

# 1 Einleitung

Polysaccharide werden aufgrund ihrer funktionellen Eigenschaften gezielt bei der Herstellung von Lebensmitteln eingesetzt. Sie eignen sich durch eine hohe Wasserbindung, gute Hydrierbarkeit und hohe Viskosität bis hin zur Gelbildung als Stabilisator, Verdickungs- und/oder Geliermittel. Insbesondere im Bereich der Convenience- und Fertiggerichte sowie im Bereich der fettreduzierten Lebensmittel ist der Einsatz von Polysacchariden für die Texturbildung und die Produktstabilität oft unabdingbar [28, 79, 88, 182, 202, 219].

Aufgrund ihrer einfachen Handhabung und Kosteneffizienz werden überwiegend pflanzliche und marine Polysaccharide, wie beispielsweise Pektin, (modifizierte) Stärke, Gummi arabicum oder Alginat, eingesetzt [28, 202, 219]. Darüber hinaus finden mikrobielle Polysaccharide wie Xanthan, Gellan oder Dextran seit einigen Jahren vermehrt Anwendung [88, 188, 219, 256]. Diese stellen aufgrund neuartiger funktioneller Eigenschaften eine Alternative zu herkömmlich eingesetzten Polysacchariden dar [60, 88, 188]. Zudem ist im Gegensatz zu pflanzlichen Polysacchariden eine vergleichsweise schnelle, biotechnologische Produktion, unabhängig von standortbedingten Schwankungen und ohne Konkurrenz um fruchtbaren Boden, möglich [77, 199, 219].

Von besonderem Interesse für die Anwendung bei der Lebensmittelherstellung sind die von Milchsäurebakterien gebildeten Exopolysaccharide [187, 188, 209, 256]. Milchsäurebakterien werden zur Herstellung und Konservierung von Lebensmitteln eingesetzt [58, 107, 167, 186, 188, 203]. Hierbei werden neben Milchsäure, Aromastoffen und Aromavorstufen teilweise auch Exopolysaccharide im Lebensmittel gebildet [17, 26, 60, 77, 188, 208, 254]. Bereits geringe Konzentrationen dieser Exopolysaccharide verbessern durch die Erhöhung der Viskosität und durch die Interaktion mit Proteinen die Textur und Stabilität, beispielsweise von fermentierten Milchprodukten [4, 26, 27, 54, 143, 167, 168, 188, 262]. Vor allem bei fettreduzierten Produkten kann so ein Mundgefühl erreicht werden, das dem nicht fettreduzierter Produkte entspricht [26, 27, 52]. Außerdem wird die Festigkeit von Caseingelen erhöht und die Stabilität gegen Synärese verbessert [54, 65, 168].

Durch die vielseitigen funktionellen Eigenschaften, bereits bei geringer Konzentration, sind die Exopolysaccharide auch für einen Einsatz in anderen, nicht fermentierten Lebensmitteln interessant. Hierzu ist eine biotechnologische Produktion mit nachfolgender Isolierung notwendig.



Diese ist jedoch aufgrund der geringen Exopolysaccharidbildung durch Milchsäurebakterien von maximal  $2,8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  bisher nicht wirtschaftlich [60, 153, 186, 188, 209, 210, 235]. Daher war die Maximierung der Exopolysaccharidbildung durch Optimierung der Kultivierungsbedingungen bereits Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen [2, 81, 97, 118, 122, 125, 146, 215, 228, 242, 260, 267, 268, 270, 271]. Die Charakterisierung der funktionellen Eigenschaften isolierter Exopolysaccharide von Milchsäurebakterien fehlt jedoch bisher weitgehend [4, 39, 196, 220].



## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Funktionelle Eigenschaften von Polysacchariden

Polysaccharide sind in der Natur weit verbreitete Makromoleküle, die bei Pflanzen und Lebewesen eine Vielzahl verschiedener Funktionen übernehmen. Sie dienen z. B. als Gerüstsubstanzen (Cellulose, Pektin, Chitin), als Reservestoffe (Stärke, Dextrine, Glycogen) oder als wasserbindende Stoffe (Agar, Pektin, Alginat). Daher sind Polysaccharide als Nähr- und Ballaststoffe ein wichtiger Bestandteil von Lebensmitteln und der menschlichen Ernährung [17, 21, 28, 60]. Darüber hinaus werden sie gezielt bei der Verarbeitung und Herstellung von Lebensmitteln eingesetzt [28, 88, 182, 202]. Der Einsatz erfolgt dabei insbesondere aufgrund ihrer funktionellen Eigenschaften, also z. B. der verdickenden oder texturgebenden Eigenschaften, seltener wegen des Nährwerts oder als Ballaststoff [28, 79, 86, 174, 202, 219]. Verwendung finden vor allem Polysaccharide pflanzlicher (Stärke, modifizierte Stärke, Exsudate) und mariner (Carrageenan, Alginate) Herkunft. Mikrobielle Polysaccharide (Xanthan, Gellan, Dextran) werden aufgrund besonderer funktioneller Eigenschaften ebenfalls eingesetzt [28, 47, 60, 88, 202]. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über verschiedene funktionelle Eigenschaften von Polysacchariden und Lebensmittel, in denen diese eingesetzt werden.

Nahezu alle Lebensmittel sind komplexe Mehrphasensysteme, bei denen im Allgemeinen mindestens eine wässrige Phase vorhanden ist [79, 182, 234]. In dieser reichern sich Polysaccharide aufgrund ihrer hydrophilen Eigenschaften an [79, 182]. Die positiven Effekte im Lebensmittel resultieren direkt aus den funktionellen Eigenschaften der Polysaccharide oder können das Resultat verschiedener komplexer Mechanismen sein [79]. Für den gezielten Einsatz sind detaillierte Kenntnisse der funktionellen Eigenschaften der Polysaccharide in wässriger Lösung notwendig [164, 202].

Polysaccharide bestehen aus glycosidisch verknüpften Monosacchariden mit einem Polymerisierungsgrad von mehreren tausend Einheiten. Amylopektin besteht beispielsweise aus mehreren hunderttausend Glucosemolekülen [28, 119, 174]. Das Molekulargewicht dieser Makromoleküle kann dementsprechend über eine Million Dalton erreichen [17, 21, 119].

Polysaccharide, die aus einer einzigen Monosaccharidart aufgebaut sind, werden als Homopolysaccharide bezeichnet. Hierzu gehören viele der in der Natur vorkommenden Polysaccharide,

**Tabelle 2.1:** Funktionelle Eigenschaften von Polysacchariden in der Lebensmittelherstellung [28, 79]

<b>Funktion</b>	<b>Lebensmittel</b>	<b>verwendete Polysaccharide</b>
Verdickungsmittel	Saucen, Suppen, Salatsaucen, Mayonnaisen, Cremes, Eiscremes, fettreduzierte Lebensmittel, Fruchtmassen	Karaya-Gummi, Xanthan, Guaran, Johannisbrotkernmehl, Carboxymethylcellulose, modifizierte Stärke, Pektin
Geliermittel	Desserts, Süßwaren, Marmeladen, Gelees, Tierfutter	Pektin, Alginat, Carrageenan, Agar, Carboxymethylcellulose, modifizierte Stärke
Bindemittel	Käsezubereitungen, verarbeitete Fleischprodukte	Carrageenan, Agar, Traganth, Guaran, Johannisbrotkernmehl, Carboxymethylcellulose
Emulgator	Saucen, Salatsaucen, Mayonnaisen	Gummi arabicum, modifizierte Stärke
Stabilisatoren für Emulsionen, Suspensionen oder Schäume	Salatsaucen, Mayonnaisen, Getränke, Schokoladenmilch, fettreduzierte Margarinen, Bierschäume, Schlagsahne, Schaumküsse	Carrageenan, Alginat, Pektin, Carboxymethylcellulose, Agar, Gummi arabicum, Karaya-Gummi, Xanthan
Verkapselungsmaterial	Sprühgetrocknete Aromen	Gummi arabicum, modifizierte Stärke, Xanthan, Ghatti-Gummi
Stabilisierung gegen Eiskristallbildung	Eiscremes	Carrageenan, Gummi arabicum, Guaran, Johannisbrotkernmehl, Pektin

z. B. Stärke, Cellulose, Pektin, Dextran und Glycogen [17, 21, 119]. Bestehen die Makromoleküle aus mindestens zwei verschiedenen Monosacchariden, werden sie als Heteropolysaccharide bezeichnet. Beispiele für Heteropolysaccharide sind Hemicellulose, Alginat, Xanthan und Gummi arabicum [17, 21, 119, 174].

Das am häufigsten vorkommende Monosaccharid in Polysacchariden ist Glucose [21, 119, 222]. Eine Vielzahl weiterer Monosaccharide, wie z. B. Fructose, Galactose, Mannose oder Arabinose, können in der Struktur von Polysacchariden vorkommen. Weitere Bestandteile von Polysacchariden sind Zuckersäuren, wie Galacturonsäure (Pektin) oder Glucuronsäure (Gummi arabicum), Aminozucker, wie N-Acetyl-Glucosamin und N-Acetyl-Muraminsäure (Peptidoglycane), oder Proteinreste (Glycoproteine) [21, 119].

Die Struktur der Polysaccharide kann linear oder verzweigt sein. Der Grad der Verzweigung, die Länge der Seitenketten sowie die Regelmäßigkeit der Seitenketten sind charakteristisch für das jeweilige Polysaccharid [17, 28, 119, 174]. Die funktionellen Eigenschaften von Polysacchariden sind eng mit dem Molekulargewicht, der Struktur und der räumlichen Anordnung verbunden und beruhen insbesondere auf der hohen Anzahl an freien Hydroxygruppen und Sauerstoffatomen, welche über Wasserstoffbrückenbindungen einen Teil des Wassers binden [86, 164, 174, 182, 250]. Durch diese Wasserbindung wird die Fließfähigkeit der Lösung

reduziert [79, 86, 250]. Viele Polysaccharide sind darüber hinaus in der Lage, unter entsprechenden Bedingungen (Konzentration, Lösungsmittel, Temperatur) Gele auszubilden [86]. Die Polysaccharide bilden dabei durch kovalente oder nicht-kovalente Bindungen ein dreidimensionales Netzwerk, in dessen Zwischenräumen Wasser gebunden wird [86, 182, 202, 250]. Diese Eigenschaften werden in Lebensmitteln genutzt, um die Textur zu verbessern oder zu erzeugen, sowie um disperse Systeme zu stabilisieren [164, 202].

### 2.1.1 Rheologische Eigenschaften

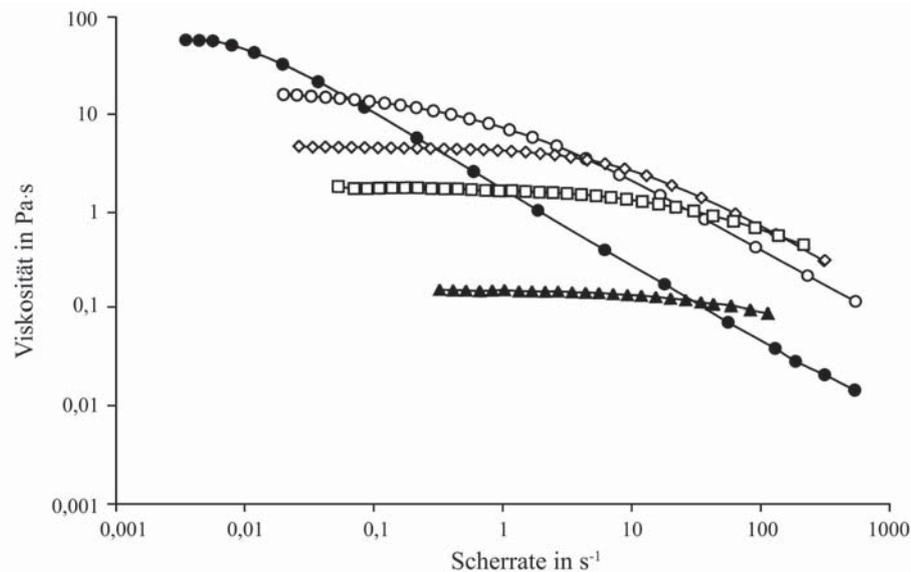
Die Viskosität  $\eta$  beschreibt den Widerstand, den eine Flüssigkeit dem freien Fließen entgegensetzt [202, 250]. Sie ist definiert als der Quotient der Schubspannung  $\tau$  und der Scherrate  $\dot{\gamma}$ , siehe Gleichung (2.1) [202, 250].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

Flüssigkeiten, bei denen dieser Zusammenhang unabhängig von der Scherrate und der Scherzeit gilt, werden als idealviskos oder NEWTON'sch bezeichnet [202]. Hierzu zählen reine Flüssigkeiten, Lösungen niedermolekularer Substanzen wie Zucker oder Salze und verdünnte Lösungen von Polysacchariden [202]. Verändert sich die Viskosität mit der Scherrate oder der Scherzeit, liegt nicht-NEWTON'sches Fließverhalten vor [202]. Für diese Substanzen ist die Viskosität keine Konstante [202]. Für die meisten mäßig konzentrierten und konzentrierten Polysaccharidlösungen, wie beispielsweise Xanthan-, Guaran- oder Pektinlösungen, sinkt die Viskosität mit steigender Scherrate [38, 86, 164, 227]. Dieses Fließverhalten wird als strukturviskoses Fließverhalten bezeichnet [170, 202]. In Bild 2.1 sind die Viskositätskurven für verschiedene Polysaccharide mit strukturviskosem Fließverhalten dargestellt. Im Gegensatz hierzu wird bei hochkonzentrierten Stärkelösungen mit steigender Scherrate die Viskosität der Lösung erhöht [202].

Die Zugabe von geringen Mengen Polysaccharid verändert die rheologischen Eigenschaften der Lösungen grundlegend, die Viskosität des Lösungsmittels wird teilweise deutlich erhöht [79, 86, 250]. Hierdurch können die Textur und das Mundgefühl der Lebensmittel verändert werden und gewünschte Sinneseindrücke erzeugt werden [28, 79, 86]. Bei Säften führt die Zugabe von geringen Mengen Polysaccharid zu einem volleren Mundgefühl [38, 43]. Saucen und Salatdressings erhalten eine gewünschte Konsistenz [227]. Bei fettreduzierten Lebensmitteln kann der Eindruck der „Cremigkeit“ verbessert werden [28, 219].

Der Einfluss von Polysacchariden auf die Viskosität von Lösungen ist insbesondere abhängig von der Konzentration und dem effektiven Volumen, das ein Molekül einnimmt [26, 33, 86,



**Bild 2.1:** Viskositätskurven verschiedener Hydrokolloide in Lösung: 0,3 % Xanthan (●), 1 % Guarkernmehl (○), 1 % Johannisbrotkernmehl (◇), 1 % Alginate (□), 1 % Cellulose (▲) [227]

202]. Das effektive Volumen ist das Volumen, das ein Molekül für eine ungehinderte dreidimensionale Rotationsbewegung benötigt, und entspricht dem Volumen einer Kugel, deren Durchmesser der größten eindimensionalen Ausdehnung des Moleküls entspricht [28, 86, 164]. Polymere mit einem höheren Molekulargewicht haben in der Regel ein größeres Volumen. Flexible Polymerketten nehmen in Lösung die Form eines statistischen Knäuels ein, wodurch das effektive Volumen geringer ist als das eines steifen linearen Polymers gleichen Molekulargewichts. Ähnlich benötigen stark verzweigte Polymere ein geringeres Volumen als lineare. Außerdem kann die Art des Lösungsmittels oder die Ladungsdichte der Moleküle das effektive Volumen beeinflussen [26, 28, 33, 86, 89, 164, 167, 185, 199, 230, 250].

Zur Charakterisierung der Eigenschaften werden Polysaccharidlösungen im Allgemeinen in drei Konzentrationsbereiche eingeteilt. Dabei erfolgt die Unterscheidung in verdünnte Lösungen, bei denen die einzelnen Moleküle nicht miteinander sondern ausschließlich mit dem umgebenden Lösungsmittel interagieren, mäßig konzentrierte Lösungen, bei denen die Moleküle den gesamten Raum des Lösungsmittels einnehmen und beginnen sich zu überlagern und zu durchdringen, und konzentrierte Lösungen, bei denen die Polysaccharide sich gegenseitig so stark behindern, dass sie nicht mehr vollständig entfaltet vorliegen [56, 202, 250]. Verdünnte Lösungen bieten den Vorteil, dass die Polymere unabhängig voneinander vorliegen und so Parameter wie Molekulargewicht oder räumliche Anordnung ermittelt werden können [79, 164, 202, 250].

Verdünnte Lösungen von Polymeren zeigen idealviskoses Fließverhalten [79, 86, 250]. Dabei ist die Viskosität der Lösung  $\eta$  stets höher als die des Lösungsmittels  $\eta_s$  [250]. Die Viskositätserhöhung wird über die relative Viskosität  $\eta_{\text{rel}}$  (Gleichung (2.2)) und die relative Viskositätserhöhung  $\eta_{\text{sp}}$  (Gleichung (2.3)) beschrieben [79, 202, 250].

$$\eta_{\text{rel}} = \frac{\eta}{\eta_s} \quad (2.2)$$

$$\eta_{\text{sp}} = \frac{\eta - \eta_s}{\eta_s} = \eta_{\text{rel}} - 1 \quad (2.3)$$

In ideal verdünnten Lösungen, bei denen Wechselwirkungen zwischen den Molekülen ausgeschlossen werden können, ist die relative Viskositätserhöhung  $\eta_{\text{sp}}$  nur vom Volumenanteil der gelösten Substanzen abhängig und damit proportional zur Konzentration  $c$  (Gleichung (2.4)) [83, 84].

$$\frac{\eta_{\text{sp}}}{c} = \text{konstant} \quad (2.4)$$

In verdünnten Lösungen können Wechselwirkungen zwischen den Molekülen jedoch nicht ausgeschlossen werden, sodass der Zusammenhang in Gleichung (2.4) nicht konstant sondern eine Funktion der Konzentration ist [250]. Zur Betrachtung der ideal verdünnten Lösungen wird daher der Grenzwert bei unendlich verdünnten Lösungen ( $c \rightarrow 0$ ) gebildet, siehe Gleichung (2.5) [86, 202].

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \left( \frac{\eta_{\text{sp}}}{c} \right) \quad (2.5)$$

Der ermittelte Grenzwert wird als STAUDINGER-Index bezeichnet und ist ein Maß für das effektive Volumen eines einzelnen Moleküls in ideal verdünnter Lösung [79, 202, 250]. In der Praxis kann der STAUDINGER-Index  $[\eta]$  über die Gleichungen nach HUGGINS (Gleichung (2.6)) und KRAEMER (Gleichung (2.7)) extrapoliert werden [250].

$$\frac{\eta_{\text{sp}}}{c} = [\eta] + k_H [\eta]^2 \cdot c \quad (2.6)$$

$$\frac{\ln \eta_{\text{rel}}}{c} = [\eta] + k_K [\eta]^2 \cdot c \quad (2.7)$$

Hierbei sind  $k_H$  und  $k_K$  Koeffizienten der Gleichungen, die entsprechend als HUGGINS- bzw. als KRAEMER-Koeffizient bezeichnet werden. Der HUGGINS-Koeffizient  $k_H$  ist ein Index für die Form der Polysaccharide in Lösung und Polymer-Polymer-Wechselwirkungen [109, 185,

202]. Für flexible Polymere, die in guten Lösungsmitteln als statistisches Knäuel vorliegen, liegt der HUGGINS-Koeffizient zwischen 0,2 und 0,4 [185, 202]. Für längliche Moleküle oder flexible Ketten in schlechtem Lösungsmittel wurden Werte im Bereich von 0,4 bis 0,7 bestimmt und für Kugeln im Bereich von 0,7 bis 0,8 [185]. Darüber liegende Werte deuten auf Aggregate oder Wechselwirkungen zwischen den Molekülen hin [79, 185, 202]. Zwischen dem HUGGINS- und dem KRAEMER-Koeffizienten besteht folgender mathematischer Zusammenhang [79, 185, 202]:

$$k_H = k_K + 0,5 \quad (2.8)$$

Außerdem kann der STAUDINGER-Index über die empirische MARK-HOUWINK-KUHN-SAKURADA-Gleichung (Gleichung (2.9)) mit dem mittleren Molekulargewicht  $M$  korreliert werden [79, 202, 250]. Die Größen  $K$  und  $\alpha$  sind für ein Molekül-Polymersystem bei gegebener Temperatur Konstanten, die die räumliche Anordnung der Moleküle widerspiegeln [79, 86, 202, 250].

$$[\eta] = K \cdot M^\alpha \quad (2.9)$$

Bei Polyelektrolyten ist die räumliche Ausdehnung der Polymere von der Ionenstärke des Lösungsmittels abhängig. In Lösungsmitteln mit geringer Ionenstärke führt die Ladung des Polymers intramolekular zu elektrostatischer Abstoßung und somit zu einer Versteifung und Ausdehnung der Molekülkette [79, 131, 250]. Die Gegenwart von Ionen verringert die elektrostatische Abstoßung, wodurch das Molekül flexibler wird und das effektive Volumen des Moleküls sinkt [79, 131, 250]. Der Zusammenhang zwischen dem STAUDINGER-Index  $[\eta]$  und der Ionenstärke  $I$  wurde wie folgt beschrieben [79, 221, 250]:

$$[\eta] = [\eta]_\infty + S I^{-0,5} \quad (2.10)$$

Hier ist  $[\eta]_\infty$  der STAUDINGER-Index bei unendlicher Ionenstärke und  $S$  ein Vergleichsparameter, der die Flexibilität des Polymers beschreibt [250]. Ein Vergleich der Flexibilität der Moleküle über den Parameter  $S$  ist jedoch nur für Moleküle gleichen Molekulargewichts zulässig [109]. SMIDSRØD und HAUG stellten daher den Parameter  $B$  vor, der die Flexibilität von Polymeren unabhängig von deren Molekulargewicht beschreibt, siehe Gleichung (2.11) [221].

$$S = B \cdot ([\eta]_{I=0,1})^\nu \quad (2.11)$$

Dabei ist  $[\eta]_{I=0,1}$  der STAUDINGER-Index bei einer Ionenstärke von  $0,1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  und  $\nu$  ein empirischer Parameter, für den für verschiedene Polymere ein Wert von  $\nu = 1,3 \pm 0,1$  er-

mittelt wurde [221]. Für den Parameter  $B$  wurden Werte zwischen 0,02 (Pektin) und 0,11 ( $\kappa$ -Carrageenan) ermittelt, wobei ein niedriger Wert für  $B$  mit einer geringeren Flexibilität der Moleküle korreliert [79, 111, 112, 201, 221].

### 2.1.2 Stabilisierung disperser Systeme

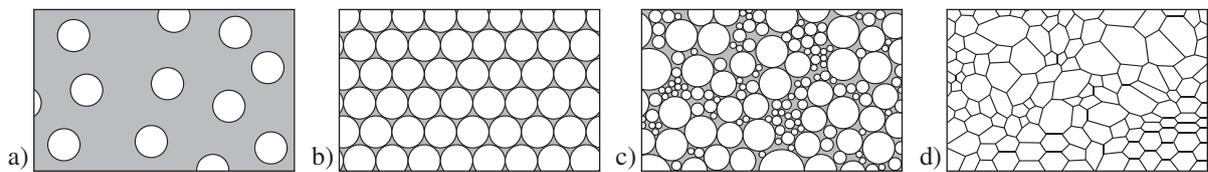
Unter dem Oberbegriff „Dispersion“ werden alle Systeme zusammengefasst, die sich aus zwei oder mehr nicht miteinander mischbaren Phasen zusammensetzen, von denen mindestens eine Phase dispers verteilt und von einer kontinuierlichen Phase umgeben ist [234]. Nahezu alle Lebensmittel stellen komplexe disperse Mehrphasensysteme dar, die aus mehreren dispersen Phasen und gegebenenfalls mehreren kontinuierlichen Phasen bestehen [8, 74, 191, 206, 234]. Bei einer Vielzahl von Lebensmitteln ist die kontinuierliche Phase flüssig [79]. Diese Systeme sind über die Lagerdauer instabil, sodass eine Stabilisierung durch geeignete Methoden notwendig ist [164, 171, 191, 207]. In Lebensmitteln werden hierfür häufig Polysaccharide eingesetzt [71, 131, 164, 171]. Suspensionen, die aufgrund der Sedimentation der Feststoffpartikel instabil sind, können durch die Erhöhung der Viskosität der kontinuierlichen Phase und somit durch die Zugabe von Polysacchariden stabilisiert werden [219, 234]. Bei Emulsionen und Schäumen sind die Mechanismen, die zur Destabilisierung des dispersen Systems führen, vielfältiger und daher auch die Mechanismen der Stabilisierung [8, 164, 171, 207].

Emulsionen sind Dispersionen aus zwei nicht mischbaren flüssigen Phasen [71, 164, 234]. Bei Lebensmitteln handelt es sich in der Regel um Emulsionen aus Wasser und Öl, die je nach kontinuierlicher und disperser Phase als Wasser-in-Öl- bzw. Öl-in-Wasser-Emulsionen bezeichnet werden [164]. Schäume sind Dispersionen mit einer flüssigen kontinuierlichen und einer gasförmigen dispersen Phase [171, 234].

Ziel bei der Herstellung von Emulsionen und Schäumen ist es, eine stabile Feinverteilung der dispersen Phase in der kontinuierlichen Phase zu erreichen [164, 171, 207]. Aufgrund der Grenzflächenspannung ist der thermodynamisch günstigste Zustand eines Zwei-Phasen-Gemisches bei einer möglichst geringen Grenzfläche zwischen beiden Phasen erreicht, wenn die Phasen getrennt vorliegen. Eine Verteilung der dispersen Phase in der kontinuierlichen Phase ist stets mit einer Vergrößerung der Grenzfläche verbunden, bei der die Grenzflächenspannung überwunden werden muss [71, 74, 164, 171, 192, 206, 234]. Dies erfolgt in der Regel durch die Einbringung von mechanischer Energie, die ausreichen muss, um eine Zerkleinerung und eine Verteilung der dispersen Phase in der kontinuierlichen zu erreichen [73, 120, 164, 171, 234]. Darüber hinaus werden bei der Herstellung disperser Systeme Stabilisatoren, wie beispielsweise Emulgatoren, Makromoleküle, Proteine oder Partikel, eingesetzt, die aufgrund ihrer oberflächenaktiven Eigenschaften und der Adsorption an der Grenzfläche die Grenzflächenspannung

senken und die Grenzfläche stabilisieren [71, 155, 164, 165, 171, 192, 206, 207]. Neben den grenzflächenaktiven Eigenschaften ist eine hohe Diffusionsgeschwindigkeit dieser Substanzen notwendig, um die Grenzfläche unmittelbar nach der Neubildung zu stabilisieren [155, 165, 191, 207]. Eine hohe Diffusionsgeschwindigkeit wird in der Regel für Moleküle mit starken hydrophoben Eigenschaften beobachtet [191].

Für die Stabilität, die Textur und die rheologischen Eigenschaften von Emulsionen und Schäumen ist der Innenphasenanteil (vgl. Bild 2.2), also der Anteil der dispersen Phase am Gesamtsystem, ein bedeutender Faktor [132].



**Bild 2.2:** Verteilung zwischen disperser und kontinuierlicher Phase bei unterschiedlichem Innenphasenanteil: a) geringer Innenphasenanteil, b) dichteste monodisperse Kugelpackung, c) dichte heterodisperse Kugelpackung, d) polyedrisches System [132]

Bei monodispersen, kugelförmigen Tropfen oder Blasen liegt die theoretische Obergrenze des Innenphasenanteils bei 0,74, der dichtesten Kugelpackung. Die Tropfen der Innenphase berühren einander (vgl. Bild 2.2 b). Ein höherer Innenphasenanteil von bis zu etwa 0,8 ist nur bei heterodisperser Verteilung möglich (vgl. Bild 2.2 c). Darüber hinaus bewirkt eine höhere Konzentration der inneren Phase die Deformation der Tropfen/Blasen, sodass sich ein polyedrisches System ausbildet (vgl. Bild 2.2 d) und die Tropfen/Blasen nur durch eine dünne Lamelle voneinander getrennt werden [132]. Emulsionen haben in der Regel einen Innenphasenanteil von bis zu 0,8, bei Schäumen kann dieser deutlich höher liegen [132, 171]. Schäume liegen entweder als Kugelschaum (vgl. Bild 2.2 b und c) oder als polyedrischer Schaum (vgl. Bild 2.2 d) vor.

Die Mechanismen, die bei Schäumen und Emulsionen vorrangig zum Zerfall des dispersen Systems führen, sind Dichteunterschiede, Aggregation, Koaleszenz und OSTWALD-Reifung bzw. Disproportionierung [132, 164, 171, 192].

### *Dichteunterschiede und Drainage*

Dichteunterschiede zwischen der kontinuierlichen und der dispersen Phase führen zur Destabilisierung disperser Systeme. Triebkraft ist hier die Verringerung der potentiellen Energie [132, 171]. Bei Emulsionen wird dies als Aufrahmung oder Sedimentation bezeichnet, je nachdem ob die disperse Phase leichter oder schwerer als die kontinuierliche Phase ist [132, 164]. Dies führt