

Strukturierungsmechanismen bei der Herstellung von Analog- und Schmelzkäse

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Yamen Edelby

aus Idleb, Syrien

von der Fakultät III – Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
-Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Manfred H. Wagner

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Senge

Gutachter: Prof. Dr. Stephan Drusch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Hülsen

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 12. Februar 2014

Berlin 2014

D83

Danksagung

Eine wissenschaftliche Arbeit ist nie das Werk einer einzelnen Person, deshalb ist jetzt die Zeit gekommen, mich bei den Menschen zu bedanken, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation unterstützt haben.

Herr Prof. Dr.-Ing. B. Senge hat mir zu jeder Zeit mit seinen thematischen und wissenschaftlichen Hinweisen stets zur Seite gestanden und mich immer wieder gefordert und gefördert. Des Weiteren ermöglichte er mir als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Berlin wertvolle Erfahrungen zu sammeln. Für all die tatkräftige Unterstützung möchte ich mich von ganzem Herzen bei Ihnen bedanken.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred H. Wagner für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss sowie bei Herrn Prof. Dr. S. Drusch und Prof. Dr.-Ing. U. Hülsen für die Übernahme des Koreferates bedanken.

Herrn Dr.-Ing. R. Blochwitz möchte ich für seine technische Unterstützung bei der Durchführung rheologischer Untersuchungen meinen Dank aussprechen. Auch für Fragen jeglicher Art stand mir Herr Dr.-Ing. Blochwitz immer zur Seite und unterstützte mich wo er nur konnte.

Ein weiterer Dank geht an meine Kolleginnen und Kollegen aus den Fachgebieten Lebensmittelrheologie sowie Lebensmitteltechnologie und -materialwissenschaften, unter denen eine freundliche und angenehme Arbeitsatmosphäre sowie ein respektvoller Umgang untereinander herrscht. Auch für die Unterstützung bei der Durchführung praktischer Arbeiten und die vielen zielführenden fachlichen Gespräche möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

Den Firmen BK Giulini GmbH, Ladenburg und Lactoprot GmbH, Kaltenkirchen möchte ich dafür danken, dass sie uns für die zur Ausarbeitung dieser Dissertation wichtigen Untersuchungen die notwendigen Schmelzsalze sowie Lab- und Säurekaseine zur Verfügung gestellt haben.

Die Universität Aleppo hat die finanzielle Basis während des Studiums in Deutschland gelegt. Auch dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Nicht weniger aufreibend war diese Zeit für meine Familie, die die Anfertigung dieser Dissertation durch alle Phasen hinweg begleitet und unterstützt haben. Ihr gilt mein besonderer Dank.

Abstract

Effects of the formulation and manufacturing technology on the physical properties of cheese analogue and processed cheese have affect its product applications by several parameters. The physical structure of cheese analogue should make for example the shredding processes possible and lead to appropriate melting behavior.

The aim of this thesis was to carry out material scientific examinations of cheese analogue and processed cheese with various formulations and process parameters.

The original microstructure of the cheese analogue samples were nondestructively examined by oscillation measurements. The presence of a dispersion structure was observed for the samples. The $\tan \delta$ vs. temperature curve obtained by temperature sweep upon cooling (85 – 10 °C) exhibited different structuring mechanisms. It was divided into three regions that are caused by hydrophobic, hydrophilic interactions and fat crystallization. A qualitative evaluation of the structuring kinetic was carried out through calculation of the structure development rate and structure acceleration parameters. Four regions in the diagram of v_{Str} vs. temperature were observed. It was found that the used rennet casein is the most influential ingredient on the structural stability. The increasing concentrations of rennet casein, melting salt and coconut fat led to increase the storage modulus by enhancement of water immobilization and fat-protein interactions with the following ranking: $c_{LK} > c_{FIT} > c_{SS}$. The higher swelling capacity of potato starch, in comparison with wheat and corn starch, led to less firmness. Through the rennet casein substitution by wheat starch (up to a relation 60 Lk:40 S2), the structure formation has been improved. By using micellar casein, the application properties were changed due to foam formation and Maillard reaction. The substitution of rennet casein by acid casein or soy protein isolate affected cheese analogue negatively. The substitution of 3% rennet casein by 1% MC or Na-CMC was successful. With decreasing pH value of the preparations or increasing the stirring speed of the Thermomix, the storage modulus increased. According to shear measurements at 85 °C, plastic behavior was observed for all samples. The meltability as an important application parameter increased with decreasing c_{LK} and c_{FIT} and increasing c_{SS} . The force-distance diagram of a texture analysis indicated three regions of elastic, transition und diffluence. The Young's modulus raised with increasing c_{LK} , c_{SS} , and c_{FIT} . The results of the texture analysis confirmed the results of the temperature sweep measurements.

The structure formation of the processed cheese samples was determined in a similar way and the results were consistent with others studies.

The material scientific examinations on a laboratory scale are suitable to objectively monitor and analyze the mechanisms of the structure formation of cheese analogue and processed cheese depending on the formulation and process parameters and they can be utilized in product developments and quality assurance.

Kurzfassung

Die von der Formulierung und der Herstellungstechnologie beeinflussten physikalischen Eigenschaften von Analog- und Schmelzkäse bestimmen am Beispiel vieler Kennwerte die Produktapplikationen. Die physikalische Struktur von Analogkäse sollte z. B. die Zerkleinerungsprozesse ermöglichen und entsprechendes Aufschmelzverhalten als Applikationskennwert aufweisen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Durchführung von lebensmittelmateriawissenschaftlichen Untersuchungen bei der Herstellung von Analog- und Schmelzkäse bei variablem Ingredienzieneinsatz und dient der Optimierung der Technologieführung.

Die native Mikrostruktur der Analogkäseproben wurde mittels Oszillationsmessungen zerstörungsfrei untersucht und das Vorliegen einer Dispersionsstruktur ermittelt. Am Beispiel des $\tan \delta$ bei Temperatursweeps wurden über den Abkühlungsbereich (85 – 10 °C) differenzierte Strukturierungsmechanismen nachgewiesen und in drei durch hydrophobe und hydrophile Interaktionen sowie die Fettkristallisation bedingte Abschnitte eingeteilt. Anhand der Strukturbildungsgeschwindigkeit und -beschleunigung wurde eine qualitative Bewertung der Strukturkinetik durchgeführt und vier charakteristische Bereiche ermittelt. Es wurde festgestellt, dass das eingesetzte Labkasein die wichtigste Ingredienz zur Strukturstabilität darstellt. Die zunehmenden Anteile von Labkasein, Schmelzsalz und Kokosfett führten durch Erhöhung der Wasserimmobilisierung und Fett-Protein-Interaktionen zum Anstieg des Speichermoduls mit folgendem Ranking: $c_{LK} > c_{FIT} > c_{SS}$. Die höhere Quellfähigkeit von Kartoffelstärke im Vergleich zu Weizen- und Maisstärke führte zu geringerer „Festigkeit“. Bis zu einer Relation 60 Lk:40 S2 bei der Labkaseinsubstitution durch Weizenstärke wurde die Strukturausbildung verbessert. Durch den Einsatz von micellarem Kasein veränderten sich aufgrund von Schaumbildung und Maillardreaktion die Applikationseigenschaften. Die Labkaseinsubstitution durch Säurekasein oder Sojaproteinisolat ist als negativ zu bewerten. Eine 3 %ige Labkaseinsubstitution durch 1 % MC oder Na-CMC ist möglich. Mit abnehmendem pH-Wert der Präparationen oder mit zunehmender Drehzahl des Thermomix stieg der Speichermodul an. Durch Schermessungen bei 85 °C wurde plastisches Verhalten für alle Proben nachgewiesen. Die Schmelzbarkeit als wichtiger Applikationsparameter erhöhte sich mit abnehmendem c_{LK} und c_{FIT} und zunehmendem c_{SS} . Am Beispiel des Kraft-Weg-Kurvenverlaufs einer Texturanalyse wurden drei Bereiche (elastischer Bereich, Übergangs- und Zerfließbereich) erkannt und analysiert. Der Elastizitätsmodul stieg mit zunehmenden c_{LK} , c_{SS} , und c_{FIT} an. Die Ergebnisse der Texturanalyse bestätigten die Aussagen der Temperatursweepmessungen.

Die Strukturausbildung der Schmelzkäseproben wurde auf analoge Weise ermittelt. Generelle Erkenntnisse aus der Herstellung von Schmelzkäse wurden bestätigt.

Die lebensmittelmateriawissenschaftlichen Untersuchungen im Labormaßstab sind geeignet, um Mechanismen der Strukturausbildung von Analog- und Schmelzkäse in Abhängigkeit von der Formulierung und der Technologieführung objektiv zu erfassen und zu analysieren und können im Rahmen von Produktentwicklungen und Qualitätssicherung genutzt werden.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Abstract	II
Kurzfassung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XI
Verzeichnis der verwendeten Symbole, Formelzeichen und Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
2 Aufgabenstellung	3
3 Literaturrecherche	5
3.1 Analogkäsetechnologie	5
3.1.1 Herstellungsverfahren	6
3.1.2 Vier-Phasen-Matrixentwicklung	8
3.1.3 Proteinquellen und Funktionelle Eigenschaften	10
3.1.3.1 Bedeutung des Proteineinsatzes	10
3.1.3.2 Kaseincharakterisierung	10
3.1.3.3 Labkasein	13
3.1.3.4 Säurekasein	16
3.1.3.5 Kaseinate	16
3.1.3.6 Molkenproteine	17
3.1.3.7 UF-Retentate	17
3.1.3.8 Sojaprotein	17
3.1.3.9 Wasser- und Fettbindekapazität	19
3.1.4 Fettcharakterisierung	19
3.1.5 Schmelzsalze	20
3.1.6 Wasser, NaCl und Säuerungsmittel	21
3.1.6.1 Wasser	21
3.1.6.2 NaCl	22
3.1.6.3 Säuerungsmittel	22
3.1.7 Geschmacksverstärker bzw. -stoffe	22
3.1.8 Stärke	23
3.1.9 Hydrokolloide	24
3.1.9.1 Cellulosederivate	25

3.1.9.2 Galaktomannane (Guarkernmehl und Johannisbrotkernmehl)	26
3.1.9.3 Alginate	27
3.1.9.4 Carrageenan	28
3.1.9.5 Xanthan	28
3.2 Schmelzkäsetechnologie	28
3.2.1 Schmelzrohstoffe	29
3.2.2 Andere Ingredienzien	30
3.2.3 Schmelzprozess.....	30
3.2.4 Beeinflussung der Schmelzkäsestruktur.....	33
3.2.4.1 Einfluss der Proteinart und -anteils	33
3.2.4.2 Einfluss der Fettzusammensetzung und -gehaltes.....	33
3.3 Rheologische Grundlagen.....	34
3.3.1 Fließverhalten	34
3.3.2 Oszillationsmessungen	36
3.3.3 Textureigenschaften.....	38
3.4 Aufschmelzverhalten.....	39
3.5 Partikelgrößenverteilung	39
3.6 Kapitelzusammenfassung	40
4 Material und Methoden	41
4.1 Material.....	41
4.1.1 Material zur Präparation der Analogkäseproben.....	41
4.1.2 Material zur Präparation der Schmelzkäseproben	42
4.2 Messmethoden	42
4.2.1 Partikelgrößenanalytik.....	42
4.2.2 Bestimmung der Wasserbindekapazität	43
4.2.3 Bestimmung der Fettbindekapazität	43
4.2.4 Bestimmung des pH-Wertes.....	44
4.2.5 Bestimmung des Trockensubstanzgehalt.....	44
4.2.6 Rheologische Untersuchungen	44
4.2.6.1 Amplitudensweepmessung.....	45
4.2.6.2 Temperatursweepmessung	45
4.2.6.3 Frequenzsweepmessung.....	45
4.2.6.4 Schermessung.....	45
4.2.7 Instrumentelle Texturanalyse	45
4.2.8 Schmelzbarkeitstest	47

4.3	Präparationsmethoden.....	48
4.3.1	Präparation der Analogkäseproben.....	48
4.3.2	Versuchsmatrix zur Analogkäsepräparation.....	49
4.3.3	Präparation der Schmelzkäseproben.....	50
4.3.4	Versuchsmatrix zur Schmelzkäsepräparation.....	51
4.4	Statistische Absicherung.....	52
5	Partikelgrößen- sowie funktionelle Analytik der eingesetzten Proteinpulver.....	53
5.1	Partikelgrößenanalytik.....	53
5.2	Funktionelle Analytik.....	54
5.3	Kapitelzusammenfassung.....	55
6	Strukturanalyse und Technologieoptimierung von Analogkäse.....	56
6.1	Einfluss des Labkaseinanteils.....	56
6.1.1	Amplitudensweepmessungen.....	56
6.1.2	Temperatursweepmessungen.....	57
6.1.3	Strukturbildungsgeschwindigkeit.....	59
6.1.4	Frequenzsweepmessungen.....	62
6.2	Einfluss des Schmelzsalzanteils.....	64
6.2.1	Amplitudensweepmessungen.....	64
6.2.2	Temperatursweepmessungen.....	65
6.2.3	Strukturbildungsgeschwindigkeit.....	67
6.2.4	Frequenzsweepmessungen.....	67
6.3	Einfluss des Fettgehaltes.....	69
6.3.1	Amplitudensweepmessungen.....	69
6.3.2	Temperatursweepmessungen.....	69
6.3.3	Strukturbildungsgeschwindigkeit.....	71
6.3.4	Frequenzsweepmessungen.....	72
6.4	Einfluss der Stärkekonzentration und -art.....	73
6.5	Substitutionspotenzial für Labkasein.....	77
6.5.1	Labkaseinsubstitution durch Weizenstärke.....	77
6.5.2	Substitution von Labkasein durch micellares Kasein.....	79
6.5.3	Substitution von Labkasein durch Säurekasein.....	81
6.5.4	Substitution von Labkasein durch Sojaproteinisolat.....	83
6.5.5	Substitution von Labkasein durch Hydrokolloide.....	86
6.6	pH-Einfluss.....	88
6.7	Drehzahleinfluss.....	89
6.8	Schermessungen.....	91

6.8.1 Labkaseinanteil	91
6.8.2 Schmelzsatzanteil	93
6.8.3 Fettgehalt	94
6.9 Schmelzbarkeitstest	96
6.9.1 Labkaseinanteil	96
6.9.2 Schmelzsatzanteil	97
6.9.3 Fettgehalt	97
6.9.4 Stärkeanteil	98
6.9.5 Einfluss von Hydrokolloiden	98
6.10 Kapitelzusammenfassung	99
7 Instrumentelle Texturanalyse von Analogkäse	101
7.1 Labkaseinanteil	101
7.2 Schmelzsatzanteil	104
7.3 Fettgehalt	106
7.4 Gesamtbewertung Applikation	107
7.5 Kapitelzusammenfassung	109
8 Strukturausbildung in Schmelzkäsepräparationen	110
8.1 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes	110
8.2 Einfluss der Schmelzsatzkonzentration	111
8.3 Einfluss des Fettgehaltes	113
8.4 Einfluss der Rührerdrehzahl	114
8.5 Einfluss der Schmelzprozesszeit	116
8.6 Ableitung einer Masterkurve	118
8.7 Kapitelzusammenfassung	119
9 Hinweise für weiterführende Untersuchungen	120
10 Zusammenfassung	121
11 Literaturverzeichnis	124
12 Anhang	141

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1 Prozessschema eines kontinuierlichen Herstellungsverfahrens von Analogkäse [36].7	
Abb. 3.2 Innenraum von Doppelschnecken-Schmelzmaschine (a) und Schmelzkessel (b) [33]8	
Abb. 3.3 Vier-Phasen-Matrixentwicklung während des Herstellungsprozesses [31]	9
Abb. 3.4 Lichtmikroskopische Aufnahmen der Vier-Phasen-Matrixentwicklung	9
Abb. 3.5 Schematische Darstellung einer Kaseinmicelle nach dem Submicellen-Modell [81] .12	
Abb. 3.6 Modell einer Kaseinmicelle nach Holt et al. 1992/1996 [75; 76].....	13
Abb. 3.7 Dualbindungsmodell einer Kaseinmicelle nach Horne 1998 [77]	13
Abb. 3.8 Mechanismus der labinduzierten Gerinnung [86; 87; 88; 89].....	14
Abb. 3.9 Viskositätsänderung während der labinduzierten Gerinnung [90]	15
Abb. 3.10 Prozesslinie zur Herstellung von Labkasein [81]	15
Abb. 3.11 Prozesslinie zur Herstellung von Säurekasein [81].....	16
Abb. 3.12 Wirkungsweise der Schmelzsalze am Beispiel Dinatriumhydrogenphosphat [18]...20	
Abb. 3.13 Cellulose-Struktur [170].....	25
Abb. 3.14 MC-Struktur mit einem Substitutionsgrad von 2 [170].....	26
Abb. 3.15 Na-CMC-Struktur mit einem Substitutionsgrad von 1 [170].....	26
Abb. 3.16 Alginat-Struktur mit einer symbolischen Darstellung [184].....	27
Abb. 3.17 „Egg box-Struktur“ von Alginaten mit Calciumionen [184].....	27
Abb. 3.18 Fließschema zur Herstellung von Schmelzkäse [191]	29
Abb. 3.19 TEM- Aufnahmen und Viskositätsprofil von Schmelzkäse	32
Abb. 3.20 Deformierter und undeformierter Zustand von Schmelzkäse [201]	33
Abb. 3.21 Scherverformung eines viskosen Körpers [203]	34
Abb. 3.22 Vorgegebene γ -Regelung (a) und resultierende τ -Kurve mit δ (b) [205].....	37
Abb. 3.23 Vorgabe der Amplitude (a); $G'(\gamma)$ und $G''(\gamma)$ als Messantwort (b) [205].....	37
Abb. 3.24 Uniaxiale Kompressionsverformung, HENCKY-Deformation [215]	38
Abb. 4.1 Partikelanalysator HORIBA LA-950 (a) und schematische Lichtstreuung (b).....	43
Abb. 4.2 MCR 301 (a), UDS 200 (b) und Zylindermesssystem Z3 DIN (c).....	44
Abb. 4.3 Material-Prüfmaschine (Zwick Roell/Z0.5) mit Druckstempel und Probenmodell	46
Abb. 4.4 Ausstechtschema der Proben	47
Abb. 4.5 Fließstrecke nach dem Schmelzbarkeitstest	48
Abb. 4.6 Fließschema zur Präparation der Analogkäseproben im Labormaßstab.....	49
Abb. 4.7 Fließschema zur Präparation der Schmelzkäseproben im Labormaßstab	51
Abb. 5.1 Einzelhäufigkeitsverteilungen der eingesetzten Proteinpulver	53
Abb. 5.2 Summenverteilungskurven der eingesetzten Proteinpulver	53
Abb. 6.1 Amplitudensweepmessungen 17 % Labkasein/ 80, 60 und 40 °C	56
Abb. 6.2 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %.....	57
Abb. 6.3 Masterkurve des Abkühlungsverlaufs am Beispiel 17 % Labkasein.....	58
Abb. 6.4 Labkaseinkonzentrationsabhängige Strukturbildungsgeschwindigkeit.....	60
Abb. 6.5 Strukturbildungsgeschwindigkeit am Beispiel 17 % Labkasein	60

Abb. 6.6 Strukturbildungsbeschleunigung der Probe mit 17 % Labkasein	62
Abb. 6.7 Frequenzsweepmessungen 17 % Labkasein/ 80, 60 und 40 °C	63
Abb. 6.8 Frequenzsweepmessungen $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %/ 80 °C	63
Abb. 6.9 Amplitudensweepmessungen 2,4 % Schmelzsatz/ 80, 60 und 40 °C	65
Abb. 6.10 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Schmelzsatzanteil $1,2 \leq c_{SS} \leq 3,0$ %	65
Abb. 6.11 Schmelzsatzkonzentrationsabhängige Strukturbildungsgeschwindigkeit	67
Abb. 6.12 Frequenzsweepmessungen 2,4 % Schmelzsatz/ 80, 60 und 40 °C	68
Abb. 6.13 Amplitudensweepmessungen 50 % FiT/ 80, 60 und 40 °C	69
Abb. 6.14 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Fettgehalt $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %	70
Abb. 6.15 Fettgehaltsabhängige Strukturbildungsgeschwindigkeit	71
Abb. 6.16 Frequenzsweepmessungen 50 % FiT/ 80, 60 und 40 °C	72
Abb. 6.17 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Stärkeanteil $0 \leq c_{S1} \leq 3$ %	73
Abb. 6.18 Vergleich des Verlaufs G' , G'' sowie $\tan \delta$ von S1, S2, S3 und S4 bei 2,0 %	76
Abb. 6.19 Vergleich des Verlaufs G' , G'' sowie $\tan \delta$ von S1, S2, S3 und S4 bei 2,5 %	76
Abb. 6.20 Verlauf G' und G'' in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation	77
Abb. 6.21 Verlauf $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation	78
Abb. 6.22 G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:mK-Relation/ $0 \leq c_{mk} \leq 100$ % vom GPA ..	79
Abb. 6.23 Hitzestabilität in Abhängigkeit der (Lk:mK)-Relation	81
Abb. 6.24 G' und G'' in Abhängigkeit von der Lk:Sk-Relation/ $0 \leq c_{Sk} \leq 100$ % vom GPA	81
Abb. 6.25 $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation/ $0 \leq c_{Sk} \leq 40$ % vom GPA	82
Abb. 6.26 $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation/ $60 \leq c_{Sk} \leq 100$ % vom GPA	82
Abb. 6.27 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:SPI-Relation	84
Abb. 6.28 Vergleich des Verlaufs G' und $\tan \delta$ der Proben mit 17 % Lk und 15 % SPI	84
Abb. 6.29 Verlauf G' in Abhängigkeit vom Hydrokolloidzusatz als Einzelkomponente	86
Abb. 6.30 Verlauf $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Hydrokolloidzusatz als Einzelkomponente	87
Abb. 6.31 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom pH-Wert ($6,62 \geq \text{pH-Wert} \geq 5,18$)	88
Abb. 6.32 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Drehzahl ($100 \leq n_U \leq 650$)	90
Abb. 6.33 Schermessungen der Proben $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ % bei 85 °C	92
Abb. 6.34 Fließkurven (Abschnitt 3 – 5) $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ % bei 85 °C	92
Abb. 6.35 Schermessungen $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ % bei 85 °C	93
Abb. 6.36 Fließkurven (Abschnitt 3 – 5) $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ % bei 85 °C	94
Abb. 6.37 Schermessungen $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ % bei 85 °C	95
Abb. 6.38 Fließkurven (Abschnitt 3 – 5) $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ % bei 85 °C	95
Abb. 7.1 Vierfachbestimmung der Kraft-Weg-Messung 17 % Labkasein	101
Abb. 7.2 Mittelwertkurven der Kraft-Weg-Messungen $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %	102
Abb. 7.3 Masterkurve der Kraft-Weg-Messungen am Beispiel MW von 17 % Labkasein	102

Abb. 7.4 Mittelwertkurven der Kraft-Weg-Messungen $1,2 \leq c_{SS} \leq 3 \%$	104
Abb. 7.5 Mittelwertkurven der Kraft-Weg-Messungen $45 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$	106
Abb. 7.6 Netzdiagramm des Einflusses der Labkaseinkonzentration.....	107
Abb. 7.7 Netzdiagramm des Einflusses der Schmelzsalzkonzentration	108
Abb. 7.8 Netzdiagramm des Fettgehalteinflusses (FiT)	108
Abb. 7.9 Netzdiagramm des Einflusses von Hydrokolloidzusatz als Einzelkomponente	109
Abb. 8.1 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Trockensubstanz $35 \leq c_{TS} \leq 50 \%$	110
Abb. 8.2 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Schmelzsalzanteil $2,03 \leq c_{SS} \leq 2,71 \%$..	112
Abb. 8.3 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Butterfettgehalt $40 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$	113
Abb. 8.4 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Drehzahl $300 \leq n_U \leq 1500$ U/min	115
Abb. 8.5 Schmelzkäseproben als Funktion der Rührerdrehzahl	116
Abb. 8.6 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Schmelzprozesszeit $4 \leq t \leq 12$ min ...	117
Abb. 8.7 Masterkurve am Beispiel des technologischen Optimums	118
Abb. 12.1 Einzelhäufigkeitsverteilungen der Proteinpulver (Doppelbestimmung).....	145
Abb. 12.2 Summenverteilungskurven der Proteinpulver (Doppelbestimmung)	145
Abb. 12.3 Amplituden- und Frequenzsweeps $15 \leq c_{Lk} \leq 21 \%$ / 80, 60 und 40 °C	146
Abb. 12.4 Amplituden- und Frequenzsweeps $1,2 \leq c_{SS} \leq 3,0 \%$ / 80, 60 und 40 °C	147
Abb. 12.5 Amplituden- und Frequenzsweeps $45 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$ / 80, 60 und 40 °C	148
Abb. 12.6 Amplituden- und Frequenzsweeps 2 % S1, S2, S3 und S4/ 80, 60 und 40 °C.....	149
Abb. 12.7 Amplituden- und Frequenzsweeps $20 \leq c_{mK} \leq 80 \%$ des GPA.....	151
Abb. 12.8 Amplituden- und Frequenzsweeps $20 \leq c_{Sk} \leq 80 \%$ des GPA	153
Abb. 12.9 Amplitudensweeps $10 \leq c_{SPl} \leq 70 \%$ des GPA/ 80, 60 und 40 °C	155
Abb. 12.10 Frequenzsweeps $10 \leq c_{SPl} \leq 70 \%$ des GPA/ 80, 60 und 40 °C	156
Abb. 12.11 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil (Doppelbestimmung) 158	
Abb. 12.12 Verlauf G' und $\tan \delta$ bei 2,4 % Schmelzsalz JOHA [®] S9 (Doppelbestimmung)	158
Abb. 12.13 Verlauf G' und $\tan \delta$ bei 55 % FiT (Doppelbestimmung)	159
Abb. 12.14 G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:mK-Relation (Doppelbestimmung)	159
Abb. 12.15 G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:Sk-Relation (Doppelbestimmung)	160
Abb. 12.16 G' und $\tan \delta$: 17 % Lk; 2 % S2; 5,98 pH; 200 U/min (Doppelbestimmung).....	160
Abb. 12.17 G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Drehzahl (Doppelbestimmung)	161

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Ingredienzien mit Einsatzkonzentrationen in Analogkäseformulierung [33].....	6
Tab. 3.2	Zusammengefasste Charakterisierung der Kaseinmonomere [62; 63; 64; 65].....	11
Tab. 3.3	Zusammensetzung des Fettsäurespektrums im Kokosfett [127].....	19
Tab. 3.4	Typische Charakteristika verschiedener Stärkearten [155; 157].....	23
Tab. 3.5	Anwendungsrichtung von Schmelzsalzen je nach der Schmelzkäseart [18].....	30
Tab. 3.6	Rheologische Standardmodelle [208].....	36
Tab. 4.1	Materialien zur Präparation der Schmelzkäseproben.....	41
Tab. 4.2	Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Proteinpulver, Angaben in %.....	42
Tab. 4.3	Rohstoffe zur Präparation der Schmelzkäseproben.....	42
Tab. 4.4	Messprofilvorgabe der Schermessung bei 85 °C.....	45
Tab. 4.5	Parameter des Parallelplattendeformationsversuches.....	46
Tab. 4.6	Grundrezeptur für schnittfeste und schmelzbare Analogkäseproben.....	48
Tab. 4.7	Versuchsmatrix zur Analogkäsepräparation.....	50
Tab. 4.8	Grundrezeptur für streichfähige Schmelzkäseproben.....	51
Tab. 4.9	Versuchsmatrix zur Schmelzkäsepräparation.....	52
Tab. 5.1	Kennwerte der Partikelgrößenverteilung je nach der Proteinart/ MW ± MWA.....	54
Tab. 5.2	Wasser- und Fettbindekapazitäten je nach der Proteinart/ MW ± MWA.....	54
Tab. 6.1	Ermittlung des Grenzwertes des LVB am Beispiel von 17 % Labkasein bei 80 °C....	56
Tab. 6.2	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil.....	59
Tab. 6.3	Grenzpunkte der Strukturierungsbereiche, $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %.....	61
Tab. 6.4	Frequenzabhängiger Strukturaufbau der Analogkäseproben, $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %.....	64
Tab. 6.5	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom Schmelzsalzanteil.....	66
Tab. 6.6	Grenzpunkte der Strukturierungsbereiche, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ %.....	67
Tab. 6.7	Frequenzabhängiger Strukturaufbau der Analogkäseproben, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ %.....	68
Tab. 6.8	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom Fettgehalt.....	70
Tab. 6.9	Grenzpunkte der Strukturierungsbereiche, $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %.....	71
Tab. 6.10	Frequenzabhängiger Strukturaufbau der Analogkäseproben, $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %.....	72
Tab. 6.11	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom Stärkeanteil.....	74
Tab. 6.12	Materialwissenschaftliche Kennwerte nach der botanischen Stärkeart.....	75
Tab. 6.13	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation.....	78
Tab. 6.14	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Lk:mK-Relation.....	80
Tab. 6.15	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Lk:Sk-Relation.....	83
Tab. 6.16	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Lk:SPI-Relation.....	85
Tab. 6.17	Materialwissenschaftliche Kennwerte je nach Hydrokolloid (mit 16 % Lk).....	87
Tab. 6.18	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom pH-Wert.....	89
Tab. 6.19	Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Drehzahl.....	90
Tab. 6.20	Rheologische Kennwerte/ Rücklauf-Fließkurve/ 85 °C, $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %.....	92

Tab. 6.21 Strukturabbauparameter im Vorscherungsabschnitt, $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %.....	93
Tab. 6.22 Rheologische Kennwerte/ Rücklauf-Fließkurve/ 85 °C, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ %	93
Tab. 6.23 Strukturabbauparameter im Vorscherungsabschnitt, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ %.....	94
Tab. 6.24 Rheologische Kennwerte/ Rücklauf-Fließkurve/ 85 °C, $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %	95
Tab. 6.25 Strukturabbauparameter im Vorscherungsabschnitt, $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %.....	96
Tab. 6.26 Fließstrecken in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil/ MW \pm MWA.....	96
Tab. 6.27 Fließstrecken in Abhängigkeit vom Schmelzsalzanteil/ MW \pm MWA	97
Tab. 6.28 Fließstrecken in Abhängigkeit vom Fettgehalt/ MW \pm MWA.....	98
Tab. 6.29 Fließstrecken beim Hydrokolloidzusatz als Einzelkomponenten/ MW \pm MWA	99
Tab. 7.1 Bereichsabhängige Regressionsdaten der Kraft-Weg-Kurven, $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %.....	103
Tab. 7.2 Texturkennwerte in Abhängigkeit von der Labkaseinkonzentration/ MW \pm S _{Ab}	104
Tab. 7.3 Bereichsabhängige Regressionsdaten der Kraft-Weg-Kurven, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ %.....	105
Tab. 7.4 Texturkennwerte in Abhängigkeit von der Schmelzsalkonzentration/ MW \pm S _{Ab} ..	105
Tab. 7.5 Bereichsabhängige Regressionsdaten der Kraft-Weg-Kurven, $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %.....	106
Tab. 7.6 Texturkennwerte in Abhängigkeit vom Fettgehalt/ MW \pm S _{Ab}	107
Tab. 8.1 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt.....	111
Tab. 8.2 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit von der Schmelzsalkonzentration	112
Tab. 8.3 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit vom Butterfettgehalt	114
Tab. 8.4 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit von der Rührerdrehzahl.....	115
Tab. 8.5 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit von der Schmelzprozesszeit.....	117
Tab. 12.1 Anforderungen an die Zusammensetzung von „Prozesskäseprodukten“ [20]	141
Tab. 12.2 Fettgehaltstufen der Käseprodukte [20]	141
Tab. 12.3 Einfluss verschiedener Faktoren beim Schmelzprozess in Schmelzkäse [18].....	142
Tab. 12.4 Vorkommen und Gewinnung von Hydrokolloiden [155]	143
Tab. 12.5 Anwendungsgebiete und Wirkung von Hydrokolloiden in Lebensmitteln [155].....	144
Tab. 12.6 Frequenzabhängiger Strukturaufbau nach der Stärkeart bei 2 % Stärkeinsatz ...	150
Tab. 12.7 Frequenzabhängiger Strukturaufbau nach der Lk:mK-Relation bei 19 % GPA	152
Tab. 12.8 Frequenzabhängiger Strukturaufbau nach der Lk:Sk-Relation bei 19 % GPA.....	154
Tab. 12.9 Frequenzabhängiger Strukturaufbau nach der Lk:SPI-Relation bei 17 % GPA.....	157

Verzeichnis der verwendeten Symbole, Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Symbole 1

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m ²
A _{TH}	Thixotropiefläche	Pa/s
a _{Str}	Beschleunigung der Strukturbildung	Pa/min ²
c	Konzentration	%
c _{Lk}	Labcaseinkonzentration	%
c _{SS}	Schmelzsalkonzentration	%
c _{FIT}	Fettgehalt in der Trockensubstanz	%
c _{FIT1}	Fettgehalt in der Trockensubstanz der Ausgangsformulierung	%
c _{FIT2}	gewünschter Fettgehalt in der Trockensubstanz der gewünschten Formulierung	%
c _{TS}	gewünschter Trockensubstanzgehalt in der Schmelzkäsepräparation	%
c _S	Stärkekonzentration	%
c _{S1}	Konzentration der Weizenstärke (von Unilever)	%
c _{mK}	Anteil des micellaren Kasein vom Gesamtproteinanteil	%
c _{Sk}	Säurekaseinanteil vom Gesamtproteinanteil	%
c _{SPI}	Sojaproteinisolatanteil vom Gesamtproteinanteil	%
Δc _{Lk}	Differenz der Labcaseinkonzentration	%
Δc _{SS}	Differenz der Schmelzsalkonzentration	%
Δc _{FIT}	Differenz des Fettgehaltes	%
Δc _{TS}	Differenz des Trockensubstanzgehaltes	%
Δc _{S1}	Differenz der Weizenstärkekonzentration (von Unilever)	%
d	Differential der Größe	...
d ₀	Ausgangsdurchmesser des zylindrischen Probenmodells bei der Texturanalyse	m
d ₁₀	Durchgang von 10 % des Partikelspektrums	m
d ₅₀	Durchgang von 50 % des Partikelspektrums (Median)	m
d ₉₀	Durchgang von 90 % des Partikelspektrums	m
d _{4.3}	Der volumengewichtete mittlere Durchmesser	m
E	Elastizitätsmodul bzw. YOUNG'scher Modul	Pa
FBK	Fettbindekapazität	%
F	Kraft	N
F ₅	maximale elastische Kraft nach Fahrweg 5 mm	N
F ₁₀	maximale Übergangskraft nach Fahrweg 10 mm	N
F ₁₆	maximale Zerfließkraft nach Fahrweg 16 mm	N
F _{lin}	Koeffizient der linearen Gleichung F (elastischer Bereich)	N
F _{pot}	Koeffizient der potenziellen Gleichung F (Übergangsbereich)	–
F _{exp}	Koeffizient der exponentiellen Gleichung F (Zerfließbereich)	–
F _{abs}	Fett absolut	kg
f	Frequenz	Hz
G'	Speichermodul	Pa

Lateinische Symbole 2

Symbol	Bezeichnung	Einheit
G''	Verlustmodul	Pa
G'_i	Messpunkt eines Speichermoduls	Pa
G'_{pot}	Koeffizient des frequenzabhängigen Strukturaufbaus des G'	–
G''_{pot}	Koeffizient des frequenzabhängigen Strukturaufbaus des G''	–
h	Höhe	m
h_0	Ausgangshöhe des zylindrischen Probenmodells bei der Texturanalyse	m
i	Anzahl der eingehenden Stützstellen	–
K	Konsistenzfaktor	Pas^n
M	Molarität	mol/l
MW	Mittelwert	...
MWA	Mittelwertabweichung	...
m_{B1}	Menge der Butter in der Ausgangsformulierung	kg
m_{B2}	Menge der Butter in der gewünschten Formulierung	kg
m_0	Leermasse des Zentrifugenglasröhrchens	kg
m_1	Probeneinwaage	kg
m_2	Masse des Zentrifugenglasröhrchens nach dem Ablauen (Wasser/Öl)	kg
m_{lin}	Steigung der linearen Gleichung F (elastischer Bereich)	N/m
m_{pot}	Exponent der potenziellen Gleichung F (Übergangsbereich)	–
m_{exp}	Exponent der exponentiellen Gleichung F (Zerfließbereich)	–
m_W	zuzusetzende Wassermenge bei Herstellung der Schmelzkäsepräparation	kg
m_{IM}	Menge der Ingredienzienmischung einer Schmelzkäsepräparation	kg
n	Fließindex	–
n	Anzahl der Einzelwerte in statistischen Gleichungen	–
n_U	Drehzahl	1/s
Δn_U	Differenz der Drehzahl	1/s
p	Druck	Pa
R^2	Bestimmtheitsmaß	–
r	Korrelationskoeffizient	–
S_{Ab}	Standardabweichung	...
s	Weg, Fahrweg	m
$s_{Fließ}$	Fließstrecke bei Schmelzbarkeitstest	m
T	Temperatur	°C
T_{Start}	Anfangstemperatur des Bereiches A der v_{Str}	°C
T_1	Endtemperatur des Bereiches A der v_{Str}	°C
T_2	Endtemperatur des Bereiches B der v_{Str}	°C
T_3	Endtemperatur des Bereiches C der v_{Str}	°C
T_{End}	Endtemperatur des Bereiches D der v_{Str}	°C
t	Zeit, Schmelzprozesszeit der Herstellung von Schmelzkäsepräparationen	s
Δt	Zeitspanne	s

Lateinische Symbole 3

Symbol	Bezeichnung	Einheit
v	Geschwindigkeit	m/s
v_{Str}	Strukturbildungsgeschwindigkeit	Pa/min
v_{Str1}	Endstrukturbildungsgeschwindigkeit des Bereiches A	Pa/min
v_{Str2}	Endstrukturbildungsgeschwindigkeit des Bereiches B	Pa/min
v_{Str3}	Endstrukturbildungsgeschwindigkeit des Bereiches C	Pa/min
v_{StrEnd}	Endstrukturbildungsgeschwindigkeit des Bereiches D	Pa/min
WBK	Wasserbindekapazität	%
W_{el}	elastische Arbeit	Nm
$W_{Ügb}$	Übergangsarbeit	Nm
W_{Zer}	Zerfließarbeit	Nm
W_{TS}	Gewicht der kalkulierten Trockensubstanz einer Schmelzkäsepräparation	kg
W_{TS1}	Gewicht der kalkulierten Trockensubstanz in der Ausgangsformulierung	kg
x	Exponent des frequenzabhängigen Strukturaufbaus des Speichermoduls	–
x_i	Einzelwert	...
\bar{x}	Mittelwert	...
y	Exponent des frequenzabhängigen Strukturaufbaus des Verlustmoduls	–
Y_{SK}	Ausbeute der Schmelzkäsepräparation	kg
z	Gewicht des zusätzlichen Fettes	kg

Griechische Symbole

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Deformationswinkel	°
γ	Deformation, Scherverformung	–
γ_L	Grenzwert des linear viskoelastischen Bereiches	–
$\dot{\gamma}$	Scherrate; Schergeschwindigkeit	s ⁻¹
δ	Phasenverschiebungswinkel	°
$\tan \delta$	Verlustfaktor	–
ε	Dehnung	–
ε_H	wahre Dehnung nach der Hencky-Deformation	–
η	dynamische Viskosität	Pas
η_{eff}	effektive Viskosität	Pas
η_s	scheinbare Viskosität	Pas
λ	Strukturabbauparameter	s
σ	Normalspannung	Pa
τ	Schubspannung	Pa
$\Delta\tau$	Schubspannungsdifferenz	Pa
τ_0	Fließgrenze (bei Schermessung); resultierender Stress (bei Oszillationsmessung)	Pa
τ_{pot}	Koeffizient des Strukturabbaus der Schubspannung in der Vorscherung	Pa
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹

Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung
Car	κ -Carrageen
EMC	enzymmodifizierter Käse
FiT	Fett in der Trockensubstanz
GPA	Gesamtproteinanteil
Guar	Guarkernmehl
HB	HERSCHEL-BULKLEY-Modell
Hk	Hydrokolloid
HPMC	Hydroxypropylmethylcellulose
IEP	isoelektrischer Punkt
JBK	Johannisbrotkernmehl
LVB	linear viskoelastischer Bereich
Lk	Labkasein
mK	micellares Kasein
MC	Methylcellulose
Na-CMC	Natrium-Carboxymethylcellulose
NaAl	Natriumalginat
P	Signifikanzniveau
SS	Schmelzsalz (JOHA [®] S9)
S1	Weizenstärke von Unilever
S2	Weizenstärke von Kröner
S3	Maisstärke
S4	Kartoffelstärke
Sk	Säurekasein
SPI	Sojaproteinisolat
TMP	Total Milk Protein
WSB	Wasserstoffbrückenbindung
WP	Molkenproteine

1 Einleitung

Käseerzeugnisse erfreuen sich weltweit eines wachsenden Verbraucherinteresses. 2012 wurden in Deutschland 2161 kt Käse und 165 kt Schmelzkäse produziert [1]. Die Globalisierung der Märkte sowie die in den letzten Jahren stark ansteigenden Rohstoff- und Energiekosten haben zu einer erheblichen Verschärfung des Konkurrenzdrucks zwischen den Lebensmittelproduzenten geführt. Lebensmittelimitate können Alternativen für Verbrauchergruppen sein, die aus kulturellen oder gesundheitlichen Gründen auf bestimmte Lebensmittel verzichten wollen/müssen, oder die eine spezielle Ernährungsweise, wie etwa die vegetarische oder vegane, bevorzugen. Aus diesen Gründen sind Lebensmittelimitate in der Lebensmittelproduktion keine Seltenheit mehr und gehören bereits seit Jahrzehnten zum Lebensmittelangebot. Innerhalb der Ernährung nehmen sie eine immer gewichtigere Rolle ein. Aufgrund des mangelhaften Wissens von Verbrauchern über die Herstellung von Lebensmitteln und die Verarbeitung von Rohstoffen werden im Lebensmittelsektor neue Entwicklungen in vielen Fällen negativ beurteilt. Allerdings sind die für den Verbraucher verfügbaren Informationen über Lebensmittel aus den Medien häufig irreführend oder falsch und tragen somit zu einer Verunsicherung bei.

Kunstlebensmittel bzw. Lebensmittelimitate sind im Allgemeinen Erzeugnisse, die alternativ zu traditionellen tierischen eiweißhaltigen Lebensmitteln wie Fleisch, Geflügel, Meeresfrüchten sowie Milchprodukten produziert werden und eine neue Kategorie von Lebensmitteln bilden [2]. In den USA gelten sie eher als ergänzende Nahrungsmittel und besitzen einen eigenen Markt. In der EU war bis vor kurzem noch kein Lebensmittelimitatmarkt existent [3]. Durch die steigenden Herstellungskosten von Käse sowie die große Nachfrage in der Gastronomie nach auf Käse basierenden Lebensmittelprodukten wurde bereits in den 1980er die Notwendigkeit erkannt, Analogkäse zu entwickeln [4; 5; 6; 7; 8; 9]. Käseimitate werden heutzutage in Ländern wie Großbritannien, Schweden, Frankreich, Deutschland, Belgien, der Schweiz, Australien sowie in den USA produziert, wobei die Markteinführung derartiger Produkte in den USA bereits in den frühen 1970er Jahren stattfand [10; 11]. Schätzungen zufolge beträgt die jährliche Produktion von Mozzarella-Imitaten in den USA ca. 80000 t [10]. In Deutschland werden jährlich bis zu 100.000 t Analogkäse produziert [12]. Hiervon werden die größten Mengen allerdings exportiert. Mit etwa 7 % in den USA sowie etwa 3 % in Europa bewegen sich die Marktanteile von Käsesubstituten auf einem stabilen Niveau [6].

Die weltweite Nachfrage nach eiweißhaltigen Produkten steigt stetig an. Imitate aus pflanzlichem Eiweiß können die immer größer werdende Lücke zwischen Angebot und Nachfrage schließen. Die Imitate sollen die Eiweißprodukte nicht ersetzen, sondern stellen eine komplett neue Klasse an Lebensmittelprodukten dar [2]. Die Nachfrage an Käseersatz steigt weltweit an, da dieser kostengünstiger produziert werden kann und weniger gesättigte Fettsäuren, Cholesterin und Nahrungsenergie enthält als echter Käse [13]. In Analogkäse sind Milchfette teilweise oder vollständig durch pflanzliche Fette ersetzt, was aus ernährungsphysiologischer Sicht vorteilhaft ist [14]. Die Haupteinsatzgebiete für Käseersatz sind in Fertiggerichten wie Pizza, Lasagne, Cordon-Bleu, Baguettes oder auf gegrilltem Fleisch. Ungefähr 60 % der produzierten

Analogkäseprodukte findet für die Herstellung von Pizzen Verwendung [10]. Gerade in Entwicklungsländern, in denen es keine ausreichende Versorgung an Milchprodukten gibt, stellt Käseersatz eine günstige Alternative dar.

Die durch Formulierung und Herstellungstechnologie bedingten physikalischen Eigenschaften von Analogkäse bestimmen die Anwendung in einer Reihe von Lebensmitteln. Durch z. B. veränderte Schmelzeigenschaften im Vergleich mit konventionellen Produkten resultieren in Abhängigkeit von der Zielstellung optimierte Applikationseigenschaften. Zur Erleichterung der gleichmäßigen Verteilung in verarbeiteten Lebensmitteln oder Convenienceprodukten wird Analogkäse in der Regel in Scheiben geschnitten, gewürfelt oder geschreddert. Die physikalische Struktur von Analogkäse als viskoelastisches disperses System muss die Zerkleinerungsprozesse wie beispielsweise das Schreddern und das Schneiden in Scheiben ermöglichen. Nach der Verarbeitung darf die Masse weder verkleben noch verklumpen [15; 16].

Neben den positiv zu bewertenden sensorischen Eigenschaften von Schmelzkäse tritt die ernährungsphysiologische Wertigkeit immer mehr in den Vordergrund. Schmelzkäse besitzt einen hohen Gehalt an biologisch hochwertigem Eiweiß, welches leicht verdaulich ist und eine hohe Konzentration an essentiellen Aminosäuren aufweist [17]. Im Schmelzkäse wie in der Milch sind die Calcium- und Phosphorgehalte von besonderer Bedeutung [18]. Bei den Verbrauchern hat der Schmelzkäse gegenüber den Frischerzeugnissen aus der Milch den Vorteil, dass er länger haltbar ist. Schmelzkäse oder sog. „Prozesskäse“ ist ein Erzeugnis, welches vorwiegend aus Labkäse (Hart- und Schnittkäse) unter Zusatz von Schmelzsalzen, Milchprodukten und/oder anderen Lebensmitteln durch physikalisches Schmelzen von gemischten Rohwaren und Zutaten bis zur Umwandlung in ein hinsichtlich der Textur und Sensorik neuartiges Produkt hergestellt wird. Der „Prozesskäse“ kann in zwei Hauptprodukte eingeteilt werden [19; 20]:

1. Schmelzkäse ist ein Erzeugnis aus Käse (mindestens zu 50 % bezogen auf die Trockenmasse laut Käseverordnung), welches unter Verwendung von Schmelzsalzen durch einen wärmeinduzierten Schmelzprozess hergestellt wird.
2. Schmelzkäsezubereitungen sind Erzeugnisse aus Schmelzkäse oder aus Käse und Schmelzkäse, die unter Zusatz von Milcherzeugnissen und/oder anderen Lebensmitteln als Zutat oder Standardisierungsmittel, auf gleiche Weise hergestellt werden wie Schmelzkäse.

Die Anforderungen an die Zusammensetzung von „Prozesskäseprodukten“ sowie deren Fettgehaltstufen nach der Käseverordnung sind in Tab. 12.1 und Tab. 12.2 im Anhang angegeben.

2 Aufgabenstellung

Für die Optimierung der Prozessführung und der Qualität der Analog- und Schmelzkäseprodukte ist die Aufklärung der ablaufenden Strukturbildungsmechanismen während und nach der Herstellung von wissenschaftlicher und technologischer Bedeutung. Trotz des hohen technologischen Fortschritts bei der industriellen Herstellung von Lebensmitteln wurde den Strukturbildungsreaktionen bei der Produktion von Schmelz- und Analogkäse bisher wenig wissenschaftliche Aufmerksamkeit geschenkt.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der Ingredienzien sowie der Technologieführung auf die Strukturausbildung und die Textureigenschaften sowie die Schmelzbarkeit von im Labormaßstab (1 kg) hergestellten Analog- und Schmelzkäsepräparationen zu untersuchen und technologische Optima festzulegen. Schwerpunktmäßig befasst sich die Arbeit mit den folgenden Themen:

Analogkäsepräparation:

Die physikalische Struktur als viskoelastisches disperses System von Analogkäse soll die Zerkleinerung (Schneiden, Würfeln, Schreddern) und das Aufschmelzen ohne Verkleben bzw. Verklumpen ermöglichen. In Abhängigkeit von der Proteinquelle und -konzentration, der Schmelzsalkonzentration, des Fettgehaltes, Stärkeart und -konzentration, dem Einsatz unterschiedlicher Hydrokolloide als Einzelkomponenten, dem pH-Wert und der Drehzahl des verwendeten Schmelzvorrichtung werden eine Reihe von materialwissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt. Für den jeweiligen Variationsparameter wird ein technologisches Optimum ermittelt. Folgende Schwerpunkte sind Bestandteil der Arbeit:

1. Untersuchung der ingredienzien- und technologieabhängigen Strukturausbildung mit Hilfe moderner Oszillationsmessungen (Temperatur- und Frequenzsweep).
2. Aufklärung der Dynamik der Strukturierungsmechanismen anhand der Kennwerte Strukturbildungsgeschwindigkeit und -beschleunigung.
3. Lebensmittelmaterialwissenschaftliche Bewertung der Analogkäsestruktur.
4. Partikelanalytik sowie Untersuchung funktioneller Eigenschaften (Wasser- und Fettbindkapazität) der eingesetzten Proteinpulver, da von diesen die Strukturausbildung stark beeinflusst werden kann.
5. Untersuchung des Substitutionspotentials des kostenintensiven Labkaseins durch Substitute: Stärke, micellares Kasein, Säurekasein, Sojaproteinisolat und Hydrokolloide.
6. Applikationsverhalten am Beispiel der ingredienzienabhängigen Schmelzbarkeit mit Hilfe einer empirischen Methode.
7. Auswertung der ingredienzienabhängigen Textureigenschaften mit Hilfe instrumenteller Texturanalyse (Kraft-Weg-Messungen) durch Parallelplattendeformation und Gewinnung objektiver physikalischer Kennwerte für Zerkleinerungsprozesse.
8. Untersuchung des Fließverhaltens mit Hilfe von Schermessungen für die Nutzung im Herstellungsprozess.

Schmelzkäsepräparation:

Zur Erzielung optimaler Textureigenschaften und Strukturstabilität in Schmelzkäse ist die Kenntnis der Strukturierungsmechanismen im Käseteig nach dem Schmelzprozess von großer Bedeutung. Zur Untersuchung des Einflusses der Zusammensetzung und der Prozessparameter auf die Strukturausbildung sollen streichfähige Schmelzkäsepräparationen im Labormaßstab hergestellt werden. Für die Parameter Trockensubstanzgehalt, Schmelzsalkonzentration, Fettgehalt, Rührerdrehzahl und Schmelzprozesszeit sollen die spezifischen Strukturierungsmechanismen mittels Temperatursweepmessung erfasst und technologische Optima ermittelt werden.

3 Literaturrecherche

3.1 Analogkäsetechnologie

Analogkäse ist ein Ersatz für Milchkäse und ähnelt diesem in Zusammensetzung, Aussehen und den Anwendungseigenschaften, wobei ein Direktverzehr nicht vorgesehen ist. In Analogkäse werden Milchfett und Milcheiweiß teilweise oder vollständig durch pflanzliche Fette sowie Öle (z. B. teilweise hydriertes pflanzliches Fett auf Basis Soja, Palmkern) und pflanzliche Eiweiße (z. B. Erdnuss- und Sojaprotein) ersetzt [11; 21; 22; 23]. Analogkäse wird mit den gewünschten nutritiven, funktionellen und Lageranforderungen formuliert und produziert [7; 10; 11]. Für die Geschmacksgebung werden künstliche oder natürliche Aroma- und Farbstoffe verwendet [24]. Der Vergleich der käseähnlichen Imitate mit den originären tierischen Erzeugnissen hinsichtlich der sensorischen Eigenschaften zeigt signifikante und gewünschte Übereinstimmungen. Sie gleichen sich in Geschmack, Farbe, Textur, Aussehen sowie charakteristischen Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten.

Es gibt in der Literatur verschiedene Kennzeichnungen zu dieser Produktart, u. a. Analog-, Kunstkäse, Käseersatz, -imitat, extrudierter, gefüllter und synthetischer bzw. künstlicher Käse [25]. Grundsätzlich stellen diese Begriffe aufgrund der Substitution des Milchfettes durch pflanzliche Fette keine zulässige Verkehrsbezeichnung für derartige Lebensmittel dar. Vielmehr sind sie Bezeichnungen, welche unter anderem durch die Medien signifikant geprägt wurden, um käseähnliche Produkte zu kategorisieren und den Unterschied zum Original zu verdeutlichen [26; 27]. Vielfach werden Käseimitate medial und politisch hinsichtlich der Irreführung von Verbrauchern durch die käseähnliche Erscheinung kritisch diskutiert. Das Lebensmittel- und Kennzeichnungsrecht bezieht dazu eindeutig Stellung. Demnach gilt das Deklarieren dieser Erzeugnisse in Kombination mit dem Begriff Käse als irreführend und ist nach dem Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch LFGB (§ 11 Vorschriften zum Schutz vor Täuschung) als gesetzeswidrig einzustufen [28].

Die Akzeptanz und der Erfolg der Analogkäseprodukte kann auf folgende Faktoren zurückgeführt werden [4; 10; 13; 23; 29; 30; 31; 32]:

1. Der Konsum von Fast Food und Fertiggerichten, zu deren wichtigsten Zutaten Käse gehört, nimmt tendenziell zu.
2. Natürlicher Käse ist in der Produktion deutlich kostenaufwendiger als sogenannte Käseimitate. Die geringeren Kosten von Analogkäse sind auf die Verwendung von Pflanzenölen im Vergleich zu Butterfett und die Kostenreduktion für die Produktionsanlagen und das Fehlen einer langwierigen Reifungszeit für diese Produkttypen zurückzuführen.
3. Leicht modifizierbare Applikationseigenschaften wie beispielsweise eine große Fließ- und Zerkleinerungsfähigkeit sowie eine hohe Hitzebeständigkeit durch die Veränderung der Formulierung und Prozessparameter sind möglich. Die Herstellung von Stücken, Scheiben oder Raspeln ist problemfrei.

4. Höhere Lagerstabilität als natürlicher Labkäse während der Kühlung während der Kühlung bezüglich der funktionellen Eigenschaften, kein Ausölen und unbedeutende Fettschädigung liegen vor.
5. Eine Ernährungsflexibilität und Erfüllung diätetischer Anforderungen (z. B. laktosefrei und kalorienarm mit Vitamin-, Mineralstoff- und Ballaststoffanreicherung und reduziertem Cholesteringehalt) wird ermöglicht.
6. Eine breite Geschmacksvielfalt kann erzeugt werden.
7. Die Analogkäseherstellung stellt eine günstige Alternative für Länder mit mangelhafter Versorgung an Milchprodukten wie beispielsweise im Nahen Osten dar.
8. Vom Aussehen und Geschmack her ist Analogkäse für den Laien kaum vom Original unterscheidbar.

Die möglichen Vorteile von Analogkäse, die in vielen gesellschaftlichen Bereichen von der Diätetik bis hin zum Umweltschutz und nachhaltigen Produktionsprozessen eine Rolle spielen können, sind hingegen nur selten das Thema öffentlicher Debatten.

Die funktionellen und rheologischen Eigenschaften von Analogkäse (z. B. das Aufschmelzverhalten und die „Festigkeit“) werden stark von den Herstellungsbedingungen sowie den Ingredienzen und deren Konzentrationen in der Formulierung beeinflusst. Tab. 3.1 zeigt eine Reihe von verwendenden Ingredienzen mit den Einsatzkonzentrationen [33].

Tab. 3.1 Ingredienzen mit Einsatzkonzentrationen in Analogkäseformulierung [33]

Ingredienzen	Einsatzkonzentration in %
Wasser	43,5 – 60
Kasein und Kaseinate	11 – 28
Pflanzliche Öle und Fette	0 – 28
Stärke*	0 – 25,8
Schmelzsalze (Emulgiersalze)	0,5 – 4
Säuerungsmittel	0,1 – 1,6
Natriumchlorid	0,7 – 2
Konservierungsmittel (z. B. Nisin, K-Sorbate & Na-Propionate)	0,09 – 1,1
Stabilisatoren	0,35 – 5
Farbstoffe (z. B. Annatto & künstliche Farbstoffe)	0,2 – 2
Geschmackstoffe oder Geschmackverstärker	0,2 – 5

* In eigenen Untersuchungen werden maximal 6,8 % Stärke eingesetzt

Auf die Herstellungsverfahren sowie die Ingredienzen und deren technofunktionellen Eigenschaften wird nachfolgend detailliert eingegangen.

3.1.1 Herstellungsverfahren

Die Herstellung von Analogkäse ist gekennzeichnet durch das Vermischen ausgewählter Zutaten unter dem Einfluss von Hitze bis zum Erreichen einer homogenen Masse, die sich während der Abkühlung verfestigt. Die Formulierung beeinflusst dabei maßgeblich den technologischen

Ablauf der Produktion. Prinzipiell werden Käseimitate nach folgendem Technologieablauf in Anlehnung an [15; 33; 34; 35; 36] hergestellt:

1. Dosieren und Vermischen der trockenen Zutaten mit Wasser bei 50 °C.
2. Hinzugabe der flüssigen Fettkomponente.
3. Einstellung des pH-Wertes auf 6 für Mozzarella-Analogkäse und auf 4,5 für cremige Produkte mit Hilfe eines Säuerungsmittels wie z. B. Citronensäure oder Milchsäure.
4. Erhöhung der Temperatur auf ca. 85 °C (die Temperatur kann variiert werden, sollte jedoch im Bereich von 70 – 95 °C liegen) durch direkte oder indirekte Beheizung.
5. Fortführen des Mischvorganges, bis eine homogene Masse entsteht.
6. Ausschließlich für cremige Analogkäseprodukte Homogenisieren der aufgeschmolzenen Masse bei 200 bar.
7. Zugabe von Aroma- und Farbstoffen kurz vor Prozessende.
8. Entleeren der Schmelzvorrichtung, Abfüllung, Abkühlung und Lagerung bei 4 °C.

Zur Herstellung von Analogkäse unterscheidet man zwei Verfahren. Zum einen die kontinuierliche Produktion unter Verwendung eines Consistators [36] und zum anderen die Batchproduktion in einer speziellen Schmelzanlage. Ein möglicher kontinuierlicher Prozessablauf ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt.

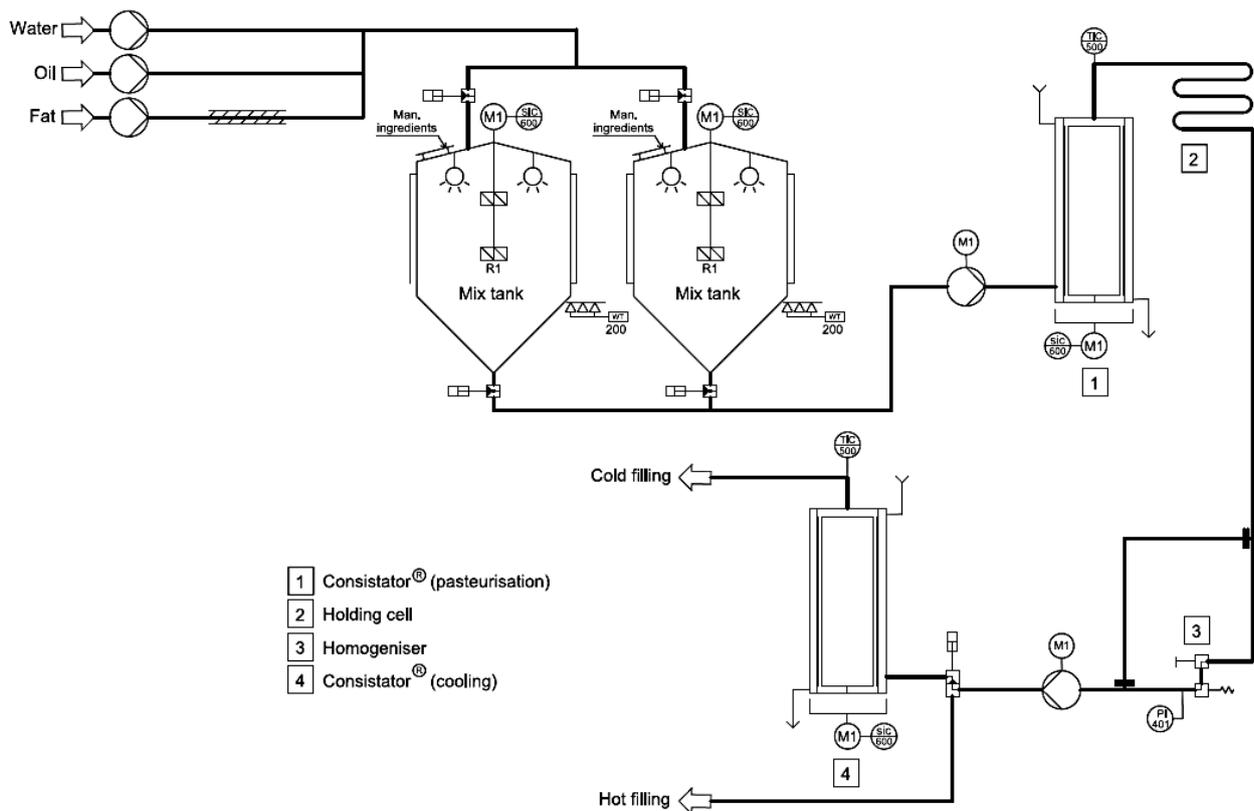


Abb. 3.1 Prozessschema eines kontinuierlichen Herstellungsverfahrens von Analogkäse [36]

Bei der Batchproduktion wird wie bei der kontinuierlichen Herstellung die Doppelschnecken-Schmelzvorrichtung (siehe Abb. 3.2) am häufigsten eingesetzt [33]. Diese Schmelzvorrichtung

arbeitet mit Geschwindigkeiten von 50 bis 200 U/min und Temperaturen von 70 bis 90 °C mit typischen Verarbeitungszeiten von 3 – 7 min. Imitiert wird hierbei das Kneten und Ausziehen bei der traditionellen Herstellung von echtem Mozzarella [37; 38; 39]. Der Einsatz von Extrudern wurde auch als wirksames Instrument zur Herstellung von Analogkäse verwendet [40]. Die Textur des extrudierten Käses ähnelt sich im Vergleich zu dem mit der Doppelschnecken-Schmelzvorrichtung produzierten Käses. Jedoch weist der extrudierte Käse eine geringere Fettemulgierung und eine höhere Kaseindissoziation auf. Der sogenannte Einzelschneidemeser-Schmelzvorrichtung bzw. Stephan-Schmelzkessel (siehe Abb. 3.2) kommt aus der klassischen Schmelzkäseherstellung und wird immer häufiger zur Herstellung von Analogkäse verwendet. Die Verarbeitungsbedingungen, wie z. B. die Temperatur, die Verarbeitungszeit und die Scherrate zur Kontrolle der funktionellen Eigenschaften können geändert werden [33; 41; 42]. Verglichen wurden die physikalischen Eigenschaften von Analogkäseprodukten, die mit identischen Formulierungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, sowohl in der Doppelschnecken-Schmelzvorrichtung als auch im Stephan-Schmelzkessel hergestellt wurden. Mit zunehmender Drehzahl der Mischeinrichtung steigt die „Festigkeit“ an und die Schmelzbarkeit sowie die Größe der Fettkügelchen nimmt ab [43].

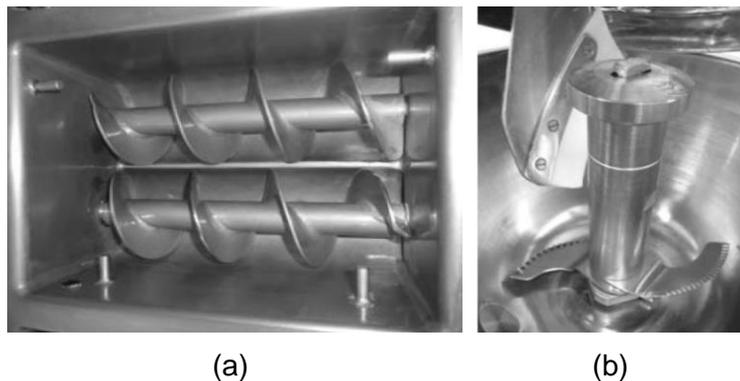


Abb. 3.2 Innenraum von Doppelschnecken-Schmelzmaschine (a) und Schmelzkessel (b) [33]

3.1.2 Vier-Phasen-Matrixentwicklung

Der Prozessablauf zur Herstellung von Analogkäse ist hauptsächlich durch physikalisch-chemische Veränderungen der Komponentenmischung unter dem Einfluss der Hitze und Scherung zur Bildung einer stabilen O/W-Emulsion charakterisiert [33]. Während des Herstellungsprozesses wird die Matrix innerhalb von vier Phasen aufgebaut [31] (siehe Abb. 3.3). Lichtmikroskopische Aufnahmen dieser Phasen sind in Abb. 3.4 veranschaulicht.

In der ersten Phase (Abb. 3.3, A) quillt das Protein durch die Wasserbindung auf und es entwickelt sich eine steife partikuläre Konsistenz. Nach der lichtmikroskopischen Aufnahme (Abb. 3.4, A) ist das Protein (blau gefärbt) einigermaßen gleichmäßig innerhalb der Probe verteilt. Die Proteinmatrix scheint mehr oder weniger kontinuierlich zu sein. In der lichtmikroskopischen Aufnahme liegt der Anteil an Fettkügelchen (rot gefärbt, Größe: 0,5 – 5 μm) in geringem Maße vor. Mischpartikel von Protein und Fett (MFP) sowie Leerflächen (Luft einschließen) sind in der Matrix deutlich zu erkennen.

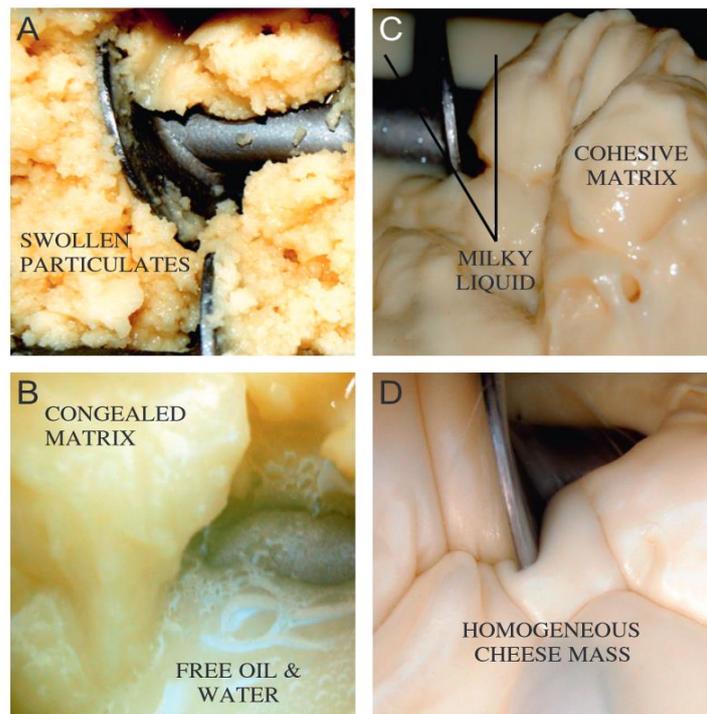


Abb. 3.3 Vier-Phasen-Matrixentwicklung während des Herstellungsprozesses [31]

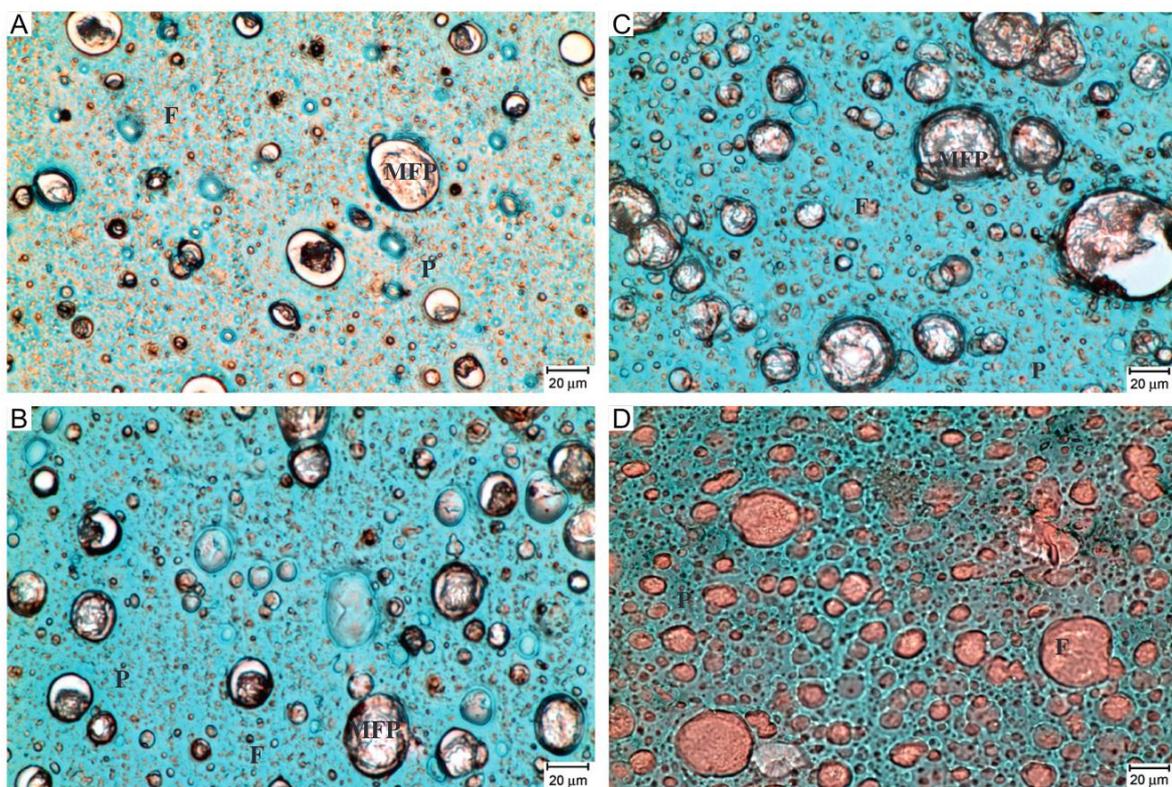


Abb. 3.4 Lichtmikroskopische Aufnahmen der Vier-Phasen-Matrixentwicklung
Fettkügelchen: rot, Proteinmatrix, blau, MFP: Mischpartikel von Fett und Protein [31]

Die zweite Phase (Abb. 3.3, B) ist durch eine Umwandlung der hydratisierten Kaseinpartikel in eine lichtdurchlässige und starre Masse (bei ca. 80 °C) gekennzeichnet. Freies Öl und Wasser sind deutlich sichtbar.

In der dritten Phase (Abb. 3.3, C) wird die lichtdurchlässige Masse unter dem Einfluss der Hitze und der mechanischen Arbeit in eine opake und kohäsive Matrix transformiert. Die Oberfläche erscheint dennoch ölig und eine kleine Menge milchiger Flüssigkeit ist erkennbar. In den zweiten und dritten Phasen (Abb. 3.4, B und C) wird die Proteinmatrix kontinuierlicher mit größeren Fettkügelchen. Die Mischpartikel sind noch vorhanden.

In der letzten Phase (Abb. 3.3, D) bildet sich eine homogene Masse aus, in der die Fettphase innerhalb der Matrix vollständig emulgiert vorliegt. Die lichtmikroskopische Aufnahme der letzten Phase (Abb. 3.4, C) deutet auf eine Fettemulgierung durch das Protein hin. Die Mischpartikel von Fett und Protein sind nicht mehr sichtbar. Die Fettkügelchen sind gleichmäßig in der gesamten Proteinmatrix verteilt und größer als die in den vorherigen Phasen (ca. 20 μm). Zum Erreichen eines Endproduktes mit guten funktionellen Eigenschaften kommt vor allem das gut hydratisierte Kasein sowie die stabile Fettphase in Frage [31; 33].

3.1.3 Proteinquellen und Funktionelle Eigenschaften

3.1.3.1 Bedeutung des Proteineinsatzes

Analogkäse ist ebenso wie Schmelzkäse eine O/W-Emulsion, wobei die Ölphase in der wässrigen Phase durch das Protein stabilisiert wird [44; 45; 46]. Dies findet durch die Herabsetzung der Grenzflächenspannung zwischen der wässrigen Phase und der Fettphase und die gleichzeitige Erhöhung der Viskosität statt. Dadurch werden sowohl die Koaleszenz und als auch das Zusammenfließen der Öltröpfchen verhindert [37; 45; 47; 48; 49; 50]. Die Proteine stellen aufgrund ihrer funktionellen Eigenschaften das strukturelle Rückgrat für die verarbeiteten Käseprodukte dar und sind somit als Schlüsselsubstanzen des Prozessierens von Käseimitaten zu betrachten. Die Reduzierung des Proteingehaltes kann in Bezug auf die Strukturstabilität und den Verlust funktioneller Eigenschaften einen großen Einfluss auf die anwendungstechnischen Eigenschaften (z. B. Schredder- und Dehnfähigkeit, „Härte“, Aufschmelz- und Fließverhalten) besitzen [46; 49]. Aus gesundheitlichen Aspekten stehen sowohl Proteine tierischer als auch pflanzlicher Herkunft im Vergleich mit anderen Ingredienzien an erster Stelle. Proteine und bioaktive Peptide können u. a. antimikrobielle, anticancerogene und immunstimulierende Wirkungen haben. Des Weiteren können sie zum einen blutdruck- und cholesterinsenkend wirken und zum anderen können sie bei Menschen mit Herzerkrankungen einen positiven Einfluss haben [51; 52; 53; 54; 55]. Für die Herstellung von Analogkäse werden Lab- und Säurekasein sowie Kaseinate, Molkenproteine bis hin zu Proteinen auf pflanzlicher Basis eingesetzt. Art und Menge des verwendeten Proteins wirken sich dabei maßgeblich auf die funktionellen und strukturellen Eigenschaften der Käseimitate aus.

3.1.3.2 Kaseincharakterisierung

Den Hauptbestandteil des Milchproteins bilden mit etwa 80 % des Gesamtproteinanteils die Kaseine. Sie bestehen hauptsächlich aus α_{s1} -, α_{s2} -, β -, und κ -Kasein mit einem Verhältnis von 4:1:4:1 [56; 57; 58]. Die Kaseine zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus [59]:

1. Die Kaseine sind Phosphoproteine mit über Esterbindung an die Hydroxylgruppen der Aminosäure Serin angekoppelten Phosphorsäuremolekülen [59]. Die Phosphatgruppen sind in der Lage, mit zweiwertigen Ionen (Ca^{+2}) stabile intra- und intermolekulare Bindungen auszubilden [60; 61].
2. Wegen eines hohen Gehaltes (35 – 45 %) an apolaren Aminosäuren wäre eine schlechte Löslichkeit der Kaseine in wässrigen Systemen zu erwarten. Dieser Einfluss wird jedoch durch einen hohen Gehalt an Phosphatgruppen, niedrigen Gehalt an schwefelhaltigen Aminosäuren und durch den glycosidischen Anteil im κ -Kasein kompensiert.
3. Durch hydrophobe Interaktionen assoziieren die Kaseinmonomere mit- und untereinander.
4. Alle Kaseine besitzen einen hohen Gehalt an der Aminosäure Prolin, die die Herausbildung der geordneten Sekundärstruktur der Proteine stört. Folglich sind Kaseine leicht proteolysierbar durch Proteinasen und damit leicht verwertbar als Nahrungsproteine. Die Denaturierung als Verlust der Sekundärstruktur ist für Kaseine, die weitgehend ungeordnete Strukturbereiche aufweisen untypisch und für die beachtliche Temperaturstabilität der Kaseine verantwortlich [59; 62].
5. Wegen eines sehr niedrigen Gehaltes an schwefelhaltigen Aminosäuren ist die biologische Wertigkeit der Kaseine niedriger als die des Eialbumins als Referenzproteins (80 gegenüber 100 für Ovaralbumin). α_{s1} - und β -Kasein enthalten keine Cystin- oder Cysteinreste, wohingegen das α_{s2} und κ -Kasein je zwei intermolekular über die Disulfidbindungen vernetzten Cysteinreste pro Mol Protein enthalten. Die hohe Hitzestabilität und veränderte Labfähigkeit der Milch hängen mit den Reaktionen dieser Disulfidbindungen mit den freien Thiolgruppen der Molkenproteine (vorwiegend β -Lactoglobulin) zusammen.
6. Die Kaseine sind reich an der in vielen pflanzlichen Proteinen defizitären Aminosäure Lysin. Demzufolge sind sie als ernährungsphysiologische Ergänzungskomponente für pflanzliche Lebensmittel bekannt.

Eine zusammengefasste Charakterisierung der Kaseinmonomere ist in Tab. 3.2 angegeben.

Tab. 3.2 Zusammengefasste Charakterisierung der Kaseinmonomere [62; 63; 64; 65]

Kaseinmonomer	Charakterisierung
α_{s1} -Kasein	23,6 kDa; 199 Aminosäuren; geringe Sensitivität gegenüber Chymosin; calciumempfindlich; keine Disulfidbrücken; stark phosphoryliert; 9 genetische Varianten
α_{s2} -Kasein	25,2 kDa; 207 Aminosäuren; keine Sensitivität gegenüber Chymosin; calciumempfindlich; eine Disulfidbrücke; stark phosphoryliert; 4 genetische Varianten
β -Kasein	24 kDa; 209 Aminosäuren; geringe Sensitivität gegenüber Chymosin; calciumempfindlich; keine Disulfidbrücke; zum Teil phosphoryliert; 15 genetische Varianten
κ -Kasein	19 kDa; 169 Aminosäuren; hohe Sensitivität gegenüber Chymosin; calciumunempfindlich; eine Disulfidbrücke; wenig phosphoryliert; 13 genetische Varianten; zum Teil glycosyliert

Struktureller Aufbau von Kaseinmicellen

95 % der Kaseine bilden aufgrund des starken Assoziationsvermögens über hydrophobe Interaktionen, elektrostatische Bindungen und Calciumphosphatbrücken in Milch Micellen aus [62; 66; 67; 68; 69]. Diese Micellen enthalten je nach ihrer Größe (Durchmesser: 130 – 160 nm) zwischen 100 und 300000 Kaseinmoleküle und befinden sich in der Milch in einem dynamischen Gleichgewichtszustand. Die Trockenmasse der Micelle besteht zu etwa 92 % aus Protein und zu 8 % aus Salzbestandteilen (hauptsächlich Calcium und Phosphat) [62]. Die Struktur der Kaseinmicelle wurde in mehreren Studien untersucht [56; 70; 71; 72; 73; 74; 75; 76; 77] und dazu verschiedene Modelle auf molekularer Ebene vorgeschlagen.

Nach dem von Schmidt (1982), Walstra et al. (1984) und Walstra (1990) vorgeschlagene Submicellen-Modell [56; 72; 78] (siehe Abb. 3.5) zeichnet sich die Micelle durch einen hydrophoben Kern und einen hydrophilen Mantel aus [79]. Sie setzt sich aus kleinen Aggregaten, den sogenannten Submicellen (Durchmesser: 10 – 20 nm/ 10 bis 20 Kaseinmonomere) zusammen [61]. Die Aggregation der Submicellen bis zu einer bestimmten Größe ist durch kleine Calciumphosphatcluster und hydrophobe Interaktionen bedingt [80].

Es gibt κ -kaseinreiche und κ -kaseinarne Submicellen. Die κ -kaseinreichen Submicellen befinden sich auf der Oberfläche der Kaseinmicelle [81]. Der negativ geladene C-terminale Molekülteil (Glycomakropeptid) des an der Oberfläche der Micelle befindlichen κ -Kaseins ragt an verschiedenen Stellen der Oberfläche als 7 bis 10 nm langes flexibles Haar in die umgebende wässrige Lösung. Er bewirkt eine elektrische und sterische Abstoßung gegenüber anderen Micellen. Dadurch wird die Aggregation der Micellen verhindert [61; 62; 80]. Das Submicellen-Modell bietet die beste Erklärung für den Aufbau und die Stabilisierung von Kaseinmicellen [81].

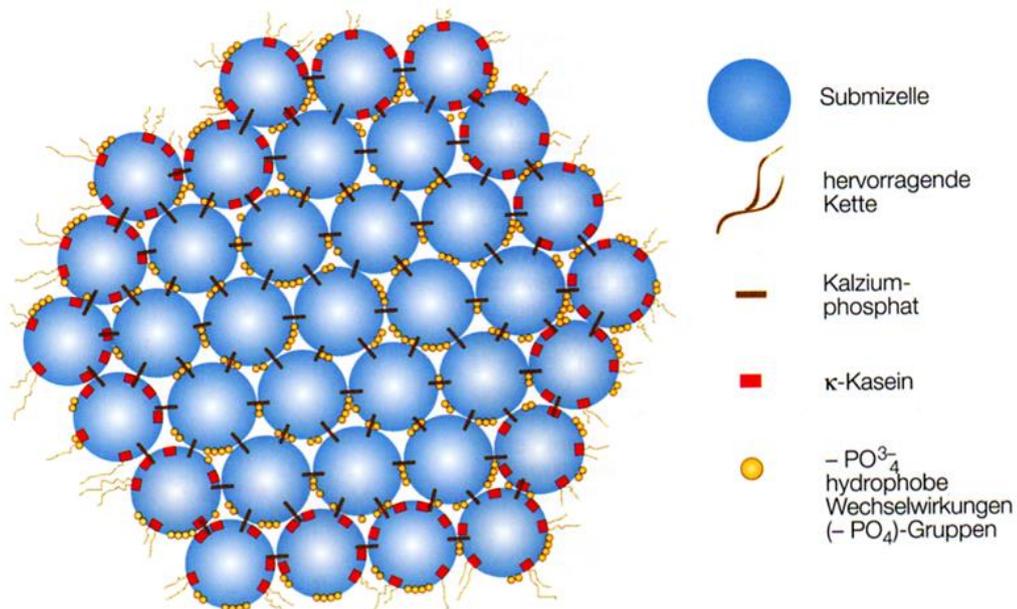


Abb. 3.5 Schematische Darstellung einer Kaseinmicelle nach dem Submicellen-Modell [81]

Ein anderes Modell der Kaseinmicelle nach Holt et al. (1992 und 1996) [75; 76] weist darauf hin, dass es keine quantitativen Unterschiede in der Zusammensetzung der Micelle sowohl auf ihrer

Oberfläche als auch im Inneren gibt und die Micelle durch Calciumphosphat-Nanoclustern vernetzt ist (siehe Abb. 3.6).

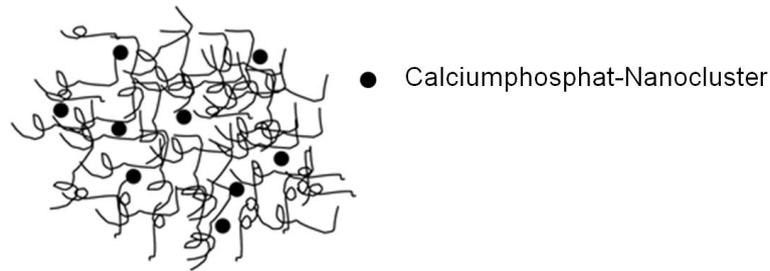


Abb. 3.6 Modell einer Kaseinmicelle nach Holt et al. 1992/1996 [75; 76]

Das Dualbindungsmodell der Micelle nach Horne (1998) [77] besagt, dass die einzelnen Kaseine nicht nur über ein kolloidales Calciumphosphat (CCP) verbunden sind, sondern auch durch hydrophobe Interaktionen (siehe Abb. 3.7). Das nach außen hydrophil agierende κ -Kasein ist mit den hydrophoben Kernkaseinen verbunden und verfügt über ein oder zwei Phosphoserinreste.

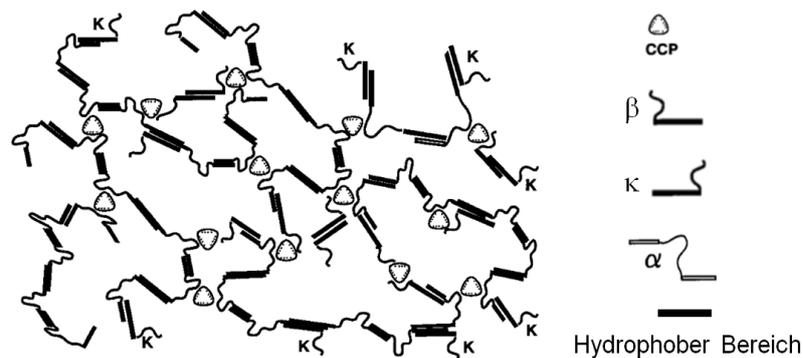


Abb. 3.7 Dualbindungsmodell einer Kaseinmicelle nach Horne 1998 [77]

Kaseinmicellen reagieren empfindlich auf Ladungsänderungen und Proteinase. Beim isoelektrischen Punkt der Kaseine mit einem pH-Wert von 4,6 oder bei einem Angriff des Labenzym kommt es zu strukturellen Veränderungen in Form von Gelbildung [60; 81; 82; 83].

In der Literatur werden Kaseine bzw. Kaseinate als wesentliche Komponenten mit ambivalenter Funktionalität zur Herstellung von Analogkäse bewertet. Aus diesem Grund werden nachstehend Informationen zu ihrer Gewinnung und Funktionalität gegeben.

3.1.3.3 Labkasein

Bei der Gewinnung von Labkasein wird unter dem Einfluss des Labenzym, welches die Proteinase Chymosin und Pepsin enthält [84; 85], die Aminosäurekette des κ -Kaseins an der Bindung zwischen der Aminosäure 105 (Phenylalanin) und 106 (Methionin) gespalten. Das Glycomakropeptid (mit der Aminosäuresequenz von 106 bis 169) geht in Molke über. Das Para- κ -Kasein (unlöslicher Rest) verbleibt mit den α_s - und β -Kaseinen im Koagulum. Diese aggregieren

durch die Calciumphosphatbrücken und hydrophoben Interaktionen miteinander und bilden ein dreidimensionales Netzwerk [81; 86].

Die Labgerinnung kann in drei Prozesse gegliedert werden [86; 87; 88; 89]. Der Mechanismus der labinduzierten Gerinnung ist in Abb. 3.8 zusammengefasst.

Während der labinduzierten Gerinnung ändert sich das Viskositätsverhalten (siehe Abb. 3.9). In der Primärphase (Abschnitt I) steigt die Viskosität minimal an. Eine Sigmoid-Kurve ist in der Sekundärphase (Abschnitt II und III) zu erkennen. Die maximale Viskosität wird in der Tertiärphase erreicht. Anschließend nimmt sie aufgrund der Molkenabgabe ab [90].



Abb. 3.8 Mechanismus der labinduzierten Gerinnung [86; 87; 88; 89]

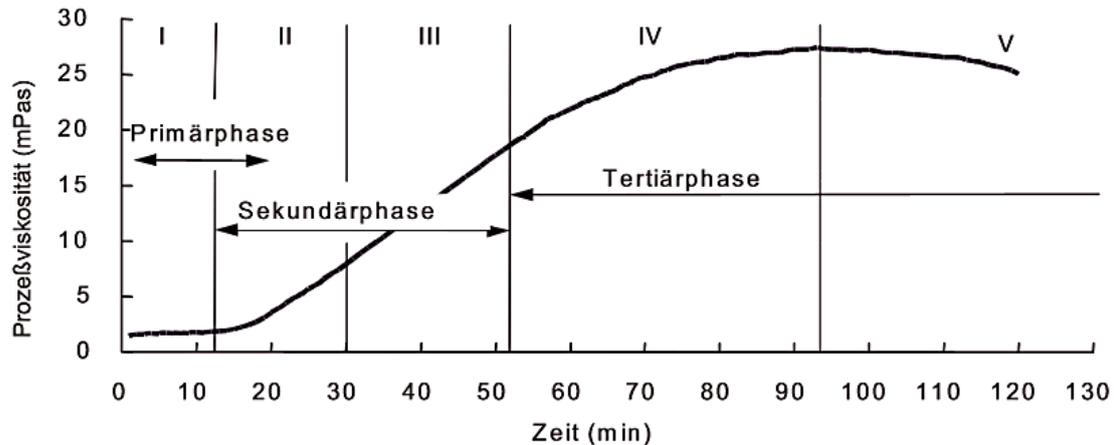


Abb. 3.9 Viskositätsänderung während der labinduzierten Gerinnung [90]

Bei der Herstellung von Labkasein wird die Magermilch zunächst bei 72 °C für 15 bis 20 s pasteurisiert und dann mittels Chymosin bei 30 °C für 15 bis 20 min dickgelegt. Die Gallerte wird mit speziellen Rührwerken geschnitten und auf 60 °C erhitzt, um die Enzyme zu deaktivieren. Danach wird die Molke vom Bruch getrennt. Normalerweise erfolgt die Entmolkung in einer Dekanterzentrifuge, um das Washwasser zu reduzieren. Das im Behälter verbleibende Kasein wird gewaschen und nach Abtrennung mit Heißluft bei 55 bis 65 °C [19; 81] auf einen Restwassergehalt von maximal 10 % getrocknet [91], abschließend gemahlen und gesiebt (0,177 – 0,420 mm) [81]. In Abb. 3.10 ist das Fließschema für eine Prozesslinie zur Herstellung von Labkasein dargestellt, wobei das Waschen zur ökonomischeren Wassernutzung im Gegenstrom erfolgt.

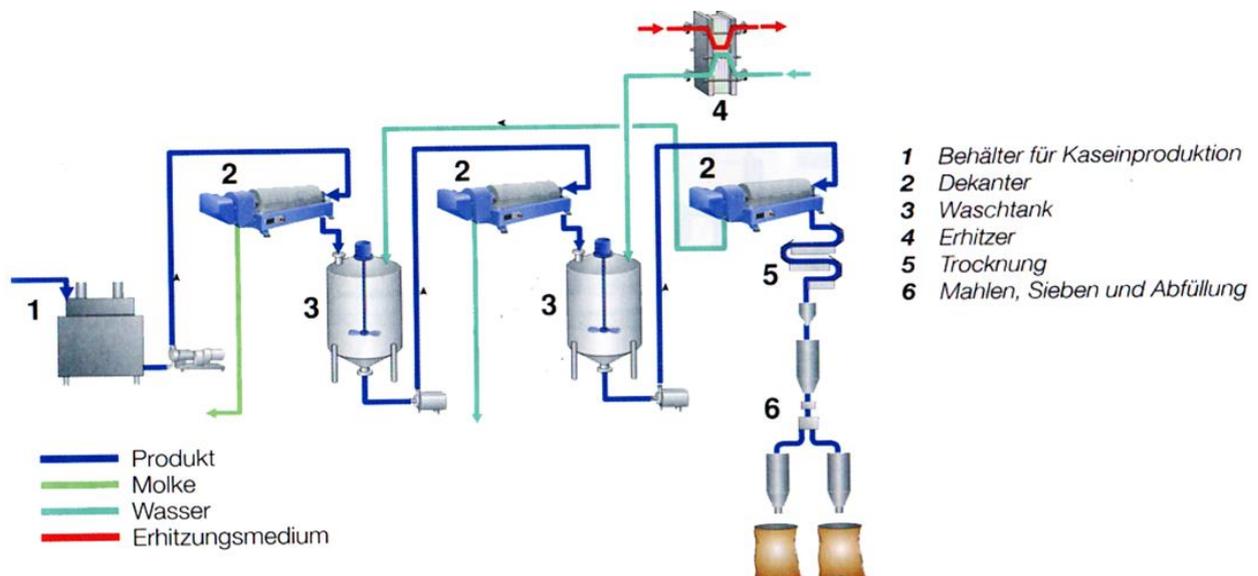


Abb. 3.10 Prozesslinie zur Herstellung von Labkasein [81]

Das Endprodukt sollte weiß bis leicht gelblich sein. Eine zu dunkle Farbe bedeutet einen zu hohen Laktoseanteil und damit eine minderwertige Qualität des Labkaseins. Im Grunde genommen ist Labkasein ein sehr junger Käse. Der ursprüngliche Calciumgehalt und die Fähigkeit zur Strukturbildung sind voll erhalten [19; 82]. Labkasein enthält circa 7,5 % Mineralstoffe, da

sämtliche Phosphatanteile der Kaseinmicelle noch vorhanden sind. Dies gilt als Hauptgrund für die gute Quellbarkeit von Labkasein [82]. Ferner weist Labkasein mehrere Vorteile wie z. B. Geschmacksneutralität und Lagerstabilität auf [92].

Für die Herstellung von Analogkäse mit entsprechenden funktionellen und strukturellen Eigenschaften kann Labkasein als alleinige Eiweißquelle verwendet werden [49]. Es verleiht den Käseimitaten einen milden Geschmack, eine helle Farbe sowie herausragende Texturereigenschaften [93]. Aufgrund dessen ist Labkasein bei der Herstellung von Analogkäse die am weitesten verbreitete Proteinquelle [37].

3.1.3.4 Säurekasein

Unter Säuregerinnung versteht man die isoelektrische Fällung [87]. Die Kaseinmicellen verlieren dabei ihre Hydrathüllen und das micellare Calciumphosphat geht aus dem Calcium-Kasein-Komplex in Lösung [94]. Die Präzipitation der Kaseine (in wenigen Minuten) durch Zugabe von Mineralsäuren wie z. B. Schwefelsäure zu Magermilch ist die Grundlage zur Gewinnung von Säurekasein [60; 82]. Die Magermilch wird auf ca. 32 °C erwärmt und auf einen pH-Wert von 4,3 – 4,6 unter Zugabe von Mineralsäure eingestellt. Danach wird die Milch in einem Plattenerhitzer für ca. 2 min auf 40 – 45 °C erwärmt. Um vor dem Waschen so viel Molke wie möglich zu entfernen, wird die Molke/Kasein-Mixtur über einen Dekanter gefahren. Auf analoge Weise, wie bei der Herstellung von Labkasein, wird danach das Säurekasein gewaschen, getrocknet, gemahlen und gesiebt [81] (siehe Abb. 3.11).

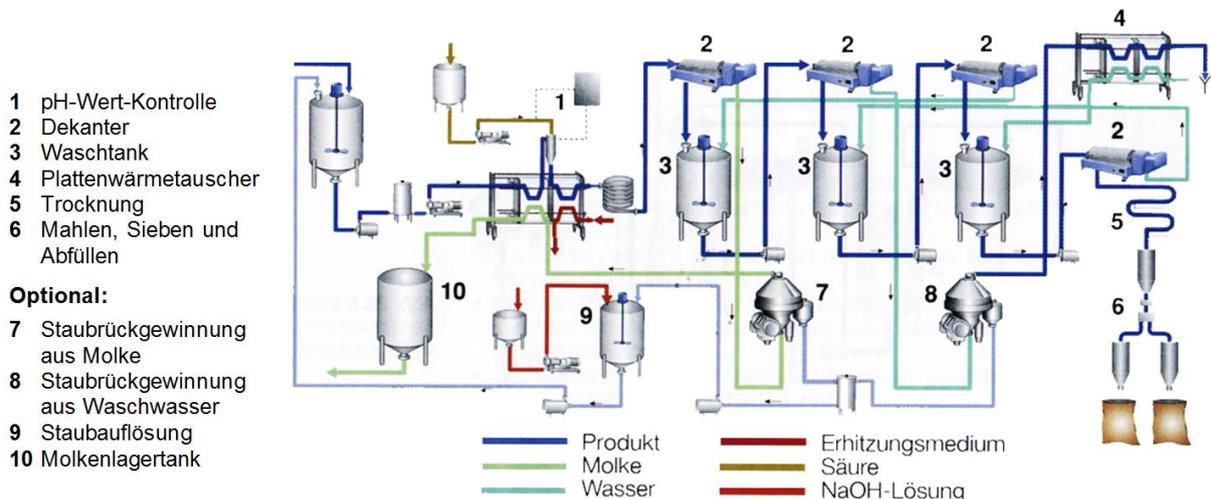


Abb. 3.11 Prozesslinie zur Herstellung von Säurekasein [81]

Säure- und Labkasein unterscheiden sich erheblich in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften [95]. Säurekasein ist nahezu calciumfrei und demzufolge nicht mit dem bei der labinduzierten Gerinnung entstehenden calciumhaltigen Parakaseinat vergleichbar [19].

3.1.3.5 Kaseinate

Kaseinate, vorzugsweise Natriumkaseinate, können aus frisch gefälltem Säurekaseinbruch oder aus trockenem Säurekasein durch die Reaktion mit verdünnten Laugen gewonnen werden. Zur

Herstellung von Natriumkaseinaten mit einem pH-Wert von 6,7 wird meistens eine 10 %ige Natronlauge in Menge von 1,7 – 2,2 % des Gewichtes der Kaseintrockenmasse eingesetzt. Die Auflösungszeit beträgt 30 – 60 min. Die Trocknung der auf 90 – 95 °C zur Reduzierung der Viskosität vorerhitzten Natriumkaseinatlösung erfolgt mittels Sprühtrockner [81].

Sowohl Natriumkaseinate als auch Säurekaseine sind durch den äußerst geringen Eigengehalt an Calcium kaum zur Gelbildung fähig und sind demzufolge nicht in der Lage, feste Strukturen aufzubauen [18]. Oft werden verschiedene Mischungen von Kaseinen und Kaseinaten bei der Herstellung von Analogkäse verwendet [21; 96].

3.1.3.6 Molkenproteine

Neben den Kaseinen enthält die Milch Molkenproteine. Sie machen in der Milch etwa 20 % des Gesamtproteinanteils aus und setzen sich hauptsächlich aus α -Lactalbumin, β -Lactoglobulin, Serumalbumin und Immunoglobulin zusammen [63; 64; 97]. Molkenproteine enthalten kein Phosphor und besitzen im Gegensatz zu den Kaseinen infolge ihres geringen Prolingehalts und der vorhandenen Disulfidbrücken eine globuläre Struktur. Aufgrund dieser Hochstrukturierung sind sie resistenter gegen Proteasen als Kaseine, jedoch hitzelabiler [19; 60; 68; 98]. Molkenproteinen beginnen ab 70 °C zu denaturieren und fallen nach Erhitzen auf 90 °C für 10 min vollständig aus [62]. Sie weisen im Vergleich zu Kaseinen und Kaseinaten ein geringeres Emulgiervermögen auf, sind jedoch unempfindlicher bezüglich Veränderungen des pH-Wertes und sind ernährungsphysiologisch wertvoller [55; 62].

3.1.3.7 UF-Retentate

Seit einigen Jahren haben durch Ultrafiltration gewonnene Retentate aus Magermilch, sogenanntes „Total Milk Protein“ (TMP), als hochwertiges Milchprotein in verschiedenen Analogkäsesorten an Bedeutung gewonnen [21]. Bis zu einem Substitutionsanteil von 40 % Labkasein durch TMP wiesen die Analogkäseproben voll zufriedenstellende organoleptische und textuelle Eigenschaften auf [92]. Die Labkaseinsubstitution durch ein Milchproteinkonzentrat (85 % Proteinanteil) führte zur Erhöhung der „Festigkeit“. Jedoch verschlechterte sich die Schmelzbarkeit [99]. Die erhöhte „Festigkeit“ ist auf die verstärkte Komplexbildung zwischen β -Lactoglobulin und κ -Kasein infolge der Thiol-Disulfidaustauschreaktion zurückzuführen [100].

3.1.3.8 Sojaprotein

In den letzten Jahren hat sich der Trend verstärkt, tierische Proteine durch pflanzliche zu ersetzen [101]. Die pflanzlichen Proteine stellen bezüglich ökonomischer Aspekte sowie der teilweise hohen biologischen Wertigkeit eine interessante Alternative zu Milchproteinen dar [10; 21].

Eine Reihe von Studien wurde unter Verwendung kostengünstiger Kaseinsubstitute wie z. B. pflanzlicher Proteine (Soja-, Reis- und Erdnussproteine und Weizengluten) durchgeführt. Der erhoffte Erfolg blieb jedoch aus [30; 102; 103; 104; 105; 106; 107; 108; 109]. Zu einigen Problemen bei Verwendung pflanzlicher Proteine mit hohen Anteilen gehören Mangel an Elastizität,

beeinträchtigt Fließverhalten und oft ein negativer Geschmack [10]. Pflanzenproteine und Kaseine unterscheiden sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrer molekularen Struktur und ihrer funktionellen Eigenschaften [18; 33]. Die pflanzlichen Proteine quellen bei Wasseraufnahme und insbesondere in Gegenwart von Schmelzsalzen stark auf. Dadurch wird die Fließfähigkeit herabgesetzt und die Möglichkeit des Anbrennens erhöht sich [18].

Das Sojaprotein ist die meist angewendete pflanzliche Proteinquelle [110]. Die Sojabohne gehört zur Gruppe der Hülsenfrüchte [69]. Diese ist aufgrund ihrer vielfältigen Verarbeitungs- und Einsatzmöglichkeiten sowie ihres Fett- und Proteingehalts (18 % Fett und 38 % Protein [111]) von großer Bedeutung [112]. In der heutigen Zeit wird die Sojabohne auf ca. 6 % der globalen landwirtschaftlichen Nutzflächen angebaut. Im Jahre 2008 lag die Produktion bei 230 Mt [113].

Etwa 80 % der Proteine aus der Sojabohne werden nach vorheriger Ölextraktion bei einem pH-Wert von 6,8 extrahiert, die aber bei einem pH-Wert von 4,5 größtenteils ausfallen. Das Sojaprotein besteht aus drei Fraktionen: Globuline (dominierend), Albumine und Gluteline [69]. Als Ausgangsmaterial für die Herstellung fast aller proteinreichen Sojaprodukte dienen nicht erhitzte, entfettete Sojaflocken (Rückstand der Sojaölgewinnung). Zu ihrer Herstellung werden konditionierte Sojabohnen Riffelwalzwerken zugeführt. Bei diesem Prozess lösen sich die Schalen der Sojabohnen von den Kotyledonen. Die Trennung des Öls von der Proteinfraction lässt sich nur aus dünnen Sojaflocken (optimal 0,20 bis 0,25 mm dick) extraktiv durchführen, weshalb die Bruchstücke der Sojabohnen Glattwalzen zugeführt werden. Anschließend werden die Flocken erwärmt, wodurch sich das Lösungsmittel verflüchtigt und unerwünschte Stoffe inaktiviert werden [114]. Zur Gewinnung von Sojaproteinkonzentraten (ca. 60 % Eiweiß) werden die entfetteten Sojaflocken mit Hilfe einer Alkohol-Wasser-Mischung extrahiert. Hierbei werden die unverträglichen Oligosaccharide entfernt. Das Sojaproteinisolat (> 90 Eiweiß) entsteht durch wässrige Extraktionen der Sojaflocken und anschließende Säureausfällung. Die löslichen Inhaltsstoffe werden durch Zentrifugation abgetrennt. Der Rückstand wird gewaschen und anschließend getrocknet [69; 112].

Sojaproteinmoleküle sind wesentlich größer als Kaseinproteinmoleküle, denn sie besitzen komplexe quartäre Strukturen und sind keine Phosphorproteine [107]. Sojaproteine werden zur Verbesserung des Emulgier- und Wasserhaltevermögens sowie zur Stabilisierung von Emulsionen in der Lebensmittelindustrie eingesetzt [115]. Die biologische Wertigkeit der Sojaproteine ist im Vergleich zum tierischen Protein von Rindfleisch gleichwertig [116], jedoch mit Mangel an schwefelhaltigen Aminosäuren [69]. Sie haben eine cholesterinsenkende Wirkung [117]. Ihr negativer Geschmack ist eines der Hauptprobleme beim Einsatz im Lebensmittelbereich.

Eine überkritische Konzentration von Sojaprotein beeinflusst die Textureigenschaften von Analogkäse negativ [107; 108]. Zur Verbesserung der funktionellen Eigenschaften wie z. B. die Löslichkeit und das Emulgiervermögen wird das Sojaproteinisolat mittels Proteasen modifiziert [118]. Nach einer Studie wurden beim Einsatz eines enzymmodifizierten SPI in Analogkäse zum einen sowohl die „Härte“ als auch die Bruchneigung herabgesetzt. Zum anderen erhöhte sich die Schmelzbarkeit, diese war jedoch geringer als die bei Milchkäse (Cheddar/Mozzarella) [107].

3.1.3.9 Wasser- und Fettbindekapazität

Die Löslichkeit von Proteinen hängt von der Anzahl polarer und apolarer Gruppen sowie deren Anordnung im Molekül ab. Allgemein sind Proteine nur in stark polaren Lösungsmitteln, wie beispielsweise Wasser löslich, wobei die Löslichkeit sowohl vom pH-Wert [119] als auch von anwesenden Salzen (z. B. NaCl oder CaCl₂) [120; 121] bestimmt wird. Unlösliche Proteine besitzen die Fähigkeit zur Quellung. Volumenvergrößerungen und andere Änderungen von physikalischen Eigenschaften treten durch die Einlagerung von Wasser in die Strukturen ein. Die Wasseraufnahme kann ein Vielfaches der Proteintrockenmasse betragen [69; 122]. Die Wasserbindekapazität (WBK) bestimmt den Grad der Wasseraufnahme und kann durch verschiedene Methoden ermittelt werden, wie beispielsweise durch die Zentrifugationsmethode oder Filtrationsmethode. Flüssige Fette können durch ähnliche Mechanismen wie bei der Wasserbindung von Proteinen aufgenommen werden. In der Regel ist die Fettbindekapazität (FBK) von Proteinen geringer als die Wasserbindekapazität. Des Weiteren benötigt dieser Prozess mehr Zeit, da die Viskosität der flüssigen Fette deutlich höher ist, als die von Wasser [119].

3.1.4 Fettcharakterisierung

Vorzugsweise erfolgt der Einsatz von Kokosöl bzw. -fett. Dieses wird aus Kopra gewonnen, welches aus dem zerkleinerten und getrockneten Nährgewebe der Kokosnuss besteht [123]. Ein weißes bis gelbliches Pflanzenfett mit wachsartiger Struktur und einem milden, frischen Geruch mit leichter Kokosnote liegt vor [124]. Es zeichnet sich durch seine hervorragende Hitze- und Lagerstabilität (bis ca. 2 Jahre) aus [125]. Charakterisiert ist das Fettsäurespektrum des Kokosfettes durch den hohen Gehalt der mittelkettigen Laurinsäure und der langkettigen Myristinsäure [123; 126] (siehe Tab. 3.3).

Tab. 3.3 Zusammensetzung des Fettsäurespektrums im Kokosfett [127]

Fettsäure	Chemische Formel	C-Anzahl: Doppelbindung-Anzahl	Anteil in %
Laurinsäure	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	12:0	51,0
Myristinsäure	CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOH	14:0	18,5
Caprylsäure	CH ₃ (CH ₂) ₆ COOH	8:0	9,5
Palmitinsäure	CH ₃ (CH ₂) ₁₄ COOH	16:0	7,5
Ölsäure	CH ₃ (CH ₂) ₇ CH=CH(CH ₂) ₇ COOH	18:1	5,0
Caprinsäure	CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH	10:0	4,5
Stearinsäure	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	18:0	3,0
Linolensäure	CH ₃ (CH ₂) ₄ CH=CHCH ₂ CH=CH(CH ₂) ₇ COOH	18:2	1,0

Die Laurinsäure, deren Anteil im Kokosfett bei ca. 50 % liegt, besitzt eine Hemmaktivität gegen Viren, Bakterien und Protozoen [128; 129]. Hinsichtlich der Atherogenität ist Kokosöl ein neutrales Fett. Somit reduziert es bei Verwendung in Lebensmittelprodukten statt tierischer Fette die

Risikofaktoren von Herzerkrankungen [130]. Durch den hohen Anteil an gesättigten Fettsäuren (etwa 90 %) ist das Kokosfett bei Raumtemperatur in festem Zustand [131]. Intensive rheologische Untersuchungen von Kokosfetten wurden durch Tipvarakarnkoon [132] durchgeführt. Anhand von Oszillationsmessungen wurde festgestellt, dass die Kristallisations- und Schmelztemperaturen im Bereich von 20 – 11 °C und 18 – 32 °C liegen [132].

Weitere Verwendung finden u. a. Kokosnuss-, Soja-, Erdnuss-, Sesam-, Palmkern-, Sonnenblumen- und Rapsöl sowie gehärtete Fette und Fettmischungen [21; 33; 133; 134]. Die funktionellen und strukturellen Eigenschaften der Käseimitate werden von der Art und Menge des eingesetzten Fetts beeinflusst [21; 33; 135; 136].

3.1.5 Schmelzsalze

Emulgier- bzw. Schmelzsalze sind bei der Produktion von Analogkäse von großer Bedeutung. Während die Einflüsse der Schmelzsalze auf die funktionellen und strukturellen Eigenschaften von Schmelzkäse intensiv untersucht und in der Literatur ausführlich dargestellt sind, liegen für die spezifische Verwendung in Käseimitaten weniger Kenntnisse vor [21; 137].

Aufgrund des Vorhandenseins der intermolekularen Calciumbindungen in Labkasein besitzt es eine begrenzte Hydrationskapazität und Wasserlöslichkeit [11; 37]. Labkasein kann nur hydratisiert werden und Fett emulgieren, wenn Calcium-Protein-Interaktionen ausreichend durch Calcium-Sequestrationssalze (Schmelzsalze) unterbrochen werden [48; 93; 133; 138; 139].

Im Allgemeinen werden als Schmelzsalze die Natriumsalze der Phosphor- und Citronensäure verwendet [133]. Mit dem Austausch der zweiwertigen Kationen (Ca^{2+}) durch einwertige (Na^+) kommt es zur Vereinzelung bzw. Peptisierung der Peptidketten des Calcium-Parakaseinats und das Natrium-Parakaseinat entsteht [18] (siehe Abb. 3.12). Dadurch werden die polaren hydrophilen und apolaren hydrophoben Segmente der Kaseine aktiviert. Durch die damit einhergehende Ladungsänderung kommt es zwischen Wasser und Proteinen zum Abbau der Grenzflächenspannung sowie zu einer stärkeren Ausbildung von Hydrathüllen an der Oberfläche der Teilchen [19]. Die Kaseine entfalten damit ihre Funktionalität als Emulgator [133; 140].

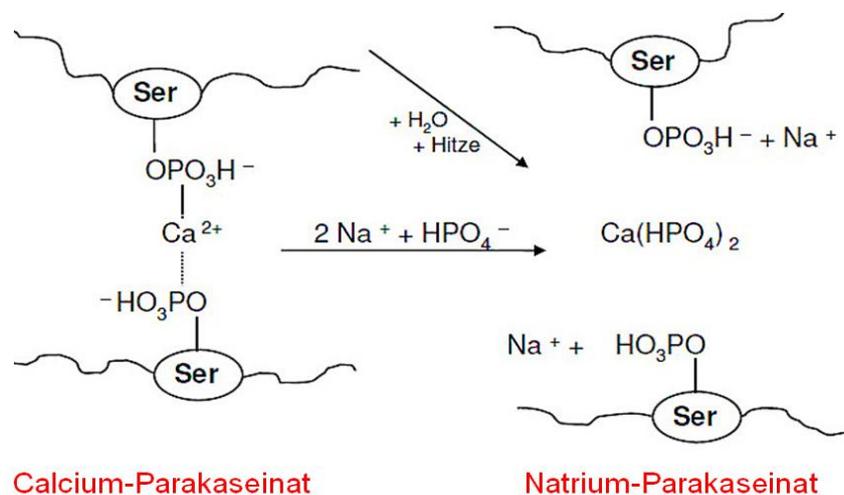


Abb. 3.12 Wirkungsweise der Schmelzsalze am Beispiel Dinatriumhydrogenphosphat [18]

Um den gewünschten Grad der Kaseinhydratation/-aggregation zu erreichen und das Fett emulgiert zu werden, wird unter Verwendung einer korrekten Mischung von Schmelzsalzen der Grad der Calcium-Sequestration und der Parakaseinaggregation kontrolliert [10]. Die hinzugebende Menge an Schmelzsalz hängt proportional vom intakten Kaseingehalt ab. Je höher der Anteil an intaktem Kasein ist, desto höher muss die Schmelzsalzmenge sein [18]. Bei dem im Analogkäse verwendeten Labkasein handelt es sich in der Regel um 100 % intaktes Kasein. Mit steigendem Schmelzsalzanteil erhöht sich die Löslichkeit der Kaseine. Typische Einsatzkonzentrationen von Schmelzsalzen liegen zwischen 0,5 und 4 % [33].

Die Funktion der Schmelzsalze ist nicht nur Calcium zu sequestrieren, sondern auch den pH-Wert zu erhöhen, was die Dispergierung und die Hydratation der Kaseine weiter fördert [11; 37]. Jedes Schmelzsalz besitzt dabei andere Eigenschaften, die das Endprodukt in seinen physikalischen und chemischen Eigenschaften beeinflussen [11; 137].

Die Schmelzsalze werden in Phosphate und Citrate klassifiziert [18; 33]. Mit Schmelzsalzen, in welchen ein monovalentes Kation, meistens Natrium, mit einem polyvalenten Anion kombiniert ist, erreicht man die optimalsten Ergebnisse. Polyvalente Anionen weisen eine höhere Wasserbindekapazität als monovalente Anionen auf. Die Puffereigenschaften der Phosphate sind von deren Kettenlänge abhängig. Aus diesem Grund haben Mono- und Diphosphate eine hohe Pufferkapazität und sind deshalb als pH-Wert-Korrektoren geeignet. Die Pufferkapazität nimmt mit steigender Kettenlänge ab [18; 27]. Die Kaliumsalze werden vorwiegend zur Reduzierung des Natriumgehalts eingesetzt [33], da die Aufnahme von überschüssigem Natrium in der Nahrung eine Beeinträchtigung für die Gesundheit ist [141; 142; 143]. Bei Zusatz in höheren Mengen verleihen die Kaliumsalze dem Produkt jedoch einen bitteren Geschmack [33]. Da die Verwendung von Citraten eine „lange“ Struktur hervorruft, sind diese nicht für die Herstellung streichfähiger Schmelzkäseprodukte geeignet. Sie werden vor allem bei der Herstellung von schnittfähigen Produkten verwendet [18]. Mono- und Dinatriumcitrate führen zu einem sauren Produkt sowie einer schwachen Textur mit Ölauslauf. Infolge dessen werden sie nicht alleine eingesetzt, sondern in Mischungen mit anderen Schmelzsalzen als pH-Korrektur [11; 33; 133].

Allgemein sind Schmelzsalze stark hygroskopisch und sollten deswegen in einer luft- und wasserdichten Verpackung gelagert werden [18].

3.1.6 Wasser, NaCl und Säuerungsmittel

3.1.6.1 Wasser

Analogkäse wird als O/W-Emulsion betrachtet [44]. Der Wassergehalt (siehe Tab. 3.1) beeinflusst als kostengünstige Komponente die funktionellen und strukturellen Eigenschaften der Käseimitate. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die Schmelzbarkeit zu, da das Fließen der Partikel durch ungebundenes Wasser erleichtert wird. Ferner nimmt die „Festigkeit“ ab [34]. Somit fungiert das Wasser als Weichmacher in der Käsematrix [144], welcher das Produkt elastischer und weniger brüchig macht [33]. Bei geringerem Wassergehalt nehmen die Wasser-Protein-Interaktionen gegenüber den Protein-Protein-Interaktionen ab. Dadurch wird die Pro-

teinhydratation reduziert. Dies führt zur Reduzierung des Plastifizierungslevels der Käsematrix und dadurch kann es zur Abnahme der Fließfähigkeit kommen [145]. Außerdem können der Schmier-effekt von Fett und die „cremige“ Textur sowie das „cremige“ Mundgefühl bei Reduzierung des Fettgehaltes mit gleichzeitiger Erhöhung des Wassergehaltes nicht beeinträchtigt werden [146].

3.1.6.2 NaCl

Die Hauptaufgabe von NaCl in Käse ist es als Konservierungsmittel zu fungieren (siehe Tab. 3.1). Dies ist auf die Reduzierung der Wasseraktivität zurückzuführen. Darüber hinaus wird durch die Chlorid-Ionen die Keimung von mikrobiellen Sporen gehemmt [147; 148; 149]. Des Weiteren trägt NaCl zum gewünschten Geschmack bei und beeinflusst die rheologischen und strukturellen Eigenschaften von Käse [150].

3.1.6.3 Säuerungsmittel

Zur Einstellung des finalen pH-Werts werden organische Säuren wie beispielsweise Zitronen-, Milch-, Phosphor- und Essigsäure verwendet. Die Säurezugabe erfolgt in der Regel gegen Ende der Analogkäseherstellung, da ein hoher pH-Wert (ca. 8 – 9) während der Verarbeitung zur Proteinkonformation, -hydratation und -löslichkeit erforderlich ist [10; 33]. Danach dient die Herabsetzung des pH-Werts auf 5,9 – 6,1 zur Sicherung besserer funktioneller Eigenschaften [33]. Dadurch steigt die Schmelzbarkeit und Ausdehnungsfähigkeit an [93]. Es wurde festgestellt, dass bei der Reduzierung des pH-Werts von 6,2 auf 5,0 die „Härte“ von Analogkäse zunimmt [151]. Bei einem pH-Wert < 5,0 nähern sich die Kaseine ihrem isoelektrischen Punkt an und werden die elektrostatischen Abstoßungen geschwächt. Dies führt zur Abnahme der Wasserbindekapazität der Kaseine und damit zur Beeinflussung der Textureigenschaften. Der Analogkäse wird extrem hart und krümelig. Bei einem pH-Wert > 6,5 wird er zu weich und mikrobiologisch bedenklich [33; 45].

3.1.7 Geschmacksverstärker bzw. -stoffe

In der Regel hat Analogkäse ohne Verwendung von Geschmacksstoffen einen milden Kaseingeschmack. Zum Erreichen einer gewünschten Geschmacksrichtung finden unterschiedliche, natürliche Geschmacksverstärker Verwendung.

Verwendet wird z. B. enzymmodifizierter Käse (EMC) oder sog. Käsearomakonzentrate, welche dem Analogkäse einen gereiften Käsegeschmack verleihen [24; 133]. EMCs werden enzymatisch aus natürlichen Käsesorten verschiedener Alters hergestellt [152]. Im Vergleich zu natürlichem Käse weisen sie eine 15 – 30fach höhere Aromaintensität auf. EMCs sind kostengünstig und als Pasten oder sprühgetrocknete Pulver sowie mit verschiedenen Geschmacksrichtungen u. a. Mozzarella, Cheddar, Feta, Gouda, Parmesan und Emmentaler vorhanden [152; 153; 154]. Die organoleptischen Eigenschaften von EMC-aromatisierten Käseimitaten werden durch deren Zusammensetzung (z. B. Fettgehalt) und pH-Wert sowie den Anteil an den geschmackaktiven Hydrolyseprodukten im EMC (wie freie Fettsäuren) beeinflusst [24].

Darüber hinaus können Butterfett und natürlicher Käse in kleinen Mengen zum Käsegeschmack beitragen [33]. Ferner können hierbei ebenfalls Holzrauch-Extrakte, Gewürze und Hefeextrakte sowie Destillate verwendet werden.

Um den Verlust von flüchtigen Aromen bei hohen Temperaturen zu minimieren, werden die Geschmacksverstärker bzw. -stoffe erst gegen Ende des Prozesses hinzugegeben [10].

3.1.8 Stärke

Als Reservekohlenhydrat ist Stärke bei Pflanzen weit verbreitet. Die Weltproduktion basiert hauptsächlich auf Mais-, Kartoffel-, Maniok-, Weizen- und Reisstärke. Sie gehört als Kohlenhydrat zur Gruppe der Polysaccharide und setzt sich aus zwei Komponenten, Amylose (20 – 30 %) als Gelbildner und Amylopektin (70 – 80 %) als Viskositätsbildner, zusammen. Amylose besteht aus D-Glucose-Einheiten mit linearen α -1,4-Verknüpfungen in helikaler Form. Amylopektin besteht ebenfalls aus D-Glucose-Einheiten, jedoch weist es neben α -1,4-Verknüpfungen auch verzweigte α -1,6-Verknüpfungen an ca. jeder 50. D-Glucose-Einheit auf. Die Struktur von Stärke ist als semikristallin charakterisiert [69; 155]. Stärke dient der Lebensmittelindustrie als Verdickungs- und Stabilisierungsmittel sowie als Gelbildner [156]. In Tab. 3.4 erfolgt eine Übersicht über typische Charakteristika verschiedener nativer Stärken.

Tab. 3.4 Typische Charakteristika verschiedener Stärkearten [155; 157]

Stärkeart	Amylose	Amylopektin	Verkleisterungstemperatur	Quellvermögen
	%	%	°C	-fach
Maisstärke	26	74	62 – 67	64
Wachsmaisstärke	1	99	63 – 72	24
Weizenstärke	25	75	52 – 64	21
Reisstärke	17	83	66 – 78	19
Kartoffelstärke	21	79	50 – 68	> 1000

Aufgrund ihrer Wasserbindefähigkeit sowie der Viskositätsverbesserung und Gelbildungsförderung nach Verkleisterung und Abkühlung kann Stärke als kostengünstiges Kaseinsubstitut in Analogkäse zum Einsatz kommen [46]. Hierzu wurde eine Reihe von Studien u. a [15; 38; 46; 106; 158; 159; 160; 161; 162; 163] über das Einsatzpotential sowohl nativer als auch modifizierter Stärke durchgeführt.

In einem komplexen System wie z. B. Analogkäse wird das Verhalten von Stärke von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören die Temperatur- und Schereinwirkung während der Verarbeitung, die Konkurrenzfähigkeit um Wasser, die Interaktionen zwischen Stärke und Proteinen sowie die Effekte auf die Käsemikrostruktur [46]. Nach Noronha et al. (2008) [160] wird die Mikrostruktur von Analogkäse je nach Stärkeart erheblich beeinflusst [160]. Der Amylosegehalt von Stärke beeinflusst die Textureigenschaften. Nach Mounsey et al. (2001) [15] nimmt die „Härte“ von Analogkäse beim Einsatz von Stärke mit höherem Amylosegehalt zu. Mit

zunehmendem Stärkeanteil kommt es zur Reduzierung der Schmelzbarkeit [15; 38]. Nach den Untersuchungen von Mounsey et al. (2001) [15] wurde die Schmelzbarkeit der Analogkäseproben mit einem Stärkeanteil von 3 % im Vergleich zur Kontrollprobe (ohne Stärke) nach folgendem Ranking reduziert: Kontrollprobe (185,6 mm) > Reisstärke (149,1 mm) > Weizenstärke (139,6 mm) > Wachsmaisstärke (117,5 mm) > Kartoffelstärke (105,8 mm) > Maisstärke (99,3 mm), wobei der Schmelzbarkeitstest nach der modifizierten Methode von Olson und Price durchgeführt wurde [38]. Dies liegt an der Wasserimmobilisierung durch die verkleisterte Stärke, wodurch es zur Dehydration der Proteinmatrix kommen kann. Dadurch nehmen hydrophoben Protein-Protein-Interaktionen zu. Als Folge dessen nimmt die Schmelzbarkeit ab [15].

3.1.9 Hydrokolloide

Bei Lebensmittelhydrokolloiden handelt es sich um makromolekulare hydrophile Biopolymere, welche als funktionelle Komponenten in der Lebensmittelindustrie zur Kontrolle und Optimierung der Mikrostruktur, der Textur und der Haltbarkeit in geringer Konzentration eingesetzt werden. Sie umfassen eine Vielfalt von Polysacchariden, welche aus Landpflanzen (z. B. Guarkernmehl, Johannisbrotkernmehl und Pektin), Algen (z. B. Carrageenan, Alginat und Agar Agar) und mikrobieller Synthese (Xanthan) gewonnen sowie durch physikalische, chemische oder enzymatische Behandlung von Stärke oder Cellulose abgeleitet werden. Darüber hinaus wird das Protein Gelatine (tierischer Herkunft) aufgrund seines polydispersen und stark hydrophilen Charakters als Vertreter dieser Polysaccharid-Gruppe angesehen [164; 165]. In Tab. 12.4 im Anhang ist eine Zusammenfassung zum Vorkommen und der Gewinnung von Hydrokolloiden.

Hydrokolloide weisen eine stabilisierende, verdickende oder gelierende Wirkung auf und können ein Vielfaches ihres eigenen Gewichts an Wasser aufnehmen. Aus diesem Grund werden sie als Stabilisator, Verdickungs-, Gelier-, Quell- oder Bindemittel verwendet [61]. Die funktionellen Eigenschaften der Lebensmittel-Biopolymere unterscheiden sich erheblich voneinander und sind von der chemischen Struktur des Polymers sowie der Empfindlichkeit gegenüber den Lösungsbedingungen (pH-Wert, Ionenstärke, spezifische Ionen) abhängig. Darüber hinaus wird die Funktionalität eines einzelnen Polymers durch Interaktionen mit anderen Lebensmittelkomponenten u. a. Proteinen, Polysacchariden, Lipiden, Zucker und Salzen beeinflusst [164]. In Tab. 12.5 im Anhang ist eine Übersicht über Anwendungsgebiete und funktionelle Wirkungen von Hydrokolloiden in Lebensmitteln gegeben.

Die Strukturstabilität sowie die Modifizierung der strukturellen und funktionellen Eigenschaften der Käseimitate können durch den Einsatz von Hydrokolloiden erfolgen (siehe Tab. 3.1) [10]. Die Kombination verschiedener Hydrokolloide kann effektiver sein als die Verwendung eines einzelnen Hydrokolloids [166]. Mischungen von Carrageenan und Gelatine wurden zur Modifikation der Textureigenschaften und des Schmelzverhaltens verwendet [105]. Mischungen von Xanthan, Johannesbrotkernmehl und Carrageenan bei einer Konzentration von 0,42 % wurden als Stabilisator in Analogkäse eingesetzt [167]. Andere Forscher verwendeten modifizierte Stärke und Gelatine als Kaseinsubstitute [21].

Die in weiterführenden Untersuchungen eingesetzten Hydrokolloide werden nachfolgend beschrieben.

3.1.9.1 Cellulosederivate

Cellulose ist die in der Natur am häufigsten vorkommende organische Substanz und bildet den Hauptbestandteil der pflanzlichen Zellwände [168]. Chemisch betrachtet ist Cellulose ein Polysaccharid, das aus D-Glucopyranoseringen aufgebaut ist, die über β -1,4- Bindungen linear miteinander verbunden sind [69] (siehe Abb. 3.13). Cellulose ist ein hydrophiles Polymer, dessen Fasern jedoch durch intra- und intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen kristalline geordneten Bereiche enthalten, welche Cellulose in Wasser unlöslich macht [169].

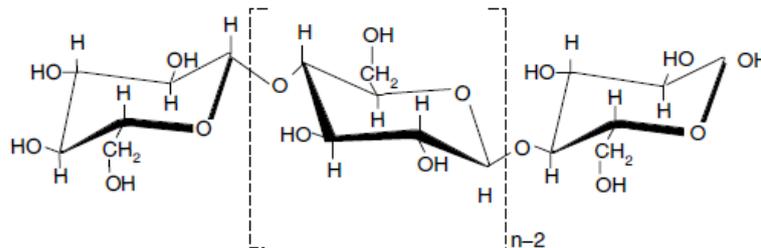


Abb. 3.13 Cellulose-Struktur [170]

Daher wird Cellulose hauptsächlich in chemisch modifizierter Form eingesetzt und bildet somit das Ausgangsmaterial für eine Reihe von Modifikationen. Hierbei werden zur Herabsetzung der Kristallinität einige Wasserstoffatome der Hydroxylgruppen der Cellulose durch andere funktionelle Gruppen substituiert [171]. Dadurch ergeben sich verschiedene, wasserlösliche Cellulosederivate u. a. Methylcellulose (MC, E 461), Hydroxypropylmethylcellulose (HPMC, E 464) und Natriumcarboxymethylcellulose, häufig genannt Carboxymethylcellulose (Na-CMC/CMC, E 466) [168; 170]. Im Wesentlichen werden diese auf ähnliche Weise hergestellt. Der Produktionsprozess kann in die Erzeugung von Alkalicellulose, die Alkylierung oder Hydroxyalkylierung und schließlich die Produktreinigung unterteilt werden [170]. Drei wesentliche Faktoren beeinflussen die Eigenschaften der modifizierten Cellulose. Diese sind die Art der Substitution und der Polymerisationsgrad sowie der Substitutionsgrad [168].

Methylcellulose (MC)

MC ist ein wasserlösliches Polymer und entsteht durch die Substitution einer bestimmten Anzahl der Hydroxylgruppen von Cellulose durch die hydrophoben Methoxygruppen mit einem durchschnittlichen Substitutionsgrad von 1,7 – 2,0 (siehe Abb. 3.14). MC ist durch seine einzigartige thermoreversible Gelbildung in wässriger Lösung beim Erhitzen bekannt [172]. Der Sol-Gel-Sol-Übergang und das Fließverhalten wurden in [173; 174; 175] intensiv untersucht. Die Temperatur des Gelpunkts (bei $\tan \delta = 1$) einer wässrigen MC-Lösung liegt bei ca. 65 °C. Die Gelbildung ist durch hydrophobe Interaktionen bedingt [173].

MC hat aufgrund seiner Unbedenklichkeit und funktionellen Eigenschaften viele Applikationen in der Lebensmittelindustrie [176] u. a. als Verdickungsmittel [177], als Stabilisator [178], Bildung

einer Wasser-Fett-Barriere [179; 180; 181] und Ausbildung viskoelastischer Eigenschaften in glutenfreiem Brot [182].

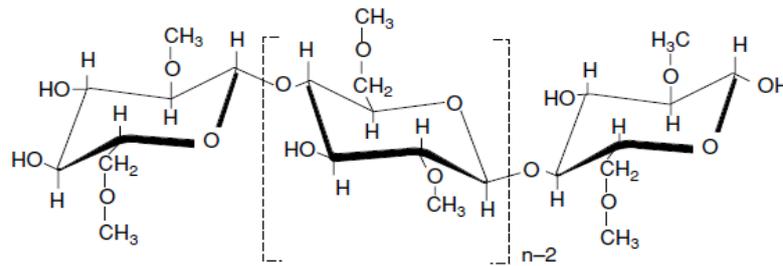


Abb. 3.14 MC-Struktur mit einem Substitutionsgrad von 2 [170]

Hydroxypropylmethylcellulose (HPMC)

Hierbei werden die Wasserstoffatome der Hydroxylgruppen teilweise durch Methyl- bzw. Hydroxypropylgruppen ersetzt. HPMC und MC besitzen sehr ähnliche Eigenschaften und Applikationen. Beide liegen in einem stabilen pH-Bereich von 3 – 11 [168; 170]. Die Temperatur des Gelpunkts (bei $\tan \delta = 1$) einer 2 %igen wässrigen HPMC-Lösung liegt bei 80 °C [174].

Carboxymethylcellulose (CMC/Na-CMC)

Die Hydroxylgruppen von Cellulose werden hierbei teilweise durch Carboxymethylgruppen mit einem Substitutionsgrad von 0,4 – 1,5 [170] ersetzt (siehe Abb. 3.15). CMC ist sowohl in warmem als auch in kaltem Wasser löslich. Die wässrigen Lösungen sind klar und farblos und haben einen neutralen Geschmack. CMC ist ein ionisches Polymer. Dies erlaubt ihm die Bildung von pH-wertabhängigen Komplexen mit löslichen Proteinen wie z. B. Kasein und Soja. Die Viskositätsentwicklung stellt die Haupteigenschaft von CMC dar [168]. CMCs werden in der Lebensmittelindustrie als Verdickungs- und Bindemittel zur Konsistenzverbesserung wie z. B. bei Gelees, Pastetenfüllungen und Schmelzkäse eingesetzt [69].

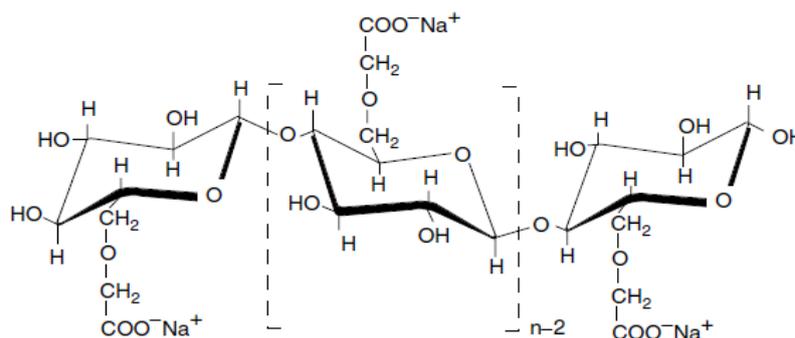


Abb. 3.15 Na-CMC-Struktur mit einem Substitutionsgrad von 1 [170]

3.1.9.2 Galaktomannane (Guarkernmehl und Johannisbrotkernmehl)

Galaktomannane sind hydrophile Biopolymere [164]. Die Hauptkette besteht aus Verknüpfungen von 1,4- β -D-Mannopyranosylresten, wobei in verschiedenen Abständen kurze Seitenketten aus jeweils 1,6- α -D-Galactopyranosylreste auftreten. Die Galactomannantypen unterscheiden

sich durch die Anzahl der Galactosen. Das Mannose-Galactose-Verhältnis von Guarkernmehl liegt bei 1,6:1 und das von Johannisbrotkernmehl bei 3,5:1 [183]. In der Lebensmittelindustrie sind sie als Verdickungs- sowie Binde- und Stabilisierungsmittel weit verbreitet [164]. Guar ist als Verdickungsmittel effektiver als Johannisbrotkernmehl. Allerdings interagiert Johannisbrotkernmehl aufgrund des geringeren Galactose-Substitutionsgrads stärker mit anderen Polysacchariden. Einige dieser Interaktionen wie beispielsweise mit Carrageenan und Xanthan führen zur Verbesserung der rheologischen Eigenschaften (Gelbildung, Begrenzung von Synärese), welche unter Verwendung von Guar nicht möglich sind [183].

3.1.9.3 Alginat

In allen Braunalgen kommen Alginat als Zellwandbestandteile vor [69]. Sie bestehen aus unverzweigten, dualen Copolymeren 1,4- β -Mannuronsäure (M) und α -L-Guluronsäurereste (G). Sie bilden einen echten Block-Copolymer bestehend aus homopolymeren Regionen von M und G, genannt M- und G-Blöcke [184; 185] (siehe Abb. 3.16).

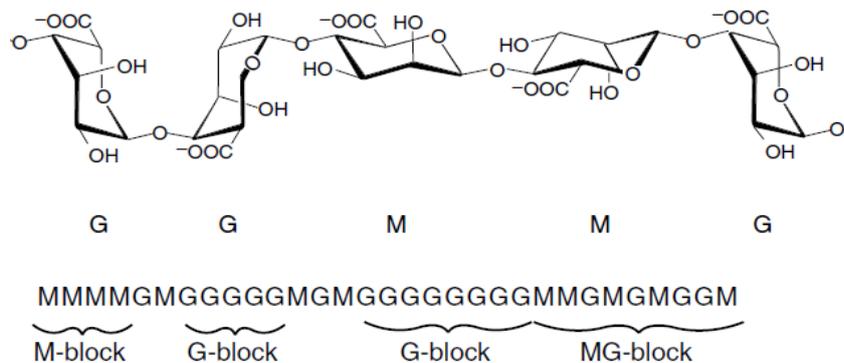


Abb. 3.16 Alginat-Struktur mit einer symbolischen Darstellung [184]

Es bilden sich Gele in Form von „Egg box-Strukturen“ aus, da die Guluronsäureblöcke eine gefaltete Bandstruktur annehmen. Die Konfiguration der Guluronblöcke ist für die Gelierung mit Calciumionen am besten geeignet [61; 184] (siehe Abb. 3.17). Alginat sind sehr wirksame Dickungsmittel, Stabilisatoren und Gelbildner [69].

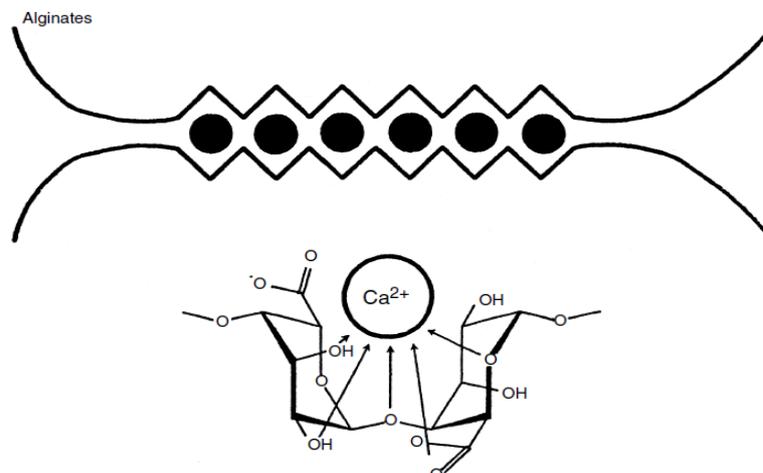


Abb. 3.17 „Egg box-Struktur“ von Alginaten mit Calciumionen [184]

3.1.9.4 Carrageenan

Carrageenan (E 407) ist ein makromolekulares, lineares Polysaccharid bestehend aus sich wiederholenden Galactoseeinheiten und 3,6-Anhydrogalactosen, wobei sie mehr oder weniger sulfatiert und durch abwechselnde α -(1,3) und β -(1,4) glycosidische Verbindungen verknüpft sind [186; 187; 188]. Nach der Anzahl und der Stellung der Sulfat-Gruppen sowie dem Vorliegen oder Fehlen einer 3,6-Anhydrogalactose unterscheidet man hauptsächlich zwischen κ -, ι - und λ -Carrageenan [187; 189]. κ -Carrageenan bildet ein festes Gel mit Kaliumionen aus. ι -Carrageenan interagiert mit Calciumionen und dadurch ergeben sich weiche, elastische Gele. Im Gegensatz dazu haben Salze keinen Einfluss auf die Eigenschaften des λ -Carrageenan-Typs. Interaktionen zwischen κ -Carrageenan und Johannisbrotkernmehl sind zu erkennen. Mit einem Mischungsverhältnis von 60:40 und 40:60 der beiden Hydrokolloide wird eine maximale Synergie festgestellt. Das ausgebildete Gel ist stark, elastisch und mit einer geringeren Synärese [187].

3.1.9.5 Xanthan

Mit Hilfe von Bakterien *Xanthomonas campestris* u. a. wird Xanthan (E 415) gewonnen. Es besteht aus einem langkettigen Polysaccharid mit einer hohen Anzahl an Trisaccharid-Seitenketten. Die Hauptkette wird aus 1,4- β -Glucopyranoseresten gebildet. Im Durchschnitt trägt jeder zweite Glucoserest in der 3-Position ein Trisaccharid. Xanthan ist gut wasserlöslich und bildet kolloidale Lösungen mit hoch strukturviskosem Fließverhalten. Es wird zur Stabilisierung von Emulsionen benutzt und aufgrund seiner Hitzestabilität als Dickungsmittel in Konserven verwendet. Es bestehen synergistische Effekte zwischen Xanthan und Galactomannanen [69; 189; 190].

3.2 Schmelzkäsetechnologie

Erfunden wurde Schmelzkäse 1911 von den beiden Schweizern Walter Gerber und Fritz Stettler. Um ein glattes, homogenes und fließbares Produkt herzustellen, haben sie Schweizer Käse mit Natriumcitrat als Schmelzsalze geschmolzen [18; 191]. Im Jahre 1916 erfuhr die Entwicklung von Schmelzkäse in den USA durch J. L. Kraft einen Aufschwung, als er natürliche Käse durch Erwärmen und Mischen, um die Haltbarkeit zu erhöhen, in Dosen konservierte. Die Entwicklung von Schmelzkäseprodukten bei Verwendung von phosphatbasierten Schmelzsalzen in den USA ist auf J. L. Kraft und die Mitarbeiter von Phenix Cheese Co., denen zahlreiche Patente für ihre Arbeit an Schmelzkäse zwischen 1916 und 1938 verliehen wurden, zurückzuführen [191].

Im Laufe der Jahrzehnte hat sich ein bedeutender Industriezweig zur Herstellung von „Prozesskäseprodukten“ entwickelt, weil sich die Marktchancen dieser Produkte ständig verbesserten. Dazu haben folgende wesentliche Aspekte beigetragen [18; 19]:

1. leichtere Standardisierung der Fertigprodukte durch Abstimmung von Rohwarenzusammenstellung und chemischer, thermischer und mechanischer Parameter,
2. leichte Förderung der heißen, flüssigen Schmelzkäsemasse im Betrieb,
3. lange Haltbarkeit aufgrund der UHT-Wärmebehandlung und Heißverpackung,

4. breites Sortiment durch verschiedenartige Rohstoffe und deren Zusammenstellung,
5. rationeller Verbrauch durch eine streichbare Konsistenz und kleinportionierte Packungen,
6. Aufwertung von Labkäsen mit Fehlern (in Schwellenländern), die die Haltbarkeit einschränken, jedoch für den menschlichen Verzehr noch tauglich sind.

Schmelzkäse entsteht infolge mehrerer aneinander gekoppelter technologischer Schritte in der Produktionslinie und besteht als komplexes Lebensmittel neben Wasser hauptsächlich aus Proteinen und Fett sowie Zusatzstoffen, wie Schmelzsalzen [192]. Diese Bestandteile sowie deren Art und chemische Zusammensetzung beeinflussen neben den prozesstechnischen Faktoren wie Temperatur, Zeit und Grad der mechanischen Bearbeitung die chemisch-physikalischen Strukturbildungsreaktionen bei der Schmelzkäseherstellung. Im Gegensatz zu natürlichem Käse kann Schmelzkäse als eine stabile O/W-Emulsion beschrieben werden [18; 45]. Die verschiedenen Schritte der Herstellungsverfahren von Schmelzkäse und Schmelzkäsezubereitungen sowie die unterschiedlichen Geräte wurden umfangreich von zahlreichen Autoren beschrieben [18; 138; 191]. Der Überblick über die Verfahrensschritte der gesamten Schmelzkäseproduktion ermöglicht die Darstellung eines Produktionsstufenschemas in Abb. 3.18.

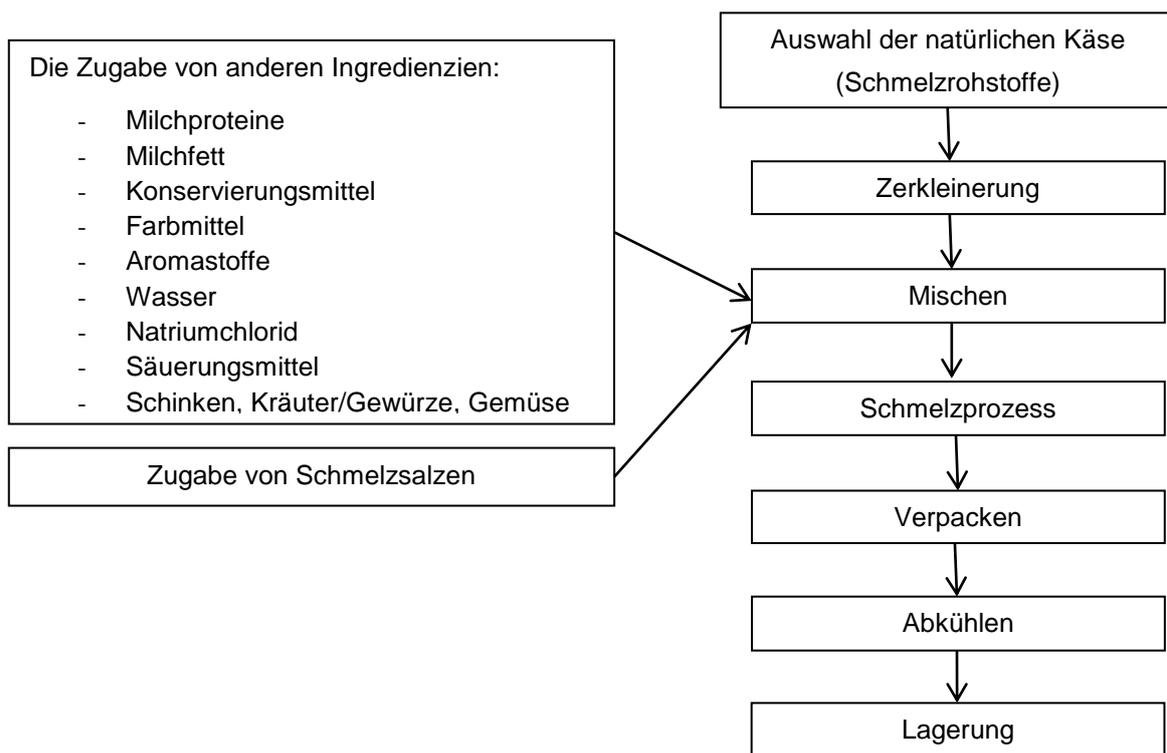


Abb. 3.18 Fließschema zur Herstellung von Schmelzkäse [191]

3.2.1 Schmelzrohstoffe

Als Ausgangsmaterial für die Schmelzkäseherstellung werden bevorzugt die Labkaseine, d. h. alle bekannten Hart- und Schnittkäse wie Cheddar und Emmentaler, ferner auch Gouda, Edamer und Tilsiter verwendet [18]. Die richtige Auswahl des natürlichen Käsetyps spielt bei der erfolgreichen Schmelzkäseherstellung eine bedeutende Rolle. Zu einer leichteren Verarbeitung und verbesserten Geschmacksbilanz werden verschiedene Käsetypen miteinander vermischt

[193]. Die wichtigsten Kriterien für die Käseauswahl sind der Typ, der Geschmack, der Reifungsgrad, die Konsistenz sowie der pH-Wert [133; 137]. Bei jungem, ungerieftem Käse sind die Kaseinmoleküle in ihrem ursprünglichen Zustand. Ihre Emulgierereigenschaften sind daher beibehalten. Während der Reifung wird das Kasein hydrolisiert und verliert dabei seine Emulgierereigenschaften [45; 194]. Der relative Kaseingehalt (Gehalt an nativem, enzymatisch nicht abgebautem Kasein) beeinflusst das Aufschmelzen des Käses und die Struktur des Endproduktes. Junger Käse mit einem relativen Kaseingehalt von 90 bis 95 % zeigt eine „lange“ Struktur und wird daher eher für Schmelzkäsescheiben und schnittfeste Portionen verwendet. Mittelreifer Käse, welcher ein intaktes Kasein zwischen 60 bis 75 % aufweist, besitzt dagegen eine verhältnismäßig „kurze“ Struktur und findet daher bei streichfähigen Erzeugnissen seine Verwendung. Ein zu alter Käse enthält sehr wenig intaktes Kasein und deshalb wird eine Eiweißgerüstbildung nach dem Schmelzprozess verhindert [18].

3.2.2 Andere Ingredienzien

Zu den wichtigsten Ingredienzien in Schmelzkäse gehören die Schmelzsalze. Die Erhitzung eines Käses ohne Schmelzsalze führt zur Trennung der drei Phasen Eiweiß (Parakaseinat), Wasser (Serum) und Fett. Zweck der Schmelzsalzverwendung ist es, den Bruch der Gelstruktur durch den Proteinaufschluss auszulösen. Dabei soll eine bessere Dispergierbarkeit der Kaseinmicellen erreicht werden. Somit werden natürliche Emulgierereigenschaften von Kaseinen zurückgewonnen. Dies geschieht genauso wie in Analogkäse durch Ionenaustausch vom an Kasein gebundenen Calcium gegen die im Schmelzsalz vorhandenen Natriumionen (siehe 3.1.5). Je nach der Schmelzkäseart (streichfähig oder schnittfest) finden unterschiedliche Schmelzsalztypen Verwendung, siehe Tab. 3.5. Die Schmelzsalzkonzentration variiert zwischen 2 und 3 % bezogen auf die Schmelzrohware und ist von dem Gehalt an intaktem Kasein abhängig [18].

Tab. 3.5 Anwendungsrichtung von Schmelzsalzen je nach der Schmelzkäseart [18]

Typen von Schmelzsalzen	Anwendung
Phosphat: Ortho-, Tri- und Polyphosphate	speziell für streichfähige Schmelzkäse
Citrat : Di- und Trinatriumcitrat	speziell für Blöcke und Scheiben

Magermilch- und Molkenpulver, Kaseinate und Butter können zur Herstellung von Schmelzkäse verwendet werden. Molken- und Molkenproteinpulver werden nur in einer beschränkten Menge hinzugegeben, da sie den Geschmack des Endproduktes negativ beeinflussen können. Als geschmackgebende Zutaten werden Kräuter/Gewürze verwendet. Zur Erzielung einer gewünschten Farbe erfolgt die Zugabe von Paprika, Curcuma oder Curry [195]. Als Konservierungsmittel finden z. B. Sorbinsäure und ihre Natriumsalze sowie Nisin (E 234) Verwendung [18; 33].

3.2.3 Schmelzprozess

Nach dem Reinigen der Oberfläche des Labkäses, dem Zerkleinern und dem Zusammenstellen der Schmelzpartien beginnt der eigentliche Schmelzprozess. Dabei wird die zerkleinerte Roh-

ware mit Wasser und gegebenenfalls anderen Zutaten durch Wärme, mechanische Bearbeitung und Wirkung der Schmelzsalze zu einer homogenen Masse nach erfolgter pH-Einstellung verarbeitet [19]. Beim Schmelzprozess finden zahlreiche chemische Umwandlungen in der Schmelzkäsemasse statt. Das Ausmaß der dabei einhergehenden strukturellen Veränderungen wird jedoch durch physikalische Prozessparameter wie Temperatur, Druck sowie mechanische Bearbeitung stark beeinflusst. Durch Zugabe von Schmelzsalzen kommt es oberhalb von 75 °C zum Ionenaustausch zwischen dem Calcium-Parakaseinat und den natriumionenhaltigen Schmelzsalzen, so dass das schlecht lösliche Calcium-Parakaseinat in Natrium-Parakaseinat umgewandelt wird. Mit der einhergehenden Peptisierung (Vereinzelung der Kaseinketten) wird das Einschleusen von Wasser zwischen den Kasein-submicellen ermöglicht. Proteine werden durch vorhandene Natriumionen besser dispergiert und gleichzeitig durch Ausbildung einer Hydrathülle hydratisiert. Die Gelstruktur bricht zusammen, die Micellen zerfallen teilweise und die Kaseine gewinnen ihren natürlichen Emulgatorcharakter zurück. Die Fettkügelchen werden emulgiert und das Wasser kann durch die hydrophilen Bereiche der Kaseine gebunden werden [18]. Hierbei steigt die Viskosität durch die Wasserimmobilisierung und die Verringerung der Fettkügelchengröße und der Heterogenität an [196; 197]. Die Reduzierung der Fettkügelchengröße ermöglicht, dass mehr Proteine an der Fett-Wasser-Grenzfläche absorbiert werden, während die Herabsetzung der Heterogenität den Einbau der Fettkügelchen in die Proteinmatrix erhöht. Dies führt zur Bildung eines stärkeren Netzwerks und festerer Konsistenz [192]. Die gezielte Auflösung der Kaseinmicellen des Rohkäses in eine neue „kurze“ Struktur wird als „Cremieren“ bezeichnet. Je stärker die originäre Struktur aufgelöst ist, desto stärker ist der Schmelzkäse cremiert [18]. Die „Cremieren“-Reaktion kann durch die Änderung des Viskositätsprofils während des Schmelzprozesses mit Hilfe einer Schermessung bei einer niedrigen, konstanten Scherrate verfolgt werden [192]. Das „Übercremieren“ (bei sehr langer Cremierungszeit) führt zu „kürzeren“ Strukturen, die nur aus kleinen Kaseinbruchstücken und dazwischen eingelagertem Fett und Wasser bestehen. Dies führt zu einer Phasentrennung (Fett-Proteine-Wasser), da die in so einem Ausmaß zerkleinerten Kaseinmoleküle nicht mehr in der Lage sind, die Fettkügelchen zu emulgieren [18].

Die progressive Veränderung der Mikrostruktur der Proteinmatrix (vermessen mittels Transmissionselektronenmikroskopie) und der scheinbaren Viskosität (vermessen mittels Bohlin CVO Rheometer bei 80 °C und einer konstanten Scherrate von 15/s) bei der Herstellung von Schmelzkäse beinhaltet nach der Prozesszeit drei Phasen (A, B und C) [192] und ist in Abb. 3.19 dargestellt. Während der ersten Prozessphase (A) werden aufgrund der Auswirkung der Schmelzsalze und der mechanischen Arbeit die Proteine, insbesondere die Kaseine, in kleine Einheiten (möglicherweise in Submicelle-Ebenen) dispergiert. Die Kalziumphosphatbrücken, welche die Kaseine zusammenhalten, werden abgebaut. Dadurch nimmt die Hydratation der Proteine zu. Die Quellung der Proteineinheiten führt zur Erhöhung des Volumens der dispergierten Phase. Es kann davon ausgegangen werden, dass die entfalteten Proteinmoleküle ineinander eindringen und die Protein-Protein-Interaktionen zunehmen. Die entwickelte Struktur durch eine solche Vernetzung der Proteinmolekülketten trägt möglicherweise zur Erhöhung der

Anfangsviskosität bei. Beim Fortschreiten des Schmelzprozesses führen die Protein-Protein-Interaktionen wahrscheinlich zur Wieder-Assoziation und zur Bildung eines Netzwerks (bei der Zeit B). Der Abfall der Viskosität bei weiterer Technologieführung über die Zeit B hinaus signalisiert den Beginn des Kollapses der Protein-Gelnetzwerk-Struktur. Hier wird die Wieder-Assoziation fortschrittlich, was zu einer großen verdichteten Proteinstruktur führt (siehe Abb. 3.19, C). Eine solche Struktur verursacht die Körnigkeit, die oft in Schmelzkäse mit langer Verarbeitungszeit („Übercremieren“) festzustellen ist. Dieser Schmelzkäse ist in der Regel trocken und spröde (unerwünschte Eigenschaften).

Je nach den erwünschten strukturellen Eigenschaften ergeben sich unterschiedliche Temperatur-Zeit-Regime [19] (siehe Tab. 12.3 im Anhang):

1. Schnittfester Schmelzkäse:
Schonendes Bearbeiten, kurze Schmelzzeit, mäßig hohe Temperaturen.
2. Streichfähiger Schmelzkäse:
Starkes Bearbeiten, längere Schmelzzeit, hohe Temperaturen.

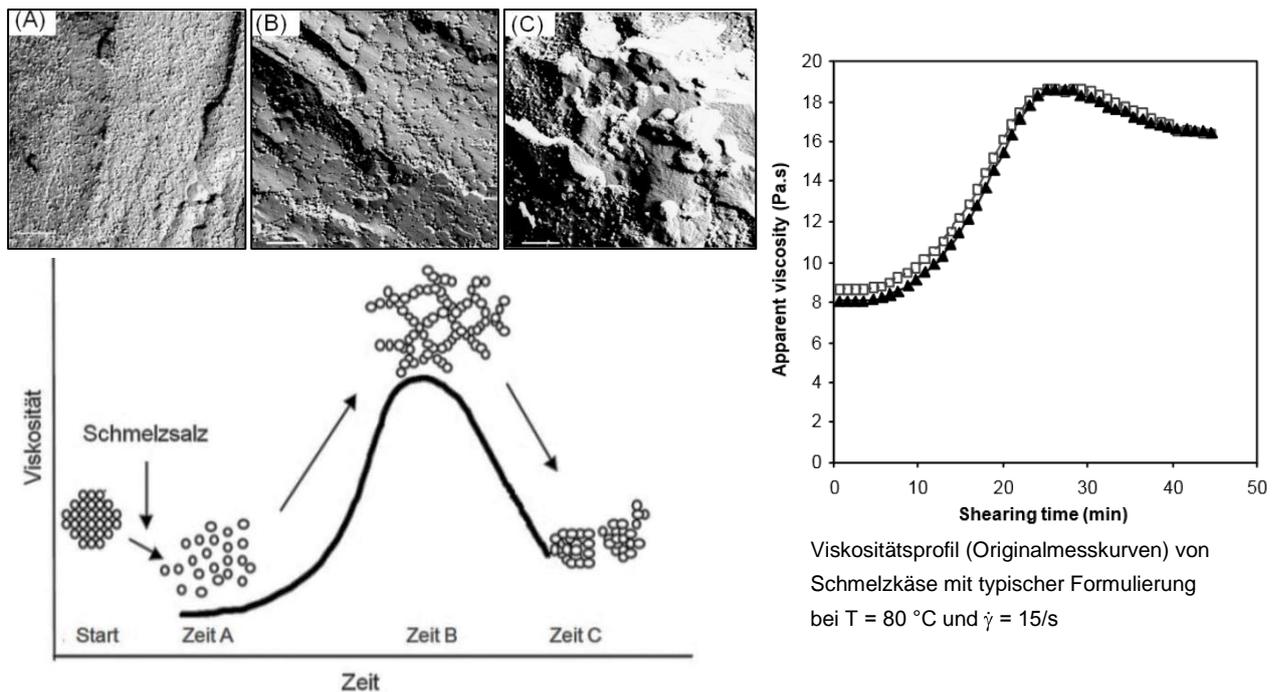


Abb. 3.19 TEM- Aufnahmen und Viskositätsprofil von Schmelzkäse bei 80 °C und einer Scherrate von 15/s [192]

Unterschiedliche Typen von Schmelzmaschinen (z. B. Blentech, Stephan oder „Rota Therm“) mit verschiedenen Designs und Betriebsbedingungen werden zur Herstellung von Schmelzkäse verwendet. Diese Schmelzmaschinen unterscheiden sich auf Basis der Herstellungsart von Schmelzkäse (Batch oder kontinuierlich), der Art von Misch- und Rührsystemen, und auf Basis der Art und des Mechanismus der Beheizung (direkt oder indirekt) [18; 138; 191].

Um ein „Übercremieren“ zu verhindern wird der Schmelzkäse unmittelbar nach der Prozessierung abgepackt und sofort abgekühlt [18].

3.2.4 Beeinflussung der Schmelzkäsestruktur

Ein guter Schmelzkäse sollte eine glatte, homogene Struktur, eine gleichmäßige Farbe und keine Gärgas-Augen haben [133; 194]. Rheologische und textuelle Eigenschaften von Schmelzkäse sind in hohem Maße von der chemischen Zusammensetzung wie z. B. die Trockenmasse, der Fettgehalt, der pH-Wert, die Reifungsgrad der Käsemischung, Art und Menge der Schmelzsalze [133; 137; 198] sowie von den Verarbeitungsbedingungen wie z. B. die Verarbeitungstemperatur und die Abkühlungsgeschwindigkeit der geschmolzenen Masse [199] beeinflusst.

3.2.4.1 Einfluss der Proteinart und -anteils

Um gezielte strukturelle Eigenschaften von Schmelzkäse zu erreichen, werden aufgrund der guten Wasserbindekapazität Molkenproteine in Form von Magermilchpulver oder Molkenpulver eingesetzt. Jedoch verleihen die Molkenproteine dem Schmelzkäse einen leicht bittermetallischen Geschmack. Durch Zugabe von Magermilchpulver im Vergleich zu Molkenpulver wird die Schmelzkäseconsistenz deutlich cremiger und der Geschmack frischer und neutraler [18]. Es wurde festgestellt, dass die Festigkeit von Schmelzkäse mit steigendem Proteingehalt aufgrund der erhöhten Protein-Protein-Wechselwirkungen zunimmt [200].

3.2.4.2 Einfluss der Fettzusammensetzung und -gehaltes

Es ist bekannt, dass durch den Milchfettzusatz die Viskosität und die Konsistenz von Schmelzkäse bei gleicher Trockenmasse beträchtlich verringert wird [18]. Nicht nur der Fettgehalt selbst, sondern auch die Fettzusammensetzung besitzt großen Einfluss auf die strukturellen Eigenschaften von Schmelzkäse. Schmelzkäseprodukte mit harter Butter (niedriger Gehalt an ungesättigten Fettsäuren/ Milchfettfraktion bei 30 °C noch fest) erweisen sich als signifikant fester als die mit weicher Butter (Milchfettfraktion bei 24 °C flüssig) [201]. Die Ursache dafür liegt in einer besseren Deformierbarkeit der Fettkügelchen mit einem hohen Anteil an Flüssigfett unter der angelegten mechanischen Belastung (siehe Abb. 3.20).

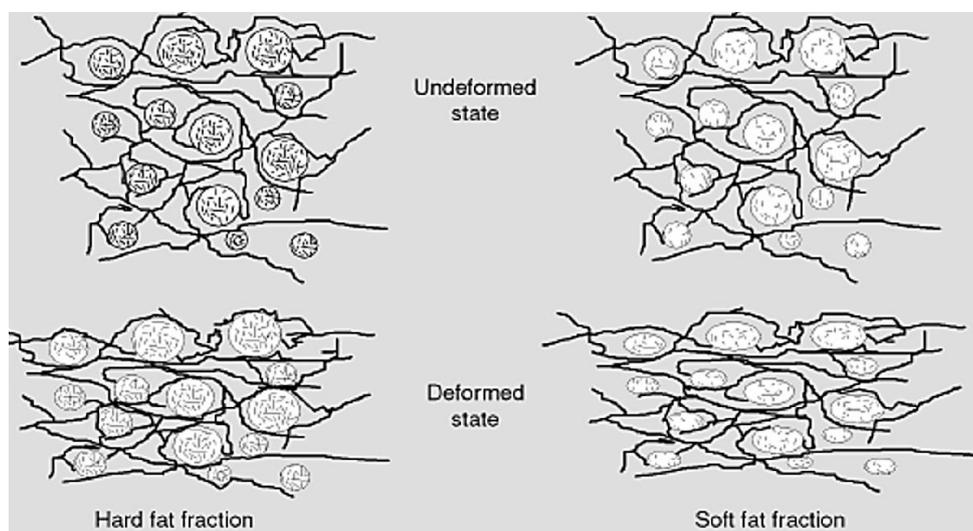


Abb. 3.20 Deformierter und undeformierter Zustand von Schmelzkäse [201]

3.3 Rheologische Grundlagen

Die Rheologie untersucht das Deformations- und Fließverhalten fluider und fester Körper unter Einwirkung mechanischer Kräfte und stellt eine Teildisziplin der Physik dar [202]. In der Regel ist das Deformationsverhalten von Lebensmitteln durch die Abweichung vom idealelastischen und idealviskosen Materialverhalten gekennzeichnet [203].

Durch die Anwendung rheologischer Messungen können Verarbeitungsprozesse simuliert und prozesstechnisch relevante Parameter quantitativ erfasst werden. Insbesondere im Lebensmittelbereich, wo die Textur und das Mundgefühl der Produkte von großer Bedeutung für die Verbraucherakzeptanz sind, hat sich die Rheologie zur Qualitätssicherung und -kontrolle sowie zur Produktionsoptimierung [204] und zur Bewertung von Lager-, Fließ- und Transportverhalten sowie zur Strukturdetektion etabliert.

3.3.1 Fließverhalten

Zur Charakterisierung des Fließverhaltens von Fluiden finden Rotations- bzw. Schermessungen Verwendung. Das Fließverhalten kann mit Hilfe des Zwei-Platten-Modells beschrieben werden (siehe Abb. 3.21), bei dem sich ein Fluid zwischen zwei parallelen Platten mit dem Abstand h befindet. Die obere Platte besitzt die Scherfläche A und wird durch eine Scherkraft F bewegt, während die untere Platte feststehend ist [205]. Auf diesem Modell basiert die Bewegung aller Fluide als sog. Couette-Strömung. Übt eine externe Kraft auf das Fluid aus, führt dies entweder zur Bewegung als Ganzes oder zur Änderung der ursprünglichen Form [206].

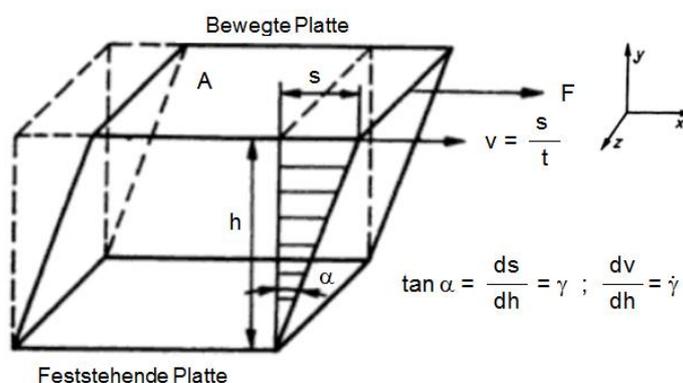


Abb. 3.21 Scherverformung eines viskosen Körpers [203]

Der Deformationswinkel α entspricht bei einer kleinen Deformation der Scherverformung (siehe Gl. 3.1). Die Scherverformungsgeschwindigkeit bzw. Scherrate $\dot{\gamma}$ ist der Quotient aus dem Geschwindigkeitsgradienten (als Folge eines angelegten Schubspannung) und der Schichthöhe (siehe Gl. 3.2). Die Schubspannung ist die tangentielle Spannungskomponente und gleich dem Quotient aus der Kraft und der Scherfläche (siehe Gl. 3.3) [207].

$$\gamma = \frac{ds}{dh} \quad \text{Gl. 3.1}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dh} = \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{in 1/s} \quad \text{Gl. 3.2}$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{in Pa} \quad \text{Gl. 3.3}$$

Viskosität η kennzeichnet die innere und äußere Reibung eines Fluids und dient als Maß für den Fließwiderstand. Bei Newtonschen Fluiden gilt Gl. 3.4 und ist definiert als der Proportionalitätskoeffizient zwischen der Schubspannung und Scherrate (Gl. 3.8). Bei nicht-Newtonschen Fluiden gilt Gl. 3.5 [205; 208].

$$\eta = \eta(c, T, p) \quad \text{in Pas} \quad \text{Gl. 3.4}$$

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, c, T, p) \quad \text{in Pas} \quad \text{Gl. 3.5}$$

Verantwortlich für das scherrateabhängige Fließverhalten eines Fluids ist eine Abnahme oder auch Zunahme der Wechselwirkungen innerhalb des Fluids aufgrund der geänderten mikroskopischen Struktur. Wenn die Viskosität bei steigender Scherrate absinkt, wird das Verhalten als strukturviskoses (scherverdünnendes) Fließverhalten bezeichnet. Die Ursache hierfür liegt in der Umstrukturierung der Moleküle oder Molekülverbände. Durch die angreifenden Kräfte richten sich die länglichen Moleküle in Strömungsrichtung aus, Tropfen können gestreckt und Agglomerate geteilt werden, wodurch diese leichter aneinander vorbeigleiten können. Nimmt die Viskosität hingegen mit steigender Scherrate zu, verhält sich das Fluid dilatant (scherverdickend). Ursächlich hierfür ist eine Strukturänderung mit veränderten Mechanismen der Wasserrimmobilisierung im Fluid, die durch Kontakt rauer, zerklüfteter Oberflächen ein Verhaken und stärkere Interaktionen der Partikel innerhalb des Fluids bewirkt. Somit wird das aneinander Vorbeigleiten der Partikel infolge trockener Coulombscher Reibung erschwert [204; 205].

Die Begriffe Thixotropie und Rheopexie beschreiben das rheodynamische scherzeitabhängige Fließverhalten. Hierbei findet bei einer konstanten Scherrate ein zeitlich verzögerter Strukturabbau oder -aufbau statt [203]. Ein thixotropes Fließverhalten liegt vor, wenn die Viskosität mit der Dauer der Scherbelastung abnimmt (zeitabhängiges verdünnendes Fließverhalten). Steigt die Viskosität an, spricht man von Rheopexie (zeitabhängiges verdickendes Fließverhalten) [209].

Die fluiddynamischen Stoffkennwerte sind mit entscheidend für die Auslegung der gesamten Prozesstechnik und die Strukturstabilität der Produkte. Das phänomenologische Fließ- und Deformationsverhalten von Stoffen kann durch rheologische Zustandsgleichungen beschrieben werden. In Tab. 3.6 sind die wichtigsten rheologischen Standardmodelle aufgeführt. In 95 % der Fälle wird für die Gruppe der strukturviskosen Flüssigkeiten der Potenzansatz von Ostwald/de Waele genutzt. Die Modelle unterscheiden sich nach der Anzahl der Parameter und dem funktionalen Zusammenhang $\tau = f(\dot{\gamma})$. Kriterien für die Modellierung des Fließverhaltens sind die einfache Handhabbarkeit des Modells (Anzahl der Parameter), die Korrelationskoeffizienten und die Standardabweichung [208].

Der Konsistenzfaktor K ist ein Maß für die innere Reibung und somit für die Viskosität und lässt Rückschlüsse auf die Konzentration von Inhaltsstoffen zu. Der Fließindex n beschreibt die Strukturstabilität und ermöglicht eine Differenzierung des Strukturverhaltens. Für $n = 1$ liegt ein Newtonsches Fließverhalten vor. Werte von $n < 1$ kennzeichnen ein strukturviskoses Fließver-

halten. Auf ein dilatantes Verhalten kann bei $n > 1$ geschlossen werden [208]. Die Fließgrenze τ_0 entspricht der erforderlichen Mindestschubspannung zum Einleiten des Fließvorgangs durch Aufbrechen der permanenten Struktur, die dem System Plastizität verleiht [203]. Sie als Indikator aller strukturierenden Elemente im Produkt charakterisiert die Partikelgrößen. Bei $\tau < \tau_0$ liegt ein elastisches Verhalten (Festkörperstruktur) vor. Bei $\tau = \tau_0$ ist der Übergang vom Festkörper zum Fließverhalten. Für $\tau > \tau_0$ tritt plastisches Fließen ein [208].

Tab. 3.6 Rheologische Standardmodelle [208]

Modell	Zustandsgleichung		effektive Viskosität		Anzahl der Modellparameter
	$\tau = f(\dot{\gamma})$ in Pa	Gl. 3.6	$\eta_{\text{eff}} = f(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ in Pas	Gl. 3.7	
Newton	$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^1$	Gl. 3.8	$\eta_{\text{dyn}} \neq f(\dot{\gamma})$		1 linear-viskose
Ostwald/ de Waele	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$	Gl. 3.9	$\eta_{\text{eff}} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	Gl. 3.10	2 nichtlinear-viskose
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{BH}} \cdot \dot{\gamma}$	Gl. 3.11	$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_{\text{BH}}$	Gl. 3.12	2 linear-plastisch
Casson	$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_{\text{CA}} \cdot \dot{\gamma}}$	Gl. 3.13	$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + \eta_{\text{CA}} + 2 \cdot \sqrt{\tau_0 \cdot \eta_{\text{CA}} / \dot{\gamma}}$	Gl. 3.14	2 nichtlinear-plastisch
Herschel- Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$	Gl. 3.15	$\eta_{\text{eff}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$	Gl. 3.16	3 nichtlinear-plastisch

3.3.2 Oszillationsmessungen

Das viskoelastische Verhalten komplexer Lebensmittelsysteme kann mit Hilfe von Oszillationsmessungen bei kleinen Amplituden als Deformationsvorgabe ermittelt werden. Die Oszillationsmessungen stellen eine zerstörungsfreie materialwissenschaftliche Untersuchung dar. Die native Struktur der untersuchten Probe kann detektiert werden. Die Ergebnisse sind eindeutig abhängig von der Formulierung und Prozessierung sowie der physikalischen Struktur, so dass sie sich für ein breites Spektrum von Applikationen eignen, wie beispielsweise Auswertung von Gelstärke, Beobachtung der Stärkeverkleisterung, Untersuchung der Glasübergangsphänomen, Beobachtung der Eiweißkoagulation oder -denaturierung, Auswertung des Schmelzverhalten von Käse, Texturentwicklung in Backwaren und Fleischprodukten und Haltbarkeitstest [209].

Die Messsubstanz wird einem sinusförmigen oszillierenden Stress ausgesetzt. Die Phasenverschiebung zwischen dem oszillierenden Stress und der Deformation wird erfasst [207; 205]. Der Phasenverschiebungswinkel δ (siehe Abb. 3.22) wird als Verlustwinkel bezeichnet und liegt zwischen 0° und -90° . Wenn $\delta = 0^\circ$ ist, liegt ein idealelastisches Verhalten vor. Bei $\delta = -90^\circ$ ist ein idealviskoses Verhalten vorhanden. Bei $0^\circ < \delta < -90^\circ$ verhält sich das System viskoelastisch [202].

Das Messergebnis bei einer γ -Regelung nach Abb. 3.22 ist eine τ -Kurve als phasenverschobene Sinusfunktion [205]:

$$\tau(t) = \tau_0 \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad \text{in Pa}$$

$$\text{Gl. 3.17}$$

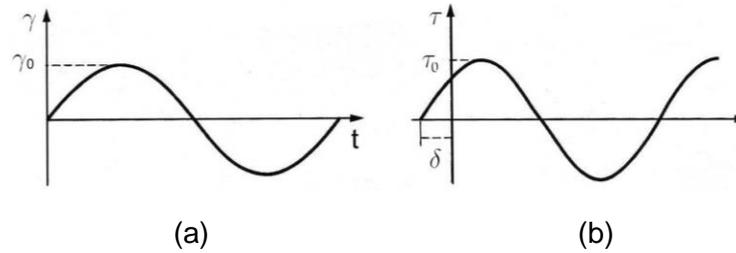


Abb. 3.22 Vorgegebene γ -Regelung (a) und resultierende τ -Kurve mit δ (b) [205]

Bei einer Deformation innerhalb des linear viskoelastischen Bereichs (LVB) kann der resultierende Stress τ_0 in Form von einem Speichermodul G' (Gl. 3.18), einem Verlustmodul G'' (Gl. 3.19) und einem Verlustfaktor $\tan \delta$ (Gl. 3.20) angegeben werden [207].

$$G' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot \cos \delta \quad \text{in Pa} \quad \text{Gl. 3.18}$$

$$G'' = \frac{\tau_0}{\gamma_0} \cdot \sin \delta \quad \text{in Pa} \quad \text{Gl. 3.19}$$

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad \text{Gl. 3.20}$$

Der Speichermodul G' ist ein Maß für die gespeicherte Deformationsenergie in der Messsubstanz, die nach Entlastung wieder zur Verfügung steht und zu einem Ausgleich der Deformation führt. G' beschreibt demnach die elastische Komponente eines Materials. Der Verlustmodul G'' hingegen ist ein Maß für die verlorene Deformationsenergie durch Dissipation und damit wird die viskose Komponente eines Materials beschrieben. Der Verlustfaktor als Quotient aus dem Verlust- und Speichermodul beschreibt die viskoelastische Relation. Wenn $\tan \delta > 1$ ist, dominiert ein Flüssigkeitsverhalten. Bei $\tan \delta < 1$ liegen dominierende Festkörpereigenschaften vor. Ein Gelpunkt bzw. Sol-Gel-Übergangspunkt bildet sich bei $\tan \delta = 1$ aus [205; 207].

Durch die Oszillationsmessungen können nützliche rheologische Eigenschaften von viskoelastischen Lebensmitteln ermittelt und wie folgt beschrieben werden [205]:

1. **Amplitudensweepmessung:** Hierbei wird die Deformationsamplitude variiert und die Frequenz sowie die Temperatur konstant gehalten. Diese Messung dient in erster Linie zur Ermittlung des linear viskoelastischen Bereichs (siehe Abb. 3.23), in dem das Material keine strukturellen Veränderungen erfährt.

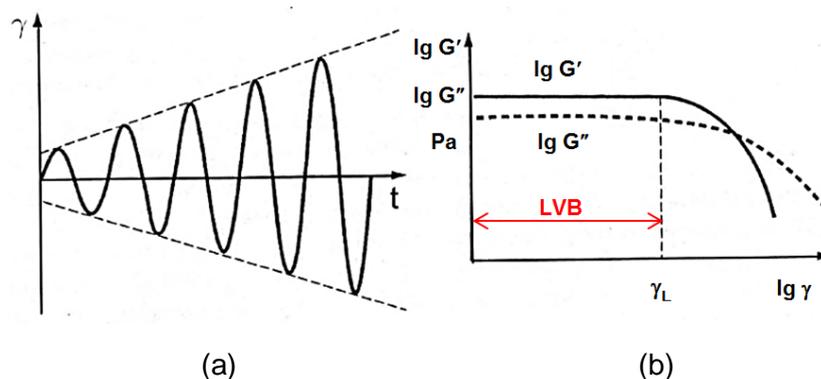


Abb. 3.23 Vorgabe der Amplitude (a); $G'(\gamma)$ und $G''(\gamma)$ als Messantwort (b) [205]

2. **Frequenzweepmessung:** Hierbei wird die Frequenz bei konstanter Amplitude (im LVB) und Temperatur verändert. Dies dient vor allem der Aufklärung der Struktur. Verlaufen $G'(f)$ und $G''(f)$ bei doppellogarithmischer Auftragung als parallele Geraden mit einem Anstieg, liegt eine Dispersionsstruktur vor. Der $G'(f)$ - und $G''(f)$ -Verlauf als Plateau deutet auf eine Gelstruktur im Gummielastischer Bereich auf [210].
3. **Temperatursweepmessung:** Hierbei wird die Temperatur bei konstanter Amplitude (im LVB) und Frequenz variiert. Mit Hilfe dieser Messung können temperaturabhängige Strukturumwandlungen, wie zum Beispiel der Sol-Gel-Übergang, die Kristallisationen, die Verkleisterungen und das Schmelzverhalten erkannt werden [210].

3.3.3 Textureigenschaften

Die Textur der Lebensmittel beinhaltet nach der internationalen Organisation für Normung (ISO) alle mechanischen, geometrischen, Oberflächen- und Körperattribute eines Produkts, die durch kinästhetische, taktilen, ggf. visuellen und auditiven Rezeptoren wahrnehmbar sind [211]. Die Textureigenschaften sind abhängig von der Zusammensetzung und der Mikrostruktur sowie dem physikalisch-chemischen Zustand der Komponenten und den Interaktionen zwischen den Strukturelementen [11; 212]. Materialprüfmaschinen finden bei der objektiven Charakterisierung der Textur von Lebensmittelprodukten Verwendung. Mit Hilfe der instrumentellen Textur-Profil-Analyse (TPA) soll den Kauvorgang durch mehrfache zyklische Belastung der Probe simuliert und Aussagen über die Textureigenschaften wie beispielsweise Festigkeit, Adhäsion und Kohäsion geliefert werden [209; 204; 213; 214]. Über die Aufnahme von Kraft-Weg-Diagrammen bei der Parallelplattendeformation können fundamentale mechanische Eigenschaften des untersuchten Materials vermessen werden. Beim Prüfversuch wird eine zylindrische Probe (Prüfkörper) durch einen Stempel uniaxial komprimiert (siehe Abb. 3.24) und dadurch vollständig in Gestalt und Volumen deformiert. Bei Überschreiten der Bruchgrenze zeigen sich an der freien Oberfläche Verformungen und Risse [215].

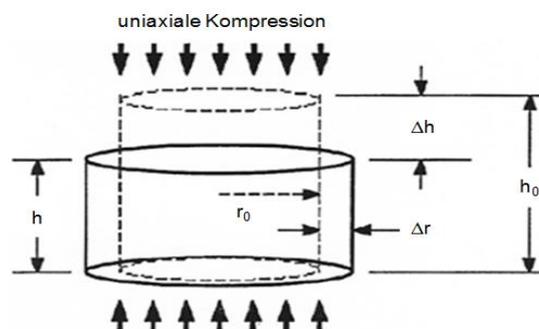


Abb. 3.24 Uniaxiale Kompressionsverformung, HENCKY-Deformation [215]

Nach dem HOOKE'schen Gesetz ist für ein idealelastisches Material die Spannung proportional zur Dehnung [216]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{F}{A} \quad \text{in Pa}$$

Gl. 3.21

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h_0 - h}{h_0} \quad \text{Gl. 3.22}$$

Der Modul E wird hierbei als YOUNG'scher Modul bzw. Elastizitätsmodul bezeichnet. Bei einer starken Verformung ist die wahre Dehnung nach Hencky zu berechnen [217; 218]:

$$\varepsilon_H = - \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} = - \ln \left(\frac{h}{h_0} \right) = - \ln (1 - \varepsilon) \quad \text{Gl. 3.23}$$

Die Veränderung der Formulierung von Analogkäse beeinflusst das funktionelle Verhalten sowie die Textureigenschaften in praktischen Applikationen wie z. B. in Pizzabelägen. Hierbei ist die „Härte“ bzw. die „Festigkeit“ für die Zerkleinerungsprozesse (Schreddern, Scheiben schneiden und Würfeln) von großer Bedeutung [34].

3.4 Aufschmelzverhalten

Käse mit schlechter Schmelzbarkeit ist zäh und kaum dehnbar, während ein Übercremieren zu einem suppenartigen Aussehen führt. Beide werden als nicht akzeptabel erachtet [219]. Die funktionellen Eigenschaften von Käse werden durch die chemische Zusammensetzung einschließlich des Wassergehalts bestimmt [220; 221]. Demzufolge hat die Veränderung der Formulierung von Analogkäse Auswirkungen auf sein funktionelles Verhalten in praktischen Applikationen wie beispielsweise in Pizzabelägen und Lasagne. Die Schmelzbarkeit gilt dabei als wichtiges Applikations- und Qualitätskriterium [15; 34; 222; 223; 224; 225]. Die empirischen Methoden, die am häufigsten zur Auswertung der Schmelzbarkeit von Käse (z. B. Mozzarella und Schmelzkäse) angewandt werden, finden beim Analogkäse ebenfalls Verwendung [38; 219]. Dazu zählen die Methoden nach Schreiber [226], Olsen und Price [227] sowie Arnott [228]. Die empirischen Schmelzbarkeitstests unterscheiden sich in Bezug auf die Probengeometrie, die Aufwärmbedingungen und die Vorrichtungen sowie die Ermittlung der Abmessungsveränderung. Dies erschwert den Vergleich der Ergebnisse verschiedener Studien. Die Simplizität und die Schnelligkeit der empirischen Schmelzbarkeitstests sind jedoch vorteilhaft für die Qualitätssicherung in der Industrie. Die Methoden von Schreiber und Arnott bewerten die Abmessungsänderungen einer zylindrischen Käseprobe bei hohen Temperaturen. Während bei der Methode nach Olson und Preis die in einem Glasrohr bei 110 °C für 6 min entstandene Fließstrecke einer zylindrischen Käseprobe vermessen und als Index für die Schmelzbarkeit genutzt wird. Mounsey und O'Riordan modifizierten die Methode nach Olson und Preis, sodass eine Erhöhung der Erhitzungstemperatur auf 180 °C sowie der Testzeit auf 15 min durchgeführt wird. Diese Hitzebehandlung ist typisch für die Vorbereitungsverfahren von Convenience Food mit Analogkäse wie beispielsweise bei Pizza [38].

3.5 Partikelgrößenverteilung

Bei der Entwicklung von Formulierungen und Verfahren sowie bei der Kontrolle von Rohstoffen und Prozessen in der Lebensmittelindustrie spielt die Charakterisierung von Partikeln eine wichtige Rolle. Wichtige Unterscheidungsmerkmale in der mechanischen Verfahrenstechnik sind vor

allem die Größe der Partikel sowie deren Verteilung, die spezifische Oberfläche, die Porosität, Benetzbarkeit und das Fließverhalten. Dadurch werden die Benetzbarkeit, die Agglomeration, das Mischverhalten, Wandhaftungen, die Reaktivität und die Löslichkeit beeinflusst. Zudem verändert sich das Streuvermögen für Licht. Im Allgemeinen weichen die Partikel von der idealen Form einer Kugel ab und werden aus diesem Grund durch die Bestimmung eines Äquivalentdurchmessers (geometrisch oder physikalisch) analysiert. Allgemein umfasst die Partikelmesstechnik die Größen- und Formanalyse einzelner Partikel sowie die Bestimmung der Größenverteilung von Partikelkollektiven. Zu den verschiedenen Techniken gehören das Siebverfahren, das Sedimentationsverfahren, das optische Verfahren und das Zählverfahren [229].

3.6 Kapitelzusammenfassung

Als Literaturrecherche wurden die Analog- und Schmelzkäsetechnologien sowie die Ingredienzen mit ihren funktionellen Eigenschaften umfassend beschrieben. Käseimitate besitzen verschiedene Vorteile (Ökonomie, Vielfalt, Lagerstabilität und Ernährungsflexibilität). Labkasein ist aufgrund seines ambivalenten Charakters die wichtigste Ingredienz bei der Herstellung von Analogkäse. Dagegen sind Untersuchungen zur Strukturausbildung in Analog- und Schmelzkäse bei variablem Ingredienzeinsatz und Technologieführung nicht bekannt und mehr von technologischen Aspekten her untersucht worden. Moderne Oszillationsmessungen ermöglichen neben Scher- und Texturmessungen Untersuchungen zu den Mechanismen der Strukturausbildung und dadurch die Aufklärung des Einflusses verschiedener Parameter bei der Herstellung sowohl von Analog- als auch Schmelzkäse. Dieses Wissen kann zur Produktionsoptimierung und Qualitätssicherung gezielt genutzt werden.

Auch wurde bei den recherchierten Quellen nicht die geschlossene Kausalkette Formulierung, Technologieführung, Substitutionspotential, resultierende Texturkennwerte, Applikationsverhalten untersucht.

Durch die nachfolgende Arbeit sollen die Themenkreise miteinander verknüpft und komplex bewertet werden.

4 Material und Methoden

4.1 Material

4.1.1 Material zur Präparation der Analogkäseproben

Die verwendeten Materialien bei der Analogkäsepräparation sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt.

Tab. 4.1 Materialien zur Präparation der Schmelzkäseproben

Produkt	Hersteller
Labkasein (90 mesh)	Lactoprot Deutschland GmbH, Kaltenkirchen
Säurekasein	Lactoprot Deutschland GmbH, Kaltenkirchen
micellares Kasein (MCC80)	Sachsenmilch Leppersdorf GmbH, Deutschland
Sojaproteinisolat	DENA GmbH, Bonn, Deutschland
Schmelzsatz JOHA [®] S9	BK Giulini GmbH, Ladenburg, Deutschland
NaCl	Merck KGaA, Deutschland
Weizenstärke	Unilever, Hamburg, Deutschland
Weizenstärke	Kröner, Ibbenbüren, Deutschland
Maisstärke	Unilever, Hamburg, Deutschland
Kartoffelstärke	Müller`s Mühle GmbH, Gelsenkirchen-Schalke
Hydriertes Kokosfett aus Palmin	Peter Kölln KGaA, Elmshorn, Deutschland
Citronensäure	Carl Roth GmbH & Co. KG, Karlsruhe
Guarkernmehl (E 412)	Hajnal Rohstoffe GmbH & Co. KG, Düsseldorf
Johannisbrotkernmehl (E 410)	Loryma GmbH, Deutschland
κ-Carrageenan (E 407)	Sanofi Bio-Industries Ltd.
Natriumalginat (E 401)	Fluka Chemie GmbH
Xanthan (E 415)	Hajnal Rohstoffe GmbH & Co. KG, Düsseldorf
Methylcellulose A40M (E 461)	The Dow Chemical Company
Natrium-Carboxymethylcellulose 20000 PA (E 466)	Wolff Cellulosics GmbH & Co. KG, Bomlitz
Hydroxypropylmethylcellulose K100M (E 464)	The Dow Chemical Company

Nach der Hersteller-Spezifikation besitzt das eingesetzte Schmelzsatz JOHA[®] S9 folgende Charakteristika [230]:

- Deklaration: E 452 Natriumpolyphosphat; E 339 Natriumorthophosphat
- Spezifikation: P₂O₅-Gehalt (%): 59,7 ± 1,0; pH-Wert (1 %): 9,0 ± 0,3
- Spezielle Eigenschaften: pH-Verschiebung: + 0,1 / + 0,3;
Ionenaustauschvermögen: mittelstark; Cremierung: schwach

In Tab. 4.2 sind die chemischen Zusammensetzungen aller eingesetzten Proteinpulver und deren pH-Wert nach Angaben der Hersteller-Spezifikationen aufgelistet.

Tab. 4.2 Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Proteinpulver, Angaben in %

	Labkasein [231]	micellares Kasein [232]	Säurekasein [233]	Sojaproteinisolat [234]
Protein	82,3	80,12 (davon 10 % WP)	89,2	> 90
Wasser	8,9	4,14	8,0	< 6
Asche	8,2	7,67	2,2	< 5
Fett	0,7	1,70	0,7	–
Laktose	–	5,74	–	–
pH-Wert	6,7	6,72	4,8	7,2

4.1.2 Material zur Präparation der Schmelzkäseproben

Tab. 4.3 gibt eine Übersicht der verwendeten Rohstoffe bei der Präparation der Schmelzkäseproben an.

Tab. 4.3 Rohstoffe zur Präparation der Schmelzkäseproben

Produkt	Handelskette	Hersteller
Gouda (48 % FiT)	Edeka	DE/SN 009/EG (Heinrichstaler Milchwerke GmbH, Radeberg); 2 Monate vor MHD
Magerquark (< 0,2 % FiT)	Edeka	DE/NI 069/EG (Molkerei Neuhaus der Milchwerke Hagenow GmbH, Neuhaus)
Butter (82 % FiT)	Edeka	DE/SN 016/EG (Molkerei Müller GmbH & Co. - Sachsenmilch AG, Leppersdorf)
Schmelzsatz JOHA [®] S9	–	BK Giulini GmbH, Ladenburg, Deutschland

4.2 Messmethoden

4.2.1 Partikelgrößenanalytik

Die Partikelgrößenverteilung aller verwendeten Proteinpulver erfolgte mittels Doppelbestimmungen im Laser-Streulichtspektrometer (HORIBA LA-950, Retsch Technology GmbH, Haan, Deutschland), welcher auf der Grundlage der statischen Laserlichtstreuung (gemäß DIN/ISO 133320) arbeitet. Das Messgerät verfügt über einen Messbereich von 0,01 µm bis 3000 µm. Die spezielle Anordnung des segmentierten Vorwärtsdetektors und der Seit- und Rückwärtsdetektoren, gekoppelt mit zwei Lichtquellen (blaue LED-Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 405 nm für feinste Partikel und Laserdiode mit 650 nm für große Partikel) und 87 Detektoren (siehe Abb. 4.1) ermöglicht die Vermessung der gesamten Partikelgrößenverteilung. Bei der Wechselwirkung von Laserlicht mit Partikeln werden charakteristische Streulichtverteilungen erzeugt. Diese sind abhängig von der Partikelgrößen, ihren optischen Eigenschaften und der Wellenlän-

ge des Lichtes. Die Auswertung findet anhand der Mie-Theorie (bei kleinen Partikeln) oder der Fraunhofer-Beugung-Theorie (bei großen Partikeln) statt [235].

Zur Messung der Partikelgrößen der Protein Pulver wurden der Trockenmessmodul im Druckluftbetrieb von 0,2 MPa sowie die Fraunhofer-Näherung verwendet. Durch eine computergestützte Datenverarbeitung (HORIBA NextGen Project Software für Windows, Ltd., Japan) erfolgte eine statistische Analyse der Partikelgrößenverteilung. Erfasst wurden d_{10} , d_{50} , d_{90} , der Modalwert, der volumengewichtete mittlere Durchmesser (Mean-Wert, Volumen bezogen) $d_{4,3}$, und die spezifische Oberfläche.

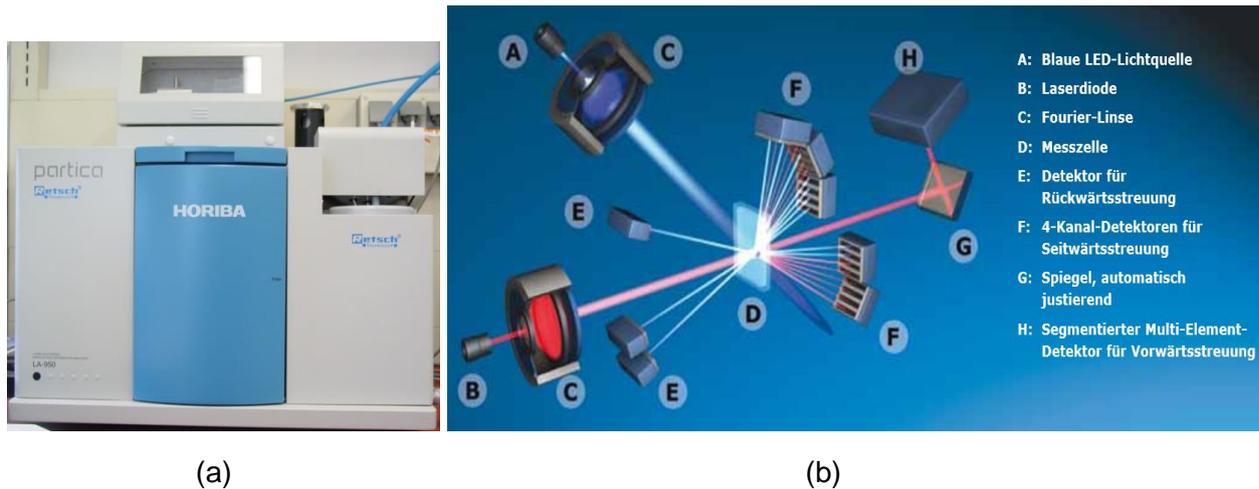


Abb. 4.1 Partikelanalysator HORIBA LA-950 (a) und schematische Lichtstreuung (b)

4.2.2 Bestimmung der Wasserbindekapazität

Die Wasserbindekapazitäten der eingesetzten Proteinpulver wurden mittels Dreifachbestimmungen nach der Zentrifugationsmethode [236] mit einer leichten Modifizierung ermittelt.

Hierbei wurde 0,5 g der Proteinprobe in einem 25 ml-Zentrifugen-Glasröhrchen eingewogen. Dann folgten die Zugabe von 10 ml Wasser und das Rühren für 1 min bei 1400 U/min mit Hilfe von einem Vortex-Mixer (Stuart SA8, Bibby Sterilin Ltd., Stone, Staffordshire, UK). Danach wurden die Wände des Probengefäßes mit 2,5 ml Wasser abgespült. Anschließend wurden die Probengefäße mit Hilfe einer Zentrifuge (Sigma 6K10, Sigma Laborzentrifugen GmbH, Osterode am Harz, Deutschland) bei $4300 \times g$ und $20 \text{ }^\circ\text{C}$ für 20 min zentrifugiert und danach auf Wattepads (Zellstoff) gestürzt und 10 min ablaufen gelassen (bei sehr weichen Proben zur Vermeidung des Auslaufens den Winkel auf ca. 30° reduziert). Zum Schluss folgte das Abwiegen.

Die Berechnungsgleichung der WBK lautet wie folgt:

$$\text{WBK} = \frac{(m_2 - m_0) - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Gl. 4.1}$$

4.2.3 Bestimmung der Fettbindekapazität

Analog zur Ermittlung der Wasserbindekapazität wurde mittels Dreifachbestimmungen die Fettbindekapazität der Proteinpulver bei Raumtemperatur ermittelt [236]. 1 g der Proteinprobe wur-

de in einem 25 ml-Zentrifugen-Glasröhrchen eingewogen und 5 ml Sonnenblumenöl dazu gegeben. Unter Verwendung des Vortex-Mixers wurden die Probengefäße für 1 min bei 1400 U/min gerührt und anschließend 5 min stehen gelassen. Der letzte Schritt (Rühren und Stehen lassen) wurde einmal wiederholt. Danach wurden die Probengefäße bei 20 °C und $4300 \times g$ für 20 min zentrifugiert. Der Ölüberstand wurde dann vorsichtig dekantiert und nach dem Stürzen der Probengefäße auf Wattepad 10 min ablaufen gelassen. Die FBK wurde nach Gl. 4.1 berechnet.

4.2.4 Bestimmung des pH-Wertes

Zur pH-Wert-Einstellung bei der Präparation der Analogkäseproben wurde eine Einstichelektrode (Schott Instruments Blue Line 18, Messaufnehmer: pH Schott Instruments, Lab 860, Mainz, Deutschland) verwendet.

4.2.5 Bestimmung des Trockensubstanzgehalt

Der Trockensubstanzgehalt wurde gravimetrisch anhand der Seesandmethode bei 102 °C bis zur Massenkonstanz bestimmt [237]. Die Bestimmung der Trockensubstanz des Gouda und Quarks zur Berechnung der gewünschten Trockensubstanz der Schmelzkäseproben erfolgte über eine Dreifachbestimmung.

4.2.6 Rheologische Untersuchungen

Die rheologischen Untersuchungen wurden mit Hilfe der Luftlagerreometer UDS 200 und MCR 301 (Physica®, Anton Paar GmbH, Graz, Österreich) mit den Zylindermesssystemen Z3 DIN und CC27/P1 (siehe Abb. 4.2) durchgeführt. Zur präzisen Temperaturregelung sind beide Rheometer mit einer Peltier-Temperatureinrichtung versehen. Die Auswertung sowie die grafische Darstellung der Messergebnisse erfolgten durch die Software RheoPlus.

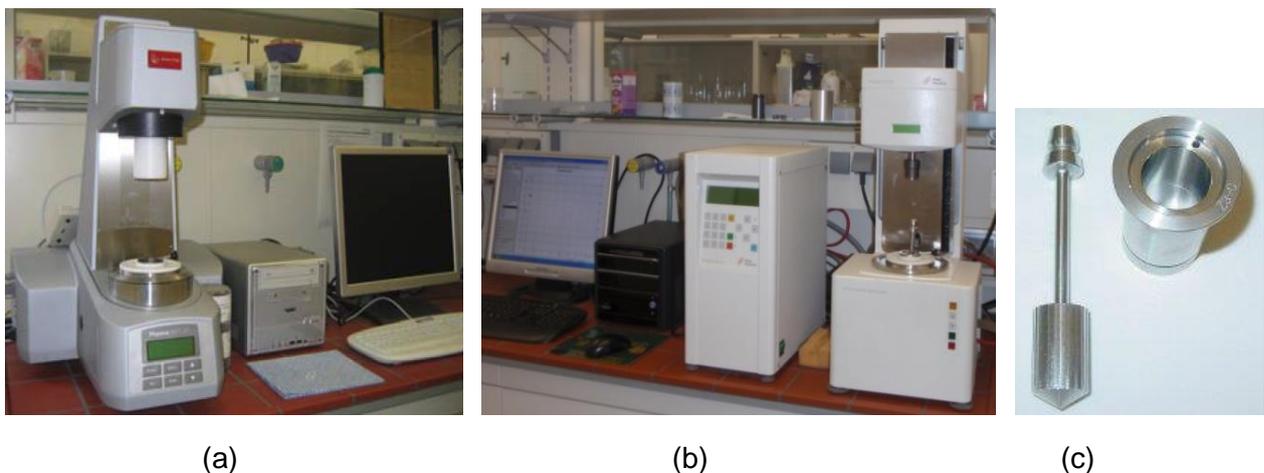


Abb. 4.2 MCR 301 (a), UDS 200 (b) und Zylindermesssystem Z3 DIN (c)

Zu den durchgeführten rheologischen Untersuchungen gehört neben den Oszillationsmessungen (Amplituden-, Temperatur- und Frequenzsweepmessungen) auch die Schermessung.

4.2.6.1 Amplitudensweepmessung

Hierbei erfolgte eine Veränderung der Amplitude bzw. Deformation im Bereich von $10^{-4} \leq \gamma \leq 10$ bei einer konstanten Frequenz von 1 Hz. Der Amplitudensweep wurde bei Temperaturen von 80, 60 und 40 °C (bei manchen Proben auch bei 10 °C) durchgeführt. Die Messungen im Amplitudensweep-Modus dienen der Ermittlung der Amplitude, bei der die Proben noch eindeutig im linear viskoelastischen Bereich (LVB) liegen.

4.2.6.2 Temperatursweepmessung

Unmittelbar nach der Präparation der Analog- und Schmelzkäseproben erfolgte die Temperatursweepmessung bei einem Abkühlverlauf von 85 bis 10°C mit einer Abkühlrate von 1 K/min und einer konstanten Frequenz von 1 Hz sowie einer konstanten Deformation von 10^{-3} . Anhand der Messergebnisse (der Speicher-, der Verlustmodul und der Verlustfaktor) wurde die Strukturausbildung untersucht und charakterisiert.

4.2.6.3 Frequenzsweepmessung

Der Frequenzsweep erfolgte bei einer konstanten Deformation von 10^{-3} und $0,01 \leq f \leq 50$ Hz sowie bei 80, 60 und 40 °C (bei manchen Proben auch bei 10 °C). Zur Abklärung des strukturellen Zustandes wurden im Auswertungsbereich von $0,1 \leq f \leq 10$ Hz Regressionsgleichungen für $G'(f)$ sowie $G''(f)$ ermittelt.

4.2.6.4 Schermessung

Das Fließverhalten der Analogkäseproben wurde bei 85°C mit Hilfe der Schermessung untersucht. Die Messung erfolgte dabei in fünf Messabschnitten (siehe Tab. 4.4). Das Vorscheren ist aus rheologischer Sicht notwendig, um eine vergleichbare Vorbehandlung der Proben zu gewährleisten.

Zur Berechnung der Strukturparameter wurden die Daten des 5. Abschnittes herangezogen. Hier fand das Herschel-Bulkley-Modell Anwendung.

Tab. 4.4 Messprofilvorgabe der Schermessung bei 85 °C

Abschnitt-Nr.	Abschnitt	Messdauer in s	Zahl der Mess- punkte	$\dot{\gamma}$ in s^{-1}
1	Vorscheren	60	20	10
2	Ruhephase	60	–	0
3	Hinlaufkurve	60	20	$0,1 \leq \dot{\gamma} \leq 10$
4	Rampe	60	20	10
5	Rücklaufkurve	60	20	$10 \leq \dot{\gamma} \leq 0,1$

4.2.7 Instrumentelle Texturanalyse

Zur Ermittlung und Bewertung der Textureigenschaften der Analogkäsepräparationen erfolgten mittels Vierfachbestimmungen Kraft-Weg-Messungen nach dem Prinzip der Parallelplattende-

formation mit Hilfe der Material-Prüfmaschine Zwick Roell/Z0.5 (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland). Die Auswertung entstand durch die entsprechende Software testXpert II.

Das zu untersuchende Probenmaterial wird zwischen der feststehenden Grundplatte (Unterlage) und dem Druckstempel, welcher mit einer Kraftmessdose verbunden ist, positioniert (siehe Abb. 4.3).

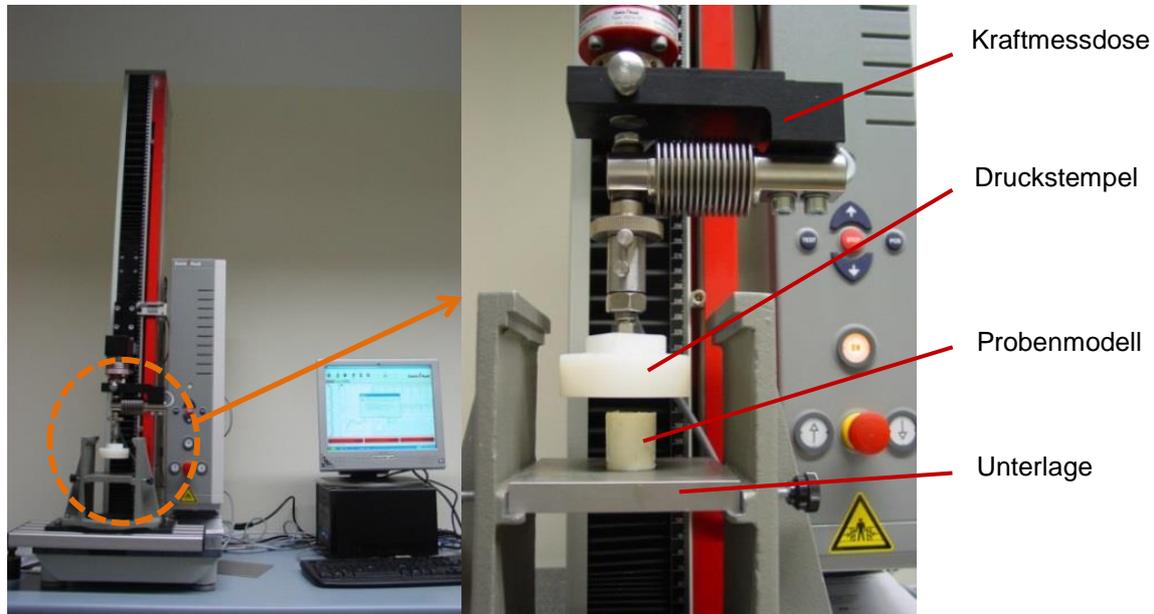


Abb. 4.3 Material-Prüfmaschine (Zwick Roell/Z0.5) mit Druckstempel und Probenmodell

Mit Beginn der Messung bewegt sich der Druckstempel mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit senkrecht nach unten. Dabei ist zu beachten, dass der Druckstempel zur Sicherung von Normalkräften zentral und vollflächig auf dem Probenmodell aufliegen sollte. Eine entsprechende Präparierung des Probenmodells ist demnach erforderlich. Darüber hinaus werden die Oberflächen des Druckstempels und der Unterlage mit Öl bestrichen.

Die Kraftmesszelle erfasst die Kraft als Funktion des Weges. Die Darstellung der Parameter des Parallelplattendeformationsversuches sind in Tab. 4.5 dargestellt.

Tab. 4.5 Parameter des Parallelplattendeformationsversuches

Parameter	
d_0	25,4 mm
h_0	26 mm
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Kraftmessdose	100 N
Messwertspeicher	0,05 s/Messpunkt
Prüftemperatur	10 °C
Vorkraft	0,5 N
Maximale Verformung (Wegbegrenzung)	20 mm
Obere Kraftgrenze	80 N

Die Prüfkörpergeometrie beeinflusst unter Berücksichtigung bestimmter Abmessungen maßgeblich die Messung und die daraus resultierenden Messergebnisse. Es wurde ein angepasster Zylinderkörper (Probenmodell) gewählt, der das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser nach DIEHL ($1,00 \leq h_0/d_0 \leq 1,08$) [215] aufweist.

Die Analogkäseprobe wurde unmittelbar nach der Präparation in einen Behälter eingefüllt und im Kühlschrank bei 8 °C 24 h lang gelagert. Mit Hilfe einer geeigneten Stanzform (Hohlzylinder) erfolgte das Ausstechen von vier zylinderförmigen Probenmodellen ($h_0/d_0 = 1,02$) aus dem Analogkäseblock (siehe Abb. 4.4). Eine vorsichtige Nachkorrektur der Höhe des Probenmodells war gegebenenfalls erforderlich und konnte mit einem Messer erreicht werden. Das Probenmodell mit einer Temperatur von ca. 10 °C wurde der Kraft-Weg-Messung unterzogen.

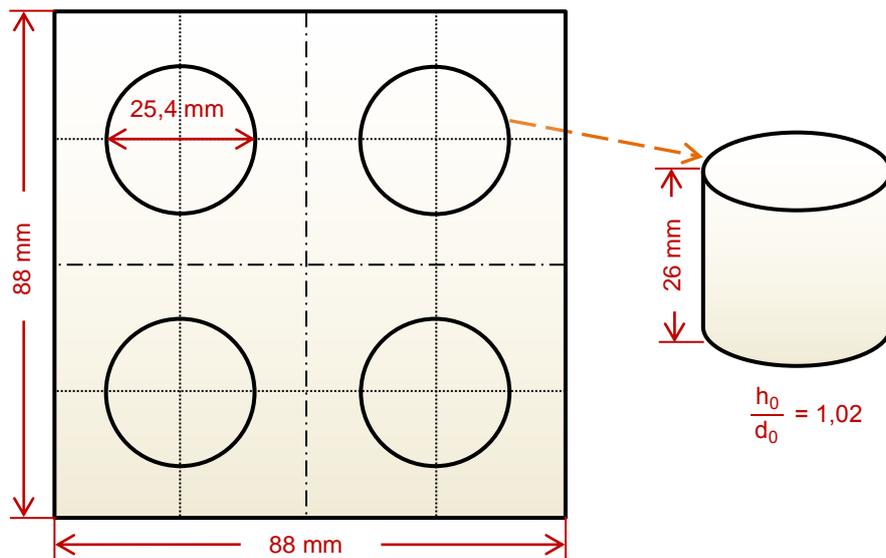


Abb. 4.4 Ausstechschema der Proben

Nach der Erfassung der Kraft als Funktion des Weges wurden die Texturkennwerte (der Elastizitätsmodul sowie die Deformationsarbeit und die maximalen Kräfte für die entstandenen Deformationsbereiche) ermittelt.

4.2.8 Schmelzbarkeitstest

Zur Beurteilung des Schmelzverhaltens bzw. der Schmelzbarkeit der Analogkäseproben wurde mittels Dreifachbestimmung die modifizierte Methode von Olson und Price verwendet [38].

Nach der Präparation erfolgte das Einfüllen der Probe in einen Behälter und die Lagerung im Kühlschrank bei 8 °C 24 h lang. Danach wurden mit Hilfe einer geeigneten Stanzform drei zylinderförmige Proben (25 mm Durchmesser, 40 mm Höhe) aus dem Analogkäseblock ausgestochen. Anschließend wurden diese in das geschlossene Ende eines Glasrohr (30 mm Durchmesser, 250 mm Länge) platziert (siehe Abb. 4.5). Die Glasrohre wurden horizontal auf einem Backblech in einem vorgeheizten Ofen bei 180 °C für 15 min erhitzt. Dann erfolgte die Vermessung der Fließstrecke $s_{\text{Fließ}}$ in mm.

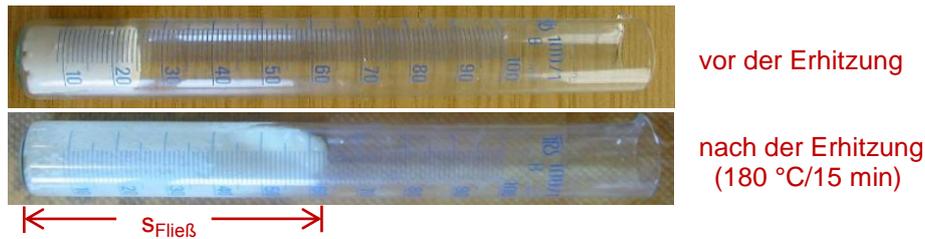


Abb. 4.5 Fließstrecke nach dem Schmelzbarkeitstest

4.3 Präparationsmethoden

4.3.1 Präparation der Analogkäseproben

Als erstes wurde eine Grundrezeptur (siehe Tab. 4.6) zur Präparation eines schnittfesten und schmelzbaren Analogkäses ausgewählt. Anschließend wurde sie schrittweise nach dem Variationsparameter geändert und optimiert.

Tab. 4.6 Grundrezeptur für schnittfeste und schmelzbare Analogkäseproben

Ingredienzien	Anteil in %
Labkasein	15
Schmelzsalz JOHA [®] S9	3
NaCl	1
Hydriertes Kokosfett	20
Wasser	61

Bei der Präparation des Analogkäses im Labormaßstab (1 kg je Probe) fand der Thermomix TM 31 (Vorwerk Elektrowerke GmbH & Co. KG, Wuppertal) Verwendung. Bei dem Mischsystem handelt es sich um einen Blattrührer mit vier Messerkanten sowie drei Strombrechern. Die Drehzahl des Thermomix wurde mittels eines digitalen Drehzahlmessers (Type: DT1L-Voltcraft, Deutschland) bestimmt.

Zuerst wurde das Wasser im Thermomix auf 60 °C temperiert. Dann wurde die Trockenmischung (Mischung der trockenen Ingredienzien) unter kontinuierlichem Rühren bei 200 U/min langsam hinzugegeben. Die Masse wurde 2 min lang bei 60 °C und 200 U/min gemischt. Nun fand die Hinzugabe des bei 85 °C für 1 h aufgeschmolzenen Kokosfetts statt. Die Mischung wurde ebenfalls 2 min bei 60 °C und 200 U/min gehalten. Bei diesem Schritt wurde der pH-Wert durch Citronensäure-Lösung (2,5 M) auf $6,0 \pm 0,1$ eingestellt. Anschließend erfolgte die Erhitzung der Mischung auf 90 °C. Das Weiterrühren der Mischungsmasse bei dieser Temperatur für 10 min fand bei 200 U/min statt. Zum Schluss entstand eine homogene Masse. Ein Teil dieser Masse wurde in einen Behälter gefüllt und im Kühlschrank bei 8 °C für 24 h gelagert und dann für die Schmelzbarkeits- und Texturtests verwendet. Der andere Teil fand direkt für die rheologischen Messungen Verwendung.

In Abb. 4.6 ist der Technologieablauf des Herstellungsprozesses von Analogkäse im Labormaßstab mit den durchgeführten Messungen dargestellt.

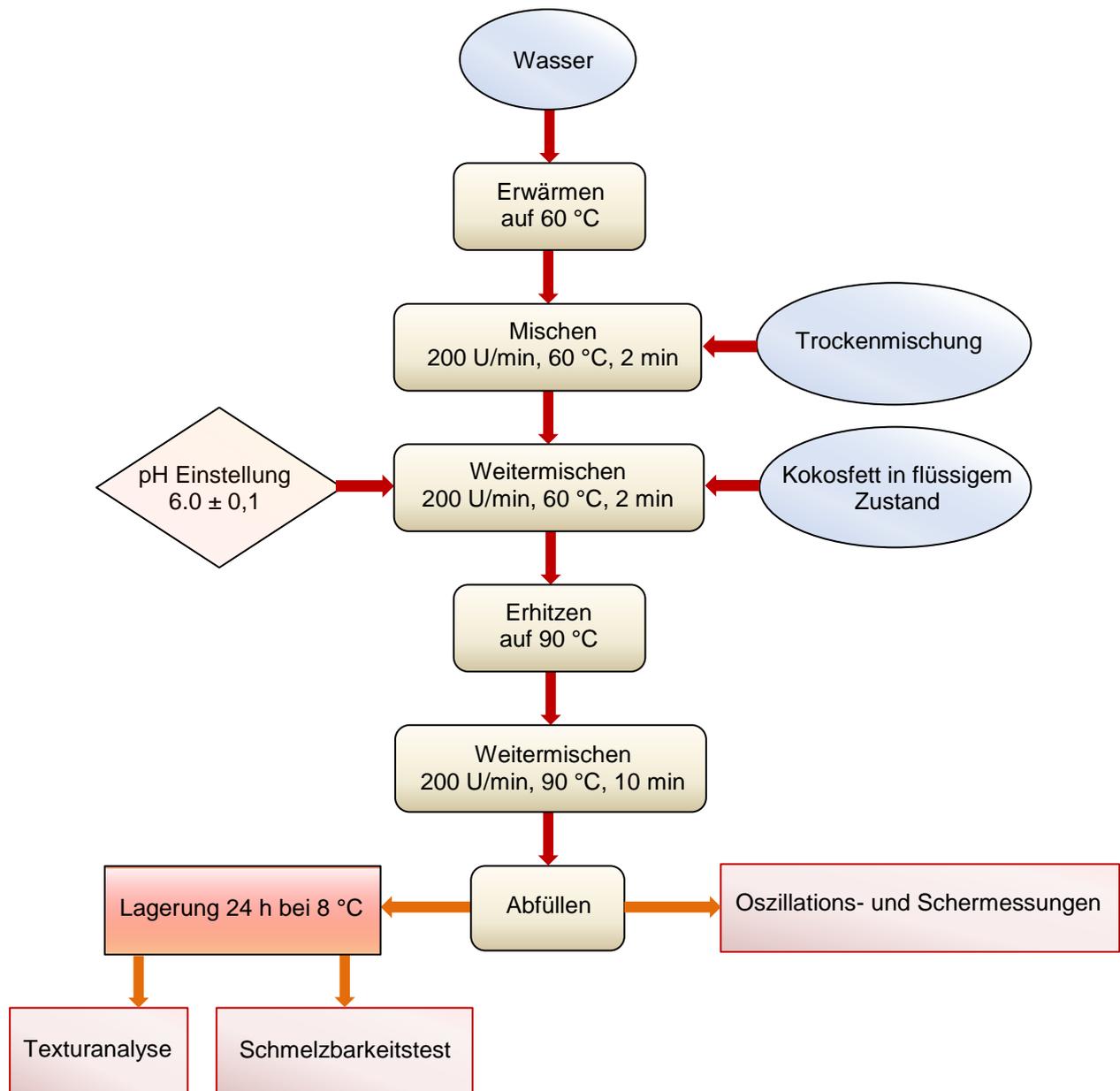


Abb. 4.6 Fließschema zur Präparation der Analogkäseproben im Labormaßstab

4.3.2 Versuchsmatrix zur Analogkäsepräparation

Zur Untersuchung des Einflusses der Ingredienzien und der Technologieführung auf die Strukturierungsmechanismen, das Fließverhalten und Textureigenschaften sowie das Schmelzbarkeit der Analogkäseproben mussten Änderungen in der Grundrezeptur (Tab. 4.6) vorgenommen werden. Hierbei wurden der Labkaseinanteil, die Schmelzsalkonzentration, der Fettgehalt, die Stärkekonzentration und -art, die Labkaseinsubstitution durch Stärke (S2), micellares Kasein, Säurekasein, Sojaproteinisolat und acht verschiedene Hydrokolloide als Einzelkomponenten (Guarkernmehl, Johannisbrotkernmehl, κ -Carrageenan, Natriumalginat, Xanthan, Methylcellulose, Natrium-Carboxymethylcellulose und Hydroxypropylmethylcellulose) sowie der pH-Wert und die Drehzahl des verwendeten Thermomix als Variationsparameter ermittelt und bewertet.

In Tab. 4.7 sind alle Versuchsvarianten mit Angaben der Variationswerte und festen Parameter für das gesamte Probenspektrum aufgeführt.

Tab. 4.7 Versuchsmatrix zur Analogkäsepräparation

Parameter	Variation in Bereich	Feste Parameter	Versuchsanzahl
c_{Lk}	$15 \leq c_{Lk} \leq 21 \%$; $\Delta c_{Lk} = 2 \%$	3 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett	4
c_{SS}	$1,2 \leq c_{SS} \leq 3 \%$; $\Delta c_{SS} = 0,6 \%$	17 % Lk; 1 % NaCl; 20 % Fett	3
c_{FIT}^*	$45 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$; $\Delta c_{FIT} = 5 \%$	17 % Lk; 2,1 % SS; 1 % NaCl	4
c_{S1}	$0,5 \leq c_{S1} \leq 3 \%$; $\Delta c_{S1} = 0,5 \%$	17 % Lk; 2,1 % SS; 1 % NaCl 20 % Fett	6
c_S (S1, S2, S3, S4)	2 % und 2,5 %	17 % Lk; 2,1 % SS; 1 % NaCl 20 % Fett	6
Labkaseinsubstitution:			
c_{S2}	$0 \leq c_{S2} \leq 50 \%$ vom gesamten (Lk + S2)-Anteil; $\Delta c_{S2} = 10 \%$	17 % (Lk + S2)-Anteil; 2,1 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett	5
c_{mK}	$0 \leq c_{mK} \leq 100 \%$ vom gesamten (Lk + mK)-Anteil; $\Delta c_{mK} = 20 \%$	19 % (Lk + mK)-Anteil; 2,1 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett	6
c_{Sk}	$0 \leq c_{Sk} \leq 100 \%$ vom gesamten (Lk + Sk)-Anteil; $\Delta c_{Sk} = 20 \%$	19 % (Lk + Sk)-Anteil; 2,1 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett	5
c_{SPI}	$0 \leq c_{SPI} \leq 70 \%$ vom gesamten (Lk + SPI)-Anteil; $\Delta c_{SPI} = 10 \%$	17 % (Lk + SPI)-Anteil; 2,1 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett	7
	$c_{SPI} = 100 \%$ vom gesamten (Lk + SPI)-Anteil	15 % SPI; 2,1 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett	1
Hydrokolloideinsatz**	1 %	16 % Lk; 2,1 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett	8
pH-Wert	$5,18 \leq \text{pH-Wert} \leq 6,62$	17 % Lk; 2,1 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett; 2 % Stärke (S2)	4
n_U	$100 \leq n_U \leq 650 \text{ U/min}$	17 % Lk; 2,1 % SS; 1 % NaCl; 20 % Fett; 2 % Stärke (S2)	4

Gesamtversuchszahl = 63

* Die entsprechenden absoluten Fettgehalte gegenüber c_{FIT} sind:

c_{FIT} in %:	45	50	55	60
Fett _{absolut} in %:	16,4	20,0	24,5	30,0

** Guar, JBK, Car, NaAl, MC, Na-CMC oder HPMC,

4.3.3 Präparation der Schmelzkäseproben

Unter Berücksichtigung, dass die Schmelzkäsepräparationen streichfähige Eigenschaften besitzen sollten, erfolgte die Auswahl einer Grundrezeptur (siehe Tab. 4.8), welche anschließend je nach den Versuchsvarianten geändert wurde.

Tab. 4.8 Grundrezeptur für streichfähige Schmelzkäseproben

Ingredienzien	Menge in g	Anteil in %
Gouda	66,0	55,83
Quark	28,0	23,69
Butter	6,5	5,50
JOHA [®] S9 als Schmelzsalz	3,0	2,54
Wasser	14,7	12,44

Gesamtmenge = 118,2 g, $c_{TS} = 43 \%$, $c_{FIT} = 45 \%$, und pH-Wert im Endprodukt ca. 5,7

Der Technologieablauf zur Präparation der Schmelzkäseproben in kleinen Mengen (ca. 150 g je nach der Formulierung) im kleintechnischen Labormaßstab ist in Abb. 4.7 dargestellt. Als erstes wurde der Gouda mittels einer Messermühle (Retsch, Typ GRINOMIX GM200, Deutschland) fein zerkleinert. Danach erfolgte die Dosierung und Durchmischung der Ingredienzien. Anschließend ruhte die Mischung eine Stunde bei Raumtemperatur, um einen Temperaturgradientenausgleich zu gewährleisten. Schlussendlich erfolgte der Schmelzprozess bei 85 °C und unter kontinuierlichem Rühren bei 300 U/min für 8 min.

Die Präparation der Schmelzkäseproben wurde mit Hilfe eines Blattrührers, eines Rührwerks (Typ IKA Eurostar Basic, Deutschland) und eines Behälters (Höhe: 150 mm, Durchmesser: 90 mm) sowie eines Wasserbads (Typ T LAUDA, Deutschland) durchgeführt.

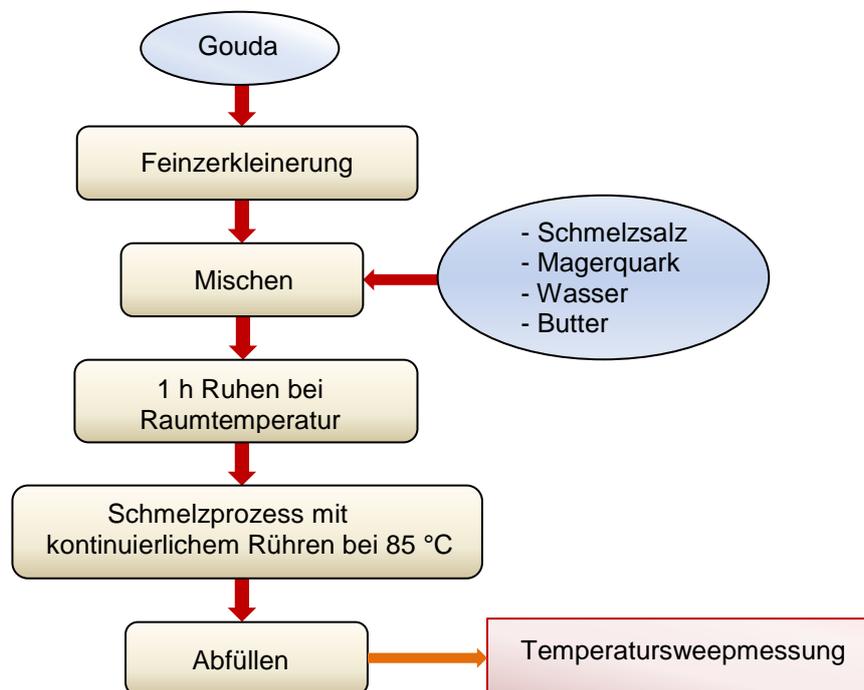


Abb. 4.7 Fließschema zur Präparation der Schmelzkäseproben im Labormaßstab

4.3.4 Versuchsmatrix zur Schmelzkäsepräparation

Zur Ermittlung einzelner Einflussfaktoren wurden schrittweise, quantitative und technologische Veränderungen der Grundrezeptur an Trockensubstanzgehalt, Schmelzsalzanteil, Fettgehalt, Rührerdrehzahl, Schmelzprozesszeit, und als Prozessvariablen durchgeführt. Um einen Über-

blick über das gesamte Probenspektrum zu schaffen, wurden alle Versuchsvarianten mit Angaben der Variationswerte und festen Parameter in Tab. 4.9 zusammengefasst.

Tab. 4.9 Versuchsmatrix zur Schmelzkäsepräparation

Parameter	Variation in Bereich	Feste Parameter/ Ingredienzien	Versuchsanzahl
c_{TS}	$35 \leq c_{TS} \leq 50 \%$; $\Delta c_{TS} = 5 \%$	Gouda: 66 g; Quark: 28 g; Butter: 12,77 g Schmelzsatz: 3 g; $n_U = 900$ U/min; $t = 8$ min	4
c_{SS}	$2,03 \leq c_{SS} \leq 2,71 \%$; $\Delta c_{SS} = 0,17 \%$	Gouda: 66 g; Quark: 28 g; Butter: 6,5 g Wasser: 14,7 g; $n_U = 300$ U/min; $t = 8$ min	5
c_{FIT}	$40 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$; $\Delta c_{FIT} = 5 \%$	Gouda: 66 g; Quark: 28 g; Schmelzsatz: 3 g; Wasser: 14,7 g; $n_U = 900$ U/min; $t = 8$ min	5
n_U	$300 \leq n_U \leq 1500$ U/min; $\Delta n_U = 300$ U/min	Gouda: 66 g; Quark: 28 g; Butter: 6,5 g (45 % FiT); Schmelzsatz: 3 g (2,54 % c_{SS}); Wasser: 14,7 g; $c_{TS} = 43 \%$; $t = 8$ min	5
t	$4 \leq t \leq 12$ min; $\Delta t = 2$ min	Gouda: 66 g; Quark: 28 g; Butter: 6,5 g (45 % FiT); Schmelzsatz: 3 g (2,54 % c_{SS}); Wasser: 14,7 g; $c_{TS} = 43 \%$; $n_U = 900$ U/min	5

Gesamtversuchsanzahl = 24

4.4 Statistische Absicherung

Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit wurden die Messungen mittels Doppel- bis Vierfachbestimmungen durchgeführt. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgte anhand von Gl. 4.2. Bei weniger als vier Einzelwerten wurden die Mittelwertabweichungen nach Gl. 4.3 berechnet. Die Standardabweichungen wurden nach Gl. 4.4 berechnet.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Gl. 4.2}$$

$$MWA = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad \text{Gl. 4.3}$$

$$s_{Ab} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Gl. 4.4}$$

Um die Signifikanz der Versuchsergebnisse zu überprüfen, wurden mit Hilfe der SPSS-Software (Version 16.0) die Varianzanalyse (einfache ANOVA) und der Multiple-Range-Test von DUNCAN verwendet. Unterschiede wurden bei einem Signifikanzniveau $P < 0,05$ als signifikant bezeichnet.

Darüber hinaus wurde bei den rheologischen Untersuchungen die Statistiksoftware des Rheometerherstellers verwendet. In Abb. 12.1 und Abb. 12.2 sowie Abb. 12.11 bis Abb. 12.17 im Anhang sind zum Nachweis der Reproduzierbarkeit die Doppelbestimmungen der Partikelanalytik und Temperatursweeps aufgeführt. Diese weisen eine sehr gute Reproduzierbarkeit auf.

5 Partikelgrößen- sowie funktionelle Analytik der eingesetzten Proteinpulver

5.1 Partikelgrößenanalytik

Eine Doppelbestimmung der Partikelanalyse der eingesetzten Proteinpulver wurde mittels Laserpartikelanalytik mit höchster Reproduzierbarkeit durchgeführt. Die Mittelwertskurven der Einzel- und Summenhäufigkeitsverteilungen sind in Abb. 5.1 und Abb. 5.2 dargestellt.

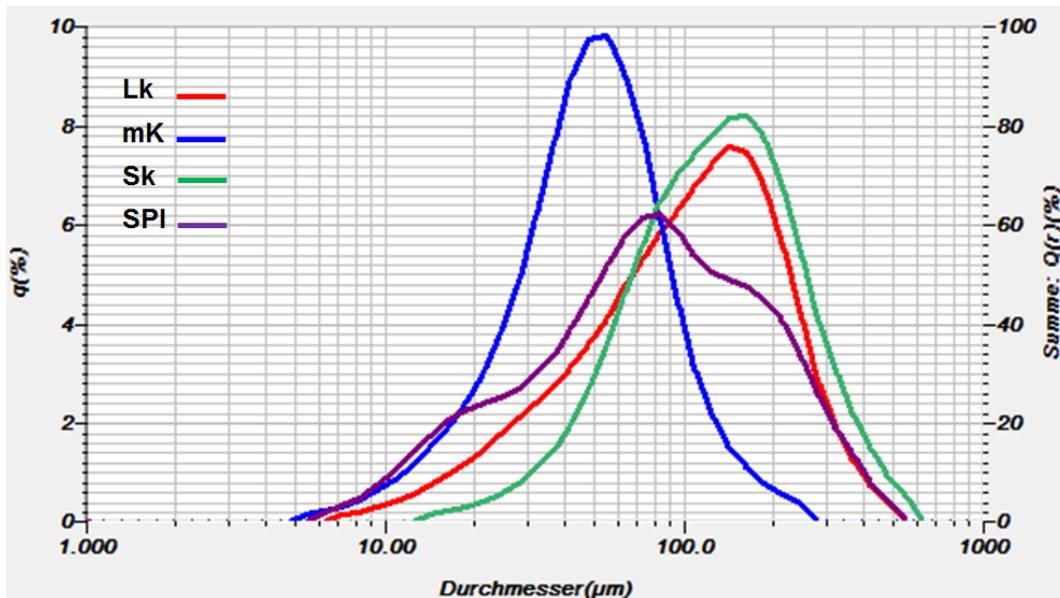


Abb. 5.1 Einzelhäufigkeitsverteilungen der eingesetzten Proteinpulver

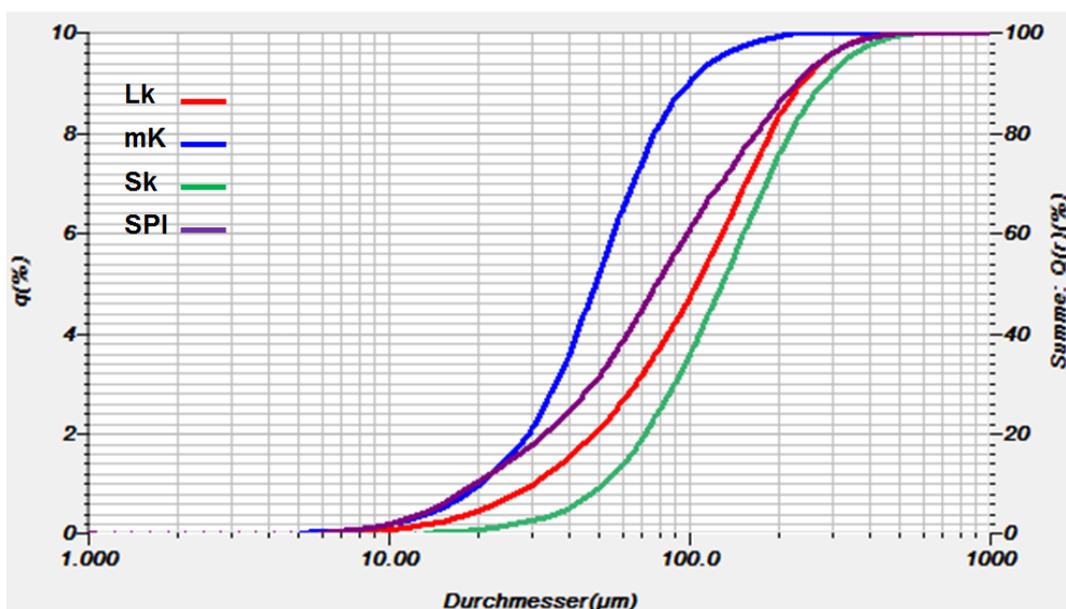


Abb. 5.2 Summenverteilungskurven der eingesetzten Proteinpulver

Anhand von Abb. 5.1 ist erkennbar, dass die Verteilungsfunktionen der Proteinpulver eine Monomodalverteilung aufweisen. Abb. 5.2 zeigt, dass alle Proben bis auf SPI eine homogene Kornbandverteilung aufweisen. Bei der Einzelhäufigkeitsverteilung der Probe SPI ist eine beidseitige Flankenbildung zu erkennen. Dies ist auf mögliche Agglomerationen aufgrund der hohen

Oberflächenenergie der Partikel zurückzuführen. Charakteristische Kennwerte der Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit von der Proteinart sind in Tab. 5.1 zusammengefasst.

Tab. 5.1 Kennwerte der Partikelgrößenverteilung je nach der Proteinart/ MW \pm MWA

Proteinart	d ₁₀ μm	d ₅₀ μm	d ₉₀ μm	Modalwert μm	d _{4,3} μm	spezifische Oberfläche cm ² /cm ³
Labkasein	31 ^b ± 0	107 ^b ± 1	238 ^b ± 2	143 ^b ± 0	124 ^b ± 1	902 ^c ± 6
micellares Kasein	20 ^c ± 0	49 ^d ± 0	100 ^c ± 0	55 ^d ± 0	57 ^d ± 0	1576 ^a ± 3
Säurekasein	53 ^a ± 0	130 ^a ± 1	282 ^a ± 2	163 ^a ± 0	152 ^a ± 1	605 ^d ± 1
Sojaproteinisolat	20 ^c ± 0	79 ^c ± 0	231 ^b ± 3	83 ^c ± 1	106 ^c ± 2	1252 ^b ± 7

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben in derselben Spalte (P < 0,05)

Es ist zu erkennen, dass das micellare Kasein (mK) und das Sojaproteinisolat (SPI) im Vergleich zum Labkasein (Lk) und Säurekasein (Sk) aus kleineren Partikeln bestehen. Dies führt zur Erhöhung der Grenzflächenenergie der Partikel und somit zu einer höheren Kohäsion untereinander. Die Zugabe des micellaren Kaseins oder Sojaproteinisolats bei der Präparation der Analogkäseproben demzufolge erschwerte sich. Zwischen allen eingesetzten Proteinpulvern bestehen signifikante Unterschiede bezüglich der spezifischen Oberfläche.

5.2 Funktionelle Analytik

Die Mittelwerte und Mittelwertabweichungen der Dreifachbestimmung für die Wasser- und Fettbindekapazitäten aller verwendeten Proteine nach der Zentrifugationsmethode sind in der nachstehenden Tabelle aufgeführt.

Tab. 5.2 Wasser- und Fettbindekapazitäten je nach der Proteinart/ MW \pm MWA

Proteinart	WBK in %	FBK in %
Labkasein	149,4 ^d ± 0,7	90,9 ^c ± 2,6
micellares Kasein	217,4 ^b ± 1,5	121,1 ^a ± 2,9
Säurekasein	167,1 ^c ± 1,6	78,7 ^d ± 3,6
Sojaproteinisolat	650,3 ^a ± 0,9	108,7 ^b ± 2,0

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben in derselben Spalte (P < 0,05)

Es ist deutlich erkennbar, dass das SPI ein sehr hohes Wasserbindevermögen im Vergleich mit den anderen Proteinarten besitzt. Seine Wasserbindekapazität beträgt das 4,4-fache gegenüber der des Labkaseins. Dabei könnte die hohe spezifische Oberfläche der SPI-Partikel eine Rolle spielen.

Das Labkasein weist aufgrund der Abtrennung des hydrophilen Teils (Glycomakropeptid) bei der Labkaseingewinnung im Vergleich zum Säurekasein eine geringere Wasserbindekapazität und eine höhere Fettbindekapazität auf.

Die Wasser- und Fettbindekapazität des micellaren Kaseins ist aufgrund der nativen funktionellen Eigenschaften und des Vorhandenseins von Molkenproteinen deutlich höher als die der anderen Kaseinsorten.

Für die Wasserbindekapazität ergibt sich folgendes Ranking: SPI > mK > Sk > Lk, und für die Fettbindekapazität: mK > SPI > Lk > Sk.

5.3 Kapitelzusammenfassung

Eine Partikelgrößenanalytik der in den Versuchen eingesetzten Proteinpulver wurde durchgeführt. Sowohl das micellare Kasein als auch das Sojaproteinisolat wiesen im Vergleich zum Lab- und Säurekasein eine sehr kleine Partikulierung auf, die eine erhöhte Grenzflächenenergie bewirkt.

Die Wasser- und Fettbindekapazitäten aller eingesetzten Proteinpulver wurden ebenfalls bestimmt und miteinander verglichen. Das SPI besaß gegenüber Labkasein eine 4,4-fach erhöhte Wasserbindekapazität. Bei der Fettbindekapazität lag das micellare Kasein vorn.

6 Strukturanalyse und Technologieoptimierung von Analogkäse

6.1 Einfluss des Labkaseinanteils

6.1.1 Amplitudensweepmessungen

Zur Ermittlung des linear viskoelastischen Bereiches (LVB) wurden Amplitudensweepmessungen für die Analogkäseproben ($15 \leq c_{Lk} \leq 21 \%$, $\Delta c_{Lk} = 2 \%$) bei 80, 60 sowie 40 °C durchgeführt. Die Versuchsergebnisse der Amplitudensweepmessungen sind in Abb. 6.1 am exemplarischen Beispiel einer Labkaseinkonzentration von 17 % und bei Messtemperaturen von 80, 60 und 40 °C in der Originalmesskurve dargestellt.

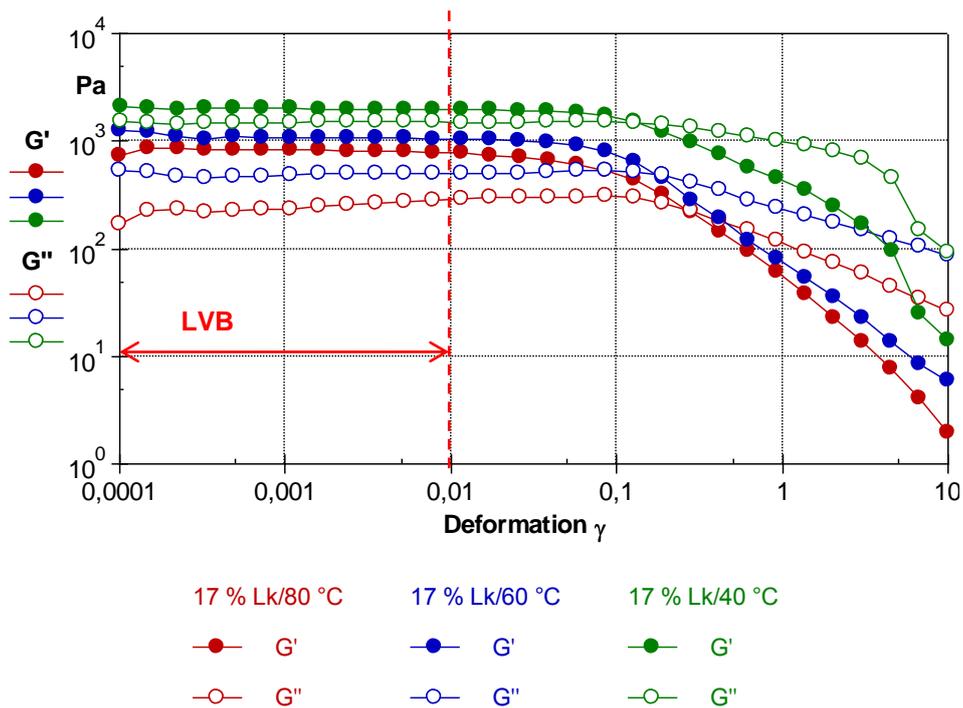


Abb. 6.1 Amplitudensweepmessungen 17 % Labkasein/ 80, 60 und 40 °C

In der doppeltlogarithmischen Darstellung des deformationsabhängigen Verhaltens ist ein ausgeprägter linear viskoelastischer Bereich bis zu einer Deformation von $\gamma_L = 0,01$ (Abfall des $G' < 10 \%$ als Grenzwert des LVB) zu erkennen, siehe auch Tab. 6.1. Dieses Ergebnis wurde für alle untersuchten Konzentrationen von Labkasein bestätigt (siehe Abb. 12.3 im Anhang).

Tab. 6.1 Ermittlung des Grenzwertes des LVB am Beispiel von 17 % Labkasein bei 80 °C

γ	G' in Pa	$\Delta G'$ in %
10^{-4}	6439	–
10^{-3}	6232	3
10^{-2}	6086	6
10^{-1}	5338	27

grüne Markierung: verwendeter Grenzwert des LVB

Für die Durchführung der weiteren Temperatur- und Frequenzsweepmessungen wurde eine Deformation $\gamma = 0,001$ als sicherer Wert genutzt.

Aus Abb. 6.1 ist ersichtlich, dass bei abnehmender Temperatur die Werte der Speicher- und Verlustmoduli ansteigen. Diese Feststellung geht mit der abkühlungsbedingten Strukturverfestigung konform. Beide dynamische Moduli fallen nach Überschreiten des LVB ab. Normalerweise würde G' absinken und G'' ansteigen. In diesem Fall wird durch den spezifischen Verlauf der Moduli eine multiple vorliegende Struktur (Struktur in Struktur) nachgewiesen.

6.1.2 Temperatursweepmessungen

Zur Ermittlung der Strukturausbildungs- und Umwandlungsmechanismen bei der Abkühlung wurden Temperatursweepmessungen der im Labormaßstab hergestellten Analogkäseproben in Abhängigkeit von der Labkaseinkonzentration ($15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %, $\Delta c_{Lk} = 2$ %) durchgeführt. In Abb. 6.2 erfolgt die Darstellung der Speichermodul- und Verlustfaktorverläufe. Aus Übersichtsgründen wurde auf die G'' -Darstellung verzichtet.

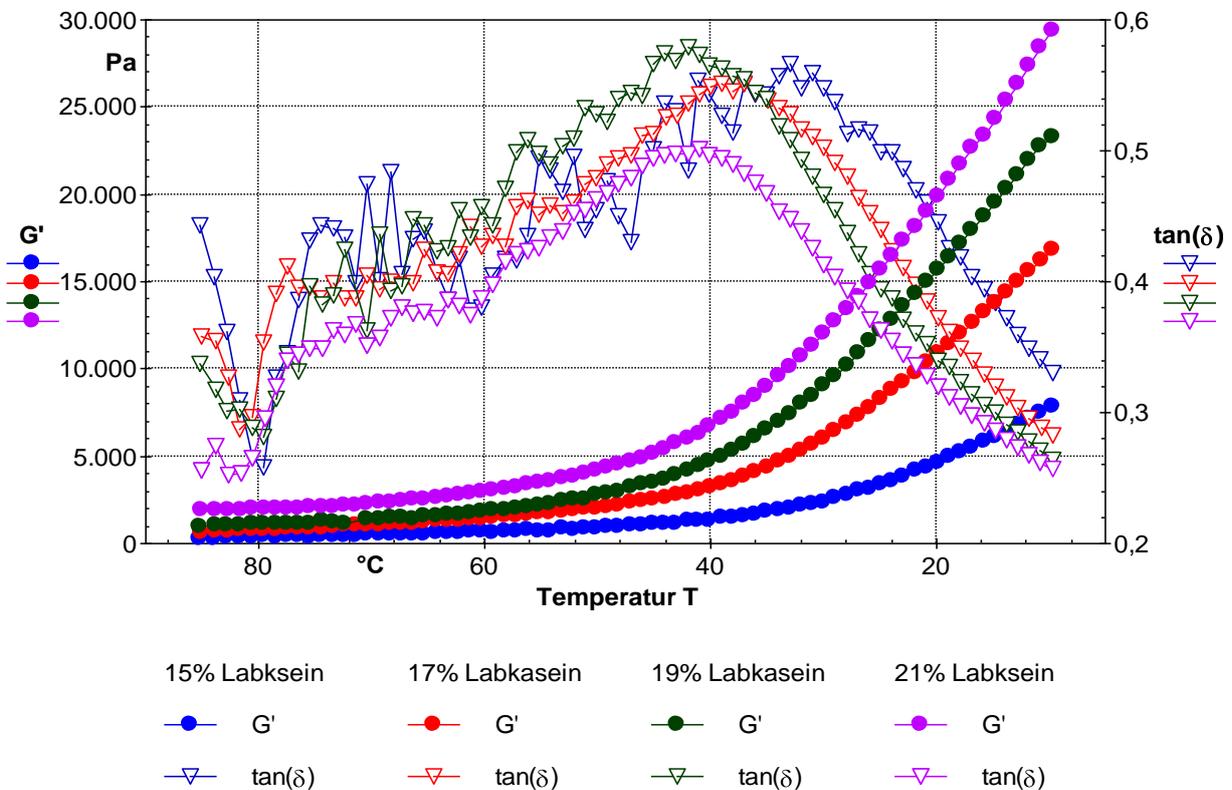


Abb. 6.2 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %

Die materialwissenschaftlichen Untersuchungen zur Ableitung einer Masterkurve für die Strukturausbildung wurden am Beispiel der Veränderungen der $\tan \delta$ -Kurve durchgeführt. In Abb. 6.3 sind die Versuchsergebnisse exemplarisch am Beispiel eines Labkaseinanteiles von 17 % in der Originalmesskurve dargestellt. Durch die Funktionalität der Kaseine als Wasserbinder und Emulgator sowie der Schmelzsalze wurde durch Abkühlung eine unterkühlte Schmelze am Beispiel des eingesetzten Kokosfettes final erzeugt. Hergestellt wurde ein viskoelastisches Material durch Abkühlung der prozessierten Dispersion, welche die Eigenschaften einer festen Emulsion dominant besitzt.

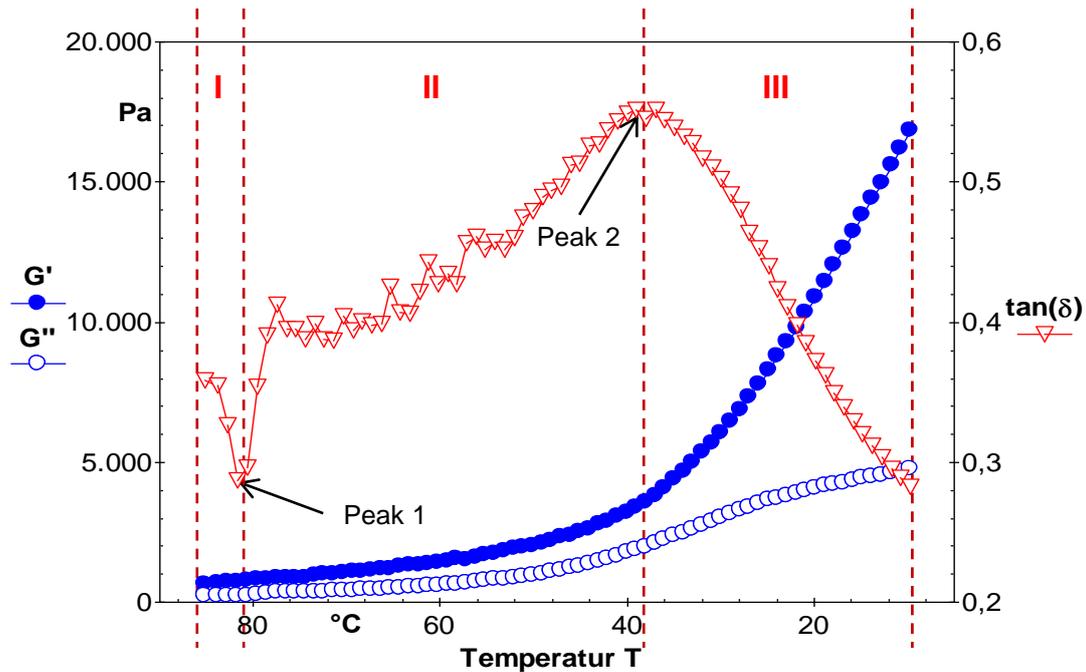


Abb. 6.3 Masterkurve des Abkühlungsverlaufs am Beispiel 17 % Labkasein

Der $\tan \delta$ ist als der schärfste Strukturindikator anzusehen und ermöglicht neben dem G' eine Differenzierung der ablaufenden Strukturierungsmechanismen. Der Kurvenverlauf des $\tan \delta$ ist durch drei Abschnitte mit zwei Peaks charakterisiert (siehe Abb. 6.3). Der Strukturbildungsprozess beginnt mit einem geringen Level für den Speicher- und Verlustmodul bei der Starttemperatur von 85 °C. Im gesamten Verlauf des Abkühlprozesses gilt $G' > G''$, was auf dominante Festkörpereigenschaften hinweist.

In **Abschnitt I** sinkt die Verlustfaktorkurve im Temperaturbereich von 85 bis ca. 80 °C bis zu einem absoluten Minimum (Peak 1) vor allem durch hydrophobe Interaktionen der Labkaseine mit dem flüssigen Fett ab. Das absolute Minimum ist durch die stärksten hydrophoben Interaktionen in der Matrix erklärbar.

In **Abschnitt II** wirken hydrophobe und hydrophile Interaktionen gleichzeitig. Die hydrophoben Interaktionen werden jedoch durch die Abkühlung geschwächt, was am Anstieg des $\tan \delta$ auf ein absolutes Maximum (Peak 2) bei ca. 40 °C erkennbar ist.

Bei fortlaufender Abkühlung findet in **Abschnitt III** die Ausbildung der finalen Struktur statt, die im Wesentlichen durch die Auskristallisation des eingesetzten Pflanzenfettes unterhalb von 40 °C sowie die Wasserimmobilisierung durch Wasserstoffbrückenbindungen WSB an dem hydrophilen Teil des Labkaseins bewirkt wird. Das verwendete Kokosfett enthält 51 % Laurinsäure, deren Schmelzpunkttemperatur als Einzelkomponente bei 43,5 °C liegt [62; 132].

Eine Zusammenstellung der wichtigsten materialwissenschaftlichen Kennwerte der Peaks sowie des Anfangs- und Endlevels in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil c_{LK} erfolgt in Tab. 6.2. Folgende lineare Korrelation kann zwischen G' und c_{LK} für die Endlevels abgeleitet werden:

$$G'(c_{LK}) = 3562 \cdot c_{LK} - 44786 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,99 ; i = 4 \quad \text{Gl. 6.1}$$

Tab. 6.2 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil

c_{Lk} %	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	tan δ –
15	Anfangslevel	85	248	110	0,443
	Peak 1	80	409	106	0,258
	Peak 2	33	1968	1115	0,567
	Endlevel	10	7820\8644*	2580	0,330
17	Anfangslevel	85	635	227	0,358
	Peak 1	82	751	216	0,287
	Peak 2	39	3388	1868	0,551
	Endlevel	10	16800\15768*	4750	0,282
19	Anfangslevel	85	976	329	0,337
	Peak 1	80	1133	319	0,282
	Peak 2	42	4166	2414	0,579
	Endlevel	10	23300\22892*	6140	0,264
21	Anfangslevel	85	1900	486	0,255
	Peak 1	82	1961	498	0,254
	Peak 2	43	5717	2846	0,498
	Endlevel	10	29400\30016*	7540	0,256

* berechnet nach Gl. 6.1, grüne Markierung: technologisches Optimum

Der Speichermodul gilt als Indikator für das Festkörperverhalten. G'-Werte am Ende der Messung stiegen mit Erhöhung des Labkaseinanteils stark an. Der steigende Kaseinanteils erhöht die Interaktionen in der Matrix zur Fett- und Wasserbindung und bewirkt somit eine stabilere Imitatstruktur. Anhand von Abb. 6.2 und Tab. 6.2 ist als heuristischer Trend erkennbar, dass mit steigendem Anteil an Labkasein eine Strukturstabilisierung bewirkt wird, da der Level des tan δ in Abschnitt III geringer wird. Gleichzeitig verschiebt sich der Peak 2 des tan δ in Richtung höherer Temperaturen. Dadurch ist eine verbesserte Strukturausbildung bereits bei höheren Temperaturen nachweisbar. Die erhöhten Protein-Interaktionen reduzieren die Grenzflächenspannung an der Öl-Wasser-Phasengrenzfläche und stabilisieren dadurch die O/W-Emulsion. Das Wasser in der Matrix wird durch Proteininteraktionen immobilisiert und die „Festigkeit“ der Matrix somit erhöht [47; 37].

Eine stabile Messkurve des tan δ lag bei einem Labkaseinanteil von 15 % nicht vor. Dies ist ab einem Labkaseinanteil von 17 % der Fall. Die Konsistenz der Probe mit 21 % Labkaseinanteil war jedoch zu „fest“. Der Speichermodul der Präparation mit 21 % Labkaseinanteil betrug bei T = 85 °C das 7,7-fache im Vergleich mit der Konzentration von 17 %. Die zu hohe „Festigkeit“ bei der Prozessierungstemperatur (85 °C) würde die weitere Bearbeitung in der Herstellungstechnologie von Analogkäse wie beispielweise den Abfüllungsprozess erschweren. Beste Verarbeitungseigenschaften lagen somit bei einem Labkaseinanteil von 17 und 19 % vor, siehe markiertes technologisches Optimum in Tab. 6.2.

6.1.3 Strukturbildungsgeschwindigkeit

Eine vertiefende Analyse der strukturellen Veränderungen wurde mit Hilfe der Strukturbildungsgeschwindigkeit durch numerische Differentiation der Originalmessdaten des Speichermoduls durchgeführt. Zur Berechnung der Strukturbildungsgeschwindigkeit v_{Str} und der Be-

schleunigung a_{Str} (zur Anzeige der jeweils wirkenden Strukturbildungsmechanismen) wurden die 1. und 2. Ableitung des Speichermoduls nach der Zeit (siehe Gl. 6.2 und Gl. 6.3) genutzt.

$$v_{\text{Str}} = \frac{dG'}{dt} = \frac{(G'_i - G'_{i-1})}{(t_i - t_{i-1})} \quad \text{in Pa/min} \quad \text{Gl. 6.2}$$

$$a_{\text{Str}} = \frac{d^2G'}{dt^2} = \frac{dv_{\text{Str}}}{dt} \quad \text{in Pa/min}^2 \quad \text{Gl. 6.3}$$

In Abb. 6.4 ist die Strukturbildungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil und der Temperatur dargestellt. Die v_{Str} -Kurven wurden einem exponentiellen Glättungsverfahren (exponential smoothing) mit einem Glättungsparameter von 0,85 unterzogen.

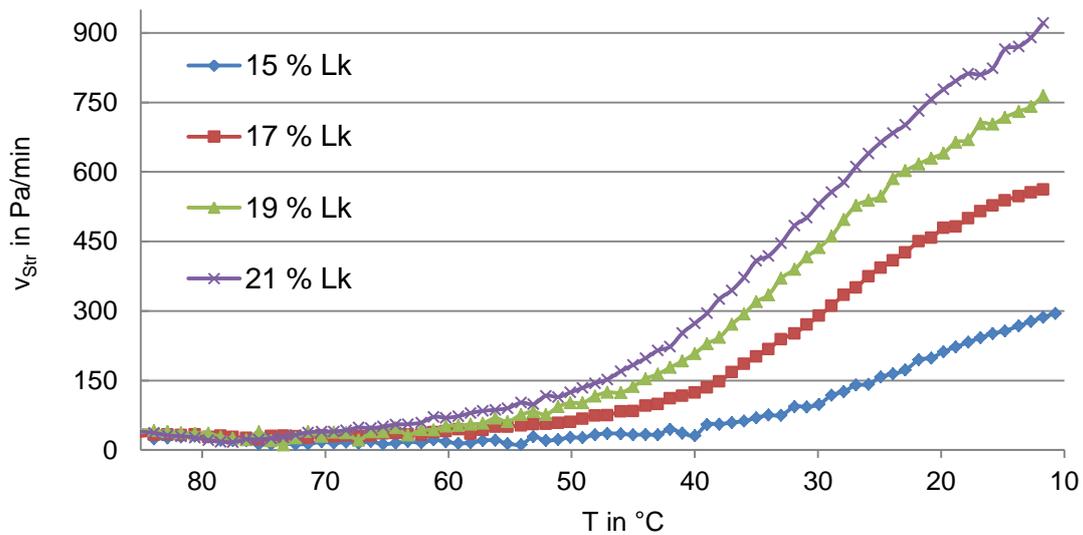


Abb. 6.4 Labkaseinkonzentrationsabhängige Strukturbildungsgeschwindigkeit

Wie aus Abb. 6.4 zu erkennen ist, verlaufen die v_{Str} -Kurven bei allen eingesetzten Labkaseinkonzentrationen nach einem heuristischen Trend.

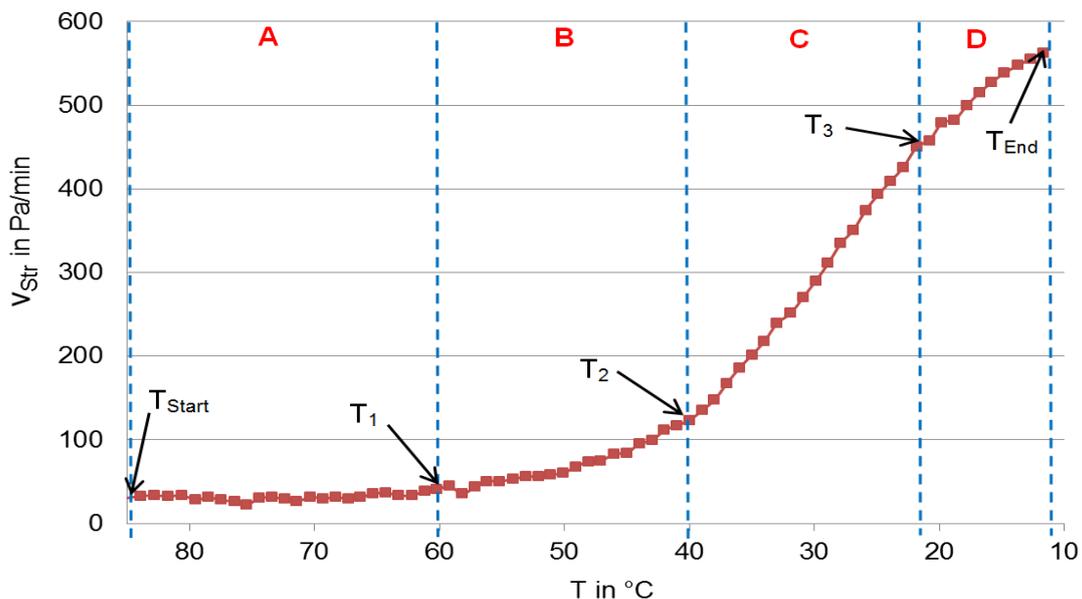


Abb. 6.5 Strukturbildungsgeschwindigkeit am Beispiel 17 % Labkasein

Eine Einteilung der Strukturbildungsgeschwindigkeitsdaten in charakteristische Abschnitte stellt eine weitere analytische Untersetzung dar (siehe Abb. 6.5). Der v_{Str} -Kurvenverlauf kann in vier temperaturabhängige Bereiche (A, B, C und D) eingeteilt werden.

Im **Bereich A** ($T_{Start} - T_1$) findet eine sehr leichte Strukturausbildung der Proteinmatrix mit einer niedrigen und relativ konstanten Strukturbildungsgeschwindigkeit von 11 – 40 Pa/min für alle Proben statt. Grundsätzlich dominieren hier die hydrophoben Wechselwirkungen der Kaseine mit dem flüssigen Fett.

Im **Bereich B** ($T_1 - T_2$) mit fortschreitender Abkühlung steigt v_{Str} langsam exponentiell an. Neben den hydrophoben Wechselwirkungen treten hier durch Wasserstoffbrückenbindungen auch hydrophile Interaktionen auf.

Nach dem Erreichen der Temperatur T_2 ist ein steiler linearer Anstieg der v_{Str} bis zu T_3 deutlich erkennbar, der **Bereich C** ($T_2 - T_3$) bildet sich aus. Die signifikante Zunahme der v_{Str} in diesem Bereich ist auf die beginnende Fettkristallisation sowie die gleichzeitige Wasserimmobilisierung zurückzuführen. Dieser Bereich endet für alle untersuchten Proben bei der Temperatur T_3 mit 20 – 22 °C. Ein großer Anteil an Fett ist bei T_3 bereits auskristallisiert.

Danach tritt der **Bereich D** ($T_3 - T_{End}$) mit einer langsamen Strukturbildungsgeschwindigkeit auf. Hierbei finden weitere Kristallisationen der restlichen flüssigen Fettsäuren (Capryl- und Ölsäure) statt.

In Tab. 6.3 sind die charakteristischen Kennwerte der Bereichsbildung in Abhängigkeit von der Labkaseinkonzentration zusammengefasst.

Tab. 6.3 Grenzpunkte der Strukturierungsbereiche, $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %

c_{Lk} %	T_1 °C	v_{Str1} Pa/min	T_2 °C	v_{Str2} Pa/min	T_3 °C	v_{Str3} Pa/min	T_{End} °C	v_{StrEnd} Pa/min
15	53	20	35	75	20	222	12	287
17	60	35	37	168	20	479	12	562
19	63	37	38	243	22	617	12	765
21	69	40	39	295	22	731	12	921

Bei Betrachtung von Abb. 6.4 und Tab. 6.3 ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Labkaseinanteil die Temperaturdifferenz des Bereiches A geringer wird und der Anstieg der v_{Str} -Kurve im Bereich C zunimmt, wodurch eine höhere Strukturierung nachgewiesen wird. Die Strukturbildungsgeschwindigkeit der Probe mit 15 % Labkasein ist deutlich geringer als die bei den anderen Proben.

Zur weiteren Aufklärung der einwirkenden Strukturierungsmechanismen wurde die Beschleunigung der Strukturbildung nach Gl. 6.3 für die Probe mit 17 % Labkasein exemplarisch ermittelt und in Abb. 6.6 grafisch dargestellt. Die a_{Str} -Kurve wurde mittels eines exponentiellen Glättungsverfahrens mit einem Glättungsparameter von 0,95 berechnet.

Mit Hilfe des gezeigten Verfahrens ist es möglich, den Strukturierungsabläufen in der Mikrostrukturebene einwirkende Mechanismen zuzuordnen. Anhand der zweiten Ableitung der

$G'(t)$ -Kurve kann die Beschleunigung der Strukturbildung in vier Bereiche mit den gleichen Temperaturbereichen wie bei der Strukturbildungsgeschwindigkeit eingeteilt werden.

Im **Bereich A** nimmt a_{Str} ab, da hydrophobe Wechselwirkungen mit abnehmender Temperatur absinken. Der **Bereich B** stellt einen Übergangsbereich mit relativ konstanter bis leicht zunehmender Beschleunigung der Strukturausbildung dar, was durch das Eintreten erster hydrophiler Interaktionen bewirkt wird. Anschließend ist eine starke Beschleunigung der Strukturierung im **Bereich C** aufgrund der Kristallisation der gesättigten Fettsäuren und der WSB-Ausbildung der Labkaseine zu sehen. Zuletzt erkennt man im **Bereich D** wieder eine Abnahme der a_{Str} , da der größte Anteil an Fettsäuren bereits im Bereich C auskristallisiert ist. Die Hauptstrukturierung der Analogkäseproben findet im Bereich C statt. **Zu keinem Zeitpunkt wurden Destrukturierungen festgestellt, da stets $a_{Str} > 0$ war.**

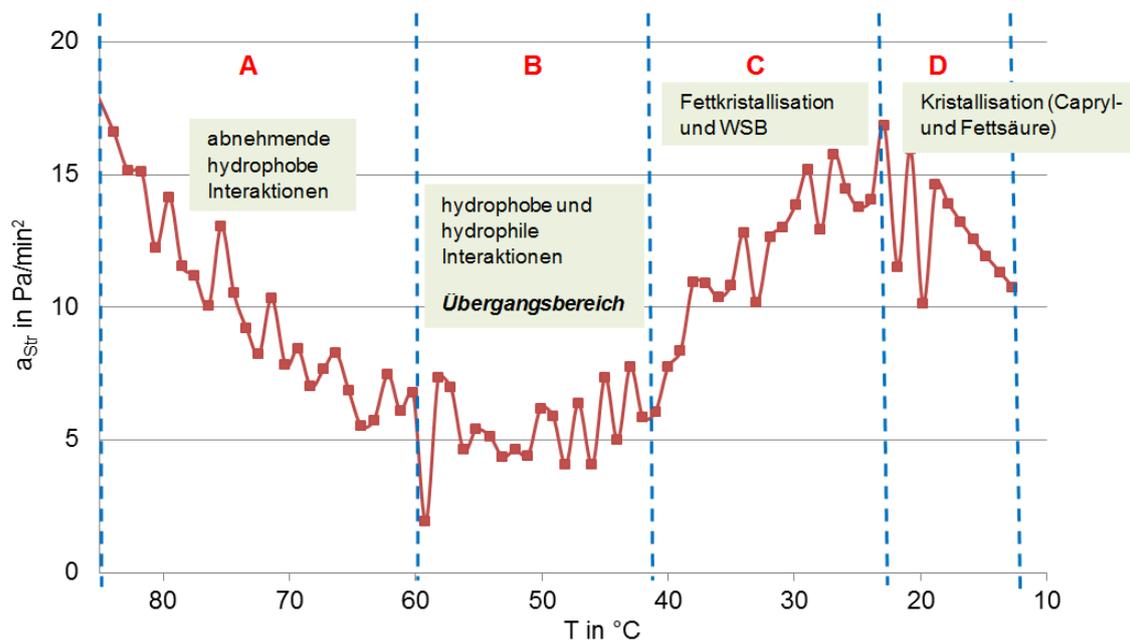


Abb. 6.6 Strukturbildungsbeschleunigung der Probe mit 17 % Labkasein

6.1.4 Frequenzweepmessungen

Abb. 6.7 zeigt Frequenzweepmessungen für die Analogkäseprobe mit einer Labkaseinkonzentration von 17 % und bei Temperaturen von 80, 60 und 40 °C. In Abb. 6.8 erfolgt eine vergleichbare Darstellung der Frequenzweepmessungen der Labkaseinkonzentrationsabhängigen Proben bei einer Temperatur von 80 °C.

In Abb. 6.7 sowie Abb. 12.3 im Anhang weisen sowohl der Speicher- als auch die Verlustmodul bei niedrigeren Temperaturen höhere Werte auf. Begründet werden kann dieser Effekt durch die abkühlungsbedingte Strukturverfestigung. Über den gesamten Messbereich ist ein frequenzabhängiger Anstieg von Speicher- und Verlustmodul zu erkennen, was typisch für eine Dispersionsstruktur ist. Von der Formulierung her liegt fettseitig (20 % Fettanteil) eine Emulsionsstruktur vor. Kaseinbezogen liegt für die Wasserbindung (60 % Wasseranteil) eine Lebensmittelsuspension vor.

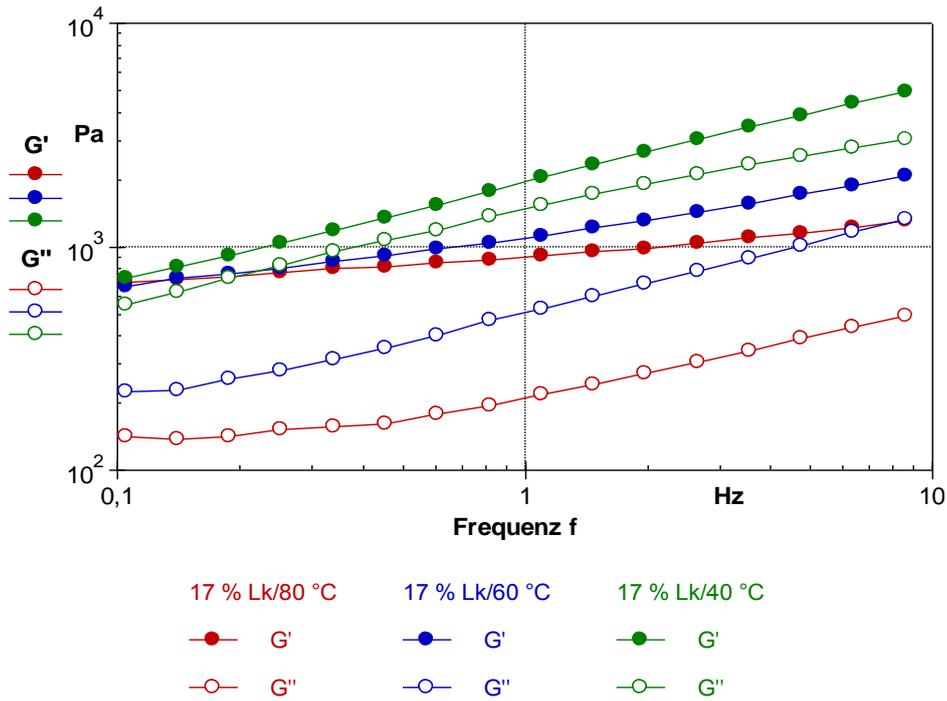


Abb. 6.7 Frequenzsweepmessungen 17 % Labkasein/ 80, 60 und 40 °C

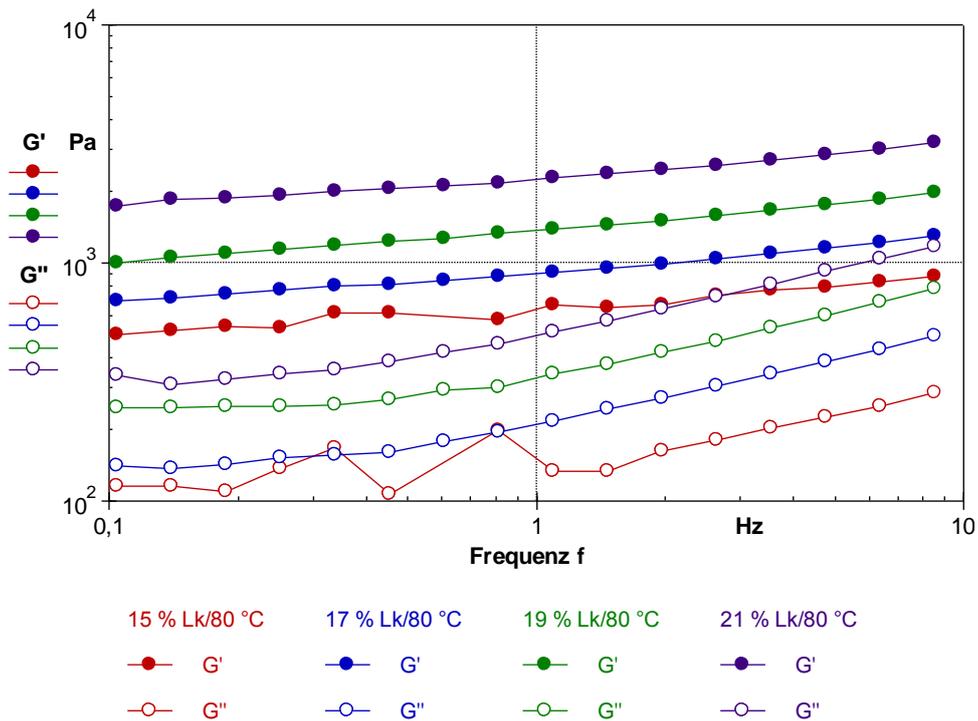


Abb. 6.8 Frequenzsweepmessungen $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %/ 80 °C

Zur mathematischen Beschreibung der Kurvenverläufe der Frequenzsweepmessungen wurden Potenzfunktionen im Frequenzband 0,1 – 10 Hz regressiert. Man unterscheidet in den Regressionsgleichungen (Gl. 6.4 und Gl. 6.5) zwischen den Koeffizienten G'_{pot} und G''_{pot} sowie den Exponenten des frequenzabhängigen Strukturaufbaus x und y . In Tab. 6.4 ist eine Zusammenstellung der Regressionsdaten in Abhängigkeit von der Temperatur und Labkaseinkonzentration aufgeführt.

$$G'(f) = G'_{\text{pot}} \cdot f^x \quad \text{in Pa} \quad \text{Gl. 6.4}$$

$$G''(f) = G''_{\text{pot}} \cdot f^y \quad \text{in Pa} \quad \text{Gl. 6.5}$$

Je größer der Wert der nach Gl. 6.4 und Gl. 6.5 berechneten Exponenten ist, desto steiler ist der Anstieg und desto größer ist der frequenzabhängige Strukturaufbau der untersuchten Probe und die Abweichung von einer Gelstruktur. Der Koeffizient gibt Auskunft über den Ausgangsstrukturlevel der dynamischen Moduli bei der Messfrequenz 0,1 Hz.

Wie anhand von Tab. 6.4 zu erkennen ist, nehmen die Werte der Koeffizienten bei allen Proben mit sinkender Temperatur als Effekt der Abkühlung und ebenfalls mit steigender Labkaseinkonzentration als Effekt der verstärkten Protein-Interaktionen mit dem Fett und Wasser ab.

Tab. 6.4 Frequenzabhängiger Strukturaufbau der Analogkäseproben, $15 \leq c_{\text{Lk}} \leq 21 \%$

c_{Lk} %	Regressionsdaten	Temperatur in °C		
		40	60	80
15	G'_{pot}	832	662	643
	x	0,4339	0,2145	0,1215
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,98	0,88
	G''_{pot}	634	213	155
	y	0,4487	0,3593	0,1979
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,97	0,82
17	G'_{pot}	1931	1133	919
	x	0,4436	0,2540	0,1390
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	1410	516	229
	y	0,3908	0,3822	0,3025
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,96
19	G'_{pot}	3701	1840	1386
	x	0,4374	0,2772	0,1477
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	2540	895	370
	y	0,3274	0,3091	0,2734
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,97
21	G'_{pot}	5905	2494	2304
	x	0,4066	0,2733	0,1318
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,98
	G''_{pot}	3677	1161	538
	y	0,2889*	0,4368	0,3115
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,96

* Messartefakt

6.2 Einfluss des Schmelzsalzanteils

6.2.1 Amplitudensweepmessungen

Amplitudensweepmessungen wurden für die Analogkäseproben mit einem konstanten Labkaseinanteil von 17 % und unterschiedlichen Schmelzsalkonzentrationen $1,2 \leq c_{\text{SS}} \leq 3,0 \%$ mit $\Delta c_{\text{SS}} = 0,6 \%$ (Schmelzsatz hier JOHA[®] S9) bei 80, 60 sowie 40 °C durchgeführt. Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 6.9 am exemplarischen Beispiel von 2,4 % Schmelzsatz in der

Originalmesskurve dargestellt. Ein ausgeprägter linear viskoelastischer Bereich bis zu $\gamma = 0,01$ (siehe auch Abb. 12.4 im Anhang) ist zu erkennen.

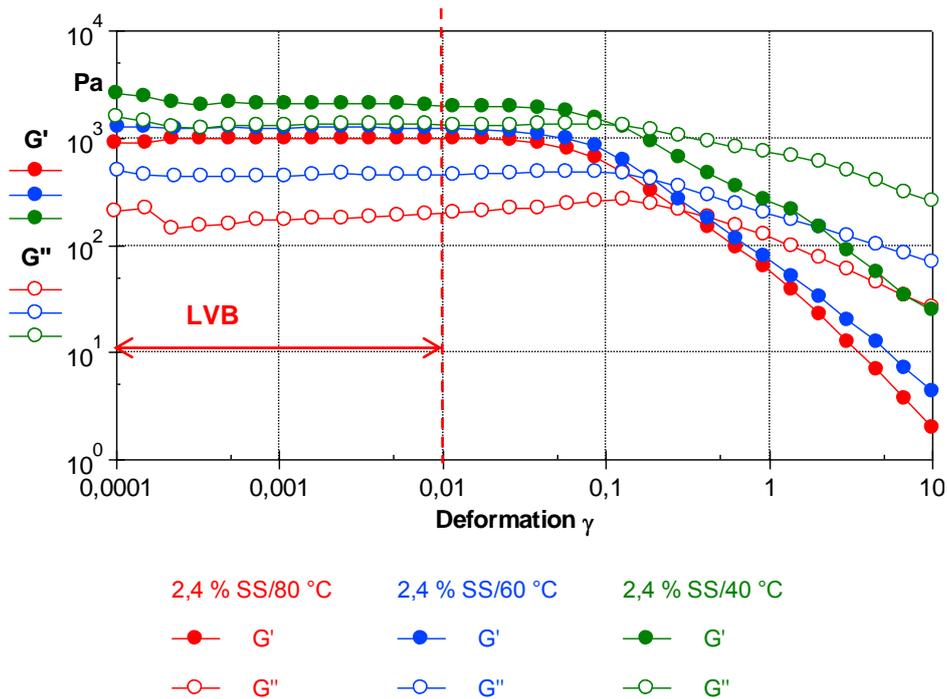


Abb. 6.9 Amplitudensweepmessungen 2,4 % Schmelzsalz/ 80, 60 und 40 °C

6.2.2 Temperatursweepmessungen

In der nachstehenden Abbildung ist der Einfluss der Schmelzsalzkonzentration auf die Strukturausbildung dargestellt.

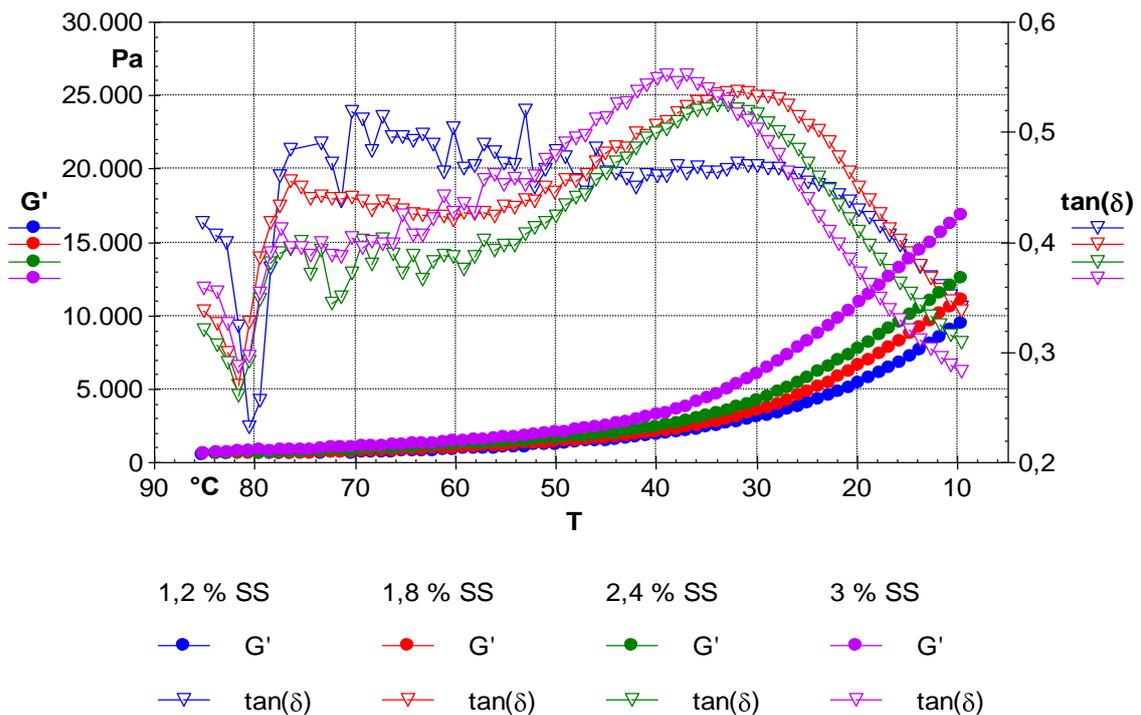


Abb. 6.10 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Schmelzsalzanteil $1,2 \leq c_{SS} \leq 3,0$ %

In Analogie zum Einfluss des Labkaseinanteils erfolgt eine Zusammenstellung der wichtigsten materialwissenschaftlichen Kennwerte der bereits bekannten Peaks sowie des Anfangs- und Endlevels in Abhängigkeit vom Schmelzsalzanteil c_{SS} in Tab. 6.5.

Tab. 6.5 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom Schmelzsalzanteil

c_{SS} %	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	tan δ –
1,2	Anfangslevel	85	552	231	0,418
	Peak 1	81	762	177	0,232
	Peak 2	–	–	–	–
	Endlevel	10	9496\8975*	3240	0,342
1,8	Anfangslevel	85	579	199	0,344
	Peak 1	82	634	171	0,270
	Peak 2	32	3123	1680	0,537
	Endlevel	10	11115\11319*	3750	0,337
2,4	Anfangslevel	85	588	188	0,320
	Peak 1	82	658	171	0,260
	Peak 2	33	3320	1740	0,524
	Endlevel	10	12513\13662*	3860	0,309
3,0	Anfangslevel	85	635	227	0,357
	Peak 1	82	751	216	0,287
	Peak 2	39	3388	1870	0,551
	Endlevel	10	16843\16006*	4750	0,282

* berechnet nach Gl. 6.6, grüne Markierung: technologisches Optimum, rote Markierung: unterkritische c_{SS}

Folgende lineare Korrelation als Trendgleichung kann zwischen G' und c_{SS} für die Endlevels abgeleitet werden:

$$G'(c_{SS}) = 3906 \cdot c_{SS} + 4288 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,92 ; i = 4 \quad \text{Gl. 6.6}$$

Wie aus Abb. 6.10 zu erkennen ist, steigen die G' -Werte am Ende der Messung mit zunehmender Schmelzsalzkonzentration aufgrund der erhöhten Ionenstärke der Natrium- und Phosphatgruppen in der Analogkäsemischung an. Je höher die Ionenstärke der genannten Gruppen sind, desto höher sind die Wechselwirkungen in der Matrix als verbesserte Kaseinlöslichkeit durch Na^+ -Ionen und Zuordnung der Phosphatgruppen zum Kaseinspektrum. Gleiche Aussagen wurden durch [133] gefunden. Außerdem verschiebt sich das absolute Maximum (Peak 2) des $\tan \delta$ zu höheren Temperaturen bei Erhöhung der Schmelzsalzkonzentration (siehe Abb. 6.10). Dadurch ist eine Verbesserung fester Emulsionsbildung und des viskoelastischen Verhaltens infolge verstärkter Wasserbindungskapazität des Kaseins bei höheren Temperaturen nachzuweisen.

Anhand der $\tan \delta$ -Kurven lag bei 1,2 % Schmelzsalzanteil kein gesicherter Strukturaufbau vor. Dies erkennt man durch den indifferenten hohen Level des $\tan \delta$ bei ca. 70 °C. Ab einer Konzentration von 1,8 % werden akzeptable Imitate hergestellt.

Bei einem konstanten Labkaseingehalt von 17 % bildete sich die Schmelzsalzkonzentration als wichtige Komponente für die Strukturausbildung heraus. Eine nahezu Verdopplung des Speichermoduls und damit der Festkörpereigenschaften wurde bei der Erhöhung von 1,2 auf 3,0 % festgestellt (Bezugstemperatur 10 °C, siehe Tab. 6.5).

6.2.3 Strukturbildungsgeschwindigkeit

Unter Verwendung von Gl. 6.2 wurde die Strukturbildungsgeschwindigkeit ermittelt. In Abb. 6.11 ist die Strukturbildungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Schmelzsalzanteil nach dem exponentiellen Glätteverfahren mit einem Glättungsparameter von 0,85 dargestellt.

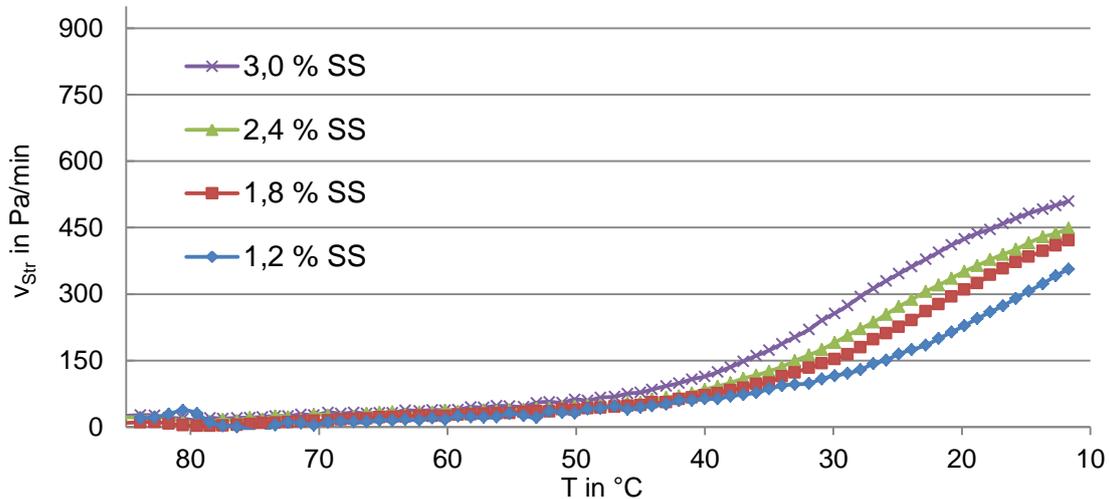


Abb. 6.11 Schmelzsalzkonzentrationsabhängige Strukturbildungsgeschwindigkeit

Der Kurvenverlauf der v_{Str} mit Ausnahme der Probe mit 1,2 % Schmelzsalzanteil kann ebenso wie beim Einfluss des Labkaseinanteils (siehe 6.1.3) in vier Bereiche (A, B, C und D) eingeteilt werden. In Tab. 6.6 sind die charakteristischen Grenzpunkte der abgebildeten v_{Str} Bereiche in Abhängigkeit von der Schmelzsalzkonzentration zusammengefasst.

Tab. 6.6 Grenzpunkte der Strukturierungsbereiche, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3 \%$

c_{SS} %	T_1 °C	v_{Str1} Pa/min	T_2 °C	v_{Str2} Pa/min	T_3 °C	v_{Str3} Pa/min	T_{End} °C	v_{StrEnd} Pa/min
1,2	60	17	23	185	–	–	12	356
1,8	60	25	28	180	18	344	12	421
2,4	60	28	31	175	19	364	12	448
3,0	60	35	37	168	20	479	12	562

Anhand von Abb. 6.11 ist erkennbar, dass mit abnehmendem Schmelzsalzanteil die Strukturbildungsgeschwindigkeit absinkt. Die v_{Str} -Werte der Proben mit 2,4 und 1,8 % SS liegen nahe bei einander.

Als Schlussfolgerung wird eine Mindestkonzentration des verwendeten Schmelzsalzes von 2,1 % vorgeschlagen. Dieser Vorschlag geht mit dem Trend der Reduzierung des Natriumgehaltes in Lebensmitteln aus Gesundheitsaspekten konform [141; 142; 143], stellt jedoch nicht das technologische Optimum für die Strukturausbildung dar.

6.2.4 Frequenzsweepmessungen

Die Frequenzsweepmessungen der Proben wurden bei 80, 60 und 40 °C (siehe Abb. 6.12 und auch Abb. 12.4 im Anhang) durchgeführt. In Tab. 6.7 ist eine Zusammenstellung der Regres-

sionsdaten (Gl. 6.4 und Gl. 6.5) im Frequenzband 0,1 – 10 Hz in Abhängigkeit von der Temperatur und Schmelzsalkonzentration aufgeführt.

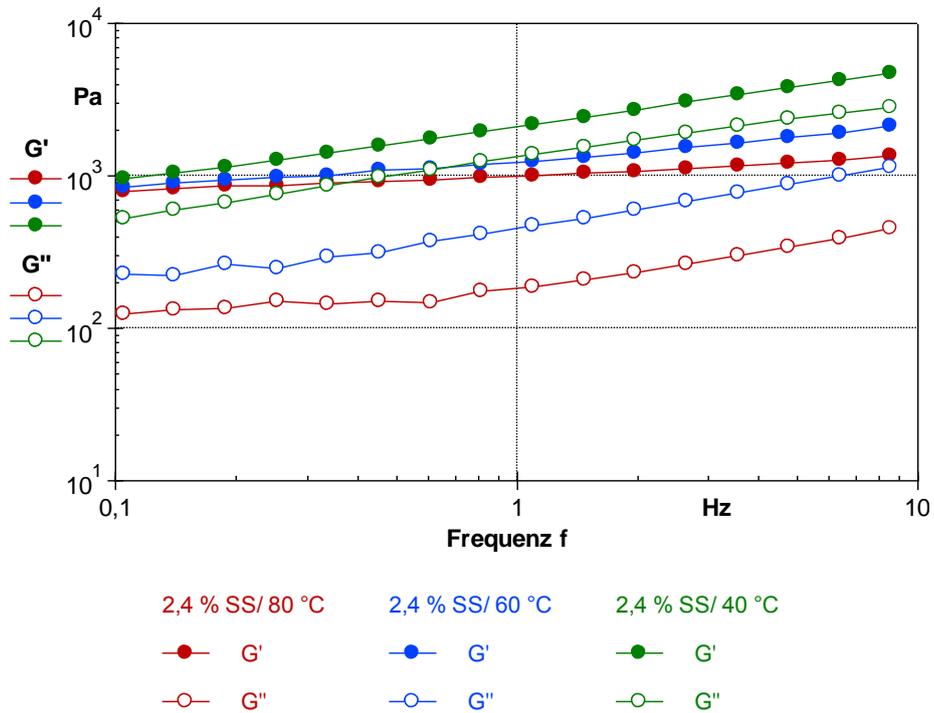


Abb. 6.12 Frequenzsweepmessungen 2,4 % Schmelzsatz/ 80, 60 und 40 °C

Tab. 6.7 Frequenzabhängiger Strukturaufbau der Analogkäseproben, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3 \%$

c _{SS} %	Regressionsdaten	Temperatur in °C		
		40	60	80
1,2	G' _{pot}	1753	1143	963
	x	0.2026	0,1680	0,2847*
	R ² (Gl. 6.4)	0.99	0,99	0,48**
	G'' _{pot}	620	335	271
	y	0,2979	0,2254	0,0642
	R ² (Gl. 6.5)	0,99	0,94	0,34**
1,8	G' _{pot}	1904	1132	1208
	x	0.3579	0,1893	0,1421
	R ² (Gl. 6.4)	0.99	0,98	0,80
	G'' _{pot}	1133	385	261
	y	0,3622	0,3502	0,1159
	R ² (Gl. 6.5)	0,99	0,97	0,47**
2,4	G' _{pot}	2121	1276	1013
	x	0,3688	0,2028	0,1139
	R ² (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,98
	G'' _{pot}	1298	465	205
	y	0,3851	0,3672	0,2871
	R ² (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,93
3,0	G' _{pot}	1931	1133	919
	x	0,4436	0,2540	0,1390
	R ² (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G'' _{pot}	1410	516	229
	y	0,3908	0,3820	0,3025
	R ² (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,96

* Messartefakt, ** Ungleichung, rote Markierung: unterkritische c_{SS}

Die G' - und G'' -kurven bei gleicher Messtemperatur verlaufen nahezu parallel mit einem frequenzabhängigen Anstieg, was ein Hinweis auf eine vorliegende Dispersionsstruktur ist.

Anhand von Tab. 6.7 nehmen die Exponenten x und y mit Erhöhung der Schmelzsalzkonzentration und Reduzierung der Temperatur zu und belegen einen erhöhten Anstieg der Speicher- und Verlustmodulverläufe.

6.3 Einfluss des Fettgehaltes

6.3.1 Amplitudensweepmessungen

Das Kokosfett wurde als Ersatz für das Milchfett verwendet. Die Amplitudensweepmessungen wurden für die Proben mit 17 % Labkaseinanteil, 2,1 % Schmelzsalzanteil und unterschiedlichen Fettgehalten $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ % mit $\Delta c_{FIT} = 5$ % bei 80, 60 sowie 40 °C durchgeführt. Ein ausgeprägter linear viskoelastischer Bereich wurde bis zu $\gamma = 0,01$ (siehe Abb. 6.13 und Abb. 12.5) festgestellt.

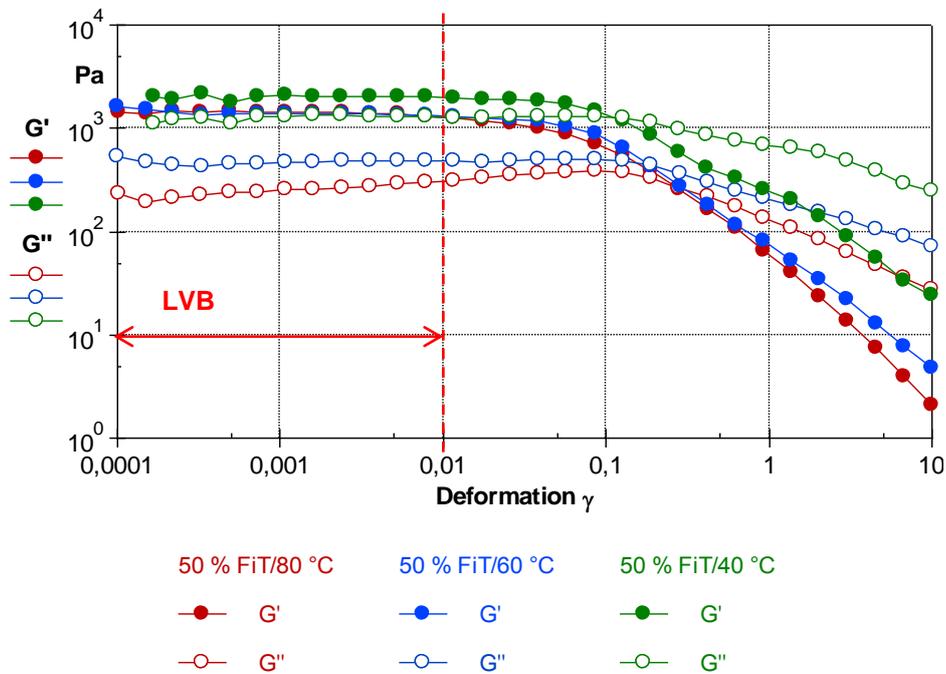


Abb. 6.13 Amplitudensweepmessungen 50 % FIT/ 80, 60 und 40 °C

6.3.2 Temperatursweepmessungen

In Abb. 6.14 sind die fettgehaltsabhängigen Verläufe des G' und $\tan \delta$ aufgeführt. Eine fettgehaltsabhängige Zusammenstellung der wichtigsten materialwissenschaftlichen Kennwerte der Peaks sowie des Anfangs- und Endlevels erfolgt in Tab. 6.8.

Je höher der Fettgehalt in Analogkäse ist, desto größere Levels des Speichermoduls werden für die Matrix ermittelt. Der Speichermodul nimmt für die Endlevels mit steigendem Fettgehalt nach der linearen Trendgleichung Gl. 6.7 zu.

$$G'(c_{FIT}) = 582,84 \cdot c_{FIT} - 16598 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,95 ; i = 4$$

Gl. 6.7

Je höher der Fettgehalt in Analogkäse ist, desto höhere Festkörpereigenschaften weist die finale Käsematrix auf.

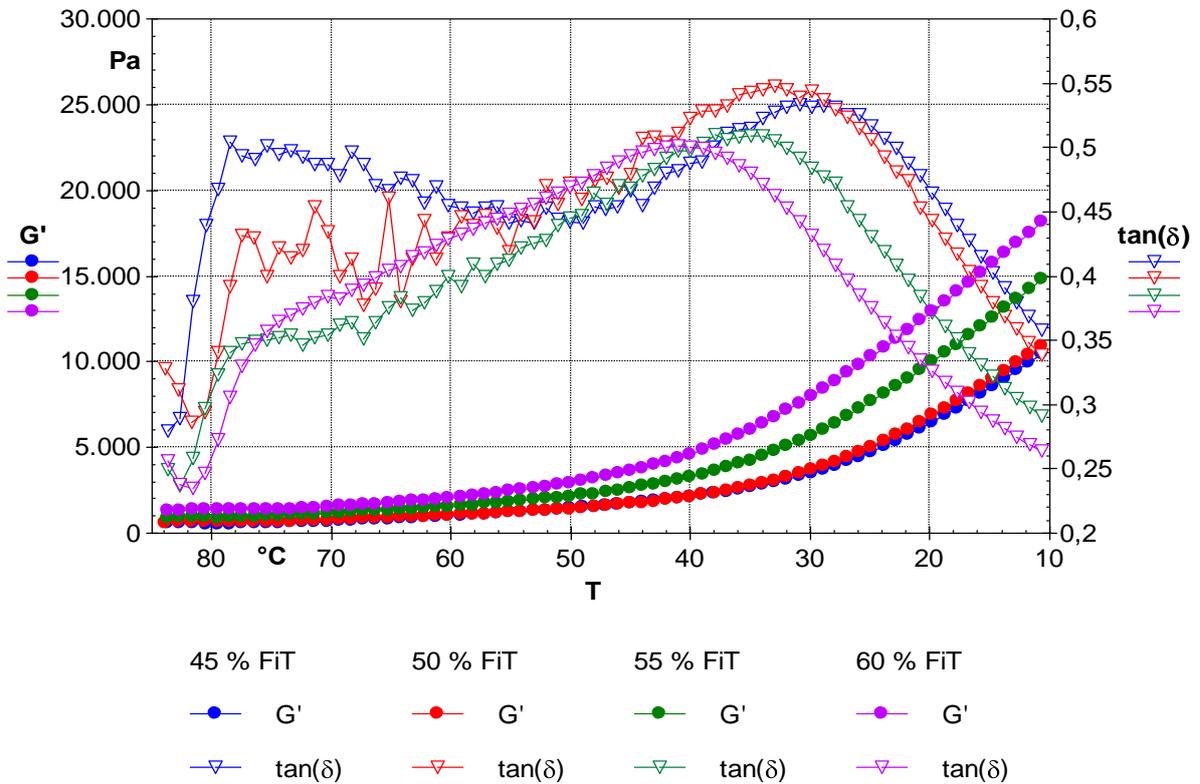


Abb. 6.14 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Fettgehalt $45 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$

Tab. 6.8 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom Fettgehalt

c_{FIT} %	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	$\tan \delta$ -
45	Anfangslevel	85	573	187	0,327
	Peak 1	-	-	-	-
	Peak 2	31	3315	1766	0,533
	Endlevel	10	10427\9630*	3730	0,358
50	Anfangslevel	85	594	195	0,329
	Peak 1	82	654	187	0,286
	Peak 2	33	3061	1677	0,548
	Endlevel	10	11377\12544*	3745	0,329
55	Anfangslevel	85	893	230	0,257
	Peak 1	83	923	219	0,237
	Peak 2	35	4240	2160	0,509
	Endlevel	10	15400\15458*	4370	0,285
60	Anfangslevel	85	1280	336	0,263
	Peak 1	82	1370	323	0,235
	Peak 2	41	4370	2190	0,501
	Endlevel	10	18800\18372*	4860	0,258

* berechnet nach Gl. 6.7 rote Markierung: unterkritische c_{FIT}

Die Probe mit 45 % FiT weist anhand des $\tan \delta$ bis ca. 80 °C einen geringeren Strukturaufbau im Vergleich mit den anderen Proben auf und stellt somit einen unterkritischen Fettgehalt dar. Die entscheidende Differenzierung im Kurvenverlauf des G' findet bei $T < 50$ °C statt und wird durch die Fettkristallisation verstärkt.

Am Beispiel des $\tan \delta$ -Verlaufs werden die gleichen Strukturbildungsabschnitte und Peakausbildung mit Ausnahme (45 % FiT) wiedergefunden und der generelle Mechanismus bestätigt. Außerdem ist eine Verschiebung des absoluten Maximums mit zunehmendem Fettgehalt in Richtung höherer Temperaturen erkennbar. Dies ist wiederum ein Hinweis auf die steigenden Protein-Fett-Interaktionen.

Die Formulierung sollte einen Mindestgehalt des verwendeten Kokosfettes von 50 % FiT (20 % Fett absolut) nicht unterschreiten.

6.3.3 Strukturbildungsgeschwindigkeit

Es wurde nach Gl. 6.2 die Strukturbildungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fettgehalt ermittelt. Die v_{Str} -Verläufe sind nach dem exponentiellen Glätteverfahren mit einem Glättungsparameter von 0,85 in Abb. 6.15 aufgeführt.

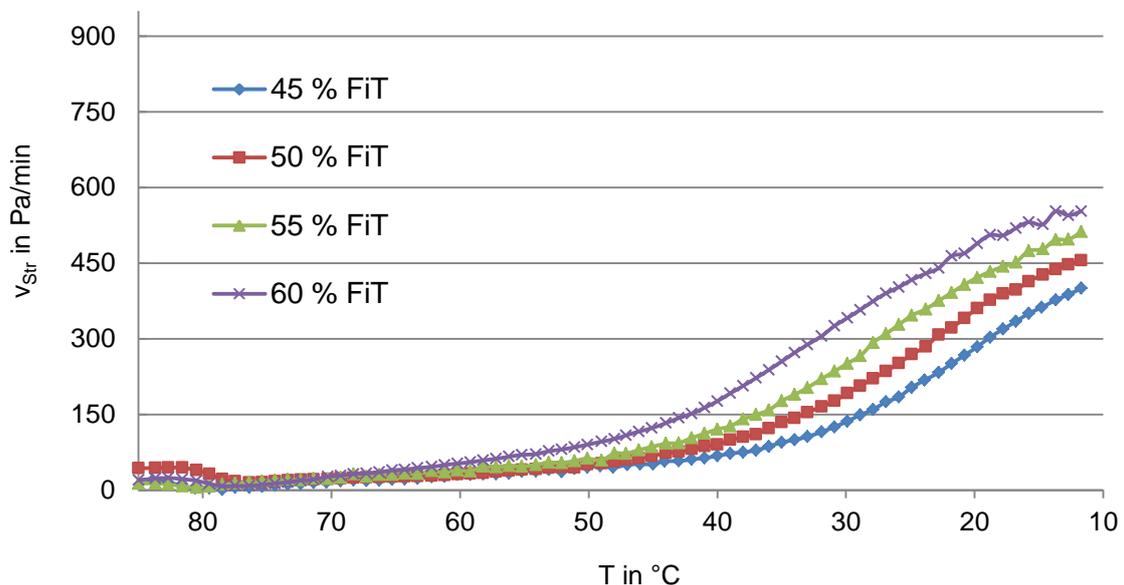


Abb. 6.15 Fettgehaltsabhängige Strukturbildungsgeschwindigkeit

Der Verlauf der Strukturbildungsgeschwindigkeit kann wie bei den labkasein- und Schmelzsatzabhängigen Proben in vier Bereichen (A, B, C und D) differenziert werden. Die charakteristischen Grenzpunkte der v_{Str} Bereiche in Abhängigkeit vom Fettgehalt wurden in Tab. 6.9 aufgeführt. Die Strukturbildungsgeschwindigkeit erhöht sich mit zunehmendem Fettgehalt und somit trägt die Verwendung von Kokosfett zur Verbesserung der Strukturausbildung bei.

Tab. 6.9 Grenzpunkte der Strukturierungsbereiche, $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %

c_{FIT} %	T_1 °C	v_{Str1} Pa/min	T_2 °C	v_{Str2} Pa/min	T_3 °C	v_{Str3} Pa/min	T_{End} °C	v_{StrEnd} Pa/min
45	60	28	28	160	16	350	12	400
50	60	31	30	177	18	377	12	455
55	60	39	33	189	18	433	12	512
60	71	21	39	176	18	506	12	553

6.3.4 Frequenzweepmessungen

Anhand der Frequenzweeps (siehe Abb. 6.16 und Abb. 12.5) wurde eine Dispersionsstruktur bestätigt. Eine Zusammenstellung der Regressionsdaten (Gl. 6.4 und Gl. 6.5) im Frequenzband 0,1 – 10 Hz in Abhängigkeit vom Fettgehalt und der Temperatur erfolgt in Tab. 6.10.

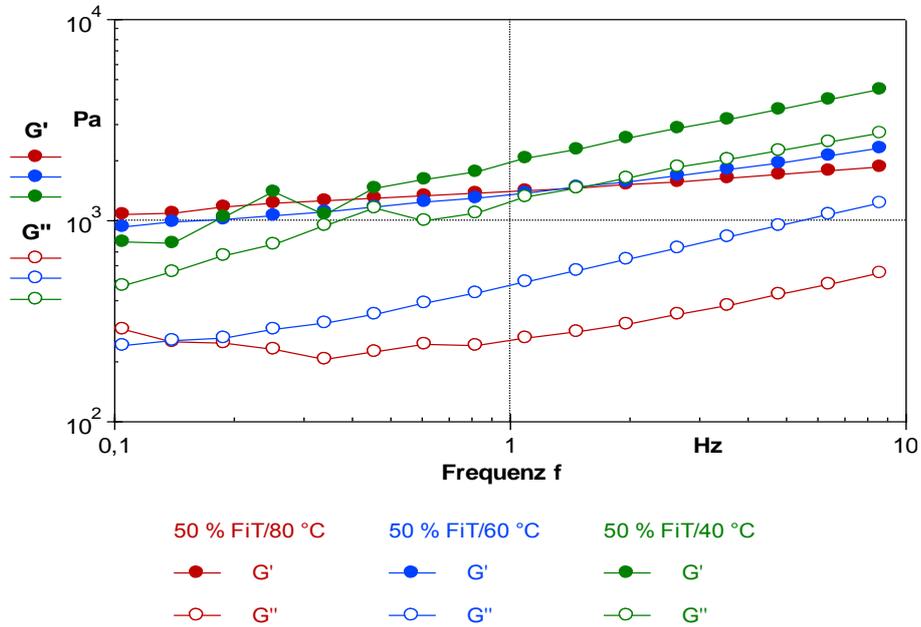


Abb. 6.16 Frequenzweepmessungen 50 % FiT/ 80, 60 und 40 °C

Tab. 6.10 Frequenzabhängiger Strukturaufbau der Analogkäseproben, $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %

c _{FIT} %	Regressionsdaten	Temperatur in °C		
		40	60	80
45	G' _{pot}	1213	1084	1007
	x	0,3628	0,1789	0,1147
	R ² (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G'' _{pot}	764	275	217
	y	0,4330	0,3640	0,1195
50	R ² (Gl. 6.5)	0,99	0,98	0,55*
	G' _{pot}	1931	1400	1307
	x	0,3985	0,2014	0,1182
	R ² (Gl. 6.4)	0,98	0,99	0,98
	G'' _{pot}	1256	499	299
55	y	0,3766	0,3867	0,1729
	R ² (Gl. 6.5)	0,98	0,99	0,68*
	G' _{pot}	2390	1433	1783
	x	0,3742	0,2270	0,1421
	R ² (Gl. 6.4)	0,99	0,98	0,80
60	G'' _{pot}	1442	579	454
	y	0,3547	0,3564	0,31721
	R ² (Gl. 6.5)	0,99	0,98	0,74*
	G' _{pot}	2310	2292	1830
	x	0,2845	0,2484	0,1633
60	R ² (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,98*
	G'' _{pot}	4141	989	527
	y	0,3575	0,3702	0,1777
	R ² (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,71*

* Ungleichung

6.4 Einfluss der Stärkekonzentration und -art

Der Einfluss von Stärkezugabe in die originäre Matrix wurde nachfolgend untersucht. Zur Erhöhung der Wasserbindung wurde Weizenstärke (S1) bei unterschiedlichen Konzentrationen ($0 \leq c_{S1} \leq 3\%$ mit $\Delta c_{S1} = 0,5\%$) nach der Formulierung in Tab. 4.7 verwendet. Anschließend wurden die Ergebnisse mit anderen botanischen Stärkearten (S2 Weizenstärke anderer Hersteller, S3 Maisstärke und S4 Kartoffelstärke) verglichen. Dabei muss beachtet werden, dass die Stärkezugabe ohne Reduzierung des Proteineinsatzes erfolgte.

Die je nach eingesetzter Stärkekonzentration entstehenden Strukturrelationen wurden mit Hilfe von Temperatursweepmessungen erfasst. In Abb. 6.17 erfolgt die Darstellung des Speichermoduls und Verlustfaktors für die Analogkäseproben mit Variation der Stärkekonzentration S1 im Bereich von 0 bis 3 %.

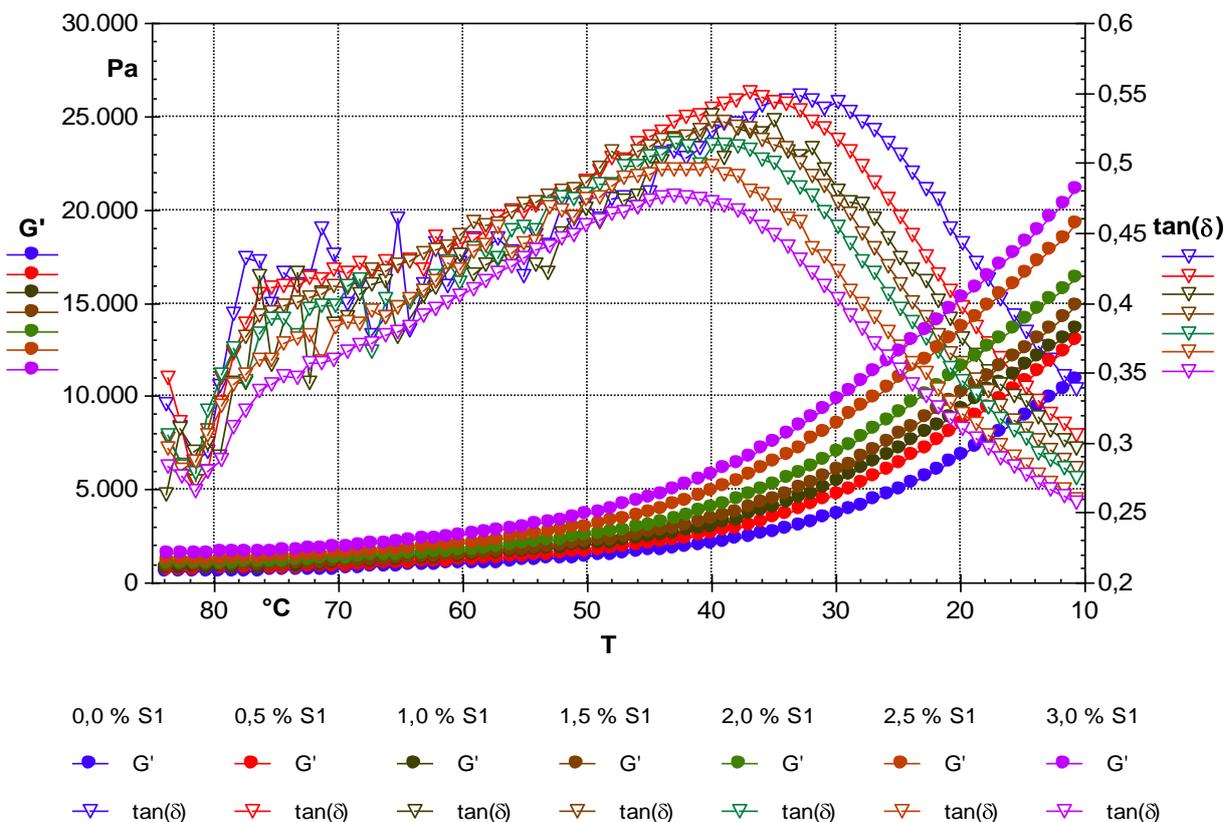


Abb. 6.17 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Stärkeanteil $0 \leq c_{S1} \leq 3\%$

Die strukturelle Ausbildung der Analogkäsemasse nach Stärkezugabe erfolgt analog der Mechanismen des Standardverlaufes ($c_{S1} = 0\%$). Die G' -Werte aller Proben steigen signifikant mit Stärkezugabe und sinkender Messtemperatur besonders $< 55\text{ °C}$ an. Durch die zusätzliche Stärkezugabe wird eine Erhöhung der Festkörpereigenschaften der Analogkäsematrix bewirkt [15; 238; 38]. Die Wasserimmobilisierung erfolgt durch die hydrophilen Interaktionen des Kaseins und infolge der bereits während des Vorprozesses erfolgten Stärkeverkleisterung. Anhand des $\tan \delta$ -Kurvenverlaufs ist ersichtlich, dass die Zunahme des Stärkeanteils eine Erhöhung der Strukturstabilität während der Abkühlung bewirkt. Des Weiteren verschiebt sich

Peak 2 in Richtung höherer Temperaturen (siehe Tab. 6.11), d. h. die Strukturstabilisierung erfolgt zeitlich und temperaturmäßig früher. Die G' -Kurven verlaufen nach der Stärkekonzentration differenziert übereinander.

Erklärbar ist dieser Verlauf durch die verstärkte Wasserimmobilisierung infolge der Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen. Die Zunahme des Stärkeanteils unterstützt das Labkasein bei der Wasserbindung. Dies führt zu einer stabileren Käsestruktur, so dass perspektivisch einen Teil des Labkaseins durch Stärke partiell ersetzt werden kann.

Die im Analogkäse enthaltene Stärke konnte über sensorische Kriterien wie Geruch und Geschmack nicht wahrgenommen werden.

Ein Überblick über die wichtigsten materialwissenschaftlichen Kennwerte mit steigendem Stärkeanteil ist in Tab. 6.11 dargestellt.

Tab. 6.11 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom Stärkeanteil

c_{S1} %	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	$\tan \delta$ –
0,0	Anfangslevel	85	594	195	0,329
	Peak 1	82	654	187	0,286
	Peak 2	33	3061	1677	0,548
	Endlevel	10	11377\11596*	3745	0,329
0,5	Anfangslevel	85	644	233	0,362
	Peak 1	82	747	204	0,273
	Peak 2	37	3100	1710	0,550
	Endlevel	10	13600\12863*	4050	0,299
1,0	Anfangslevel	85	697	246	0,353
	Peak 1	82	839	247	0,294
	Peak 2	38	3380	1770	0,525
	Endlevel	10	14200\14269*	4060	0,287
1,5	Anfangslevel	85	902	282	0,313
	Peak 1	82	951	260	0,273
	Peak 2	39	3620	1910	0,529
	Endlevel	10	15400\15827*	4240	0,275
2,0	Anfangslevel	85	1020	318	0,312
	Peak 1	82	1060	295	0,278
	Peak 2	40	4010	2060	0,513
	Endlevel	10	16800\17557*	4620	0,275
2,5	Anfangslevel	85	1180	354	0,301
	Peak 1	83	1230	354	0,287
	Peak 2	42	4430	2200	0,496
	Endlevel	10	20000\19476*	5100	0,256
3,0	Anfangslevel	85	1520	448	0,294
	Peak 1	82	1590	422	0,266
	Peak 2	43	5010	2390	0,477
	Endlevel	10	21900\21604*	5540	0,253

* berechnet nach Gl. 6.8 grüne Markierung: technologisches Optimum, rote Markierung: überkritische c_{S1}

Die Korrelation für G' in Abhängigkeit vom Stärkeanteil c_{S1} für die Endlevels ist eine Exponentialfunktion und lautet:

$$G'(c_{S1}) = 11596 \cdot e^{0,2074 \cdot c_{S1}} \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,98 ; i = 7 \quad \text{Gl. 6.8}$$

Bei einem 3 %igen Anteil von Weizenstärke war die entstandene Analogkäsemasse zu „fest“, da aufgrund einer überkritischen Stärkekonzentration der Speichermodullevel bei der Prozesstemperatur (85 °C) zu hoch (1520 Pa, mehr als doppelt so hoch wie bei der Standardprobe ohne Stärke) war. Eine zu starke Immobilisierung von Wasser durch die verkleisterte Stärke oder den gelierten Amyloseanteil kann zum Dehydratisieren der Proteinmatrix führen, was eine schlechtere Aufschmelzbarkeit zur Folge hat [15].

Ein Optimum der Strukturausbildung und Applikationseigenschaften wurde bei einer Stärkekonzentration von 2 bis 2,5 % gefunden. Aus diesem Grund wurden weitere Strukturuntersuchungen mittels Temperatursweepmessungen ausschließlich bei Stärkekonzentrationen von 2,0 und 2,5 % für die Stärkearten (S2, S3 und S4) durchgeführt.

In Abb. 6.18 und Abb. 6.19 wurde der Vergleich des Verlaufs der $\tan \delta$ -, G' - und G'' -Kurven in Abhängigkeit von der botanischen Herkunft bei den Stärkekonzentrationen von 2,0 % und 2,5 % dargestellt. In Tab. 6.12 sind die materialwissenschaftlichen Kennwerte der stärkehaltigen Analogkäseproben bei Peak 2 und Endlevel in Abhängigkeit von der botanischen Stärkeart bei einer Stärkekonzentration von 2,0 und 2,5 % zusammengestellt.

Tab. 6.12 Materialwissenschaftliche Kennwerte nach der botanischen Stärkeart

Stärkeart	c_s %	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	$\tan \delta$ –
S1	2,0	Peak 2	40	4010	2060	0,513
	2,0	Endlevel	10	16800	4620	0,275
	2,5	Peak 2	42	4430	2200	0,496
	2,5	Endlevel	10	20000	5100	0,256
S2	2,0	Peak 2	40	4344	2102	0,484
	2,0	Endlevel	10	16687	4461	0,267
	2,5	Peak 2	42	4480	2220	0,494
	2,5	Endlevel	10	19500	5020	0,257
S3	2,0	Peak 2	39	4150	2140	0,517
	2,0	Endlevel	10	17400	4630	0,266
	2,5	Peak 2	42	3920	2020	0,515
	2,5	Endlevel	10	19100	4990	0,261
S4	2,0	Peak 2	39	3030	1760	0,579
	2,0	Endlevel	10	14100	4190	0,296
	2,5	Peak 2	41	3370	1830	0,543
	2,5	Endlevel	10	15900	4520	0,284

rote Markierung: ungeeignete botanische Stärkeart

Aus Abb. 6.18 und Abb. 6.19 sowie Tab. 6.12 ist ersichtlich, dass der Abkühlverlauf von S3 (Maisstärke) ähnlich wie bei den S1 und S2 (Weizenstärke unterschiedlicher Produzenten) ist. Weizen- und Maisstärke bilden im Gegensatz zur Kartoffelstärke (S4) wesentlich stabilere Strukturen bei gleicher Konzentration aus. Als Ursache kommt die höhere Quellfähigkeit der Kartoffelstärke sowie die höhere Löslichkeit aufgrund der vorhandenen Phosphatmonoestergruppen in Frage [239; 240]. Folgendes Ranking der $\tan \delta$ -Werte am Peak 2 liegt vor: Kartoffelstärke > Maisstärke > Weizenstärke.

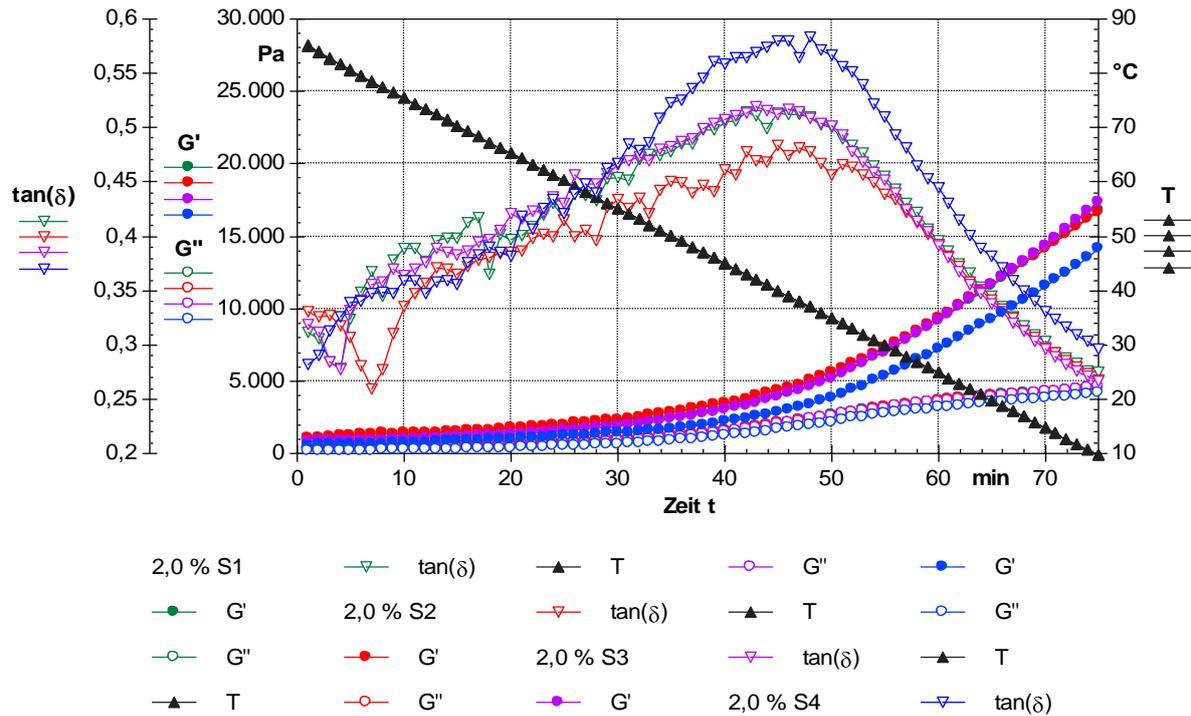


Abb. 6.18 Vergleich des Verlaufs G' , G'' sowie $\tan \delta$ von S1, S2, S3 und S4 bei 2,0 %

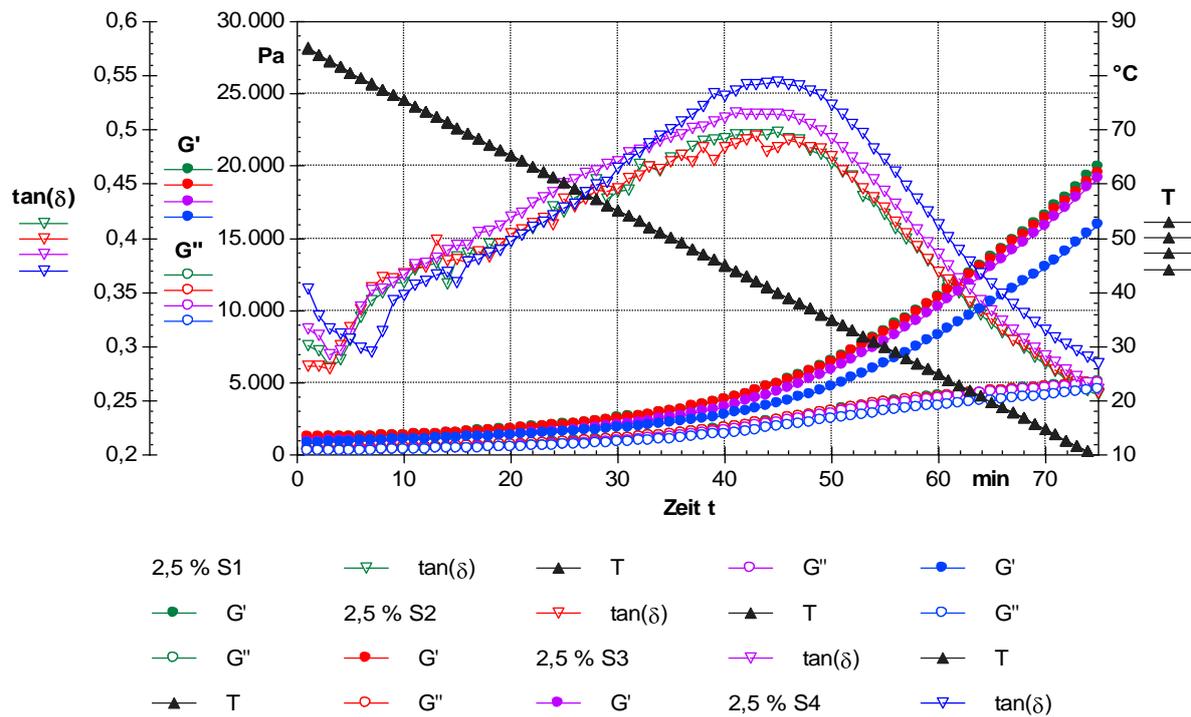


Abb. 6.19 Vergleich des Verlaufs G' , G'' sowie $\tan \delta$ von S1, S2, S3 und S4 bei 2,5 %

Durchgeführte Frequenzsweepmessungen bestätigen, dass durch den Einsatz von Stärke die Dispersionsstruktur der Analogkäsepräparation beibehalten wird (siehe Abb. 12.6 im Anhang). Eine Zusammenstellung der Regressionsdaten (Gl. 6.4 und Gl. 6.5) in Abhängigkeit von der Stärkeart ist in Tab. 12.6 im Anhang aufgeführt. Die Werte für den Koeffizienten G'_{pot} und G''_{pot} stiegen als Effekt der verstärkten Wasserimmobilisierung durch Stärkezugabe an.

6.5 Substitutionspotenzial für Labkasein

Es wurde versucht, Labkasein teilweise durch kostengünstigere Ingredienzien (Weizenstärke, micellares Kasein, Säurekasein und Sojaproteinisolat) zu substituieren. Als Ziel sollte tierisches Eiweiß minimiert, die Kosten reduziert und der Einfluss auf die Strukturausbildung bewertet werden.

6.5.1 Labkaseinsubstitution durch Weizenstärke

Das Labkasein wurde teilweise bis zu 50 % vom gesamten Proteinanteil in der Analogkäsepräparation (hier 17 %) durch Weizenstärke S2 (siehe Tab. 4.7) substituiert und die strukturellen Veränderungen mit Hilfe der Temperatursweepmessungen ermittelt und bewertet. In Abb. 6.20 erfolgt die Darstellung des G' und G'' in Abhängigkeit der Lk:S2-Relation.

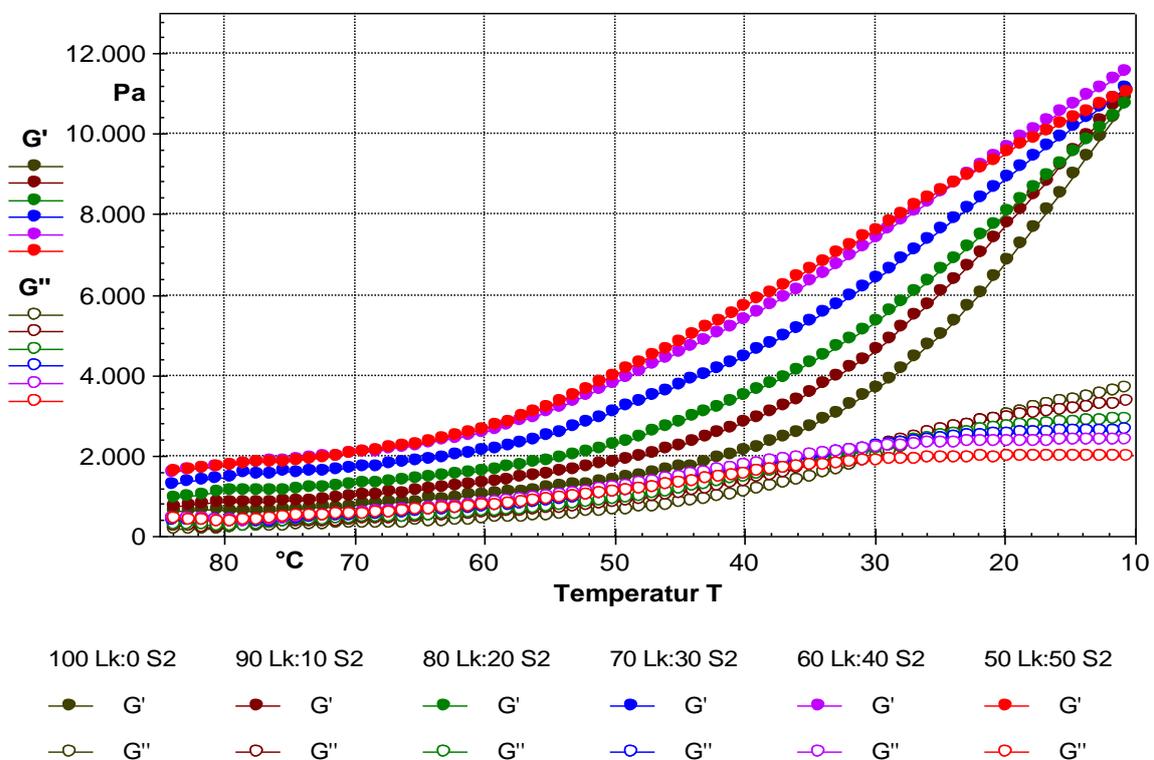


Abb. 6.20 Verlauf G' und G'' in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation

Anhand von Abb. 6.20 ist zu erkennen, dass die Speichermodulkurven bei der Endtemperatur (10 °C) mit einem relativ gleichem Level enden. Eine deutliche Differenzierung der G' -Kurven ist zwischen 20 und 60 °C ersichtlich. Je höher der Weizenstärkeanteil ist, desto höher sind die Festkörpereigenschaften im Temperaturbereich 60 – 20 °C aufgrund der zunehmenden Wasserimmobilisierung durch WSB sowie der Fettkristallisation.

Auffällig ist, dass die G'' -Kurven bei ca. 30 °C einen Schnittpunkt aufweisen und invers verlaufen. Nach Erreichen dieser Temperatur sinken die G'' -Werte mit zunehmendem Weizenstärkeanteil in der Relation Labkasein zu Weizenstärke ab. Die Fettkristallisation bei $T < 30$ °C dominiert die Strukturausbildung. Abb. 6.21 zeigt den Verlauf des $\tan \delta$ bei den verwendeten Relationen von Lk:S2.

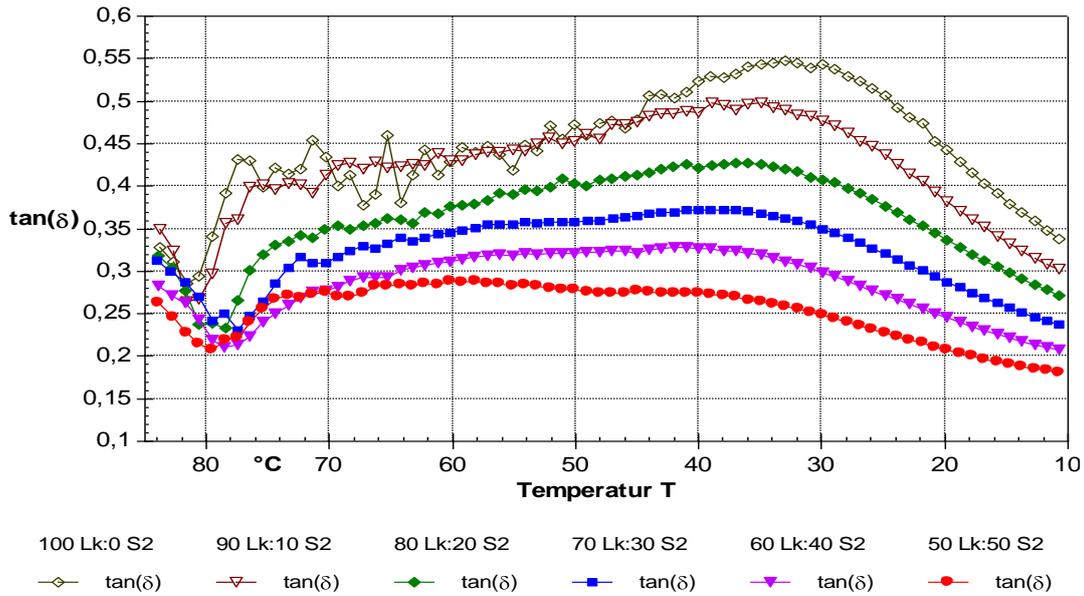


Abb. 6.21 Verlauf $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation

Durch verstärkte Wasserimmobilisierung kann die viskoelastische Relation alternierend erheblich beeinflusst werden. Anhand des $\tan \delta$ -Verlaufs ist erkennbar, dass mit zunehmendem Weizenstärkeanteil die Proben elastischer werden und der Peak 2 bei höheren Temperaturen einsetzt sowie die $\tan \delta$ -Kurven im Temperaturbereich 75 – 40 °C flacher werden. In Tab. 6.13 sind die materialwissenschaftlichen Kennwerte der Proben zusammengefasst.

Tab. 6.13 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation

Relation (Lk %:S2 %)	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	$\tan \delta$ –
100 Lk:0 S2	Anfangslevel	85	594	195	0,329
	Peak 1	82	654	187	0,286
	Peak 2	33	3061	1677	0,548
	Endlevel	10	11377	3745	0,329
90 Lk:10 S2	Anfangslevel	85	700	251	0,359
	Peak 1	82	821	217	0,264
	Peak 2	35	3584	1783	0,498
	Endlevel	10	11456	3387	0,296
80 Lk:20 S2	Anfangslevel	85	909	311	0,342
	Peak 1	81	1112	264	0,238
	Peak 2	37	3967	1697	0,428
	Endlevel	10	11040	2938	0,266
70 Lk:30 S2	Anfangslevel	85	1245	404	0,324
	Peak 1	80	1489	360	0,241
	Peak 2	39	4643	1728	0,372
	Endlevel	10	11392	2653	0,233
60 Lk:40 S2	Anfangslevel	85	1549	461	0,298
	Peak 1	79	1820	384	0,211
	Peak 2	41	5207	1708	0,328
	Endlevel	10	11676	2390	0,205
50 Lk:50 S2	Anfangslevel	85	1604	439	0,273
	Peak 1	80	1790	372	0,208
	Peak 2	–	–	–	–
	Endlevel	10	11199	2009	0,179

rote Markierung: überkritischer Weizenstärkeanteil

Bis zu einer Relation 60 Lk:40 S2 verbesserte sich die Strukturausbildung. Bei höheren Substitutionen kam es nahezu zur Ausbildung eines $\tan \delta$ -Plateaus zwischen ca. 75 und 40 °C aufgrund der Stärkeverkleisterung. Der Mechanismus der originären Strukturausbildung geht verloren.

6.5.2 Substitution von Labkasein durch micellares Kasein

Bei den Untersuchungen des Einflusses des Anteils eines micellaren Kaseins auf die Strukturausbildung wurden verschiedene Verhältnisse (Lk:mK) bei einem gesamten Proteinanteil GPA von 19 % nach Tab. 4.7 eingesetzt. Mit Hilfe der durchgeführten Temperatursweepmessungen wurde die Strukturausbildung erfasst und bewertet. Die Versuchsergebnisse aller Lk:mK-Relationen sind in Abb. 6.22 dargestellt.

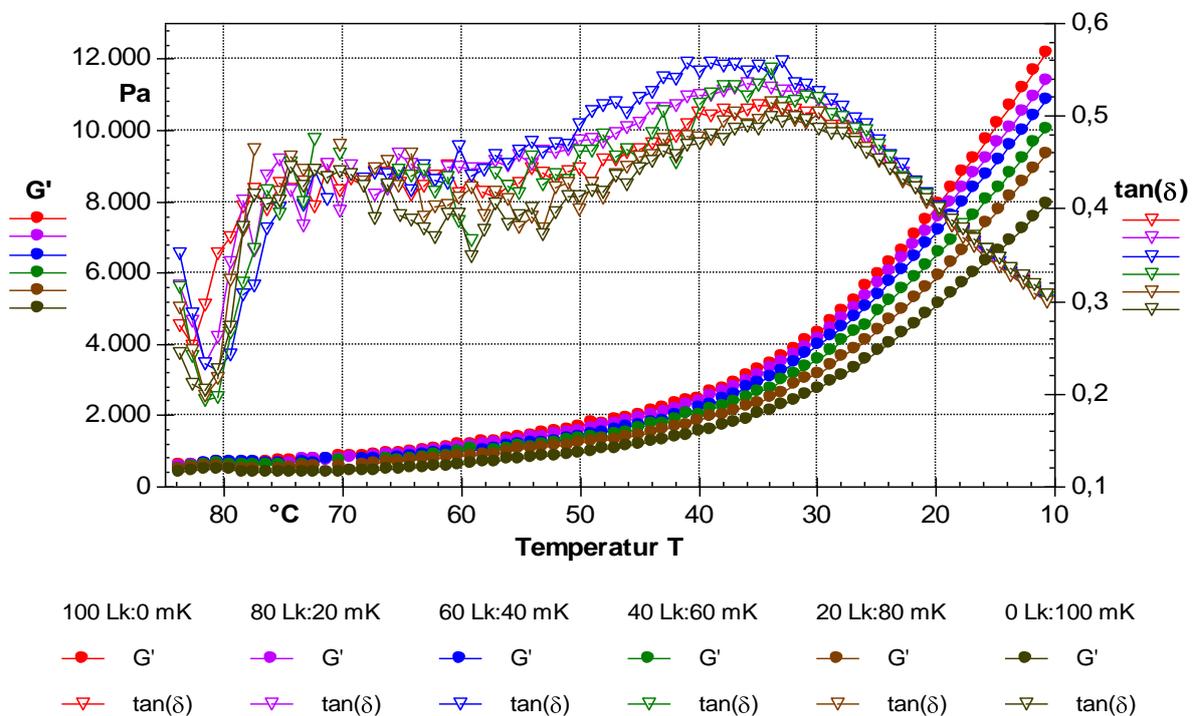


Abb. 6.22 G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:mK-Relation/ $0 \leq c_{mK} \leq 100$ % vom GPA

Die strukturelle Ausbildung der Analogkäseproben erfolgte relativ analog zu den Mechanismen des Standardverlaufes (ohne micellares Kasein).

Interessant ist, dass die Werte des $\tan \delta$ bei $T < 30$ °C weitgehend identisch sind (siehe Abb. 6.22), d. h. die Verwendung des micellaren Kaseins besaß keinen Einfluss auf die viskoelastische Relation im Endprodukt. Der Speichermodul sinkt mit Erhöhung des micellaren Kaseinanteils im Verhältnis zum Labkaseinanteil ab.

Bei 10 °C sinkt G' mit zunehmendem micellarem Kaseinanteil im GPA (19 %) linear ab:

$$G'(c_{mK}) = -41,3 \cdot c_{mK} + 12795 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,98 ; i = 6 \quad \text{Gl. 6.9}$$

Bei der Präparation der Proben mit micellaren Kaseinanteilen kam es während der Prozessierung zu einer Schaumbildung, da das verwendete micellare Kasein durch eine schonende

Membrantrenntechnologie produziert wurde und die nativen funktionellen Eigenschaften der Kaseinmicellen vorlagen. Außerdem enthält dieses Produkt Molkenproteine (siehe Tab. 4.2). Infolge des Lufteinschlags und der Schaumbildung schwächten sich Protein-Protein- und Protein-Fett-Interaktionen ab. Die Schaumbildung in den präparierten Proben führte zur Erhöhung ihres Volumens. Das Volumen nahm mit steigendem micellarem Kaseinanteil signifikant zu und mit (0 Lk:100 mK) war ca. 50 % höher als mit (100 Lk:0 mK).

In der nachstehenden Tabelle sind die materialwissenschaftlichen Kennwerte der Proben mit verschiedenen (Lk:mK)-Verhältnissen bei einem GPA von 19 % zusammengefasst.

Tab. 6.14 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Lk:mK-Relation

Relation (Lk %:mK %)	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	tan δ –
100 Lk:0 mK	Anfangslevel	85	606	178	0,293
	Peak 1	83	633	160	0,252
	Peak 2	35	3280	1677	0,511
	Endlevel	10	12702\12795*	3791	0,298
80 Lk:20 mK	Anfangslevel	85	523	182	0,349
	Peak 1	82	665	155	0,233
	Peak 2	36	2949	1577	0,535
	Endlevel	10	11834\11969*	3504	0,296
60 Lk:40 mK	Anfangslevel	85	447	180	0,403
	Peak 1	81	685	156	0,227
	Peak 2	35	2922	1620	0,554
	Endlevel	10	11269\11143*	3299	0,293
40 Lk:60 mK	Anfangslevel	85	444	160	0,631
	Peak 1	82	610	118	0,193
	Peak 2	35	2693	1437	0,534
	Endlevel	10	10479\10317*	3084	0,294
20 Lk:80 mK	Anfangslevel	85	416	149	0,359
	Peak 1	82	565	112	0,198
	Peak 2	34	2529	1299	0,514
	Endlevel	10	9781\9491*	2843	0,291
0 Lk:100 mK	Anfangslevel	85	376	114	0,303
	Peak 1	82	479	98	0,204
	Peak 2	34	2159	1075	0,498
	Endlevel	10	8305\8665*	2485	0,299

* berechnet nach Gl. 6.9, keine kritische Lk:mK-Relation

Da das verwendete micellare Kasein bedeutende Anteile von Laktose und Molkenproteine enthält (siehe Tab. 4.2), wurde die Hitzestabilität der Analogkäseproben untersucht. Hierfür wurde nach 24 h Lagerung im Kühlschrank (6 °C) ein Probenmodell 2 x 2 x 2 cm³ entnommen und im Ofen für 15 min bei 180 °C erhitzt.

Je höher der Anteil des micellaren Kaseins ist, desto intensiver ist aufgrund der zunehmenden Intensität der Maillardreaktion die braune Oberflächenfärbung der Analogkäseprobe (siehe Abb. 6.23). Bis zu (40 Lk:60 mK) bildete sich eine gute goldene Färbung aus. Ab einem Verhältnis von (20 Lk:80 mK) entstand eine dunkelbraune Oberfläche. Diese kann nicht mehr als Pizzabelag verwendet werden, sondern eher in Richtung Grillkäse mit einem höheren ernährungsphysiologischen Wert durch Molkenproteine.

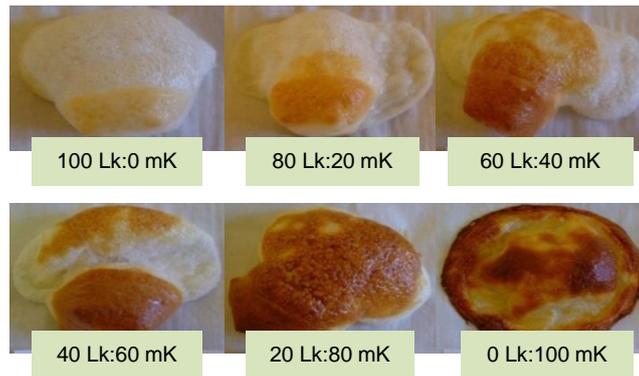


Abb. 6.23 Hitzestabilität in Abhängigkeit der (Lk:mK)-Relation

Eine Dispersionsstruktur wurde bei allen micellares Kasein enthaltenen Proben beibehalten (siehe Abb. 12.7 im Anhang). In Tab. 12.7. im Anhang erfolgte eine Zusammenstellung der materialwissenschaftlichen Kennwerte in Abhängigkeit vom Anteil des micellaren Kaseins im GPA (19 %). Die Koeffizienten G'_{pot} und G''_{pot} sanken mit zunehmendem Anteil des micellaren Kaseins infolge der Schaumstruktur ab. **Beim Einsatz von micellarem Kasein wurde keine kritische Konzentration festgestellt**, die Applikationseigenschaften aber verändert.

6.5.3 Substitution von Labkasein durch Säurekasein

Mit einem konstanten Gesamtproteinanteil (GPA) von 19 % und unterschiedlichen Anteile von Säurekasein $0 \leq c_{Sk} \leq 100 \%$ vom GPA wurden neben der Probe mit 19 % Labkaseinanteil fünf Proben präpariert (siehe Tab. 4.7). Die Strukturausbildung bei der Labkaseinsubstitution durch Säurekasein wurde mit Hilfe von Temperatursweepmessungen untersucht und bewertet. In Abb. 6.24 folgt die Gegenüberstellung der temperaturabhängigen G' und $\tan \delta$ -Verläufe.

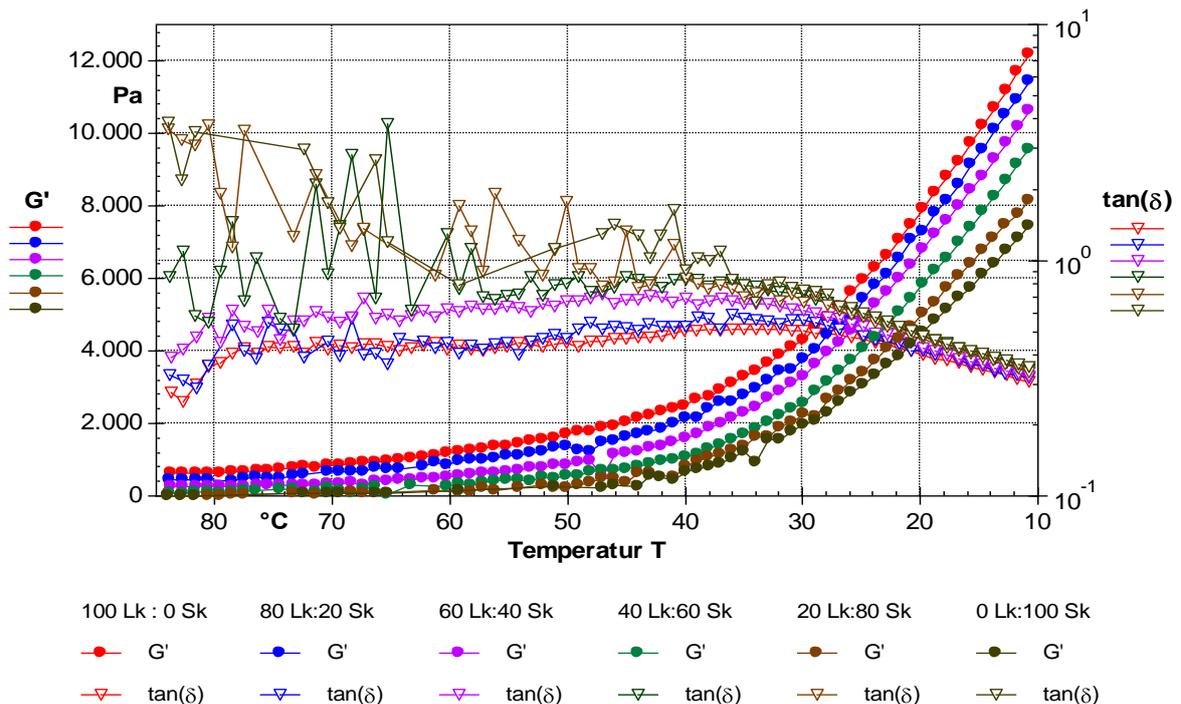


Abb. 6.24 G' und G'' in Abhängigkeit von der Lk:Sk-Relation/ $0 \leq c_{Sk} \leq 100 \%$ vom GPA

Abb. 6.24 verdeutlicht, dass die Zusammensetzung des GPA bezüglich der Relation von Labkasein zu Säurekasein signifikant die Strukturausbildung negativ beeinflusst. Mit steigendem Substitutionsgrad des Labkaseins durch Säurekasein nahm G' und damit die „Festigkeit“ ab. Da sich die Kurvenverläufe des $\tan \delta$ der Proben mit dominierendem Labkaseinanteil jedoch deutlich von denen der Proben mit dominierendem Säurekaseinanteil unterschieden, wurden diese separat betrachtet (siehe Abb. 6.25 und Abb. 6.26). Es kann festgestellt werden, dass die Proben mit $c_{Sk} \leq 40$ % vom GPA im gesamten Messbereich dominante Festkörpereigenschaften ($\tan \delta < 1$) aufweisen. Der $\tan \delta$ -Verlauf ist wie in Abb. 6.3 charakterisiert. Auffällig ist, dass die Proben eine relativ gleiche viskoelastische Relation bei 10 °C aufweisen.

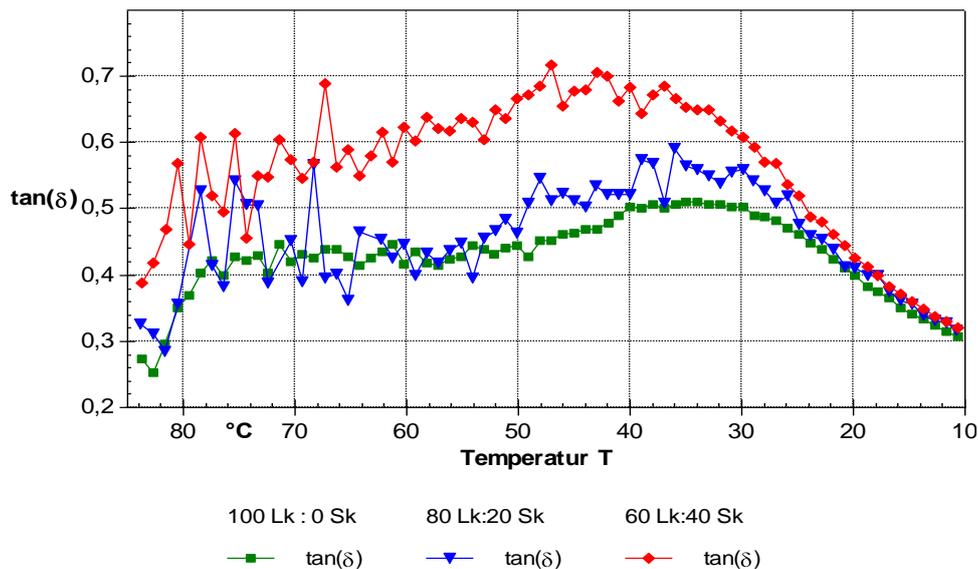


Abb. 6.25 $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation/ $0 \leq c_{Sk} \leq 40$ % vom GPA

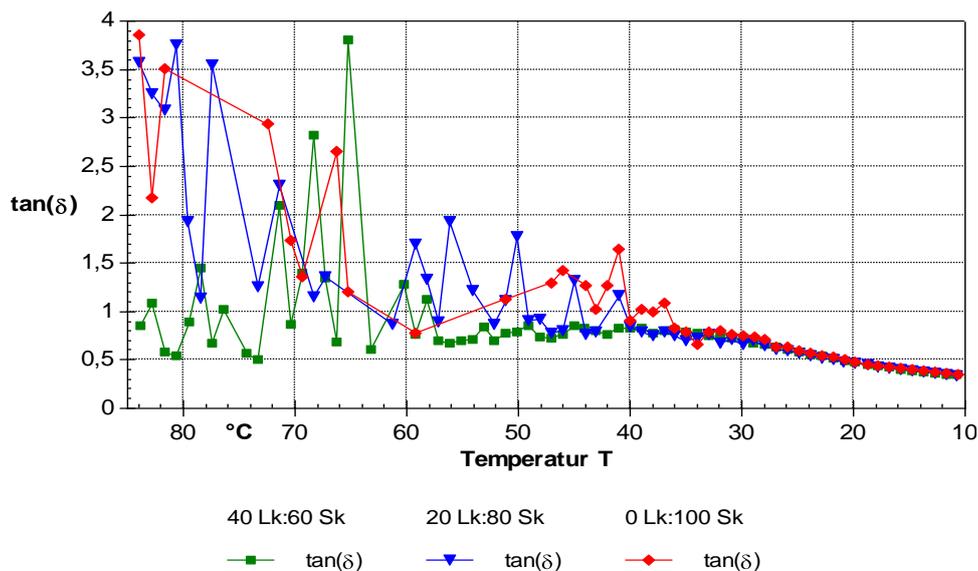


Abb. 6.26 $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:S2-Relation/ $60 \leq c_{Sk} \leq 100$ % vom GPA

Als Ursache für die verringerte Strukturausbildung sind fehlende Calciumphosphatbrücken durch das Säurekasein im Vergleich zum Labkasein anzuführen. Die Strukturverfes-

tigung mit dominierendem Säurekaseinanteil ab $T < 40 \text{ °C}$ ist auf die Fettkristallisation zurückzuführen. Es scheint demnach möglich, ein stabiles Produkt durch die partielle Substitution von Labkasein gegen Säurekasein herzustellen, wenn der Anteil des Labkaseins gegenüber dem des Säurekaseins dominiert. Die materialwissenschaftlichen Kennwerte in Abhängigkeit vom Säurekaseinanteil bei einem GPA von 19 % sind in Tab. 6.15 aufgelistet.

Tab. 6.15 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Lk:Sk-Relation

Relation (Lk %:Sk %)	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	tan δ –
100 Lk:0 Sk	Anfangslevel	85	606	178	0,293
	Peak 1	83	633	160	0,252
	Peak 2	35	3280	1677	0,511
	Endlevel	10	12702\12918*	3791	0,298
80 Lk:20 Sk	Anfangslevel	85	412	142	0,344
	Peak 1	82	458	131	0,285
	Peak 2	36	2578	1523	0,508
	Endlevel	10	11943\11892*	3719	0,311
60 Lk:40 Sk	Anfangslevel	85	235	98	0,416
	Peak 1	–	–	–	–
	Peak 2	43	1332	941	0,707
	Endlevel	10	11163\10866*	3468	0,311
40 Lk:60 Sk	Anfangslevel	85	58	51	0,889
	Endlevel	10	9972\9840*	3349	0,336
20 Lk:80 Sk	Anfangslevel	85	4	16	3,894
	Endlevel	10	8536\8814*	2809	0,329
0 Lk:100 Sk	Anfangslevel	85	6	19	3,073
	Endlevel	10	7803\7788*	2655	0,340

* berechnet nach Gl. 6.10, grüne Markierung: maximales Substitutionspotenzial

Für den Endlevel nimmt der Speichermodul mit steigendem Säurekaseinanteil im gesamten Proteinanteil (GPA = 19 %) linear nach der folgenden Gleichung ab. Die Festkörpereigenschaften der finalen Käsematrix sinken somit ab.

$$G'(c_{Sk}) = -51,30 \cdot c_{Sk} + 12918 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,99 ; i = 6 \quad \text{Gl. 6.10}$$

Eine Dispersionsstruktur aller Proben wurde bei verschiedenen Temperaturen (einschließlich 10 °C/ Endprodukt) durch Frequenzsweepmessungen bestätigt. Jedoch wiesen die Proben mit zunehmendem Säurekaseinanteil eine geringere Strukturstabilität auf (siehe Abb. 12.8 und Tab. 12.8. im Anhang).

6.5.4 Substitution von Labkasein durch Sojaproteinisolat

Eine Labkaseinsubstitution bei einem Gesamtproteinanteil von 17 % wurde durch Sojaproteinisolat (SPI) bis zu einer Relation 30 Lk:70 SPI (siehe Tab. 4.7) vorgenommen.

Die Strukturausbildung wurde mittels Temperatursweepmessungen untersucht. In Abb. 6.27 ist der Verlauf des G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom SPI-Anteil dargestellt. Abb. 6.28 zeigt einen Vergleich des G' und $\tan \delta$ bei Präparation der Proben mit 17 % absolutem Labkaseinanteil und 15 % absoluten Sojaproteinanteil.

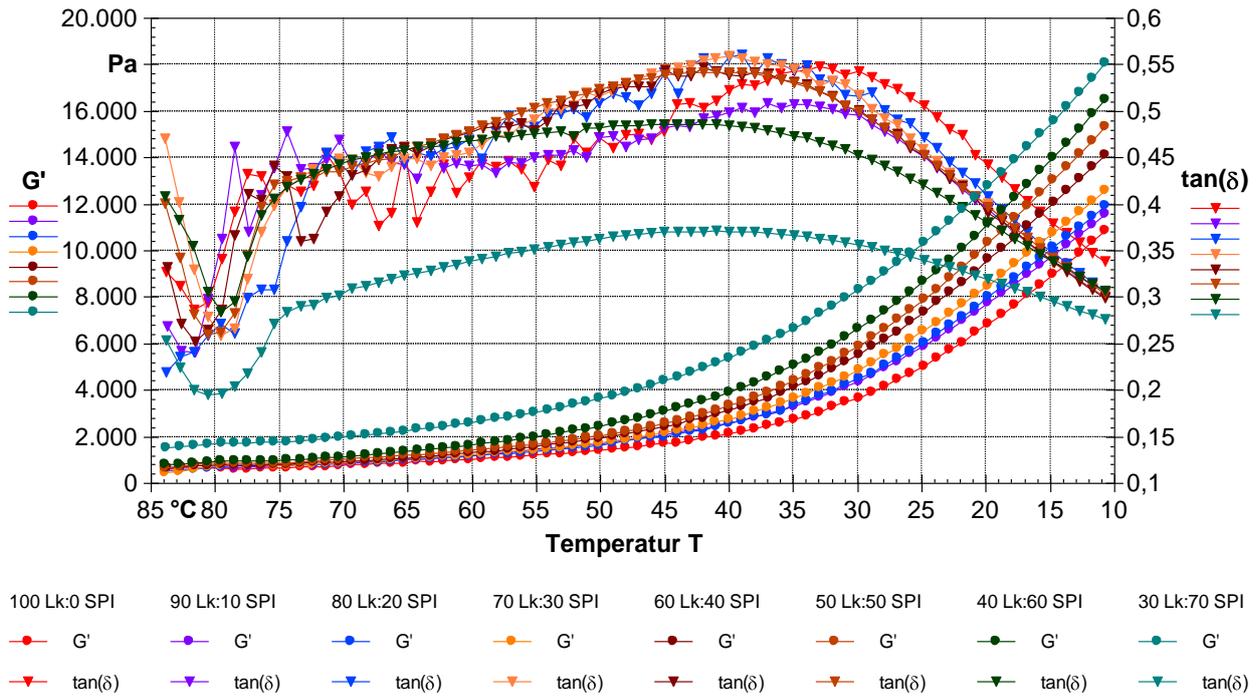


Abb. 6.27 Verlauf G' und tan δ in Abhängigkeit von der Lk:SPI-Relation

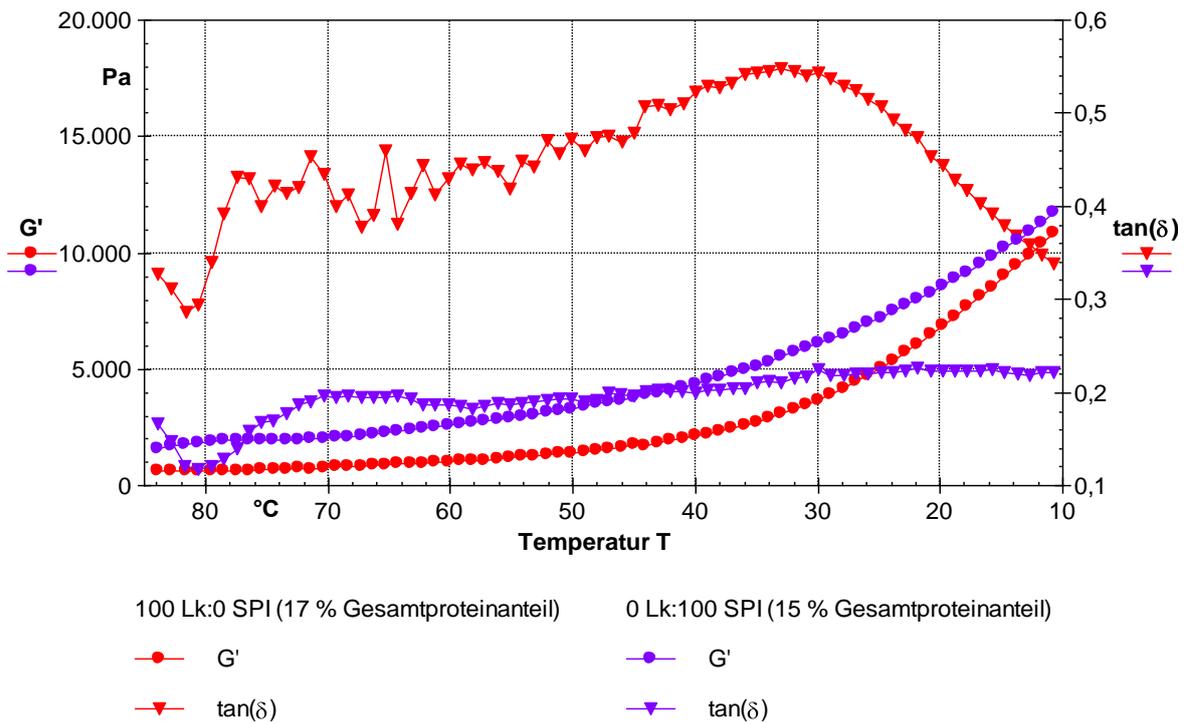


Abb. 6.28 Vergleich des Verlaufs G' und tan δ der Proben mit 17 % Lk und 15 % SPI

G' am Endlevel (10 °C) kann exponentiell vom Sojaproteinisolatanteil c_{SPI} des GPA regressiert werden, siehe Gl. 6.11:

$$G'(c_{SPI}) = 10993 \cdot e^{0,0073 \cdot c_{SPI}} \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,95 ; i = 8 \quad \text{Gl. 6.11}$$

In Tab. 6.16 sind die materialwissenschaftlichen Kennwerte in Abhängigkeit vom Sojaproteinanteil des gesamten Proteinanteils zusammengestellt.

Tab. 6.16 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Lk:SPI-Relation

Relation (Lk %:SPI %)	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	tan δ –
100 Lk:0 SPI (mit 17 % GPA)	Anfangslevel	85	594	195	0,329
	Peak 1	82	654	187	0,286
	Peak 2	33	3061	1677	0,548
	Endlevel	10	11377\10993*	3745	0,329
90 Lk:10 SPI (mit 17 % GPA)	Anfangslevel	85	610	195	0,320
	Peak 1	82	755	182	0,241
	Peak 2	35	3318	1683	0,507
	Endlevel	10	12031\11825*	3525	0,293
80 Lk:20 SPI (mit 17 % GPA)	Anfangslevel	85	524	117	0,223
	Peak 1	–	–	–	–
	Peak 2	39	2701	1515	0,561
	Endlevel	10	12392\12772*	3694	0,298
70 Lk:30 SPI (mit 17 % GPA)	Anfangslevel	85	413	213	0,516
	Peak 1	80	755	195	0,258
	Peak 2	40	2762	1544	0,559
	Endlevel	10	13024\13767*	3771	0,290
60 Lk:40 SPI (mit 17 % GPA)	Anfangslevel	85	580	222	0,384
	Peak 1	82	763	192	0,252
	Peak 2	42	2796	1528	0,546
	Endlevel	10	14651\14839*	4244	0,290
50 Lk:50 SPI (mit 17 % GPA)	Anfangslevel	85	564	259	0,460
	Peak 1	81	844	219	0,259
	Peak 2	42	2850	1543	0,542
	Endlevel	10	15889\15995*	4690	0,295
40 Lk:60 SPI (mit 17 % GPA)	Anfangslevel	85	751	329	0,438
	Peak 1	80	939	266	0,284
	Peak 2	44	3228	1570	0,486
	Endlevel	10	17201\17240*	5150	0,299
30 Lk:70 SPI (mit 17 % GPA)	Anfangslevel	85	1476	411	0,279
	Peak 1	81	1680	327	0,195
	Peak 2	44	4579	1697	0,371
	Endlevel	10	18774\18583*	5118	0,273
0 Lk:100 SPI (mit 15 % SPI)	Anfangslevel	85	1523	282	0,192
	Peak 1	81	1843	218	0,118
	Peak 2	–	–	–	–
	Endlevel	10	12196	2724	0,223

* berechnet nach Gl. 6.11, rote Markierung: überkritischer SPI-Anteil, grüne Markierung: kein SPI-Geschmack

G' am Anfangslevel (85 °C) der Probe mit (30 Lk: 70 SPI) ist um das 2,5 fache höher als mit Labkasein, was die Präparation der Probe erheblich erschwerte. Dies ist auf die höhere Wasserbindekapazität des SPI im Vergleich zum Labkasein (siehe Tab. 5.2) zurückzuführen. Um eine Probe mit ausschließlich SPI zu präparieren, musste aus diesem Grund der Gesamtproteinanteil auf 15 % reduziert werden. Die Proben mit einem zunehmenden SPI-Anteil wiesen eine höhere „Festigkeit“ auf, waren jedoch krümelig, da die Ausbildung des Proteinnetzwerks geschwächt wurde. Peak 2 verschob sich in Richtung höhere Temperaturen, was ein Hinweis auf eine schnellere Strukturausbildung aufgrund der höheren Hydrophilität des SPI im Vergleich zum Labkasein ist. Anhand von Abb. 6.27 wird ab einer Relation 40 Lk:60 SPI die tan δ -Kurve flacher und deutlich niedriger. Der Substitutionsanteil von 60 % SPI stellt somit von der Strukturausbildung her einen überkritischen Anteil dar. Aus Abb. 6.28 ist zu erkennen, dass

die $\tan \delta$ -Kurve mit $T < 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ein Plateau aufweist. Dies deutet auf einen fehlenden Struktur-
aufbau hin. **Die Herstellung von Analogkäse mit den strukturellen Eigenschaften eines
Mozzarella durch Verwendung von SPI als alleinige Proteinquelle war nicht möglich.**

Wenn mehr als 20 % des Labkaseinanteils durch SPI ersetzt wurden, wurde ein negativer
Sojageschmack wahrgenommen. Die Proben mit $> 50 \%$ SPI-Anteil wiesen eine krümelige
Konsistenz auf. Die Relation 80 Lk:20 SPI stellte somit die maximale potenzielle Labkasein-
substitution durch SPI dar.

Die Dispersionsstruktur wurde bei allen SPI-Anteilen beibehalten und mit Hilfe von Frequenz-
sweeps erfasst und bewertet (siehe Abb. 12.10 und Tab. 12.9 im Anhang). G'_{pot} und G''_{pot} stie-
gen mit zunehmendem SPI-Anteil an, was ein Hinweis auf eine höhere „Festigkeit“ aufgrund
der steigenden Wasserbindung ist. Außerdem sanken die Exponenten x und y ab, was auf
eine schwächere Struktur durch die Ausbildung einer krümeligen Konsistenz hindeutet.

6.5.5 Substitution von Labkasein durch Hydrokolloide

3 % Labkaseinanteil sollen durch 1 % Hydrokolloidanteil ersetzt werden. Dazu wurden neben
der Probe mit 19 % Labkaseinanteil (ohne Hydrokolloid) acht Präparationen mit
16 % Labkasein und 1 % Hydrokolloid nach der Formulierung in Tab. 4.7 hergestellt. Acht ver-
schiedene Hydrokolloide (Guarkernmehl, Johannisbrotkernmehl, κ -Carrageenan, Natriumalgi-
nat, Xanthan, Methylcellulose, Natrium-Carboxymethylcellulose und Hydroxypropylmethylcel-
lulose) wurden als Einzelkomponenten verwendet. Die Strukturausbildung wurde mit Hilfe von
Temperatursweepmessungen untersucht. Die Verläufe von G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom
eingesetzten Hydrokolloid sind in Abb. 6.29 und Abb. 6.30 dargestellt

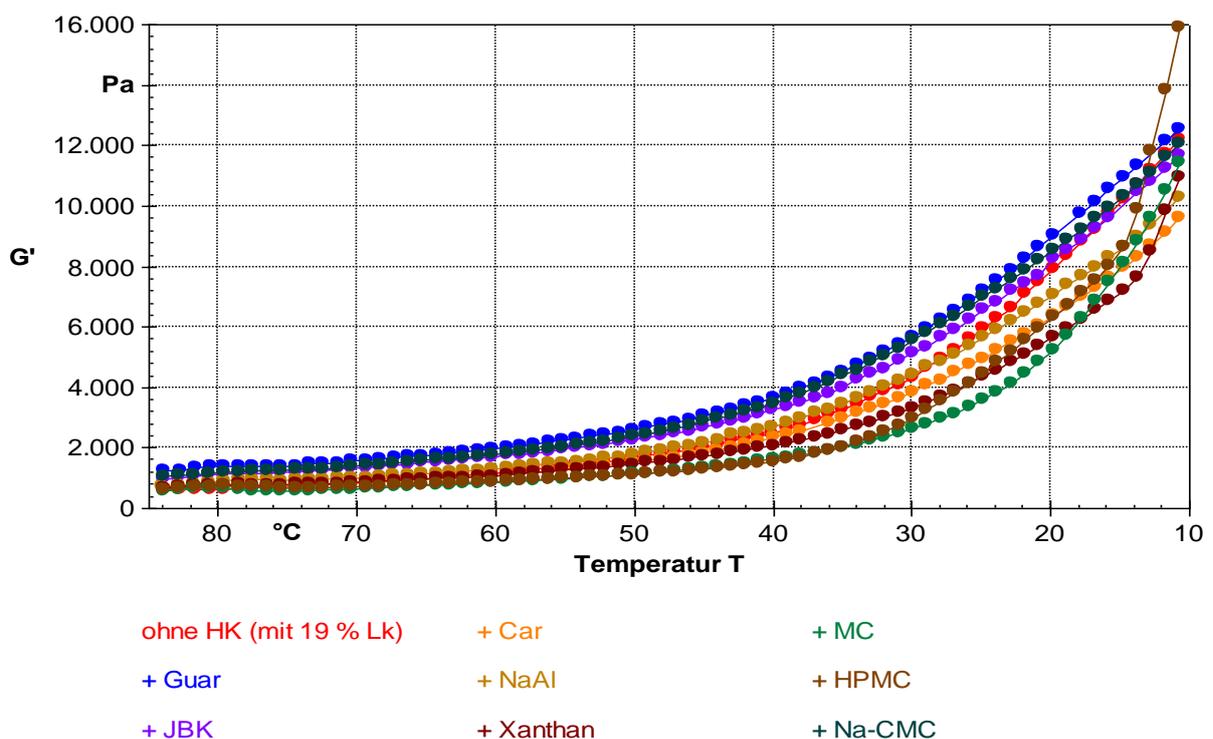


Abb. 6.29 Verlauf G' in Abhängigkeit vom Hydrokolloidzusatz als Einzelkomponente

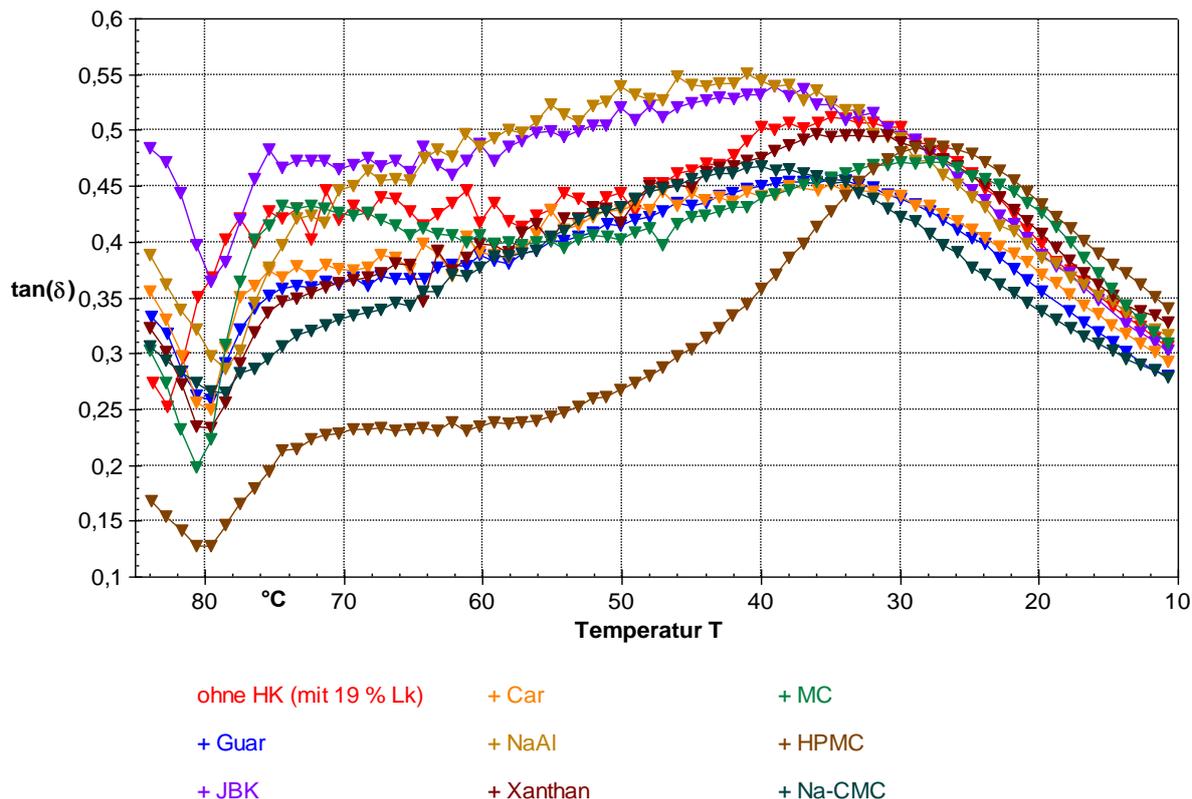


Abb. 6.30 Verlauf $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Hydrokolloidzusatz als Einzelkomponente

Tab. 6.17 gibt einen Überblick über die materialwissenschaftlichen Kennwerte beim Anfangs- und Endlevel.

Tab. 6.17 Materialwissenschaftliche Kennwerte je nach Hydrokolloid (mit 16 % Lk)

Probe	Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	$\tan \delta$ –
ohne Hk, 19 % Lk	Anfangslevel	85	606	178	0,293
	Endlevel	10	12702	3791	0,298
+ 1% Guar	Anfangslevel	85	1202	407	0,339
	Endlevel	10	12988	3535	0,272
+ 1% JBK	Anfangslevel	85	930	454	0,489
	Endlevel	10	12090	3587	0,297
+ 1% Car	Anfangslevel	85	555	208	0,374
	Endlevel	10	10050	2878	0,286
+ 1% NaAl	Anfangslevel	85	658	276	0,420
	Endlevel	10	10760	3337	0,310
+ 1% Xanthan	Anfangslevel	85	668	224	0,335
	Endlevel	10	11947	3862	0,323
+ 1% MC	Anfangslevel	85	527	170	0,322
	Endlevel	10	12411	3719	0,300
+ 1% HPMC	Anfangslevel	85	604	107	0,178
	Endlevel	10	18498	6100	0,330
+ 1% Na-CMC	Anfangslevel	85	1021	322	0,316
	Endlevel	10	12563	3452	0,275

rote Markierung: ungeeignet als Einzelkomponente (Gelbildner)

Anhand von Tab. 6.17 ist erkennbar, dass am Anfangslevel bei 85 °C kein großer Unterschied der G'-Werte in Abhängigkeit vom eingesetzten Hydrokolloid vorliegt. Eine deutliche Differen-

zierung der Festkörpereigenschaften kristallisiert sich bei $T < 30\text{ °C}$ heraus. Einzig HPMC (Typ: K100M) bewirkt einen wesentlichen Strukturzuwachs, da gleiche funktionelle Interaktionen wie durch Labkasein ermöglicht werden. Die Proben mit κ -Carrageenan und Natriumalginat weisen bei 10 °C im Vergleich zu den anderen Proben einen geringeren G' -Wert auf, da beide als Gelbildner fungieren. Demzufolge sind sie ungeeignet zur Verbesserung der Strukturausbildung von Analogkäse.

Bezüglich der sensorischen Eigenschaften wurde beim Einsatz von Guar, Natriumalginat, und Xanthan ein leichter, negativer Geschmack (metallisch, bitter) festgestellt. Proben mit Ausnahme von HPMC-, Na-CMC- und MC-Zugabe waren beim Einschneiden (nach 24 h Lagerung bei 8 °C) leicht klebrig. Somit weisen die Cellulose-Derivate ein positives Applikationspotential in Analogkäse auf.

Aufgrund der ähnlichen Verarbeitung und des Lebensmittelsystems können die Ergebnisse auf die Schmelz- und Mozzarella-Produktion voll übernommen werden. Die Wirkung von Hydrokolloid-Blends wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

6.6 pH-Einfluss

Zur Untersuchung des pH-Wert-Einflusses auf die Strukturausbildung wurden neben der Probe mit einem pH-Wert von 5,98 (Standard) vier Präparationen mit $6,62 \geq \text{pH-Wert} \geq 5,18$ mittels Citronensäure-Lösung (2,5 M) nach der in Tab. 4.7 stehenden Formulierung hergestellt und Temperatursweepmessungen durchgeführt. Die Messergebnisse sind in Abb. 6.31 dargestellt und die wichtigsten materialwissenschaftlichen Kennwerte in Tab. 6.18 aufgeführt.

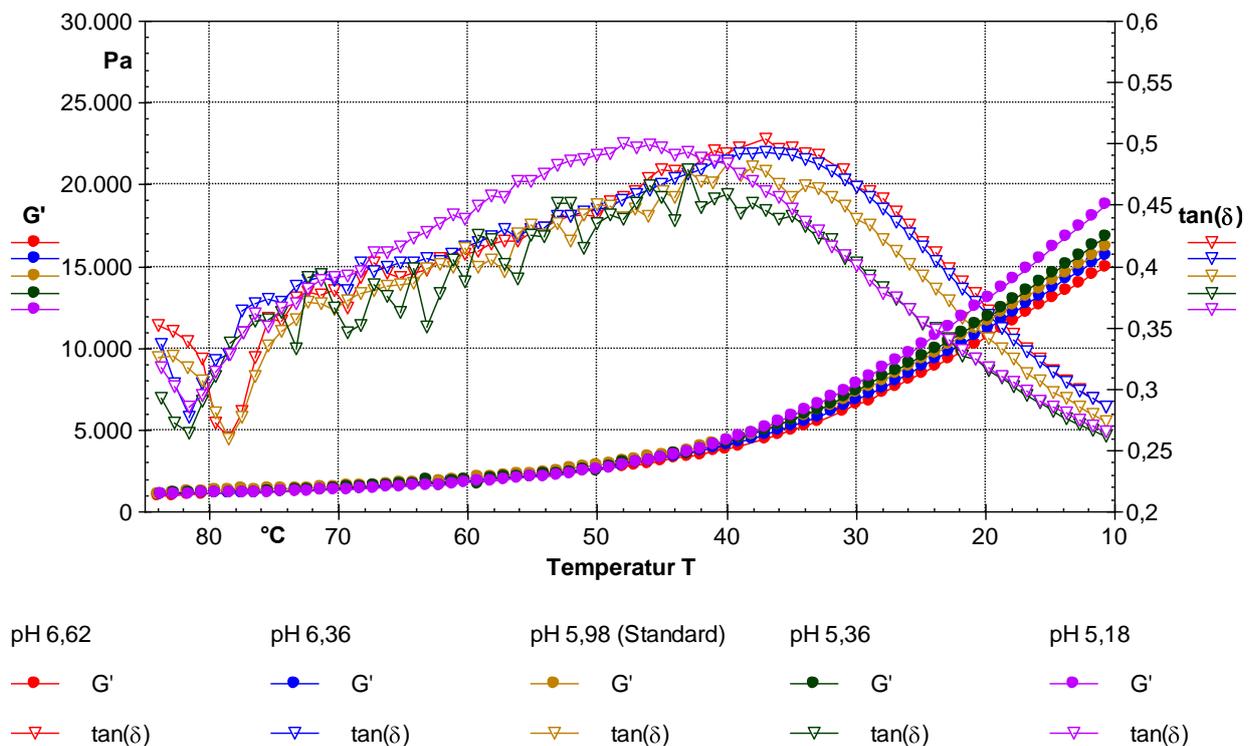


Abb. 6.31 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom pH-Wert ($6,62 \geq \text{pH-Wert} \geq 5,18$)

Anhand von Abb. 6.31 ist zu sehen, dass die Proben im Temperaturbereich von 85 °C bis ca. 45 °C vom pH-Wert relativ unabhängig sind. Danach ist eine Differenzierung der viskoelastischen Eigenschaften zu erkennen. Hierbei sinkt der Verlustfaktor mit abnehmendem pH-Wert ab, was auf eine Erhöhung des elastischen Anteils hindeutet. Außerdem verschiebt sich der Peak 2 bei Reduzierung des pH-Wertes (siehe auch Tab. 6.18) in Richtung höherer Temperaturen, was ein Hinweis auf eine schnellere Strukturierung ist.

Tab. 6.18 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit vom pH-Wert

pH-Wert	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	tan δ –
6,62	Anfangslevel	85	957	328	0,342
	Peak 1	79	1198	312	0,261
	Peak 2	37	4449	2240	0,503
	Endlevel	10	15482\15669*	4314	0,279
6,36	Anfangslevel	85	1036	350	0,338
	Peak 1	82	1123	311	0,277
	Peak 2	37	4711	2326	0,494
	Endlevel	10	16222\16044*	4525	0,279
5,98 (Standard)	Anfangslevel	85	1058	349	0,330
	Peak 1	79	1333	346	0,260
	Peak 2	40	4344	2102	0,484
	Endlevel	10	16687\16593*	4461	0,267
5,36	Anfangslevel	85	1088	332	0,305
	Peak 1	82	1159	306	0,264
	Peak 2	43	3602	1726	0,479
	Endlevel	10	17404\17488*	4457	0,256
5,18	Anfangslevel	85	1021	334	0,327
	Peak 1	82	1098	313	0,285
	Peak 2	46	3124	1558	0,499
	Endlevel	10	19411	5001	0,258

* berechnet nach Gl. 6.12, grüne Markierung: Standard, rote Markierung: überkritischer pH-Wert

Der Speichmodul steigt bei 10 °C mit abnehmendem pH-Wert linear nach der Gl. 6.12 an.

$$G'(\text{pH}) = -1443,8 \cdot \text{pH} + 25227 \text{ in Pa ; } R^2 = 0,96 ; i = 4 \text{ (pH 5,18 nicht einbezogen)} \quad \text{Gl. 6.12}$$

Die Probe mit einem pH-Wert von 5,18 weist bei 10 °C eindeutig den höchsten Speichmodul auf. Dies ist auf das Erreichen des Isoelektrischen Punktes von β -Kasein bei pH = 5,2 zurückzuführen [94]. Eine pH-Wert-Veränderung führt zur Variierung der elektrischen Ladungen der Kaseinkomponenten und somit ihren elektrostatischen Interaktionen. Bei der Herabsetzung des pH-Wertes nimmt die negative Nettoladung der Kaseine ab. Dadurch nähern sich die Kaseine ihrem isoelektrischen Punkt, wodurch die Hydratation absinkt. Infolge dessen weisen die Proben höhere Festkörpereigenschaften auf. Ab einem pH-Wert von 5,36 wurden die Präparationen als zu sauer für den Verzehr empfunden.

6.7 Drehzahleinfluss

Mittels Temperatursweepmessungen wurde der Einfluss der Drehzahl des verwendeten Thermomix auf die Strukturausbildung untersucht und bewertet. Neben der präparierten Probe

bei 200 U/min (Standard) wurden vier Präparationen bei $100 \leq n_U \leq 650$ nach der Formulierung in Tab. 4.7 hergestellt.

Die Messergebnisse sind in Abb. 6.32 dargestellt und die wichtigsten materialwissenschaftlichen Kennwerte in Tab. 6.19 aufgeführt.

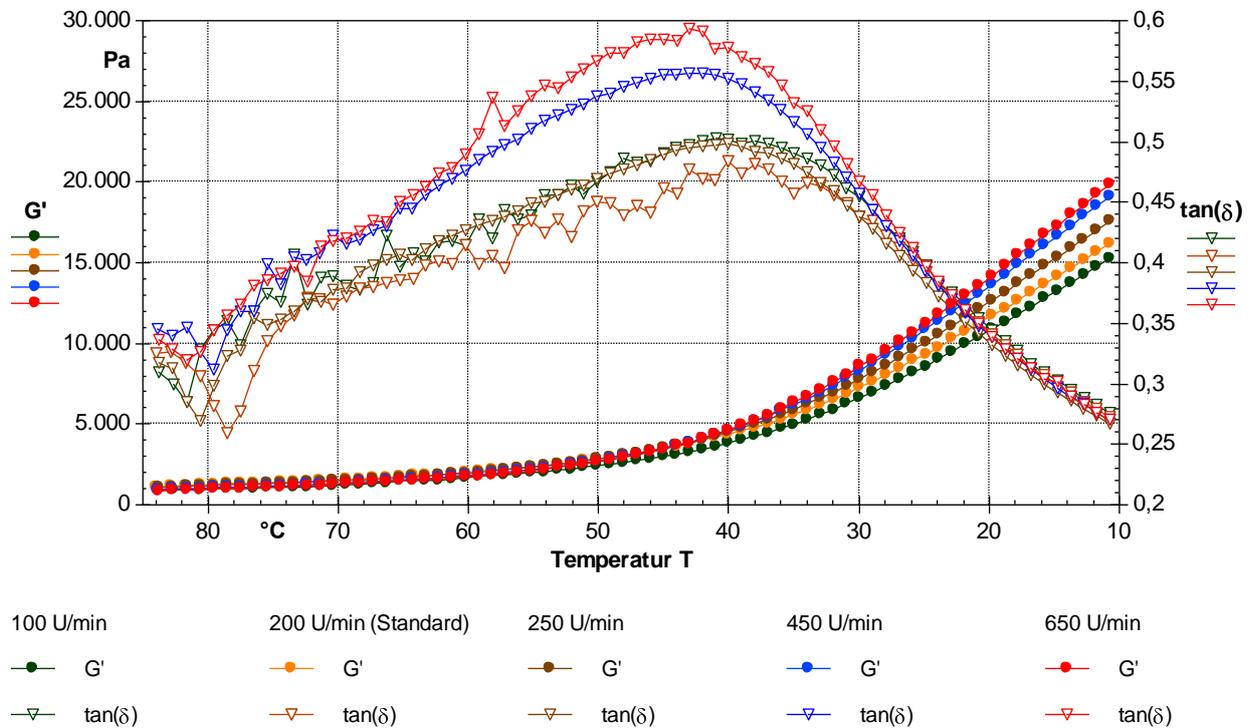


Abb. 6.32 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Drehzahl ($100 \leq n_U \leq 650$)

Tab. 6.19 Materialwissenschaftliche Kennwerte in Abhängigkeit von der Drehzahl

n_U U/min	Peak/Level	T °C	G' Pa	G'' Pa	$\tan \delta$ –
100	Anfangslevel	85	904	292	0,323
	Peak 1	82	974	277	0,284
	Peak 2	40	3822	1917	0,502
	Endlevel	10	15708\15553*	4260	0,271
200 (Standard)	Anfangslevel	85	1058	349	0,330
	Peak 1	79	1333	346	0,260
	Peak 2	40	4344	2102	0,484
	Endlevel	10	16687\17261*	4461	0,267
250	Anfangslevel	85	1068	338	0,317
	Peak 1	81	1157	329	0,285
	Peak 2	40	4498	2239	0,498
	Endlevel	10	18165\17850*	4757	0,262
450	Anfangslevel	85	880	308	0,350
	Peak 1	79	1065	332	0,312
	Peak 2	42	4083	2273	0,557
	Endlevel	10	19760\19499*	5236	0,265
650	Anfangslevel	85	855	292	0,342
	Peak 1	82	923	295	0,320
	Peak 2	43	3806	2257	0,593
	Endlevel	10	20472\20607*	5417	0,265

* berechnet nach Gl. 6.13, grüne Markierung: Standard

Abb. 6.32 belegt, dass mit zunehmender Drehzahl der Speichermodul ansteigt, die Proben mit $T < 30 \text{ °C}$ aber relativ gleiche Werte des $\tan \delta$ aufweisen. Die Trendgleichung für G' in Abhängigkeit von der Drehzahl des Thermomix bei 10 °C ist eine Potenzfunktion und lautet wie folgt:

$$G'(n_U) = 7784,4 \cdot n_U^{0,1503} \quad \text{in Pa ; } n_U \text{ in U/min ; } R^2 = 0,96 ; i = 5 \quad \text{Gl. 6.13}$$

Die Struktur der Proben wird mit höheren Drehzahlen bei gleicher viskoelastischer Relation mit geringer potenzieller Abhängigkeit verbessert. Zwei reale Effekte besitzen ihre Ursache in:

1. der Reduzierung der Fettpartikeldurchmesser und damit homogener Einbau in das Kaseinnetzwerk.
2. dem „Verspinnen“ der Kaseine.

6.8 Schermessungen

6.8.1 Labkaseinanteil

Die Schermessungen der Proben wurde im Konzentrationsbereich $15 \leq c_{LK} \leq 21 \text{ %}$ bei 85 °C durchgeführt. In Abb. 6.33 ist der Verlauf der Schubspannung τ in Abhängigkeit von der Messzeit und in Abb. 6.34 sind die Fließkurven (Abschnitt 3 – 5) dargestellt. In Tab. 6.20 sind die rheologischen Kennwerte als regressierte Daten des 5. Abschnittes nach dem HERSCHEL-BULKLEY-Modell (HB) mit der effektiven Viskosität η_{eff} aufgeführt. Die effektive Viskosität ist ein fluiddynamischer Kennwert als Integral der rheologischen Kennwerte.

Folgende Trendgleichungen zwischen dem Kaseinanteil (ohne die Probe mit 15 % Lk) und den Kennwerten können als lineare Korrelationen abgeleitet werden:

$$\tau_0(c_{LK}) = 2,18 \cdot c_{LK} - 8,90 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,96 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.14}$$

$$K(c_{LK}) = 2,77 \cdot c_{LK} - 17,96 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,98 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.15}$$

$$n(c_{LK}) = -0,018 \cdot c_{LK} + 0,728 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,99 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.16}$$

$$\eta_{\text{eff}}(c_{LK}) = 0,55 \cdot c_{LK} + 1,15 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,97 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.17}$$

Der Fließindex n ist < 1 . Ein plastisches Medium liegt vor. Die niedrigen Werte von n ab 17 % Labkasein weisen auf stabile Strukturen der Proben hin und signalisieren eine hohe Strukturstabilität bei mechanischer Belastung. Der Konsistenzfaktor K und η_{eff} steigen linear mit Erhöhung der Labkonzentration an, da die innere Reibung zunimmt. Anhand der Thixotropiefläche A_{TH} nimmt die Strukturzerstörungsarbeit bei steigendem Labkaseinanteil zu.

Ein entscheidender struktureller Abbau findet bereits beim Vorscherungsvorgang statt. Zur Bestimmung des Strukturabbauparameters λ und der näheren Auswertung der Strukturstabilität wurde die Vorscherungskurve $\tau(t)$ der Analogkäseproben regressiert. Folgende Potenzfunktion dient der Ermittlung der geeignetsten Regression im Vorscherungsabschnitt:

$$\tau(t) = \tau_{\text{pot}} \cdot t^{-\frac{1}{\lambda}} \quad \text{in Pa} \quad \text{Gl. 6.18}$$

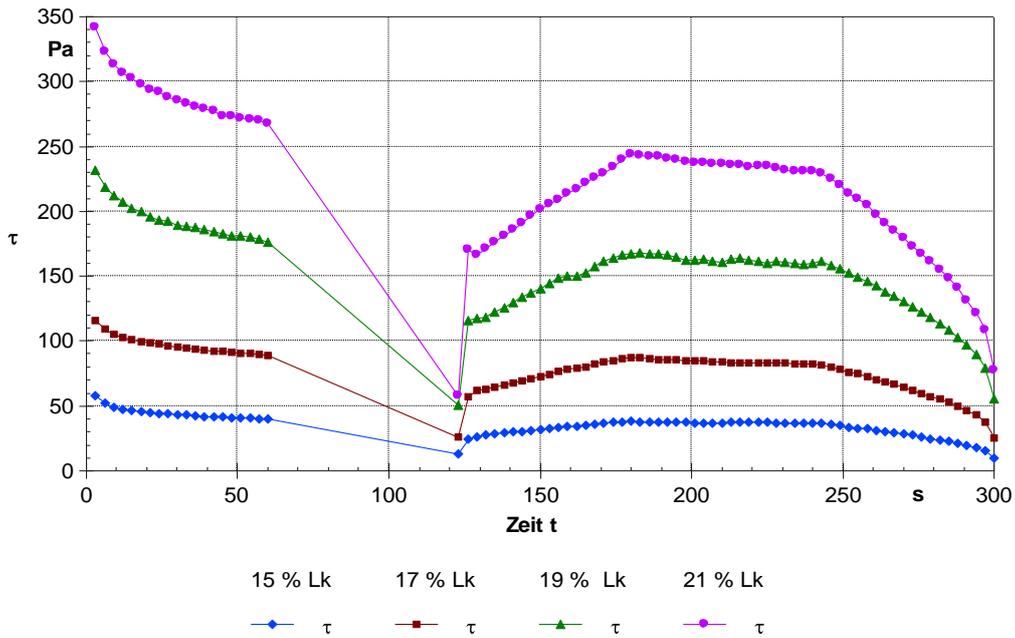


Abb. 6.33 Schermessungen der Proben $15 \leq c_{Lk} \leq 21 \%$ bei $85 \text{ }^\circ\text{C}$

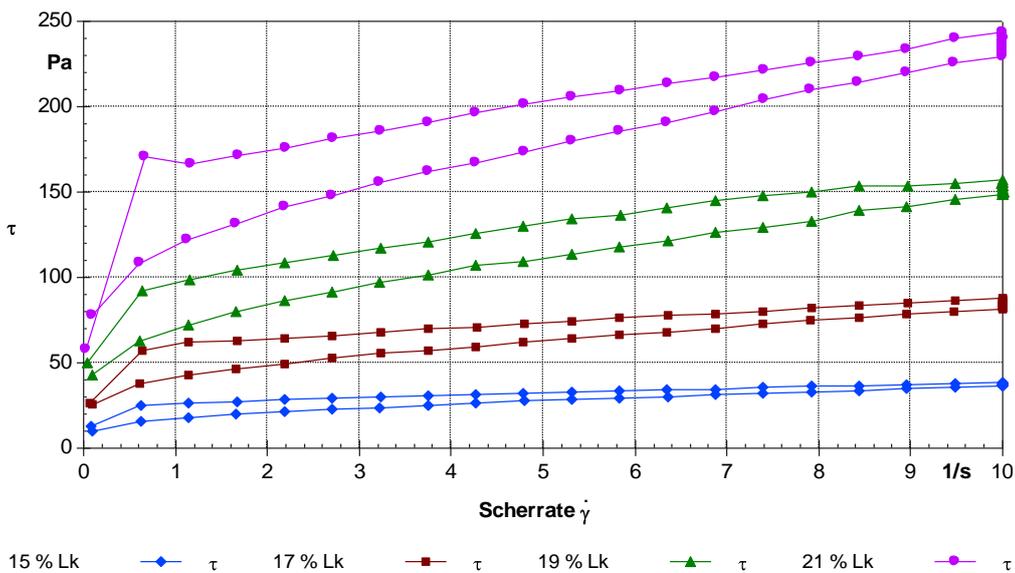


Abb. 6.34 Fließkurven (Abschnitt 3 – 5) $15 \leq c_{Lk} \leq 21 \%$ bei $85 \text{ }^\circ\text{C}$

Tab. 6.20 Rheologische Kennwerte/ Rücklauf-Fließkurve/ $85 \text{ }^\circ\text{C}$, $15 \leq c_{Lk} \leq 21 \%$

c_{Lk} %	τ_0 Pa	K Pas^n	n –	r –	A_{TH} Pa/s	$\eta_{eff} (\dot{\gamma} = 10/s)$ Pas
15	6,32	10,58	0,445	0,997	0,4	3,58
17	28,60	28,56	0,417	0,998	49	10,31
19	31,37	37,55	0,383	0,999	170	11,72
21	37,30	39,62	0,344	0,994	189	12,49

rote Markierung: unterkritische c_{Lk}

In Tab. 6.21 sind die schubspannungsabhängigen Regressionsdaten λ und der Koeffizient des Strukturabbaus τ_{pot} sowie die Schubspannungsdifferenz $\Delta\tau$ zwischen dem Anfangs- und Endwert im Vorscherungsabschnitt aufgelistet.

Tab. 6.21 Strukturabbauparameter im Vorscherungsabschnitt, $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %

c_{Lk} %	τ_{pot} Pa	λ s	R^2 –	$\Delta\tau$ Pa
15	64,2	8,6	0,99	17,4
17	184,5	11,1	0,98	38,0
19	257,7	11,6	0,99	55,0
21	375,7	12,2	0,99	75,0

Die Strukturabbauparameter (τ_{pot} , λ und $\Delta\tau$) steigen mit zunehmendem Labkaseinanteil an und zeigen eine erhöhte Strukturzerstörungsarbeit an. Eine optimierte Prozesstechnik könnte in der Mischphase mit hoher Intensität betrieben werden. Bei der weiteren Verarbeitung sollte die mechanische Belastung auf einen technologisch notwendigen Level reduziert werden.

6.8.2 Schmelzsalzanteil

In Analogie zum Labkaseinanteil wurden Schermessungen für die Proben mit $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ % durchgeführt. In Tab. 6.22 sind die rheologischen Kennwerte dargestellt. Abb. 6.35 und Abb. 6.36 zeigen das Fließverhalten der Proben in Abhängigkeit der Schmelzsalkonzentration.

Tab. 6.22 Rheologische Kennwerte/ Rücklauf-Fließkurve/ 85 °C, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ %

c_{SS} %	τ_0 Pa	K Pas ⁿ	n –	r –	A_{TH} Pa/s	$\eta_{eff} (\dot{\gamma} = 10/s)$ Pas
1,2	-28,70*	56,41	0,092	0,986	157	4,10
1,8	26,30	26,61	0,427	0,996	159	9,18
2,4	27,34	27,49	0,420	0,998	167	9,97
3,0	28,60	28,56	0,417	0,998	170	10,31

* rheologisches Modell ungültig, rote Markierung: unterkritische c_{SS}

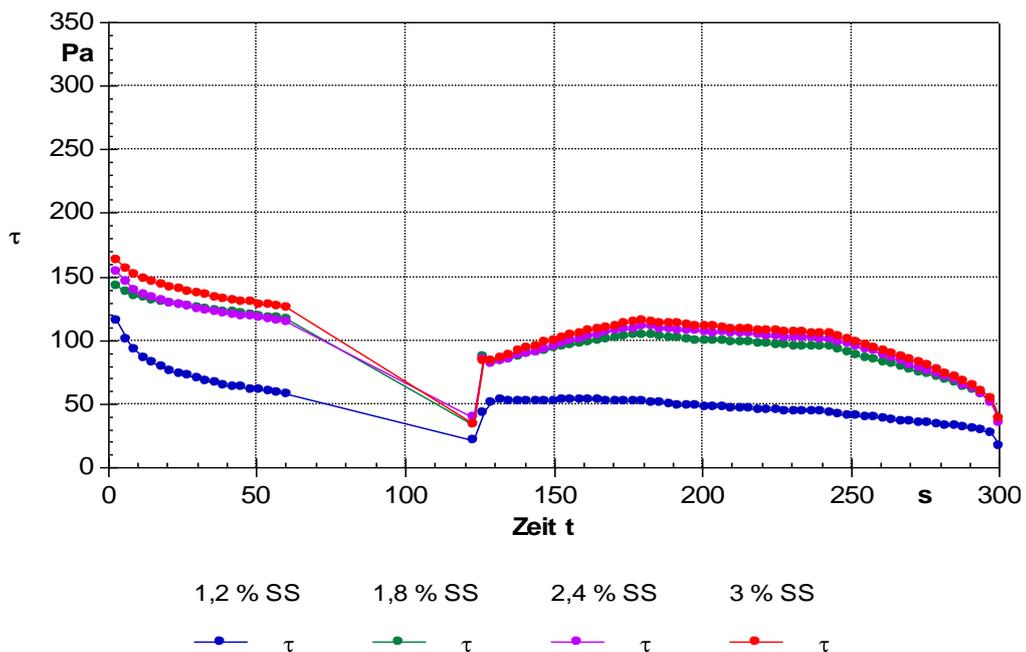


Abb. 6.35 Schermessungen $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ % bei 85 °C

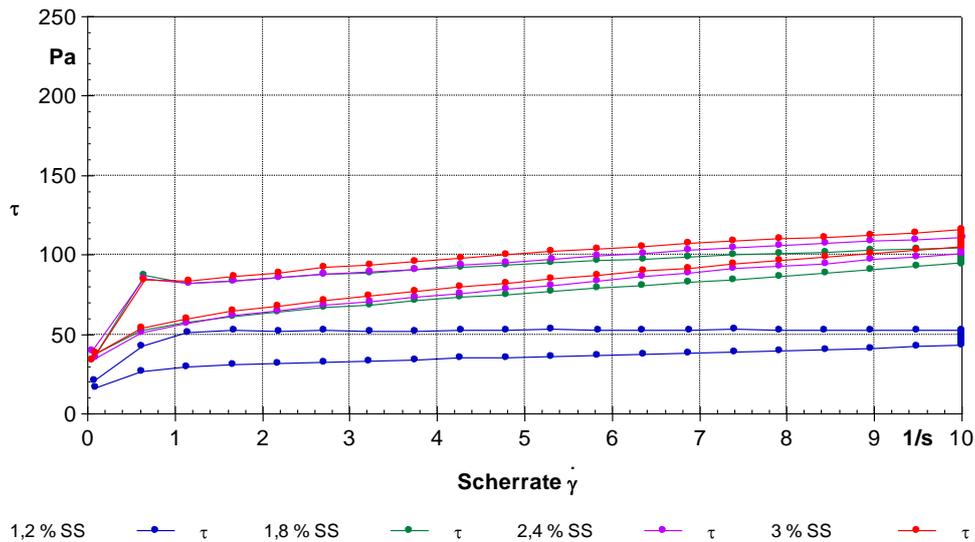


Abb. 6.36 Fließkurven (Abschnitt 3 – 5) $1,2 \leq c_{SS} \leq 3 \%$ bei $85 \text{ }^\circ\text{C}$

Der Fließindex ist relativ konstant (0,42) bei $c_{SS} \geq 1,8 \%$. Man erhält eine stabile Struktur, die nicht stark abhängig vom Schmelzanteil ist.

Folgende lineare Trendgleichungen zwischen dem Schmelzsatzanteil (ohne die Probe mit 1,2 % SS) und den rheologischen Kennwerten können abgeleitet werden:

$$\tau_0(c_{SS}) = 1,92 \cdot c_{SS} + 22,81 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,99 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.19}$$

$$K(c_{SS}) = 1,63 \cdot c_{SS} + 23,65 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,99 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.20}$$

$$\eta_{\text{eff}}(c_{SS}) = 0,94 \cdot c_{SS} + 7,56 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,95 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.21}$$

Die Kennwerte τ_0 , K und η_{eff} steigen geringfügig aufgrund der erhöhten Ionenstärke mit zunehmender Schmelzsatzkonzentration an. In Tab. 6.23 sind die schubspannungsabhängigen Regressionsdaten λ und τ_{pot} von Gl. 6.18 sowie $\Delta\tau$ zwischen dem Anfangs- und Endwert im Vorscherungsabschnitt aufgelistet.

Die Strukturabbauparameter ändern sich leicht. Der Schmelzsatz einfluss fällt im Vergleich zum Labkasein geringer aus.

Tab. 6.23 Strukturabbauparameter im Vorscherungsabschnitt, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3 \%$

c_{SS} %	τ_{pot} Pa	λ s	R^2 –	$\Delta\tau$ Pa
3,0	184,5	11,1	0,98	38,0
2,4	177,1	11,6	0,99	36,0
1,8	157,3	14,5	0,96	27,0
1,2	150,9	4,1	0,99	58,8

rote Markierung: unterkritische c_{SS}

6.8.3 Fettgehalt

Die Schermessungen wurden ebenfalls für die Proben (17 % Lk und 2,1 % SS) mit unterschiedlichem Fettgehalt $45 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$ FIT durchgeführt. Das Fließverhalten und die Fließ-

kurven der Proben in Abhängigkeit vom Fettgehalt sind in Abb. 6.37 und Abb. 6.38 sowie die rheologischen Kennwerte bei 85 °C in Tab. 6.24 dargestellt.

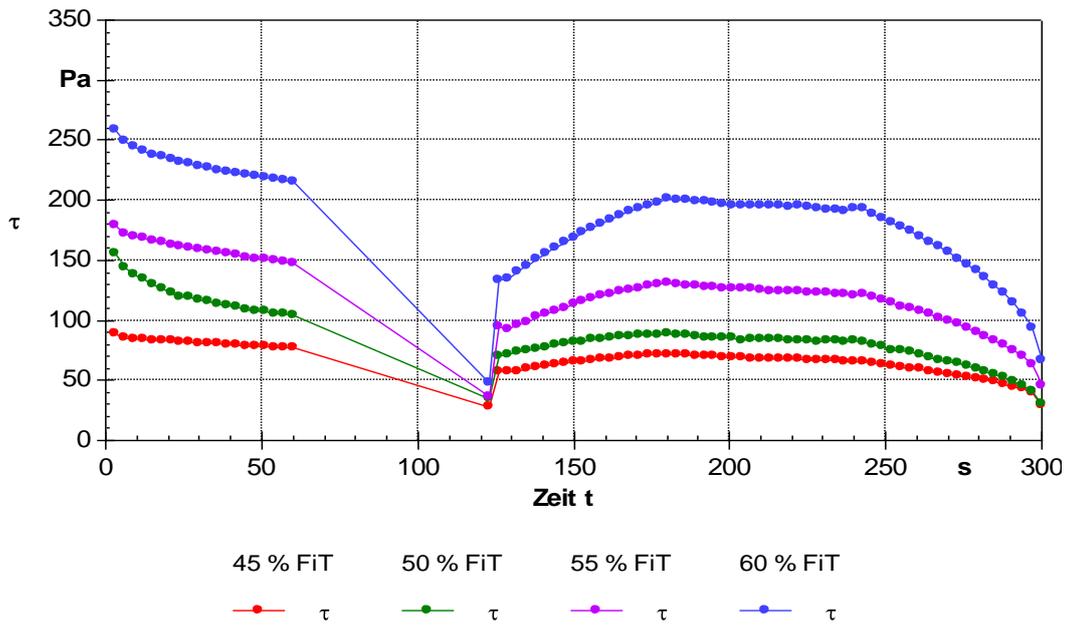


Abb. 6.37 Schermessungen $45 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$ bei 85 °C

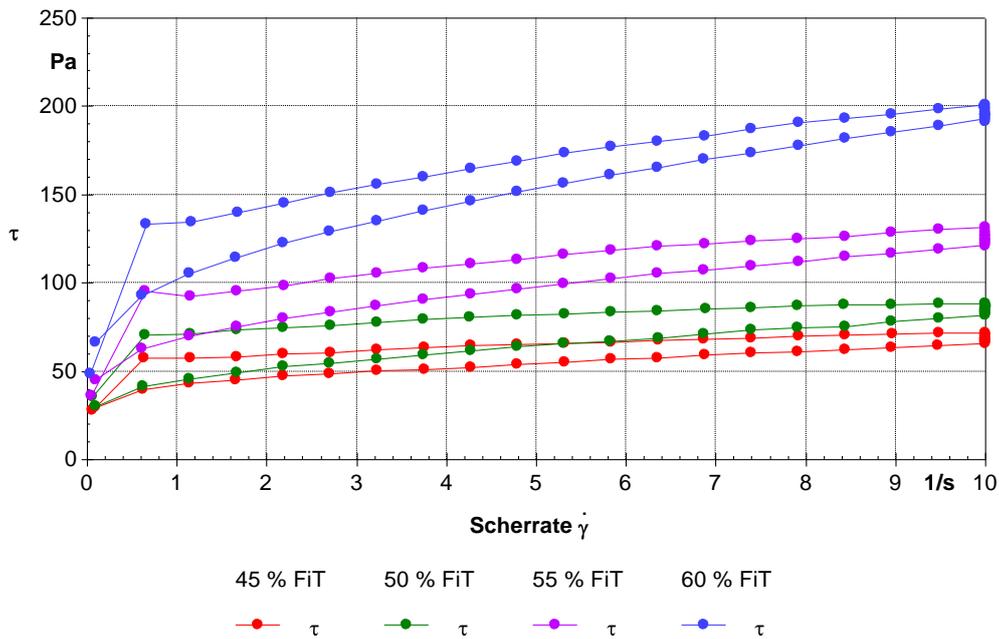


Abb. 6.38 Fließkurven (Abschnitt 3 – 5) $45 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$ bei 85 °C

Tab. 6.24 Rheologische Kennwerte/ Rücklauf-Fließkurve/ 85 °C, $45 \leq c_{FIT} \leq 60 \%$

c_{FIT} %	τ_0 Pa	K Pas ⁿ	n –	r –	A_{TH} Pa/s	$\eta_{eff} (\dot{\gamma} = 10/s)$ Pas
45	22,08	19,71	0,356	0,997	116	6,68
50	23,49	22,08	0,379	0,998	140	7,63
55	32,34	34,87	0,399	0,991	162	11,98
60	46,61	54,79	0,421	0,999	172	19,11

rote Markierung: unterkritische c_{FIT}

Anhand von Tab. 6.24 ist zu erkennen, dass ein plastisches Medium vorliegt und mit zunehmendem Fettgehalt die Fließgrenze τ_0 deutlich ansteigt, was auf eine Erhöhung der Aggregatbildung hindeutet, da die Fließgrenze mit der Partikelgröße der Substanz korreliert. Ebenfalls steigen aufgrund der erhöhten Protein-Fett-Interaktionen die Konsistenzfaktor und die effektive Viskosität an. Lineare Trendgleichungen wurden wiederum zwischen dem Fettgehalt in der Trockenmasse (ohne die Probe mit 45 % FiT als unterkritischer Fettgehalt) und den rheologischen Kennwerten gefunden:

$$\tau_0(c_{\text{FIT}}) = 2,31 \cdot c_{\text{FIT}} - 93,01 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,98 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.22}$$

$$K(c_{\text{FIT}}) = 3,27 \cdot c_{\text{FIT}} - 142,66 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,98 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.23}$$

$$n(c_{\text{FIT}}) = 0,0042 \cdot c_{\text{FIT}} + 0,169 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,99 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.24}$$

$$\eta_{\text{eff}}(c_{\text{FIT}}) = 1,15 \cdot c_{\text{FIT}} - 50,23 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,98 ; i = 3 \quad \text{Gl. 6.25}$$

Die schubspannungsabhängige Regressionsdaten λ und τ_{pot} von Gl. 6.18 sowie $\Delta\tau$ zwischen dem Anfangs- und Endwert im Vorscherungsabschnitt sind in Tab. 6.25 dargestellt.

Tab. 6.25 Strukturabbauparameter im Vorscherungsabschnitt, $45 \leq c_{\text{FIT}} \leq 60$ %

c_{FIT} %	τ_{pot} Pa	λ s	R^2 –	$\Delta\tau$ Pa
45	93,9	22,2*	0,95	12,2
50	133,5	13,7	0,99	26,0
55	196,3	15,4	0,95	31,0
60	279,7	16,4	0,98	44,0

* Messartefakt

Die Strukturzerstörungsarbeit steigt mit zunehmendem Fettgehalt an. Der Einfluss des Fettgehaltes auf die Struktur und Scherstabilität ist geringer als der Labkaseineinfluss aber deutlich höher als die Wirkung der Schmelzsalkonzentration.

6.9 Schmelzbarkeitstest

6.9.1 Labkaseinanteil

Der Schmelzbarkeitstest wurde im Konzentrationsbereich $15 \leq c_{\text{Lk}} \leq 21$ % (3 % Schmelzsatz und 20 % Fett) durchgeführt. In Tab. 6.26 sind die Mittelwerte und Mittelwertabweichungen der Dreifachbestimmungen der Fließstrecken $s_{\text{Fließ}}$ dargestellt.

Tab. 6.26 Fließstrecken in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil/ MW \pm MWA

c_{Lk} in %	$s_{\text{Fließ}}$ in mm
15	159,0 ^a \pm 2,7
17	136,0 ^b \pm 1,3
19	97,0 ^c \pm 0,7
21	80,0 ^d \pm 1,3

grüne Markierung: technologisches Optimum

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben ($P < 0,05$)

Folgende lineare Korrelation kann zwischen c_{Lk} und $s_{Fließ}$ abgeleitet werden:

$$s_{Fließ}(c_{Lk}) = -13,8 \cdot c_{Lk} + 366,4 \quad \text{in mm ; } R^2 = 0,98 ; i = 4 \quad \text{Gl. 6.26}$$

Der negative Trend der Fließstrecke mit Erhöhung der Labkaseinkonzentration ist auf die verstärkten hydrophoben Wechselwirkungen bei hohen Temperaturen und eine stärkere Vernetzung der Kaseinmoleküle zurückzuführen. Darüber hinaus wurde die Erhöhung des Labkaseinanteils bei der Analogkäsepräparation mit gleichzeitiger Reduzierung der Wassermenge vorgenommen. Die Probe mit 21 % Labkaseinanteil erreichte im Vergleich mit der Probe 15 % nur die Hälfte der Fließstrecke. Die Proben mit 17 und 19 % Labkaseinanteil wiesen eine akzeptable Fließstrecke auf. Jedoch war das Fließverhalten bei der Probe mit 17 % Labkasein optimaler.

6.9.2 Schmelzsatzanteil

Der Schmelzbarkeitstest wurde ebenfalls für die Proben mit $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ % (17 % Labkasein und 20 % Fett) durchgeführt [241]. Die Mittelwerte und Mittelwertabweichungen der Dreifachbestimmungen von $s_{Fließ}$ sind in Tab. 6.27 dargestellt.

Tab. 6.27 Fließstrecken in Abhängigkeit vom Schmelzsatzanteil/ MW \pm MWA

c_{SS} in %	$s_{Fließ}$ in mm
1,2	57,7 ^d \pm 1,1
1,8	86,0 ^c \pm 2,0
2,4	115,0 ^b \pm 2,0
3,0	136,0 ^a \pm 1,3

grüne Markierung: technologisches Optimum, rote Markierung: unterkritische c_{SS}

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben ($P < 0,05$)

Die Schmelzsatzkonzentration ist linear mit der Fließstrecke korreliert:

$$s_{Fließ}(c_{SS}) = 43,8 \cdot c_{SS} + 6,7 \quad \text{in mm ; } R^2 = 0,99 ; i = 4 \quad \text{Gl. 6.27}$$

Die Verbesserung der Schmelzbarkeit mit zunehmender Schmelzsatzkonzentration ist auf den höheren Peptisierungseffekt der Kaseine zurückzuführen. Die Fließstrecke der Probe mit 1,2 % SS (als unterkritische Konzentration) ist im Vergleich mit der Probe mit 3,0 % SS mehr als um die Hälfte kürzer. Neben dem positiven Effekt des Schmelzsatzes auf die rheologischen Eigenschaften verbesserte es das Schmelzverhalten.

6.9.3 Fettgehalt

Eine Durchführung des Schmelzbarkeitstests wurde für den Fettgehaltparameter bei $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ % (2,1 % Schmelzsatz und 17 % Labkasein) gemacht [241] und die ergebenden Fließstrecken in Tab. 6.28 aufgelistet.

Die Fließstrecke nimmt mit steigendem Fettgehalt nach der folgenden Korrelation ab:

$$s_{Fließ}(c_{FIT}) = -3,7 \cdot c_{FIT} + 289,5 \quad \text{in mm ; } R^2 = 0,96 ; i = 4 \quad \text{Gl. 6.28}$$

Dies kann auf die erhöhten hydrophoben Interaktionen der Kaseine zum Fettanteil bei der Erhitzung zurückzuführen. Des Weiteren spielt das Wasser durch die Hydratation und Solubili-

sierung der Proteine und Salze innerhalb der Matrix eine bedeutende Rolle. Die Protein-Hydratation ermöglicht eine stärkere Interaktion des Proteins mit der Fettphase und dadurch eine gute Emulgierung. Dies führt zu einer guten Schmelzbarkeit. Ungenügenden Protein-Hydratation (Erhöhung des Fettanteils begleitet mit Reduzierung des Wasseranteils) führt zu einer schlechten Verbindung mit der Fettphase, was zu einem übermäßigen Ausölen beim Schmelzen des Analogkäses führt [37].

Die Probe mit 60 % FiT zeigte eine sehr kurze Fließstrecke, während mit 50 % FiT die Fließstrecke akzeptabel war und das Optimum darstellt.

Tab. 6.28 Fließstrecken in Abhängigkeit vom Fettgehalt/ MW \pm MWA

c_{FiT} in %	$s_{\text{Fließ}}$ in mm
45	120,7 ^a \pm 0,9
50	103,0 ^b \pm 2,0
55	92,7 ^c \pm 2,2
60	62,3 ^d \pm 0,4

grüne Markierung: technologisches Optimum

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben ($P < 0,05$)

6.9.4 Stärkeanteil

In Untersuchungen wurde festgestellt, dass alle Stärkearten die Schmelzbarkeit reduzieren mit folgendem Ranking: Maisstärke > Kartoffelstärke > Wachsmaisstärke > Weizenstärke > Reisstärke. Der negative Einfluss auf die Schmelzbarkeit wurde durch die Veränderungen der Größenverteilung der Fettkügelchen und die Unterbrechung der Proteinmatrix von den Stärkemolekülen erklärt. Des Weiteren könnte die Immobilisierung von Wasser durch die verkleisternden Stärkepartikel zum Dehydratisieren der Proteinmatrix führen. Dies führt zur Erhöhung der hydrophoben Protein-Protein-Interaktionen und letztendlich zur schlechteren Schmelzbarkeit [15].

6.9.5 Einfluss von Hydrokolloiden

Die Veränderung des Schmelzverhaltens bei einem 1 %igen Einsatz unterschiedlicher Hydrokolloide (als Einzelkomponenten) und einem reduzierten Labkaseinanteil auf 16 % nach der Formulierung in Tab. 4.7 wurde mit Hilfe des Schmelzbarkeitstests bewertet. Die Mittelwerte und Mittelwertabweichungen von $s_{\text{Fließ}}$ sind in Tab. 6.29 aufgeführt.

Durch Betrachtung von Tab. 6.29 wird deutlich, dass der Einsatz von Xanthan und HPMC die Schmelzbarkeit verschlechtert. Dies ist auf die hohe Wasseraffinität sowie die Temperaturbeständigkeit der beiden Polymere durch die Hydroxypropylgruppen bei HPMC und die Nebenkette bei Xanthan (Schutz für die Hauptkette) zurückzuführen. Bei HBMC kommt es durch die Bildung eines Thermogels bei 80 °C [174] zu einer Verfestigung. Somit können beide Hydrokolloide zum Einsatz in Analogkäse (Anwendung als Pizzabelag) ausgeschlossen werden. Die Proben mit den anderen Hydrokolloiden wiesen eine verbesserte Schmelzbarkeit im Vergleich zu der Probe mit 19 % Labkaseinanteil und ohne Hydrokolloidzusatz auf. Anhand der Kriterien des Aufschmelzverhaltens und der Strukturausbildung (siehe 6.5.5) besitzen die Cellulosed-

private Na-CMC und MC, gefolgt von den Galaktomannanen JBK und Guar ein großes Potential für die Verwendung bei der Analogkäseherstellung.

Tab. 6.29 Fließstrecken beim Hydrokolloidzusatz als Einzelkomponenten/ MW \pm MWA

Probe	s _{Fließ} in mm
ohne Hk, 19 % Lk	75,0 ^e \pm 1,3
+ 1 % Guar (mit 16 % Lk)	83,7 ^d \pm 2,4
+ 1 % JBK (mit 16 % Lk)	99,0 ^c \pm 3,3
+ 1 % Car (mit 16 % Lk)	156,0 ^a \pm 1,3
+ 1 % NaAl (mit 16 % Lk)	116,3 ^b \pm 3,8
+ 1 % Xanthan (mit 16 % Lk)	65,0 ^f \pm 2,0
+ 1 % MC (mit 16 % Lk)	86,3 ^d \pm 0,9
+ 1 % HPMC (mit 16 % Lk)	63,7 ^f \pm 2,9
+ 1 % Na-CMC (mit 16 % Lk)	100,7 ^c \pm 4,9

rote Markierung: unakzeptabel

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben ($P < 0,05$)

6.10 Kapitelzusammenfassung

Mit Hilfe von Temperatursweeps und des Schmelzbarkeitstests wurde der konzentrationsabhängige Einfluss der Ingredienzen und das Potenzial der Labkaseinsubstitution sowie der Einfluss des pH-Wertes und der Drehzahl untersucht und technologische Optima abgeleitet.

Ein viskoelastisches Material mit einer Dispersionsstruktur wurde hergestellt. Drei charakteristische Abschnitte wurden am Beispiel des $\tan \delta$ -Verlaufs bestimmt. Hydrophobe und hydrophile Interaktionen sowie die Fettkristallisation bestimmten die Strukturausbildung. Eine vertiefende Bewertung der strukturellen Veränderungen konnte durch die Ermittlung der Strukturbildungsgeschwindigkeit und -beschleunigung gewonnen werden.

Mit zunehmendem Labkaseinanteil erhöhten sich Interaktionen zur Fett- und Wasserbindung. Die Proben mit 17 und 19 % Labkaseinanteil stellten das technologische Optimum dar. Der steigende Schmelzsalzanteil führte zur Verbesserung der Strukturausbildung. Eine Mindestkonzentration von 2,1 % wurde vorgeschlagen. Mit zunehmendem Fettgehalt wies die finale Struktur höhere Festkörpereigenschaften auf. Ein Mindestfettgehalt wurde mit 50 % FiT bestimmt. Der Einfluss auf die Strukturausbildung lautet: $c_{LK} > c_{FIT} > c_{SS}$. Mit zunehmendem zusätzlichem Stärkeanteil stieg der Speichermodul an. Weizen- und Maisstärke wiesen ähnliche Auswirkungen auf. Aufgrund der höheren Quellfähigkeit führte die Verwendung von Kartoffelstärke im Vergleich mit Weizen- und Maisstärke zu geringerer „Festigkeit“.

Bei der Labkaseinsubstitution durch Weizenstärke wurde bis zu einer Relation 60 Lk:40 S2 die Strukturausbildung verbessert. Bei höherem Stärkeanteil ging der Mechanismus der originären Strukturausbildung verloren. Die Labkaseinsubstitution mit micellarem Kasein veränderte die Applikationseigenschaften. Bei der Labkaseinsubstitution durch Säurekasein verschlechterte sich die Strukturausbildung. Die Labkaseinsubstitution durch Sojaproteinisolat ist durch den negativen Geschmack ab einer Relation 70 Lk:30 SPI sowie die krümelige Konsistenz kritisch zu werten. Ein Hydrokolloideinsatz mit 1 % erfolgte nach einer Reduzierung des Labkaseinanteils auf 16 %. Der Einsatz von MC und Na-CMC stellte sich als Bestvariante heraus.

Mit abnehmendem pH-Wert stieg der Speichermodul an. Ab einem pH-Wert von 5,36 wurden die Präparationen als zu sauer für den Verzehr empfunden. Die Erhöhung der Drehzahl des verwendeten Thermomix führte mit geringer potenzieller Abhängigkeit zur Strukturverbesserung. Die Schmelzbarkeit erhöhte sich mit abnehmendem c_{LK} und c_{FIT} und zunehmendem c_{SS} . Die 3 % Labkaseinsubstitution durch 1 % Einsatz von Na-CMC, MC, κ -Carrageenan, Na-Alginat oder Johannisbrotkernmehl als Einzelkomponenten verlieh den Proben eine verbesserte Schmelzbarkeit.

7 Instrumentelle Texturanalyse von Analogkäse

7.1 Labkaseinanteil

Die Texturanalyse ist von großer Bedeutung zur Auslegung der Zerkleinerungstechnik für die Prozesse wie beispielweise Schneiden und Schreddern. Die Erfassung des Deformationsverhaltens der untersuchten Proben erfolgte mit Hilfe von Kraft-Weg-Messungen durch Parallelplattendeformation nach einer Lagerungszeit von 24 h bei 8 °C. Die Messung wurde bei einer Probentemperatur von ca. 10 °C und in Vierfachbestimmung mit Mittelwert und Standardabweichung der Messergebnisse durchgeführt.

Die Texturanalyse der Proben mit $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ % nach der Formulierung in Tab. 4.7 beim Parameter c_{Lk} wurde durchgeführt. Die folgende Abbildung zeigt beispielsweise die Originalmesskurven der Kraft-Weg-Messungen einer Probe mit 17 % Labkaseinanteil über den gesamten Fahrweg ($s = 20$ mm).

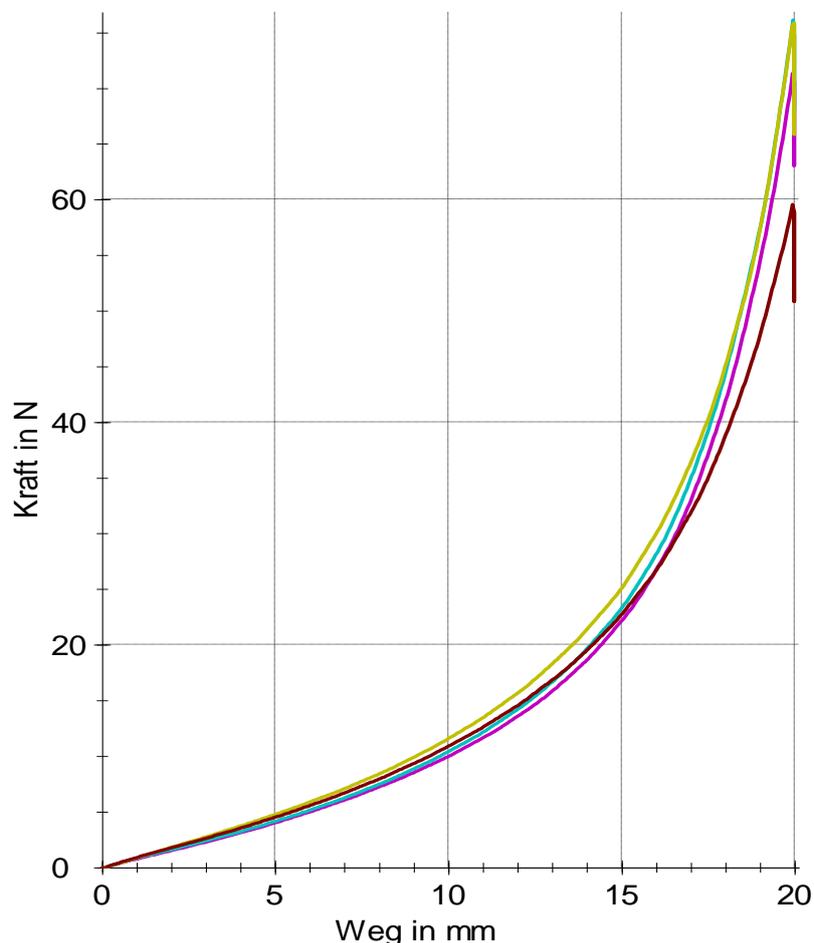


Abb. 7.1 Vierfachbestimmung der Kraft-Weg-Messung 17 % Labkasein

Anhand von Abb. 7.1 ist erkennbar, dass die Kraft-Weg-Messungen sehr gut reproduzierbar sind. Da die Messergebnisse ab $s > 16$ mm aus texturanalytischer Sicht nicht mehr interessant sind, wurde der Fahrweg $s \leq 16$ mm zur Erleichterung des Probenvergleiches festgelegt. In Abb. 7.2 sind die Mittelwertkurven der Labkaseinkonzentrationsabhängigen Kraft-Weg-Messungen dargestellt.

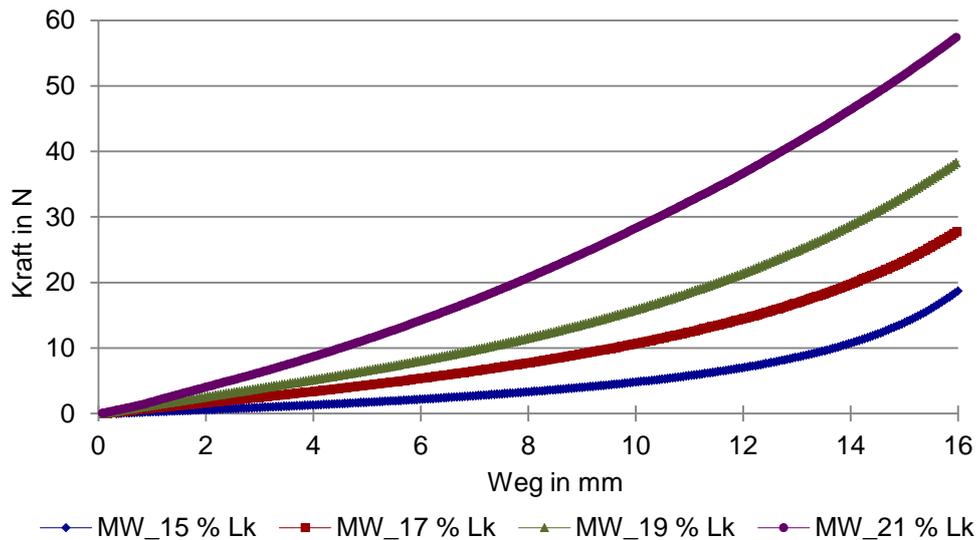


Abb. 7.2 Mittelwertkurven der Kraft-Weg-Messungen $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %

Aus Abb. 7.2 ist ersichtlich, dass die Kraft-Weg-Kurven einen heuristischen Verlauf zeigen. Aus diesem Grund und zur Auswertung von Textureigenschaften der Proben wurde eine Masterkurve am Beispiel der Mittelwertkurve der Kraft-Weg-Messungen der Probe 17 % Labkasein abgeleitet (siehe Abb. 7.3).

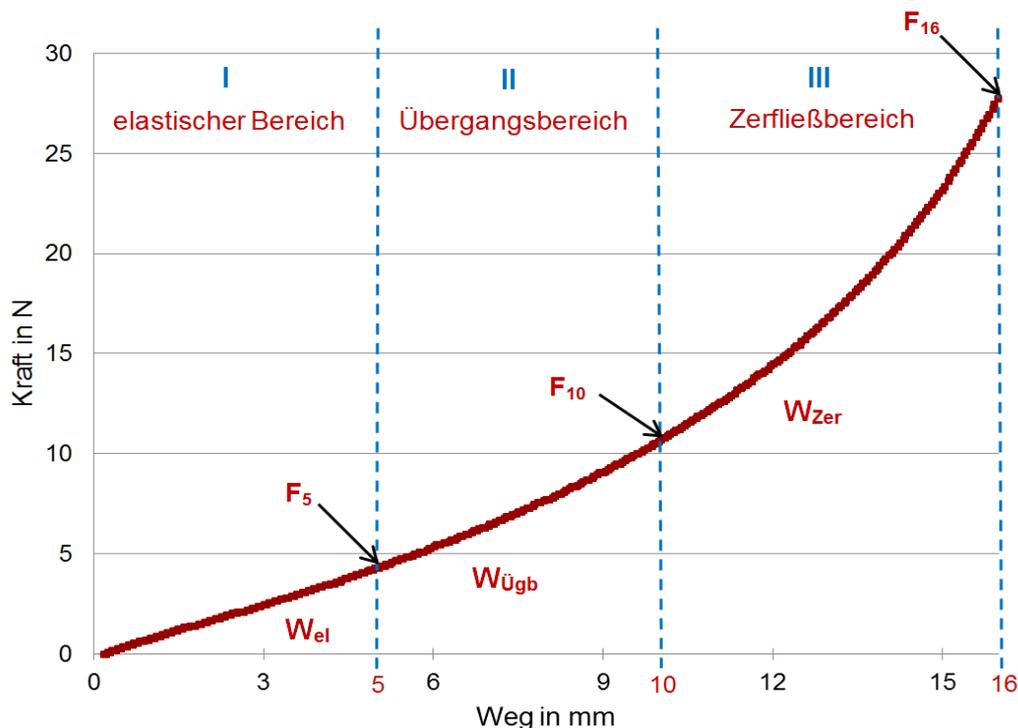


Abb. 7.3 Masterkurve der Kraft-Weg-Messungen am Beispiel MW von 17 % Labkasein

Anhand der Masterkurve der Kraft-Weg-Messungen können grundsätzlich folgende Deformationsbereiche determiniert werden:

- I. **Elastischer Bereich ($s = 0 - 5$ mm):** Hier liegt eine lineare Abhängigkeit zwischen F und s vor und das HOOKE'sche Gesetz gilt. Die elastische Verformung ist vollständig reversi-

bel und endet mit der maximalen elastischen Kraft F_5 bei $s = 5$ mm. Die Fläche in dem Bereich unter der Kraft-Weg-Kurve stellt die elastische Arbeit W_{el} dar.

- II. **Übergangsbereich ($s = 5 - 10$ mm):** Mit fortlaufender Krafteinwirkung tritt eine plastische Verformung ein. Der Übergangsbereich befindet sich zwischen dem elastischen und dem Zerfließbereich und weist eine Potenzkorrelation zwischen F und s auf. Das HOOKE'sche Gesetz gilt hier nicht mehr. Durch Einwirkung von Kraft wird die Probe irreversibel verformt. Dieser Bereich endet mit der maximalen Übergangskraft F_{10} bei $s = 10$ mm. Die Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve bezeichnet man als Übergangsarbeit $W_{Ügb}$.
- III. **Zerfließbereich ($s = 10 - 16$ mm):** Nach dem Überschreiten des Übergangsbereichs zerfließt die Probe. Es liegt ein viskoelastisches Deformationsverhalten sowie eine exponentielle Korrelation zwischen F und s vor. Am Ende dieses Bereichs wird die maximale Zerfließkraft F_{16} bei $s = 16$ mm erreicht. Die Zerfließarbeit W_{Zer} ist die Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve im Zerfließbereich.

Die Messdaten der Kraft-Weg-Kurven wurden für die einzelnen Deformationsbereiche regressiert. Tab. 7.1 zeigt die geeigneten Regressionskorrelationen sowie deren Parameter in den relevanten Bereichen bei den verwendeten Labkaseinkonzentrationen.

Tab. 7.1 Bereichsabhängige Regressionsdaten der Kraft-Weg-Kurven, $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %

Deformationsbereich & Regressionskorrelation	Regression Parameter	c_{Lk} in %			
		15	17	19	21
Elastischer Bereich (linear) Gl. 7.1: $F_{el}(s) = m_{lin} \cdot s + F_{lin}$ in N	F_{lin}	0,10	0,13	0,14	0,36
	m_{lin}	0,35	0,87	1,32	2,25
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99
Übergangsbereich (potenziell) Gl. 7.2: $F_{Ügb}(s) = F_{pot} \cdot s^{m_{pot}}$ in N	F_{pot}	0,15	0,51	0,82	1,31
	m_{pot}	1,28	1,31	1,33	1,48
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99
Zerfließbereich (exponentiell) Gl. 7.3: $F_{Zer}(s) = F_{exp} \cdot e^{m_{exp} \cdot s}$ in N	F_{exp}	0,49	2,16	3,66	8,88
	m_{exp}	0,22	0,16	0,15	0,12
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99

Die berechneten Koeffizienten und Exponenten der Regressionen im elastischen Bereich und Übergangsbereich steigen mit Erhöhung der Labkaseinkonzentration an. Dies weist auf eine erhöhte „Festigkeit“ und Strukturstabilität der Analogkäseproben hin. Die Exponenten hingegen nehmen im Zerfließbereich mit zunehmender Labkaseinkonzentration ab. Dies kann ein Signal für die Umwandlung zu einer unerwünschten gummiartigen Konsistenz sein.

Zur besseren Auswertung des Effekts der Labkaseinkonzentration auf die Textureigenschaften der Analogkäseproben wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen der Texturkennwerte (Elastizitätsmodul E , Deformationsarbeit W und maximale Kräfte für die relevanten Deformationsbereiche) ermittelt und in Tab. 7.2 dargestellt.

Tab. 7.2 Texturkennwerte in Abhängigkeit von der Labkaseinkonzentration/ $MW \pm S_{Ab}$

Texturkennwerte	c_{LK} in %			
	15	17	19	21
F_5 in N	1,72 ^d \pm 0,24	4,32 ^c \pm 0,35	6,58 ^b \pm 0,61	11,33 ^a \pm 0,80
F_{10} in N	4,80 ^d \pm 0,73	10,69 ^c \pm 0,71	15,88 ^b \pm 1,46	28,33 ^a \pm 1,69
F_{16} in N	18,70 ^d \pm 2,18	27,96 ^c \pm 1,70	38,54 ^b \pm 2,82	57,68 ^a \pm 2,35
W_{el} in Nmm	3,85 ^d \pm 0,57	10,34 ^c \pm 0,87	16,12 ^b \pm 1,53	26,27 ^a \pm 2,26
$W_{\ddot{u}gb}$ in Nmm	15,43 ^d \pm 2,26	36,22 ^c \pm 2,55	54,16 ^b \pm 4,94	96,62 ^a \pm 6,28
W_{zer} in Nmm	57,26 ^d \pm 7,61	106,13 ^c \pm 6,54	154,00 ^b \pm 12,65	251,56 ^a \pm 12,39
E in kPa	15,91 ^d \pm 2,20	39,68 ^c \pm 3,16	60,67 ^b \pm 5,59	104,38 ^a \pm 7,58

grüne Markierung: technologisches Optimum

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben in derselben Zeile ($P < 0,05$)

Anhand von Tab. 7.2 ist zu erkennen, dass die Texturkennwerte durch die Erhöhung der Labkaseinkonzentration signifikant zunehmen. Dies ist auf den Strukturstabilisierungseffekt der steigenden Konzentration von Labkasein zurückzuführen. Der Elastizitätsmodul hängt von der Labkaseinkonzentration durch eine lineare Korrelation ab, siehe Gl. 7.4:

$$E(c_{LK}) = 14,32 \cdot c_{LK} - 202,57 \quad \text{in kPa} ; R^2 = 0,97 ; i = 4 \quad \text{Gl. 7.4}$$

Die lineare Zunahme des Elastizitätsmoduls bei steigender Labkaseinkonzentration ist ein Hinweis auf erhohnte Festkörpereigenschaften. Dieser Trend geht mit den Ergebnissen der G' -Veränderung in den Temperatursweepmessungen bei der Endabkuhltemperatur (10 °C) konform. Die Proben mit 17 und 19 % Labkasein wiesen ein Applikationsrelevantes Verhalten auf.

7.2 Schmelzsatzanteil

Die Texturanalyse der bei 8 °C für 24 h gelagerten Proben mit unterschiedlichem Schmelzsatzanteil $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ % nach der Formulierung in Tab. 4.7 beim Parameter c_{SS} wurde mittels der Kraft-Weg-Messungen bei 10 °C durchgeführt [241]. In Abb. 7.4 sind die Mittelwertkurven der Kraft-Weg-Messungen in Abhängigkeit vom Schmelzsatzanteil dargestellt.

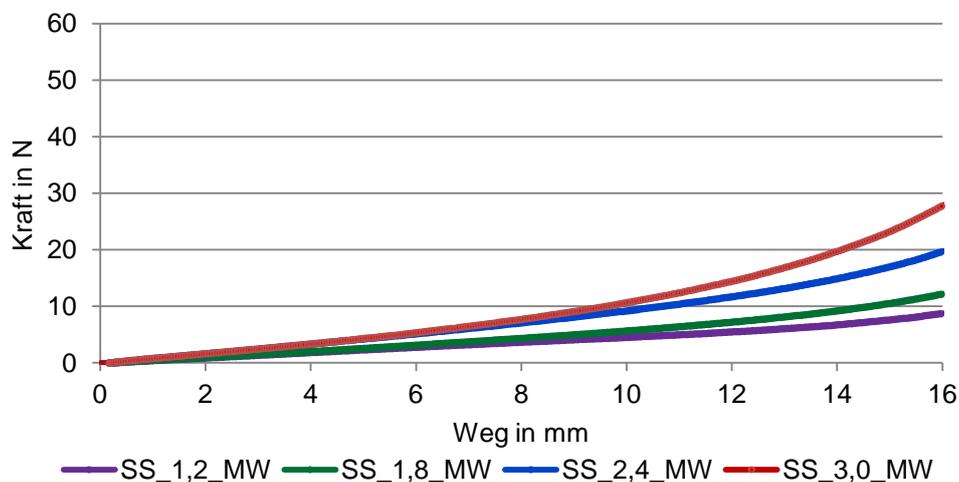


Abb. 7.4 Mittelwertkurven der Kraft-Weg-Messungen $1,2 \leq c_{SS} \leq 3$ %

Die Messdaten der Kraft-Weg-Kurven wurden für die einzelnen Deformationsbereiche nach der Masterkurve (siehe Abb. 7.3) regressiert. Tab. 7.3 zeigt die Parameter der Regressionskorrelationen in den relevanten Bereichen.

Tab. 7.3 Bereichsabhängige Regressionsdaten der Kraft-Weg-Kurven, $1,2 \leq c_{SS} \leq 3 \%$

Deformationsbereich & Regressionskorrelation	Regression Parameter	c_{SS} in %			
		1,2	1,8	2,4	3,0
Elastischer Bereich nach Gl. 7.1	F_{lin}	0,09	0,10	0,11	0,13
	m_{lin}	0,48	0,53	0,86	0,87
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99
Übergangsbereich nach Gl. 7.2	F_{pot}	0,39	0,41	0,49	0,51
	m_{pot}	0,96	1,13	1,22	1,31
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99
Zerfließbereich nach Gl. 7.3	F_{exp}	1,50	1,59	2,04	2,16
	m_{exp}	0,11	0,12	0,12	0,16
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99

Mit abnehmender Schmelzsalkonzentration sinken die Koeffizienten und Exponenten der Regressionskorrelationen ab, was auf eine Festigkeitsreduzierung gleich kommt.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Texturkennwerte (E , W und maximale Kräfte für die relevanten Deformationsbereiche) wurden ebenfalls ermittelt und in Tab. 7.4 dargestellt. Sie nehmen mit Reduzierung der Schmelzsalkonzentration aufgrund der abnehmenden Peptisierung der Kaseine durch das Schmelzsatz ab.

Tab. 7.4 Texturkennwerte in Abhängigkeit von der Schmelzsalkonzentration/ $MW \pm S_{Ab}$

Texturkennwerte	c_{SS} in %			
	1,2	1,8	2,4	3,0
F_5 in N	2,30 ^b ± 0,21	2,58 ^b ± 0,17	4,23 ^a ± 0,08	4,32 ^a ± 0,35
F_{10} in N	4,51 ^d ± 0,91	5,67 ^c ± 0,15	9,22 ^b ± 0,12	10,69 ^a ± 0,71
F_{16} in N	8,76 ^d ± 2,49	12,24 ^c ± 0,55	19,76 ^b ± 0,58	27,96 ^a ± 1,70
W_{el} in Nmm	5,66 ^b ± 0,40	6,31 ^b ± 0,54	10,41 ^a ± 0,28	10,34 ^a ± 0,87
$W_{Ügb}$ in Nmm	17,29 ^c ± 2,57	20,54 ^b ± 0,81	33,42 ^a ± 0,33	36,22 ^a ± 2,55
W_{zer} in Nmm	32,64 ^d ± 0,34	50,78 ^c ± 1,94	81,97 ^b ± 1,35	106,13 ^a ± 6,54
E in kPa	21,27 ^b ± 1,93	23,73 ^b ± 1,43	39,03 ^a ± 0,74	39,68 ^a ± 3,16

grüne Markierung: technologisches Optimum

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben in derselben Zeile ($P < 0,05$)

Die Texturanalyse bestätigte die Ergebnisse der Oszillationsmessungen, dass die Schmelzsalkonzentration von 3 % das technologische Optimum darstellt. Mit 2,4 % Schmelzsatzanteil war die Analogkäsetextur noch akzeptabel. Im Vergleich mit den Ergebnissen der labkaseinanteilabhängigen Texturanalyse ist der Einfluss der Schmelzsalkonzentration erheblich geringer.

7.3 Fettgehalt

Der Einfluss des Fettgehaltes $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ % nach der Formulierung in Tab. 4.7 beim Parameter c_{FIT} auf die textuellen Eigenschaften wurde untersucht [241]. Abb. 7.5 zeigt die Mittelwertkurven der Kraft-Weg-Messungen in Abhängigkeit vom Fettgehalt. In Tab. 7.5 sind die Regressionsparameter für die einzelnen Deformationsbereiche nach der Masterkurve (Abb. 7.3) dargestellt.

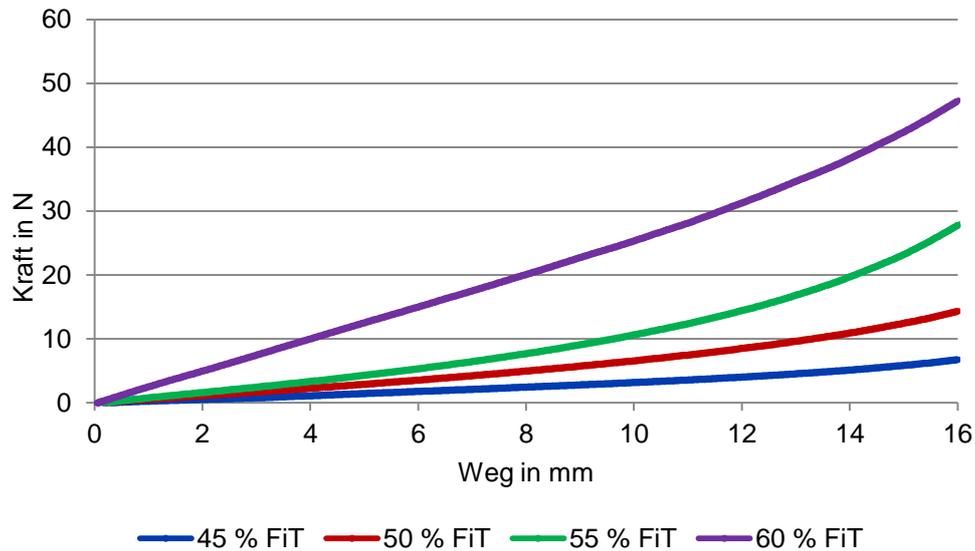


Abb. 7.5 Mittelwertkurven der Kraft-Weg-Messungen $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %

Tab. 7.5 Bereichsabhängige Regressionsdaten der Kraft-Weg-Kurven, $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ %

Deformationsbereich & Regressionskorrelation	Regression Parameter	c_{FIT} in %			
		45	50	55	60
Elastischer Bereich nach Gl. 7.1	F_{lin}	0,08	0,09	0,09	0,10
	m_{lin}	0,29	0,59	1,36	2,53
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99
Übergangsbereich nach Gl. 7.2	F_{pot}	0,24	0,43	1,22	2,42
	m_{pot}	1,13	1,18	1,06	1,02
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99
Zerfließbereich nach Gl. 7.3	F_{exp}	0,91	1,83	5,25	9,11
	m_{exp}	0,13	0,13	0,10	0,10
	R^2	0,99	0,99	0,99	0,99

Anhand von Tab. 7.5 nehmen die Koeffizienten der Regressionen mit steigendem Fettgehalt zu, was eine Erhöhung der Festkörpereigenschaften aufweist. Dies ist auf die Verwendung von Kokosfett und dessen hoher Gehalt gesättigter Fettsäuren (> 90 % des gesamten Fettsäurespektrums [127]) zurückzuführen.

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der ermittelten Texturkennwerte (E, W und maximale Kräfte für die relevanten Deformationsbereiche) in Abhängigkeit vom Fettgehalt sind in Tab. 7.6 dargestellt.

Tab. 7.6 Texturkennwerte in Abhängigkeit vom Fettgehalt/ $MW \pm S_{Ab}$

Texturkennwerte	c_{FIT} in %			
	45	50	55	60
F_5 in N	1,45 ^d ± 0,13	2,91 ^c ± 0,18	6,72 ^b ± 0,54	12,54 ^a ± 0,51
F_{10} in N	3,18 ^d ± 0,28	6,59 ^c ± 0,19	13,98 ^b ± 0,69	25,38 ^a ± 0,89
F_{16} in N	6,77 ^d ± 0,50	14,38 ^c ± 0,49	25,49 ^b ± 0,96	47,32 ^a ± 1,83
W_{el} in Nmm	3,43 ^d ± 0,35	7,19 ^c ± 0,53	16,96 ^b ± 1,79	31,84 ^a ± 1,40
$W_{ügb}$ in Nmm	11,56 ^d ± 1,06	23,52 ^c ± 0,91	51,78 ^b ± 3,12	95,12 ^a ± 3,34
W_{zer} in Nmm	28,28 ^d ± 2,34	59,92 ^c ± 1,75	116,33 ^b ± 4,64	212,19 ^a ± 7,60
E in kPa	13,35 ^d ± 1,24	26,77 ^c ± 1,59	61,81 ^b ± 4,77	115,81 ^a ± 4,96

signifikanter Unterschied zwischen den Werten mit den unterschiedlichen hochgestellten Buchstaben in derselben Zeile ($P < 0,05$)

Aus Tab. 7.6 ist zu erkennen, dass sich die Texturkennwerte mit zunehmendem Fettgehalt signifikant erhöhen. E hängt von c_{FIT} durch die folgende exponentielle Korrelation ab:

$$E(c_{FIT}) = 0,0184 \cdot e^{0,1464 \cdot c_{FIT}} \quad \text{in kPa ; } R^2 = 0,99 ; i = 4 \quad \text{Gl. 7.5}$$

Die Textureigenschaften von Ananaskäse verbessern sich mit Erhöhung des Fettgehaltes durch eine erhöhte „Festigkeit“ bei 10 °C. Dies erleichtert den Zerkleinerungsprozess. Nach der Texturanalyse bezüglich der „Festigkeit“ kann folgendes Ranking $c_{Lk} > c_{FIT} > c_{SS}$ gegeben werden.

7.4 Gesamtbewertung Applikation

In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 7.6 bis Abb. 7.9 sind Netzdiagramme zur Visualisierung der wichtigsten Einflussgrößen bei der Herstellung von Ananaskäse dargestellt. Die wesentlichen Parameter wie die Labkasein- und Schmelzsatzkonzentration, der Fettgehalt sowie der Einsatz von Hydrokolloiden als Einzelkomponenten wurden auf ihren Einfluss auf die Strukturparameter G' , $\tan \delta$, und den Applikationsparameter $s_{Fließ}$ und am Beispiel der Texturausbildung E-Modul vergleichend dargestellt. Visuell kann die Bedeutung der Einflussgrößen wichtiger Kennwerte einfach erfasst werden.

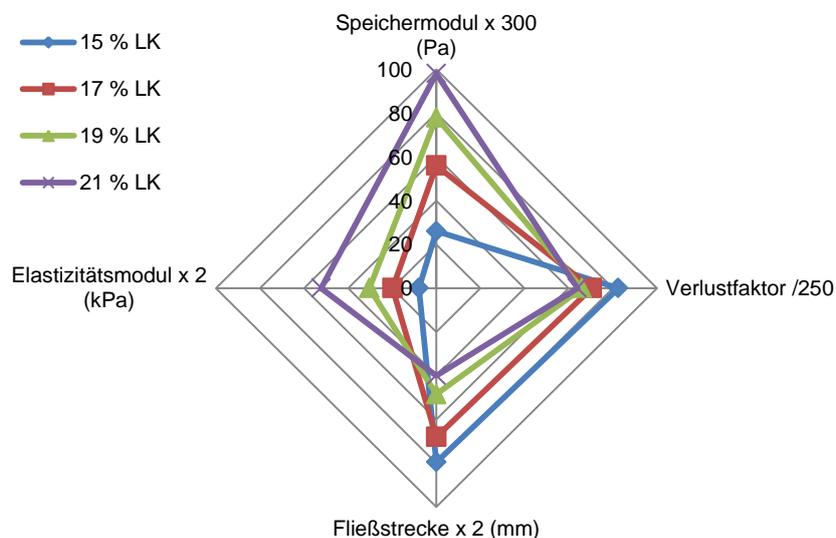


Abb. 7.6 Netzdiagramm des Einflusses der Labkaseinkonzentration

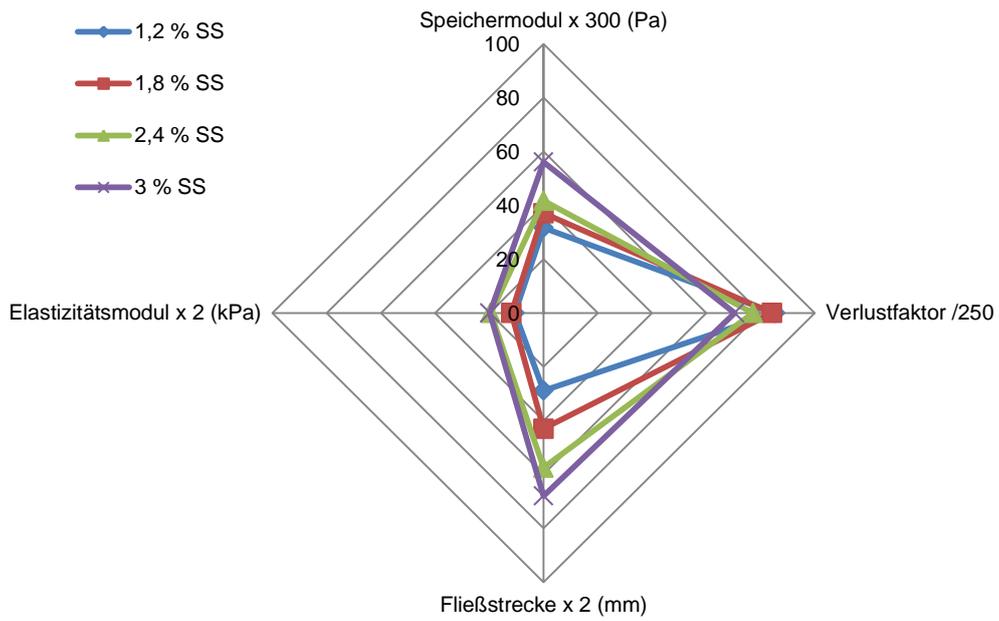


Abb. 7.7 Netzdiagramm des Einflusses der Schmelzsalzkonzentration

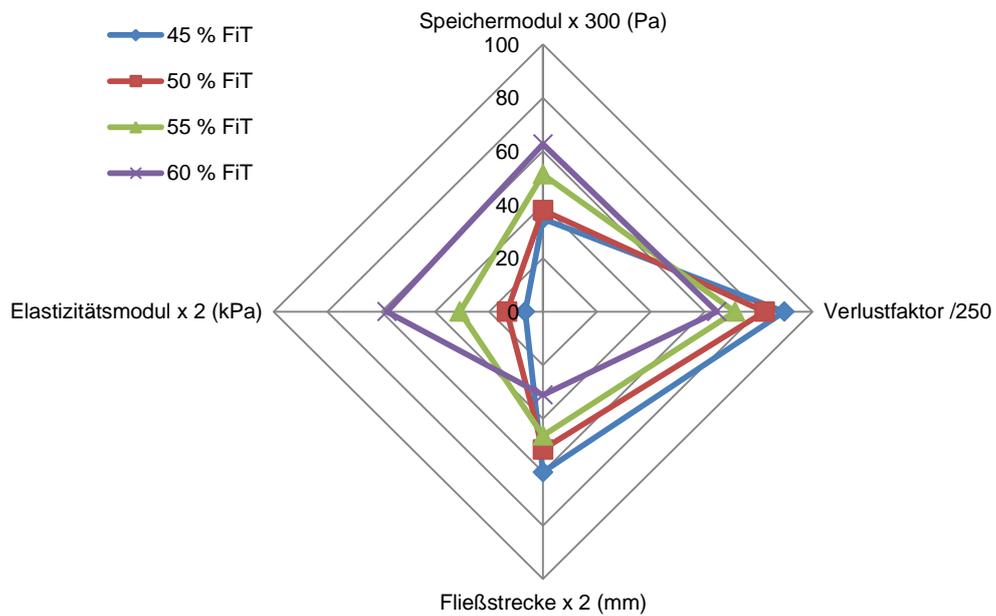


Abb. 7.8 Netzdiagramm des Fettgehalteinflusses (FiT)

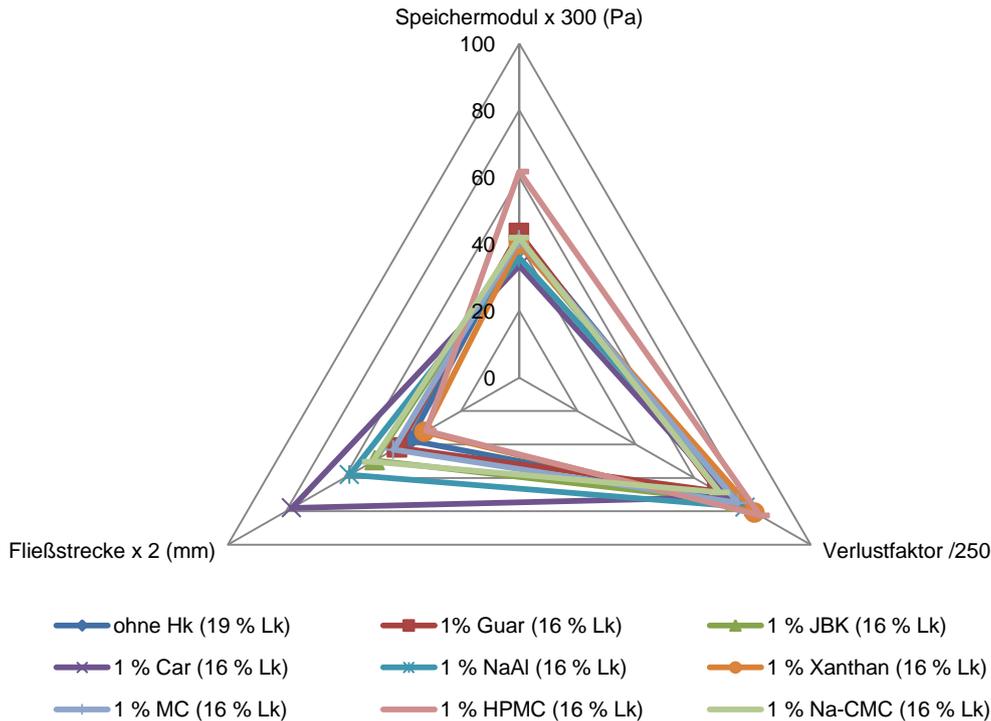


Abb. 7.9 Netzdiagramm des Einflusses von Hydrokolloidzusatz als Einzelkomponente

7.5 Kapitelzusammenfassung

Eine objektive quantitative Bewertung der Veränderungen der Textureigenschaften in Abhängigkeit vom Labkasein- und Schmelzsalzanteil sowie Fettgehalt wurde mit Hilfe der Kraft-Weg-Messungen durch die Parallelplattendeformation durchgeführt. Drei charakteristische Bereiche (elastischer Bereich, Übergangs- und Zerfließbereich) wurden anhand des Kraft-Weg-Kurvenverlaufs bestimmt und regressiert. Mit zunehmendem Labkaseinanteil stieg der Elastizitätsmodul signifikant an. Die zunehmende Schmelzsalkonzentration erhöhte die „Festigkeit“ nur leicht im Vergleich mit dem Labkaseineffekt. Die Textureigenschaften verbesserten sich mit Erhöhung des Fettgehaltes. Bezüglich der „Festigkeit“ kann folgendes Ranking $c_{LK} > c_{FIT} > c_{SS}$ gegeben werden. Die Ergebnisse der Texturmessungen bestätigen die Aussagen in 6.10.

8 Strukturausbildung in Schmelzkäsepräparationen

8.1 Einfluss des Trockensubstanzgehaltes

Eine Grundrezeptur (siehe Tab. 4.8) wurde zur Herstellung einer streichfähigen Schmelzkäsepräparation verwendet. Dann wurde die Strukturausbildung der im Labormaßstab hergestellten Schmelzkäsepräparationen in Abhängigkeit von dem Trockensubstanzgehalt c_{TS} untersucht. Vier Schmelzkäsepräparationen mit unterschiedlich eingestellten Trockensubstanzgehalten $35 \leq c_{TS} \leq 50 \%$ mit $\Delta c_{TS} = 5 \%$ (siehe Tab. 12.1 im Anhang) wurden nach Abb. 4.7 und Tab. 4.9 hergestellt. Die zuzusetzende Wassermenge m_W zur Einstellung des gewünschten Trockensubstanzgehaltes c_{TS} wurde anhand der folgenden Gleichungen berechnet:

$$Y_{SK} = \frac{W_{TS}}{c_{TS}} \cdot 100 \quad \text{in kg} \quad \text{Gl. 8.1}$$

$$m_W = Y_{SK} - m_{IM} \quad \text{in kg} \quad \text{Gl. 8.2}$$

Anhand der Seesandmethode bei 102 °C und mittels Dreifachbestimmung lag die Trockensubstanz des verwendeten Gouda bei 57,6 % ± 0,2 % und des Quarks bei 18,1 % ± 0,1 %.

In Abb. 8.1 sind die Messergebnisse der Temperatursweepmessungen dargestellt. Tab. 8.1 gibt wichtige materialwissenschaftliche Kennwerte der ausgebildeten Peaks und Endlevels in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt an.

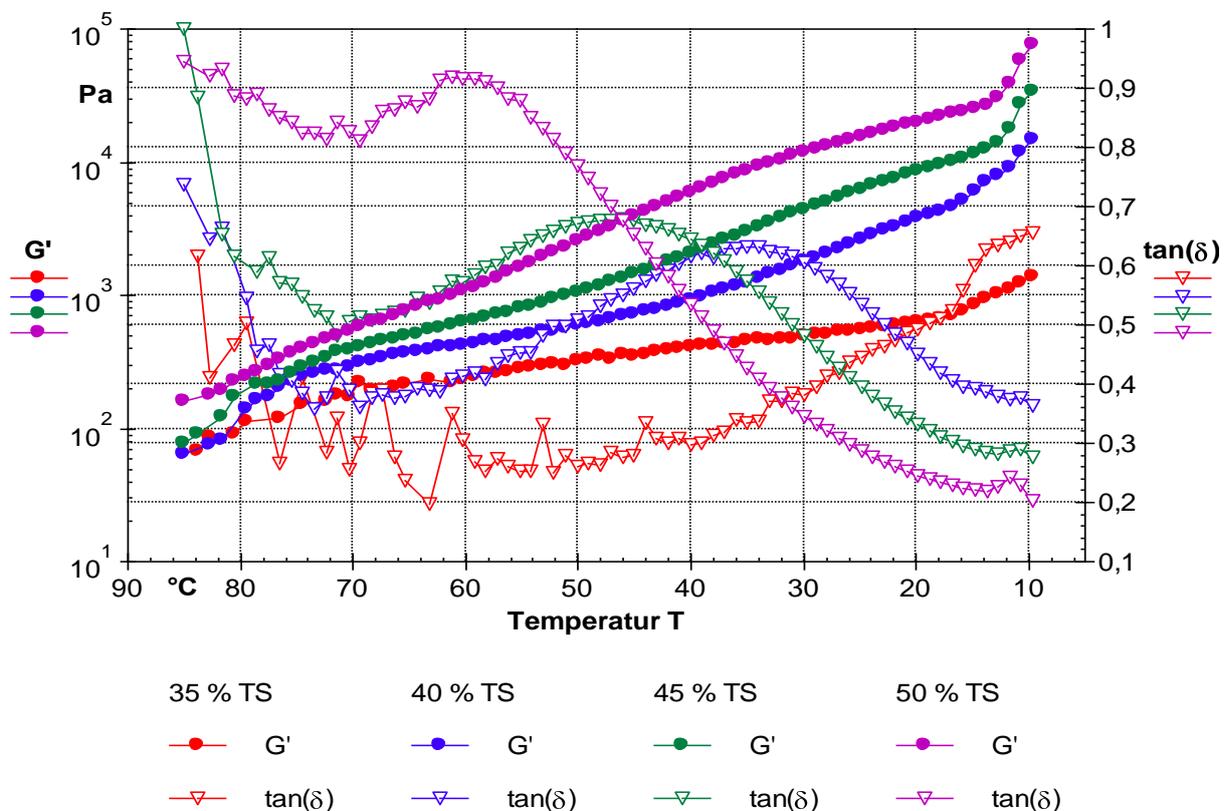


Abb. 8.1 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Trockensubstanz $35 \leq c_{TS} \leq 50 \%$

Eine exponentielle Korrelation zwischen dem Endlevel- G' und c_{TS} ist nach Gl. 8.3 regressiert:

$$G'(c_{TS}) = 22,117 \cdot e^{0,1629 \cdot c_{TS}} \text{ in Pa ; } R^2 = 0,999 ; i = 3 \text{ (35 \% } c_{TS} \text{ nicht einbezogen)} \quad \text{Gl. 8.3}$$

Tab. 8.1 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt

c_{TS} %	Peak/Endlevel	T °C	G' Pa	$\tan \delta$ –
35	Endlevel	10	1376	0,655
40	Peak 1	69	315	0,360
	Peak 2	35	1245	0,632
	Peak 3	12	9147	0,374
	Endlevel	10	14828\14948*	0,364
45	Peak 1	71	381	0,481
	Peak 2	46	1353	0,678
	Peak 3	13	17757	0,281
	Endlevel	10	34165\33754*	0,276
50	Peak 1	69	590	0,811
	Peak 2	60	1070	0,916
	Peak 3	14	26658	0,219
	Endlevel	10	75580\76217*	0,203

* berechnet nach Gl. 8.3, grüne Markierung: technologisches Optimum, rote Markierung: unterkritischer c_{TS}

Anhand des $\tan \delta$ -Kurvenverlaufs ist ersichtlich, dass die Trockensubstanzreduzierung eine Erniedrigung der Strukturstabilität bewirkt.

Bei der Schmelzkäseprobe mit einem Trockensubstanzgehalt von 35 % steigt der Verlustfaktor trotz der fortschreitenden Abkühlung an und detektiert somit einen Abbau des Strukturlevels. Ursache ist die ungenügende Menge an Kasein in der Schmelzkäsematrix. Die Probe mit einem Trockensubstanzgehalt von 50 % war zu „fest“ und mit fehlenden streichfähigen Eigenschaften.

Die bei $c_{TS} = 45$ % hergestellte Schmelzkäsepräparation wies eine stabile und homogene Masse sowie gute streichfähige Eigenschaften auf. Der Trockensubstanzgehalt von 45 % stellt somit das technologische Optimum dar.

8.2 Einfluss der Schmelzsalkonzentration

Fünf unterschiedliche Schmelzsalkonzentrationen von JOHA[®] S9 ($c_{SS} = 2,03 \leq c_{SS} \leq 2,71$ %, $\Delta c_{SS} = 0,17$ %) wurden zur Untersuchung ihres Einflusses auf die Strukturierungsmechanismen in den Schmelzkäseproben verwendet. Die Proben wurden mit der Formulierung (66 g Gouda, 28 g Quark, 6,5 g Butter und 14,7 g Wasser) bei $n = 300$ U/min und $t = 8$ min nach Abb. 4.7 präpariert.

Je nach der Schmelzsalkonzentration entstanden unterschiedliche Strukturen, die mittels der Temperatursweepmessungen erfasst wurden. Die Änderungen des G' und $\tan \delta$ der Proben im Messtemperaturbereich in Abhängigkeit von der Schmelzsalkonzentration sind in Abb. 8.2 dargestellt. Die materialwissenschaftlichen Kennwerte G' und $\tan \delta$ der ausgebildeten Peaks und Endlevels wurden in Tab. 8.2 aufgelistet.

Folgende lineare Korrelation kann zwischen c_{SS} und dem Endlevel-G' herangeleitet werden, wobei G' der Proben mit 2,03 und 2,20 % Schmelzsatzanteil nicht einbezogen wurden:

$$G'(c_{SS}) = 4602,9 \cdot c_{SS} + 3869,9 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,99 ; i = 3 \quad \text{Gl. 8.4}$$

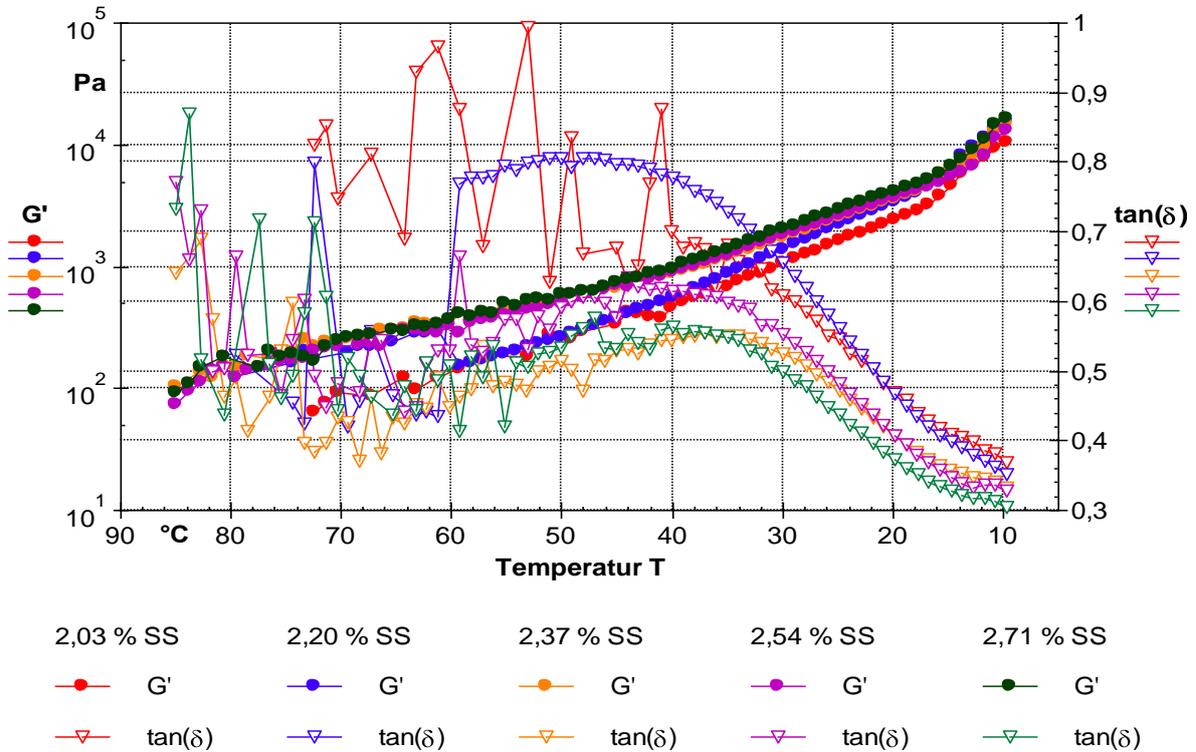


Abb. 8.2 Verlauf G' und tan δ in Abhängigkeit vom Schmelzsatzanteil $2,03 \leq c_{SS} \leq 2,71$ %

Tab. 8.2 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit von der Schmelzsatzkonzentration

c_{SS} %	Peak/Endlevel	T °C	G' Pa	tan δ -
2,03	Endlevel	10	10502	0,369
2,20	Endlevel	10	13222	0,351
2,37	Peak 1	68	256	0,370
	Peak 2	37	1056	0,555
	Peak 3	13	8094	0,347
	Endlevel	10	14812\14779*	0,331
2,54	Peak 1	71	215	0,447
	Peak 2	39	960	0,615
	Peak 3	13	6639	0,332
	Endlevel	10	15495\15561*	0,328
2,71	Peak 1	70	248	0,443
	Peak 2	40	961	0,563
	Peak 3	13	9088	0,317
	Endlevel	10	16377\16344*	0,305

* berechnet nach Gl. 8.4, grüne Markierung: Mindestkonzentration zur Sicherung guter Strukturausbildung

Bei Betrachtung von Abb. 8.2 ist zu erkennen, dass alle Schmelzkäseproben mit $\tan \delta < 1$ im gesamten Messband Festkörpereigenschaften nachweist. Stabile Strukturen bildeten sich bei $c_{SS} \geq 2,37$ % ab. Der Käseteig wies bei $c_{SS} < 2,37$ % eine relativ inhomogene Konsistenz auf. Alle mit einer Schmelzsatzkonzentration $< 2,37$ % produzierten Schmelzkäsemassen blieben nach der Cremierung dünnflüssig, zum Teil auch klumpig. Anhand von Abb. 8.2 und Tab. 8.2

ist ersichtlich, dass sich der Peak 2 als absolutes Maximum des $\tan \delta$ mit Erhöhung der Schmelzsalkonzentration in Richtung der höheren Temperaturen verschiebt, d. h. die Strukturstabilisierung erfolgt zeitlich früher. Dies ist auf eine bessere Peptisierung und Dispergierung der Ca-vernetzten Kaseine zurückzuführen. Dadurch wird eine stabilere Emulsion mit akzeptabler Struktur ermöglicht.

Eine Mindestkonzentration des eingesetzten Schmelzsalzes JOHA® S9 von 2,37 % mit Sicherung guter Strukturausbildung wurde festgestellt. Diese stellt kein technologisches Optimum dar, sondern geht mit der Reduzierung des Natriumgehaltes in Lebensmitteln konform.

8.3 Einfluss des Fettgehaltes

Es wurden insgesamt fünf Schmelzkäseproben mit jeweils 40, 45, 50, 55 und 60 % FiT nach Abb. 4.7 und Tab. 4.9 beim Parameter c_{FIT} präpariert. Zur Einstellung des gewünschten Fettgehaltes in der Trockensubstanz $c_{\text{FIT}2}$ wurde die Menge der zugegebenen Butter (82 % Fett) $m_{\text{B}2}$ anhand der Massenbilanz durch die folgenden Gleichungen berechnet:

$$c_{\text{FIT}} = \frac{F_{\text{abs}}}{W_{\text{TS}}} \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad \text{Gl. 8.5}$$

$$z = \frac{W_{\text{TS}1} \cdot (c_{\text{FIT}2} - c_{\text{FIT}1})}{100 - c_{\text{FIT}2}} \cdot 100 \quad \text{in kg} \quad \text{Gl. 8.6}$$

$$m_{\text{B}2} = m_{\text{B}1} + z \cdot \frac{100}{82} \quad \text{in kg} \quad \text{Gl. 8.7}$$

In der nachstehenden Abbildung sind die Messergebnisse der Temperatursweeps dargestellt.

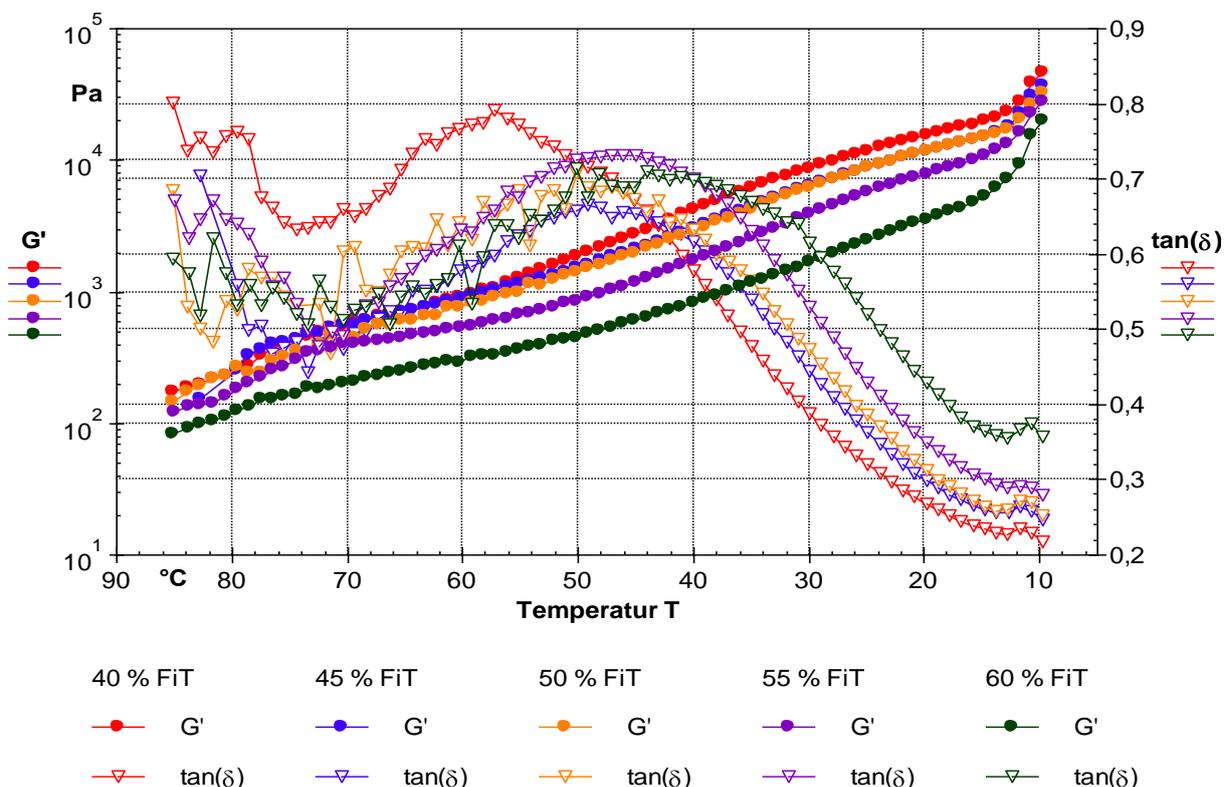


Abb. 8.3 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Butterfettgehalt $40 \leq c_{\text{FIT}} \leq 60 \%$

Die Erhöhung des Fettgehaltes bedingt eine Verringerung der Strukturausbildung. Der Endlevel-G' nahm mit zunehmendem Fettgehalt nach der folgenden linearen Korrelation ab:

$$G'(c_{\text{FIT}}) = -1279,8 \cdot c_{\text{FIT}} + 97101 \quad \text{in Pa ; } R^2 = 0,99 ; i = 5 \quad \text{Gl. 8.8}$$

In Tab. 8.3 sind wichtige materialwissenschaftliche Kennwerte der Peaks und Endlevels in Abhängigkeit vom Butterfettgehalt zusammengefasst.

Tab. 8.3 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit vom Butterfettgehalt

c_{FIT} /Fettgehaltstufe %	Peak/Endlevel	T °C	G' Pa	tan δ –
40 Fettstufe	Peak 1	73	465	0,634
	Peak 2	57	1078	0,791
	Peak 3	13	23109	0,228
	Endlevel	10	46233\45909*	0,217
45 Vollfettstufe	Peak 1	73	487	0,442
	Peak 2	49	1606	0,666
	Peak 3	14	16249	0,255
	Endlevel	10	39204\39510*	0,251
50 Rahmstufe	Peak 1	71	467	0,476
	Peak 2	47	1712	0,688
	Peak 3	14	15803	0,252
	Endlevel	10	32377\33111*	0,252
55 Rahmstufe	Peak 1	72	359	0,477
	Peak 2	46	1107	0,731
	Peak 3	13	13326	0,288
	Endlevel	10	27806\26712*	0,280
60 Doppelrahmstufe	Peak 1	70	202	0,512
	Peak 2	44	635	0,710
	Peak 3	13	7133	0,354
	Endlevel	10	19937\20313*	0,356

* berechnet nach Gl. 8.8, grüne Markierung: technologisches Optimum

Die Proben mit 50 und 55 % FiT (Rahmstufe) wiesen hinsichtlich der Streichfähigkeitseigenschaften und der Strukturausbildung beste Ergebnisse auf und wurden als technologisches Optimum festgelegt.

8.4 Einfluss der Rührerdrehzahl

Diese Versuchsanstellung beinhaltete die Untersuchung des Einflusses der Rührerdrehzahl und somit der mechanischen Energie auf die Strukturierungsmechanismen. Die Rührerdrehzahl bei der Präparation der Proben mit der in Tab. 4.9 beim Parameter n_U stehenden Formulierung wurde im Bereich $300 \leq n_U \leq 1500$ U/min mit $\Delta n_U = 300$ U/min geändert. Diese Versuche ergaben als Effekt der Drehzahländerungen unterschiedlich ausgebildete Schmelzkäsestrukturen im Labormaßstab.

Die G'- und tan δ -Änderungen der Schmelzkäseproben im Messtemperaturbereich in Abhängigkeit von der Rührerdrehzahl sind in Abb. 8.4 und die materialwissenschaftlichen Kennwerte der ausgebildeten Peaks und Endlevels in Tab. 8.4 dargestellt.

Eine Übertragung der Versuchsergebnisse in die betriebliche Praxis erscheint tendenziell sinnvoll. Die bei erhöhten Drehzahlen hergestellten Schmelzkäseproben zeichneten sich durch Ausbildung von festeren Strukturen aus (siehe Abb. 8.4).

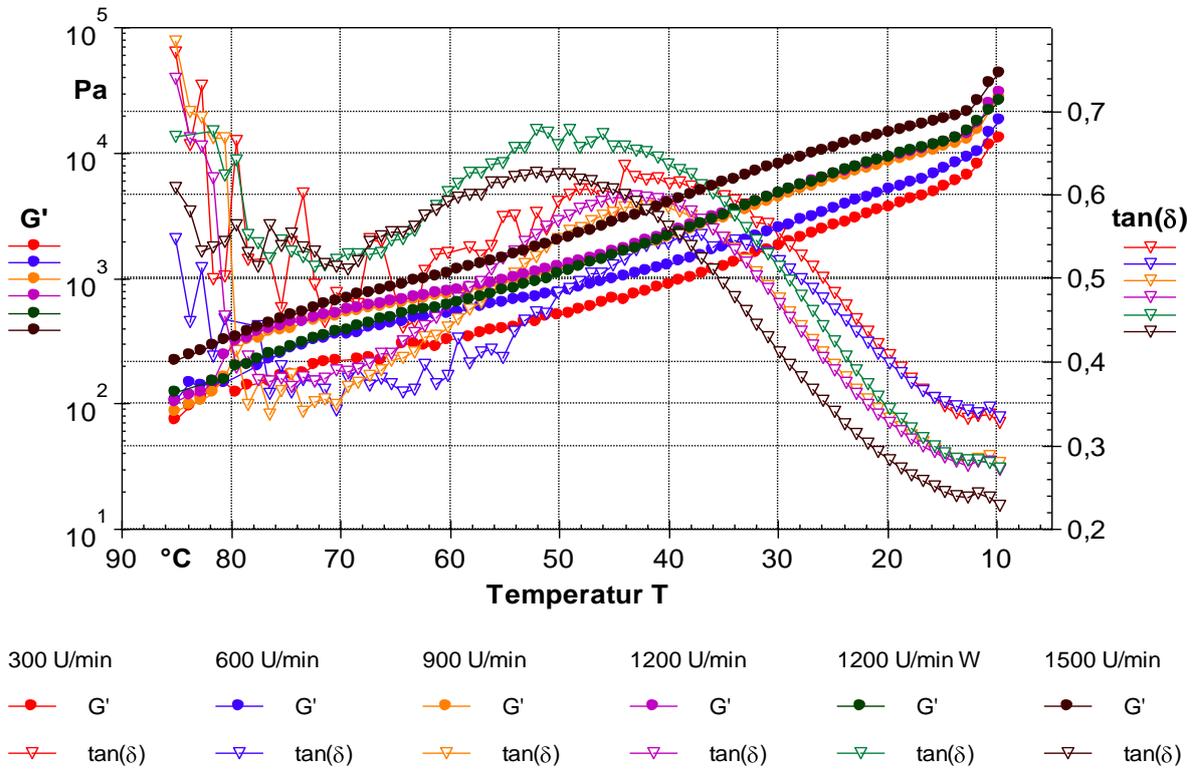


Abb. 8.4 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Drehzahl $300 \leq n_U \leq 1500$ U/min

Tab. 8.4 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit von der Rührerdrehzahl

n_U U/min	Peak/Endlevel	T °C	G' Pa	$\tan \delta$ -
300	Peak 1	71	215	0,447
	Peak 2	39	960	0,615
	Peak 3	13	6639	0,332
	Endlevel	10	15495\14937*	0,328
600	Peak 1	70	356	0,342
	Peak 2	39	1358	0,346
	Peak 3	12	10292	0,339
	Endlevel	10	18418\18989*	0,335
900	Peak 1	70	501	0,349
	Peak 2	41	1982	0,587
	Peak 3	13	12896	0,279
	Endlevel	10	27206\24140*	0,279
1200	Peak 1	72	485	0,378
	Peak 2	44	1739	0,597
	Peak 3	13	14231	0,277
	Endlevel	10	30002\30687*	0,272
1500	Peak 1	69	699	0,510
	Peak 2	52	1753	0,626
	Peak 3	13	21362	0,238
	Endlevel	10	43145\39011*	0,249

* berechnet nach Gl. 8.9, grüne Markierung: technologisches Optimum

Mit steigender Drehzahl verschiebt sich der Peak 2 in Richtung der höheren Temperaturen, was ein Hinweis auf eine schnellere Strukturstabilisierung ist. Die folgende exponentielle Korrelation ergibt sich näherungsweise zwischen n_U und dem Endlevel- G' :

$$G'(n_U) = 11750 \cdot e^{0,0008 n_U} \quad \text{in Pa ; } n_U \text{ in U/min ; } R^2 = 0,97 ; i = 5 \quad \text{Gl. 8.9}$$

Eine höhere Agitation führt zur Erhöhung des mechanischen Arbeitseintrags, der zur Dispergierung der Proteine sowie zur Zerkleinerung und Verteilung der Fettkügelchen in der Proteinmatrix benötigt wird. Die Wasser- und Fettimmobilisierung steigt somit an. Darüber hinaus kommt es bei einer zu hohen mechanischen Energie zum „Verspinnen“ der Kaseine und bildet sich dadurch ein starkes Proteinnetzwerk mit Strukturverfestigung.

Eine cremige und streichfähige Schmelzkäsekonsistenz wurde bei Schmelzkäseproben nachgewiesen, die mit einem nicht technologierelevanten Drehzahlbereich von 900 bis 1200 U/min produziert wurden. Es war kein Ausfetten der Oberfläche sichtbar. Die Fließfähigkeit nach dem Schmelzvorgang war vorhanden. Die Proben wiesen eine glatte Oberfläche ohne Schrumpfungerscheinungen auf. Bei $n_U \leq 600$ U/min wurde bei allen Schmelzkäseproben das Vorhandensein einer geschrumpften Oberfläche sowie Ausfetten festgestellt. Bei $n_U > 1200$ U/min zeigten die Proben unmittelbar nach dem Schmelzen eine geringfügige Fließfähigkeit. Sie waren nicht mehr streichfähig und wiesen eine zu feste und unakzeptable Konsistenz auf (Abb. 8.5).



Abb. 8.5 Schmelzkäseproben als Funktion der Rührerdrehzahl

Der Effekt des Ausfettens, der bei $n_U < 900$ U/min zu beobachten ist, tritt möglicherweise aufgrund der unzureichenden Emulsionsstabilisierung während des Cremierungsvorganges auf, die durch einen vollständigen Fetttropfeneinschluss in das physikalische Proteinnetzwerk zustande kommt. Eine Drehzahl in Höhe von 900 U/min wurde als technologisches Optimum im Labormaßstab gefunden.

8.5 Einfluss der Schmelzprozesszeit

Der Schmelzprozess für die in Tab. 4.9 zum Parameter t stehende Formulierung mit $n_U = 900$ U/min wurde bei verschiedenen Zeiten $4 \leq t \leq 12$ min mit $\Delta t = 2$ min durchgeführt. Als Resultat der Änderung der Schmelzprozesszeit entstanden unterschiedlich ausgebildete

Strukturen. Abb. 8.6 zeigt die Messergebnisse von G' und $\tan \delta$ der durchgeführten Temperatursweepmessungen. Materialwissenschaftliche Kennwerte der ausgebildeten Peaks und Endlevels sind in Tab. 8.5 angegeben.

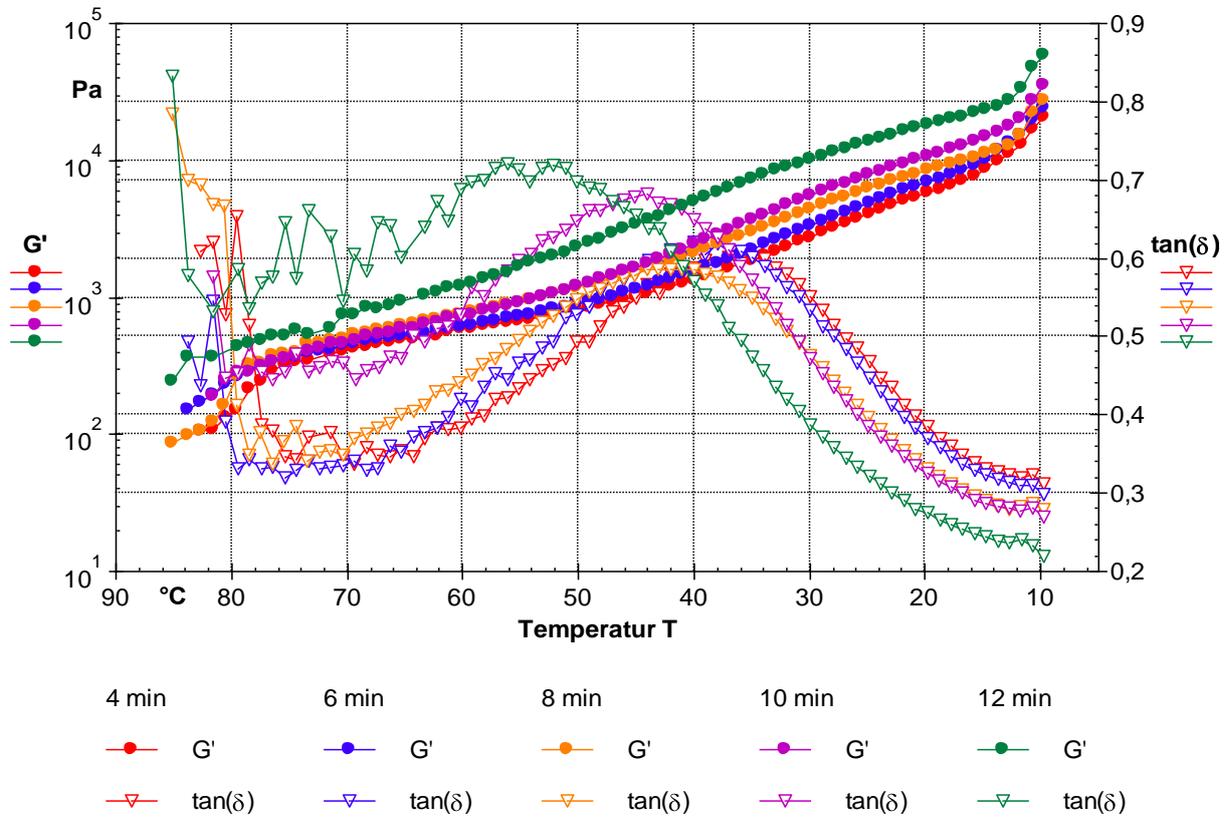


Abb. 8.6 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Schmelzprozesszeit $4 \leq t \leq 12$ min

Tab. 8.5 Peaks und Endlevels in Abhängigkeit von der Schmelzprozesszeit

t min	Peak/Endlevel	T °C	G' Pa	$\tan \delta$ -
4	Peak 1	69	428	0,337
	Peak 2	35	1858	0,601
	Peak 3	12	13075	0,320
	Endlevel	10	20755\18900*	0,311
6	Peak 1	72	407	0,331
	Peak 2	38	1776	0,618
	Peak 3	12	15342	0,310
	Endlevel	10	24131\24152*	0,298
8	Peak 1	70	501	0,349
	Peak 2	41	1982	0,587
	Peak 3	13	12896	0,279
	Endlevel	10	27206\30863*	0,279
10	Peak 1	69	489	0,445
	Peak 2	44	1765	0,682
	Peak 3	13	18015	0,280
	Endlevel	10	34929\39440*	0,269
12	Peak 1	70	754	0,544
	Peak 2	52	1990	0,718
	Peak 3	13	27500	0,237
	Endlevel	10	58764\50398*	0,219

* berechnet nach Gl. 8.10, grüne Markierung: technologisches Optimum

Anhand von Abb. 8.6 und Tab. 8.5 ist zu erkennen, dass mit steigender Schmelzprozesszeit die Schmelzkäseproben fester werden sowie sich der Peak 2 in Richtung der höheren Temperaturen verschiebt, was auf eine schnellere Strukturstabilisierung aufgrund des erhöhten mechanischen Energieeintrags hinweist. Der Endlevel von G' nahm mit zunehmender Schmelzprozesszeit näherungsweise exponentiell nach der folgenden Trendgleichung zu.

$$G'(t) = 11574 \cdot e^{0,1226 t} \quad \text{in Pa ; } t \text{ in min ; } R^2 = 0,91 ; i = 5 \quad \text{Gl. 8.10}$$

Bei $t = 4 - 6$ min waren die Proben relativ dünnflüssig. Nach der Abkühlung hat sich eine geschrumpfte Oberfläche ausgebildet. Die bei $t = 8 - 10$ min präparierten Proben hingegen waren fester und wiesen streichfähige Eigenschaften bei guter Struktur auf. Dagegen war die bei $t = 12$ min präparierte Schmelzkäseprobe zu fest und nicht mehr streichfähig. Ein technologisches Optimum wurde bei $t = 8$ min gefunden.

8.6 Ableitung einer Masterkurve

Aufgrund des weitestgehend identischen Kurvenverlaufs (G' , G'' und $\tan \delta$) während der Abkühlung bei den Temperatursweepmessungen aller untersuchten Schmelzkäseproben wurde eine Masterkurve am Beispiel des gefundenen technologischen Optimums ($c_{TS} = 45\%$, $c_{SS} = 2,54\%$, $c_{FIT} = 50\%$, $n_U = 900$ U/min und $t = 8$ min abgeleitet (siehe Abb. 8.7).

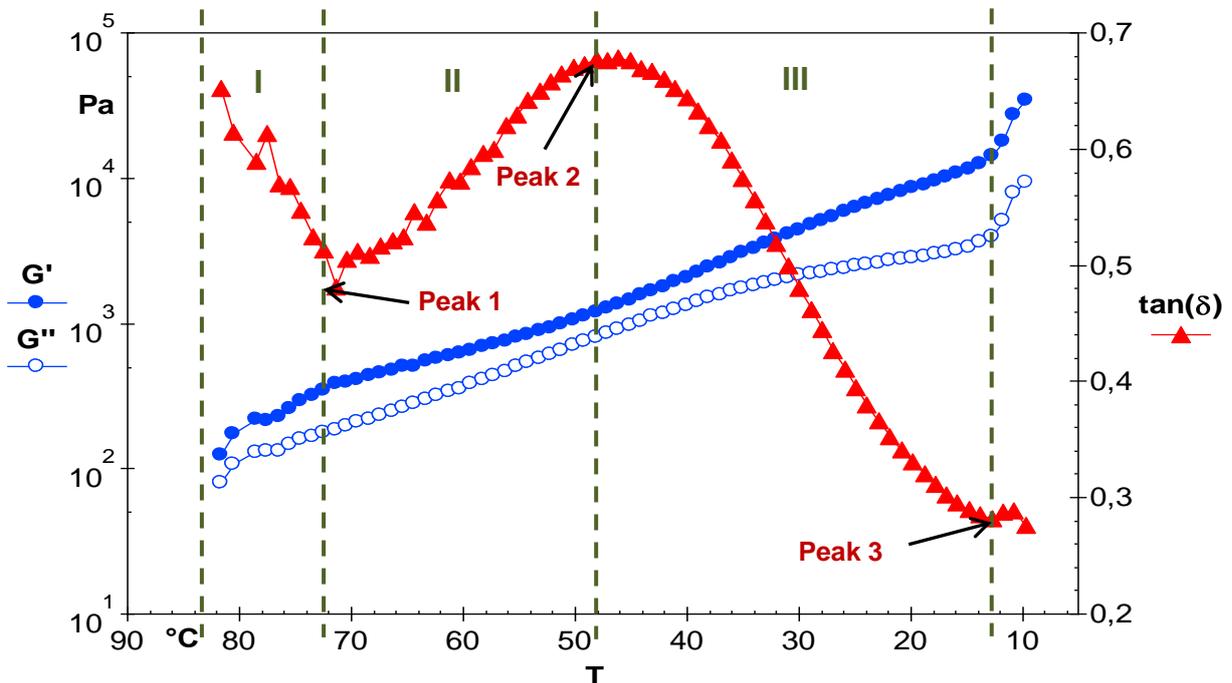


Abb. 8.7 Masterkurve am Beispiel des technologischen Optimums

Hergestellt wurde zu jeder Phase des Prozessablaufes ein viskoelastisches System mit ausgeprägten Festkörpereigenschaften ($G' > G''$). Aus Abb. 8.7 ist ersichtlich, dass sich die Kurve des $\tan \delta$ in drei charakteristische Abschnitte und drei charakteristische Peaks (Peak 1, Peak 2 und Peak 3) einteilen lässt. Die Kurvenabschnitte und die Peakausbildung werden wie folgt analysiert:

Abschnitt I: Bei fast allen Schmelzkäseproben bildete sich bei einer Temperatur von 68 – 73 °C ein relatives Minimum (Peak 1) aus. Das Absinken des $\tan \delta$ bis zum Erreichen des Peaks 1 kennzeichnet eine Strukturausbildung auf niedrigem Level. Dieser Strukturaufbau bei hohen Temperaturen kann als Zusammenlagerung der Kaseinmicellen mit ersten Interaktionen zur flüssigen Fettphase gewertet werden.

Abschnitt II: Nachdem der $\tan \delta$ sein Minimum erreicht hat, findet ein kontinuierlicher Anstieg des Verlustfaktors statt, der für einen zunehmenden viskosen Anteil des viskoelastischen Systems kennzeichnend ist. Dieser Vorgang ist auf die Schwächung der hydrophoben Interaktionen zurückzuführen. Der Peak 2 als absolutes Maximum im Temperaturbereich von 35 – 60 °C (abhängig von den Versuchsbedingungen) bildet sich ab. Der Speichermodul steigt in diesem Abschnitt weiter an, was auf das Eintreten der hydrophilen Interaktionen hinweist.

Abschnitt III: Das folgende Absinken des Verlustfaktors indiziert eine abkühlungsbedingte Erstarrung des gesamten Systems und die Fettauskristallisation sowie die Wasserimmobilisierung mittels Wasserstoffbrückenbindungen. Am Ende des Untersuchungsbereiches wurde der Peak 3 bei einer Temperatur von ca. 13 °C definiert. Dieser Peak deutet auf die Phasenumwandlung der Ölsäure hin (Milchfett enthält 23 % Ölsäure als Mittelwert, deren Schmelzpunkttemperatur bei 14 °C liegt [62]).

8.7 Kapitelzusammenfassung

Ingredienzen und Technologieführung beeinflussten in hohem Maße die Strukturausbildung und damit die Produktqualität bei der Schmelzkäseherstellung. Ein technologisches Optimum für die Versuche im kleintechnischen Labormaßstab wurde bei $c_{TS} = 45 \%$, $c_{SS} = 2,54 \%$, $c_{FIT} = 50 \%$, $n_U = 900 \text{ U/min}$ und $t = 8 \text{ min}$ ermittelt.

Aus materialwissenschaftlicher Sicht handelte es sich bei allen produzierten Schmelzkäseproben um ein viskoelastisches Material mit dominant elastischem Verhalten. Während des Abkühlungsverlaufs bei den Temperatursweepmessungen der Schmelzkäseproben traten verschiedene Mechanismen der Strukturausbildung analog wie bei den Analogkäseproben auf, jedoch auf höherem Level. Hydrophoben und Hydrophilen Interaktionen der Proteine mit dem Butterfett und Wasser sowie die Fettkristallisation nach der Abkühlung sind die entscheidenden Strukturbildungsfaktoren. Unterschiede im Verlauf der Masterkurve zum Analogkäse wurden festgestellt.

9 Hinweise für weiterführende Untersuchungen

Die ermittelten Messergebnisse sind für die die Produkt- und Technologieoptimierung von Bedeutung. Als weitere ergänzende Untersuchungen werden empfohlen:

1. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einsatz verschiedener Hydrokolloiden als Einzelkomponenten untersucht. Deshalb ist im Hinblick auf die Strukturausbildung und funktionelle Eigenschaften zu empfehlen, den Einfluss von positiv interagierenden Hydrokolloidmischungen zu untersuchen.
2. In dieser Arbeit wurde nur Sojaproteinisolat als pflanzliches Protein zur Labkaseinsubstitution verwendet. Aus sensorischen und strukturellen Aspekten war der Erfolg jedoch begrenzt. Da natives Sojaprotein eine komplexe Quartärstruktur aufweist und seine Moleküle größer sind als die der Milchproteine, wäre es durchaus interessant, dass Einsatzpotential anderer pflanzlicher Proteine (z. B. Weizengluten) oder von enzymmodifizierten Sojaproteinen (Modifikation durch Proteasen wie z. B. Trypsin) zu untersuchen.
3. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Analogkäse bzw. Schmelzkäse mit reduzierendem Fettgehalt und gesundheitlichen Vorteilen durch den Einsatz von Inulin (präbiotischer, löslicher Ballaststoff) herzustellen und den Einfluss auf die Strukturausbildung sowie die Schmelzbarkeit und Schnittfestigkeit zu untersuchen.
4. Die Untersuchungen des Substitutionspotentials wurden bei der Herstellung von Analogkäse in dieser Arbeit mit nativen Stärken durchgeführt. Interessant wäre der Einsatz modifizierter Stärken zur Proteinsubstitution, z. B. Acetyliertes Distärkeadipat (E 1422) mit erhöhter Wasserbindekapazität. Ziel ist die Produktoptimierung durch Einsatz von kostengünstigen Ingredienzien und Minimierung der tierischen Bestandteile.
5. Aufgrund des Einflusses der Art des eingesetzten Fettes auf die Strukturausbildung wäre zu empfehlen, verschiedene pflanzliche Öle bzw. Fette (regional) bei der Herstellung von Analogkäse zu verwenden und deren Einfluss auf die Strukturausbildung und Textureigenschaften zu untersuchen.
6. Der Einfluss verschiedener Schmelzsalze bei der Schmelzkäseherstellung ist relativ bekannt. Dies ist bei der Analogkäseherstellung nicht der Fall. Folglich wäre es interessant, den Einfluss unterschiedlicher Schmelzsalze auf die Strukturausbildung in Analogkäse zu untersuchen.
7. Ein weiterer interessanter Aspekt wäre die Bewertung der Applikationsparameter (Aufschmelzverhalten und Elastizitätsmodul bei der Texturanalyse) zum Qualitätsvergleich unterschiedlicher Lieferanten bzw. Hersteller.

10 Zusammenfassung

Eine lebensmittelmateriawissenschaftliche Analyse bei der Herstellung von Analog- und Schmelzkäse im Labormaßstab war Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen. Aus der Literaturrecherche ging hervor, dass Käseimitate im Vergleich zu natürlichem Milchkäse neben den technologischen Vorteilen verschiedene gesundheitliche und ökonomische Vorzüge besitzen. Untersuchungen zur Strukturausbildung bei variablem Ingredienzieneinsatz und Technologieführung konnten nicht recherchiert werden. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss der Ingredienzien sowie der Technologieführung auf die Strukturausbildung, die Textureigenschaften und die Schmelzbarkeit von im Labormaßstab hergestellten Analog- und Schmelzkäsepräparationen zu untersuchen und technologische Optima festzulegen.

Auf die Strukturausbildung und die Schmelzbarkeit von Analogkäse wurde der konzentrationsabhängige Einfluss von Labkasein, Schmelzsalz, Fett und Stärke botanischer Herkunft untersucht. Darüber hinaus wurde das Potenzial der Labkaseinsubstitution durch Weizenstärke, Säurekasein, micellares Kasein oder Sojaproteinisolat und die Eignung von Hydrokolloiden bewertet. Ferner wurde der Einfluss der technologischen Parameter (z. B. Drehzahl) des verwendeten Prozesssystems untersucht.

Eine Partikelgrößenanalytik der eingesetzten Proteinpulver ergab eine deutlich verringerte Partikulierung des micellaren Kaseins und Sojaproteinisolats im Vergleich zum Lab- und Säurekasein deutlich. Das Sojaproteinisolat besaß die höchste Wasserbindekapazität. Die höchste Fettbindekapazität wurde für das micellare Kasein gefunden.

Durch die Oszillationsmessungen im Modus Temperatursweep wurde die native Mikrostruktur der Analogkäseproben zerstörungsfrei untersucht. Analogkäse ist im Gegensatz zu natürlichem Labkäse ein viskoelastisches Material mit einer Dispersionsstruktur, welches sich aus einer festen O/W-Emulsion (20 % Fett) und einer kaseinstabilisierten Suspension (ca. 60 % Wasser) zusammensetzt. Die unterschiedlich ablaufenden Mechanismen konnten anhand des Abkühlungsverlaufes von 85 auf 10 °C am Beispiel von Speichermodul und Verlustfaktor erfasst und bewertet werden. Drei charakteristische Abschnitte mit 2 Peaks wurden unter Zuhilfenahme des Verlustfaktorverlaufs während des Messtemperaturbereiches bestimmt und analysiert. Die hauptsächlichen Strukturbildungsfaktoren waren hydrophobe und hydrophile Interaktionen sowie die abschließende Fettkristallisation. Durch die Ermittlung der Strukturbildungsgeschwindigkeit und -beschleunigung konnte eine vertiefende analytische Bewertung der strukturellen Veränderungen und eine weitere Aufklärung der einwirkenden Strukturierungsmechanismen durchgeführt werden. Vier erkennbare Bereiche wurden beschrieben.

Mit zunehmendem Labkaseinanteil erhöhten sich die Interaktionen in der Matrix zur Fett- und Wasserbindung und bewirkten eine stärkere Wasserimmobilisierung. Die Proben mit 17 % und 19 % Labkaseinanteil stellten das technologische Optimum dar. Der zunehmende Schmelzsalzanteil (hier JOHA[®] S9) führte aufgrund der steigenden Ionenstärke der Natrium- und Phosphatgruppen in der Analogkäsemischung zur Verbesserung der Strukturausbildung. Eine Mindestkonzentration von 2,1 % wurde vorgeschlagen. Der Fettgehalt (hier Kokosfett) spielte

bei der Strukturausbildung durch die Fettkristallisation eine entscheidende Rolle. Mit zunehmendem Fettgehalt wies die finale Käsestruktur eine höhere „Festigkeit“ auf. Ein Mindestgehalt lag bei 50 % FiT (20 % Fett absolut) vor. Eine zusätzliche Stärkezugabe von maximal 2,0 bis 2,5 % führte über erhöhte Wasserstoffbrückenbindungen zu einer Strukturverbesserung. Mit zunehmendem Stärkeanteil im Käseimitat stieg der Speichermodul an. Bei der Verwendung von Maisstärke wurden keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zur Weizenstärke festgestellt. Ersetzt man Weizenstärke durch Kartoffelstärke, entstehen Produkte mit deutlich geringerer „Festigkeit“.

Das Labkasein stellte aufgrund seiner funktionellen Eigenschaften (ambivalenter Charakter) die wichtigste Ingredienz bei der Herstellung von Analogkäse dar. Substitutionsuntersuchungen ergaben, dass durch Weizenstärke bis zu einer Relation 60 Lk:40 S2 die Strukturausbildung durch Erhöhung der Wasserimmobilisierung verbessert wurde. Bei höherem Weizenstärkeanteil ging der Mechanismus der originären Strukturausbildung verloren. Eine Labkaseinsubstitution durch ein micellares Kasein führte zu Schaumbildung und dadurch zur Volumenerhöhung. Der Gehalt an Molkenproteinen und Laktose im micellaren Kasein bewirkte eine geringere Hitzestabilität mit intensiver Braunfärbung infolge Maillardreaktion. Der Analogkäse mit micellarem Kasein eignet sich daher eher als Grillkäse. Die Labkaseinsubstitution durch Säurekasein wies keine verbesserte Strukturausbildung auf und war mit der Einschränkung verbunden, dass der Labkaseinanteil gegenüber dem Säurekaseinanteil dominierend ist. Die Labkaseinsubstitution durch Sojaproteinisolat musste kritisch bewertet werden, was auf den typischen Soja-Geschmack ab einer Relation 70 Lk:30 SPI sowie die krümelige Konsistenz mit > 50 % SPI des Proteinanteil aufgrund der fehlenden Ausbildung eines Proteinnetzwerk zurückzuführen war. Die Relation 80 Lk:20 SPI stellte das mögliche Substitutionspotenzial dar. Ein Hydrokolloideinsatz mit 1 % erfolgte nach einer Reduzierung des Labkaseinanteils auf 16 %. Hierbei wurden acht verschiedene Hydrokolloide als Einzelkomponenten verwendet und deren Einfluss auf die Strukturausbildung bewertet und miteinander verglichen. Die eingesetzten Hydrokolloide mit Ausnahme von κ -Carrageenan und Natriumalginat (Gelbildner) wirkten sich positiv auf die strukturellen Eigenschaften aus. Die Cellulose-Derivate E 461 und E 466 zeigten im Vergleich zu den anderen Hydrokolloiden eine deutlich verbesserte Strukturausbildung.

Mit abnehmendem pH-Wert der Präparationen stieg der Speichermodul aufgrund der Näherung der Kaseine zum isoelektrischen Punkt an. Ab einem pH-Wert von 5,36 wurden die Präparationen als zu sauer für den Verzehr empfunden.

Die Erhöhung der Drehzahl des verwendeten Mischsystems führte aufgrund der steigenden Homogenität der Käsematrix und des „Verspinnens“ der Kaseine zu einer Strukturverbesserung mit geringer potenzieller Abhängigkeit.

Durchgeführte Schermessungen der vermischten Komponenten bei 85 °C wiesen ein plastisches Medium nach, welches durch das HERSCHEL-BULKLEY-Modell beschrieben wurde. Die ermittelten rheologischen Parameter des Fließverhaltens können für die Auslegung der

Prozesstechnik und die Abfüllvorrichtung genutzt werden. Die Fließgrenze und der Konsistenzfaktor sowie die Strukturzerstörungsarbeit stiegen mit zunehmendem Labkasein- und Schmelzsalzanteil sowie Fettgehalt an. Der Einfluss des Fettgehaltes auf die Struktur und Scherstabilität war geringer als der Labkaseineinfluss, jedoch deutlich höher als der Einfluss des Schmelzsalzanteils.

Eine objektive quantitative Bewertung der Veränderungen der Textureigenschaften in Abhängigkeit vom Labkasein- und Schmelzsalzanteil sowie Fettgehalt wurde durch Parallelplattendeformation durchgeführt. Drei charakteristische Deformationsbereiche (elastischer Bereich, Übergangs- und Zerfließbereich) wurden am Beispiel des Kraft-Weg-Kurvenverlaufs analysiert und bewertet. Mit zunehmendem Labkaseinanteil stieg der Elastizitätsmodul signifikant an. Der zunehmende Schmelzsalzanteil erhöhte die „Festigkeit“ im Vergleich mit dem Labkaseineffekt nur in geringem Maße. Die Textureigenschaften verbesserten sich mit Erhöhung des Fettgehaltes. Nach der Texturanalyse bezüglich der Krafteinwirkung und des ermittelten Elastizitätsmoduls kann folgendes Ranking $c_{LK} > c_{FIT} > c_{SS}$ aufgestellt werden. Hierbei wurden die Aussagen anhand der Temperatursweepmessungen bestätigt.

Der Einfluss der Parameter Labkasein- und Schmelzsalzanteil sowie Fettgehalt wurden für das Aufschmelzverhalten ermittelt. Anhand des Schmelzbarkeitstests führte die Erhöhung des Labkaseinanteils und des Fettgehaltes aufgrund der verstärkten Protein-Fett-Interaktionen zur Reduzierung der Fließstrecke. Durch die steigende Peptisierung der Kaseine erhöhte das Schmelzsalz die Schmelzbarkeit. Ein 1 %iger Einsatz unterschiedlicher Hydrokolloide spielte beim Schmelzverhalten durch die hohe Wasserimmobilisierung eine große Rolle. Die Proben mit Na-CMC, κ -Carrageenan, Natriumalginat oder Johannisbrotkernmehl wiesen eine gute Schmelzbarkeit auf. Bei den Proben mit Xanthan oder HPMC war diese aufgrund sehr gering.

Die Strukturausbildung von den im Labormaßstab hergestellten Schmelzkäseproben wurde auf analoge Weise am Beispiel des Trockensubstanzgehaltes, der Schmelzsalzkonzentration, des Fettgehaltes, der Rührerdrehzahl und der Schmelzprozesszeit untersucht, bewertet und optimiert. Während des Abkühlungsverlaufs bei den Temperatursweepmessungen traten verschiedene Mechanismen der Strukturausbildung auf. Anhand des Verlustfaktors wurden drei charakteristische Abschnitte mit drei Peaks differenziert und beschrieben. Diese wurden durch hydrophobe und hydrophile Interaktionen der Proteine mit dem Butterfett und Wasser sowie die Fettkristallisation nach der Abkühlung entstanden. Ein technologisches Optimum für die Herstellung von streichfähigem Schmelzkäse im kleintechnischen Labormaßstab wurde bei $c_{TS} = 45 \%$, $c_{SS} = 2,54 \%$, $c_{FIT} = 50 \%$, $n_U = 900 \text{ U/min}$ und $t = 8 \text{ min}$ ermittelt.

Die Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass mit Hilfe von modernen materialwissenschaftlichen Messungen die Mechanismen der Strukturausbildung sowohl in Analog- als auch in Schmelzkäse in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern erfolgreich analysiert und bewertet und für Produkt- und Technologieoptimierung genutzt werden können.

11 Literaturverzeichnis

- [1]. **Anonymous.** *Beilage zum Geschäftsbericht 2012/2013; Zahlen - Daten - Fakten.* Erstellt von ZMB GmbH. Berlin, Deutschland : Herausgeber: Milchindustrie-Verband e. V., September 2013.
- [2]. **Welsh, Thomas L.** Meat and Dairy Analogs from Vegetable Proteins. *Journal of the American Oil Chemists`Society.* 1979, 59, S. 404-406.
- [3]. **Tamime , A. Y.,.** *Structure of Dairy Products.* Oxford, UK : Blackwell Publishing Ltd., 2007. ISBN: 978-1-4051-2975-6,.
- [4]. **Shaw, M.** Cheese substitutes: threads or opportunity. *Journal of the Society of Dairy Technology.* 1984, 37, S. 27-31.
- [5]. **Anonymous.** The present and future importance of imitation dairy products. *Bulletin of the International Dairy Federation.* 1989, 239, S. 3-20.
- [6]. **Mc Carthy, J.** Imitation cheese products. In: The World Dairy Situation-Butter: the World Market Imitation Cheese Products. *Brussels: International Dairy Federation.* 1990, Bulletin No. 249, S. 45-52.
- [7]. **Mortensen, H. und Mc Carthy, J.** Imitation cheese products will gain importance. *Scandinavian Dairy Information.* 1991, 5, S. 14-15.
- [8]. **Engel, M. E.** *Process for producing synthetic cheese.* 5,098,729 United States Patent, 24. Mar. 1992.
- [9]. **Lee, S. Y. K., Park, P. S. W. und Rhee, K. C.** Textural properties of cheese analogs containing proteolytic enzyme-modified soy preprotein isolates. *Journal of the American Oil Chemists`Society.* 1992, 69, S. 755-759.
- [10]. **Chavan, R. S. und Atanu, J.** Cheese Substitutes: An Alternative to Natural Cheese-A review. *Int. J. of Food Science, Technology & Nutrition.* 2007, 2 (2), S. 25-39.
- [11]. **Fox, P. F.; Guinee, T. P.; Cogan, T. P. & McSweeney, P. L. H.** *Fundamentals of Cheese Science.* Gaithersburg : Aspen Publishers, 2000. ISBN: 0-8342-1260-9.
- [12]. **Anonymous.** Alles Käse oder was? S. 5. [Online] MUM- Markt & Medien, ÖKO- TEST Verlag GmbH, September 2010. [Zitat vom: 25. 9 2013.]
<http://media.oekotest.de/media/mum092010/mum092010-web.pdf>.
- [13]. **Mulvihill, D. M. und Mc Carthy, A.** Proteolytic and rheological changes during ageing of cheese analogues made from rennet caseins. *Int. Dairy Journal.* 1994, 4, S. 15-23.
- [14]. **Stratmann, B.** *Umweltauswirkungen von Ernährungsgewohnheiten im Zirn Projekt. Übergewicht und Adipositas bei Kindern und Jugendlichen.* Freiburg : Öko-Institut e. V., 2008.
- [15]. **Mounsey, J. S. und O`Riordan., E. D.** Characteristics of imitation cheese containing native starches. *Journal Food Science.* 2001, 66, S. 586-591.

- [16]. **Kindstedt, P. S.** Functional properties of mozzarella cheese on pizza: A review. *Cultured Dairy Products Journal*. 1991, 26, S. 27–31.
- [17]. **Souci, W, Fachmann, W und Kraut, H.** Die Zusammensetzung der Lebensmittel; Nährwerttabellen, 3. Aufl. Stuttgart : wiss. Verlagsges., 1986.
- [18]. **Klostermeyer, H.** *Die Schmelzkäseherstellung: JOHA Leitfaden*. Ladenburg : Benckiser-Knappsack GmbH, 1989.
- [19]. **Spreer, E.** *Technologie der Milchverarbeitung*. Hamburg : B. Behr's Verlag, 2005. ISBN 3-89947-233-0 HC.
- [20]. Käseverordnung 1986, geändert Dezember 2010. Ein Service des Bundesministeriums der Justiz in Zusammenarbeit mit der juris GmbH, www.juris.de.
- [21]. **Bachmann, H. P.** Cheese analogues: a review. *International Dairy Journal*. 2001, S. 505-515.
- [22]. **Eymery, O. und Pangborn, R. M.** Influence of fat, citric acid and sodium chloride on texture and taste of a cheese analog. *Science des Aliments*. 1988, 8, S. 15-32.
- [23]. **Ahmed, N. S.; Hassan, F. A. M.; Salama, F. M. M. & Enb, A. K. M.** Utilization of plant proteins in the manufacture of cheese analogs. *Egyptian Journal of Food Science*. 1995, 23, S. 37–45.
- [24]. **Noronha, N.; Cronin, D. A.; O`Riordan, E. D. & O` Sullivan, M.** Flavouring of imitation cheese with enzyme-modified cheeses (EMCs): sensory impact and measurement of aroma active Short Chain fatty acids (SCFAs). *Food Chemistry*. 2008, 106, S. 905-913.
- [25]. **Muir, D. D.; Tamime, A. Y.; Shenana, M. E. & Dawood, A. H.** Processed Cheese Analogues Incorporating Fat-Substitutes. 1. Composition, Microbiological Quality and Flavour Changes During Storage at 5 °C. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 1999, 32, S. 41-49.
- [26]. **Rieke, J. W.** „Käse-Analoge“ Käseschwindel oder was?! *Deutsche Molkereizeitung*. 2009, 16, S. 28-30.
- [27]. **Guinee, T. P., Caric, M. und Kalab, M.** *Pasteurized processed cheese and substitute/ imitation cheese products*. In: *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (eds Fox, P. F.; Mc Sweeney, P. L. H.; Cogan, T. M. & Guinee T. P.). vol. 2. 2004. S. 349-394.
- [28]. **Anonymous.** Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch (Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch - LFGB), Ausfertigungsdatum: 01.09.2005 Ein Service des Bundesministeriums der Justiz in Zusammenarbeit mit der juris GmbH - www.juris.de, . § 11 Vorschriften zum Schutz vor Täuschung. Neugefasst Bek. v. 3.6.2013 I 1426 .
- [29]. **Kiely, L. J., Mc Connell, S. L. und Kindstedt, P. S.** Observations on the melting behaviour of imitation Mozzarella cheese. *J. Dairy Sci.* 1991, 74, S. 3568-3572.
- [30]. **Taranto, M. V. und Yang, C. S. T.** Morphological and textural characterization of soybean Mozzarella cheese analogs. *Scan. Elect. Microsec.* 1981, 3, S. 483-492.

- [31]. **Noronha, N.; Duggan, E.; Ziegler, G. R.; O’Riordan, E. D. & O’Sullivan, M.** Investigation of imitation cheese matrix development using microscopy and NMR relaxometry. *International Dairy Journal*. 2008, 18, S. 641-648.
- [32]. **Guinee, T. P.** The functionality of cheese as an ingredient: a review. *Australian journal of dairy technology*. 2002, 57, S. 79–91.
- [33]. **Tamime, A. Y.** *Processed Cheese and Analogues*. Chichester, UK : Wiley-Blackwell Publishing Ltd., 2011. ISBN: 978-1-4051-8642-1.
- [34]. **Hennelly, P.J.; Dunne, P.G.; O’Riordan, E.D. & O’Sullivan, M.** Increasing the moisture content of imitation cheese: effects on texture, rheology and microstructure. *European Food Research and Technology*. 2005, 220, S. 415-420.
- [35]. **Montesinos, C. und Cottell, D. C., O’Riordan, E. D. & O’Sullivan, M.** Partial replacement of fat by functional fibre in imitation cheese: effects on rheology and microstructure. *International Dairy Journal*. 2006, 16, S. 910-919.
- [36]. **Anonymous.** Gerstenberg Schröder An SPX Brand, Cheese Analogue, 09/2010_A4_GB. <http://www.bykowskiequipment.com/literature/category/268-recipes#>. [Online] [Zitat vom: 22. 09 2013.]
- [37]. **Ennis, M. P. und Mulvihill, D. M.** Compositional characteristics of rennet caseins and hydration characteristics of the caseins in a model system as indicators of performance in Mozzarella cheese analogue manufacture. *Food Hydrocolloids*. 1999, 13, S. 325-337.
- [38]. **Mounsey, J. S. und O’Riordan, E. D.** Empirical and dynamic rheological data correlation to characterize of imitation cheese. *Journal of food science*. 1999, 64 (4), S. 701-703.
- [39]. **O’Malley, A. M., Mulvihill, D. M. und Singh, T. K.** Proteolysis in casein-based cheese analogue. *International Dairy Journal*. 2000, 10, S. 743-753.
- [40]. **Cavalier-Salou, C., Queguiner, C. und Cheftel, J. C.** Preparation of cheese analogues by extrusion cooking. In (eds Zeuthen, P.; Cheftel, J. C.; Eriksson, C.; Gormley, T. R.; Linko, P.; Paulus, K.). *Processing and Quality of Foods*. s.l. : Elsevier Applied Science Publishers, 1990 vol. 1, S. 373-383.
- [41]. **Rayan, A., Kalab, M. und Ernstrom, C.A.** Microstructure and rheology of pasteurized process cheese. *Scanning Electron Microscopy*. 1980, 3, S. 635-644.
- [42]. **Glenn, T. A., Daubert, C. R. und Farkas, B. E.** A statistical analysis of creaming variables impacting process cheese melt quality. *Food Quality*. 2003, 26, S. 299-321.
- [43]. **Noronha N.; Cronin D. A.; O’Riordan E. D.; O’Sullivan, M.** Influence of processing parameters on the microstructure and texture of imitation cheese. *European Food Research Technology*. 2008, 226, S. 385-393.
- [44]. **O’Sullivan, M. M. und Mulvihill, D. M.** Influence of some physico-chemical characteristics of commercial caseins on the performance of the casein in Mozzarella cheese analogue manufacture. *International Dairy Journal*. 2001, S. 153-163.

- [45]. **Shimp, L. A.** Process cheese principles. *Food Technology*. 1985, 39 (5), S. 63-70.
- [46]. **Trivedi, D.; Hemar, Y.; Reid, D.C.W; Lee, S.K. & Illingrowth, D.** Effect of different starches on rheological and microstructural properties of (I) model processed cheese. *International Journal of Food Science and Technology*. 43, 2008, S. 2191–2196.
- [47]. **El Bakry, M.** Effects of emulsifying salts reduction on imitation cheese manufacture and functional properties. *Journal of Food Engineering*. 2010, 100, S. 596-603.
- [48]. **Ennis, M. P. und Mulvihill, D. M.** Cheese analogues. In Cogan, T. M.; Fox, P. F. & Ross, R. P. (Eds.), Proceedings of the Fifth Cheese Symposium. *Teagasc*. 1997, S. 1–14.
- [49]. **Ennis, M. P., O’Sullivan, M. M. und Mulvihill, D. M.** The hydration behaviour of rennet caseins in calcium chelating salt solution as determined using a rheological approach. *Food Hydrocolloids*. 1998, 12 (4), S. 451-457.
- [50]. **LAGALY, G., SCHULZ, O. und ZIMEHL, R.** *Dispersionen und Emulsionen – Eine Einführung in die Kolloidik feinverteilter Stoffe einschließlich der Tonmineralien*. Darmstadt : Steinkopff Verlag, 1997.
- [51]. **KUGLER, H. G.** Ernährungsphysiologie der vegetarischen Ernährung, In: Kugler, H. G.; Schneider, A.; Groß, A.; Wirr, C.; Herff, A., (edt.), *Vegetarisch essen Fleisch vergessen- Ärztlicher Ratgeber für Vegetarier*. Marktheidenfeld : Verlag Das Wort GmbH, 2007.
- [52]. **Teschemacher, H., Koch, G. und Brantl, V.** Milk protein-derived opioid receptor ligands. *Biopolymers*. 1997, 43 (2), S. 99-117.
- [53]. **Clare, D. A. und Swaasgood, H. E.** Bioactive milk peptides: a prospectus. *J. Dairy Sci.* 2000, 83, S. 1187-1195.
- [54]. **Aimutis, W. R.** Bioactive properties of milk proteins with particular focus on anti-cariogenesis. *J. Nutr.* 2004, 134 (4), S. 989S-995S.
- [55]. **Miller, G. D., Jarvis, J. K. und McBean, L. D.** *Handbook of Dairy Foods and Nutrition*. 3. New York : Taylor & Francis Group, LLC, 2007. ISBN: 0-8493-2828-4.
- [56]. **Walstra, P.** On the stability of Casein Micelles. *Journal of Dairy Science*. 1990, 73 (8), S. 1965-1979.
- [57]. **Wong, D. W. S.; Camirand, W. M.; Pavlath, A. E.; Parris, N. & Friedman, M.;** Structures and functionalities of milk proteins. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 1996, 36 (8), S. 807-844.
- [58]. **Swaigood, H. E.** Chemistry of the caseins. In: Fox, P.F. (ed.). *Advanced Dairy Chemistry*. 1. London, UK : Elsevier Applied Science, 1992, S. 63-110.
- [59]. **Senge, B.** Materialsammlung zur Vorlesung Grundlagen der Lebensmitteltechnologie; Milch als Rohstoff. Berlin : Fachgebiet Lebensmittelrheologie, Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie, Technische Universität Berlin, 2011.
- [60]. **Nienhaus, A. und Reimerdes, E. H.** *Milcheiweiß für Lebensmittel*. Hamburg : Behr's Verlag, 1987. ISBN 3-925673-05-9.

- [61]. **Ternes, W.** *Naturwissenschaftliche Grundlagen der Lebensmittelzubereitung*. 3. Auflage. Hamburg : Behr's Verlag, 2008. ISBN: 978-3-89947-422-0.
- [62]. **Töpel, A.** *Chemie und Physik der Milch*. Hamburg : Behr's Verlag, 2004. ISBN: 3-89947-131-8.
- [63]. **Hui, Y. H.** *Handbook of Food Science, Technology and Engineering, Volume 4*. USA : Taylor & Francis group, 2006. ISBN: 0-8493-9849-5.
- [64]. **Swaisgood, H. E.** Chemistry of milk proteins. In: P .F. FOX (ed.). *Developments in Dairy Chemistry-1: Proteins*. New York : Applied Science Publishers, 1982, S. 1-59.
- [65]. **Schlimme, E. und Buchheim, W.** *Milch und ihre Inhaltsstoffe: Chemische und physikalische Eigenschaften*. Gelsenkirchen-Buer : Verlag Th. Mann, 1995. ISBN: 3786201005.
- [66]. **Dalgleish , D. G. und Corredig, M.** The structure of the casein micelle of milk and its changes during processing. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2012, 3, S. 449-467.
- [67]. **Damodaran, S. und Paraf, A.** *Food proteins and their applications*. New York : MARCEL DEKKER, Inc., 1997. ISBN: 978-953-307-219-7.
- [68]. **Smit, G.** *Dairy Processing: Improving Quality*. Cambridge, England : Woodhead Publishing Limited, 2003. ISBN: 9781855736764.
- [69]. **Belitz, H.-D., Grosch, W. und Schieberle, P., [Hrsg.]**. *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. 6. Auflage. Berlin; Heidelberg; New York : Springer-Verlag, 2007. ISBN: 978-3-540-73201-3.
- [70]. **Farrell Jr., H. M.** Models for casein micelle formation. *Journal of Dairy Sci.* 1973, 56 (9), S. 1195–1206.
- [71]. **Payens, T. A. J. und Veerman, H. J.** Casein micelles and micelles of kapa- and beta-caseins. In: Mittal K. L. & Fendler E. J. (eds.). *Solution behavior of surfactants*. New York : Plenum, 1982, S. 543–571.
- [72]. **Schmidt, D. G.** Association of caseins and casein micelle structure. In: Fox PF (ed.). *Developments in dairy chemistry-1: Proteins*. London, UK : Applied Science Publication, 1982, S. 61-86.
- [73]. **McMahon, D. J. und Brown, R. J.** Composition structure and integrity of casein micelles: a review. *Journal of Dairy Sci.* 1984, 67, S. 499–512.
- [74]. **Ruettimann, K. W. und Ladisch, M. R.** Casein micelles: structure, properties and enzymatic coagulation. *Enzyme and Microbial Technology*. 1987, 9 (10), S. 578-589.
- [75]. **Holt, C.** Structure and stability of bovine casein micelles. In: Anfinsen C. B., Edsall J. T., Richards F.M. & Eisenberg D. S. (eds.). *Advances in protein chemistry*. Vol. 43. London, UK : Academic Press Inc., 1992, S. 63–151.

- [76]. **Holt, C. und Horne, D. S.** The hairy casein micelle: evolution of the concept and its implications for dairy technology. *Nederlands melk en Zuiveltijdschrift (Neth. Milk Dairy Journal)*. 1996, 50, S. 85-111.
- [77]. **Horne, D. S.** Casein interactions: casting light on the black boxes, the structure in dairy products. *Int. Dairy J.* 1998, 8, S. 171-177.
- [78]. **Walstra, P., Jenness, R. und Badings, H. T.** *Dairy Chemistry and Physics*. New York : Wiley, 1984.
- [79]. **Singh, H. und Bennett, R. J.** Milk and Milk Processing. In: Robinson (ed.). *Dairy Microbiology Handbook: The Microbiology of Milk and Milk Products*. 3rd Edition. New York : John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [80]. **Walstra, P.** Casein sub-micelles: do they exist? *International Dairy Journal*. 9 (3-6), 1999, S. 189-192.
- [81]. **Bake, K.** *Handbuch der Milch- und Molkereitechnik*. [Hrsg.] Tetra Pak Processing GmbH. Gelsenkirchen : Verlag Th. Mann GmbH & Co. KG, 2003. ISBN: 3-78620146-3.
- [82]. **Kessler, H. G.** *Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik-Molkereitechnologie*. 4 Auflage. München : Kessler, N., 1996. ISBN: 978-3-9802378-4-0.
- [83]. **Mehrens, H. A. und Reimerdes, E. H.** Funktionelle und technologische Eigenschaften von Milchproteinen. *Milchproteine*. Hamburg : Behr's Verlag, 1991, 2, S. 31-47.
- [84]. **Fox, F.P.** Milk-clotting and proteolytic activities of rennet, and of bovine pepsin and porcine pepsin. *Journal of Dairy Research*. 1969, 36 (3), S. 427-433.
- [85]. **Lösche, K.** *Enzyme in der Lebensmittel-Technologie*. 1. Auflage. Hamburg : Behr's Verlag, 2000. ISBN: 3-86022-640-1.
- [86]. **Dalgleish, D. G.** The Enzymatic Coagulation of Milk. In: Fox, P.F. (ed.). *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology*. Volume 1 General Aspects. s.l. : Springer US, 1993, S. 69-100.
- [87]. **Flüeler, O.** Lab- und Säuregerinnung der Milch. *Deutsche Molkerei-Zeitung (dmz)*. 1982, 103, S. 1172-1178.
- [88]. **Carlson, A., Hill, C. G. und Olson, N. F.** The kinetics of milk coagulation: II. Kinetics of the secondary phase: Micelle flocculation. *Biotechnology and Bioengineering*. 1987, 29 (5), S. 590-600.
- [89]. **Van Hooydonk, A. C. M. und Van den Berg, G.** *Control and determination of the curd-setting during cheesemaking*. Brussels : International Dairy Federation, 1988. S. 2-10. Bulletin 225.
- [90]. **Senge, B.** Inline-online Untersuchungen der Gerinnungsverfahren von Milch. *Chemie Ingenieur Technik*. 2008, 80 (8), S. 1125 – 1136.

- [91]. **Anonymous.** GEA Westfalia Separator Group; Kasein. <http://www.westfalia-separator.com/de/anwendungen/molkereitechnik/spezialprodukte/kasein.html>. [Online] [Zitat vom: 12. 11 2013.]
- [92]. **Abou El Nour, G. J.; Scheurer, G. J.; Omar, M. M. & W. Buchheim, W.;** Physicochemical and rheological properties of black-type processed cheese analogue made from rennet casein and total milk protein. *Milchwissenschaft*. 1996, 51, S. 684–687.
- [93]. **Aimutis, W. R.** Dairy protein usage in processed and imitation cheese. *Food Technology Europe*. 1995, 2, S. 30-34.
- [94]. **Senge, B., Tabel, U. und Hegemann, H.** Fermentation und Processing von Rührjoghurt Teil I. *Deutsche Molkerei-Zeitung (dmz)*. 2003, 12, S. 28-31.
- [95]. **Middleton, J. L.** *Process of using rennet casein for producing imitation cheese. Patent-Nr. 4.822.623* 18. Apr. 1989. United States Patent.
- [96]. **Cavalier-Salou, C. und Cheftel, J. C.** Emulsifying salts influence on characteristics of cheese analogs from calcium Caseinate. *Journal of Food Science*. 1991, 56 (6), S. 1542–1547.
- [97]. **Fox, P. F. und McSweeney, P. L. H.** Cheese: An Overview. In: P.F. FOX, P.L.H. MCSWEENEY, T.M. COGAN and T.P. GUINEE (eds.). *Cheese - Chemistry, Physics and Microbiology*. vol. 1. London : Elsevier Academic Press, 2004, S. 1-18.
- [98]. **Bylund, G.** *Dairy Processing Handbook*. Lund, Sweden : Tetra Pak Processing Systems AB, 2003.
- [99]. **Abou El Nour, A., Scheurer, G. J. und Buchheim, W.** Use of rennet casein and milk protein concentrate in the production of spread-type processed cheese analogue. *Milchwissenschaft*. 1998, 53, S. 686–690.
- [100]. **Gupta, V. K. und Reuter, W.** Firmness and melting quality of processed cheese foods with added whey protein concentrates. *Lait*. 1993, 73 (4), S. 381-388.
- [101]. **Romero, A.; Beaumal, V.; David-Briand, E.; Cordobé, F.; Anton, M. & Guerrero, A.;** Interfacial and O/W emulsions characterisation of potato protein isolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011, 59, S. 9466-9474.
- [102]. **Chen, S. L.; Wan, P. J.; Lusas, E. W. & Rhee, K. C.;** Utilization of peanut protein and oil in cheese analogs. *Food Technology*. 1979, 33 (7), S. 88-93.
- [103]. **Yang, C. S. T. und Taranto, M. V.** Textural properties of Mozzarella cheese analogs manufactured from soybeans. *J. Food Sci.* 1982, 47 (3), S. 906-910.
- [104]. **Rule, C. E. und Manning, R. G. & Zielinski, R. J.** *Imitation of acid-set cheese. Patent-Nr.: 4 232 050* United States Patent Application, 1980.
- [105]. **Kratochvil, J. F.** *Imitation cheese products. Patent-Nr.: 4 684 533* United States Patent Application, 1987.

- [106]. **Zwiercan, G. A., Lacourse, N. L. und Lenchin, J. M.** *Imitation cheese products containing high amylose starch as total caseinate replacement. Patent-Nr.: 4 695 475 United States Patent Application*, 1987.
- [107]. **Kim, L. S. Y., Park, P. S. W. und Rhee, K. C.** Textural properties of cheese analogs containing proteolytic enzyme-modified soy protein isolates. *Journal of the American Oil Chemists` Society*. 1992, 69, S. 755-759.
- [108]. **Murphy, K.J.** *Properties of imitation cheese containing non-casein proteins*. M. Agr. Sc, University College Dublin, National University of Ireland, Dublin. 1999.
- [109]. **Yang, C. S. T., Tarnato, M. V. und Cheryan, M.** Optimiszation of textural and morphological properties of a soy-gelatin mozzarella cheese analog. *Jouranal of Food Processing and Preservation*. 1983, 7 (1), S. 41–64.
- [110]. **Hoffman, J. R und Falvo, M. J.** Protein – Which is Best? *Journal of Sports Science and Medicine*. 2004, 3, S. 118-130.
- [111]. **Anonymous.** WISHH World Institut for Soy in Human Health. [Online] [Zitat vom: 2. 10 2013.] <http://www.wishh.org/aboutsoy/composition.html>.
- [112]. **Rimbach, G., Möhring, J. und Erbersd, H. F.** *Lebensmittel-Warenkunde für Einsteiger*. Berlin; Heidelberg : Springer Verlag, 2010. ISBN: 978-3-642-04485-4.
- [113]. **Hartman, G. L., West, E. D. und Herman, T. K.** Crops that feed the World 2. Soybean—worldwide production, use, and constraints caused by pathogens and pests. *Food Sec.* Dezember 2011, 3, S. 5-17.
- [114]. **Heiss, R.** *Lebensmitteltechnologie-Biotechnologische, chemische, mechanische und thermische Verfahren der Lebensmittelverarbeitung*. 6. Auflage. Berlin; Heidelberg; New York : Springer Verlag, 2004. ISBN: 3-540-00476-9.
- [115]. **Zayas, Joeseoph F.** *Functionality of Proteins in Food*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 1997. Kansas State University. ISBN: 0-387-60252-6.
- [116]. **Klade, M. und Kellner, J.** *Grundlagenstudie zu Fleischersatzprodukten (FEP Studie)*. Wien : Ökokauf, Interuniversitäres Forschungszentrum für Technik, Arbeit und Kultur, 2007.
- [117]. **Erdman, J. W.** *Soy protein and cardiovascular disease*. 2000. a statement for healthcare professionals from the nutrition committee of the AHA. *Circulation* 102: 2555-2559.
- [118]. **Kim, L. S. Y, Park, P. S. W. und Rhee, J., K. C.** Functional Properties of Proteolytic enzyme modified soy protein isolate. *j. Agric. Food Chem.* 1990, 38 (3), S. 651-656.
- [119]. **Miedzianka, J. und Peęksa , A.** Effect of pH on phosphorylation of potato protein isolate. *Journal of Food Chemistry*. 2013, 138 (4), S. 2321–2326.
- [120]. **Ralet, M. -C. und Guéguen , J.** Fractionation of potato proteins: solubility, thermal coagulation and emulsifying properties. *Food Science and Technology LWT*. 2000, 33, S. 380–387.

- [121]. **Van Koningsveld, G.; Gruppen, H.; de Jongh, H. H. J.; Wijngaards, G.; Van Boekel, M. A. J. S.; Walstra, P. und Voragen, A. G. J.:** Effects of pH and heat treatments on the structure and solubility of potato proteins in different preparations. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 2001, 49, S. 4889-4897.
- [122]. **Nakai, S. und Modler, H. W.** *Food Proteins: Properties and characterization*. New York : VCH Publishers, Inc., 1996. ISBN: 1-56081-691-0.
- [123]. **Hänsel, R. und Hölzl, J.** *Lehrbuch der Pharmazeutischen Biologie*. Berlin; Heidelberg; New York : Springer-Verlag, 1996. ISBN: 3 540 58969 4.
- [124]. **Hunnius, C.** *Hunnius Pharmazeutisches Wörterbuch*. [Hrsg.] C. Hunnius und A. Burger. 8. Berlin; New York : De Gruyter Verlag, 1998.
- [125]. **Fife, B.** *Coconut Cures: Preventing and Treating Common Health Problems with Coconut*. Colorado Springs, USA : Piccadilly Books, Ltd., 2005. S. 184-185. ISBN: 9780941599603.
- [126]. **Kinderlerer, J. L.** Degradation of the Lauric Acid Oils. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 1994, 33 (4), S. 345-354.
- [127]. **Jayadas, N. H. & Nair, K. P.** Coconut oil as base oil for industrial lubricants-evaluation and modification of thermal, oxidative and low temperature properties. *Tribology International*. 2006, 39, S. 873-878.
- [128]. **Projan, S. J.; Brown-Skrobot, S.; Schlievert, P. M.; Vandenesch, P. & Novick, R. P.:** Glycerol monolaurate inhibits the production of beta-lactamase, toxic shock toxin-1, and other staphylococcal exoproteins by interfering with signal transduction. *J Bacteriol*. 1994, 176 (14), S. 4204-4209.
- [129]. **Alexey Ruzin, A. und Novick, R.** Equivalence of Lauric Acid and Glycerol Monolaurate as Inhibitors of Signal Transduction in *Staphylococcus aureus*. *J. Bacteriol*. 2000, 182 (9), S. 2668-2671.
- [130]. **Florentino, B. und Herrera, J.** A reevaluation of coconut oil's effect on serum cholesterol and atherogenesis. *Journal of the Philippine Medical Association*. 1989, 65 (1), S. 144-152.
- [131]. **Krist, S., Buchbauer, G. und Klausberger, C.** *Lexikon der pflanzlichen Fette und Öle*. Wien : Springer-Verlag, 2008.
- [132]. **Tipvarakarnkoon, T.** Material science properties of coconut milk, cheese and emulsion. *Dissertation*. Berlin : Technische Universität Berlin, 2009.
- [133]. **Caric, M. und Kalab, M.** Processed Cheese Products. In: Fox, P. F. (ed.). *Cheese: Chemistry, Physics & Microbiology*. Vol. 2. London : Chapman & Hall, 1993, S. 467-505.
- [134]. **Lobato-Calleros, C. und Vernon-Carter, E. J.** Microstructure and texture of cheese analogs containing different types of fat. *Journal of Texture Studies*. 1998, 29, S. 569-586.

- [135]. **Lobato-Calleros, C.; Vernon-Carter, E. J.; Guerrero-Legarreta, I.; Soriano-Santos, J. & Escalona-Beundia, H.**. Use of fat blends in cheese analogs: Influence on sensory and instrumental textural characteristics. *Journal of Texture Studies*. 1997, 28, S. 619-632.
- [136]. **Marshall, R. J.** Combined instrumental and sensory measurement of the role of fat in food texture. *Food Quality Preference*. 1991, 2, S. 117–124.
- [137]. **Caric, M. und Gantar, M. & Kalab, M.** Effects of emulsifying agents on the microstructure and other characteristics of process cheese: a review. *Food Microstructure*. 1985, 4, S. 297-312.
- [138]. **Zehren, V. L. und Nusbaum, D. D.** *Processed cheese*. 2nd ed. Madison, Wis.: Cheese Reporter Publishing Co. Inc. : s.n., 2000.
- [139]. **Awad, R. A.; Abdel-Hamid, L. B.; El-Shabrawy, S. A. & Singh, R. K.**. Texture and Microstructure of Block Type Processed Cheese with Formulated Emulsifying Salt Mixtures. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 2002, 35, S. 54-61.
- [140]. **Schär, W. und Bosset, J. O.** Chemical and physico-chemical changes in processed cheese and ready-made fondue during storage-A Review. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.* 2002, 35, S. 15-20.
- [141]. **Doetsch, M.; Busch, J.; Batenbung, M. und Liem, G. T.** Strategies to reduce sodium consumption: a food industry perspective. *Food Science and Nutrition*. 2009, 49 (10), S. 841-851.
- [142]. **Engstrom, A., Tobelmann, R. C. und Albertson, A. M.** Sodium intake trends and food choices. *American Journal of Clinical Nutrition*. 1997, 65, S. 704-707.
- [143]. **Taormina, P. J.** Implications of salt and sodium reduction on microbial food safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2010, 50 (3), S. 209-227.
- [144]. **Marshall, R. J.** Composition, structure, rheological properties and sensory texture of processed cheese analogues. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 1990, 50, S. 237-252.
- [145]. **Arimi, J. M.; Duggan, E.; O'Sullivan, M.; Lyng, J. G. & O'Riordan, E. D.**. Effect of moisture content and water mobility on microwave expansion of imitation cheese. *Food Chemistry*. 2010, 121, S. 509-516.
- [146]. **Drake, M. A. und Swanson, B. G.** Reduced and low fat cheese technology: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 1995, 6 (11), S. 366-369.
- [147]. **Eckner, K. E., Dustman, W. A. und Rys-Rodriguez, A.** Contribution of composition, physicochemical characteristics and polyphosphates to the microbial safety of pasteurized cheese spreads. *Journal of Food Protection*. 1994, 57, S. 295-300.
- [148]. **Guraya, R., Frank, J. E. und Hassan, A. N.** Effectiveness of salt, pH and diacetyl as inhibitors for *Escherichia coli* 0157:H7 in dairy foods stored at refrigeration temperatures. *Journal of Food Protection*. 1998, 61 (9), S. 1098-1102.

- [149]. **Erkmen, O.** Survival of *Listeria monocytogenes* during the manufacture and ripening of Turkish white cheese. *Die Nahrung*. 2001, 45, S. 55-58.
- [150]. **Guinee, T. P.** Salting and the role of salt in cheese. *International Journal of Dairy Technology*. 2004, 57 (2), S. 99-109.
- [151]. **Stampanoni, C. R. und Noble, A. C.** The influence of fat, acids and salt on the temporal perception of firmness, saltiness and sourness of cheese analogs. *Journal of Texture Studies*. 1991, 22, S. 381-392.
- [152]. **Kilcawley, K. N., Wilkinson, M. G. und Fox, P. F.** Review: Enzyme-Modified Cheese. *International Dairy Journal*. 1998, 8, S. 1-10.
- [153]. **Freund, P. R.** Cheese flavours ripen into maturity. *International Food Ingredients*. 1995, 5, S. 35-37.
- [154]. **Moskowitz, G. J. und Noelck, S. S.** Enzyme modified cheese technology. *Journal of Dairy Science*. 1987, 70, S. 1761-1769.
- [155]. **Senge, B.** Materialsammlung zur Vorlesung Chemische Verfahren. Berlin : Fachgebiet Lebensmittelrheologie, Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie, Technische Universität Berlin, 2013.
- [156]. **Liehr, M. und Kulicke, W. -M.** Rheologische Untersuchungen zum Einfluss von Hydrokolloiden auf die Gefrier-Tau-Stabilität von Starkekleistern. *Starch-Stärke*. 1996, 84 (2), S. 52-57.
- [157]. **Zobel, H. F. und Stephen, A. M.** Starch: Structure, Analysis and Application. In: Stephen, A. M., Phillips, G. O & Williams, P. A. (eds.). *Food Polysaccharides and Their Applications*. Vol. 2nd. Boca Raton; London; New York : Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [158]. **Zwiercan, G. A. und Lacourse, N. L. & Lenchin, J. M.** *Imitation cheese products containing modified starch as partial replacement and method of preparation*. Nr. 4,499,116 1985. US Patent.
- [159]. **Carpenter, R. N., Finnie, K. J. und Olsen, R. L.** *Imitation Cheese Composition and Products Containing Starch*. Nr. 5,807,601 15. Sep. 1998. US Patent.
- [160]. **Noronha, N.; Duggan, E.; Ziegler, G. R.; Stapleton, J. J.; Riordan, E. D. & O'Sullivan, M.;** Comparison of microscopy techniques for the examination of the microstructure of starch-containing imitation cheeses. *Food Research International*. 2008, 41, S. 472-479.
- [161]. **Zallie, J. P. und Chiu, C. W.** *Imitation cheeses containing enzymatically debranched starches in lieu of caseinates*. Nr. 4,937,091 1990. US Patent.
- [162]. **Mounsey, J. S. & O'Riordan, E. D.** Influence of pre-gelatinised maize starch on the rheology. *Journal of Food Engineering*. 2008, 84, S. 57-64.
- [163]. **Senge, B., Edelby, Y. und Blochwitz, R.** Einfluss von Stärkekonzentration und -art auf die Strukturausbildung in Analogkäse. *DMW – Die Milchwirtschaft*. 2011, 2 (23), S. 784-792.

- [164]. **Dickinson, E.** Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems *Food Hydrocolloids*. 2003, 17 (1), S. 25-39.
- [165]. **Phillips, G. O. und Williams, P. A.** *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge, England : Woodhead Publishing Limited, 2000. ISBN: 978-1-84569-414-2.
- [166]. **Kokane, R. D., Jana, A. H. und Thakar, P. N.** Hydrocolloids in the dairy industry. *Indian Food Industry*. 1996, 15 (4), S. 32-37.
- [167]. **Jana, A. H.; Patel, H. G.; Suneeta, P. & Prajapati, J. P.;** Quality of casein based Mozzarella cheese analogue as affected by stabilizer blends. *J Food Sci Technol*. 2010, 47 (2), S. 240-242.
- [168]. **Murray, J. C. F.** Cellulosics. In: Phillips, G. O. und Williams, P. A. (ed.). *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge, England : Woodhead Publishing Limited, 2000, S. 710-723.
- [169]. **Sarkar, N.** Kinetics of thermal gelation of methylcellulose and hydroxypropylmethylcellulose in aqueous solutions. *Carbohydrate Polymers*. 1995, 26 (3), S. 195-203.
- [170]. **Coffey, D. G., Bell, D. A. und Henderson, A.** Cellulose and Cellulose Derivatives. In: Stephen, A. M.; Phillips, G. O., Williams, P. A. (ed.). *Food Polysaccharides and Their Applications*. 2nd Edition. Boca Rato; London; New York : Taylor & Francis Group, LLC, 2006, S. 148-174.
- [171]. **Kataoka, Y.; Hiroe, M.; Asai, I.; Takahashi, R. & Nishinari, K.;** Thermal aggregation of methylcellulose with different molecular weights. *Food Hydrocolloids*. 2007, 21 (1), S. 46-58.
- [172]. **Kobayashi, K., Huang, C. I. und Lodge, T. P.** Thermoreversible Gelation of Aqueous Methylcellulose Solutions. *Macromolecules*. 1999, 32 (21), S. 7070-7077.
- [173]. **Edelby, Y., Balaghi, S. und Senge, B.** Flow and sol-gel behavior of two types of methylcellulose at various concentrations. *Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting (PPS-29)*. 15-19. July 2013.
- [174]. **Balaghi, S., Edelby, Y. und Senge, B.** Evaluation of thermal gelation behavior of different cellulose ether polymers by rheology. *Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting (PPS-29)*. 15-19. July 2013.
- [175]. **Masiak, T.** Untersuchung des Sol-Gel-Übergangsverhaltens von Methylcellulose (E 461) in wässrigen Systemen, Bachelorarbeit (Betreuung: Senge, B.; Blochwitz, R. und Edelby, Y.). Berlin : Technische Universität Berlin, 2013.
- [176]. **Ye, D., Montané, D. und Farriol, X.** Preparation and characterisation of methylcellulose from annual cardoon and juvenile eucalyptus. *Carbohydr. Polym.* 2005, 61 (4), S. 446-454.
- [177]. **Zecher, D. und Van Coillie, R.** Cellulose derivatives. In: Imeson, A. (ed.). *Thickening and gelling agents for food*. London : Blackie Academic and Professional, 1992, S. 40-65.

- [178]. **Gullapalli, R. P. und Sheth , B. B.** Effect of methylcellulose on the stability of oil-in-water emulsions: influence of the disperse phase. *International Journal of Pharmaceutics*. 1997, 151, S. 249-253.
- [179]. **Sanz, T., Salvador, A. und Fiszman, S. M.** Effect of concentration and temperature on properties of methylcellulose-added batters application to battered, fried seafood. *Food Hydrocolloids*. 2004, 18, S. 127-131.
- [180]. **Mallikarjunan, P.; Chinnan, M. S.; Balasubramaniam, V. M. & Phillips, R. D.;** Edible coatings for deep-fat frying of starchy products. *Lebensmittel-Wissenschaft und –Technologie*. 1997, 30, S. 709-714.
- [181]. **Holownia, K. I.; Chinnan, M. S.; Erickson, M. C. & Mallikarjunan, P.;** Quality Evaluation of Edible Film-Coated Chicken Strips and Frying Oils. *Journal of Food Science*. 2000, 65 (6), S. 1087-1090.
- [182]. **Toufeili, I.; Dagher, S.; Shadarevian, S.; Nouredine, A.; Sarakbi, M. & Farran, M. T.;** Formulation of Gluten-Free Pocket-Type Flat Breads. *Cereal Chemistry*. 1994, 71 (6), S. 594-601.
- [183]. **Gidley, M. J. und Grant Reid, J. S.** Galactomannans and Other Cell Wall Storage Polysaccharides in Seeds. In: Phillips, G. O., Williams, P. A. (ed.). *Food Polysaccharides and Their Applications*. 2nd Edition. Boca Raton; London; New York : Taylor & Francis Group, LLC, 2006, S. 181-209.
- [184]. **Draget, K. I.; Moe, S. T.; Skjak-Braek, G. S. & Smidsrod, O.** Alginates. In: Stephen, A. M.; Phillips, G. O., Williams, P. A. (ed.). *Food Polysaccharides and Their Applications*. 2nd Edition. Boca Raton; London; New York : Taylor & Francis Group, LLC, 2006, S. 290-328.
- [185]. **Draget, K. I.** Alginates. In: Phillips, G. O. und Williams, P. A. (ed.), *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge, England : Woodhead Publishing Limited, 2000, S. 807-828.
- [186]. **Piculell, L.** Gelling Carrageenans. In: Stephen, A. M.; Phillips, G. O., Williams, P. A. (ed.). *Food Polysaccharides and Their Applications*. 2nd Edition. Boca Raton; London; New York : Taylor & Francis Group, LLC, 2006, S. 239-276.
- [187]. **Imeson, A. P.** Carrageenan and furcellaran. In: Phillips, G. O. und Williams, P. A. (ed.). *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge, England : Woodhead Publishing Limited, 2000, S. 164-185.
- [188]. **Schwarzl, F. R.** *Polymermechanik, Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren*. Berlin : Springer Verlag, 1990. ISBN: 3-540-51965-3.
- [189]. **Scherz, H.** *Hydrokolloide - Stabilisatoren, Dickungs- und Geliermittel in Lebensmitteln*. 2. Auflage . Hamburg : Behr`s Verlag, 1996. ISBN: 978-3-86022-272-0.
- [190]. **Sworn, G.** Xanthan gum. In: Phillips, G. O. und Williams, P. A. (ed.), *Handbook of Hydrocolloids*. Cambridge, England : Woodhead Publishing Limited, 2000, S. 186-203.

- [191]. **Kapoor, R. und Metzger, L. E.** Process Cheese: Scientific and Technological Aspects- A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2008, 7, S. 194-214.
- [192]. **Lee, S. K.; Buwalda, R. J.; Euston, S. R. & Foegeding, E. A.** Changes in the rheology and microstructure of processed cheese during cooking. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*. 2003, 36, S. 339–345.
- [193]. **Piska, I. und Stetina, J.** Influence of cheese ripening and rate of cooling of the processed cheese mixture on rheological properties of processed cheese. *Journal of Food Engineering*. 2004, 61 (4), S. 551–555.
- [194]. **Chambre, M. und Daurelles, J.** Processed cheese. In: Eck, A. & Gillis, J. C. (eds.). *Cheesemaking: from science to quality assurance*. Paris : Lavoisier Publishing Inc., 2000, S. 641–657.
- [195]. **Foissy, H.** Milchtechnologie. *Universität für Bodenkultur Wien*. 2002.
- [196]. **Drake, P.** Rheological properties of fat containing foods. In J. Solms (Ed.), *Functional properties of fats in foods*. Zürich : Forster, 1973, S. 171–192.
- [197]. **Jost, R., Baechler, R. und Masson, G.** Heat gelation of oil-in-water emulsions stabilised by wheyprotein. *Journal of Food Science*. 1986, 51, S. 440–444.
- [198]. **Bowland, E. L. und Foegeding, E. A.** Small strain oscillatory shear and microstructural analyses of a model processed cheese. *Journal of Dairy Science*. 2001, 84, S. 2372–2380.
- [199]. **Marchesseau, S. und Cuq, J. L.** Water-holding capacity and characterization of protein interactions in processed cheese. *Journal of Dairy Research*. 1995, 62, S. 479–489.
- [200]. **Röck, S.** Einfluss von Prozessfaktoren und Produktzusammensetzung auf die Struktureigenschaften von Schmelzkäse. *Weihenstephan Milchwissenschaftliche Forschungsberichte*. 2006, 49, S. 150-154.
- [201]. **Jaros, D.; Petrag, J.; Rohm, H. und Ulberth, F.** Milk Fat Composition Affects Mechanical and Rheological Properties of Processed Cheese. *Appl. Rheol.* 2001, 11, S. 19-25.
- [202]. **Senge, B.** *Materialsammlung zur Vorlesung Lebensmittelrheologie Grundlagen*. Berlin : Fachgebiet Lebensmittelrheologie, Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie, Technische Universität Berlin, 2009.
- [203]. **Tscheuschner, H. -D.** *Grundzüge der Lebensmitteltechnik*. Hamburg, Deutschland : Behr's Verlag, 2008. ISBN 978-3-89947-085-7 (Gb).
- [204]. **Weipert, D., Tscheuschner, H.-D. und Windhab, E.** *Rheologie der Lebensmittel*. Hamburg : Behr's Verlag, 1993.
- [205]. **Mezger, Thomas G.** *Das Rheologie Handbuch: für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. Hannover : Vincentz Network Verlag, 2010.
- [206]. **Malkin, A. Y. und Isayev, A. I.** *Rheology: concepts, methods and applications*. Canada : ChemTec Publishing, 2006.

- [207]. **Rao, M. A.** *Rheology of fluid and semisolid foods: Principles and Applications*. Gaithersburg, Maryland, USA : Aspen Publishers, 1999.
- [208]. **Senge, B., Blochwitz, R. und Bentlin, S.** Rheologische Stoffkennwerte richtig bestimmen. *Deutsche Milchwirtschaft*. 2004, 55 (7), S. 256-260.
- [209]. **Steffe, J. F.** *Rheological methods in food process engineering, 2nd ed.* East Lansing, MI, USA : Freeman Press, 1996.
- [210]. **Senge, B.** *Materialsammlung zur Vorlesung Spezielle Lebensmittelrheologie*. Berlin : Fachgebiet Lebensmittelrheologie, Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie, Technische Universität Berlin, 2008.
- [211]. **Internationale Organisation für Normung.** Sensory Analysis-Vocabulary. *ISO 5492*. 2008.
- [212]. **Konstance, R. P. und Holsinger, V. H.** Developments of rheological test methods for cheese. *Food Technol.* 1992, 1, S. 105-109.
- [213]. **Bourne, M. C.** *Food Texture and Viscosity. Concept and Measurement*. 2nd Edition. London, San Diego : Academic Press, 2002.
- [214]. **Sczczesniak, A. S.** Classification of textural characteristics. *Journal of food science*. 1963, 28 (4), S. 385-389.
- [215]. **Senge, B. und Hildebrandt, N.** *Materialsammlung zur Lehrveranstaltung Rheometrie IV - Texturuntersuchungen an Lebensmittelsystemen*. Berlin : Fachgebiet Lebensmittelrheologie, Institut für Lebensmitteltechnologie und Lebensmittelchemie, Technische Universität Berli, 2005.
- [216]. **Borwankar, R. P.** Food Texture and Rheology: A Tutorial Review. *Journal of Food Engineering*. 1992, 16, S. 1-16.
- [217]. **Peleg, M.** Operational conditions and the stress strain relationship of solid foods - Theoretical evaluation. *Journal of Texture Studies*. 1977, 8, S. 283-296.
- [218]. **Calzada, J. F. und Peleg, M.** Mechanical interpretation of compressive stress-strain relationships of solid foods. *Journal of Food Science*. 1978, 43, S. 1087-7092.
- [219]. **Wang, H.-H. und Sun, D.-W.** Melting characteristics of cheese: analysis of effects of cooking conditions using computer vision technology. *Journal of Food Engineering*. 2002, 51 (4), S. 305–310.
- [220]. **Mc Mahon, D. J. und Oberg, C. J.** Influence of fat, moisture and salt on functional properties of Mozzarella cheese. *Australian Journal of Dairy Technology*. 1998, 53, S. 98-101.
- [221]. **Noronha, N., O’Riordan , E. D. und O’Sullivan, M. .** Replacement of fat with functional fibre in imitation cheese. *International Dairy Journal*. 2007, 17, S. 1073–1082.
- [222]. **Song, J. C. und Park, H. J.** Microstructural and melting characteristics of imitation cheese analog. *Journal of Food Sci.* 1986, 18 (1), S. 11-15.

- [223]. **Hennelly, P.J., Dunne, P.G. und O’Riordan, E.D. & O’Sullivan, M.** Textural, rheological and microstructural properties of imitation cheese containing inulin. *Journal of Food Engineering*. 2006, 75, S. 388-395.
- [224]. **Savello, P. A., Ernstrom, C. A. und Kalab, M.** Microstructure and meltability of model process cheese made with rennet and acid casein. *J Dairy Sci*. 1989, 72 (1), S. 1-11.
- [225]. **Tunick, M. H.; Mackey, K. L.; Shieh, J. J.; Smith, P. W.** Rheology and microstructure of low fat Mozzarella cheese. *International Dairy Journal*. 1993, 3, S. 649–662.
- [226]. **Kosikowski, F.** *Process cheese and related types*. In *Cheese and Fermented Milk Foods*. 2nd Edition. Ann Arbor, MI, USA : Edwards Brothers, Inc., 1982.
- [227]. **Olson, N. F. und Price, W. V.** A melting test for pasteurized processed cheese. *J. Dairy Sci*. 1958, 74, S. 389.
- [228]. **Arnott, D. R., Morris, H. A. und Combs, W. B.** Effect of certain chemical factors on the melting quality of processcheese. *J. Dairy Sci*. 1957, 40, S. 957-963.
- [229]. **Stieß, M.** *Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie 1*. 3. Auflage. Berlin; Heidelberg : Springer Verlag, 2009. ISBN: 978-3-540-32551-2.
- [230]. *Spezifikationsbericht von JOHA S9*. Ladenburg : BK Giulini GmbH, 2008.
- [231]. *Spezifikationsbericht von Labkaseinpulver 90 mesh*. Kaltenkirchen : Lactoprot Deutschland GmbH, 2010.
- [232]. *Spezifikationsbericht von Micellares Kaseinkonzentrat MCC80*. Leppersdorf : Sachsenmilch Leppersdorf GmbH, 2011.
- [233]. *Spezifikationsbericht von Säurekasein*. Kaltenkirchen : Lactoprot Deutschland GmbH, 2010.
- [234]. *Spezifikationsbericht von Sojaproteinisolat (DENA SPY Protein 90 B/EU Art.03800000)*. Bonn : DENA GmbH, 2011.
- [235]. **Retsch Technology**. http://www.retsch-technology.de/dltmp/www/53175-9cccf970398f/brochure_la950_la300_de.pdf. [Online] [Zitat vom: 22. 8 2013.]
- [236]. **Schwenke, K. D.; Prahi, L.; Rauschal, E.; Gwiazda, S.; Dabrowski, K.; Rutkowski, A.;** Functional properties of plant proteins. Part 2. Selected physicochemical properties of native and denatured protein isolates from faba beans, soybeans, and sunflower seed. *Die Nahrung*. 1981, 25 (1), S. 59-69.
- [237]. **Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- u. Forschungsanstalten (VDLUFA)**. *Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (Methodenbuch VI)*. Darmstadt : VDLUFA-Verlag, 1985.
- [238]. **Zhou, N. & Mulvaney, S.J.** The effect of milk fat, the ratio of casein to water, and temperature on the viscoelastic properties of rennet casein gels. *Journal of Dairy Science*. 1998, 81, S. 2561-2571.

- [239]. **Pomeranz, Y.** Carbohydrates - Starch. In *Functional Properties of Food Components*. Orlando, USA : Academic Press, 1985, S. 24–78.
- [240]. **Singh, N.; Singh, J.; Kaur, L.; Sodhi, N. S. und Gill, B. S.** Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chemistry*. 2003, 81, S. 219-231.
- [241]. **Renchin-Bernd , E.** Einfluss von Schmelzsatzkonzentration und Fettgehalt auf die Analogkäsestruktur, Diplomarbeit (Betreuung: Senge, B. und Edelby, Y.). Berlin : Technische Universität Berlin, 2013.

12 Anhang

Tab. 12.1 Anforderungen an die Zusammensetzung von „Prozesskäseprodukten“ [20]

Produkt	Mindestgehalte an Trockenmasse in %
Schnittfähiger Schmelzkäse (Fett i. Tr. \geq 50 %)	50
Schnittfähiger Schmelzkäse (Fett i. Tr. $<$ 50 %)	34
Streichfähiger Schmelzkäse (Fett i. Tr. \geq 50 %)	40
Streichfähiger Schmelzkäse (Fett i. Tr. $<$ 50 %)	30
Schmelzkäsezubereitungen	20

Tab. 12.2 Fettgehaltstufen der Käseprodukte [20]

Fettgehaltstufe	Fettgehalt in der Trockenmasse in %
Doppelrahmstufe	höchstens 87 und mindestens 60
Rahmstufe	mindestens 50
Vollfettstufe	mindestens 45
Fettstufe	mindestens 40
Dreiviertelfettstufe	mindestens 30
Halbfettstufe	mindestens 20
Viertelfettstufe	mindestens 10
Magerstufe	$<$ 10

Tab. 12.3 Einfluss verschiedener Faktoren beim Schmelzprozess in Schmelzkäse [18]

	Schmelzkäse, streichfähige Schmelzkäsezubereitung	Schmelzkäse, schnitt- fest Blockschmelzkäse	Schmelzkäsescheiben, toastfähig
Schmelzrohware			
a) Alter	Mischung aus jung, mittelreif, überreif	jung bis mittelreif, überwiegend jung	möglichst jung
b) relativer Caseinge- halt in der Mischung	60 – 75 %	75 – 90 %	80 – 90 %
c) Struktur	Kurz bis lang	Überwiegend lang	lang
Schmelzsalze	cremend, vorzugsweise auf Basis kurz- und mittel- kettiger Polyphosphate	strukturertretend, nicht oder wenig cre- mend, vorzugsweise hochpolymere Polyphosphate, Citrate	strukturertretend, nicht cremend, vorzugs- weise Phosphat/Citrat- Mischungen
Schmelzsalzmenge (bezogen auf Rohware)	2,5 – 3,5 %	2,5 – 3,5 %	2,5 – 3,0 %
Wasserzugabe (incl. Kondensat)	20 – 45 %	10 – 25 %	5 – 15 %
Temperatur	85 – 98 °C UHT: bis 145 °C	80 – 85 °C	78 – 85 °C
Schmelzdauer			
a) herkömmliche Schmelzmaschine	8 – 15 min	4 – 8 min	4 – 6 min
b) Schmelzcutter	6 – 8 min	3 – 6 min	nicht üblich
pH-Wert	5,6 – 6,0	5,4 – 5,7	5,6 – 5,9
Rühren	schnell	langsam	langsam
Vorschmelzware	5 – 20 %	0 – 2 %	keine
Milch- /Molkenpulver	5 – 12 %	üblicherweise nicht	üblicherweise nicht
Homogenisieren	vorteilhaft	nicht	nicht
Abfüllen	10 – 30 min	5 – 15 min	so schnell wie möglich
Kühlung	30 – 60 min Kühlluft, Kühltunnel	langsam (10 – 12 h) Zimmertemperatur	sehr schnell Kühlband, Kühlbad
Bearbeitungstendenz	kräftige Behandlung	sehr schonende Behandlung	äußerst schonende Behandlung

Tab. 12.4 Vorkommen und Gewinnung von Hydrokolloiden [155]

Hydrokolloid	Vorkommen	Gewinnung
Carrageenan	Rotalgen <i>Chondrus spp.</i> , <i>Eucheuma spp.</i> , <i>Gigartina spp.</i> , <i>Gloiopelis spp.</i> , <i>Iridaea spp.</i>	Isolation des Carrageenans aus Rotalgen durch Extraktion mit heißem Wasser unter leicht alkalischen Bedingungen, anschließend Fällung der Extraktionslösung mit Alkohol und Trocknung
Furcellaran	Rotalgen <i>Furcellaria fastigiata</i>	Alkalivorbehandlung der Algen, Heißwasserextraktion, Extrakt versetzen mit 1,5 % KCl, Konzentrieren der sich abscheidenden Gelfäden durch Ausfrieren, Pressen, Abzentrifugieren und Trocknen
Agar	verschiedene Rotalgen: <i>Rhodophyceae</i> , <i>Gelidium spp.</i> , <i>Pterocladia spp.</i> , <i>Gracilaria spp.</i>	Heißwasserextraktion
Algin (Alginsäure, Alginsalze und -derivate)	Braunalgen: <i>Phaeophyceae</i> ; Zellwandbestandteil <i>Macrocystispyrifera</i> , <i>Laminaria spp.</i> , <i>Ascophyllum spp.</i> , <i>Sargassum spp.</i>	Extraktion im alkalischen Milieu, Ausfällen mit Säure, Spülen und Zentrifugieren, Neutralisieren, Trocknen
Johannesbrotkernmehl	Samen des Johannesbrotbaums <i>Ceratonia siliqua</i>	Abtrennung des Endosperms aus den Samen, Vermahlung der Samen zu Mehl
Guarkernmehl	Samen der Guarbohne <i>Cyanopsis tetragonolobus</i>	Abtrennung des Endosperms und der äußeren Schichten aus den Samen, Vermahlung der Samen zu Mehl
Traganth	Pflanzenausscheidung; Pflanzengummi von <i>Astragalus spp.</i>	
Gummi arabicum	Pflanzengummi von <i>Acacia spp.</i> , <i>Acacia senegal</i> ,	bei Verwundung der Rinde werden Tropfen von 2-7 cm Durchmesser ausgeschieden; diese werden an der Luft trocknen gelassen
Karaya- Gummi	Pflanzenausscheidung des indischen Baumes <i>Sterculia ureus</i> , <i>Sterculia spp.</i> ,	
Cellulose	Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände	
Cellulosederivate	Cellulose (inert) kann durch Alkylierung in Cellulosederivate überführt werden, die durch ihre gute Quellbarkeit und Löslichkeit viele Anwendungsgebiete haben (z. B. Carboxymethylcellulose, Hydroxypropylmethylcellulose)	
Stärke	Reservestoff in verschiedenen Organen von Pflanzen; unterschieden werden Weizen-, Mais-, Reis- und Kartoffelstärke; die Stärkekörner unterscheiden sich in Größe und Form, und im Amylose-Amylopektinanteil	
modifizierte Stärke	durch chemische oder physikalische Modifizierung von Stärke lassen sich die Eigenschaften verbessern und/oder an einen bestimmten Verwendungszweck anpassen	
Pektin	Schalen von Citrusfrüchten, Apfeltrestern (20 – 40 % bzw. 10 – 20 % in TS)	Extraktion bei 100 °C und pH 1,5 – 3, Fällung des aus der Zellwand herausgelösten Pektins mit Alkohol, Auswaschen des gefällten Pektins mit salzsaurem Ethanol 70 % und waschen mit Ethanol 70 und 90 %
Gelatine	Häute und Knochen von Schweinen, Schafen und Rindern	Saures Aufschlussverfahren liefert Gelatine Typ A Alkalisches Aufschlussverfahren liefert Typ B
Xanthan	Fermentativ hergestellt mit Mikroorganismuskulturen von <i>Xanthomonas campestris</i>	Medien müssen neben Glucose und NH ₄ Cl ein Aminosäuregemisch und Mineralstoffe enthalten; durch Fällung mit Isopropanol wird Xanthan in Gegenwart von KCl abgeschieden

Tab. 12.5 Anwendungsgebiete und Wirkung von Hydrokolloiden in Lebensmitteln [155]

Wirkung	Anwendungsgebiet/Lebensmittel	Hydrokolloid
Stabilisierung	der Emulsion / Suspension bei Kondensmilch und Schokoladenmilch	Carrageenan, Algin, Pektin, Carboxymethylcellulose
	der Emulsion bei Kaffeeweißern;	Carrageenan
	fettreduzierter Margarine	Carrageenan
	von Speiseeis gegen Eiskristallbildung, Aufschmelzen und Phasentrennung; Konsistenzverbesserung	Algin, Carrageenan, Agar, Gummi arabicum, Traganth, Xanthan, Guaran, Johannisbrotkernmehl, modifizierte Stärken, Carboxymethylcellulose, Methylcellulose
	der Emulsion bei Fleischprodukten (Wurst)	Agar, Karaya-Gummi, Guaran, Johannisbrotkernmehl
Stabilisierung	von Schäumen (Bierschaum, Proteinschaum), Schlagsahne	Algin, Carrageenan, Agar, Gummi arabicum, Karaya-Gummi, Xanthan
	von Trüb bei Fruchtsäften, Erzielung von "body" bei Getränkepulvern	Pektin, Algin, Propylenglycolalginat, Gummi arabicum, Xanthan, Guaran, Methylcellulose
	von pulverförmigen Aromastoff-Emulsionen, Verkapselung von Aromastoffen	Gummi arabicum, Ghatti-Gummi, Xanthan
	von Gelee- und Zuckerwaren, Gummibonbons, Tortenguss, Zuckerglasur	Pektin, Algin, Carrageenan, Agar, Gummi arabicum, modifizierte Stärke
Gelierung	von Gelees für Fleisch-, Fisch- und Gemüseprodukte	Algin, Carrageenan, Agar
	von Milch in heiß und kalt zubereiteten Puddings und Cremes; Konsistenzverbesserung	Pektin, Algin, Carrageenan, Guaran, Johannisbrotkernmehl, Carboxymethylcellulose, modifizierte Stärke
Verdickung und Gelierung	von Fruchtmassen (Marmelade, Konfitüre, Gelees, Fruchtmassen für Speiseeis und Joghurt)	Pektin, Algin
	Verhinderung von Synärese, Gefrier-Tau-Stabilität von Suppen, Saucen, Salatcremes, Mayonnaise, Ketchup; Erzielung von "body" bei fett- und stärke-reduzierten Produkten	Traganth, Algin, Karaya-Gummi, Xanthan, Guaran, Johannisbrotkernmehl, Carboxymethylcellulose, Propylenglycolalginat, modifizierte Stärken
Wasserbindung	Konsistenzverbesserung und Ausbeuteerhöhung bei Weichkäse, Streichkäse und Käsezubereitungen	Carrageenan, Agar, Traganth, Karaya-Gummi, Guaran, Johannisbrotkernmehl, Algin, Carboxymethylcellulose

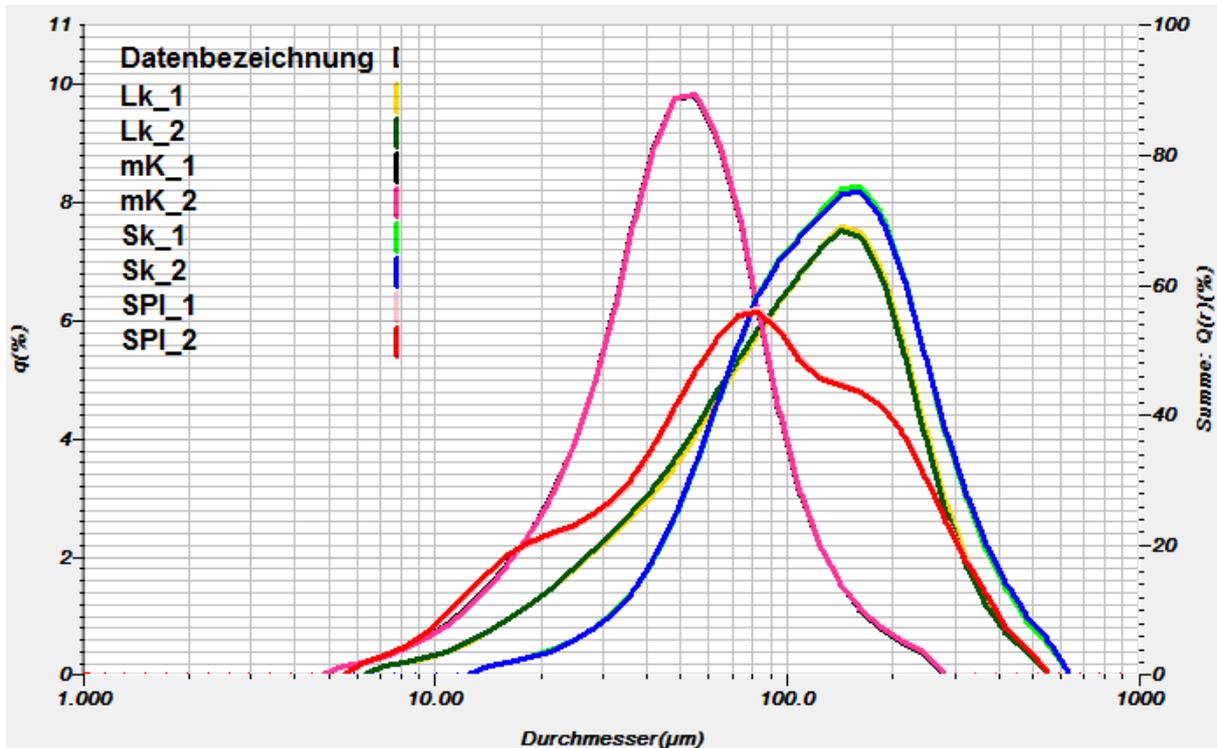


Abb. 12.1 Einzelhäufigkeitsverteilungen der Proteinpulver (Doppelbestimmung)

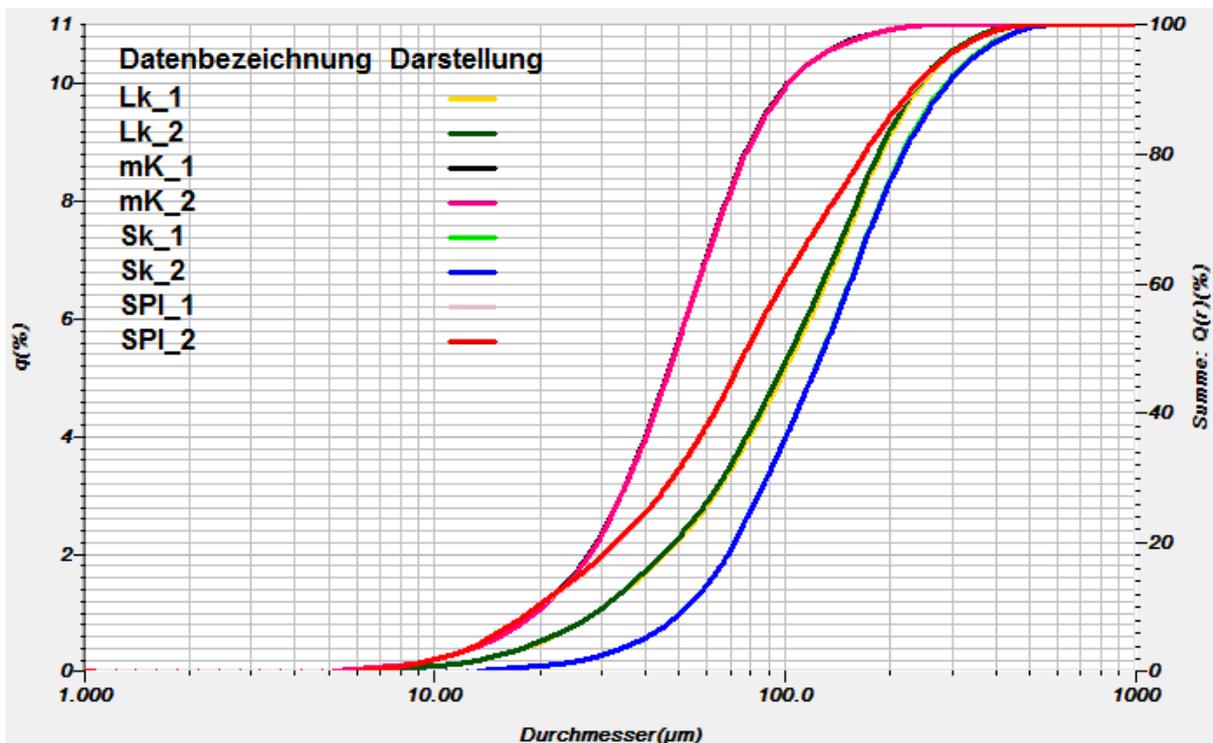


Abb. 12.2 Summenverteilungskurven der Proteinpulver (Doppelbestimmung)

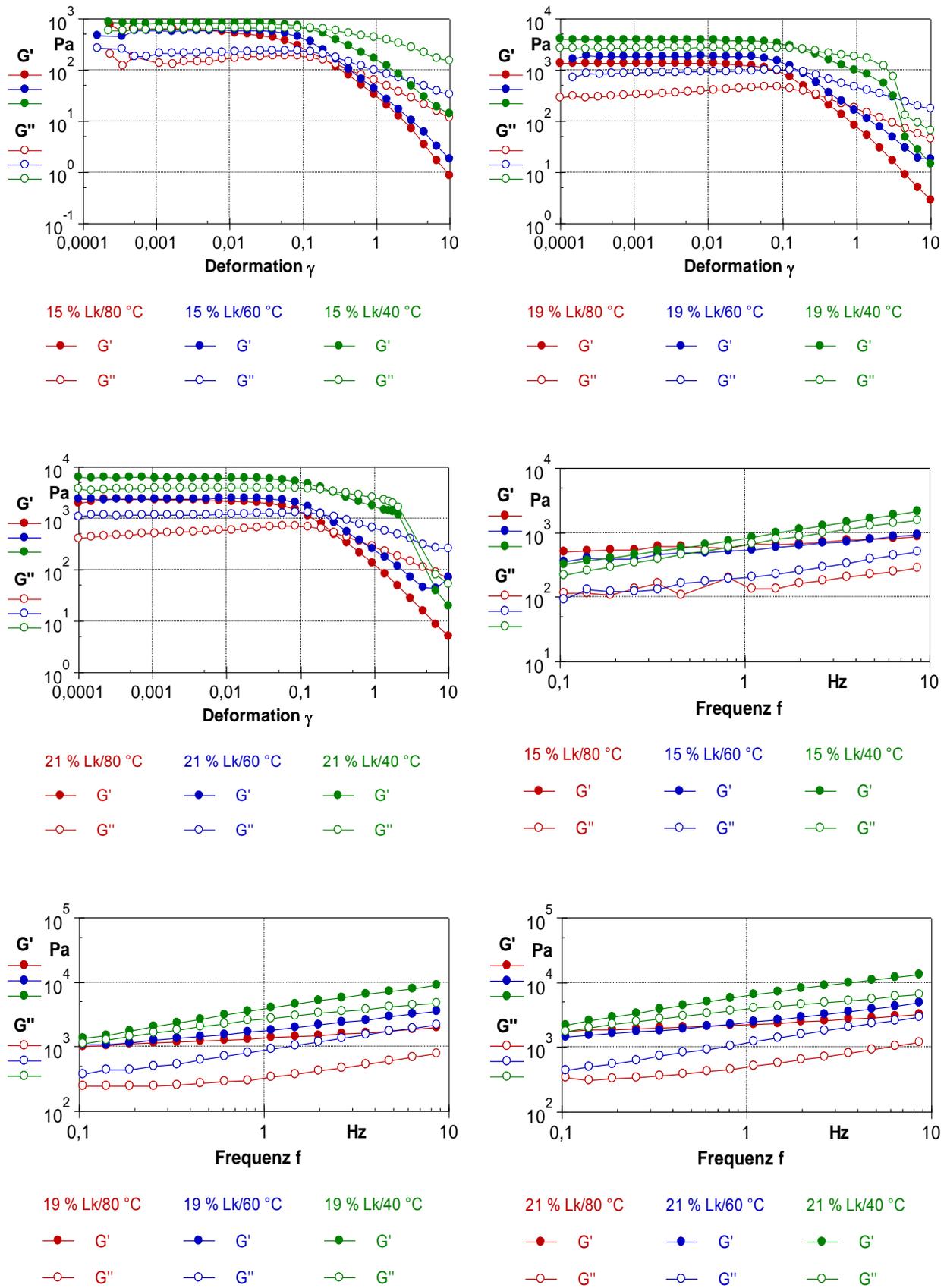


Abb. 12.3 Amplituden- und Frequenzsweeps $15 \leq c_{Lk} \leq 21$ %/ 80, 60 und 40 °C

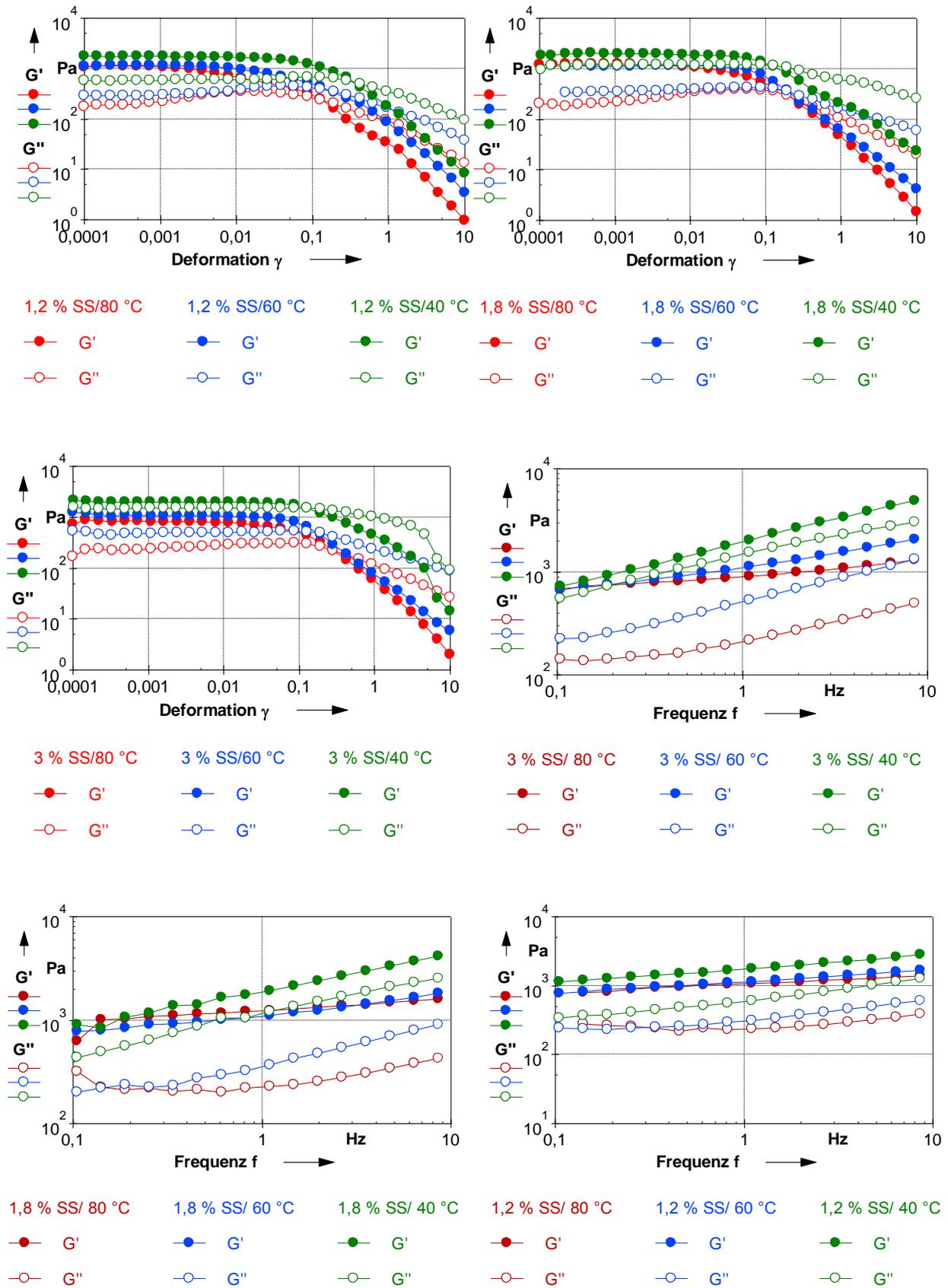


Abb. 12.4 Amplituden- und Frequenzsweeps $1,2 \leq c_{SS} \leq 3,0$ %/ 80, 60 und 40 °C

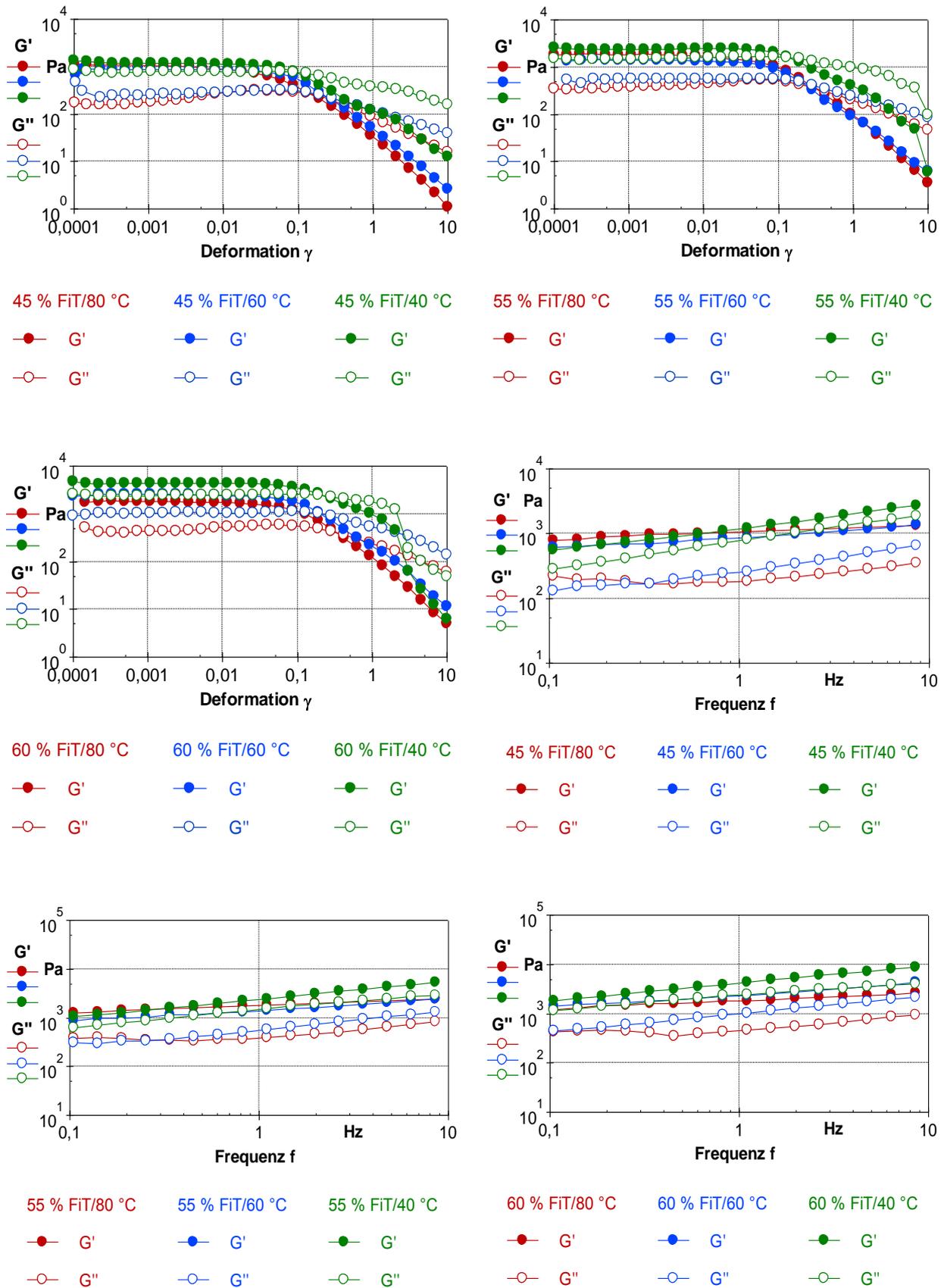


Abb. 12.5 Amplituden- und Frequenzsweeps $45 \leq c_{FIT} \leq 60$ % / 80, 60 und 40 °C

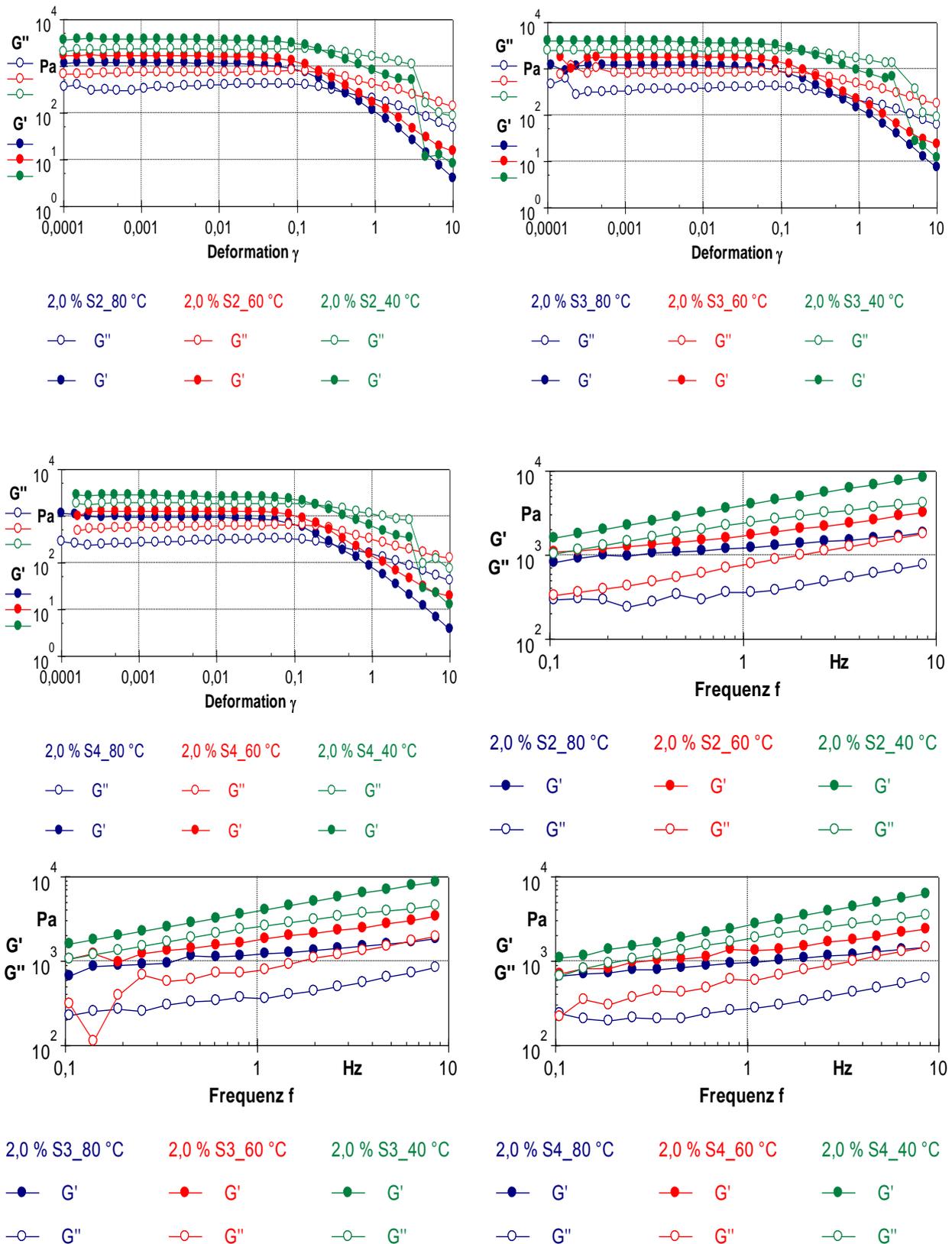


Abb. 12.6 Amplituden- und Frequenzsweeps 2 % S1, S2, S3 und S4/ 80, 60 und 40 °C

Tab. 12.6 Frequenzabhängiger Strukturaufbau nach der Stärkeart bei 2 % Stärkeinsatz

Stärkeinsatz	Regressionsdaten	Temperatur in °C		
		40	60	80
Standard (ohne Stärke)	G'_{pot}	1931	1400	1307
	x	0,3985	0,2014	0,1182
	R^2 (Gl. 6.4)	0,98	0,99	0,98
	G''_{pot}	1256	499	299
	y	0,3766	0,3867	0,1729
	R^2 (Gl. 6.5)	0,98	0,99	0,68*
S1	G'_{pot}	3698	1644	1189
	x	0,3799	0,2471	0,1545
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	2224	692	325
	y	0,3306	0,4205	0,2840
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,93
S2	G'_{pot}	3815	1771	1241
	x	0,3799	0,2463	0,1674
	R^2 (Gl. 6.4)	0,999	0,990	0,986
	G''_{pot}	2279	761	396
	y	0,3216	0,3970	0,2308
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,86
S3	G'_{pot}	3871	1802	1196
	x	0,3931	0,2675	0,1929
	R^2 (Gl. 6.4)	0,999	0,970	0,964
	G''_{pot}	2403	771	400
	y	0,3325	0,4632	0,2773
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,81	0,96
S4	G'_{pot}	2650	1324	976
	x	0,4061	0,2618	0,1752
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	1739	614	305
	y	0,3694	0,3934	0,2549
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,98	0,89

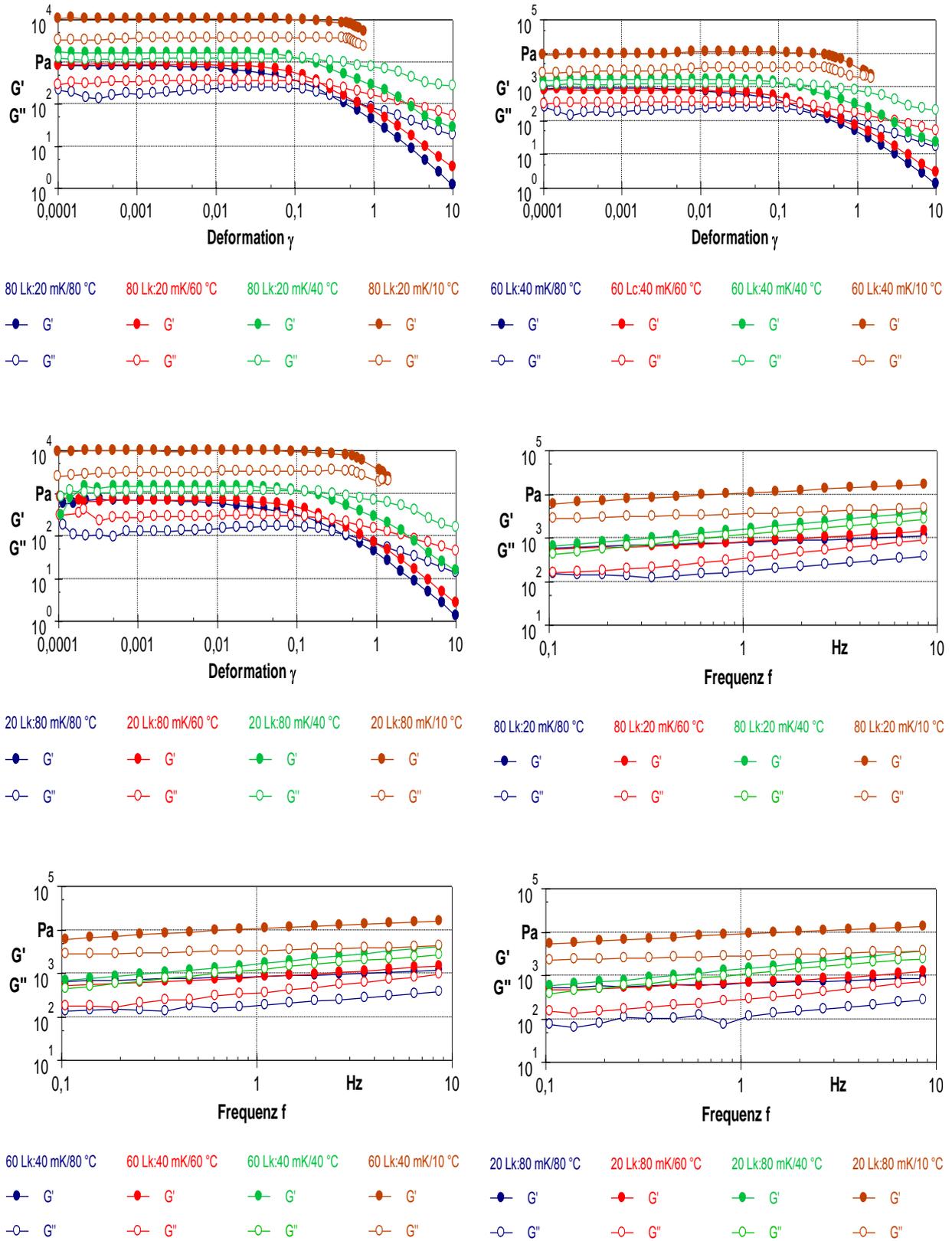


Abb. 12.7 Amplituden- und Frequenzsweeps $20 \leq c_{mK} \leq 80$ % des GPA

Tab. 12.7 Frequenzabhängiger Strukturaufbau nach der Lk:mK-Relation bei 19 % GPA

Relation (Lk %:mK %)	Regressionsdaten	Temperatur in °C			
		10	40	60	80
100 Lk:0 mK	G'_{pot}	13632	1690	1057	870
	x	0,2302	0,4105	0,2141	0,1407
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99	0,98
	G''_{pot}	4725	1164	417	229
	y	0,1302	0,4089	0,3804	0,2789
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,98	0,95
80 Lk:20 mK	G'_{pot}	10475	1609	852	809
	x	0,2272	0,4201	0,2242	0,1417
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	3610	1163	354	194
	y	0,1213	0,4180	0,4185	0,2429
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,99	0,84
60 Lk:40 mK	G'_{pot}	10346	1663	845	755
	x	0,2167	0,4187	0,2365	0,1306
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	3369	1131	369	185
	y	0,0973	0,4105	0,4053	0,2364
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,99	0,92
40 Lk:60 mK	G'_{pot}	9475	1433	799	729
	x	0,2163	0,4128	0,2241	0,1357
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99	0,96
	G''_{pot}	3081	1038	331	170
	y	0,1032	0,4105	0,3945	0,2255
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,98	0,62*
20 Lk:80 mK	G'_{pot}	8817	1437	704	667
	x	0,2140	0,4271	0,2150	0,1087
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,98	0,97
	G''_{pot}	2858	944	290	128
	y	0,1109	0,4268	0,3874	0,2955
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,98	0,87
0 Lk:100 mK	G'_{pot}	4113	1086	515	522
	x	0,3256	0,3961	0,1984	0,1066
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,98	0,97
	G''_{pot}	2020	739	181	98
	y	0,1779	0,4340	0,4214	0,2115
	R^2 (Gl. 6.5)	0,98	0,99	0,99	0,75*

* Ungleichung

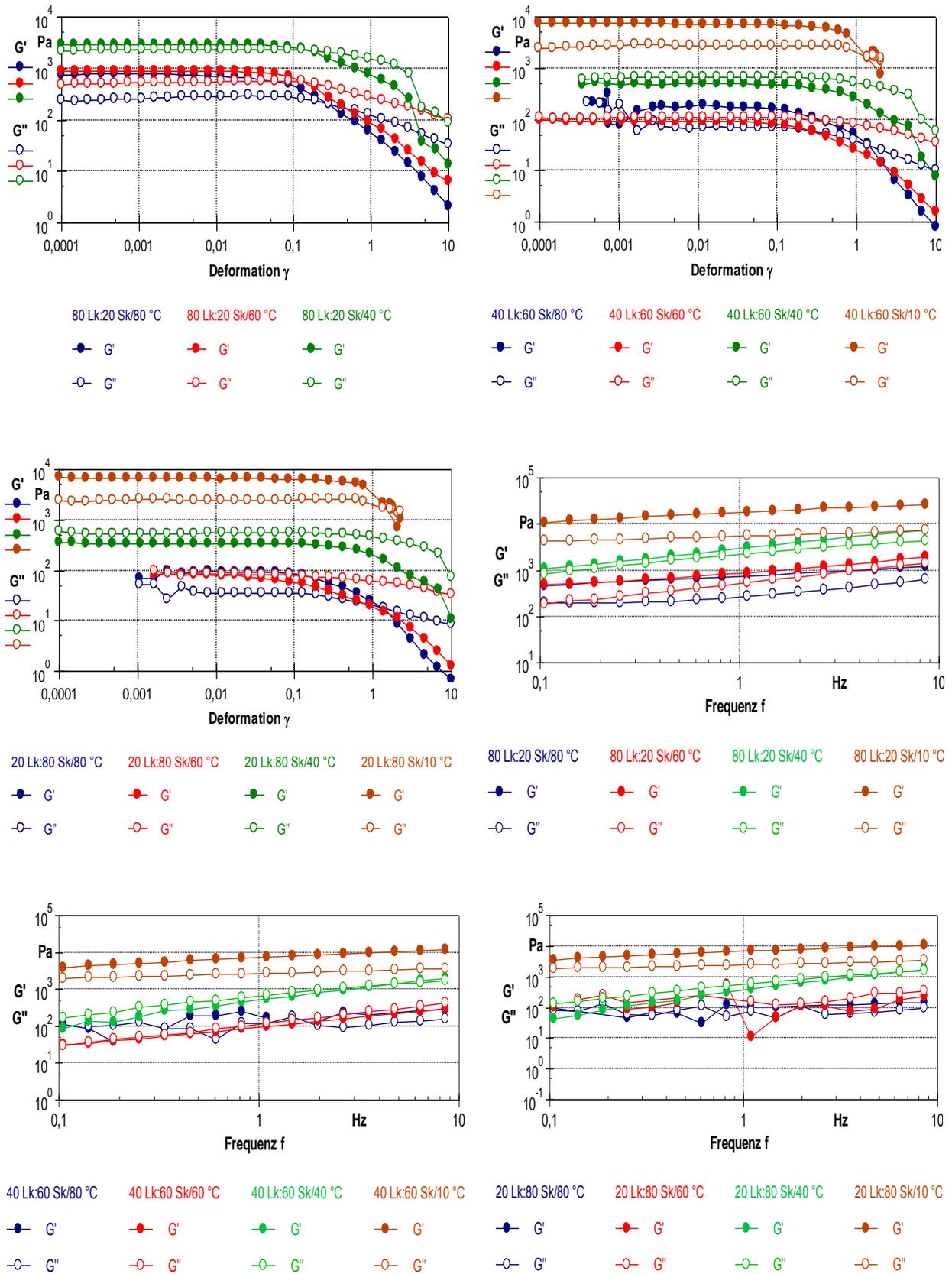


Abb. 12.8 Amplituden- und Frequenzsweeps $20 \leq c_{Sk} \leq 80$ % des GPA

Tab. 12.8 Frequenzabhängiger Strukturaufbau nach der Lk:Sk-Relation bei 19 % GPA

Relation (Lk %:Sk %)	Regressionsdaten	Temperatur in °C			
		10	40	60	80
100 Lk:0 Sk	G'_{pot}	13632	1690	1057	870
	x	0,2302	0,4105	0,2141	0,1407
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99	0,98
	G''_{pot}	4725	1164	417	229
	y	0,1302	0,4089	0,3804	0,2789
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,98	0,95
80 Lk:20 Sk	G'_{pot}	10955	1049	472	438
	x	0,2419	0,4981	0,2748	0,1855
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,98	0,99
	G''_{pot}	4062	909	245	144
	y	0,1367	0,4551	0,4611	0,2723
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,99	0,92
60 Lk:40 Sk	G'_{pot}	8781	813	264	233
	x	0,2395	0,5749	0,3791	0,2213
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	3219	821	195	88
	y	0,1391	0,4837	0,5137	0,375
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,99	0,98
40 Lk:60 Sk	G'_{pot}	7121	485	96**	157
	x	0,2489	0,7007	0,5220	0,2926
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99	0,58*
	G''_{pot}	2697	623	114	107
	y	0,1410	0,5276	0,5938	0,0985
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,99	0,16*
20 Lk:80 Sk	G'_{pot}	6611	330	86**	90
	x	0,2472	0,8389	0,1043	0,2071
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,03*	0,43*
	G''_{pot}	2499	526	194	75
	y	0,1340	0,5756	0,0896**	-0,0210**
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,14*	0,01*
0 Lk:100 Sk	G'_{pot}	6462	428	36	27
	x	0,2305	0,7210	0,8703	0,4761
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,98	0,99	0,60*
	G''_{pot}	2257	519	84	30
	y	0,1331	0,5396	0,6895	0,4873
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,96	0,99	0,71*

* Ungleichung, ** Messartefakt

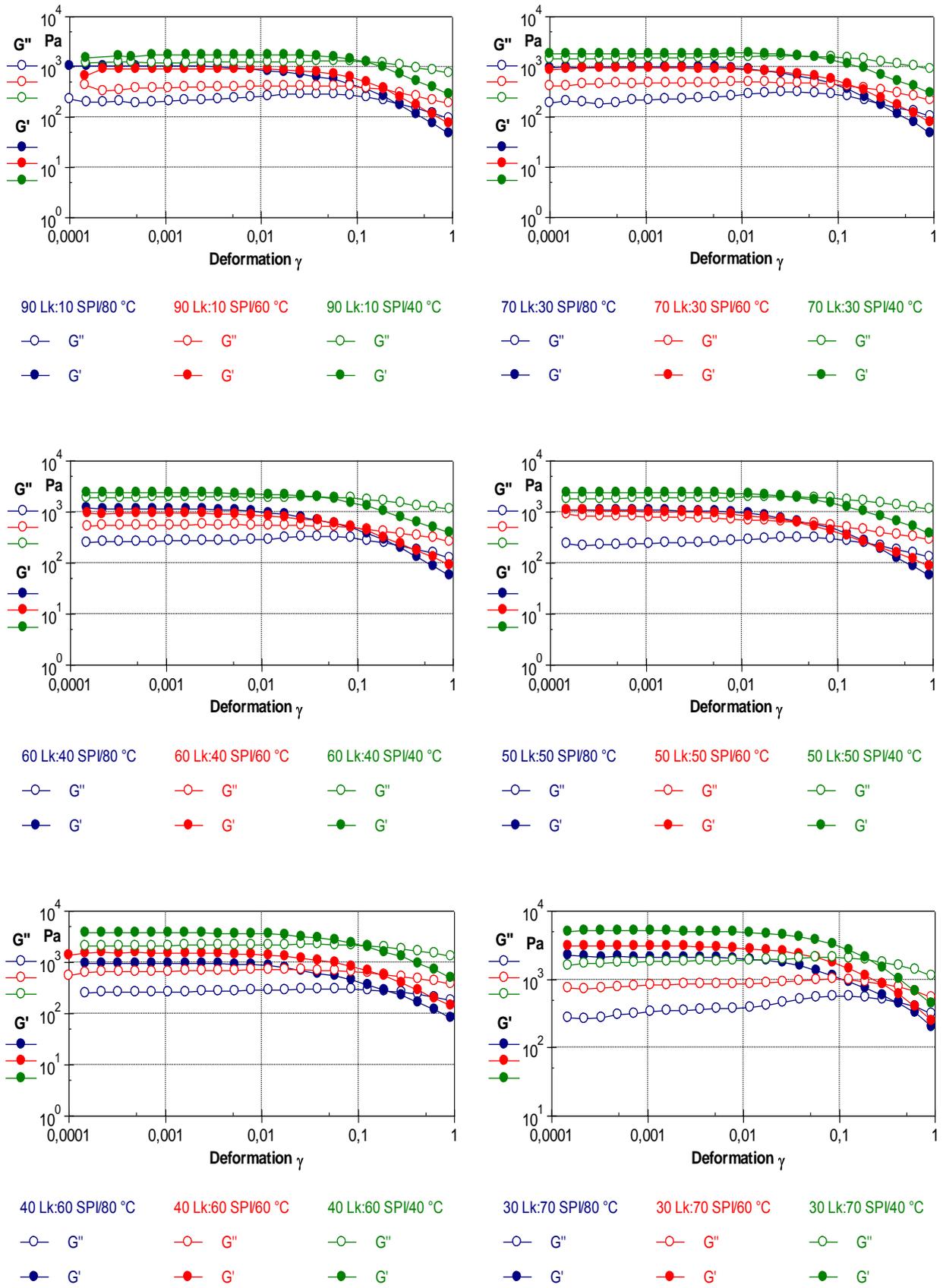


Abb. 12.9 Amplitudensweeps $10 \leq c_{SPI} \leq 70$ % des GPA/ 80, 60 und 40 °C

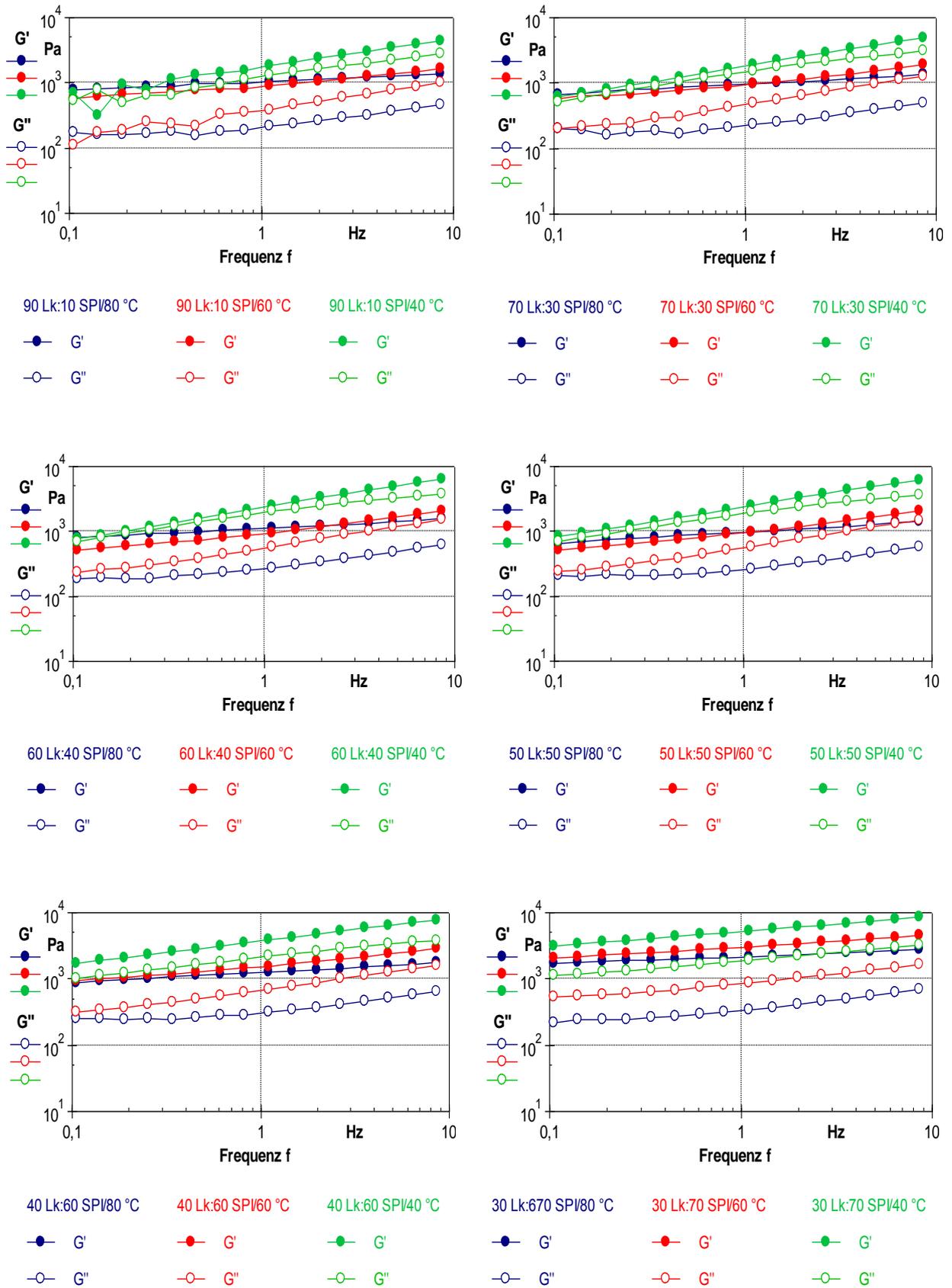


Abb. 12.10 Frequenzsweeps $10 \leq c_{SPI} \leq 70$ % des GPA/ 80, 60 und 40 °C

Tab. 12.9 Frequenzabhängiger Strukturaufbau nach der Lk:SPI-Relation bei 17 % GPA

Relation (Lk %:SPI %)	Regressionsdaten	Temperatur in °C		
		40	60	80
90 Lk:10 SPI	G'_{pot}	2123	1336	1022
	x	0,3692	0,2060	0,1346
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	1277	500	258
	y	0,3794	0,3688	0,1997
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,98	0,98
80 Lk:20 SPI	G'_{pot}	2601	1584	1387
	x	0,3518	0,2229	0,1660
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,97
	G''_{pot}	1452	617	397
	y	0,3326	0,3466	0,1268
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,98	0,54*
70 Lk:30 SPI	G'_{pot}	3336	2512	2154
	x	0,3311	0,2082	0,1276
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	1710	899	504
	y	0,2896	0,3065	0,1748
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,96	0,71*
60 Lk:40 SPI	G'_{pot}	4641	3019	2622
	x	0,2734	0,1970	0,1217
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,98
	G''_{pot}	1905	821	550
	y	0,2218	0,1940	0,1810
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,78*
50 Lk:50 SPI	G'_{pot}	4898	3640	3103
	x	0,2314	0,1601	0,1036
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	1689	910	545
	y	0,1867	0,1755	0,1995
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,80*
40 Lk:60 SPI	G'_{pot}	6192	4529	3502
	x	0,1798	0,1558	0,1047
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	2068	952	629
	y	0,2158	0,2150	0,1168
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,98	0,36*
30 Lk:70 SPI	G'_{pot}	8043	5048	3959
	x	0,1307	0,1244	0,0906
	R^2 (Gl. 6.4)	0,99	0,99	0,99
	G''_{pot}	1668	1107	661
	y	0,1349	0,1172	0,0971
	R^2 (Gl. 6.5)	0,99	0,99	0,47*

* Ungleichung

Nachweis der Reproduzierbarkeit der Präparation der Analogkäseproben und deren Temperatursweepmessungen mittels Doppelbestimmungen (Abb. 12.11 bis Abb. 12.17):

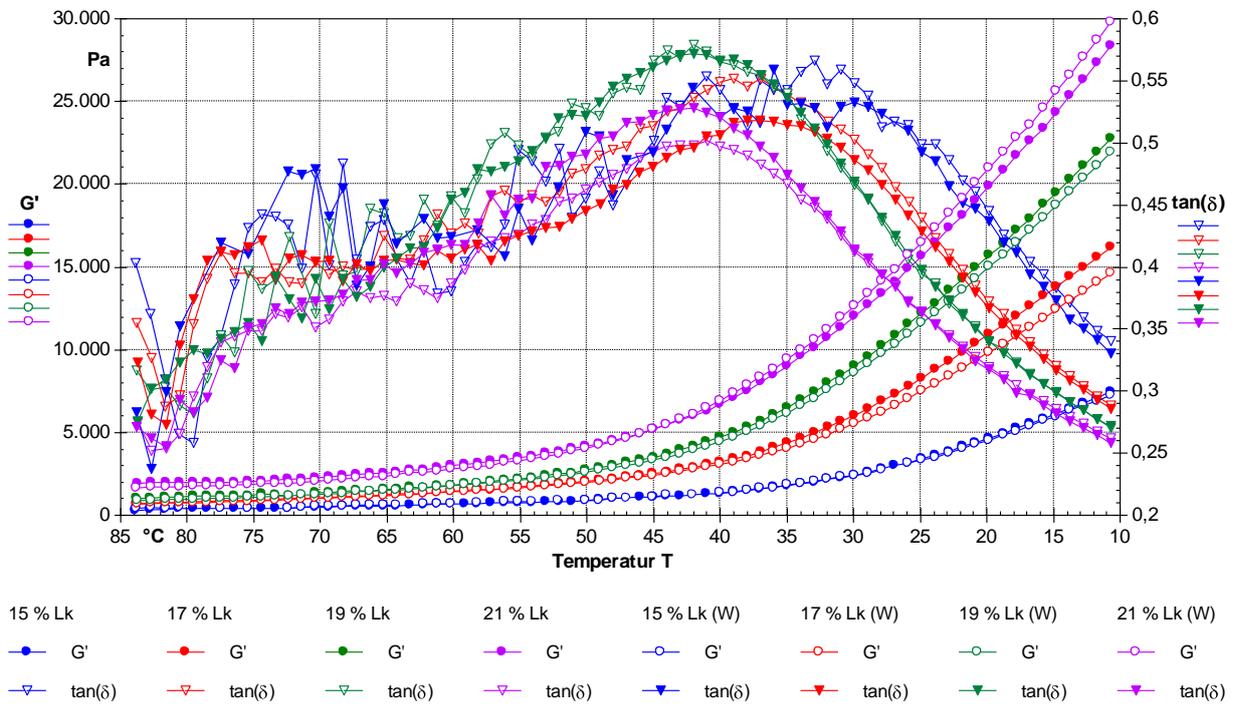


Abb. 12.11 Verlauf G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit vom Labkaseinanteil (Doppelbestimmung)

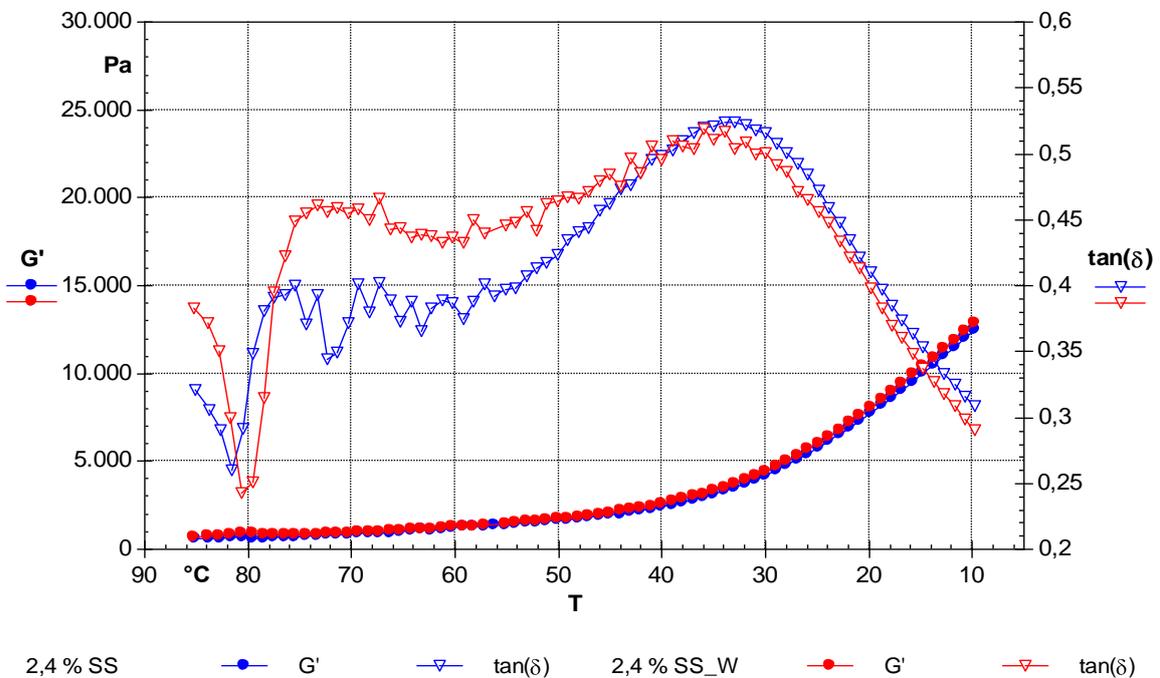


Abb. 12.12 Verlauf G' und $\tan \delta$ bei 2,4 % Schmelzsatz JOHA[®] S9 (Doppelbestimmung)

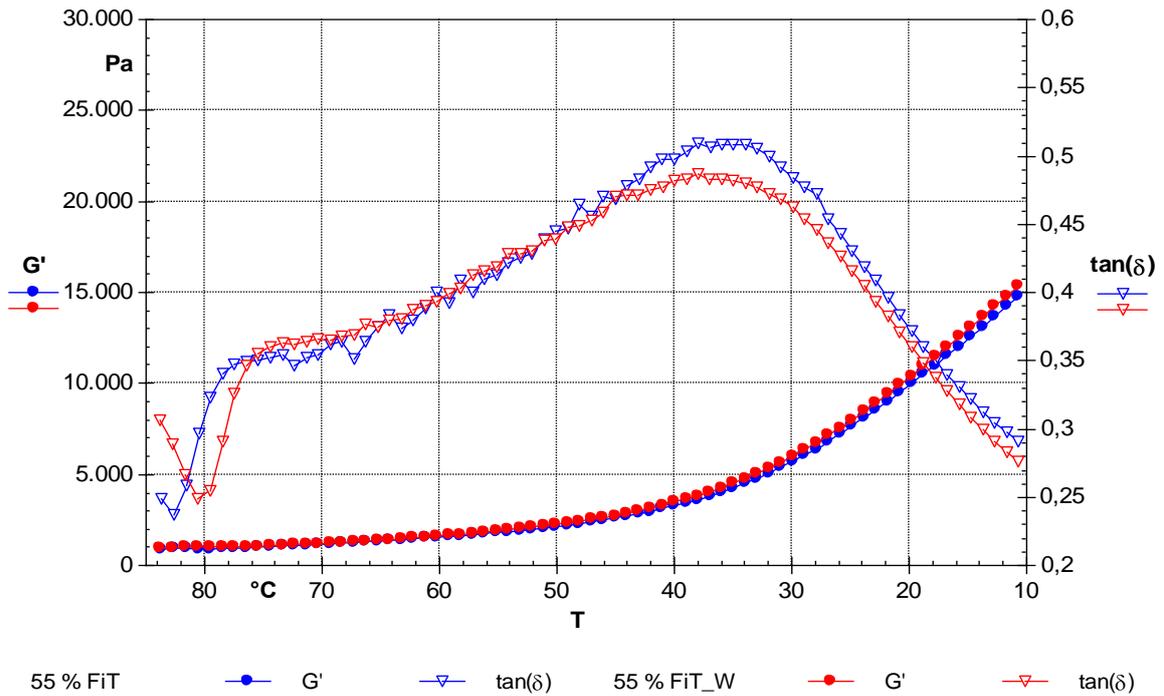


Abb. 12.13 Verlauf G' und $\tan \delta$ bei 55 % FiT (Doppelbestimmung)

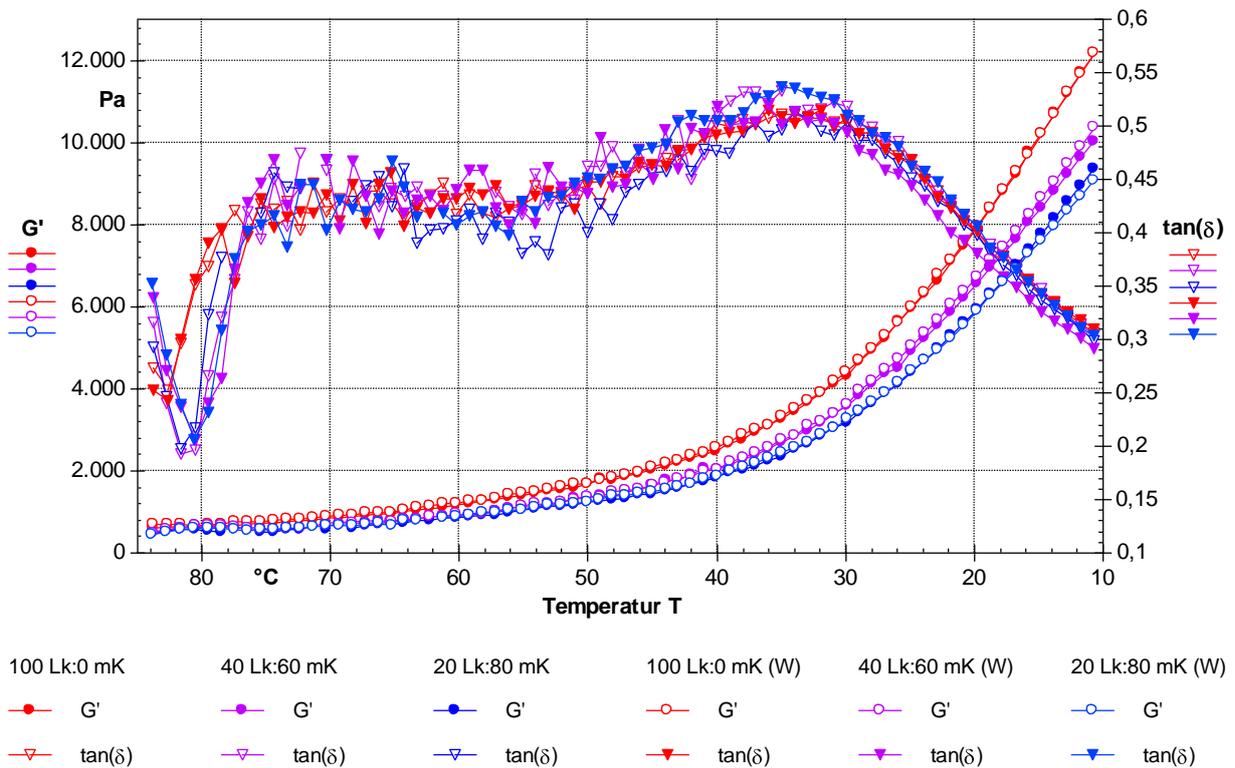


Abb. 12.14 G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:mK-Relation (Doppelbestimmung)

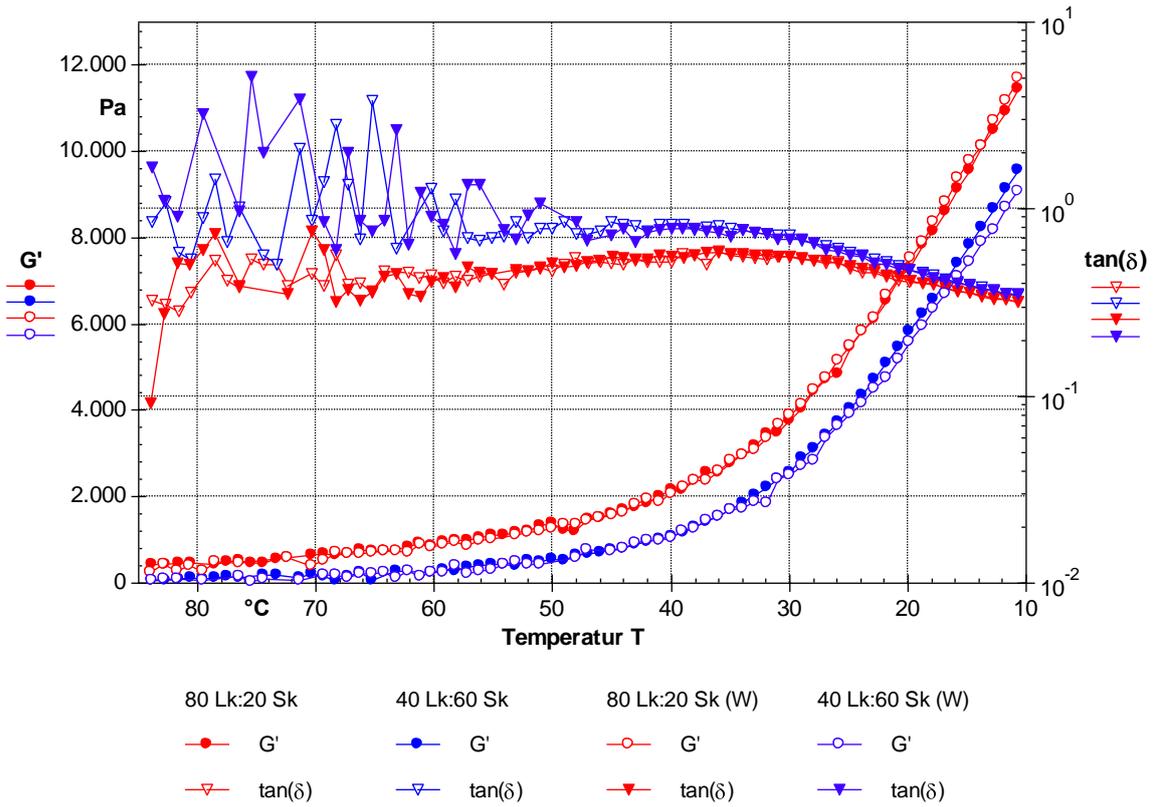


Abb. 12.15 G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Lk:Sk-Relation (Doppelbestimmung)

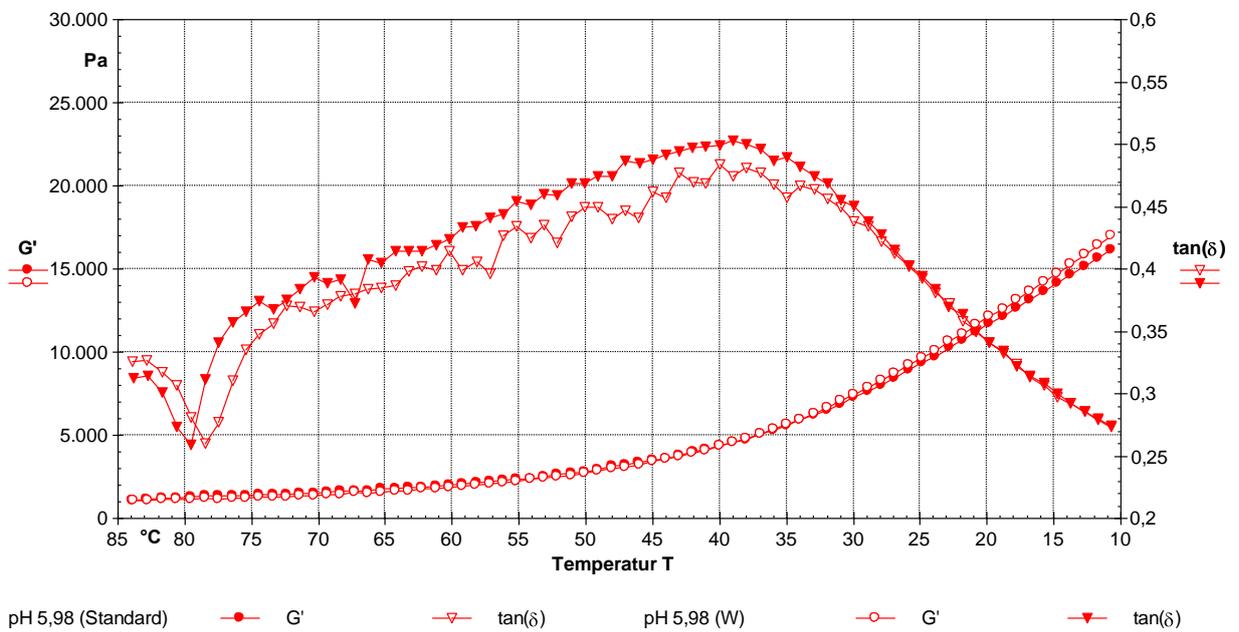


Abb. 12.16 G' und $\tan \delta$: 17 % Lk; 2 % S2; 5,98 pH; 200 U/min (Doppelbestimmung)

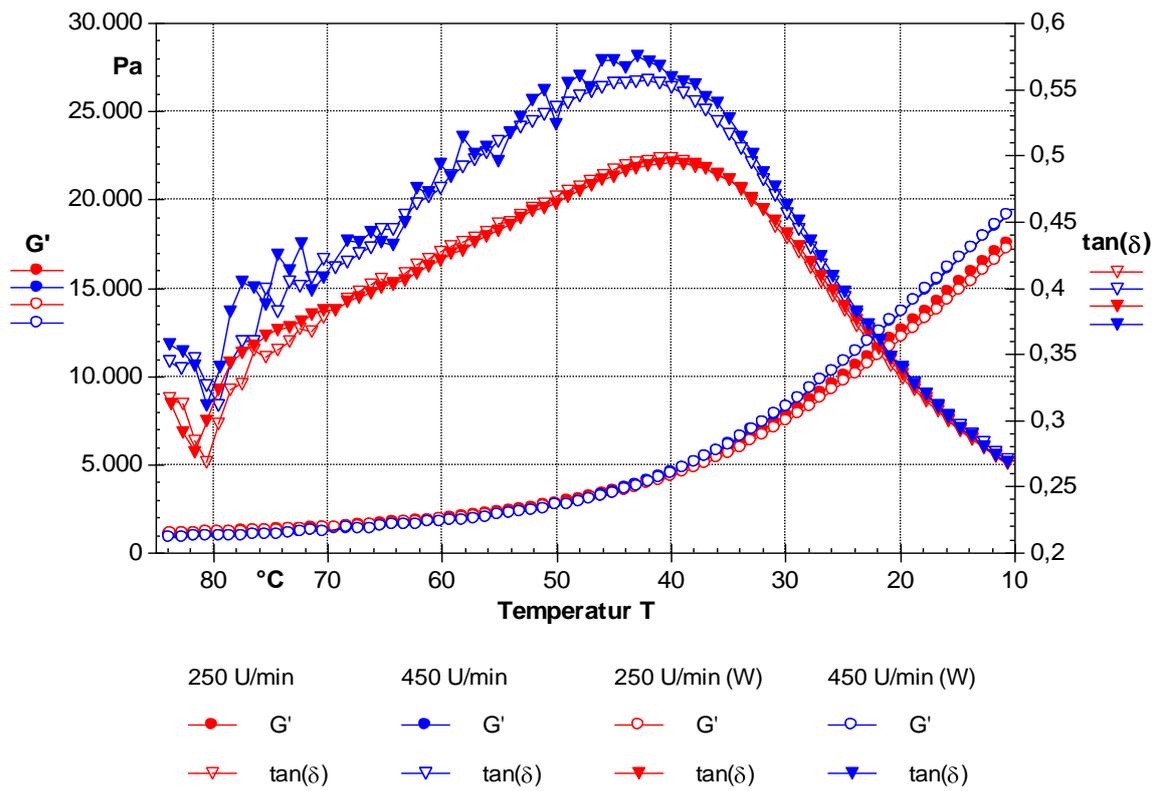


Abb. 12.17 G' und $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Drehzahl (Doppelbestimmung)

Liste von Veröffentlichungen und Präsentationen

Veröffentlichungen

1. Senge, B.; Edelby, Y. und Blochwitz. R.: Untersuchungen zur Strukturausbildung in Analogkäse. *DMW – Die Milchwirtschaft*, 2010, 1 (9), S. 324-332
2. Senge, B.; Edelby, Y. und Blochwitz. R.: Einfluss von Stärkekonzentration und –art auf die Strukturausbildung in Analogkäse. *DMW – Die Milchwirtschaft*, 2011, 2 (23), S. 784-792

Oral-Präsentationen

1. Senge, B. und Edelby, Y.: Untersuchungen zur Strukturausbildung in Analogkäse. *19. Oranienburger Milchforum*; 10.-11.11.2011, MLUA Oranienburg e. V., Oranienburg.
2. Edelby, Y. und Senge, B.: Influence of Process Parameters and Concentration of Components on Structure Formation in Cheese Analogues. *The XVIth International Congress on Rheology*, 5.-10.08.2012, Lisbon, Portugal.
3. Senge, B. und Edelby, Y.: Strukturierungsmechanismen bei der Herstellung von Analogkäse. *GDL - Lebensmitteltechnologie*, 27.-29.09.2012, Dresden, Deutschland.
4. Edelby, Y.; Balaghi, S. und Senge, B.: Flow and Sol-gel Behavior of Two Types of Methylcellulose at Various Concentrations. *Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting (PPS-29)*, 15.-19.07.2013, Nuremberg, Germany.
5. Balaghi, S.; Edelby, Y.; und Senge, B.: Evaluation of Thermal Gelation Behavior of Different Cellulose Ether Polymers by Rheology. *Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting (PPS-29)*, 15.-19.07.2013, Nuremberg, Germany.

Poster-Präsentationen

1. Edelby, Y. und Senge, B.: Influence of Rennet Casein Concentration on the Structure Construction in Cheese Analogues. *Deutsche Rheologische Gesellschaft e. V., Recent Trends in Fundamental and Applied Rheology*, 31.03.-01.04.2011, Berlin, Germany.
2. Edelby, Y. und Senge, B.: Structure Formation in Processed Cheese and Rheological Evaluation of Selected Influencing Factors. *76. Jahrestagung DPG und DPG-Frühjahrstagung*, 25.-30.03.2012, Berlin, Germany.
3. Edelby, Y. und Senge, B.: Structure Formation in Cheese Analogues and Evaluation its Substitution Potential. *6th International Symposium on Food Rheology and Structure (ISFRS)*, 10.-13.04.2012, Zürich, Switzerland.
4. Edelby, Y. und Senge, B.: Structure Formation in Cheese Analogues and Evaluation its Substitution Potential. *GDL - Kongress Lebensmitteltechnologie*, 27.-29.09.2012, Dresden, Deutschland.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass die vorliegende Dissertation in allen Teilen von mir selbstständig und unter ausschließlicher Nutzung der darin angegebenen Quellen angefertigt wurde.

Weiter erkläre ich, dass ich nicht schon anderweitig einmal die Promotionsabsicht angemeldet oder ein Promotionseröffnungsverfahren beantragt habe.

Berlin, 20.12.2013

Yamen Edelby