

Abschlussbericht

Ergebnisse und Stand des Vorhabens

anona GmbH, Mühlgasse 3, 04680 Colditz

Zuwendungsempfänger:
anona GmbH
Mühlgasse 3
04680 Colditz

DBU-Aktenzeichen Az.
37926/01-36

Thema:

„Ermittlung von Knetkennzahlen zur Erstellung eines Maßstabsübertragungsmodells in der teigverarbeitenden Industrie“

Laufzeit des Vorhabens:

01.02.2022 bis 01.08.2023

Berichtszeitraum:

01.02.2022 bis 01.08.2023

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

1.1 Arbeitspakete und Meilensteine lt. Arbeitsplan

Arbeitspakete (AP)	Bearbeitungsstand
AP 1. Sondierung potentieller Kennzahlen und Einflussfaktoren zur Maßstabsübertragung	<ul style="list-style-type: none">• <i>Festlegung und Etablierung der Analysemethoden wurde abgeschlossen.</i>• <i>Sondierung der Einflussfaktoren auf die Rheologie des Riegelteiges wurde abgeschlossen</i>
AP 2. Ermittlung der apparativen und verfahrenstechnischen Bedingungen für die Maßstabsübertragung	<ul style="list-style-type: none">• <i>Kriterien der Maßstabsübertragung nach der Modell- und Ähnlichkeitstheorie ist abgeschlossen</i>• <i>Festlegung von Übertragungsregeln durch die Anwendung einer Dimensionsanalyse ist abgeschlossen</i>
AP 3. Ermittlung von spez. Leistungseinträgen im Labor- Pilot- und Produktionsmaßstab	<ul style="list-style-type: none">• <i>Die Ermittlung der spezifischen Leistungseinträge, Wirksamkeit und Übertragungsfaktoren im Labor- und Produktionsmaßstab ist abgeschlossen</i>
AP 4. Erstellung eines Modells zur Maßstabsübertragung	<ul style="list-style-type: none">• <i>Erstellung einer Datenbank mit den hinterlegten Leistungseinträgen aus dem Labor- und Produktionsmaßstab ist erfolgt</i>• <i>Die Erstellung eines Modells zur Maßstabsübertragung unter Verwendung von Ermittelten Übertragungsfaktoren ist abgeschlossen</i>
AP 5. Integration der Scale-up-Regel in laufenden Produktionsprozess	<ul style="list-style-type: none">• <i>Prüfung der Übertragbarkeit in den Produktionsmaßstab ist abgeschlossen</i>• <i>Die Integrierung des entwickelten Maßstabsübertragungsmodells in den Produktionsalltag ist erfolgt.</i>
AP 6. Nachhaltigkeitsbewertung (LCSA)	<ul style="list-style-type: none">• <i>Erstellung einer Nachhaltigkeitsbewertung mit Fokus auf die ökologische und ökonomische Effizienz ist erfolgt</i>
Meilenstein (M)	Erreichungsstand

<p>M 1 Ausschlaggebende Kennzahlen und Einflussfaktoren auf die Teig rheologie sind bekannt</p>	<p><i>Ausschlaggebende Kennzahlen und Einflussfaktoren auf die Teig rheologie wurden aus den ermittelten Resultaten selektiert und der Meilenstein vollständig erfüllt.</i></p>
<p>M 2 Leistungskennzahlen wurden in Labor-, Pilot- und Produktionsmaßstab ermittelt und stehen zur Modellerstellung zur Verfügung</p>	<p><i>Geeignete Leistungskennzahlen wurden ermittelt und stehen zur Modellerstellung bereit. Meilenstein vollständig erfüllt</i></p>
<p>M 3 Ein geeignetes Modell zur effizienten Maßstabsübertragung wurde entwickelt</p>	<p><i>Ein zielgerichtetes Maßstabsübertragungsmodell wurde entwickelt und im Labor- sowie im Produktionsmaßstab getestet Meilenstein vollständig erfüllt</i></p>
<p>M4 Die Integrierung des Maßstabsübertragungsmodells in den Produktionsmaßstab ist erfolgreich abgeschlossen worden</p>	<p><i>die Etablierung des entwickelten Scale-up Verfahrens im Labor- und Produktionsbereich ist erfolgt Meilenstein vollständig erfüllt</i></p>
<p>M5 Eine Nachhaltigkeitsbewertung für den optimierten Produktionsprozess ist erfolgt</p>	<p><i>Erstellung einer Nachhaltigkeitsbewertung mit Fokus auf die ökonomisch- und ökologische Effizienz wurde vorgenommen Meilenstein vollständig erfüllt</i></p>

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung.....	7
2. Anlass und Zielsetzung des Projektes	7
2.1 Aufgabenstellung/Anlass	7
2.2. Ziel und Gegenstand des Projektvorhabens (Berichtszeitraum von 01.02.2022 bis 31.10.2022) 8	
3. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden	9
3.1. Texturanalyse	9
3.1.1 Bestimmung der Teigcharakteristika von Riegelteigzuschnitten	9
3.2. Ermittlung der Teigdichte	9
3.3.Ermittlung der Wasseraktivität (aW)	10
3.4. Ermittlung der Restfeuchte	10
3.5. Ermittlung der Viskosität vom Rohteig.....	10
4 Ergebnisse.....	11
4.1. Sondierung potentieller Kennzahlen und Einflussfaktoren zur Maßstabsübertragung (AP1)	11
4.2 Ermittlung der apparativen und verfahrenstechnischen Bedingungen für die Maßstabsübertragung (AP2)	12
4.2.1 Durchführung der Dimensionsanalyse	13
4.3 Ermittlung von spezifischen Leistungseinträgen im Labor-, Pilot -und Produktionsmaßstab (AP3)	15
4.4 Erstellung eines Modells zur Maßstabsübertragung (AP 4)	21
5. Diskussion	42
6. Öffentlichkeitsarbeit	43
7. Fazit	44
8. Anhang	45

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Darstellung des Messsystems für die Bestimmung der Riegelteigfestigkeit.	9
Abbildung 2. Darstellung des Verlaufes der Wirkleistung und Wirkarbeit bei konstanter Rührwerkzeug- und Behälterdrehzahl über die Knetzeit.	17
Abbildung 3. Darstellung des Viskositätsverlaufes während des Knetvorganges im Labor-Spiralknetzer bei Riegelteigen mit einem Wasser-Glycerol-Binder.	17
Abbildung 4. Darstellung der spezifischen Wirkarbeit gegen die Viskosität über die Knetzeit bei Riegelteigen mit einem Wasser-Glycerol-Binder.	18
Abbildung 5. Darstellung des elastischen und viskosen Anteils über die Versuchszeit bei Riegelteigen mit einem Wasser-Glycerol-Binder.	18
Abbildung 6. Darstellung des Newton-Faktors ermittelt aus den Labor- und Produktionsdaten bei Riegelteigen mit einem Wasser-Glycerol-Binder.	20
Abbildung 7. Gegenüberstellung des Leistungseintrages, ermittelt aus den Prozessdaten der Produktion und des berechneten Leistungseintrages auf Basis der Laborversuche.	21
Abbildung 8. Gegenüberstellung des Leistungseintrages, ermittelt aus den Prozessdaten der Produktion und des berechneten Leistungseintrages auf Grundlage der Geradengleichung ermittelt aus den theoretischen Leistungseintragsdaten.	22
Abbildung 9. Gegenüberstellung der Wirkarbeit, ermittelt aus den Prozessdaten der Produktion und der berechneten Wirkarbeit auf Grundlage der Geradengleichung ermittelt aus den theoretischen Leistungseintragsdaten.	23
Abbildung 10. Darstellung der oszillierenden Viskosität nach dem Knetvorgang und nach weiteren 4 h Standzeit.	24
Abbildung 11. Gegenüberstellung des Kurvenverlaufes einer veganen Riegelteigmasse mit einer High Protein Bar Riegelteigmasse.	26
Abbildung 12. Gegenüberstellung des Verhältnisses zwischen elastischen und viskosen Anteil einer veganen Riegelteigmasse mit einer High Protein Bar Masse.	27
Abbildung 13. Gegenüberstellung der Standzeitkurven von veganen Massen mit FOS und mit IMO-Sirup im Binder.	28
Abbildung 14. Darstellung der oszillierenden Viskosität gegen die eingetragene Energie während des Knetvorganges.	30
Abbildung 15. Darstellung des elastischen und viskosen Anteils in der Riegelteigmasse gegen die eingetragene Energie während des Knetvorganges.	30
Abbildung 16. Darstellung der osz. Viskositäten der einzelnen Messpunkte vor der Scale-up Maßnahme (Links) und nach der Scale-up-Maßnahme (Rechts). Bereich zwischen den gestrichelten roten Linien bilden den festgelegten Viskositätsgrenzbereich wieder, welcher zur Sicherstellung der Verarbeitbarkeit auf den Produktionslinien nicht überschritten werden sollte.	34
Abbildung 17. grafische Widergabe der ermittelten SIGMA-Levels ohne Scale-up (Links) und mit Scale-up (Rechts). Der Bereich zwischen den gestrichelten roten Linien bildet den festgelegten Viskositätsgrenzbereich , welcher zur Sicherstellung der Verarbeitbarkeit auf den Produktionslinien nicht überschritten werden sollte.	34

Abbildung 18. Darstellung der Zusammensetzung der bezogenen Energie.	36
Abbildung 19. Gegenüberstellung des Umweltparameters Global Warming Potential zwischen dem Laborkneter, dem Produktionskneter ohne Scale-up und mit Scale-up Maßnahme.	37
Abbildung 20. Gegenüberstellung des Umweltparameters Acidification Potential zwischen dem Laborkneter, dem Produktionskneter ohne Scale-up und mit Scale-up Maßnahme.	38
Abbildung 21. Gegenüberstellung des Umweltparameters Eutrophication Potential zwischen dem Laborkneter, dem Produktionskneter ohne Scale-up und mit Scale-up Maßnahme.	39
Abbildung 22. Gegenüberstellung des Umweltparameters Human Toxicity Potential zwischen dem Laborkneter, dem Produktionskneter ohne Scale-up und mit Scale-up Maßnahme.	39
Abbildung 23. Darstellung der getätigten Wirkarbeit (Doppelbestimmung) einer Riegelteigmasse im Labormaßstab.	45
Abbildung 24. Darstellung des Kurvenverlaufes der Riegelteigviskosität über die Standzeit von 300 min.	45
Abbildung 25. Darstellung des Kurvenverlaufes vom elastischen und viskosen Anteil über die Standzeit einer veganen Riegelteigmasse.	46
Abbildung 26. Darstellung des Kurvenverlaufes der Riegelteigviskosität über die Standzeit von 300 min.	46
Abbildung 27. Darstellung des Kurvenverlaufes vom elastischen und viskosen Anteil über die Standzeit eines High Protein Bars.	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Darstellung der Einflussgrößen auf die Teigtheologie	12
Tabelle 2. Darstellung der Anlagengeometrien des Spiralkneters Sp12, des Wendelkneters WV160 sowie des Wendelkneter WV400.	13
Tabelle 3. Auflistung des errechneten Newton-Faktoren der durchgeführten Laborversuche.	20
Tabelle 4. Auflistung der ermittelten Newton-Verhältnisse, der oszillierenden Viskosität sowie die Wirkarbeit berechnet aus dem Laboruntersuchungen gegenübergestellt mit der Wirkarbeit aus der Produktion.	23
Tabelle 5. Auflistung der oszillierenden Viskositätswerte aus den Standzeitversuchen der jeweiligen Versuchsansätze.	25
Tabelle 6. tabellarische Darstellung der Resultate aus dem Scale-up-Versuchen vom Labor in den Produktionsmaßstab.	32
Tabelle 7. Auflistung der Reihenversuche im Produktionsmaßstab.	33
Tabelle 8. Gegenüberstellung der benötigten Massen pro Ansatz, Gesamtrohstoffkosten, des mittleren Energiebedarf sowie die anfallenden Energiekosten pro Knetvorgang, pro Tag und pro Jahr	35
Tabelle 9. Betrachtung der ökologiebeeinflussenden Potentiale in Abhängigkeit der Transportart und dem genutzten Herstellungsmaßstab.	40

1. Kurzfassung

Die wissenschaftlich-technische Bedeutung des Forschungsvorhabens besteht darin, dass die Kennzahl Leistungseintrag als neuartiges Werkzeug für ein sicheres und effektives Scale-up von Entwicklungslabor bis in den realen Produktionsprozess im Bereich der Riegelteigverarbeitung zum Einsatz kommt. Durch die einheitliche Anwendung einer Kennzahl oder deren Kombination mit fluidbeeinflussenden Parametern wie die Klebrigkeit, Viskosität oder Fließeigenschaft soll der Produktionsablauf gesichert werden sowie Fehlproduktionen und der damit verbundene unnötige Ressourcenmehrbedarf vermieden werden. Das Ergebnis des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens soll ein Maßstabsübertragungsmodell für Teige unterschiedlicher Rezepturen sein, welches während der Projektphase getestet und unmittelbar nach Projektabschluss in den laufenden Produktionsbetrieb dauerhaft integriert werden soll. Parallel dazu sollen die generierten Daten als effektives, aber auch präventives Werkzeug der KMU zur Vermeidung eines unnötigem Ressourcenmehrbedarfs zur Verfügung gestellt werden. Ferner soll ein Umdenken in der Nahrungsmittelherstellungsbranche eingeleitet werden, mit dem Ziel der ökonomischeren und ökologischeren Gestaltung von Herstellungsprozessen vom Entwicklungsstadium bis hin zum Produktionsprozess.

2. Anlass und Zielsetzung des Projektes

2.1 Aufgabenstellung/Anlass

Bisher finden keine Maßstabsübertragungsregeln in der riegelteigverarbeitenden Branche Anwendung, welche erlauben, ein sicheres Scale-up vom Labor in den Produktionsmaßstab vorzunehmen. Standardmäßig werden Mischzeiten von verschiedenen Teigansätzen mit unterschiedlicher Zusammensetzung subjektiv gewählt, welche nicht auf wissenschaftlich hinterlegten Daten beruhen. Die bisher verwendete Herangehensweise zur Übertragung in den Produktionsmaßstab steht nicht im Einklang mit den Zielen und Leitgedanken der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie und dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes):

1. Durch Fehlproduktionen, welche aus nicht definierten Prozessübertragungsmaßnahmen resultieren, werden limitierte Ressourcen (Lebensmittelrohstoffe, Energie, Wasser, Personal, Zeit) verschwendet.
2. Durch den Rohstoff- und Lebensmittelausschuss fallen Kosten für Personal, die Ausschussbeseitigung und Rohstoffneubeschaffung an, welches sich negativ auf die nachgelagerten Schritte auswirken (Mehrbedarf an Energie-, Rohstoff-, Wasserressourcen)
3. Durch kundenspezifische Rezepturänderungen oder Änderung der Rohstoffherkunft wird die Rheologie (u.a. Fließeigenschaften, Klebrigkeit, Viskosität) des Teiges beeinflusst und aktuell erst im letzten Produktionsschritt sichtbar.

4. Neben dem Ressourcenmehraufwand können im nachgelagerten Produktionsschritten technische Probleme aufgrund von zu festen oder flüssigen Teigen auftreten.

Durch eine subjektive Einschätzung der Teig rheologie und fehlende Scale-up Regeln ist eine sichere und nachhaltige Gestaltung des Produktionsverfahrens nicht möglich. Es besteht die Notwendigkeit der Findung von Lösungen für eine einheitliche Maßstabsübertragung von der Entwicklungsphase bis zum Produktionsmaßstab in der breitgefächerten Nahrungsmittel- und Nahrungsergänzungsmittelbranche.

Das aktuelle Forschungsprojekt hat den Anspruch, Lösungen zu den grundlegenden Zielen des seit Juni 2015 aktuellen Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) sowie den Zielen und Leitgedanken der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, der Politikstrategie Bioökonomie, dem deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) bereitzustellen. Durch die erstmalige verfahrenstechnische Auslegung des Knetvorganges bei der Riegelteigherstellung wird ein Beitrag in Form der nachhaltigen Produktion von Industrie- und Konsumgütern geleistet, Fehlproduktionen und Rohstoffneuanschaffungen vermieden, beispielhaft die Integration neuer Technologien in bestehenden Produktionsanlagen (umsetzbares Nachhaltigkeitskonzept) dargestellt sowie Unzulänglichkeiten des Marktes korrigiert und der Wirtschaft die richtigen Anreize für mehr F&E-Investitionen gegeben.

2.2. Ziel und Gegenstand des Projektvorhabens (Berichtszeitraum von 01.02.2022 bis 31.10.2022)

Ziel des Projektvorhabens war die Kennzahlsondierung, die Auslegung der Behältergeometrie, Erfassung von Leistungseinträgen sowie die Scale-up-Modellerstellung

- Sondierung potenzieller Kennzahlen und Einflussfaktoren zur Maßstabsübertragung **(AP. 1)**
- Ermittlung der apparativen und verfahrenstechnischen Bedingungen für die Maßstabsübertragung **(AP. 2)**
- Ermittlung von spezifischen Leistungseinträgen im Labor- Pilot- und Produktionsmaßstab **(AP. 3)**
- Erstellung eines Modells zur Maßstabsübertragung (anteilmäßig) **(AP. 4)**

3. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

3.1. Texturanalyse

Zur Ermittlung der Teigfestigkeit, Zugfestigkeit und der Teigklebrigkeit von Riegelteigmassen in Abhängigkeit der Zeit wurde der Textureanalyzer und die Bedien- und Auswertesoftware TexturePro Version 1.0 Build11 der Firma Brookfield AMETEK® verwendet.

3.1.1 Bestimmung der Teigcharakteristika von Riegelteigzuschnitten

Zur Bestimmung der Textureigenschaften von Riegelteigmasse in Abhängigkeit der Zeit und Rohstoffzusammensetzung wurde die jeweilige Masse in die kundenspezifische Riegelgeometrie geformt und auf das Messplateau des Textureanalyzers nach vorhergehenden Gerätekalibrierung platziert. Zur Ermittlung der Riegelteigfestigkeit wurde ein Stempel (Durchmesser: 56mm, Fläche 9,08 cm²) automatisch mit einer definierten Sinkgeschwindigkeit (1 mm s⁻¹) in die Riegelteigmasse mit einer Eindringtiefe von 7 mm gedrückt. Die dabei entrichtete Kraft (in Newton) wurde durch die Software gemessen und dokumentiert. Die eingetragene Kraft bei fortlaufender Zeit wurde als Kurve grafisch dargestellt und mit anderen Messwerten verglichen. Zur Ermittlung der Riegelteigfestigkeit in Abhängigkeit der Lagerzeit wurde der beim Peak-Maxima dokumentierte Wert herangezogen und in einem Kraft-Zeit-Diagramm mit anderen Messresultaten verglichen (Abbildung 1). Neben diesem Parameter wurden mit derselben Messmethode die Parameter Haftkraft [g], Haftvermögen [mJ], Belastbarkeit, Fadenlänge [mm] und Zähigkeit [mJ] von der Software automatisch abgebildet.

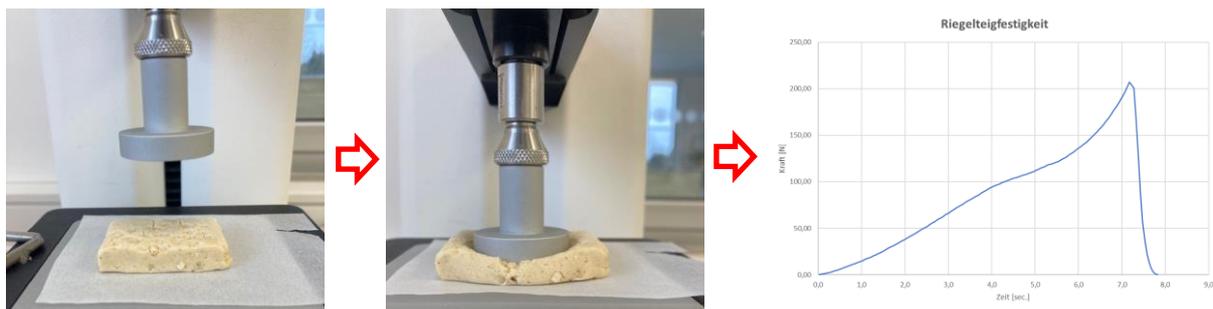


Abbildung 1. Darstellung des Messsystems für die Bestimmung der Riegelteigfestigkeit.

3.2. Ermittlung der Teigdichte

Im Labormaßstab wurde zur Ermittlung der Teigdichte ein Dichtemessring (Durchmesser 36,32 mm, Höhe 20 mm) verwendet. Der Dichtemessring wurde auf den vorher planar ausgerollten Riegelteig (h) positioniert und senkrecht nach unten gedrückt. Das manuell ausgestanzte Teigstück wurde auf eine vorher tarierte Waage gelegt und die Masse dokumentiert. Anschließend wurde unter Anwendung der Gleichung 1 und 2 zur Berechnung der Dichte die Masse durch das Volumen des Riegelteiges dividiert.

$$Volumen = Radius^2 * \pi * Höhe \text{ (ausgerollter Riegelteig)} = r^2 * \pi * h$$

(Gleichung 1)

$$Dichte = \frac{Masse}{Volumen} = \frac{m}{V}$$

(Gleichung 2)

Zur Verringerung der Messunsicherheiten wurde eine Sechsfachbestimmung zur Ermittlung der Teigdichte vorgenommen.

3.3. Ermittlung der Wasseraktivität (a_W)

Die Wasseraktivität der einzelnen Riegelteigabschnitte wurde mit dem Messsystem der Firma AquaLab 4TE (METER Group, Inc. USA) ermittelt. Eine Riegelteigprobe (10 – 20 mm lang und ca. 5 mm stark) wurde in einer Kunststoffschale überführt und diese in die Probenkammer des Messgerätes gestellt. Durch Verschließen des Gerätedeckels wurde die Messung automatisch gestartet (Temperatur 25 ± 0,2 °C). Zur statistischen Sicherheit wurde ein Dreifachbestimmung jeder Probe vorgenommen.

3.4. Ermittlung der Restfeuchte

Zur Ermittlung des nicht im Riegel gebundenen Wassers (Restfeuchte in %) wurde die Thermogravimetrie angewendet (Doppelbestimmung). Dafür wurde auf eine vorher tarierte Aluminiumschale eine Probenmasse von 4,6 bis 5,4 g eingewogen. Zur Einwaage sowie zur Restfeuchtebestimmung wurde die Trockenwaage MA 160 (Sartorius Lab Instruments GmbH, D-Göttingen) verwendet. Die Probe wurde nach dem Schließen des Gerätedeckels automatisch auf 105 °C temperiert und der Volumenverlust über die Zeit bis zum Erreichen eines konstanten Gewichtes digital dokumentiert.

3.5. Ermittlung der Viskosität vom Rohteig

Zur Ermittlung der Viskosität von Riegelteigzuschnitten wurde ein oszillierendes Rotationsviskosimeter (Mars IQ Air) der Fa. Thermofisher verwendet. Für die Viskositätsmessung wurde die Geometrie Platte zu Platte angewendet. Nach erfolgter Kalibrierung wurde die Riegelteigprobe händig in Kugelform gebracht und auf dem temperierbaren Probentisch (22,0 °C) positioniert. Die Probe wurde anschließend für 120 sec. auf 22 °C vortemperiert. Anschließend beförderte der Lift das Messelement vertikal abwärts. Dabei wurde vorab in der Methode ein Spaltmaß von 6 mm definiert, mit dem Hintergrund der Verringerung des Einflusses von grobkörnigen Rohstoffen (z.B. Nüssen oder Crispies). Anschließend erfolgte die Messung (Modus: DC; Deformationsparameter für Sweep: Start: $\gamma_0=0,001$; Ende: $\gamma_0=0,5$; Schritte/Dekade: 10) mit dem Software-Messelement „Oszillation:

Amplitude-Sweep“. Für die Charakterisierung der Teigviskosität wurden die Parameter elastischer Anteil G' , viskoser Anteil G'' und Oszillationsviskosität η (Pa s) herangezogen.

4 Ergebnisse

4.1. Sondierung potenzieller Kennzahlen und Einflussfaktoren zur Maßstabsübertragung (AP1)

Unter Verwendung von verschiedenen Online-Datenbanken und Online-Katalogen wurden mögliche Einflussfaktoren, welche auf die Teigrheologie Einfluss nehmen könnten, sondiert. Die Recherchen zeigten auf, dass eine unzureichende wissenschaftliche Charakterisierung bzw. Beschreibung von Riegelteigen vorliegt. Zum großen Teil wurden Teige auf Mehlbasis hinsichtlich ihrer Rheologie beschrieben, jedoch keine Aussagen getroffen, inwieweit die Mischanlagen- und Rührer Geometrien Einfluss auf das Verhalten des Riegelteiges haben. Als potenzielle Kennzahlen wurden der Energie- und Leistungseintrag, die Teigviskosität sowie die Teigtextur in Abhängigkeit der eingestellten Mischparameter und Teigzusammensetzungen sondiert. In Betracht gezogen wurde zudem die Detektion von Farbänderungen über die Zeit. Diese Untersuchungen können aufgrund der limitierten Projektlaufzeit nicht in das Forschungsvorhaben einbezogen werden.

Der Parameter Viskosität spiegelt das Fließverhalten des Riegelteiges in Abhängigkeit des eingebrachten Energieeintrages über die Zeit wider. Mit steigendem Leistungseintrag ändert sich die Viskosität des Riegelteiges und daraus resultierend findet eine Änderung des Fließverhaltens und der Verarbeitbarkeit statt. Folglich kann durch einen definierten Leistungseintrag die Viskosität flexibel beeinflusst werden. Neben dem Leistungseintrag sind ausschlaggebende Einflussfaktoren auf die Verarbeitbarkeit von Riegelteigmasse die Rohstoffzusammensetzung, die Temperatur sowie nachgelagerte Standzeiten in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) (Tabelle 1).

Tabelle 1. Darstellung der Einflussgrößen auf die Teig rheologie

Bezeichnung	Maßeinheit
Leistungseintrag	W
spez. Leistungseintrag	W kg ⁻¹
Oszillationsviskosität	Pa s
elastischer Anteil (G')	Pa
viskoser Anteil (G'')	Pa
Temperatur	°C
Luftfeuchtigkeit	%
Standzeiten	h

4.2 Ermittlung der apparativen und verfahrenstechnischen Bedingungen für die Maßstabsübertragung (AP2)

In diesem Arbeitspaket wurden die Grundlagen für die Maßstabsübertragung gelegt. Für die Übertragung des Verfahrens vom Labormaßstab in den Produktionsmaßstab wurden Kriterien der Modell- und Ähnlichkeitstheorie angewandt, vor allem die Gleichheit der apparativen sowie der verfahrenstechnischen Bedingungen wurden dabei berücksichtigt. Für die Festlegung der apparativen sowie der verfahrenstechnischen Bedingungen wurden zunächst von den vorhandenen Labor- und Produktionsanlagen (12 L, 160 L, 400 L) die Anlagengeometrien dokumentiert (Tabelle 2).

Tabelle 2. Darstellung der Anlagen Geometrien des Spiralkneters Sp12, des Wendelkneters WV160 sowie des Wendelkneters WV400.

Kennzahlen	Spiralknetter Sp12	Wendelknetter WV 160	Wendelknetter WV 400	Einheit
Rührertyp	Spiralknetter	Wendelknetter	Wendelknetter	-
Anzahl Rührer	1	2	2	Stück
Behälter Innendurchmesser (D)	370	840	1200	mm
Behälter Höhe (H) (Deckel mit einbezogen)	230	480	580	mm
Rührerhöhe (h)	160	250	310	mm
Rührerdurchmesser (d)	220	550	650	mm
Verhältnis (H/D)	0,62	0,57	0,48	-
Verhältniss (d/D)	0,59	0,65	0,54	-
Behältervolumen (max. Volumen)	0,022	0,26	0,65	m ³
empfohlene Teiggewicht (Herstellerangabe)	12	160	400	kg
empfohlene Mehlgewicht (Herstellerangabe)	7,5	100	250	kg
Teigmasse (z.B 250 kg)	12	70	250	kg
Teigdichte (z.B. 1000 kg m ⁻³)	1100	1057,471264	1057,471264	kg m ⁻³
Arbeitsvolumen	0,010909091	0,066195652	0,236413043	m ³
Bodengeometrie (Kennzahl)	0,0686	0,013	0,004	-
Drehzahl in Hertz Bottisch	-	10	10	Hz
Umrechnungsfaktor (Hz zu rpm) Bottisch	-	0,337	0,229	-
Drehzahl in Hertz Rührer	-	20	20	Hz
Umrechnungsfaktor (Hz zu rpm) Rührer	-	4,79	4,32	-
Drehzahl Bottisch (Stufe 1/Stufe 2)	24/36	3,37	2,29	rpm
Drehzahl Rührer (Stufe 1/Stufe 2)	96/198	95,8	86,4	rpm

4.2.1 Durchführung der Dimensionsanalyse

Im ersten Ablaufschritt der Dimensionsanalyse wurde eine Relevanzliste mit messbaren einflussnehmenden Größen einschließlich der Zielgröße erstellt:

$$P_R = f''(v, n, D, h_R, d_R, H, T, \rho)$$

$$f'(P_R, v, n, D, h_R, d_R, H, T, \rho) = 0$$

P_R = Leistungseintrag [W]

v = kinematische Viskosität [m² s⁻¹]

n = Drehzahl des Rührers [1 min⁻¹]

h_R = Höhe des Rührers [m]

d_R = Durchmesser des Rührers [m]

D = Durchmesser des Behälters [m]

H = Höhe des Behälters

T = Temperatur des Mediums [°C]

P = Dichte des Mediums [kg m⁻³]

Anschließend wurde die Bildung von Simplexen vorgenommen:

$$\frac{d_R}{D}; \frac{h_R}{D}; \frac{H}{D}$$

Daraus ergab sich folgende verbleibende Relevanzliste:

$$f(P_R, v, n, d_R, T, \rho) = 0$$

Die anschließende Analyse der Relevanzliste ergab:

$$n = 5 \text{ (Einflussgröße + Zielgröße)}$$

$$r = 4 \text{ (Grunddimensionen: } M, L, T, \Theta \text{)}$$

$$m = n - r \text{ (relevante dimensionenlose } \pi \text{ - Größen)}$$

Darauffolgend wurde die Dimensionsmatrix unter Einhaltung der Bedingung, dass so viele unabhängige Größen stehen, wie Grunddimensionen vorhanden sind, aufgestellt.

		unabhängige Größen				abhängige Größen	
		j=1	j=2	j=3	j=4	j=5	j=6
		d	T	n	ρ	v	P_R
i=1	L	1	0	0	-3	2	-2
i=2	T	0	0	-1	0	-1	-3
i=3	M	0	0	0	1	0	1
i=4	Θ	0	1	0	0	0	0
						K1	k2

Nachfolgend sind die Umformungsschritte der Dimensionsmatrix zur Einheitsmatrix und Koeffizienten Matrix dargestellt.

		unabhängige Größen				abhängige Größen	
		d	T	n	ρ	v	P_R
L		1	0	0	-3	2	2
T		0	0	-1	0	-1	-3
M		0	0	0	1	0	1
Θ		0	1	0	0	0	0

+3



		unabhängige Größen				abhängige Größen	
		d	T	n	ρ	v	P_R
L		1	0	0	0	2	5
T		0	0	-1	0	-1	-3
M		0	0	0	1	0	1
Θ		0	1	0	0	0	0

*(-1)



		d	T	n	ρ	v	P_R

L	1	0	0	0	2	5
T	0	0	1	0	1	3
M	0	0	0	1	0	1
Θ	0	1	0	0	0	0

Einheitsmatrix
Koeffizienten Matrix (p_{i,k})
Vektor y
Vektor z

Im letzten Schritt wurden die dimensionslosen Kennzahlen anhand der Koeffizienten Matrix ermittelt. Dafür wurde folgende Berechnungsvorschrift angewendet:

$$\Pi_K = z_K * \sum_{i,j=1}^r y_j^{-p_{i,k}}$$

$$k=1 \quad \Pi_1 = v_L * d^{-2} * n^{-1} * \rho^0$$

$$\Pi_1 = \frac{v_L}{d^2 * n} = \frac{1}{Re}$$

$$Re = \frac{d^2 * n}{v} \quad \text{REYNOLDS-Zahl} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$K=2 \quad \Pi_2 = P_R * d^{-5} * n^{-3} * \rho^{-1}$$

$$\Pi_2 = \frac{P_R}{d^5 * n^3 * \rho^1} = Ne \rightarrow \text{NEWTON - Zahl} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Dimensionsanalyse ergab zwei Kennzahlen (Newton und Reynold-Zahl), welche in der Literatur vielfach bereits in anderen Anwendungsbereichen untersucht und angewendet wurden. Demnach wurden die ersten Untersuchungen mit den ermittelten Kennzahlen durchgeführt. Des Weiteren floss die geleistete Wirkarbeit (Wh) als zusätzlicher Parameter in die Untersuchungen ein.

4.3 Ermittlung von spezifischen Leistungseinträgen im Labor-, Pilot -und Produktionsmaßstab (AP3)

Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurden Untersuchungen im Labormaßstab vorgenommen. Hierbei wurden Riegelteigrezepturen, welche bereits auf den Produktionsanlagen verarbeitbar waren, im Kleinmaßstab (12 L) untersucht. Dazu wurde die Rezeptur des Riegelteiges mengenmäßig auf 4,5 Kg angepasst und in einem Diosna-Spiralknetter (SP12) bei 198 rpm (Spiralrührer) und 36 rpm (Bowldrehzahl) geknetet. Für die Datenaufnahme von Energie und Leistungskennzahlen wurde der Knetvorgang und die dabei anfallende Wirkarbeit sowie Wirkleistung mittels der Software GridVis® 8.1 von der Firma Janitza electronics GmbH dokumentiert. Nach definierter Knetzeit wurden jeweils zwei Proben aus dem System entnommen und der Knetvorgang fortgesetzt. Abbruchkriterium für den Knetvorgang war das

Überschreiten eines Leistungseintrags-Plateaus (siehe Abbildung 2). Die Proben wurden in einer Kunststoffolie luftdicht verpackt und zwischenzeitlich bei 22°C und 40 % Luftfeuchte in einem Klimaschrank (Fa. memmert, ADVANCE D ECO Peltier-Technology) zwischengelagert. Von jeder Probe wurde in einer Doppelbestimmung die Wasseraktivität, die Restfeuchte, die Dichte sowie die oszillierende Viskosität ermittelt. Zusätzlich wurden die zuletzt entnommenen Proben auf ihre Standzeit (4 h) untersucht. Beispielhaft wurde in Abbildung 2 der spezifische Leistungseintrag sowie die getätigte Wirkarbeit grafisch dargestellt. Bei einer Knetzeit von 125 Sekunden wurde ein sprunghafter Anstieg des spez. Leistungseintrages und der geleisteten Wirkarbeit detektiert. Bis zu diesem Punkt lag eine inhomogene Riegelteigmasse vor, welche Pulvernester sowie eine ungleichmäßige Verteilung des eingebrachten Binders aufwies. Nach Überschreiten des Scheitelpunktes, bei 125 Sekunden, lag eine homogene Riegelteigmasse mit dementsprechenden viskosen Eigenschaften vor. Mit fortlaufender Knetdauer nahm die Viskosität aufgrund der eingebrachten mechanischen Energie im System ab (Abbildung 3). Nach dem Scheitelpunkt fand ein exponentieller Anstieg des spezifischen Leistungseintrages, sowie der Wirkarbeit gefolgt von einer Kurvenabflachung bis zu einer stationären Phase mit anschließendem Abfall des spez. Leistungseintrages statt. Unter Anwendung der ermittelten Geradengleichung wurde für jeden Messpunkt die Viskosität berechnet. Im unten dargestellten Beispiel wurde eine Riegelteigrezeptur verwendet, welche als Binder die Komponenten Wasser (23,5 %) und Glycerin (76,5 %) enthielt. Parallel zu den Laboruntersuchungen wurden zum Status Quo 164 Proben und Datenpakete (Wirkarbeit und Wirkleistung) aus dem Produktionsbereich generiert und den Labordaten gegenübergestellt. Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Versuchsansätze im Labormaßstab wurde mindestens eine Doppelbestimmung vorgenommen (Anhang).

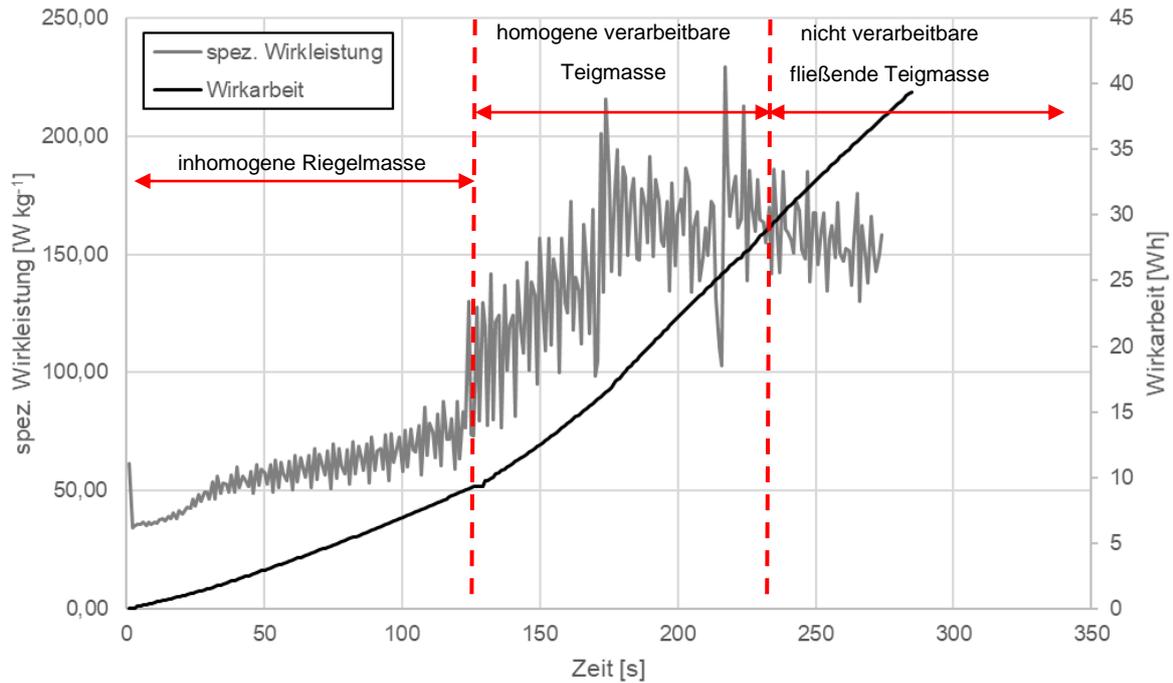


Abbildung 2. Darstellung des Verlaufes der Wirkleistung und Wirkarbeit bei konstanter Rührwerkzeug- und Behälterdrehzahl über die Knetzeit.

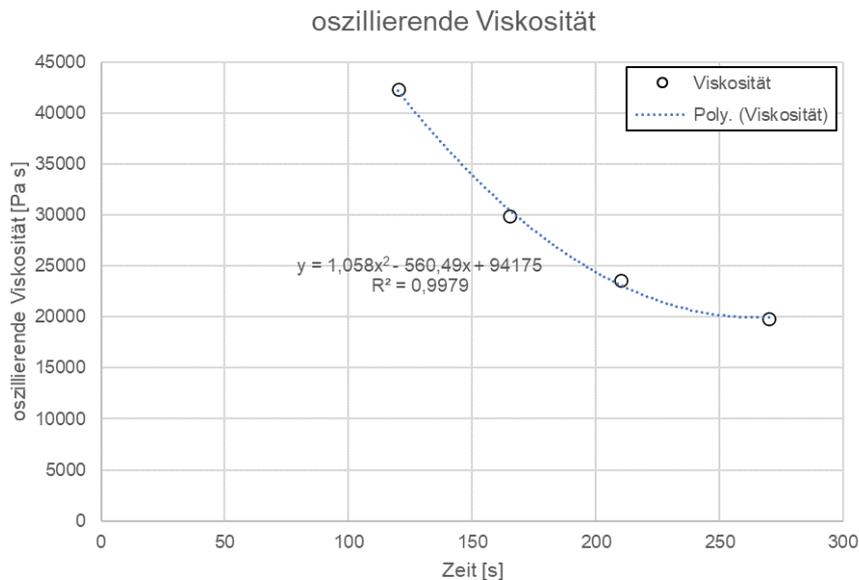


Abbildung 3. Darstellung des Viskositätsverlaufes während des Knetvorganges im Labor-Spiralknetzer bei Riegelteigen mit einem Wasser-Glycerol-Binder.

Die Gegenüberstellung der spezifischen Wirkarbeit gegen die Viskosität zeigt auf, dass mit zunehmender spezifischer. Wirkarbeit die Viskosität des Riegelteiges abnimmt (Abb. 4). Weiter kann aus der grafischen Darstellung interpretiert werden, dass nach einer riegelteigspezifischen Wirkarbeit die Viskosität im weiteren Knetvorgang nicht zusätzlich verändert wird (hier ab $7,5 \text{ Wh kg}^{-1}$ und bei 20000 Pa s).

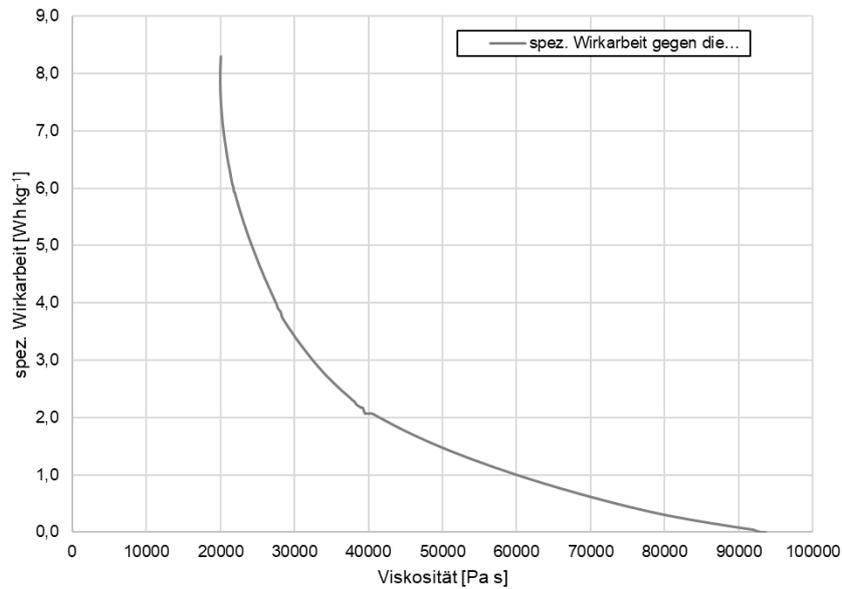


Abbildung 4. Darstellung der spezifischen Wirkarbeit gegen die Viskosität über die Knetzeit bei Riegelteigen mit einem Wasser-Glycerol-Binder.

Abbildung 5 zeigt die Änderung des elastischen und viskosen Anteils im Teigsystem während des Knetvorganges. Aus der grafischen Darstellung ist ersichtlich, dass nach 175 Sekunden Knetdauer die Fließgrenze des Riegelteiges erreicht wurde. Ab diesem charakteristischen Punkt findet fortlaufend eine Zunahme des viskosen Anteils statt, welcher mit zunehmenden Leistungseintrag zum Zerfließen des Riegelteiges führt. Dies rührt daher, dass während des Knetvorganges strukturelle Änderungen in Abhängigkeit der Knetintensität und Dauer im Teigsystem fortlaufend stattfindet, welche sich neben der Zunahme der Fließeigenschaften auch durch die Erhöhung der Klebrigkeit äußert.

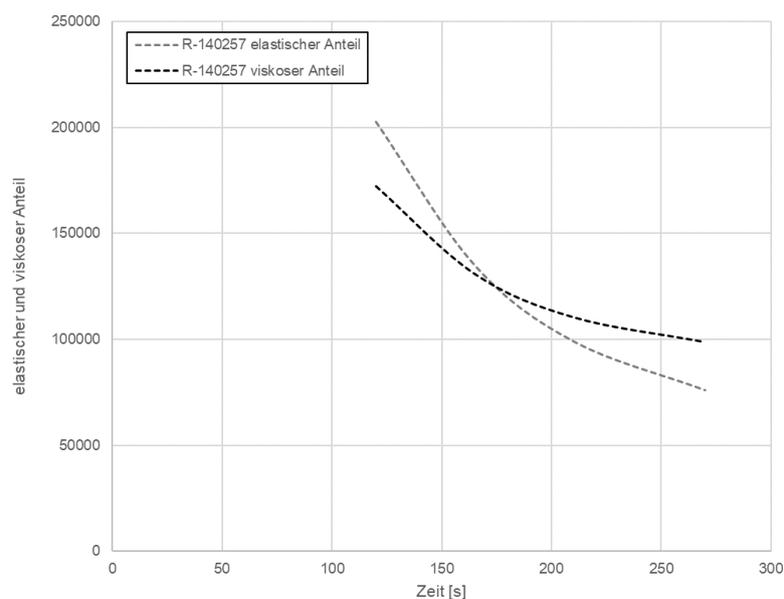


Abbildung 5. Darstellung des elastischen und viskosen Anteils über die Versuchszeit bei Riegelteigen mit einem Wasser-Glycerol-Binder.

Sowohl für die im Labor getätigten als auch die im Produktionsmaßstab bereits erfolgten Riegelteigherstellungen wurden die jeweiligen Leistungseinträge dokumentiert und unter Anwendung der ermittelten Übertragungsregel (Gleichung 2) die Newtonzahl berechnet. Für die Berechnung wurden alle hinterlegten Datenpunkte herangezogen.

$$Ne = \frac{P_R}{d^5 * n^3 * \rho^1}$$

$$Ne = \frac{845,83 \text{ W}}{0,22 \text{ m}^5 * \left(\frac{198 \text{ s}^{-1}}{60}\right)^3 * 1101,3 \text{ Kg m}^{-3}}$$

$$Ne = 26,76$$

Anschließend wurde das mathematische Verhältnis zwischen den im Labormaßstab errechneten Newton-Zahlen und den Newton-Zahlen aus dem Produktionsprozess gebildet. Dafür wurden die Daten, welche ab dem Zeitpunkt des Vorliegens eines Riegelteiges (hier 80 Sekunden) generiert wurden, herangezogen. Abbildung 6 verdeutlicht die Gegenüberstellung grafisch.

$$\text{Newton – Faktor} = \frac{Ne_{Labor}}{Ne_{Produktion}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Zu Beginn des Knetvorganges wurde, aufgrund des inhomogenen Systems, stets ein Anstieg der Newton-Zahl im Labor- sowie im Produktionsmaßstab detektiert. Daraufhin fand ein Abfall der Newton-Zahl statt, welcher mit der Teigbildung einherging. Nach einer Knetzeit von 80 Sekunden stagnierte der Newton-Faktor und blieb bis zum Versuchsende mit marginalen Abweichungen konstant.

Dieser Kurvenverlauf spiegelte sich in allen weiteren durchgeführten Versuchsansätzen wider. Deutlich wird, dass der Newton-Faktor abhängig von der Teig rheologie ist und nach einer vollständigen Teigbildung einen Kurvenverlauf mit einer gewissen Schwankungsbreite annimmt.

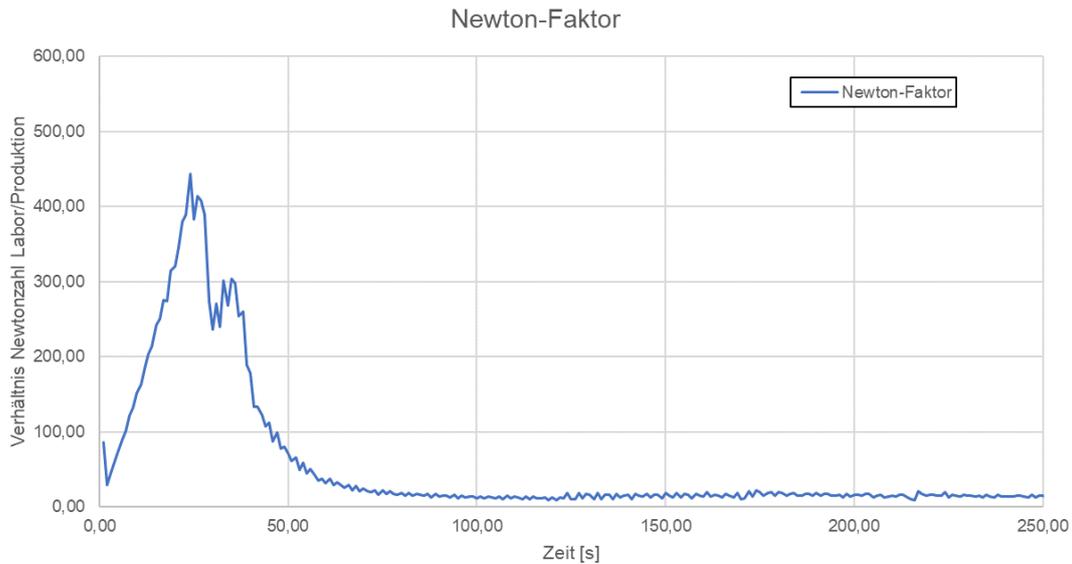


Abbildung 6. Darstellung des Newton-Faktors ermittelt aus den Labor- und Produktionsdaten bei Riegelteigen mit einem Wasser-Glycerol-Binder.

Tabelle 3 zeigt die ermittelten Newton-Faktoren aus den generierten Daten der Laborversuche und aus den Produktionsdaten. Der aktuell ermittelte Übertragungsfaktor beträgt $10,29 \pm 0,99$. Dieser wird durch weitere Laboruntersuchungen im weiteren Projektverlauf kontinuierlich angepasst, sodass der Newton-Faktor als Übertragungsfaktor eine breite Palette an Riegelrezepturen abdeckt. Die bisher generierten Daten stellen das Teigsystem unter Verwendung eines Glycerin-Wasser-Binders dar (Tabelle 3). Perspektivisch müssen weitere Übertragungsfaktoren für Binder (z.B. Glycerin, Wasser, FOS) mit anderer Zusammensetzung ermittelt und mit der jeweiligen Produktionsdauer abgeglichen werden.

Tabelle 3. Auflistung des errechneten Newton-Faktoren der durchgeführten Laborversuche.

Versuch	$Ne_{\text{Labor}}/Ne_{\text{Produktion}}$
Riegelteig 1	9,7
Riegelteig 2	12,34
Riegelteig 3	11,17
Riegelteig 4	10,03
Riegelteig 5	9,22
Riegelteig 6	9,85
Riegelteig 7	10,71
Riegelteig 8	9,27
Mittelwert	10,29

4.4 Erstellung eines Modells zur Maßstabsübertragung (AP 4)

Für die Erstellung eines Modells zur einheitlichen Maßstabsübertragung wurde der in AP 3 ermittelte Newton-Faktor herangezogen und die Anlagenparameter produktionsseitig eingebunden.

Im ersten Ansatz fungiert der Newton-Faktor mit 10,29 als Übertragungsparameter. Dazu wurde die Gleichung 3 mathematisch umgestellt, sodass daraus sich eine theoretische Newton-Zahl als dimensionslose Kennzahl zur Ermittlung des Leistungseintrages für den Produktionsmaßstab ableiten ließ. Die Newton-Zahl wurde für jeden Datenpunkt, welche im Labormaßstab dokumentiert wurde, ermittelt. Die Gleichung 2 wurde anschließend umgeformt, sodass sich aus der $Ne_{Produktion}$ -Zahl multipliziert mit der Riegelteigdichte, der Rührer Geometrie (WV400) sowie der Drehzahl des Knetystems (WV400) der Leistungseintrag rechnerisch ergab.

$$P_{Produktion} = Ne_{Produktion} * \rho * n^3 * d^5$$

Exemplarisch wurde eine Maßstabsübertragung für einen Riegelteig mit einem Glycerol-Wasser-Binder (29,9 % Anteil an Riegelteigmasse) in Abbildung 7 dargestellt. Der grafische Kurvenverlauf der Produktionsdaten gegenüber des berechneten Leistungseintrages zeigt einen ähnlichen Verlauf über die Zeit auf.

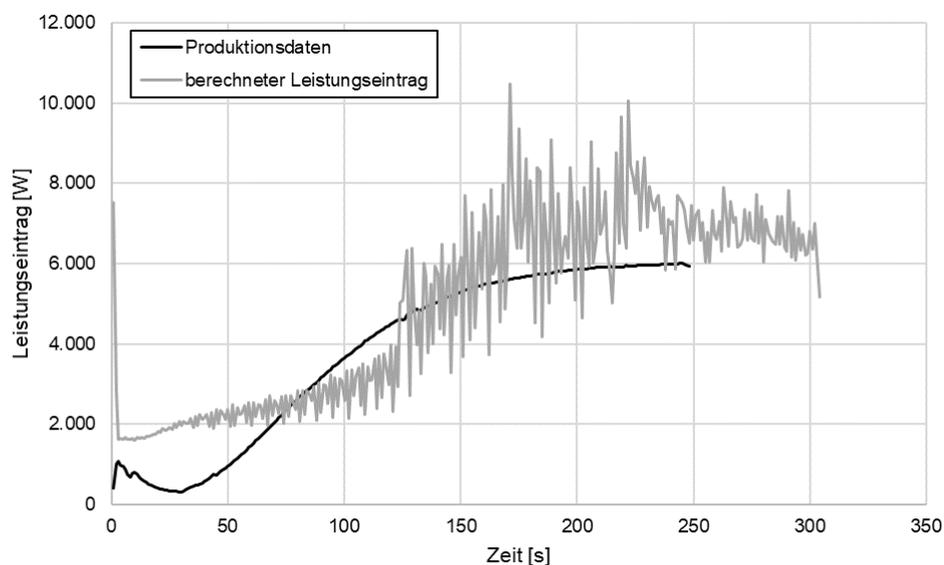


Abbildung 7. Gegenüberstellung des Leistungseintrages, ermittelt aus den Prozessdaten der Produktion und des berechneten Leistungseintrages auf Basis der Laborversuche.

Durch die Kurve des rechnerisch ermittelten Leistungseintrages wurde ein Trendkurve gelegt und mit der daraus sich ergebenden Geradengleichung die Schwankungsbreite der Kurve verringert (Abb. 8). In beiden Kurvenverläufen ist ersichtlich, dass sich in einem Knetzeitbereich zwischen 200 und 250 sec ein Plateau der Leistungseintragskurve mit

anschließendem Kurvenabfall gebildet hatte. Ein maximaler Leistungseintrag von 6000 W (Produktionsdaten) und ca. 6300 W (berechneter Leistungseintrag) wurden mittels automatischer Datendokumentation und rechnerisch ermittelt.

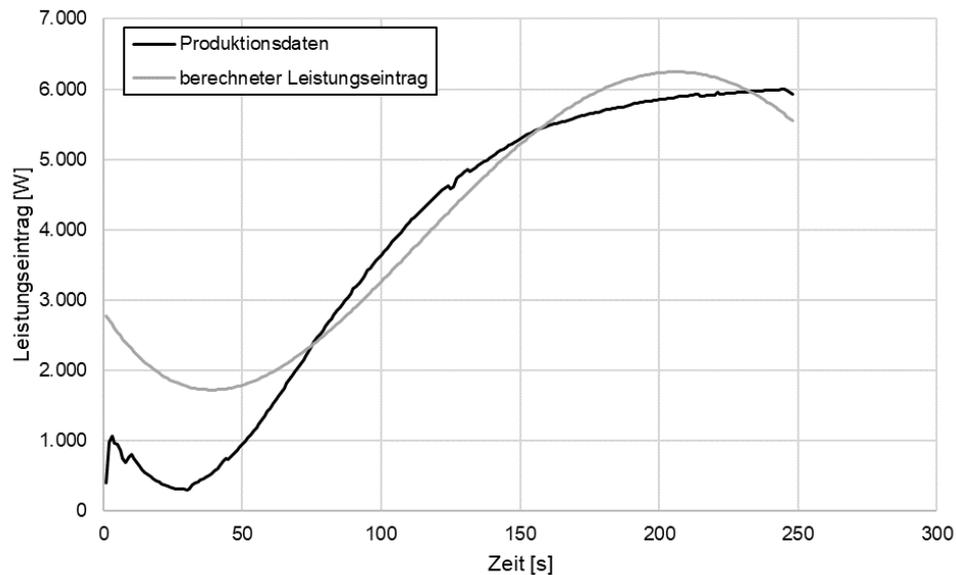


Abbildung 8. Gegenüberstellung des Leistungseintrages, ermittelt aus den Prozessdaten der Produktion und des berechneten Leistungseintrages auf Grundlage der Geradengleichung ermittelt aus den theoretischen Leistungseintragsdaten.

Aus den rechnerisch ermittelten Daten wurde anschließend die theoretische Wirkarbeit ermittelt und mit der aus dem Produktionsprozess dokumentierten Wirkarbeit verglichen (Abb. 9). Resultierend aus weiterer Datenauswertung ergab sich eine Wirkarbeit von 363,97 Wh (1310,28 kJ) nach 210 Sekunden Knetzeit. Dies gegenübergestellt mit der getätigten Wirkarbeit aus dem Produktionsprozess (1240,03 kJ) wies eine relative Standardabweichung von 2,75 % auf.

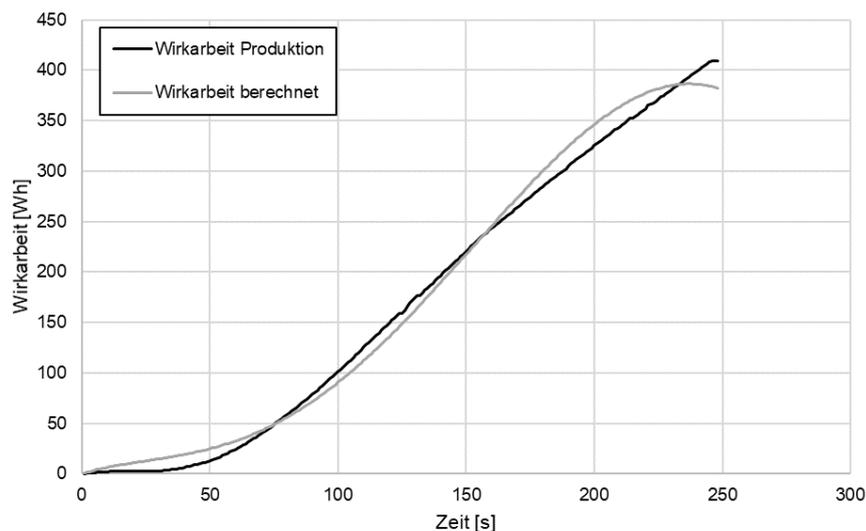


Abbildung 9. Gegenüberstellung der Wirkarbeit, ermittelt aus den Prozessdaten der Produktion und der berechneten Wirkarbeit auf Grundlage der Geradengleichung ermittelt aus den theoretischen Leistungseintragsdaten.

Die Gegenüberstellung der generierten Daten aus dem Labormaßstab mit den Daten aus dem realen Produktionsprozess zeigen auf, dass die Wirkarbeit unter Anwendung des Newton-Faktors (10,29) Standardabweichungen von 2,45 bis 8,49 %, aufweisen (Tabelle 4). Demnach lässt sich mit der aus der Dimensionsanalyse ermittelten Gleichung und der Bildung eines Newton-Zahl-Verhältnisses zwischen Labor und Produktion eine Kennzahl ermitteln, welche für die Maßstabsübertragung perspektivisch verwendet werden kann. Im weiteren Projektverlauf sollen die bisher generierten Daten durch weitere Laboruntersuchungen sowie fortlaufende Messungen im Produktionsmaßstab gestützt werden.

Tabelle 4. Auflistung der ermittelten Newton-Verhältnisse, der oszillierenden Viskosität sowie die Wirkarbeit berechnet aus dem Laboruntersuchungen gegenübergestellt mit der Wirkarbeit aus der Produktion.

Versuch	$Ne_{Labor}/Ne_{Produktion}$	Knetzeit zum Erreichen der Wirkarbeit _{Labor} [s]	oszillierende Viskosität _{Labor} [Pa s]	Wirkarbeit _{berechnet} [Wh]	Wirkarbeit _{Produktion} [Wh]	Standardabw. [Wh]
Riegelteig 1	9,7	210	36636,85	273,99	307,04	± 16,52
Riegelteig 2	12,34	210	23621,53	413,36	348,64	± 32,26
Riegelteig 3	11,17	210	44308,62	344,45	363,97	± 9,76
Riegelteig 4	10,03	210	52510,07	224,72	256,52	± 15,9
Riegelteig 5	9,22	165	30244,58	174,51	193,84	± 9,67
Riegelteig 6	9,85	210	29343,22	269,61	247,07	± 11,27
Riegelteig 7	10,71	195	21224,22	232,04	210,68	± 10,68
Riegelteig 8	9,27	188	34617,47	212,73	188,20	± 12,26
Mittelwert	10,29					

Im ersten Abschnitt des Forschungsvorhabens konnten verschiedene Einflussfaktoren, wie u.a. Viskosität, auf die rheologischen Eigenschaften von Riegelteigen sondiert werden. Die sich aus den Produktionsdaten ergebene Viskositätsrange liegt zwischen 20.000 und

55.000 Pa s, welche die sichere Verarbeitbarkeit auf den Produktionsanlagen zur Vermeidung eines Überknetens des Riegelteiges darstellt. Durch weitere Probennahmen und direkte rheologische Vermessungen der Riegelteige nach dem Knetvorgang (Produktion) soll der verarbeitbare Bereich untermauert werden. Eine potenzielle Übertragungsregel wurde vom Laborkneter (Spiralkneter) direkt auf den Produktionskneter (Wendelkneter), mit dem Ziel eine parallele Maßstabsübertragung ohne etwaige Zwischenschritte und den damit verbundenen Ressourcenmehrbedarf, ermittelt.

Ermittlung der rheologischen Teigeigenschaften in Abhängigkeit der Standzeit

Neben den Untersuchungen zur Bestimmung eines Übertragungsfaktors wurde mit den gleichen Versuchsansätzen das Verhalten der Teigrheologie in Abhängigkeit der Standzeit betrachtet (Eigenanteil anona GmbH). Dazu wurden die Proben unmittelbar nach dem Knetvorgang und nach einer definierten Standzeit von 4 h auf ihrer Viskositätseigenschaften analysiert (Abb. 10). Aus der grafischen Darstellung ist ersichtlich, dass die Viskosität und schlussfolgernd daraus die Verarbeitbarkeit eines Riegelteiges direkt von der Standzeit abhängig ist. Die Viskositätsänderung über die Zeitspanne zwischen Knetvorgang und Aufbringen auf die Verarbeitungslinie ist zudem abhängig von deren Rezepturzusammensetzung und dem Anteil einzelner Komponenten sowie wiederum deren Flüssigkeitsaufnahmefähigkeit (Quelleigenschaften). Dieser Aspekt wird perspektivisch in einem internen Forschungsprojekt wissenschaftlich betrachtet.

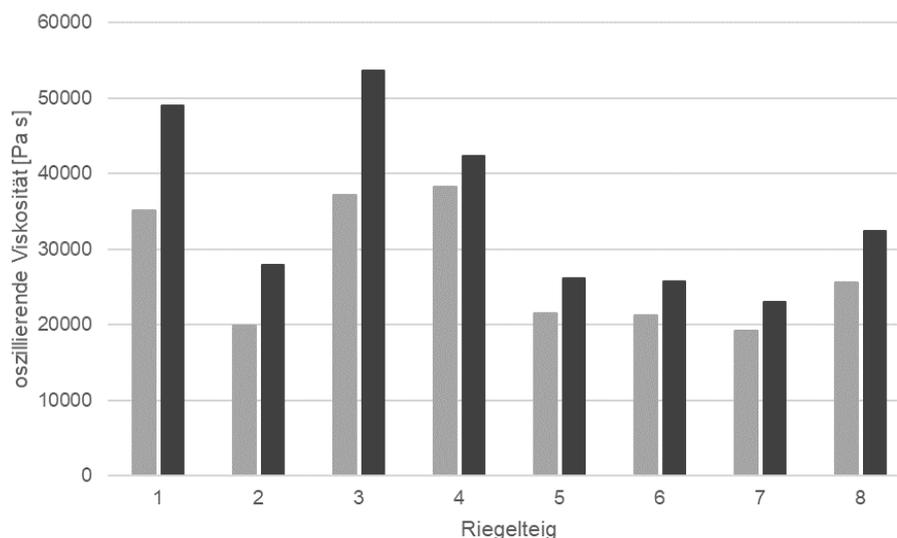


Abbildung 10. Darstellung der oszillierenden Viskosität nach dem Knetvorgang und nach weiteren 4 h Standzeit.

Tabelle 5. Auflistung der oszillierenden Viskositätswerte aus den Standzeitversuchen der jeweiligen Versuchsansätze.

Versuch	osz. Viskosität [Pa s] nach 0 h	osz. Viskosität [Pa s] nach 4 h	osz. Viskosität [Pa s] Differenz
Riegelteig 1	35104,57	49017,34	13912,78
Riegelteig 2	19841,44	27926,29	8084,85
Riegelteig 3	37111,66	53573,01	16461,35
Riegelteig 4	38252,92	42345,34	4092,42
Riegelteig 5	21451,80	26195,85	4744,06
Riegelteig 6	21289,68	25692,77	4403,10
Riegelteig 7	19184,51	23042,04	3857,52
Riegelteig 8	25618,71	32339,12	6720,40

Die grafische sowie tabellarische Darstellung (Tabelle 5) der Resultate zeigt auf, dass mit fortlaufender Standzeit die Viskosität der einzelnen Riegelteige mit unterschiedlicher Zusammensetzung zunahm (zw. 3.857,52 bis 16.461,35 Pa s). Dies deutet darauf hin, dass bei einer zu lang gewählten Standzeit, die ermittelte Viskositätsrange überschritten wird und der Teig im weiteren Verlauf nicht auf den Produktionslinien verarbeitbar ist. Dem kann entgegengesteuert werden, indem ein weiterer Energieeintrag in das Teigsystem eingebracht wird. Der dadurch aufkommende zeitliche und personelle Aufwand, sowie die Kosten und der Mehrbedarf an Stellfläche müssen berücksichtigt werden.

Demgegenüber ist eine klare symmetrische Prozessablaufkette, welche eindeutig die Zeitdauer des Knetvorganges und das Aufbringen der Riegelteigmasse auf die Verarbeitungslinie definiert, zielführend. Somit könnte perspektivisch verhindert werden, dass Riegelteigchargen aufgrund von Riegelteig-Standzeiten (u.a. durch Überkneten) oder Produktionsstillstandzeiten (z.B. Ausfall von peripheren Anlagen) ausschließlich durch Mehraufwand verarbeitbar sind.

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Standzeit auf die Viskosität und damit auf die Verarbeitbarkeit, wurden Standzeituntersuchungen von High Protein-Riegel und veganen Riegeln getätigt (Abbildung 11). Aufgrund des Einflusses von grob stückigen (ab 5 mm) Komponenten auf die Messgenauigkeit (Viskositätsmessungen) wurden diese nicht in die Rezeptur mit eingebunden bzw. nach dem Knetvorgang aus dem Probenmaterial entfernt. Die Beeinflussung von Fettmigration während des Knetvorganges und über die Standzeit hinweg, wurde in diesem Versuch nicht mit betrachtet und kann auf Basis der aktuellen Datenlage ausgeschlossen werden. Über die Standzeit von 300 min wurde ein linearer Anstieg der oszillierenden Viskosität bei veganen Riegeln detektiert. Demgegenüber zeigt der High Protein Bar einen Kurvenverlauf Potenz zweiten Grades. Die Viskositätszunahmerate (Standzeit zwischen 0 min und 300 min) für die untersuchte vegane Riegelteigmasse lag bei $46,61 \text{ Pa s min}^{-1}$ und für den High Protein Bar bei $126,7 \text{ Pa s min}^{-1}$.

Bei der Betrachtung der Trendkurven vom High Protein Bar wird deutlich, dass nach einer Standzeit von ca. 160 min. eine osz. Viskosität von ca. 61.000 Pa s vorlag. Die High Protein Bar Riegelteigmasse ist demnach direkt nach dem Knetvorgang auf der Riegelanlage verarbeitbar. Beispielhaft wird gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit der Verarbeitbarkeit der Riegelteigmasse mit fortlaufender Standzeit reduziert wird.

Die vegane geknetete Rohmasse zeigte gegenüber dem High Protein Bar eine geringere oszillierende Viskosität von 1898,76 Pa s (Faktor 20,4). Die Fließgrenze wurde nach einer Standzeit von 30 min (vegan) und nach einer Standzeit von 180 min (High Protein Bar) erreicht (Abbildung Abb. 25 und Abb. 27). Das Verhältnis zwischen dem elastischen Anteil und dem viskosen Anteil nahm gegenüber der High Protein Bar Masse (von 0,93 auf 1,07) von 0,91 (30 min) auf 1,56 zu (Abbildung 12). Dies deutet darauf hin, dass die vegane Riegelteigmasse in kürzerer Zeit zum Brechen durch beispielsweise Bandübergänge, beim Formschnitt und/oder weiteren Bearbeitungsschritten, in denen Energien eingetragen werden, neigt. Zur Untermauerung der bisher generierten Daten wurden weitere Standzeitversuche mit veganen sowie High Protein Bars durchgeführt. Die Resultate daraus wurden in diesem Projektvorhaben nicht weiter aufgeführt.

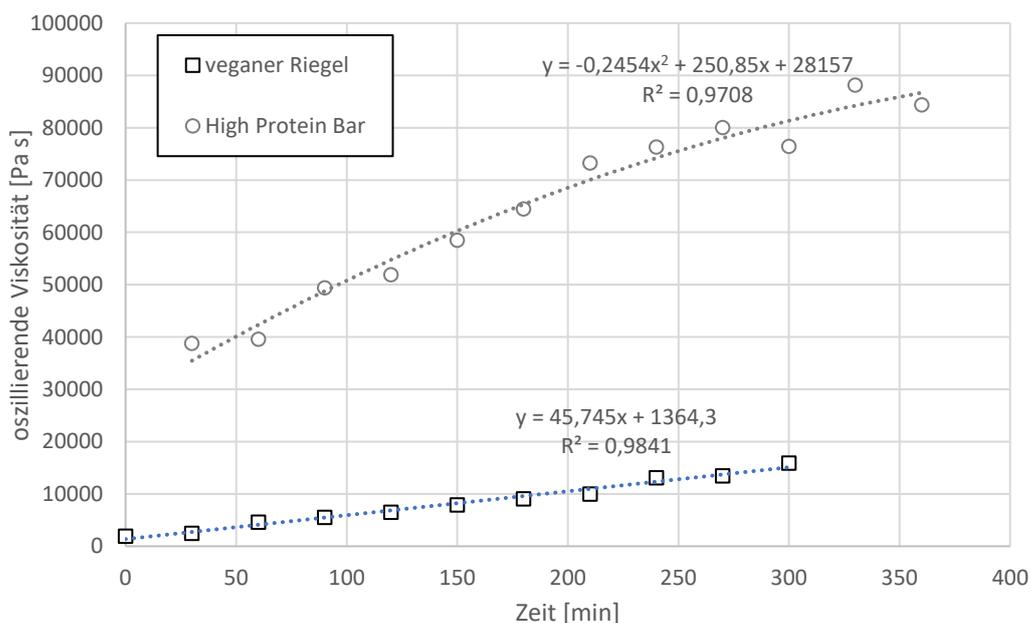


Abbildung 11. Gegenüberstellung des Kurvenverlaufes einer veganen Riegelteigmasse mit einer High Protein Bar Riegelteigmasse.

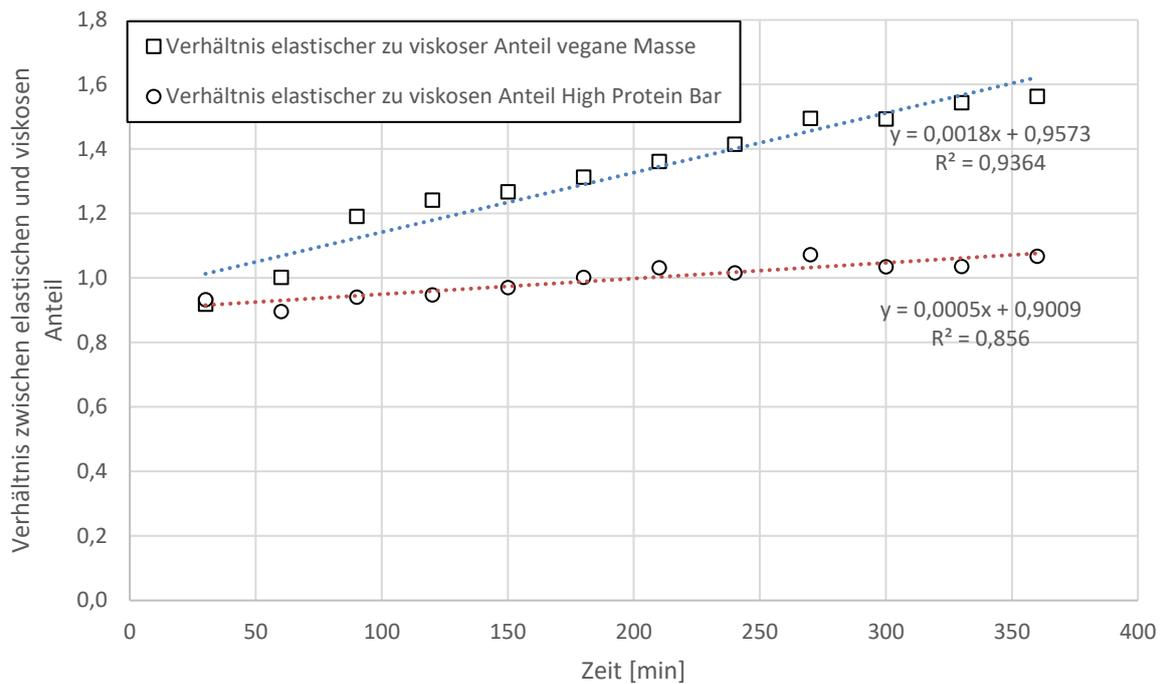


Abbildung 12. Gegenüberstellung des Verhältnisses zwischen elastischen und viskosen Anteilen einer veganen Riegelteigmasse mit einer High Protein Bar Masse.

Ermittlung des Einflusses der Binderzusammensetzung bei veganen Riegelteigmassen

Für die Untersuchung des Einflusses der gewählten Binderzusammensetzung wurde zwei vegane Riegelmassen im Labor-Spiralknetzer jeweils mit identischer Feststoffzusammensetzung geknetet. Die Binderkomponente Isomalto-Oligosaccharide (IMO) wurde vollständig durch Fructose Oligosaccharid (FOS) ausgetauscht und die aufkommenden Differenzen des Energieeintrages sowie der Einfluss der Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit der Standzeiten betrachtet. Die Viskosität der gegenseitig substituierten Binderrohstoffe betrug 6,64 Pa s (FOS) und 12,6 Pa s (IMO). Ein direkter Einfluss der Binderviskosität auf das Gesamtriegelteigsystem und dessen rheologischen Verhaltens wurde nachgewiesen (Abbildung 13). Es wurde gezeigt, dass die Riegelteigmassen, mit IMO (veganer Riegel 1 IMO) als Bestandteil des Binders, zu Beginn der Standzeitversuche Werte von ca. 9.529 Pa s aufwiesen. Bis zu einer Standzeit von 210 min. wurde bei dem Riegelteig mit IMO als Binderkomponente eine Vervierfachung der Viskosität (von 9.529 Pa s auf 39.486 Pa s) detektiert. Demgegenüber wurde eine Viskositätserhöhung mit dem Faktor 2,4 beim veganen Riegel 1 FOS ermittelt. Dies zeigt auf, dass die Riegelmasse mit FOS als Binderkomponente zu einem verzögerten Aushärten der Riegelteigmasse über die Versuchszeit führte. Im Falle eines Überknetens des Riegelteiges in Abhängigkeit der Viskosität, welche unmittelbar nach dem Knetvorgang im System vorliegt, kann dies zu einer Verlängerung der Standzeiten führen. Demgegenüber kann bei korrekt erfolgtem Knetvorgang der verarbeitbare Bereich der Riegelmasse verlängert werden. Im weiteren Versuchsverlauf fand eine Annäherung der ermittelten Kurven zwischen veganer Riegel 1 FOS und veganer Riegel 1 IMO sowie zwischen

veganer Riegel 2 FOS und veganer Riegel 2 IMO statt. Bei veganen Massen mit niedrigen viskosen Eigenschaften wird auf Basis der generierten Daten der Einsatz von IMO empfohlen mit dem Zweck, der Verringerung von Standzeiten. Voraussetzung dafür ist ein korrektes Knetregime bzw. ein definierter Energieeintrag beim Knetvorgang. Zur Vermeidung von Riegelteigmassen, welche während des Verarbeitungsprozesses zum Brechen bzw. Zerbröseln neigen, sollte FOS als Binderkomponente vorrangig eingesetzt werden. Damit kann der Verarbeitungsbereich für zügig austrocknende Riegelteigmassen verlängert werden. Perspektivisch kann bei einer exakten Charakterisierung des Systems die Konsistenz gesteuert und damit fließende oder bröckelnde Riegelteigmassen vermieden werden.

Die grafische Darstellung 13 gibt exemplarisch das rheologische Verhalten zweier ausgesuchter veganer Riegelteigmassen jeweils mit FOS und mit IMO über die Standzeit wieder.

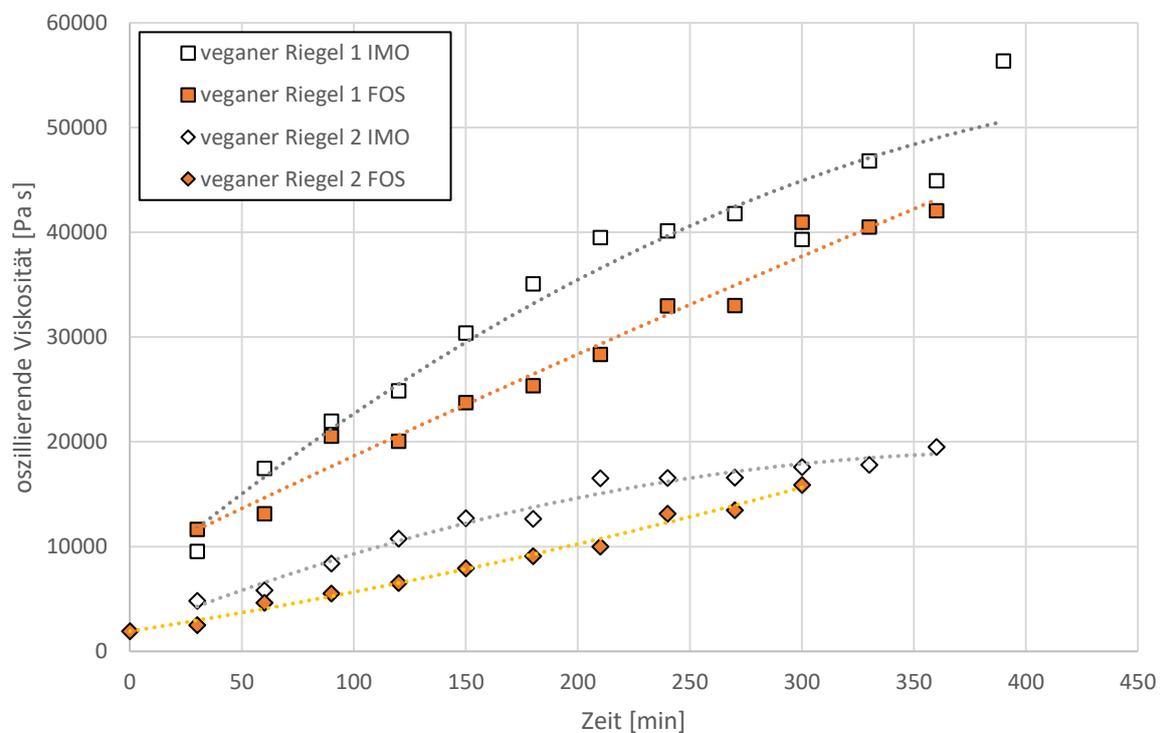


Abbildung 13. Gegenüberstellung der Standzeitkurven von veganen Massen mit FOS und mit IMO-Sirup im Binder.

Sowohl die Standzeituntersuchungen sowie die Detektion des Energiebedarfes während des Knetvorganges und die damit verbundene Verwendung der Maßstabsübertragungsregel sollen perspektivisch in den Entwicklungsprozess einbezogen werden. Damit können Standzeiten definiert, Personal und kostenintensive Produktionsversuche vermieden und zugleich Ressourcen (Rohstoffe) eingespart werden.

4.5 Integration der Scale-up-Regel in den laufenden Produktionsprozess (AP5)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 5 wurde das erstellte Modell mit dem Newton-Faktor auf seine Übertragbarkeit in den laufenden Produktionsprozess untersucht. Dazu wurde der im Labormaßstab aus dem Newton-Faktor rechnerisch ermittelte Leistungseintrag ($P_{\text{Produktion}}$) und die daraus resultierende Wirkarbeit herangezogen. Während des Knetvorganges in der Produktion wurde eine Probe zu dem Zeitpunkt entnommen, an dem die errechnete Wirkarbeit erreicht war. Die Probe wurde anschließend auf ihre rheologischen Eigenschaften untersucht und mit den Daten aus dem Labormaßstab verglichen. In der Vorbetrachtung musste generell mit einer noch nicht definierten Schwankungsbreite der Viskosität zwischen den Labor- und Produktionsdaten gerechnet werden, welche im weiteren Projektverlauf ermittelt wurde.

Exemplarisch wurde zunächst ein Riegel ausgewählt, welcher nach dem Knetvorgang in der Produktion eine mittlere Viskosität von 60.568 Pa s aufwies (13 Datenpunkte). Im Labormaßstab wurde dieser Riegelteig geknetet und alle relevanten Daten generiert. Daraus wurde unter Verwendung des Newton-Faktor eine notwendige Wirkarbeit von 367,6 Wh und eine Energie von 1.323,37 KJ berechnet. Nach dem Model soll beim Erreichen der gelieferten Energie (1.323,37 KJ) im Knetvorgang die Riegelteigviskosität im Vergleich mit den bisher generierten Viskositäten aus der Produktion (60.568 Pa s) im selben Bereich liegen. Abbildung 14 und 15 zeigen die Abhängigkeiten der Viskosität sowie des elastischen und viskosen Anteils in der Riegelteigmasse von der eingetragenen Energie während des Knetvorganges. Nach einer Mischzeit von 254 Sekunden betrug die geleistete Energie 1.303 KJ. An diesem Probenahmepunkt lag die Viskosität des Riegelteiges bei 61.187 Pa s. Im Vergleich zu den bisher generierten Produktionsdaten aus der Riegelteigklassifizierungsdatenbank (60.568 Pa s) war die Viskosität um den Faktor 1,01 höher. Schlussfolgernd daraus kann gesagt werden, dass der Übertragungsfaktor exemplarisch auf diesen Riegelteig anwendbar war. Mit der sich aus den vier Messpunkten ergebenden Trendlinie wurde eine Viskosität von 54.737 Pa s bei einer Energieeintrag von 1.323,37 KJ interpoliert. Durch die Verwendung des Übertragungsmodells konnte die Knetzeit von bis zu 400 Sekunden auf 254 Sekunden gesenkt werden (Ressourceneinsparung). Parallel dazu fand eine Reduzierung des Energiebedarfes von ca. 1874 KJ auf 1303 KJ statt. Neben der Verringerung des Zeitbedarfes eines Knetvorganges geht mit dem Übertragungsmodell eine Senkung des Energiebedarfes und somit ein Kostenreduzierung einher.

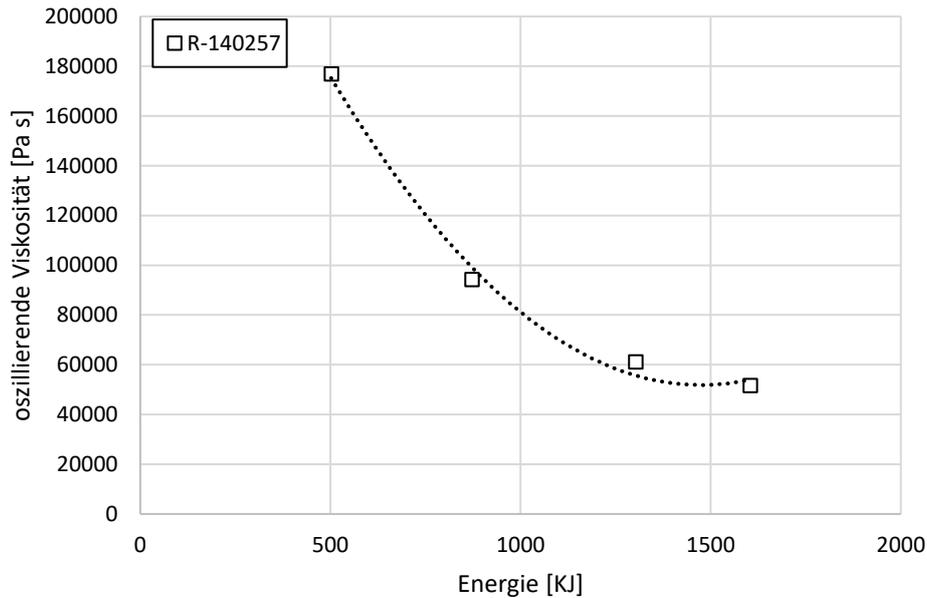


Abbildung 14. Darstellung der oszillierenden Viskosität gegen die eingetragene Energie während des Knetvorganges.

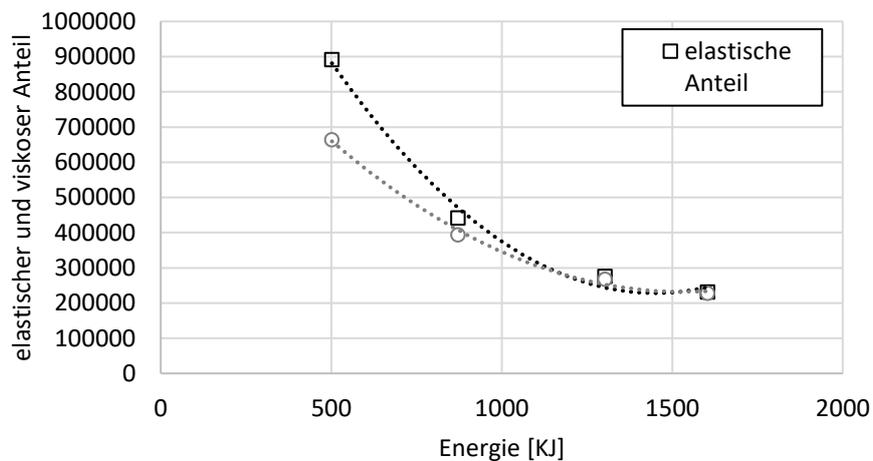


Abbildung 15. Darstellung des elastischen und viskosen Anteils in der Riegelteigmasse gegen die eingetragene Energie während des Knetvorganges.

Im Folgenden wurden die Riegelteigmassen im Labor geknetet und alle relevanten Parameter (Wirkarbeit, Viskosität, Standzeit) betrachtet und für die Übertragung in den Produktionsmaßstab der ermittelte Newton-Faktor angewendet. Nach der Ermittlung der Wirkarbeit wurde diese im laufenden Produktionsablauf getestet. Dazu wurde in die Knetersoftware, die aus dem Modell sich ergebene Wirkarbeit eingetragen und für alle Ansätze die Rührer- und Bottich Drehzahl (35 Hz, 20 Hz) konstant gehalten. Tabelle 6 gibt die sich aus den Versuchen im Produktionsmaßstab resultierenden Daten sowie deren Auswertung hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Energieeinsparung wieder.

Im weiteren Projektverlauf zeigte sich, dass vegane Riegelteigmassen gegenüber den High Protein Bars einen geringeren Energiebedarf bis zum Knetende aufzeigten. Dies rührt daher,

dass andere Rührer- und Bottich-Drehzahlen, Hauptrohstoffe (insbesondere Quellstoffe und deren Quelleigenschaften), und Binderzusammensetzungen Einfluss auf die Teigbildung und Teigrheologie nehmen. Beide Teigeigenschaften werden weiterhin durch das Verhältnis zwischen Trockensubstanz und Flüssigkomponenten sowie dem Verhältnis zwischen Quellstoffanteil und Binderanteil signifikant beeinflusst.

Auf Basis der im Projektverlauf generierten Daten wurde ein verarbeitbarer Bereich für vegane Massen ab einer oszillierenden Viskosität von 10.000 Pa s ermittelt.

Damit das Scale-up greifen kann, müssen die geleistete Wirkarbeit, die Riegelteigviskosität zum Zeitpunkt der Verarbeitung sowie das Standzeitverhalten der Riegelmasse mit einbezogen werden. Mit einer gezielten Methodenetablierung und Einbindung eines strukturierten Ablaufprozederes kann das Maßstabsübertragungsmodell in die laufende Prozesskette integriert werden.

Tabelle 6. Tabellarische Darstellung der Resultate aus den Scale-up-Versuchen vom Labor in den Produktionsmaßstab.

Bezeichnung	Knetenergie _{Produktion}		berechnete Energie _{Labor} [KJ]	Energie-Einsparung [KJ]	Verarbeitbar positiv/negativ
	ohne Scale-up Mittelwert [kJ]	Viskosität _{Produktion} mit Scale-up [Pa s]			
Riegel 1	1534	61186*	1323	211	positiv
Riegel 2	836	44757	600	236	positiv
Riegel 3	-	32412	1305	DIOSNA-Cloud fehlerhaft	positiv
Riegel 4	690	30355	600	90	positiv
Riegel 5	856	33941	500	356	positiv
Riegel 6	1638	34019	1000	638	positiv
Riegel 7	2000	54609	2000	0	positiv
Riegel 8	-	30921	300	-	positiv
Riegel 9	366	26625	250	116	positiv
Riegel 10	1638	41767	1500	138	positiv
Riegel 11	-	51154	1000	-	positiv

Anwendung des Scale-up-Modells im Produktionsmaßstab bei Erstproduktionen, Rohstoffaustauschen oder Wechsel der Produktionsstätte

Im Zuge des Projektes wurde das Scale-up-Modell für die Riegelteigmassen, welche erstmals hergestellt wurden oder durch räumliche Verlagerung der Produktionsstätte und Nutzung einer anderen Knettechnologie, angewendet. Nach der Bereitstellung der Rezepturen wurden diese im Labormaßstab charakterisiert (Viskosität, Wirkleistung, Standzeiten) und Aussagen über die Verarbeitbarkeit getroffen. Durch diese Herangehensweise konnten im Vorfeld ungeeignete Rezepturen sondiert und demnach Ressourcenmehrbedarf vermieden werden. Zum Abschluss des Projektvorhabens wurden Reihenversuche im Produktionsmaßstab durchgeführt. Dafür wurden alle notwendigen Kennzahlen im Labormaßstab ermittelt und die sich daraus ergebene Leistungskennzahl für die jeweilige Riegelzusammensetzung in den Produktionsmaßstab transferiert. Exemplarisch wurden für fünf Riegelteigrezepturen (Tabelle 7) die notwendige Knetenergie vorgegeben und im Produktionsmaßstab hergestellt. Durch stichpunktartige Probenahmen wurde sichergestellt, dass bei aufkommenden

Viskositätsabweichungen das Knetregime (Energieeintrag) angepasst wurde. Während der Reihenmessungen bewegten sich die Riegelteigviskositäten in der definierten Viskositätsrange von 25.000 Pa s bis 60.000 Pa s. Zudem wurden die Mitarbeiter bzgl. aufgekommene Probleme während des Produktionsprozesses interviewt. Während der Reihenmessungen mit Energievorgabe wurden keine nachgelagerten Probleme in den folgenden Prozessstufen sichtbar.

Tabelle 7. Auflistung der Reihenversuche im Produktionsmaßstab.

Bezeichnung	Anzahl nacheinanderlaufender Batchversuche	Verarbeitbar positiv/negativ
Riegel 1	76	positiv
Riegel 2	30	positiv
Riegel 3	53	positiv
Riegel 4	36	positiv
Riegel 5	12	positiv

Wirksamkeitsprüfung des Scale-up-Modells

Inwieweit die Scale-up-Maßnahme Wirksamkeit zeigte, ist in den Abbildung 16 und 17 dargestellt. Durch die Ermittlung der weltweit angewendeten statistische Kennzahl (SIGMA-Level) konnten Aussagen über die Prozessstabilität und Effektivität getroffen werden. Desto höher das SIGMA-Level ist, desto geringer sind die Abweichungen im Prozess. Ein SIGMA-Level von 6 (Maximalwert) gibt, bezogen auf das Projektvorhaben, eine Fehlerwahrscheinlichkeit des Prozesses von 3,4 Fehlern auf 1 Mio. Knetvorgängen an. Somit können statistisch genaue Aussagen über die Prozesseffektivität mittels SIGMA-Level getroffen werden. Dazu wurde aus den Messpunkten das SIGMA-Level vor der Scale-up-Maßnahme und nach der Integrierung der Maßstabsübertragung rechnerisch ermittelt. Ohne Optimierungsmaßnahme lag ein unteres SIGMA-Level von 1,14 (Toleranzunterschreitung von 12,8 %) und ein oberes SIGMA-Level von 0,04 (Toleranzabweichung von 48,59 %) vor. Dem Gegenüber konnte durch die Scale-up-Maßnahme ein höheres SIGMA-Level von 1,94 (Toleranzunterschreitung von 2,61 %) und 1,88 (Toleranzüberschreitung von 3,0 %) erreicht werden. Dies verdeutliche, dass durch die Anwendung des Scale-up-Modells die Viskositätsüberschreitung im definierten Viskositätsbereich von 12,8 % auf 2,61 % (Toleranzunterschreitung) und von 48,59 % auf 3,0 % (Toleranzüberschreitung) reduziert werden konnte.

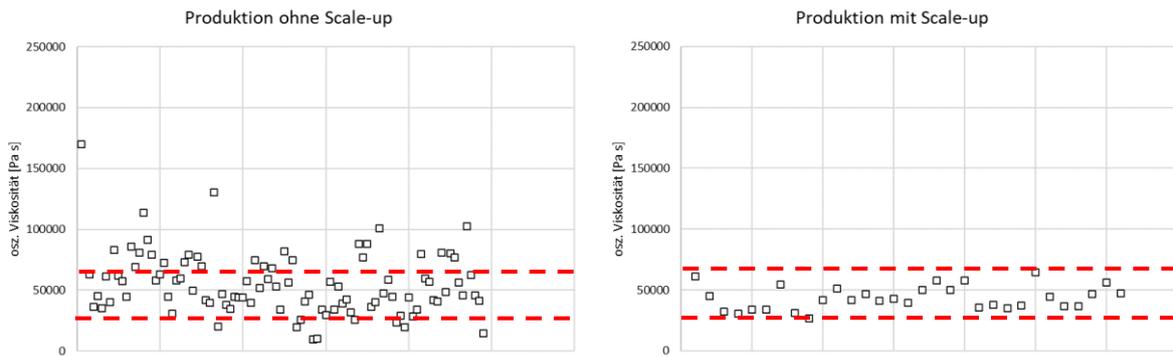


Abbildung 16. Darstellung der oszillierenden Viskositäten der einzelnen Messpunkte vor der Scale-up Maßnahme (Links) und nach der Scale-up-Maßnahme (Rechts). Bereich zwischen den gestrichelten roten Linien bildet den festgelegten Viskositätsgrenzbereich, welcher zur Sicherstellung der Verarbeitbarkeit auf den Produktionslinien nicht überschritten werden sollte.

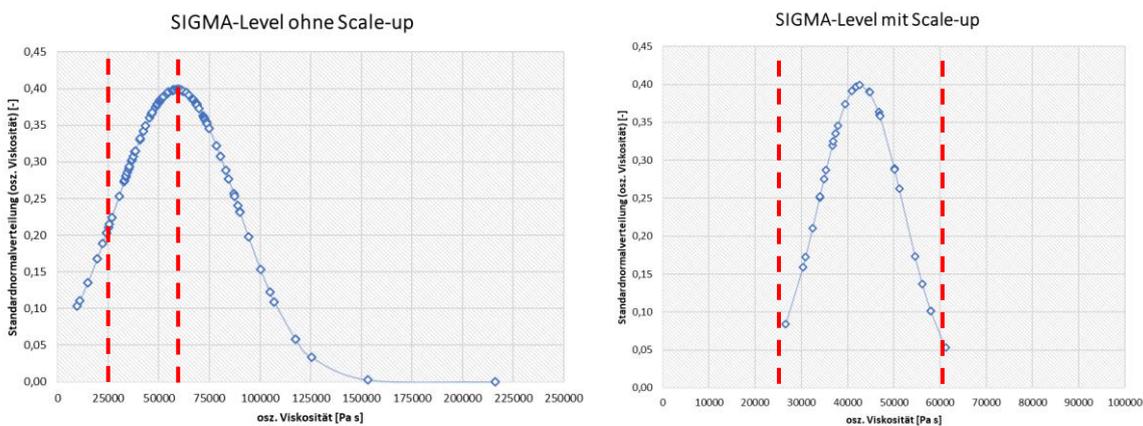


Abbildung 17. grafische Widergabe der ermittelten SIGMA-Levels ohne Scale-up (Links) und mit Scale-up (Rechts). Der Bereich zwischen den gestrichelten roten Linien bildet den festgelegten Viskositätsgrenzbereich t, welcher zur Sicherstellung der Verarbeitbarkeit auf den Produktionslinien nicht überschritten werden sollte.

In dieser Projektphase wurden insgesamt 80 Laborversuche zur Bestimmung der Riegelteigviskosität in Abhängigkeit des eingetragenen Leistungseintrages und das Viskositätsverhalten über die Standzeit durchgeführt, 99 Produktionsversuche mit Leistungsdatenvorgabe (in KJ) und fünf Reihenversuche in der Produktion mit 207 Knetvorgängen. Es konnten alle Knetvorgänge im Produktionsmaßstab, welche einer Maßstabsübertragung unterzogen wurden, erfolgreich und in den nachfolgenden Ausformungs-, Überzugs- und Verpackungsprozessstufen verarbeitet werden. Auf Grundlage der generierten Daten und der Prozesseffektivität- sowie Stabilität (SIGMA-Level) ist ein gesichertes Scale-up unter der Prämisse der Vorabcharakterisierung (im Labormaßstab) des Riegelteiges bei Neuanlagen, Rezepturänderungen, Rohstoffaustauschen und Geometrieänderung der Rühranlagen, umsetzbar.

4.6 Nachhaltigkeitsbewertung (LCSA) (AP6)

In der Nachhaltigkeitsbewertung wurde im ersten Schritt die Knetsysteme hinsichtlich des Energiebedarfes pro Knetvorgang bilanziert. Dazu wurde der Spiralkneter (Labor) dem genutzten Mischkessel aus der Produktion gegenübergestellt und die ökonomischen und ökologischen Aspekte betrachtet. Zusätzlich wurde das Knetregime, welches nach Optimierung durch das Scale-up zur Verfügung stand, bilanziert. Die generierten Resultate aus den vorhergehenden Arbeitspaketen zeigten auf, dass durch die Scale-up Maßnahme der Bedarf an Energie gesenkt werden könnte. Weiterhin wurde für die Ermittlung der Ökoeffizienz eine Riegelteigmasse herangezogen, welche in der mittleren Preiskategorie (5,0 € Kg⁻¹) lag und welche regelmäßig im Produktionsbereich (Mittelwert 1874,8 kJ) hergestellt wurde. Die tabellarische Gegenüberstellung visualisiert, dass für eine Testproduktion zur Ermittlung der Anlagengängigkeit ein Einsparungspotential hinsichtlich der Teigmasse von 97 % (975 €) besteht. Kalkulatorisch könnten weitere 42 Laborversuche zur Charakterisierung (u.a. Rheologie, Lagertests) der Riegelteigmasse sowie im Sinne der statistischen Sicherheit bis zum Erreichen der anfallenden Kosten im Produktionsbereich durchgeführt werden. Der mittlere Energiebedarf des Knetvorganges im F&E-Labor lag bei 125,28 kJ (34,8 kWh) und im Produktionsbereich bei 1874,8 kJ (520,78 kWh), was verdeutlicht, dass 93,3 % der benötigten Energie eingespart werden könnte. Der Energiebedarf nach der Scale-up-Maßnahme im Produktionsbereich betrug 1303 kJ (361,94), sodass ein Energieeinsparungspotential von 30,5 % (571,8 kJ) vorlag. Eine jährliche Kostenreduzierung von 485,3 € auf 337,29 € ginge damit einher.

Tabelle 8. Gegenüberstellung der benötigten Massen pro Ansatz, Gesamtrohstoffkosten, des mittleren Energiebedarfs sowie die anfallenden Energiekosten pro Knetvorgang, pro Tag und pro Jahr

Art	Masse pro Ansatz [kg]	Gesamtrohstoff-Kosten [€]	mittlerer Energiebedarf [kJ]	Energiekosten pro Knetvorgang [€]	Energiekosten pro Tag [€]	Energiekosten pro Jahr [€]
Laborkneter	4,5	5,00	125,28	0,0036	-	-
Scale-up Übertragung	215	238,89	1303,00	0,0371	1,30	337,29
Produktionskneter	215	238,89	1874,8	0,0533	1,87	485,30

*kalkuliert wurde für 260 Arbeitstage in einer 5 Tage-Woche, 3-Schichtmodell, 35 Knetvorgänge täglich (ERP) sowie mit einem Strompreis von 0,05621 € kWh⁻¹ (Einkauf am Terminmarkt) und 0,2871812 € kWh⁻¹ (Einkauf am Spotmarkt) Stand Dezember 2022, Verhältnis 80/20, weitere Aufschläge wurden nicht berücksichtigt.

Die Abbildung 18 zeigt die prozentuale Zusammensetzung der Stromfracht und deren Herkunft aus erneuerbaren oder fossilen Ressourcen auf. Der Gesamtenergieträgermix ist vom jeweiligen örtlichen Anbieter festgelegt, sodass auf die Herstellart des Stromes kein Einfluss genommen werden konnte.

Gesamtenergieträgermix Dezember 2022 ohne Aufschläge

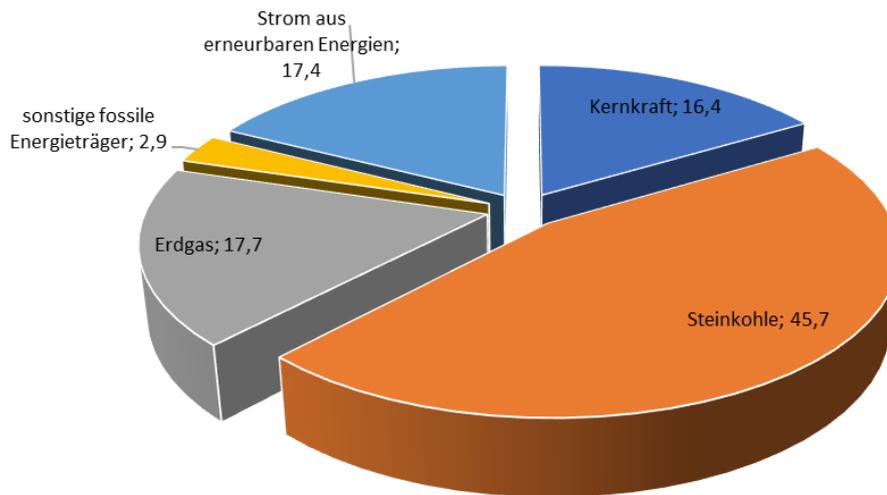


Abbildung 18. Darstellung der Zusammensetzung der bezogenen Energie.

Für die ökologische Nachhaltigkeitsbewertung wurden die Kennzahlen Global Warming Potential, Acidification Potential, Eutrophication Potential und das Human Toxicity Potential herangezogen.

Das Global Warming Potential (Treibhauspotential) bzw. CO₂-Äquivalent ist der Vergleich einer Masse eines bestimmten Treibhausgases zu derselben Masse an CO₂. Je höher der Wert ist, desto stärkeren Einfluss auf den Treibhauseffekt (globale Erwärmung) geht vom Prozess aus. Auf Grundlage der für den jeweiligen Knetprozess (Labor, Produktion) generierten Stromverbrauch wurde das Global Warming Potential mittels Anwendung der LC-SA-Software Gabi und den darin enthaltenen Datenbanken ermittelt. In Folge der Scale-up Maßnahme und die damit einhergehenden Verringerung des Energiebedarfes konnte exemplarisch das Global Warming Potential von 284,29 kg CO₂ eq. (ohne Scale-up Maßnahme) auf 197,58 Kg CO₂ eq. (mit Scale-up Maßnahme) gesenkt werden. Durch eine strukturierte Maßstabsübertragung kann im ersten Umsetzungsschritt die Riegelteigmasse charakterisiert (Sensorik, Haptik, Standzeiten), deren rheologische Eigenschaften ermittelt, die Verarbeitbarkeit auf den Produktionsanlagen prognostiziert und damit der Ressourcenaufwand (mehrere Testproduktionen, Rohstoffe, Personal, Zeit, Kosten) sowie die einhergehende Treibhausgasfreisetzung (von 284,29 Kg CO₂ eq. auf 18.99 Kg CO₂ eq.) reduziert werden.

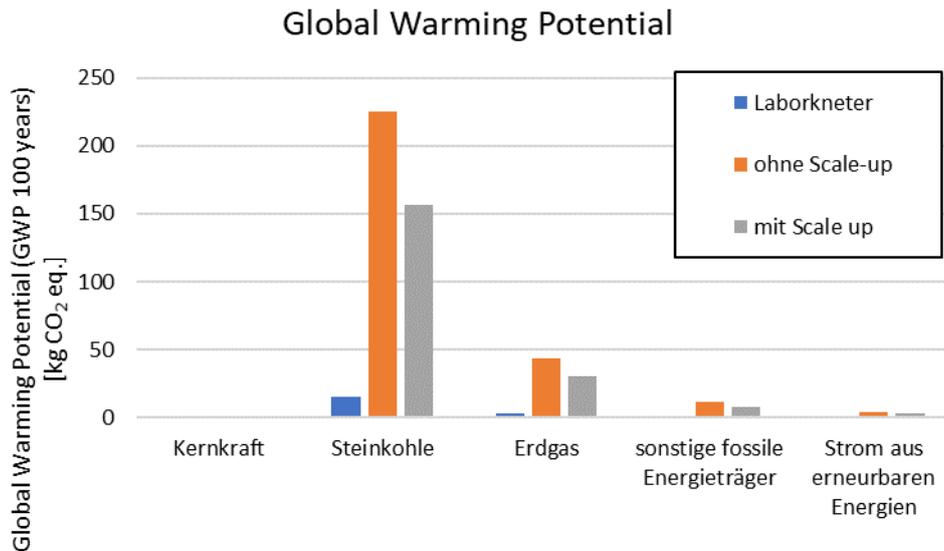


Abbildung 19. Gegenüberstellung des Umweltparameters Global Warming Potential zwischen dem Laborkneter, dem Produktionskneter ohne Scale-up und mit Scale-up Maßnahme.

Das Acidification Potential, auch Versauerungspotential, ist ein Maß für die pH-Wert-Senkung im Erdreich, verursacht durch äußere oder innere Faktoren. Hierbei wird die SO_2 Äquivalent Kennzahl, welche das Versauerungspotenzial der einzelnen Substratkomponenten wie bspw. Nitrat, Sulfat oder Ammoniak mit dem Versauerungspotential von SO_2 in Relation setzt, herangezogen. Je höher das Acidification Potential ist, desto stärker nimmt der Bioprozess Einfluss auf den pH-Wert im Erdreich. Folgen sind verringerte Photosynthese Aktivitäten von Pflanzen sowie Ernteeinbußen durch zumindest inhibiertes bis hin zu stagnierendem Pflanzenwachstum. Umliegende Bereiche wie Seen, Flüsse und Wälder werden zunehmend negativ beeinflusst. Anteilsmäßiger Hauptverursacher des Versauerungspotentials bei der Strombereitstellung von 520,78 kWh (ohne Scale-up Maßnahme) sind die Bezugsquellen Steinkohle (0,234 kgSO_2 eq. ohne Scale-up-Maßnahme) und Strom aus erneuerbaren Energien (0,165 kgSO_2 eq.). Aufgrund der geringeren Stromfacht (361,94 kWh), welche durch das Scale-up benötigt wird, wurde eine Senkung von ca. 30 % gegenüber dem ursprünglichen Strombedarf erzielt. Demnach konnte das Versauerungspotential ebenfalls mit 30 % bezogen auf den Ursprungsprozess reduziert werden. Eine Senkung des Gesamt-Acidification Potentials von 0,414 KgSO_2 eq. auf 0,288 KgSO_2 eq. wurde durch die Scale-up-Maßnahme erreicht.

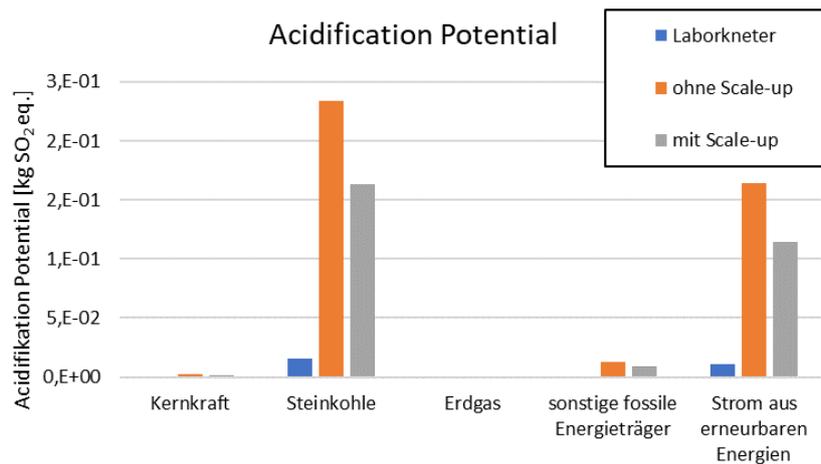


Abbildung 20. Gegenüberstellung des Umweltparameters Acidification Potential zwischen dem Laborkneter, dem Produktionskneter ohne Scale-up und mit Scale-up Maßnahme.

Das Eutrophication Potential gibt die Nährstoffanreicherung in Ökosystemen wie Gewässer, Flüsse und Meeren, verursacht durch bspw. Industrieabwässer, an. Dabei handelt es sich um eine unerwünschte Ansammlung von Nährstoffen wie Stickstoff oder Phosphat, welche eine Überdüngung von Gewässern, dessen Sedimenten und angrenzenden Trockenbereichen (Ufer) mit sich bringen. Dies führt unweigerlich zu übermäßigem Wachstum von Mikroorganismen (Algenblüte, Cyanobakterien) und Pflanzen. Beim Eutrophication Potential wird ein kg Phosphat äquivalent mit dem gesamten Bioprozess (u.a. Substrat, Stromverbrauch) in Relation gesetzt (bezogen auf 1 Kg Produkt). Der nachgelagerte Effekt der Senkung des Energiebedarfes durch eine geregelte Maßstabsübertragung zeichnete sich in Form der Senkung des Gesamt-Eutrophication Potentials von 0,081 kg_{Phosphate} eq. (ohne Scale-up) auf 0,057 kg_{Phosphate} eq. (mit Scale-up) ab. Hierbei nimmt die Energiegewinnung aus Steinkohle (53,38%) und Strom aus erneuerbaren Energien (38,20 %) ebenfalls den höchsten Stellenwert ein.

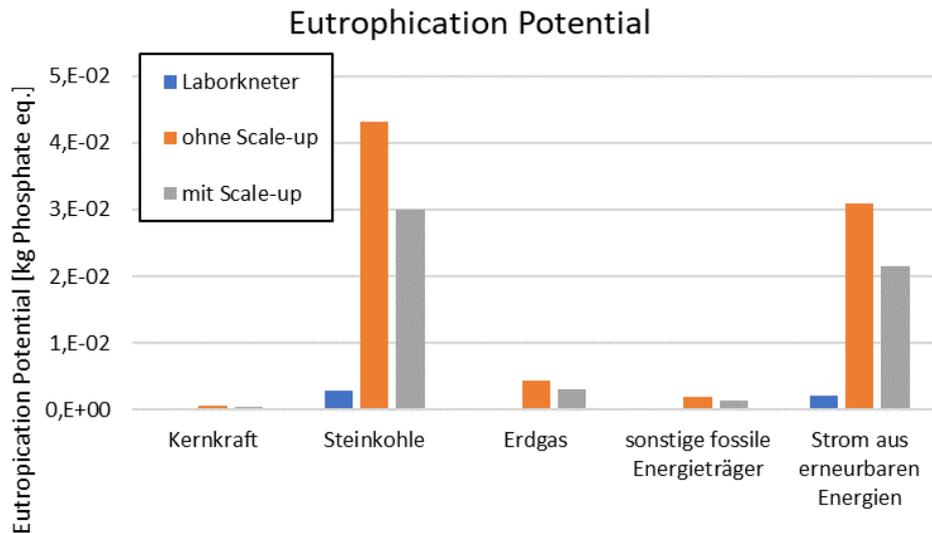


Abbildung 21. Gegenüberstellung des Umweltparameters Eutrophication Potential zwischen dem Laborkneter, dem Produktionskneter ohne Scale-up und mit Scale-up Maßnahme.

Das Human Toxicity Potential stellt einen berechneten Index dar, welcher den potenziellen Schaden einer in die Umwelt freigesetzten chemischen Einheit widerspiegelt, basierend auf der inhärenten Toxizität einer Verbindung und auf deren potenzieller Dosis. Auf Grundlage der hinterlegten Daten in der Gabi-Software wurden die Haupteinflussfaktoren Strom aus erneuerbaren Energien und Steinkohle selektiert. Anteilsmäßig nimmt die Stromerzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen mit 50,19 % (6,72 Kg DCB eq.) und Strom aus Steinkohle mit 36,96 % (4,95 Kg DCB eq.) den höchsten Stellenwert im Parameter Human Toxicity Potential ein. Die Gegenüberstellung des herkömmlich verursachten Human Toxicity Potentials mit dem selbigen nach der Scale-up Maßnahme zeigt auf, dass eine Verringerung von 13,38 kg DCB eq. auf 9,30 Kg DCB eq. erreicht wurde.

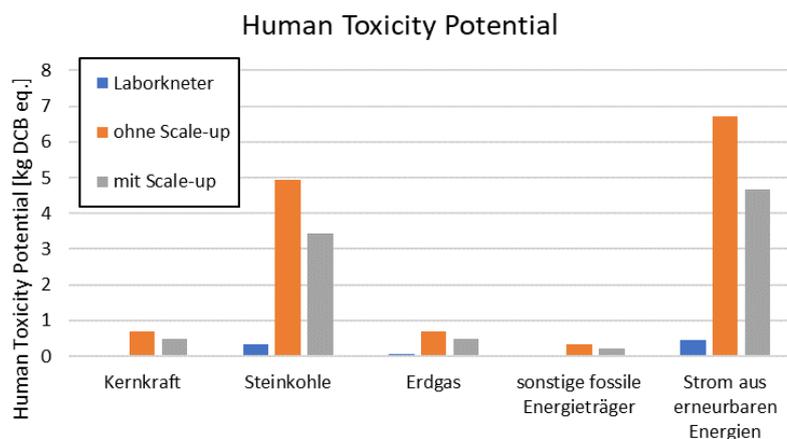


Abbildung 22. Gegenüberstellung des Umweltparameters Human Toxicity Potential zwischen dem Laborkneter, dem Produktionskneter ohne Scale-up und mit Scale-up Maßnahme.

Die Auswertung der umweltbezogenen Parameter zeigt auf, dass bzgl. des Strombedarfes eine Senkung des Acidification Potentials, Human Toxicity Potentials, Eutrophication Potentials und Global Warming Potentials durch das Scale-up vom Labor- in den Produktionsmaßstab erreicht und im Mittel die Umweltbelastung bzgl. der Energiebereitstellung anteilmäßig (30 %) gesenkt werden konnten.

Aufgrund fehlender Basisdaten hinsichtlich einer Rohstoffvorbehandlung, die in den jeweiligen Produktionsländern (u.a. Aufschluss, Zerkleinerung, Datenbankhinterlegung) stattfindet, wurde im Folgenden das Segment Transportwege und der damit einhergehende ökologische Fußabdruck in der Wertschöpfungskette betrachtet. Dafür wurden die Transportwege auf Grundlage der Herstellerangaben und deren Standorten kalkuliert. Exemplarisch an einem Riegel (Batch von 215 kg) betrachtet, wurden in Summe ca. 16300 km Transportstrecke durch aller im Riegel enthaltenen Rohstoffe zurückgelegt. Dies wurde für die getätigte Wegstrecke per Luftfracht (Cargo plane, 65 t, 371 kg Kerosin, 215 kg und 4,5 kg Fracht) mit 7400 km und die zurückgelegte Wegstrecke per Lastkraftwagen (Euro 5, 34 – 40 Tonnen, 27 Tonnen Ladekapazität, 215 kg und 4,5 kg Fracht) mit 8900 km kalkuliert (Tabelle 9). Der direkte Vergleich zwischen den Produktionsprozessen ohne Scale-up Maßnahme und mit Scale-up Maßnahme hinsichtlich der Transportwege kann unter der Annahme, dass eine Testproduktion durch einen Laborversuch substituiert wird, erfolgen. Die Resultate zeigen auf, dass aufgrund reduzierter Rohstofffracht im Laborkneter die betrachteten Einflussfaktoren auf die Umwelt sinken. Nunmehr würden 47,6 Spiralknetversuche im Labormaßstab (2,1 % der ursprünglichen Erstproduktionsversuche im Produktionsmaßstab) dieselben ökologischen Auswirkungen wie im Vergleich zu einem Erstproduktionsversuch ohne Vorbetrachtung der Riegelteigeigenschaften verursachen. Die CO₂ Emission, verursacht durch den Transport der Rohstoffe, beträgt für einen Batchansatz in der Produktion 917 kg CO₂ eq und demgegenüber im Labormaßstab 19,24 kg CO₂ eq. Auf Basis der Daten können durch die Minimierung der Erstproduktionsversuche im Produktionsmaßstab (215 kg) die Umweltauswirkungen reduziert werden.

Tabelle 9. Betrachtung der ökologiebeeinflussenden Potentiale in Abhängigkeit der Transportart und dem genutzten Herstellungsmaßstab.

Art	Transportart	Transportweg [Km]	Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO ₂ eq.]	Human Toxicity Potential [kg DCB eq.]	Eutrophication Potential [kg Phosphate eq.]	Acidification Potential [kg SO ₂ eq.]
mit und ohne Scale-up	Lastkraftwagen	8900,2	102	0,114	0,0542	0,2
	Flugzeug	7400	815	5,02	0,55	2,32
	Gesamt	16300,2	917	5,134	0,6042	2,52
Spiralkneter	Lastkraftwagen	8900,2	2,14	0,00239	0,00114	0,00419
	Flugzeug	7400	17,1	0,105	0,0115	0,0486
	Gesamt	16300,2	19,24	0,10739	0,01264	0,05279

Durch die Vorbetrachtungen und Untersuchungen im Labormaßstab sowie die Integrierung einer geregelten Maßstabsübertragung vom Labor- in den Produktionsmaßstab kann eine Senkung der Freisetzung von Emissionen und ökonomische Aufwendungen erfolgen. Durch die Findung von geeigneten regionalen und nationalen Rohstofflieferanten können perspektivisch die Transportwege und die damit verbundenen CO₂-Emissionen reduziert werden. Weiterhin muss für eine vollständige Bilanzierung entlang der Wertschöpfungskette die Datenlage insbesondere durch die Hersteller und Zwischenhändler ergänzt werden. Mit dem Scale-up Projekt werden sowohl die von den vereinten Nationen gesetzten Nachhaltigkeitsziele der Maßnahme zum Klimaschutz (SDG 13) durch die Senkung der Freisetzung von Treibhausgasen als auch der nachhaltige Konsum von Konsumenten und Produktion (SDG 12) durch Ressourceneinsparung und Minimierung des Rohstoffeinsatzes sowie zusätzlich das SDG 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur durch die Etablierung von neuartigen Umsetzungsinstrumenten in die Produktionsroutine bedient.

5. Diskussion

Inwieweit wurden die verfolgten Ziele erreicht?

Die im Forschungsvorhaben gesetzten Ziele der Findung von Einflussfaktoren auf die Riegelteigrheologie, wie die Viskosität in Abhängigkeit des eingesetzten Binders und Rohstoffes sowie die Ermittlung von potenziellen Übertragungskennzahlen als universaler Übertragungsfaktor, welcher mit weiteren Projektverlauf kontinuierlich angepasst wurde, wurden erfüllt (**Meilenstein 1 und 2**). Vorab wurde bereits eine Datenbank erstellt, welche durchgängig über die Projektlaufzeit hinaus weiter gepflegt wird.

Im weiteren Projektverlauf wurde eine Dimensionsanalyse unter Verwendung der ermittelten Einflussfaktoren erfolgreich vorgenommen. Durch den Abgleich von Labor- und Produktionsdaten wurde ein hausinterner Faktor (Newton-Faktor) ermittelt und für die Maßstabsübertragung vom Labor- in den Produktionsmaßstab angewandt. Damit wurde ein zielgerichtetes Maßstabsübertragungsmodell entwickelt und im Labor- sowie im Produktionsmaßstab getestet (**Meilenstein M3**).

Dem folgend wurden im Labormaßstab riegelspezifische Wirkarbeiten messtechnisch erfasst und unter Anwendung des Scale-up Modells die im Produktionsbereich anzuwendenden Leistungseintrag (KJ) ermittelt. Der jeweilige Leistungseintrag wurde im Produktionsmaßstab positiv getestet, sodass darauffolgend Reihenversuche vorgenommen wurden. Dazu wurde der jeweilige Leistungseintrag für mehrere zeitlich aneinandergereihten Knetvorgängen fixiert. Dies wurde für verschiedene Riegelrezepturen getestet und die nachgelagerte Verarbeitbarkeit auf der Riegelinie betrachtet. Es konnten bis dato keine Abweichungen hinsichtlich schlechterer bis hin zu keiner Verarbeitbarkeit aufgrund von fließenden Teigen oder bröckelnden Teigen (z.B. nach Hackmesser) detektiert werden. Die Etablierung des entwickelten Scale-up Verfahrens im Labor- und Produktionsbereich konnte erfolgreich umgesetzt werden (**Meilenstein 4**).

Im Laufe des Projektes wurden sowohl der bestehende als auch der neue Prozess einer Nachhaltigkeitsbewertung unterzogen. Dazu wurden wirtschaftliche und ökologische Aspekte betrachtet. Die Erstellung einer Nachhaltigkeitsbewertung mit Fokus auf die ökonomische- und ökologische Effizienz wurde erfolgreich vorgenommen (**Meilenstein M5**).

Woraus ergaben sich die Abweichungen der erhaltenen Ergebnisse?

Im laufenden Projekt wurden keine Abweichungen hinsichtlich der Ergebnisse festgestellt.

Wie gestaltet sich die Arbeit mit unterschiedlichen Kooperationspartnern?

Das von der DBU geförderte Forschungsvorhaben wird ausschließlich von der anona GmbH durchgeführt.

6. Öffentlichkeitsarbeit

Wie werden die Ergebnisse veröffentlicht?

Auf Basis des bisher erlangten Wissensstandes können die generierten Untersuchungsergebnisse unmittelbar nach deren Auswertung im Produktionsbereich praktisch umgesetzt werden. Eine Optimierung des Knetprozesses soll einen Rohstoffmehrabbedarf verhindern und den gesamten Produktionsprozess nachhaltiger gestalten. Das entwickelte Scale-up-Modell kann als Grundlage in der Lebensmittelbranche Einsatz finden, mit dem Ziel andere Unternehmen hinsichtlich ihres Ressourceneinsparungspotenzial zu sensibilisieren. Dies soll bspw. in Form von Fachvorträgen oder Publikationen erfolgen.

Wer partizipiert an den Ergebnissen?

Durch die vollständige apparative und verfahrenstechnische Charakterisierung der Knetsysteme sowie die mathematische Herangehensweise zur Ermittlung von Kennzahlen mit dem Ziel einer passgenauen Maßstabsübertragung vom Labor- in den Produktionsmaßstab können andere lebensmittelverarbeitende Unternehmen mit dem im Forschungsvorhaben generierten Know-how in Form von Fachartikeln, auf Fachmessen sowie Vorträgen bedient werden.

Wird das Vorhaben über die Projektlaufzeit weitergeführt?

Im Anschluss an das Forschungsprojekt wird eine Erweiterung der Riegelproduktion in Form der Anschaffung einer neuen Riegelproduktionsanlage durchgeführt (Eigenfinanzierung). Die im Vorhaben generierten Daten und die daraus resultierenden Maßstabsübertragungsregeln sollen in der kompletten Riegelproduktion (Knetvorgang) inkl. der neuen Riegelproduktionsanlage intern und extern Anwendung finden. Durch eine vollständige apparative und verfahrenstechnische Charakterisierung der Rührbehälter und des Spiral- sowie Wendelkneters kann für zukünftige Erstproduktionen oder bei Teigrezepturänderungen ein vollständiges Scale-up-Konzept angewendet werden mit dem Ziel der Minimierung von Ausschüssen bei der Riegelherstellung. Dies ermöglicht eine dauerhafte schnelle und effiziente Übertragung sowie Umsetzung des Prozesses vom Labor- in den Produktionsmaßstab. Durch die Integration des Maßstabsübertragungsmodells in den laufenden Produktionsprozess werden kontinuierlich Daten generiert, welche detaillierte Aussagen über die Effektivität der Maßstabsübertragungsregeln sowie ökonomischen und ökologischen Vorteile gegenüber den bestehenden Maßstabsübertragungsverfahren liefern.

7. Fazit

Hat sich die Vorgehensweise bewährt?

Die Vorgehensweise wurde beibehalten und die im Projektantrag aufgeführten Arbeitspakete und Meilensteine vollständig im vorgegebenen Zeitraum erfüllt.

Werden Änderungen der Zielsetzung notwendig?

Änderungen in der Zielsetzung des Forschungsvorhabens waren nicht notwendig.

8. Anhang

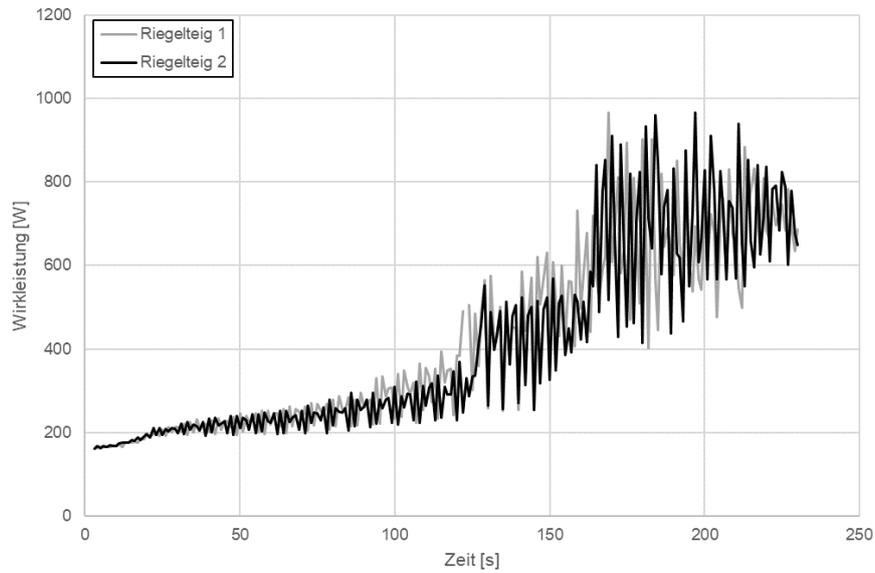


Abbildung 23. Darstellung der getätigten Wirkarbeit (Doppelbestimmung) einer Riegelteigmasse im Labormaßstab.

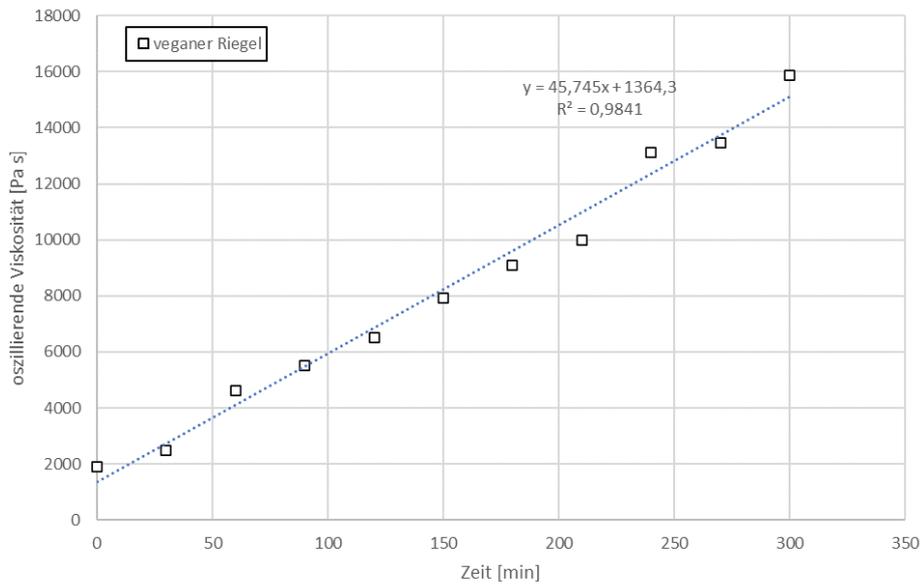


Abbildung 24. Darstellung des Kurvenverlaufes der Riegelteigviskosität über die Standzeit von 300 min.

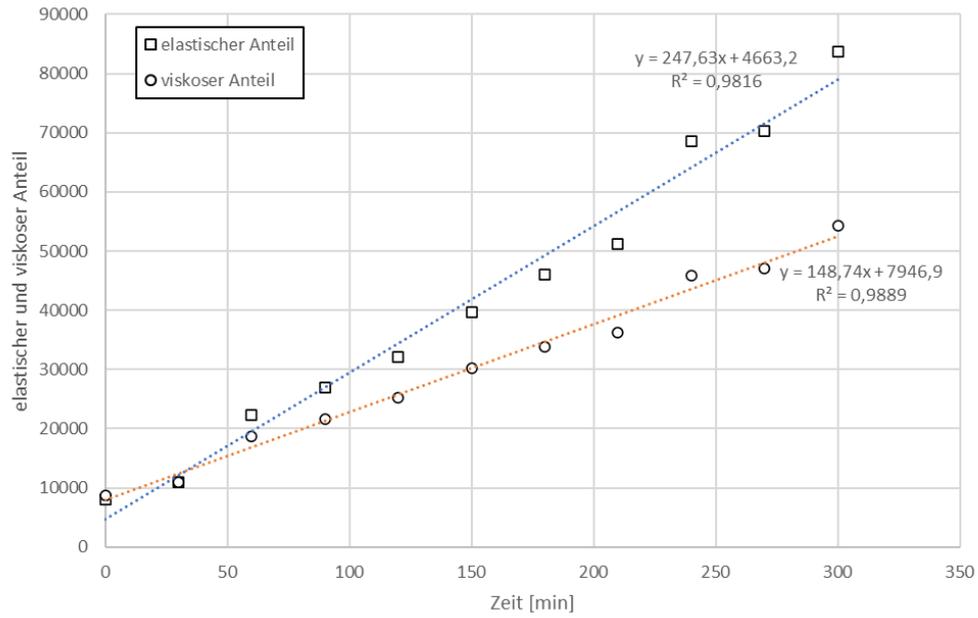


Abbildung 25. Darstellung des Kurvenverlaufes vom elastischen und viskosen Anteil über die Standzeit einer veganen Riegelteigmasse.

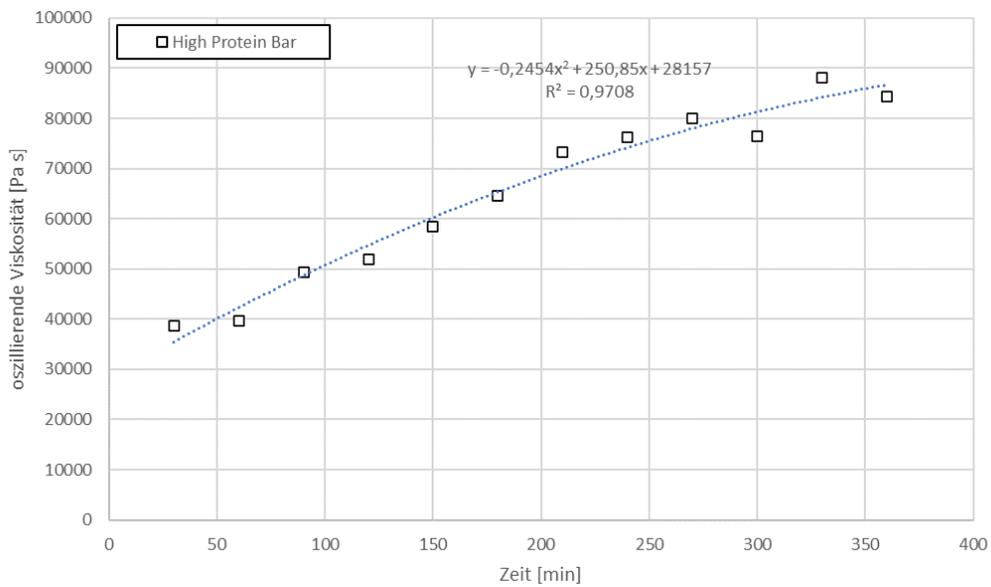


Abbildung 26. Darstellung des Kurvenverlaufes der Riegelteigviskosität über die Standzeit von 300 min.

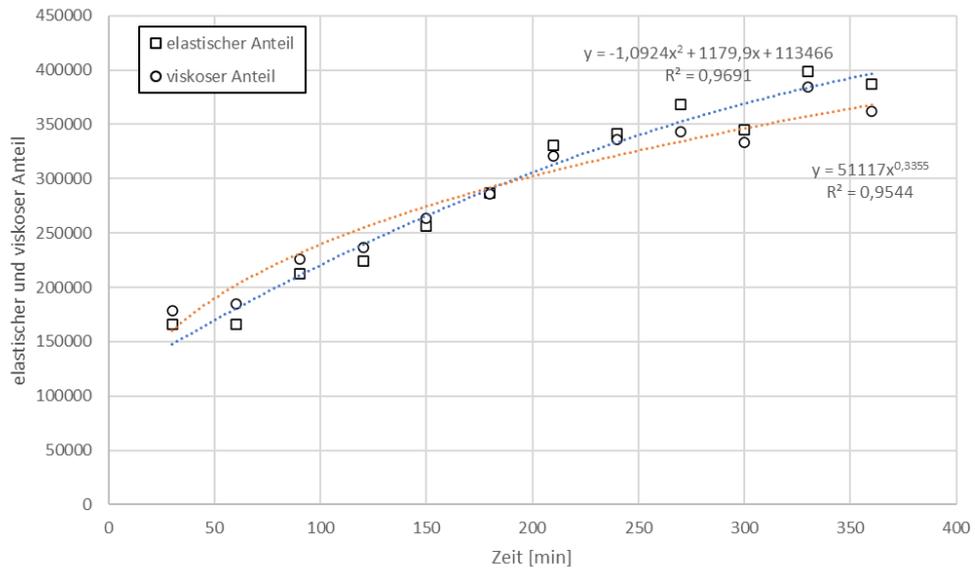


Abbildung 27. Darstellung des Kurvenverlaufes vom elastischen und viskosen Anteil über die Standzeit eines High Protein Bars.