte cremige Konsistenz erreichen. Hierbei ist wichtig, die Reaktion des Eigelbs mit anderen Stoffen sowie den Einfluss der Temperatur genau zu kennen.

Während aufgeschlagene Buttersoßen ebenso wie aufgeschlagene Eiersüßspeisen sehr beliebt und weit verbreitet sind, gibt es erstaunlich wenig wissenschaftliche Studien darüber, welche Bedingungen hier wirklich eine Rolle spielen und wie das Eigelb sich beim Erhitzen verhält. Es ist auffällig, dass die Studien in erster Linie Eigelblösung mit Salz oder Säure betrachten.

Der Wunsch, einen bestimmten Punkt im Übergang von der flüssigen zur festen Konsistenz zu erreichen, besteht im kulinarischen Bereich seit langem. Es ist allgemein bekannt und wird in guten Kochbüchern ausführlich dargestellt, dass Eigelb seine Konsistenz unter Wärmeeinwirkung von flüssig zu fest verändert[1]. Es ist auch allgemein bekannt, dass dabei eine Vielzahl von Zwischenstadien durchlaufen werden (was beispielweise die Basis für die individuell unterschiedlichen Ansprüche an die Konsistenz des Dotters im Frühstücksei ist). Mit dem "Punkt der Rose" wird ein Zwischenstadium beim Übergang von flüssiger zu fester Konsistenz von Eigelbzubereitungen beschrieben. Nur am "Punkt der Rose" ist demnach eine optimale Sauce Hollandaise herstellbar.

Mit dem Punkt der Rose liegt somit eine erstaunlich exakte empirische Bestimmungsmethode vor, um den gesuchten Grad an Konsistenzänderung zu erhalten, der zur Herstellung einer entsprechenden Soße geeignet (und vermutlich optimal) ist. Allerdings wird dabei nur eine einzelne punktuelle Bestimmung der Konsistenz einbezogen, eben der Nachweis, dass der Punkt der Rose erreicht ist. Ziel der vorliegenden Arbeit ist, den Konsistenzübergang des Eigelbs quantitativ zu beschreiben. Hierbei wird vor allem auf den Gelpunkt (Übergang vom flüssigen in den festen Zustand) und den Punkt der Rose eingegangen.

Dabei wurde außerdem der Einfluss von Öl und Wasser auf den Gelpunkt und den Punkt der Rose untersucht. Der Einfluss Öl und Wasser auf das Verhalten von Eigelb ist nicht nur aus anwendungsorientierter Sicht wichtig, sondern eignet sich auch, grundlegende lebensmittelphysikalische Fragen zu klären. Die amphipilen Eigelbbestandteile reagieren Wasser als polares Lösungsmittel vollkommen anders als auf Öl und fette bei denen es sich um unpolare Triacylglyceride handelt.

2 Grundlagen

2.1 Eigelb

In der Mitte des Hühnereis befindet sich das Eigelb, auch Dotter genannt. Es wird vom Eiklar (Eiweiß) umgeben und von den Hagelschnüren gehalten.

Der Eigelbanteil beträgt bei einem normalen Hühnerei etwa 30% bis 32% der Eimasse.

2.1.1 Aufbau

Das Eigelb enthält etwa 50% Wasser, 32 bis 35% Fett und 15,7 bis 16,6% Proteine. Der Rest besteht zu ca. 1% aus Kohlenhydraten und 1,1% aus Mineralstoffen.

Untersuchungen der Mikrostruktur des Eigelbs ergeben, dass sich das Eigelb aus polyedrischen Körnern mit einer Größe von 50 bis 7 μm aufbaut. Die einzelnen Körner sind von einer Eiweißmembran umgeben. Diese Membran wird durch Rühren oder Verdünnen leicht zerstört bzw. aufgebrochen. Die Dottertröpfchen mit einer Größe von 15 bis 45 μm sind wahrscheinlich Restbestandteile dieser Körner. Auch sie sind sehr leicht zu zersören.

Bei der Zentrifugation ergeben sich zwei Fraktionen: Die eine Fraktion sind die sogenannten Granula, in denen sich fast ausschließlich Proteine binden. Der Überstand ist das Plasma. Es ist die kontinuierliche, wässrige Phase des Eigelbs, die im wesentlichen Mizellen enthält. [2]

2.1.1.1 Granula

Die Granula haben eine Größe von 1-1,3 μm . Sie bestehen zu 70% aus High-Density-Lipoproteinen (HDL), den Lipovitellinen, zu 12% aus Low-Density-Lipoproteinen (LDLg) und zu 16% aus Phosvitin. Phosvitin ist ein Phosphoglycoprotein mit hoher Affinität zu Metallionen, z.B. Eisenionen. [8] [10]

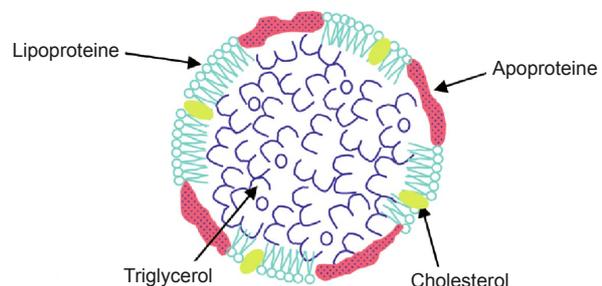


Abbildung 2.1: Aufbau einer LDL im Eigelb [6]

2 Grundlagen

2.1.1.2 Plasma

Die kontinuierliche wässrige Phase des Eigelbs ist das Plasma. In ihm befinden sich Low-Density-Lipoproteine (LDL), Lipovitellenin genannt. Es sind Mizellen mit einem Durchmesser von 25-60 nm. Diese Mizellen besitzen einen Kern aus Lipiden (Triglyceride und Cholesterinester), der von einer Hülle umgeben ist, die aus Phospholipiden, vorwiegend Lecithin, Apoproteinen, und Cholesterin besteht. Im Plasma finden sich außerdem die Livetine, hydrophile Proteine. [15]

Phosvitine sind temperaturstabil und bleiben noch bei 110° C stabil. Allerdings bilden die Livetine mit Phosvitinen faserige Strukturen an der Grenzschicht zu Ölen aus. Ab 33°C beginnen diese Strukturen zu denaturieren.

2.1.2 Temperaturabhängigkeit

Beim Erhitzen von Eigelb gibt es drei wesentliche Temperaturbereiche [3]:

1. **Bis 65°C:** Es sind keine wesentlichen Veränderungen im Eigelb festzustellen
2. **65°C bis 75°C:** Die Livetine denaturieren und bilden ein Netzwerk. Das Eigelb entwickelt eine cremige Konsistenz.
3. **Ab 75°C:** Es kommt einerseits zur Trennung der Emulsion, andererseits beginnen die Proteine im Eigelb zu denaturieren. [14] Das Eigelb ist fest.

2.1.3 Punkt der Rose



Abbildung 2.2: Eigelb zur Rose geblasen

Als Punkt der Rose wird bei Eigelb der Temperaturpunkt bezeichnet, bei dem das Eigelb eine deutliche Veränderung der Konsistenz aufweist (fester wird), die Proteine aber noch nicht vollständig denaturieren. Der Punkt der Rose liegt zwischen 67°C und 72°C. Er ist davon abhängig, welche Substanzen dem Eigelb zugefügt wurden. Der Einfluss hängt dabei deutlich von ihrem pH-Wert so wie von der Hydrophilie ab.

Wenn beim Kochen Eigelb am Punkt der Rose verwendet werden soll, wird Eigelb in einem Wasserbad so lange erhitzt, bis es eine cremige Konsistenz annimmt. Der optimale Punkt wird dadurch festgestellt, dass etwas von der erwärmten Eigelbmischung auf einen Kochlöffel gegeben und dieser dann angepustet wird. Nun sollte das Eigelb die Form einer von oben betrachteten Rose annehmen (siehe Abb. 2.2). Dieser Struktur verdankt der Punkt auch seinen ausgefallenen Namen.

Bei dem beobachteten Verhalten spielen die Proteine im Eigelb eine wichtige Rolle, da diese auf die Temperaturänderung reagieren und somit die Struktur des Eigelbs verändern.

Die globulären Livetine falten sich durch die thermische Energie auf. Es entstehen Wechselwirkungen zwischen den nun frei gewordenen langen Proteinketten und es bildet sich so ein stabilisierendes Netzwerk.

2 Grundlagen

Die LDL-Micellen des Plasmas bleiben weitgehend unbeschädigt und tragen daher nicht deutlich zur Stabilisierung bei. Auch die Granula bleiben am Punkt der Rose erhalten und sind also nicht an der Schaumbildung beteiligt.[13]

Wird die Temperatur über 75°C überschritten, so kommt es einerseits zur Trennung der Emulsion, da in diesem Temperaturbereich die Fettfreisetzung aus den LDL-Mizellen beginnt. Andererseits beginnen die Proteine im Eigelb zu denaturieren, so dass das Eigelb hart wird und seine cremige Konsistenz verliert. [14]

Wird dem Eigelb Öl oder Wasser zugefügt, sind zwei Prozesse zu beachten: die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Proteinen und Wasser einerseits und die durch die Phospholipide ermöglichte Lösung von Öl in Wasser andererseits. Beides beeinflusst das Verhalten des Eigelbs unter Wärmeeinfluss und kann so Auswirkung auf den Punkt der Rose haben.[5]

Fügt man dem Eigelb Wasser hinzu, bleibt die Öl-in-Wasser-Emulsion erhalten. Etwa 28% der im Eigelb enthaltenen Lipide sind Phospholipide bzw. Lecithine. Sie haben amphiphilen Charakter und können so als Emulgatoren wirken. Das Eigelb kann also problemlos mit Wasser verdünnt werden.

Wird dem Eigelb Öl zugefügt, behalten die Phospholipide ihre emulgatorische Eigenschaft. Selbst bei 80% Ölanteil wie in der Mayonnaise bleibt die Öl-in-Wasser-Emulsion erhalten. Durch Aufschlagen wird dabei die Eigelbmischung stabilisiert. [7]

2.2 Rheologie

Rheologie befasst sich mit den Fließ- bzw. Verformungseigenschaften von Substanzen. Bei der Rheologie wird unter anderem das Scherverhalten von Substanzen untersucht. Hierbei unterscheidet man zwischen Viskosität, Wasser ist z.B. eine ideal viskose Flüssigkeit, und Elastizität, ein Eisenblock ist ein ideal elastischer Festkörper. Die meisten Substanzen liegen in ihrem Verhalten zwischen diesen beiden Idealen und werden als viskoelastisch bezeichnet. Diese Substanzen setzen sich aus einem elastischen und einem viskosen Anteil zusammen. Mit Hilfe der Rheologie kann das Verhältnis von viskosem zu elastischem Anteil bestimmt werden. [4]

2.2.1 Oszillationsversuche

Oszillationsversuche lassen sich mit dem Zwei-Platten-Modell beschreiben. Die Probe befindet sich hierbei zwischen zwei Platten mit dem Abstand h und der Fläche A . Voraussetzung ist, dass die Probe an beiden Platten gut haftet und homogen verformt wird.

Eine der Platten wird nun mit einer Kraft F bewegt. Die Probe wird einer sinusförmig schwingenden Verformung ausgesetzt. Um die Verformungseigenschaften

2 Grundlagen

zu bestimmen, wird das komplexe Schubmodul gemessen. Dieses besteht aus dem Speichermodul G' , welches den elastischen Anteil beschreibt, und dem Verlustmodul G'' , welches für den viskosen Anteil des Materials steht. Bei der Messung werden zwei linear unabhängige Größen, die Amplitude und die Frequenz, vorgegeben. Der Strain beschreibt die Auslenkung der Platten, die Frequenz die Geschwindigkeit der Bewegung. Es wird die Kraft bzw. das Drehmoment gemessen. Hieraus ergibt sich das komplexe Schermodul $G^* = G' + iG''$.

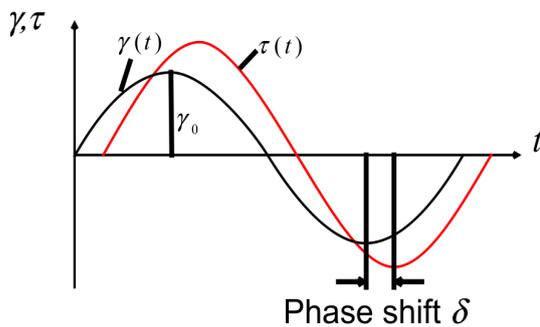


Abbildung 2.3: Vorgegebene Scherdeformation γ und resultierende Schubspannung τ

Über die Amplitude sowie Phasenverschiebung δ der Antwort Schwingung τ (siehe Abb. 2.3), lassen sich Aussagen über die Eigenschaften der Probe treffen. Je fester die Probe ist, desto geringer ist die Phasenverschiebung. So ist sie bei ideal elastischen Substanzen 0° und bei ideal viskosen Substanzen 90° . Bei viskoelastischen Substanzen liegt die Phasenverschiebung je nach elastischem und festem Anteil zwischen 0° und 90° . Die Amplitude gibt die übertragene Kraft an je größer die Antwortamplitude ist desto mehr Kraft wurde von der Substanz weitergeleitet.

Man unterscheidet bei Oszillationsversuchen zwischen viskosem und elastischem Verhalten. Wenn G'' größer als G' ist, zeigt die Substanz viskoses Verhalten, d.h. der viskose Anteil dominiert über den elastischen, die Probe zeigt Fließverhalten. Ideal viskose Substanzen lassen sich im linearen Bereich mit dem Newtonschen Gesetz beschreiben.

Bei elastischem Verhalten ist G' größer als G'' . Dies bedeutet, dass der elastische Teil den viskosen überwiegt. Die Struktur ist teilweise steif. Ein ideal elastisches Verhalten kann im linearen Bereich durch das Hookesche Gesetz beschrieben werden. Interessant ist auch der Sol-Gel-Übergangspunkt (kurz Gel-Punkt). Dies ist der Punkt, an dem das Material vom flüssigen ($G' < G''$) in den festen Zustand übergeht ($G' > G''$). Am Gelpunkt ist $G' = G''$

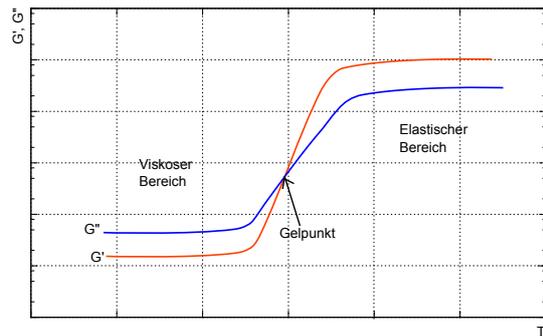


Abbildung 2.4: Temperaturabhängige Kurve von G' und G'' mit Gelpunkt

2 Grundlagen

Gemessen wird bei Oszillationsversuchen immer im linear-viskoelastischen Bereich (kurz LVE). Dies ist der Bereich, in dem G' und G'' für verschiedene Amplituden konstant sind. Der Bereich liegt meistens bei niedrigen Amplituden unterhalb der maximal zulässigen Deformation. Ab einem Grenzwert von γ_L werden Strukturen in der Substanz zerstört und somit wird eine flüssigere Struktur gemessen (siehe Abb. 2.5).

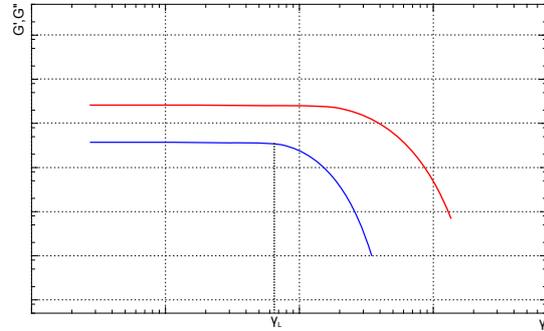


Abbildung 2.5: Amplitudentest als Deformationsfunktion (G' , G'' und γ werden logarithmisch aufgetragen)

3 Material und Methoden

3.1 Eier

Für die Messung wurden frische Hühnereier verwendet. Um möglichst ähnliche Bedingungen für die verschiedenen Messungen zu erreichen, wurden immer die real Freiland-eier vom Nahkauf in Mainz Bretzenheim verwendet und spätestens 7 Tage nach dem Legedatum verwendet. Die Eier gehörten alle in die Größenklasse M.

3.2 Rheometer

3.2.1 RMS 800



Das verwendete Rheometer RMS 800 (siehe Abb. 3.1) ist ein Scherrheometer, bei dem verschiedene Messsysteme angebracht werden können. Bei dem RMS 800 wird für die Messung an der unteren Platte eine Schwingung angelegt und der übertragene Impuls an der oberen Platte gemessen.

Beheizt wird die Probe im RMS 800 mit einem Heißluftofen. Der Ofen wird nach dem Einbringen der Probe geschlossen. Im hinteren Teil des Rheometers befindet sich die Heizspirale in einem Rohr, über das heiße Luft in den Raum geblasen wird. Die Temperatur der Probe wird über einen Fühler unter der Platte bestimmt.

Abbildung 3.1: RMS 800

3.2.2 Messsystem

Für die Untersuchung des Eigelbs werden zweierlei Messsysteme verwendet:

1. Kegel-Platte-System:

Das verwendete Kegel-Platte-Messsystem besteht aus einer runden Platte (unten) und einem Kegelstumpf (oben). Die Platte und die Grundfläche des Kegelstumpfs haben einen Durchmesser von 50 mm. Der Abstand zwischen Platte und Kegelstumpf beträgt hierbei immer die Höhe a des Ergänzungskegels (45μ) (siehe Abb. 3.2b).

Da der Abstand immer der Höhe Ergänzungskegels entsprechen muss, kann nur bei konstanter Temperatur gemessen werden, da sich die Platten beim Erhitzen ausdehnen und der Abstand dann nicht mehr eingehalten wird.

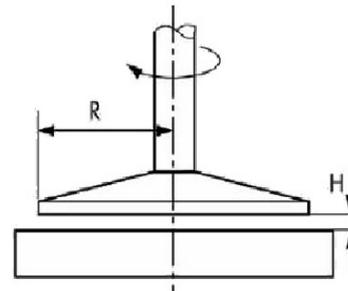
Für Messungen bei konstanter Temperatur ist das Kegel-Platte-System zu bevorzugen, da die Scherrate im gesamten Kegelspalt konstant ist.

2. Platte/Platte-Messsystem:

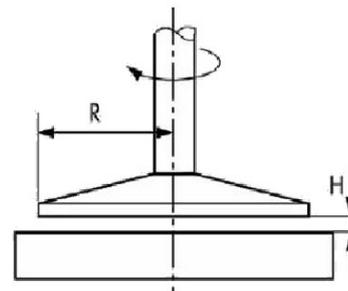
Das verwendete Platte-Platte-Messsystem besteht aus zwei runden Platten mit einem Durchmesser von 50 mm. Der Abstand H zwischen den Platten ist variabel und hängt von der Probenmenge ab (siehe Abb. 3.2a).

Da der Spaltabstand keinen deutlichen Einfluss auf die Messung hat, ist dieser Aufbau gut für Messungen mit variablen Temperaturen geeignet. Hierfür wird der Spaltabstand in kurzen Abständen nachgeregelt, um die Normalkraft konstant zu halten. So kann der Ausdehnung der Platten entgegengewirkt werden und die Ausdehnung der Probe berücksichtigt werden. Wenn die Probe fest genug ist, wird vom System ein Druck wahrgenommen und der Spaltabstand automatisch nachgeregelt.

Es besteht jedoch keine konstante Scherbedingung über den gesamten Radius der Platten.



(a) Platte-Platte-System



(b) Kegel-Platte-System mit abgenommener Spitze

Abbildung 3.2: Messsysteme

3.3 Methoden

3.3.1 Trennung der Eier

Die Eier werden von Hand getrennt. Hierfür werden sie zunächst aufgeschlagen und das Eiweiß wird abgeschüttet. Danach werden die Eigelbe vorsichtig über Küchenpapier gerollt, um das restliche Eiweiß zu entfernen. Zum Schluss wird die Dottermembran aufgeschnitten und die Flüssigkeit aufgefangen.

Das gesammelte Eigelb wird in einem geschlossenen Glasbehälter im Kühlschrank bis zum Gebrauch aufbewahrt. Um größere Probenmengen mit konstanteren Eigenschaften zu erhalten, werden teilweise 2 Eigelbe gemischt.

3.3.2 Herstellung der Mischung

Um die Eigelbmischung mit Öl oder Wasser herzustellen, wird zuerst Eigelb in ein Schnappdeckelglas gegeben. Die gewünschte Substanz (Wasser, Öl) wird hinzugefügt und vorsichtig verrührt, bis eine gleichmäßige Verteilung erreicht wird. Das Verhältnis von Eigelb zu Wasser oder Öl wird über das Gewicht bestimmt.

Die Mischungen werden bis zum Gebrauch verschlossen im Kühlschrank aufbewahrt. Für die Mikroskopie muss die Probe vorher erwärmt werden. Dafür wird eine kleine Menge in Eppendorf-Probengefäße gefüllt und im Kühlthermomixer MKR1 unter leichtem Schütteln mit 200 rpm für 5 Minuten bei der gewünschten Temperatur erhitzt.

3.3.3 Rheologie

Zuerst muss der Nullabstand am Rheometer eingestellt werden. Dafür werden die Platten aufeinander gefahren, bis eine Kraft gemessen wird. Anschließend werden die Platten wieder auseinander gefahren, bis die Kraft wieder bei null liegt. Dies ist der Nullabstand, die Anzeige wird auf null gestellt.

Danach werden ca. 2ml der Eigelblösung auf die Platte des Rheometers aufgetragen und die Platten wieder zusammengefahren, so dass der gesamte Bereich Eigelblösung enthält. Hierbei wird die untere Platte zeitweise gedreht, um für eine gleichmäßige Verteilung zu sorgen. Der Rand der Platten wird, nach der Befüllung mit Silikonöl bestrichen, um das Eigelb vor dem Austrocknen zu schützen.

Vor jeder Messung wird ein Time Sweep bei 40 °C durchgeführt, um sicher zu stellen, dass sich keine Haut gebildet hat.

Es werden zwei Messreihen für die Proben aufgenommen:

1. Dynamic Strain Sweep (DSS): Die Temperatur und Frequenz werden konstant gehalten und die Scherrate variiert:
Die Probe wird bei einer festen Temperatur gehalten und der Strain wird von 0,1 % auf 200 % erhöht.

3 Material und Methoden

2. Dynamic Temperatur Ramp (DTR): Die Amplitude und Frequenz werden konstant gehalten und die Temperatur variiert:
Während die Probe von 40°C auf 100°C erhitzt wird, werden die rheometrischen Eigenschaften gemessen. Die Temperatur wird hierbei gleichmäßig erhöht. Es muss beachtet werden, dass sich die Metallplatten beim Erwärmen um ca. 2µm pro 1°C ausdehnen, der Plattenabstand muss daher nachgeregelt werden. Dies geschieht manuell am Rheometer alle 5°C, bis das Eigelb fest genug ist und somit genug Kraft wirkt, dass das System automatisch geregelt wird.
Die Messung wird für alle Proben mit dem Platte-Platte-System durchgeführt.

Die Daten werden mit dem Programm TA Orchestrator aufgenommen und anschließend mit gnuplot ausgewertet.

3.3.4 Mikroskopie

Die Probe wird auf den Objektträger gegeben und mit einem Deckglas abgedeckt. Bei festeren Proben wird das Deckglas angedrückt, um eine dünne Probenschicht zu erhalten. Die Proben werden dann im Durchlicht mit dem Photomikroskop Axiophot betrachtet und mit Hilfe des Programms ImageJ die Bilder mit verschiedenen Vergrößerungen ausgewertet.

3.3.5 Bestimmung des Wassergehalts

Der Wassergehalt verschiedener Eigelbe wird mit dem Halogenfeuchtbestimmer HR83 gemessen. Hierfür werden ca. 2 g Eigelb auf einen Filter gegeben und dann nach Verdampfen des Wassers die Trockenmasse bestimmt. Über den Trockenmassenanteil lässt sich dann einfach der Wasseranteil bestimmen.

3.3.6 Auswertung der Rheologie

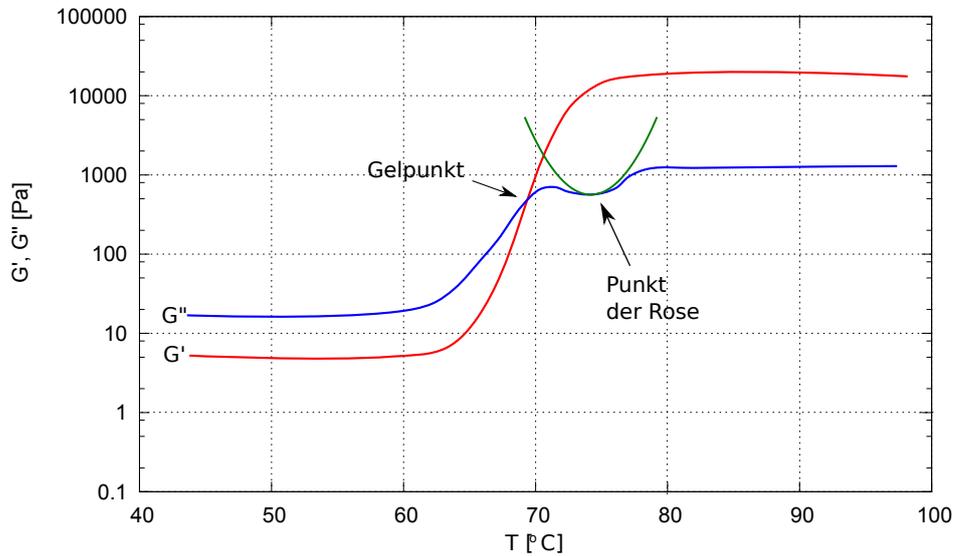


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Verlaufs von G' und G'' abhängig von der Temperatur mit Gelpunkt und Punkt der Rose

Um den Gelpunkt zu bestimmen, wird der Schnittpunkt von G' und G'' bestimmt. Dies wird mit gnuplot durchgeführt, indem die Messwerte linear interpoliert werden und dann der Schnittpunkt bestimmt wird.

Um den Punkt der Rose zu bestimmen, wird der Bereich, in dem sich der Punkt befinden soll, optisch ermittelt und dann mit einer Parabel gefittet. Der Scheitelpunkt der Parabel ist der Punkt der Rose.

Die Werte von G' und G'' bei verschiedenen Temperaturen werden ebenso durch lineare Interpolation der Messwerte mit gnuplot bestimmt.

4 Messergebnisse

Verschiedene Eigenschaften von Eigelb lassen sich schon mit dem Mikroskop erkennen (siehe Abb. 4.1). So erkennt man, dass sich im Eigelb kleine Öltröpfchen befinden (siehe Abb. 4.1). Bei 25°C liegen die Tröpfchen in Suspension (siehe Abb. 4.1a) vor. Wird das Eigelb erhitzt, so werden die Öltröpfchen deutlich größer (siehe Abb. 4.1b und 4.1c).

Zwischen 70°C und 72°C findet im Eigelb eine sichtbare strukturelle Änderung statt. Das Eigelb wird in diesem Temperaturbereich deutlich fester und die Struktur wird gröber (siehe Abb. 4.1d). Die Öltröpfchen sind jetzt von einer festen Masse eingeschlossen, mit der sie sich jedoch nicht verbinden.

Bei weiterem Erhitzen wird das Eigelb immer gröber. Es weist bei 75°C eine sehr raue Struktur auf (siehe Abb. 4.1e), bis es bei 80°C vollständig erstarrt ist (siehe Abb. 4.1f). Die Tröpfchen sind wegen der festen Struktur nur noch schlecht sichtbar.

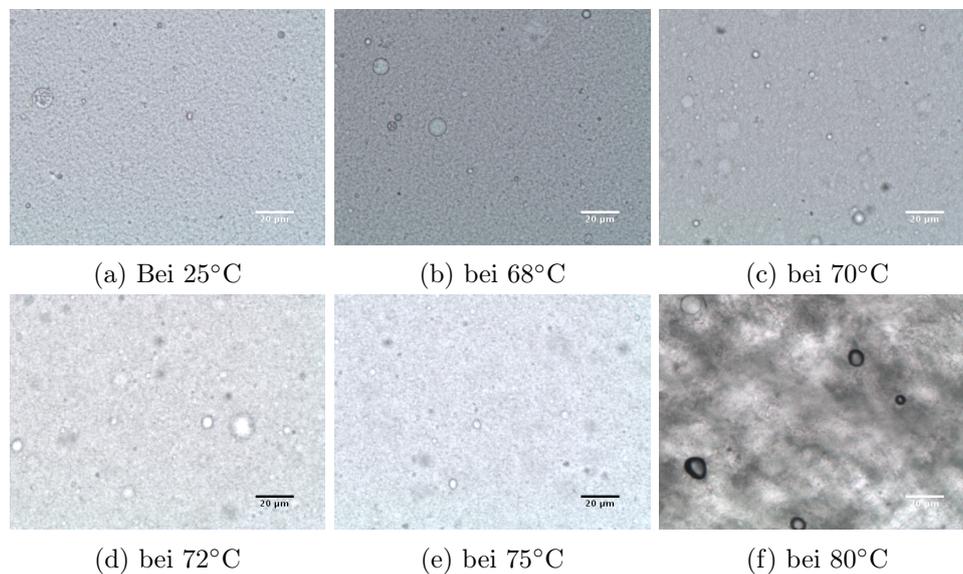


Abbildung 4.1: Mikroskopische Betrachtung von Eigelb bei verschiedenen Temperaturen

4.1 Bestimmung der Messparameter

4.1.1 Fehlerbestimmung

Es werden zweierlei Fehler bestimmt. Einerseits die Schwankung, die bei unterschiedlichen Messungen registriert wird, andererseits der Fehler, der durch Unterschiede beim Aufbau (z.B. Auftragen der Probe) zur Messung auftritt.

Um den Fehler zu finden, der durch Messungenauigkeiten auftritt, wird bei einer Eigelbprobe bei verschiedenen Temperaturen G' und G'' bestimmt. Der Fehler ergibt sich nun aus der Standardabweichung der Mittelwerte. Es wird festgestellt, dass der Fehler mit maximal 0,7% gering ist.

Der Fehler, der durch Unterschiede beim Auftragen entsteht, ist deutlich größer. Dies liegt daran, dass die Platten nicht immer genau gleich befüllt sind und dass der Plattenabstand an einer eher ungenauen Skala abgelesen wird. Um den Fehler zu bestimmen, wurden verschiedene Proben von demselben Eigelb vermessen. Es wurde der Fehler bei 40°C, 55°C und 60°C sowie bei 75°C und 80°C zur Ermittlung eines Gesamtfehlers verwendet. Im Bereich zwischen 60 und 75°C konnte kein vernünftiger Fehler ermittelt werden, da Abweichungen in der Temperatur und in der Aufheizgeschwindigkeit hier zu sehr großen Unterschieden in G' und G'' führen. Der Fehler schwankt bei der Bestimmung zwischen 12% und 20%. Für die weiteren Messungen wird daher ein Fehler von 20% verwendet.

Für die Bestimmung der Temperatur des Gelpunkts und des Punkts der Rose werden Dreifachmessungen durchgeführt und der Mittelwert betrachtet. Der Fehler ergibt sich aus der Standardabweichung.

4.1.2 Amplitudenabhängigkeit

Bevor der Konsistenzverlauf von Eigelb untersucht wird, muss bestimmt werden, welcher Strain hierfür geeignet ist. Dafür muss beachtet werden, dass sich Eigelb beim Erhitzen strukturell ändert und deutlich fester wird. Es wird daher bei verschiedenen Temperaturen die Reaktion des Eigelbs auf verschiedene Strains untersucht. Messungen sind nur im linear-viskosen Bereich sinnvoll, das heißt in dem Bereich, in dem die Werte konstant sind. Es kann weder in Bereichen gemessen werden, in denen die Werte sehr variabel sind, noch in Bereichen, in denen sich die Viskosität verändert, weil Strukturen zerstört werden.

Eine Beobachtung von Temperaturen unter 60°C zeigt, dass bei einem sehr geringen Strain keine sinnvollen Werte aufgenommen werden können (siehe Abb. 4.2), da bei geringem Strain wegen der sehr flüssigen Konsistenz nicht ausreichend Impuls weitergeleitet wird, um an der oberen Platte vernünftig gemessen zu werden. Die Sensitivität des Rheometers ist nicht ausreichend. Sinnvolle Werte sind erst ab einem Strain von ca. 3% zu messen.

Bei Temperaturen bis 60 °C und einem Strain von mehr als 10% wird das Eigelb flüssiger (siehe Abb. 4.2 gelbe und grüne Kurve), da Strukturen im Eigelb zerstört

4 Messergebnisse

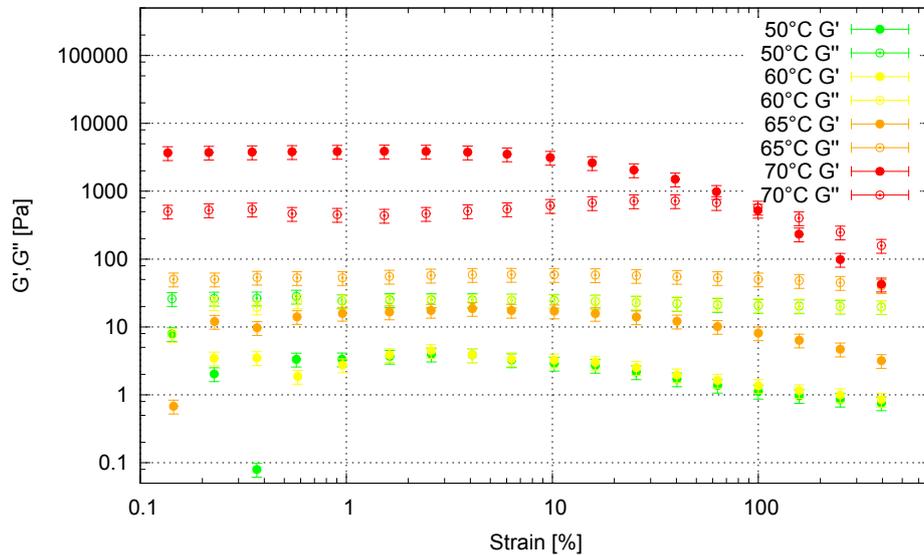


Abbildung 4.2: DSS von Eigelb bei verschiedenen Temperaturen

werden. Ist dieser Bereich erreicht, so können mit einem so hohen Strain keine aussagekräftigen Messungen mehr durchgeführt werden.

Bei 60°C ist das Eigelb schon etwas fester (siehe Abb. 4.2 orange Kurve). Durch die höhere Viskosität weist Eigelb ein anderes Verhalten in Bezug auf verschiedene Strains auf. So ist eine Messung bei 60°C schon bei einem niedrigen Strain von 0,8% möglich. Das Eigelb wird jedoch weiterhin bei Strains über 10% dünnflüssiger.

Bei weiterer Temperaturerhöhung wird das Eigelb noch fester und der Strain führt zu einem anderen Verhalten des Eigelbs. So ist bei 75°C G' größer als G'' (siehe Abb. 4.2 rote Kurve). Hier kann nun die Messung bei beliebig kleinem Strain durchgeführt werden. Allerdings fällt G' bei einem Strain von über 10% schnell ab und ist bei einem Strain von 110% sogar kleiner als G'' . Dieses Verhalten kommt dadurch zustande, dass bei höherem Strain zu viel Kraft auf das Eigelb wirkt und es sich dadurch langsam von der Platte löst. Dies führt dazu, dass der Impuls nicht mehr vollständig übertragen wird, sondern das Eigelb über die Platte gleitet.

Durch die Zugabe von Wasser zum Eigelb erhält man eine Eigelb-Wasser-Mischung, die eine flüssigere Konsistenz aufweist als das bisher betrachtete reine Eigelb.

So lassen sich bei einer Mischung mit 10% Wasseranteil bei einem Strain von unter 4% bei Temperaturen bis 60°C nur teilweise Messwerte darstellen (siehe Abb. 4.3a grüne und gelbe Kurve), da in diesem Bereich nicht ausreichend Impuls übertragen wird und somit keine Messwerte erzeugt werden. Aussagekräftige Werte können erst ab einem Strain von 9% aufgenommen werden. Bei einem Strain von über 10% ist dasselbe Verhalten wie bei reinem Eigelb zu beobachten. Auch hier wird das Eigelb flüssiger, da die Strukturen zerstört werden.

4 Messergebnisse

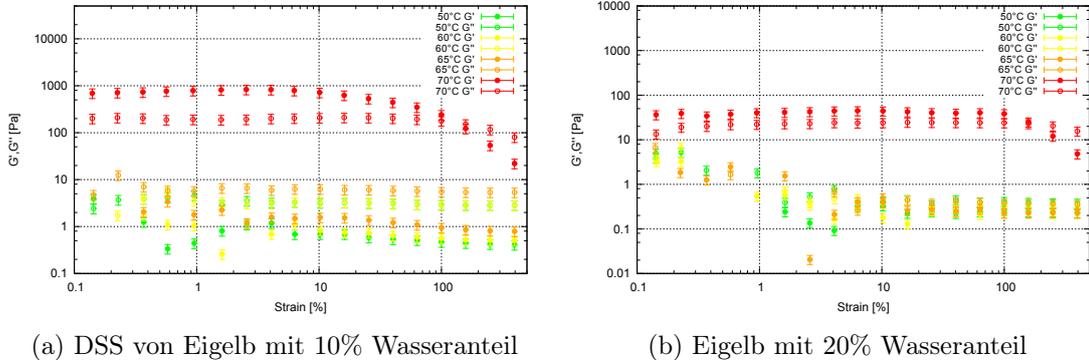


Abbildung 4.3: DSS von Eigelb mit Wasseranteil bei verschiedenen Temperaturen

Bei einer Temperatur um 65°C (siehe Abb. 4.3a orange Kurve) ist die Mischung dickflüssiger als bei niedrigeren Temperaturen. Es lassen sich daher schon ab einem Strain von ca. 4% sinnvolle Werte messen. Auch hier tritt bei Strains über 10% wieder dasselbe Verhalten wie bei reinem Eigelb auf.

Wird die Mischung bei höheren Temperaturen noch fester, so lassen sich bei beliebig niedrigen Strains schon gute Messwerte aufnehmen. Dies ist bei 70°C bereits der Fall (siehe Abb. 4.3a rote Kurve). Hierbei kommt es aber aus demselben Grund wie bei reinem Eigelb bei Strains von über 10% zu einem Abfall von G' bis unterhalb von G'' .

Bei einer Mischung mit 20% Wasseranteil ist die Konsistenzänderung noch deutlicher zu erkennen als bei der Mischung mit 10% Wasseranteil. Bei dieser Mischung ist die Viskosität bis 65°C nicht temperaturabhängig (siehe Abb. 4.3b grüne, gelbe und orange Kurve). Auch ist die Viskosität in diesem Bereich so niedrig, dass bis zu einem Strain von 1% nur teilweise Messwerte aufgenommen werden. Erst ab einem Strain von 10% ist die Schwankung der Werte gering genug, dass eine Aussage über den Verlauf gemacht werden kann. Konstante Werte werden sogar erst ab einem Strain von 12% erreicht. Es kommt jedoch im Vergleich zu reinem Eigelb und der Mischung mit 10% Wasseranteil zu keiner Änderung im Verhalten bei höheren Strains. Auch bei Strains bis zu 200% bleibt es im linearen Bereich. Dies wird bei einem 20% Wasseranteil im Eigelb möglich, da die Mischung sehr dünnflüssig ist.

Bei 70°C ist die Mischung mit 20% Wasseranteil schon deutlich fester, jedoch immer noch weicher als reines Eigelb. Es lassen sich bei Strains unter 0,3% noch keine stabilen Werte aufnehmen (siehe Abb. 4.3b). Dafür ist bis zu einem Strain von 100% noch kein Abfall von G' zu beobachten. Über 100% Strain tritt dann ein sehr starker Abfall von G' auf. Dies liegt vermutlich daran, dass sich die Mischung nicht wie bei reinem Eigelb und der Mischung mit 10% Wasseranteil langsam von der Platte löst, sondern dass sie bei einem zu hohen Strain schnell abreißt. Das Eigelb ist noch sehr weich und haftet durch den hohen Wasseranteil nicht so gut.

Wegen des betrachteten Verhaltens werden alle weiteren Messungen bei einem Strain von 10% durchgeführt.

4.1.3 Aufheizgeschwindigkeit

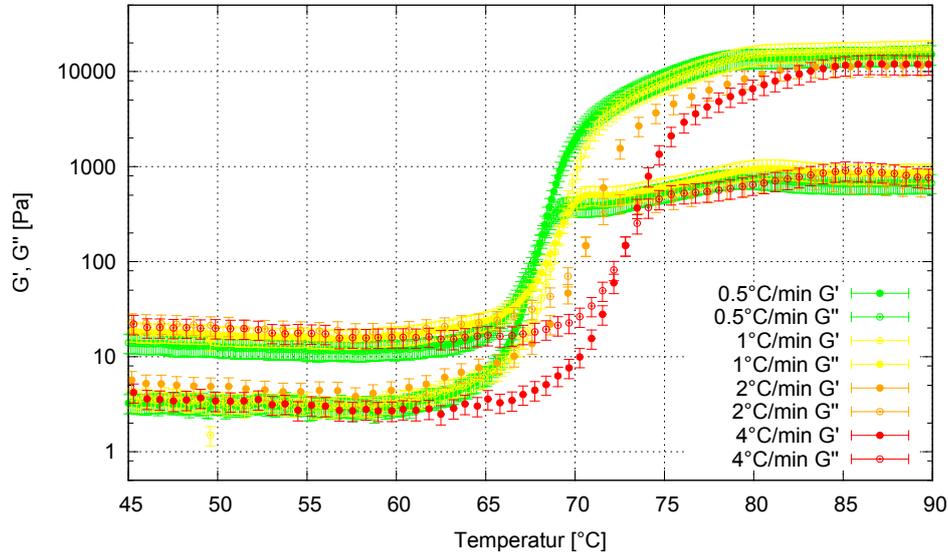


Abbildung 4.4: Verlauf von G' und G'' von Eigelb beim Erhitzen mit verschiedener Geschwindigkeit

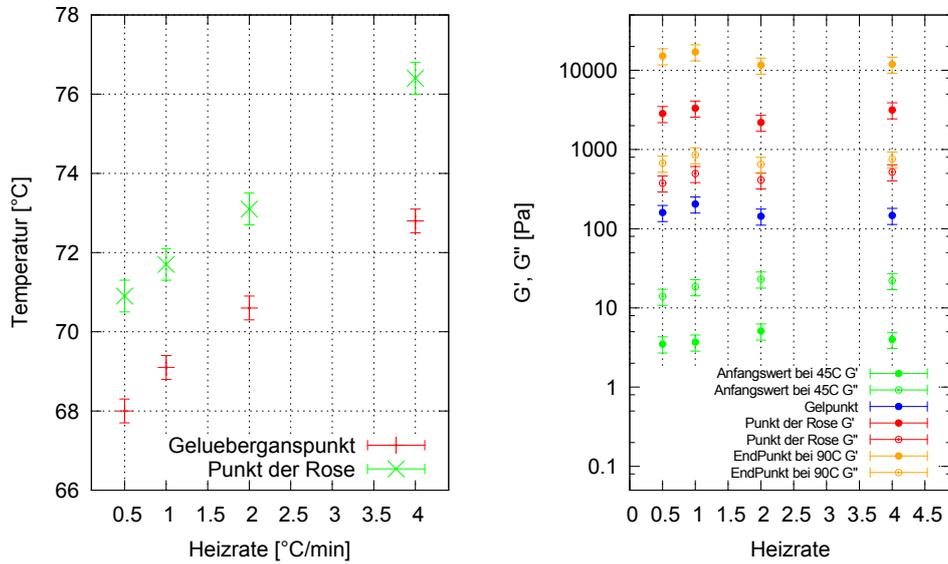
Bei der Untersuchung von Eigelbeigenschaften ist der Einfluss der Temperaturänderungsrate auf die Denaturierung interessant. Bei einem schnelleren Temperaturanstieg beginnt sich die Konsistenz erst später zu ändern als bei einer langsameren Heizgeschwindigkeit (siehe Abb. 4.4). So ist bei einer Heizrate von $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$ bei 68°C der Gelpunkt erreicht, bei der deutlich schnelleren Heizrate von $4^\circ\text{C}/\text{min}$ ist der Punkt erst bei 73°C erreicht. (4.5a). Bei einer Heizrate von $4^\circ\text{C}/\text{min}$ treten dieselben Ereignisse erst $(5 \pm 0,3)^\circ\text{C}$ später auf als bei einer Heizrate von $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$. Während der Gelpunkt und der Punkt der Rose abhängig von der Temperaturänderungsrate bei unterschiedlichen Temperaturen erreicht werden, ist die Konsistenz am Gelpunkt und am Punkt der Rose für alle Heizraten gleich (siehe 4.5b). Der gesamte Verlauf der Kurven ist nur in der Temperatur-Achse verschoben.

Diese Ergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass Eigelb nicht schlagartig denaturiert, sondern der Vorgang eine gewisse Zeit benötigt. So kann es sein, dass das Eigelb zwar die angegebene Temperatur erreicht hat, die Proteine jedoch nicht genug Zeit haben, um schon bei dieser Temperatur zu reagieren. Ein andere mögliche Erklärung ist, dass die Temperatur des Eigelbs nicht unbedingt mit der angegebenen Temperatur übereinstimmt, da die Temperatur in der unteren Platte und nicht im Eigelb selber gemessen wird.

Dies spricht dafür, dass es sinnvoller ist bei einer der langsamen Heizraten zu messen, da dann die Viskosität bei ungefähr 61°C für $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$ und bei 60°C für $1^\circ\text{C}/\text{min}$ anzusteigen beginnt.

Es wird daher im folgenden mit einer Heizrate von $1^\circ\text{C}/\text{min}$ gemessen.

4 Messergebnisse



(a) Gelpunkte und Punkte der Rose verschiedener Heizraten

(b) relevante Werte von G' und G'' bei verschiedenen Heizraten

Abbildung 4.5: Temperatur sowie Werte von G' und G'' von dem Gelpunkt und Punkt der Rose von Eigelb bei verschiedenen Heizraten

4.2 Eigelb

4.2.1 Verschiedene Eigelbe

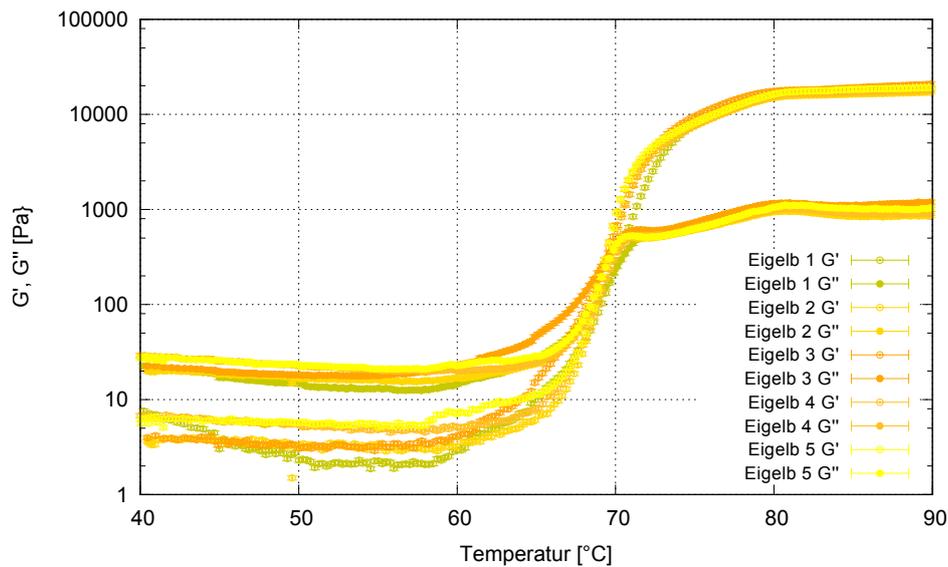


Abbildung 4.6: DTR von verschiedenen Eigelben

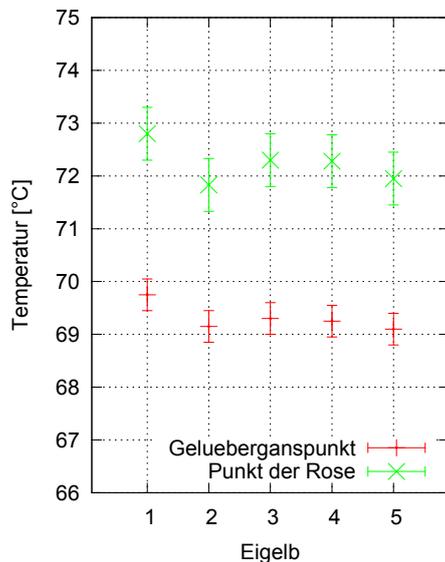


Abbildung 4.7: Temperatur am Gelpunkt und Punkt der Rose von verschiedenen Eigelb

Betrachtet man die Viskositätsänderung von verschiedenen Eigelben beim Erhitzen, so fällt auf, dass der Verlauf sich unterscheidet (siehe Abb. 4.6). Dies liegt daran, dass es sich bei Eigelb um ein Naturprodukt handelt und die Zusammensetzung nicht immer gleich ist. So zeigt eine Untersuchung des Wassergehalts, dass der Wassergehalt bei den hier verwendeten Eiern zwischen $(48,766 \pm 0,005)\%$ und $(50,123 \pm 0,005)\%$ schwankt. Es ist davon auszugehen, dass dies einen Einfluss auf die Messung hat, da durch die Zugabe von Wasser sich die rheologischen Eigenschaften von Eigelb ändern (siehe Abschnitt 4.3.2).

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Eigelbproben beeinflussen den Verlauf der Rheologiekurve (siehe Abb. 4.6), haben aber nur eine geringe Wirkung auf die Temperatur, bei der der Gelpunkt und der Punkt der Rose erreicht werden (siehe Abb. 4.7). Die Temperaturdifferenz

4 Messergebnisse

zwischen dem Gelpunkt und dem Punkt der Rose ist konstant bei 3°C .
 Es lassen sich der Gelpunkt und der Punkt der Rose von Eigelb aus den Messungen bestimmen. Der Gelpunkt von Eigelb liegt bei $(69,2 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ und der Punkt der Rose bei $(72,2 \pm 0,2)^\circ\text{C}$.

Betrachtet man G' und G'' Anfang der Messung bei 45°C , am Gelpunkt, am Punkt der Rose und am Ende der Messung bei 90°C (siehe Abb. ??), so stellt man fest, dass es keinen Zusammenhang zwischen Anfangswert bei 45°C und den anderen Werten (von G' und G'') zu geben scheint. Das Verhältnis von den anderen Werten bleibt relativ konstant. So ist zum Beispiel die Differenz vom Gelpunkt zum Punkt der Rose (G'') $(3264 \pm 26,8)\text{Pa}$ und der Abstand vom Gelpunkt zum Endpunkt $(18595,6 \pm 1373,5)\text{Pa}$. Der Fehler bei den Abständen liegt immer um 8%. Dies entspricht dem bestimmten Messfehler des Geräts von 7%. Der Viskositätsunterschied für die verschiedenen Eigelbe ist also immer gleich. Daraus lässt sich rückschließen, dass sich die Struktur beim Denaturieren gleich stark ausbildet und nur durch den Anfangsunterschied verschoben ist.

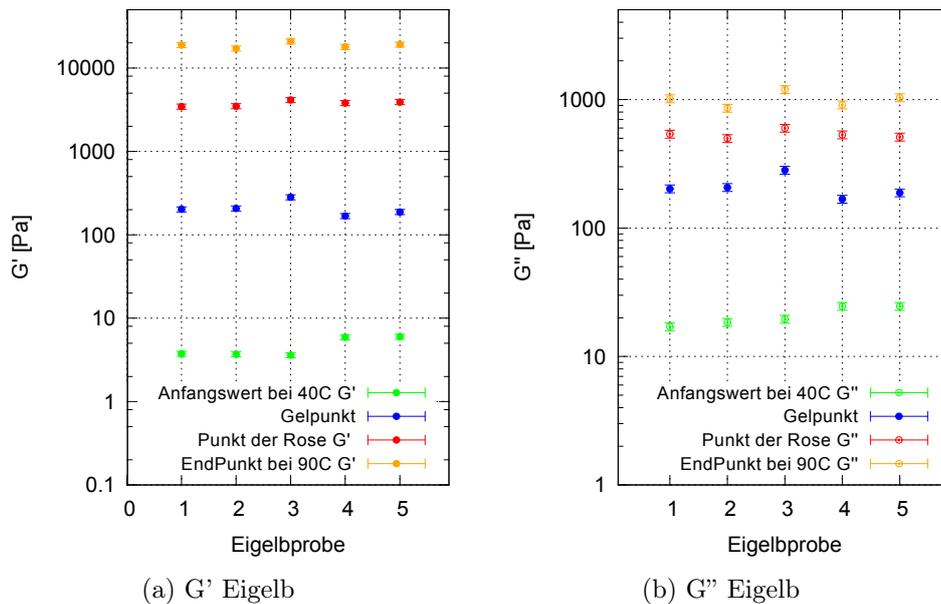
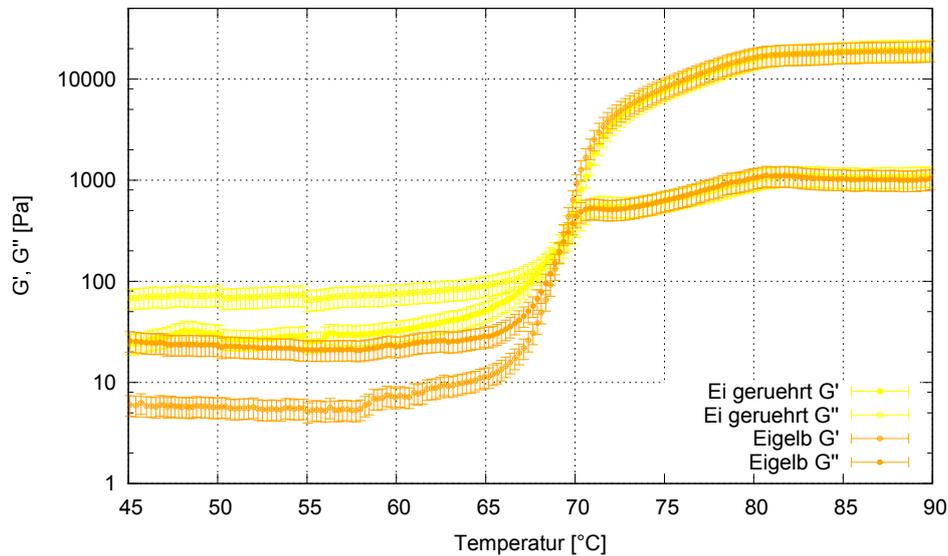


Abbildung 4.8: Werte von G' und G'' bei interessanten Temperaturen

4.2.2 Scherstabilität

Abbildung 4.9: Verlauf von G' und G'' von gerührtem und ungerührtem Eigelb

Wenn das Eigelb vor der rheologischen Betrachtung bei 900rpm mit einem Rührfisch auf der Magnetrührplatte aufgeschlagen wird, ist eine Änderung der Viskosität zu erwarten. Da beim Aufschlagen Luftbläschen eingeschlossen werden, wird die Eigelbmischung stabilisiert.

Das aufgeschlagene Eigelb hat vor dem Erhitzen eine festere Konsistenz als das ungeschlagene Eigelb (siehe Abb. 4.9). Die Unterschiede in der Viskosität sind nur bis 69°C zu beobachten. Ab 62°C denaturieren die Proteine, und die Viskosität nähert sich wieder der von reinem Eigelb. Bei 69°C (am Gelpunkt) haben das gerührte und das ungerührte Eigelb wieder die gleiche Konsistenz und weisen auch im weiteren Verlauf das gleiche Verhalten auf (siehe Abb. 4.9).

Der Unterschied verschwindet vermutlich dadurch, dass beim Erhitzen sich ein starkes Netzwerk ausbildet, das über die anderen Strukturen dominiert.

4.3 Mischungen

4.3.1 Öl

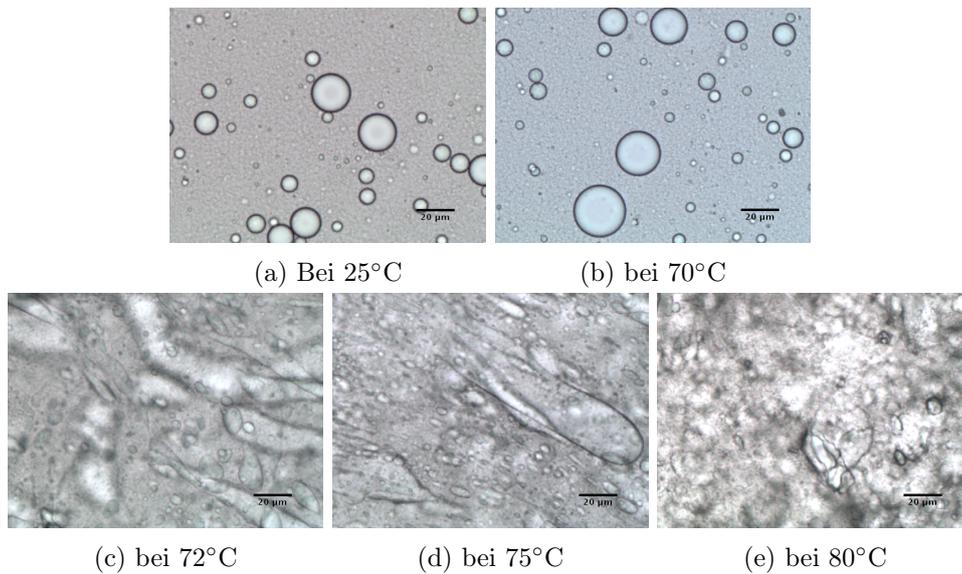


Abbildung 4.10: Mikroskopische Betrachtung von 10% Eigelb-Öl-Mischung bei verschiedenen Temperaturen

Wird Eigelb Öl zugefügt, so bildet sich keine homogene Mischung. Stattdessen bilden sich verschieden große Öltröpfchen im Eigelb (siehe Abb. 4.10a). Auch wenn das Eigelb erhitzt wird, bleiben die Tröpfchen erhalten (siehe Abb. 4.10b). Bis 70°C ändert sich nichts an der Struktur des Eigelbs. Zwischen 70°C und 72°C finden im Eigelb strukturelle Änderungen statt. Das Eigelb ist bei 72°C deutlich fester. Dies verhindert, dass sich nach dem Auftragen auf dem Objektträger die Tröpfchen wieder zu ihrer Runden Form zurückbilden (siehe Abb. 4.10c). Bei 80°C ist das Eigelb hart und die Tröpfchen verteilen sich beim aufbringen um die ausgebildete Struktur und sind nicht mehr deutlich als Tropfen zu erkennen. Das Eigelbs ist vollständig erstarrt, es bleibt daher in der beim auftragen gegebenen Struktur.

Die Eigelb-Öl-Mischung, mit 10% oder 20% Ölanteil, weist die gleiche Konsistenz auf wie reines Eigelb auf (siehe Abb. 4.11a). Die Zugabe von Öl hat auch keinen Einfluss auf den Gelpunkt oder den Punkt der Rose (siehe Abb. 4.12).

4 Messergebnisse

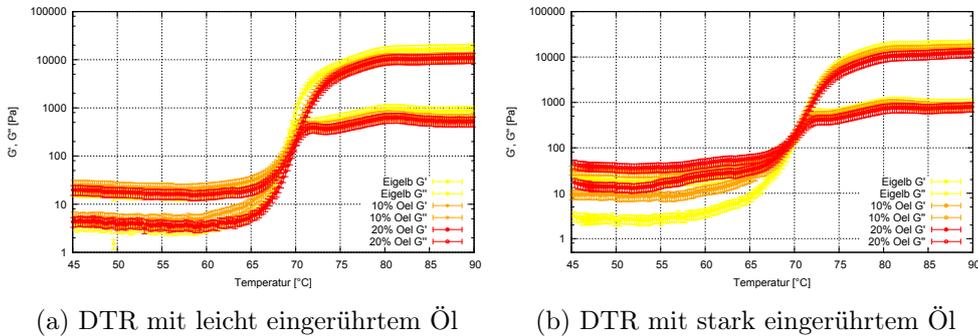


Abbildung 4.11: DTR von Eigelb mit Ölanteil

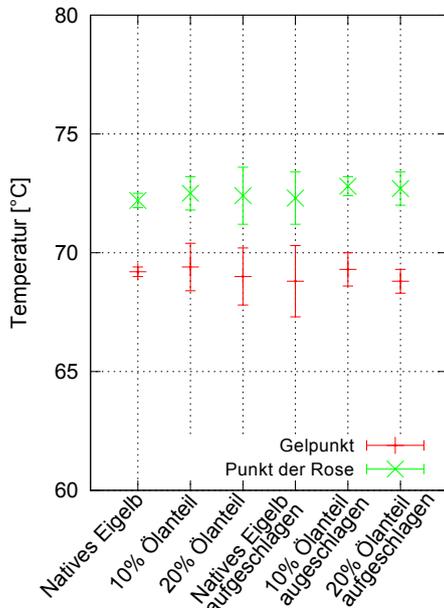


Abbildung 4.12: Gelpunkte und Punkte der Rose

(siehe Abb. 4.12). Dies liegt vermutlich daran, dass während des Rührens kleine Tröpfchen im Eigelb entstehen, die auch nicht mit dem Eigelb reagieren.

Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass sich das Öl nicht mit dem Eigelb mischt, sondern einzelne, freie Öltröpfchen im Eigelb vorliegen, (siehe Abb. 4.10 die nicht mit dem Eigelb reagieren).

Das Öl trennt sich durch Phasentrennung spontan wieder vom Eigelb. Durch starkes Rühren kann dieser Vorgang verlangsamt werden. Man könnte annehmen, dass sich durch das Rühren auch die Viskosität und das Verhalten beim Erhitzen der Eigelb-Öl-Mischung ändert.

Eine Mischung mit 10% oder 20% Ölanteil weist jedoch keine wesentlichen Unterschiede zu reinem Eigelb auf. Die Konsistenz am Anfang von der des reinen gerührten Eigelbs. Das Verhältnis zwischen der Konsistenz der unterschiedlichen Proben schwankt jedoch sehr stark (siehe Abb.4.11b).

Der Gelpunkt und der Punkt der Rose werden aber wieder bei derselben Temperatur wie bei reinem Eigelb erreicht (siehe Abb. 4.12).

4.3.2 Wasser

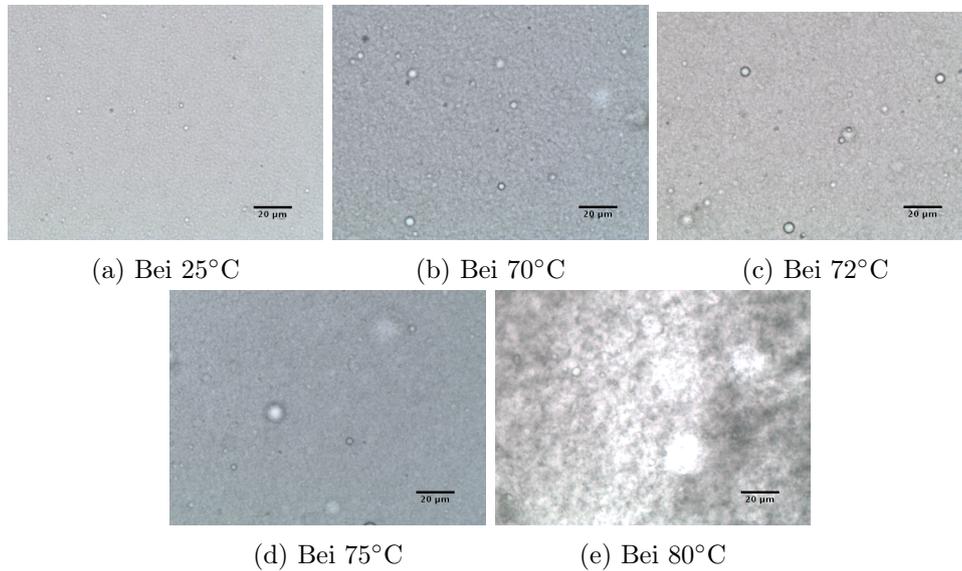


Abbildung 4.13: Mikroskopische Betrachtung von 10% Eigelb-Wasser-Mischung bei verschiedenen Temperaturen

Eine Eigelb-Wasser-Mischung hat eine deutlich niedrigere Viskosität als reines Eigelb und Eigelb-Öl-Mischungen. Das Wasser mischt sich vollständig mit dem Eigelb, es bilden sich keine Tröpfchen (siehe Abb. 4.13) und auch nach längerer Zeit kommt es zu keiner Phasenseparation.

Zwischen 72°C und 75°C kommt es zu einer sichtbaren Konsistenzänderung (siehe Abb. 4.13c, 4.13d). Bei 75°C lässt sich die Mischung nicht mehr gleichmäßig auf dem Objektträger verteilen und bei 80°C ist die Mischung fest (siehe Abb. 4.13e). Dabei wirkt die Struktur aber feiner als die von reinem Eigelb (siehe Abb. 4.1f).

4 Messergebnisse

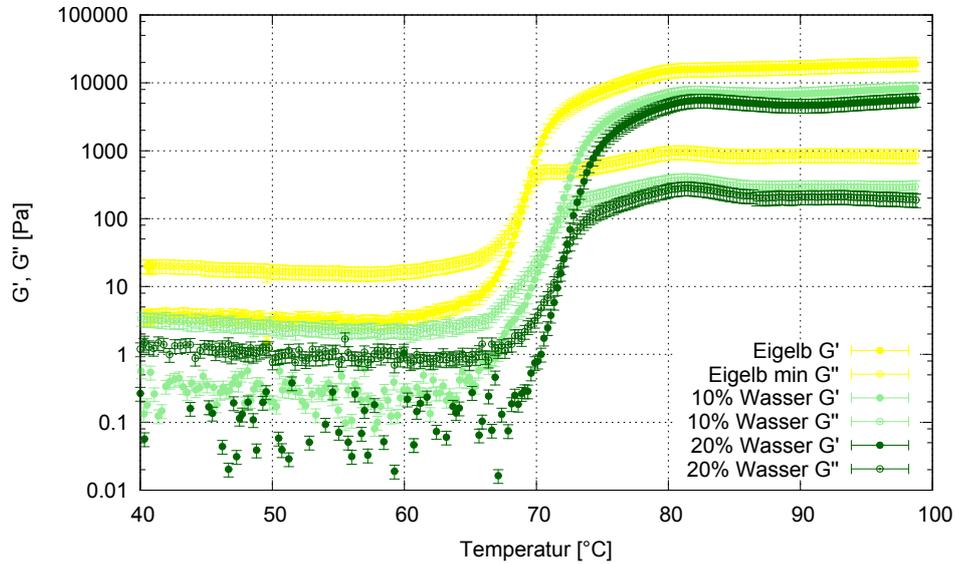


Abbildung 4.14: DTR von Eigelb mit Wasseranteil

Die Eigelb-Wasser-Mischung weist bei niedrigen Temperaturen eine niedrigere Viskosität auf als reines Eigelb. Die Viskosität bleibt auch während des gesamten Verlaufs niedriger (siehe Abb. 4.14).

Nicht nur ist die Viskosität von der Eigelb-Wasser-Mischung durchgehend niedriger, auch treten die Gelpunkte und Punkte der Rose erst bei einer höheren Temperatur als bei reinem Eigelb ein (siehe Abb. 4.15). Der Gelpunkt liegt bei reinem Eigelb bei $69,2 \pm 0,1^\circ\text{C}$, der Punkt der Rose bei $72,2 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Bei einer Mischung mit 10% Wasseranteil liegt der Gelpunkt bei $70,4 \pm 0,8^\circ\text{C}$ und der Punkt der Rose bei $73,7 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Bei 20% Wasseranteil liegt der Gelpunkt erst bei $71,0 \pm 0,8^\circ\text{C}$ und der Punkt der Rose bei $74,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ (4.15). Dies liegt vermutlich daran, dass durch die Verdünnung nur ein schwächeres Netzwerk ausgebildet werden kann und das Ei somit weicher bleibt. Die Werte für G' und G'' sind am Gelpunkt, am Punkt der Rose und bei 90°C für Eigelb-Wasser-Mischungen geringer als für reines Eigelb.

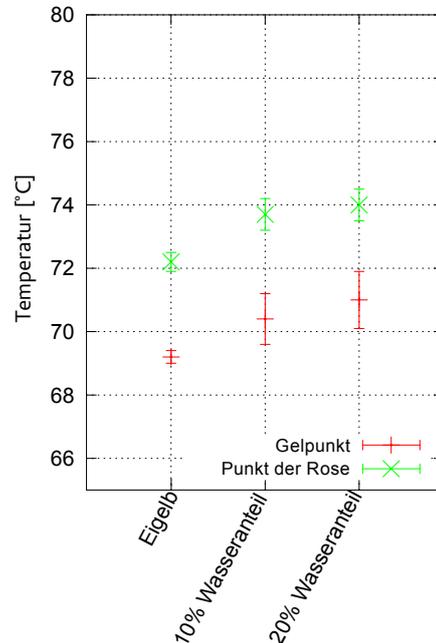


Abbildung 4.15: Gelpunkte und Punkte der Rose

5 Diskussion

Da Eigelb ein Naturprodukt ist, ist es nicht erstaunlich, dass Proben von verschiedenen Eigelben unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. So ist bekannt, dass Eigelbe verschiedene Farben haben können. Dies liegt an der Fütterung der Hühner. Genauso wie die Farbe verschieden sein kann, können sich die Eigelbe auch in anderen Eigenschaften unterscheiden. So zeigen Eigelbe bei rheologischer Betrachtung unterschiedliches Verhalten (siehe Abschnitt 4.2.1). Der Unterschied lässt sich damit erklären, dass die Zusammensetzung von Eigelb nicht immer gleich ist. So wurde unter anderem festgestellt, dass der Wassergehalt schwankt.

Es fällt auf, dass der Unterschied zwischen den verschiedenen Eigelbproben bei niedrigen Temperaturen größer ist als bei hohen. Dies lässt sich damit erklären, dass die Netzwerke, die sich durch die Denaturierung der Livetine, ausbilden, deutlich fester sind und damit andere Effekte, die zu unterschiedlichen Konsistenzen führen, überlagern.

Auffällig ist, dass die graduelle Konsistenzänderung nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Zeit abhängt. Bei einem steileren Temperaturanstieg wird die Konsistenzänderung erst mit geringer Verzögerung beobachtet (siehe Abschnitt 4.1.3). Dies könnte eine Folge des Versuchsaufbaus sein. Da die Temperatur nicht im Eigelb sondern an der Metallplatte gemessen wird, könnten diese Ergebnisse mit einer verzögerten Temperaturübertragung der Platten an das Eigelb zu erklären sein. Diese Verzögerung sollte jedoch relativ gering sein, da die Metallplatten eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen und die Eigelbschicht mit ca. 1 mm Dicke keinen deutlichen Einfluss hat.

Eine andere und vermutlich bessere Erklärung ist, dass das Eigelb zwar die angegebene Temperatur hat, die Denaturierungsvorgänge aber eine gewisse Zeit benötigen. Es ist anzunehmen, dass, je nachdem wie lange das Eigelb bei einer Temperatur gehalten wird, ein anderer Anteil an Proteinen denaturiert. Bei einer langsamen Temperaturerhöhung haben die Proteine Zeit, auf die jeweilige Temperatur zu reagieren. Wird die Temperatur schlagartig erhöht, denaturieren die Proteine nicht schlagartig, sondern erst nach und nach.

Ein Beispiel, wo die langsame Denaturierung kulinarisch eine Rolle spielt, ist das Onsen-Ei. Das Onsen-Ei wird über ein Stunde zwischen 64°C und 68°C gegart, um die gewünschte Konsistenz zu erreichen. Bei einer kürzeren Kochzeit denaturieren nicht genügend Proteine und bei einer niedrigeren Temperatur denaturieren die gewünschten Proteine noch nicht. Bei einer höheren Gartemperatur denaturieren zwar die gewünschten Proteine schneller, es denaturieren aber noch weitere Proteine, was die Konsistenz beeinflusst.

5 Diskussion

Bei Eigelb, das vor der Messung aufgeschlagen wird, würde man eine Erhöhung der Viskosität erwarten, da durch den Vorgang des Rührens Luftbläschen in dem Eigelb gebunden werden. Es fällt jedoch auf, dass das Eigelb nur vor dem Denaturieren durch das Aufschlagen eine andere Konsistenz hat. Ab dem Gelpunkt hat es die gleiche Konsistenz wie das ungerührte Eigelb. Dies liegt daran, dass bei niedrigen Temperaturen die in dem Netzwerk eingelagerten Luftblasen zusätzlich stabilisierend wirken, bei höheren Temperaturen jedoch das Netzwerk per se schon sehr fest ist, so dass eingeschlossene Luftblasen keinen Einfluss mehr auf die Viskosität haben.

Die Zugabe von Öl hat weder einen Einfluss auf die Konsistenz des Eigelbs noch auf das Verhalten beim Erhitzen (siehe Abschnitt 4.3.1).

Im Eigelb ist reichlich Öl enthalten. Zusätzliches Öl mischt sich bei geringem Rühren wegen der Größe der Tröpfchen nicht mit dem Eigelb. Das Eigelb bleibt also in seiner Konsistenz unverändert und es kommt nach einiger Zeit wieder zur Phasenseparation. Erst durch stärkeres Rühren kann eine Mischung erreicht werden, da dann die Öltröpfchen kleiner werden. Dann bilden die Lecithine mit den Öltröpfchen Mizellen, und die Mischung bleibt erhalten. Die Lecithine stabilisieren also die Emulsion - auch bei höheren Temperaturen.

Damit die Zugabe von Öl einen Einfluss auf das Verhalten hat, müssten noch andere Substanzen (zum Beispiel Salz) zugefügt werden, um die Granula zu spalten und eine Einbindung des Öls durch mehr freies Oberflächenmaterial zu ermöglichen.

Dieser Vorgang wird bei der Herstellung von Mayonnaise sowie der von ölhaltigen Saften genutzt.

Bei mit Wasser verdünntem Eigelb stellt man fest, dass die Mischung deutlich dünnflüssiger wird (siehe Abschnitt 4.3.2). Das Wasser wird durch die emulgatorische Wirkung der Phospholipide bzw. Lecithine vollständig im Eigelb gebunden. Es trennt sich daher nicht durch Phasenseparation vom Eigelb. Die Öl-in-Wasser-Emulsion bleibt erhalten. Der Gesamtverlauf der Kurve verändert sich nicht. Das Eigelb erstarrt jedoch langsamer, da durch den höheren Wasseranteil das Netzwerk sich erst dann ausbilden kann, nachdem unter thermischer Einwirkung das Wasser an die Proteine gebunden wurde.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Oszillationsrheologie ist zur qualitativen Beschreibung der Veränderung der physikalischen Eigenschaften von Eigelb gut geeignet. Die Messergebnisse waren reproduzierbar. Bei verschiedenen Geschwindigkeiten der Temperaturerhöhung waren die erwarteten Effekte zu erkennen, die Veränderungen traten verzögert auf.

Bei der Zugabe von Wasser zeigte sich eine Verringerung der Viskosität, während die Zugabe von Öl keinen wesentlichen Einfluss auf die zeit- und temperaturabhängige Konsistenzänderung der Eigelbmischung hatte.

Mit anderen Methoden würden sich die Mischungen noch genauer untersuchen lassen. Man könnte mit der Infrarot-Spektroskopie die Sekundärstruktur der Proteine untersuchen, um mögliche Änderungen darin festzustellen. Nach der Fraktionierung durch Zentrifugation könnte man die rheologischen Eigenschaften verschiedener Fraktionen der einzelnen Mischungen genauer untersuchen, um genauer zu verstehen, welche Proteine in welchen Bestandteilen Ursache für die Änderung der Viskosität sind.

In Zukunft wäre es noch interessant, weitere Substanzen dem Eigelb beizufügen und die Eigenschaften solcher Mischungen zu untersuchen. So könnte genauer betrachtet werden, wie sich zum Beispiel Alkohol auf die rheologischen Eigenschaften auswirkt, da beim Kochen vieler Saften Wein oder Spirituosen verwendet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Nathan Myhrvold "Modernist Cousine at Home" The Cooking Lab, Bellevue WA 2012
- [2] W. Termes, "Naturwissenschaftliche Grundlagen der Lebensmittelzubereitung" B. Behr's Verlag GmbH und Co.KG, Hamburg (2011) Seite 604 ff
- [3] Thomas Vilgis "Das Molekül-Menü" S. Hirzel Verlag Stuttgart (2011) Seite 118 ff
- [4] Thomas G. Mezger "Das Rheologiehandbuch" Vincentz Network GmbH und Co.KG, 2010
- [5] W. Termes und H-D. Werlein Zur Viskosität von Eigelb in höheren Temperaturbereichen in Korrelation zur Zucker-, Salz-, Säure-, und Ethanolkonzentration Eugen Ulmer GmbH und Co., Stuttgart 1987
- [6] Rainer Huopalahti, Rosina López-Fandiño, Marc Anton, Rüdiger Schade "Bioactive Egg Compounds" Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2007
- [7] V. Kiosseoglou "Egg yolk protein gels and emulsions" Current Opinion in Colloid and Interface Science 8, 2003
- [8] Fabien Guilmineau, Ulrich Kulozik "Influenc of thermal treatment on functionality of hen's egg yolk in mayonaise" Journal of Food Engineering 78, 2007
- [9] Vassilos Raikos, Lydia Campbell, Stephen R. Euston "Rheology and texture of hen's egg protein heat-set gels as affected by pH and the adittipon of sugar and/or salt" Food Hydrocolloids 21, 2007
- [10] Marc Anton Eggvolk: structur, functionalities and processes Wiley Online Libery, 2013
- [11] Amanda Laca, Benjamin Paredes, Mario Diaz "A method of egg yolk fractionation. Characterization of fractions" Food Hydrocolloids 24, 2010
- [12] M. Anton "Recent advances concerning the functional properties of egg yolk low-density lipoproteins"
- [13] M. Anton, M. Le Denmat, V. Beaumal, P. Pilet "Filler effects of droplets on the rheology of heat-set emulsion gels prepared with egg yolk and egg yolk fractions" Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 21, 2001
- [14] Klaus Roth "Chemische Köstlichkeiten" Wiley-VCH Verlag GmbH und Co.KG&A, Weinheim 2010
- [15] Emmerich Berghofer "Nanotechnologie im Bereich Lebensmittel und Ernährung" AK Wien media.arbeiterkammer.at/wien/PDF/Publikationen/Nanotechnologie.pdf

Danksagung

Ich möchte allen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Besonderer Dank geht an Prof. Vilgis und Prof. Palberg, die mir ermöglicht haben diese Arbeit anzufertigen, sowie an Bregitta Zielbauer für die gute und hilfreiche Betreuung. Meiner Familie danke ich für die bedingungslose Unterstützung und Fehlersuche.