

Abschlussbericht

Nr.: 19-Häussler-BA3149-01

Titel: Lastannahmen für Teigknetmaschinen

Autor: Kuttner Thomas, Prof. Dr.-Ing.

ORCID: 0000-0002-4227-6297

Projekt: Lastannahmen für Teigknetmaschinen

Vertrag Nr.: BA3149 / 43.4310.026/2252/01

Zeitraum: 01/2019 bis 07/2019

Datum: 10.02.2020

Seitenzahl: 22

ISBN: 978-3-943207-42-2

DOI: 10.18726/2020_4

URN: urn:nbn:de:bvb:706-6419

Verteiler: Beatrice Urban, Robert Mayer
Karl-Heinz Häussler GmbH
Backofenbau
Nussbaumweg 1
88499 Heiligkreuztal

1 Kurzfassung

Zur Messung der Betriebslasten an Teigknetmaschinen ist eine Maschine mit Messstellen für Drehmomente, Drehzahl, Temperaturen und elektrische Größen ausgerüstet worden. In einem umfangreichen Versuchsprogramm von 27 Einzelmessungen wurden Betriebslasten für zwei verschiedene Teigarten und Füllmengen generiert. Mit den Methoden der Signalanalyse und der Rainflow-Zählung sind repräsentative Lastkollektive für die Bemessung von Antriebskomponenten abgeleitet worden.

2 Einleitung

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse zusammen, welche im Zeitraum von Februar bis Juli 2019 im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens mit Firma K. H. Häussler GmbH & Co. KG erzielt wurden. Das Vorhaben ist durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg unter Vertrag Nr. 43-4310.026/2252/01 gefördert worden.

Immer raschere Innovationszyklen bedingen im Produktentstehungsprozess ständig höhere Anforderungen hinsichtlich Qualität, Zeit und Kosten. Diese Entwicklung betrifft auch und gerade kleine und mittelständische Unternehmen. Eine zeit- und kostenaufwändige Entwicklung über mehrere, durch Versuch und Irrtum bestimmte Schritte kann und will sich die Industrie nicht mehr leisten. Hier setzen moderne Methoden an, welche in einer frühen Phase der Entwicklung abgesicherte Ergebnisse für den weiteren Prozess der Konstruktion und Entwicklung von Baugruppen und Komponenten liefern.

Zur zuverlässigen und wirtschaftlichen Auslegung von Teigknetmaschinen sollen Lastannahmen ermittelt und im Konstruktionsprozess Regeln für eine sichere und kostengünstige Dimensionierung abgeleitet werden. An Teigknetmaschinen stellt der Kunde vielfältige Anforderungen. Das Qualitätsversprechen, die Leistungsanforderungen und die erwartete Langlebigkeit der Produkte befinden sich im Spannungsfeld mit der Forderung des Marktes nach Kosteneinsparung und Wirtschaftlichkeit. Für den Prozess der Produktentwicklung bedeutet dies, dass das Produkt gleichzeitig langlebig und kostengünstig ausgelegt werden muss.

In diesem Vorhaben sollen die auftretenden Belastungen an Teigknetmaschinen gemessen werden und daraus mit den Mitteln der Statistik sichere Lastannahmen für den Konstruktionsprozess abgeleitet werden. Diese Lastannahmen sollen mit Ergebnissen aus Dauerläufen gegenübergestellt werden, um einen versuchstechnischen Nachweis der Produktqualität zu erhalten.

Damit sollen dem Konstruktions- und Auslegungsprozess Regeln in die Hand gegeben werden, um ausfallsichere, zuverlässige und nachhaltige Produkte zu schaffen, die sich jedoch gleichzeitig wirtschaftlich am Markt behaupten können. Mit der Fertigung am Standort Deutschland sichert damit diese Innovation die Position der Fa. Häussler am Markt nachhaltig und trägt dazu bei, die Marktführerschaft weiter aufrechterhalten und ausgebaut wird.

3 Beschreibung des Arbeitsprogrammes

3.1 Wissenschaftliche Tätigkeiten im Rahmen des Innovationsgutscheines A

In der beantragten Projektphase soll ein Konzept für die Messungen der Lasten an Teigknetmaschinen entwickelt werden. Hierzu werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Definition von Testszenerarien (Kunden, Nutzungsprofile, Teige)
- Definition des Messaufbaues an der Maschine (max. Drehzahl, max. Moment, max. Messdauer, usw.)

- Definition der verwendeten Sensorik
- Testinstallation und Inbetriebnahme der Sensorik
- Dokumentation

Meilenstein für diese Projektphase sind der funktionsfähige Testaufbau und der Nachweis der Machbarkeit in einem Bericht.

3.2 Umsetzungsorientierte Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Rahmen des Innovationsgutscheins B

Für die Umsetzungsphase sind folgende Arbeitspakete definiert:

- Aufstellung einer Testmatrix (repräsentative Nutzung)
- Installation der Sensorik an der Maschine
- Vernetzung von Antrieb, Sensorik, Datenerfassung und Steuerung
- Implementierung der Mess- und Steuersequenzen
- Messung der Lasten aus der Testmatrix
- Ableitung von Standard-Versuchen (Maximal-Lasten, äquivalente Dauerlasten)
- Dauerläuferprobung mit Versuchslasten
- Dokumentation

Meilenstein für den Abschluss der Projektphase sind definierte Lastannahmen und Ergebnisse aus Dauerläufen.

Da der Prototyp der Maschine mit Beginn der Arbeiten am IG A nicht vorhanden war, wurde die Machbarkeitsstudie in Absprache mit dem Auftraggeber am Vorläufermodell durchgeführt. Das Arbeitsprogramm des IG B wurde nach Bereitstellung eines Prototyps im Zeitraum Februar bis Juli 2019 abgearbeitet. Teilbereiche der Methodenentwicklung wurde in [1] und [2] beschrieben.

4 Konzept der Messung an der Teigknetmaschine (IG A)

4.1 Testszenarios

Die Messungen sollen jeweils mehrfach beim Kneten von zwei unterschiedlichen Teigarten erfolgen, die sich in ihrem Wassergehalt und somit der Festigkeit unterscheiden. Diese Teige entsprechen den extremen Szenarien in der repräsentativen Nutzung. Die Zusammensetzungen mit den entsprechenden Knetparametern sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Rezepte und Knetzeiten von Bauernbrot und Brezeln

Rezept 1: Bauernbrot		Rezept 2: Brezeln ¹	
Zutat	Menge in g	Zutat	Menge in g
Mehl	1000	Mehl	1000
Wasser	700	Wasser	550

Knetzeiten		Knetzeiten	
Stufe	Dauer in min	Stufe	Dauer in min
3	4	3	5
4	6	4	5

Um die thermischen Grenzen des Antriebs auszuloten, soll die Motor- und Gehäusetemperatur bei fünfmaligem Betrieb mit der Höchstmenge gemessen werden.

4.2 Definition des Messaufbaues

Als Messaufbau wurde der Antriebsstrang mit den Übersetzungen des Getriebes zugrunde gelegt. Es erfolgte die Messung der Drehmomente am Knethaken und an der Schüssel sowie der Temperaturen und elektrischer Größen. Der gesamte Messaufbau ist in Abb. 1 ersichtlich, der Antriebsstrang ist in Abb. 2 detailliert dargestellt.

¹ bzw. Brezn

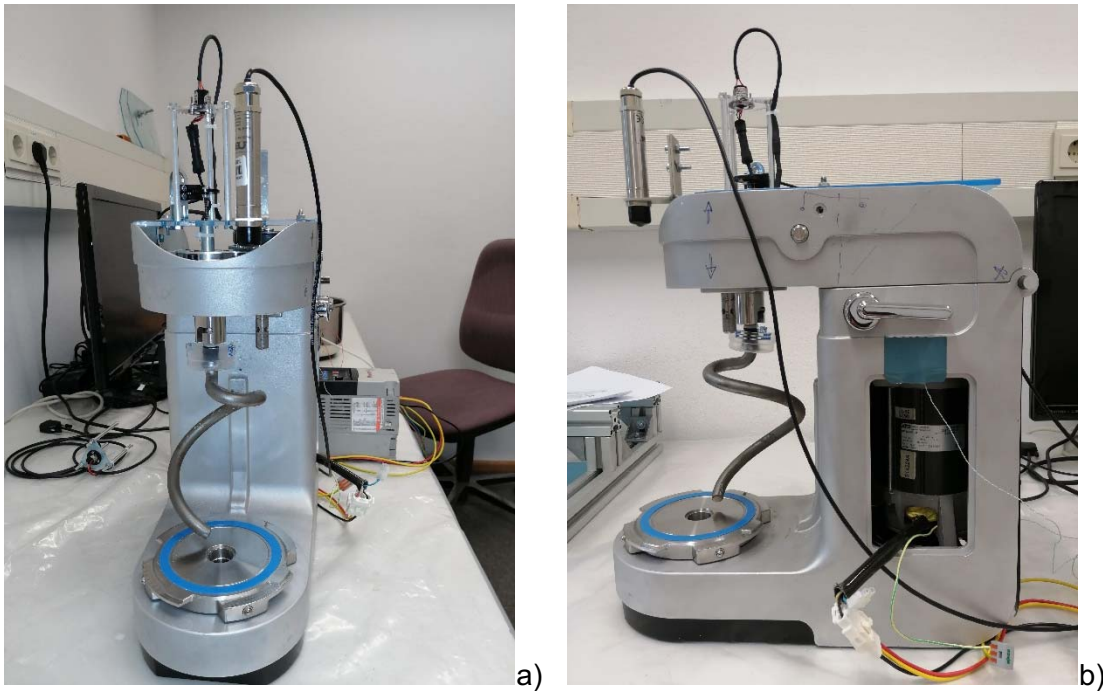


Abb. 1: Maschine mit Messaufbau a) Vorderansicht, b) Seitenansicht

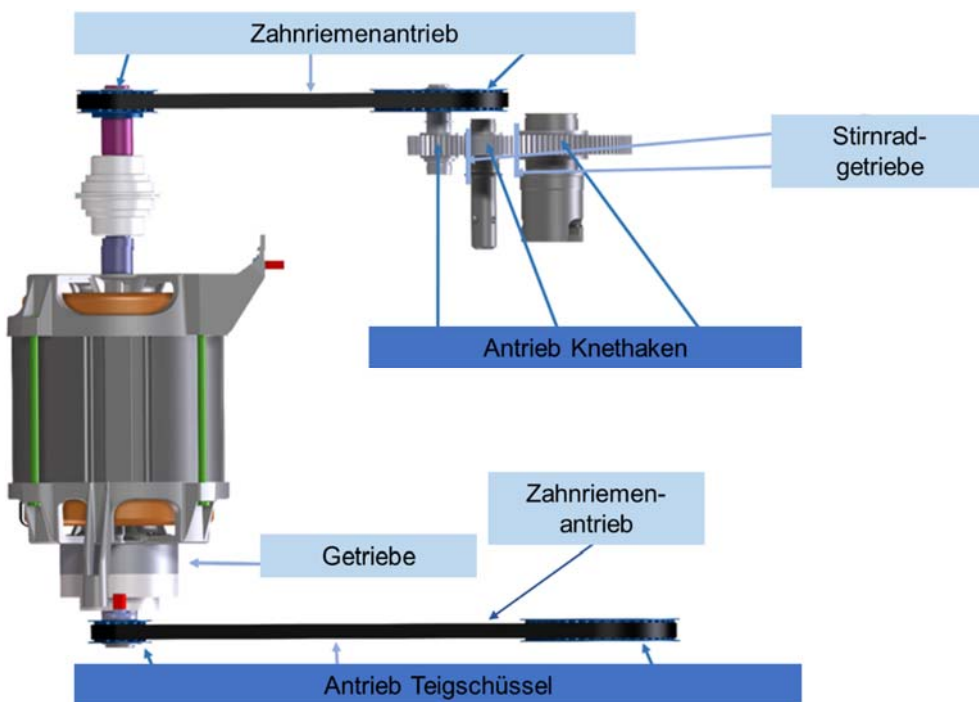


Abb. 2: Antriebskonzept

Die Kennlinie des Motors wurde wie folgt hinterlegt und diente der Definition der verwendeten Messbereiche (Abb. 3).

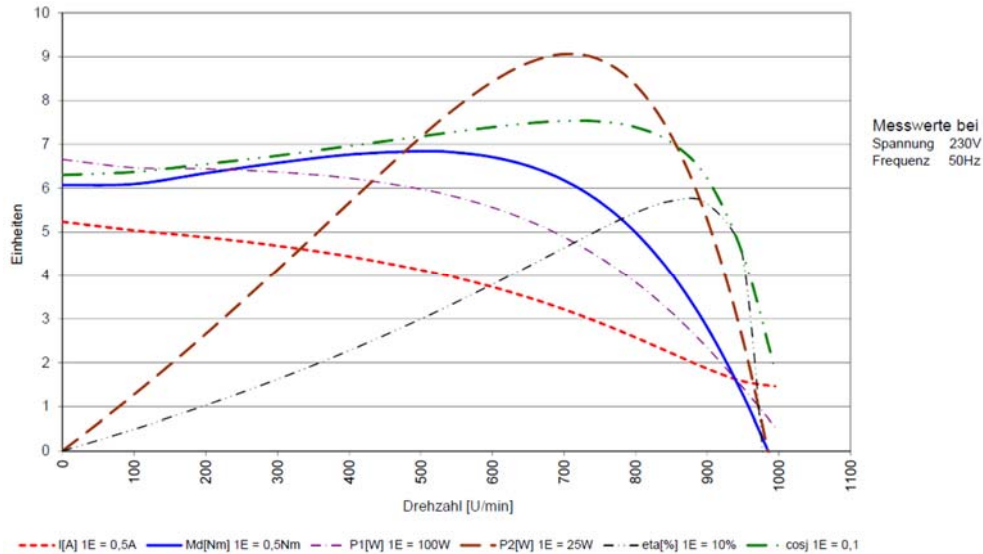


Abb. 3: Motorkennlinie

4.3 Definition der Sensorik

Folgende Größen werden gemessen und aufgezeichnet:

- Dynamische Größen: Drehmomente am Schaft der Knethaken, an der Schüsselwelle und am oberen Ende der Motorwelle.
- Kinematische Größen: Drehzahl am Knethaken
- Temperaturen: am Motor, des Gehäuses und des Teiges.
- Elektrische Größen: Spannung, Strom, Wirkleistung, Scheinleistung und Phasenwinkel
- Abgeleitete Größen: Aus dem Drehmoment und Drehzahl am Knethaken berechnet sich die mechanische Leistung, die in den Teig eingetragen wird. Ebenso wird der Wirkungsgrad aus dem Quotienten von mechanischer Leistung und Wirkleistung des Motors berechnet.

4.4 Testinstallation und Inbetriebnahme

Die Testinstallation beschränkte sich auf die Messtechnik für das Drehmoment. Als besondere Problematik stellten sich die beengten Platzverhältnisse im Antriebsstrang heraus, die den Einsatz von handelsüblichen Torsionsmesswellen zur Messung des Antriebsmoments als unmöglich gestalteten. Deshalb sind der Knethaken und das Antriebsrad des Teigkessels mit Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert worden (Abb. 4). Knethaken und Antriebsrad sind damit gleichzeitig Teil des Antriebsstranges und Sensor. Die Messung an der Motorwelle musste jedoch verworfen werden, da der geringe Bauraum keine Applikation von Dehnungsmessstreifen zuließ.

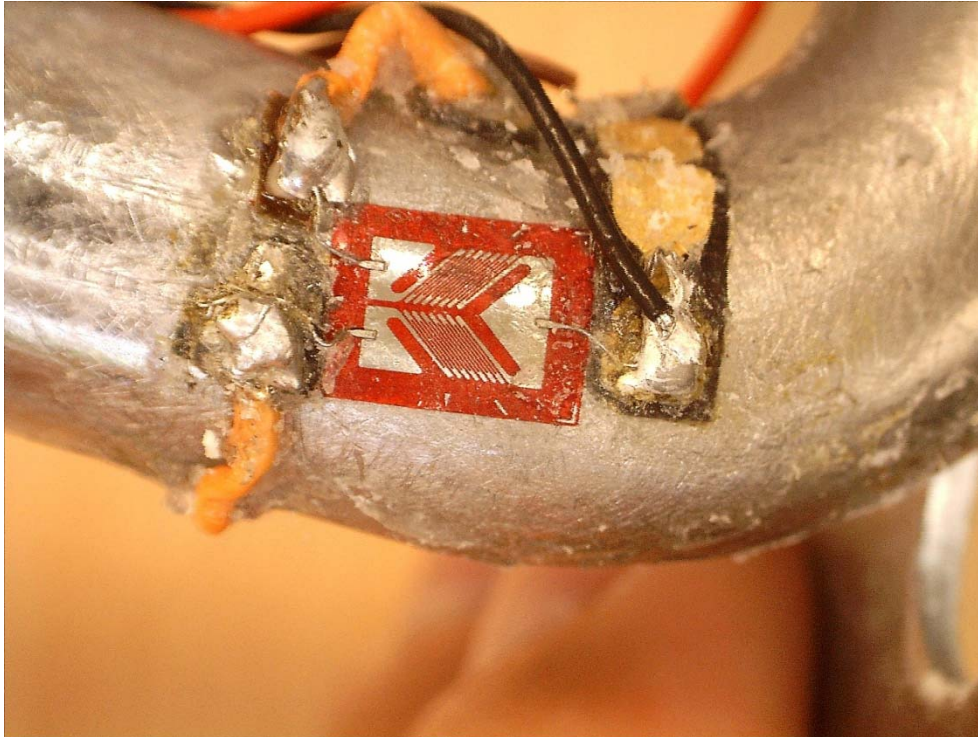


Abb. 4: Applikation der Messstelle mit Dehnungsmessstreifen am Knehtaken

Es kam eine sog. Vollbrückenschaltung mit vier Dehnungsmessstreifen zum Einsatz. Jede Messstelle wurde kalibriert, d. h. zum gemessenen elektrischen Signal in mV/V wird ein mechanischer Wert des Drehmoments in Nm hinterlegt (Abb. 5).

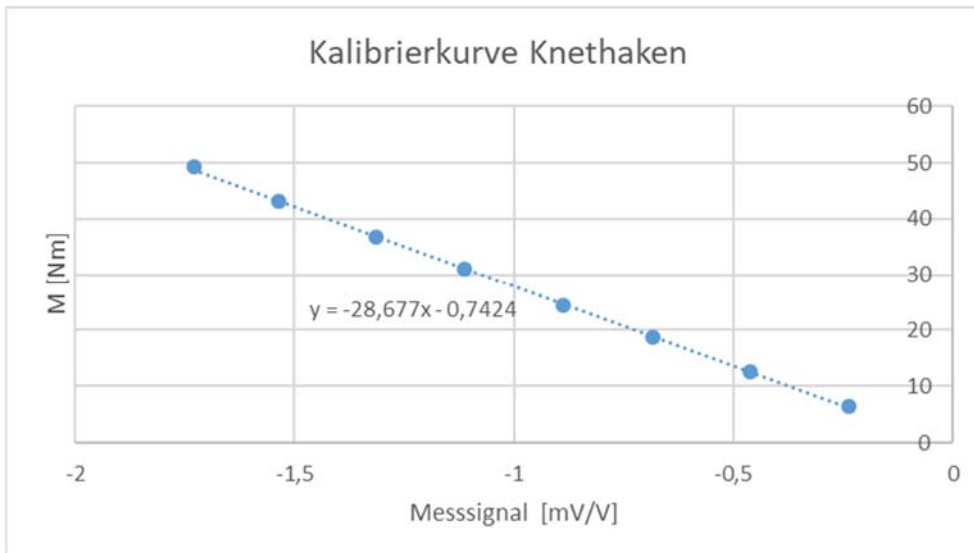


Abb. 5: Kalibrierkurve des Knehtakens

Exemplarisch ist eine Kalibrierkurve des Knehtakens abgebildet. Auffällig ist die hohe Empfindlichkeit und die sehr gute Linearität der Kalibrierkurve.

Eine weitere technische Herausforderung war die Signalübertragung der rotierenden Bauelemente zur ortsfesten Messtechnik. Hier kam ein sog. Schleifringübertrager (Abb. 6) zum Einsatz. Um eine kostengünstige Lösung zu verwirklichen, wurde auf den Einsatz eines speziellen Schleifringsübertragers für DMS verzichtet. Vielmehr kam ein Schleifringübertrager zum Einsatz, der für Videosignale in der Bildübertragung verwendet wird. Aus der praktischen An-

wendungsbeobachtung konnte eine hervorragende Praxiseignung dieses „off label use“ bescheinigt werden. Die Kabel sind mit einem Steckkontakt versehen, damit diese getrennt werden können und der Knethaken ausgetauscht werden kann.



Abb. 6: Schleifringübertrager zur Verbindung mit dem Messverstärker

5 Messaufbau, Ergebnisse und Auswertung (IG B)

5.1 Aufstellung einer Testmatrix der repräsentativen Nutzung

Die in der vorangegangenen Projektphase erstellte Matrix wurde als sinnvoll angesehen und für diese Messkampagne übernommen.

5.2 Installation der Sensorik an der Maschine

An der Maschine wurde die in der vorangegangenen Projektphase entwickelte und erprobte Messtechnik appliziert:

- Drehmomente und Drehzahl am Schaft der Knethaken und an der Schüsselwelle
- Drehzahl über einen Inkrementalgeber (Gabellichtschranke, Abb. 7b)
- Temperatur am Motor, am Gehäuse und im Teig.
- Spannung, Strom, Wirkleistung, Scheinleistung und Phasenwinkel

Aus dem Drehmoment und Drehzahl am Knethaken wurde die mechanische Leistung berechnet, die in den Teig eingetragen wird. Ebenso wird der Wirkungsgrad aus dem Quotienten von mechanischer Leistung und Wirkleistung des Motors berechnet.

Die Temperaturmessung erfolgte am Motor und am Gehäuse mit handelsüblichen Thermo-Elementen. Für die Messung des Teiges kam ein berührungsfreier Infrarot-Tempersensor (Abb. 7a) zum Einsatz, der vor der Messung ebenfalls kalibriert wurde. Um den Emissionsgrad des Teiges zu berücksichtigen, erfolgte die Kalibrierung mit Teigen, deren Temperatur mit einem Präzisions-Einsteckthermometer für den Laborbetrieb erfasst wurde.

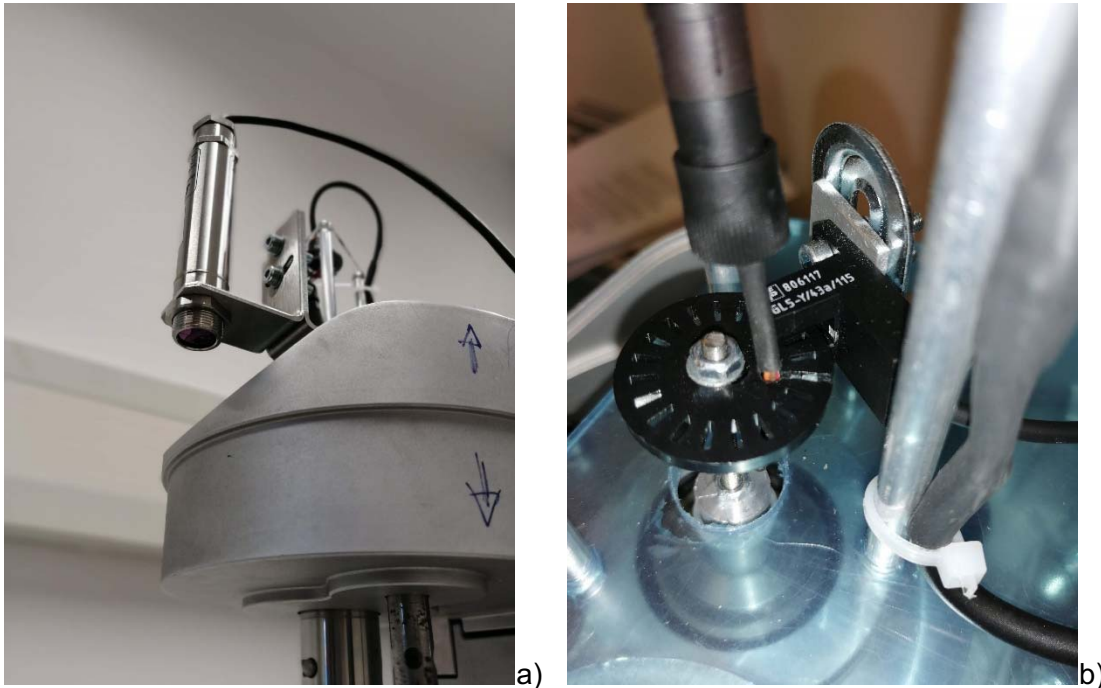


Abb. 7: Berührungsloser Infrarot-Tempersensur (a),
Inkrementalgeber zur Drehzahlmessung (b)

5.3 Vernetzung von Antrieb, Sensorik, Datenerfassung und Steuerung

Die Datenerfassung erfolgte in einem Messsystem Q-Brixx der Fa. Gantner, welche die Messung sämtlicher mechanischer und elektrischer Größen mit einem System ermöglichte (Abb. 8). Hierfür wurden folgende Module verwendet:

- A106 Brückenschaltung zur Messung der Drehmomente
- D101 Digitaler Eingang: Drehzahl
- A107 Universalmodul: Messung der Temperaturen
- A127 Elektrische Leistungen

Für die Leistungsmessung wurde die Spannung parallel zum Verbraucher und der Spannungsabfall über einen Nebenwiderstand (Shunt) als Funktion der Zeit gemessen (Abb. 8, oben im Bild). Daraus werden Wirkleistung, Scheinleistung und der Phasenwinkel berechnet.

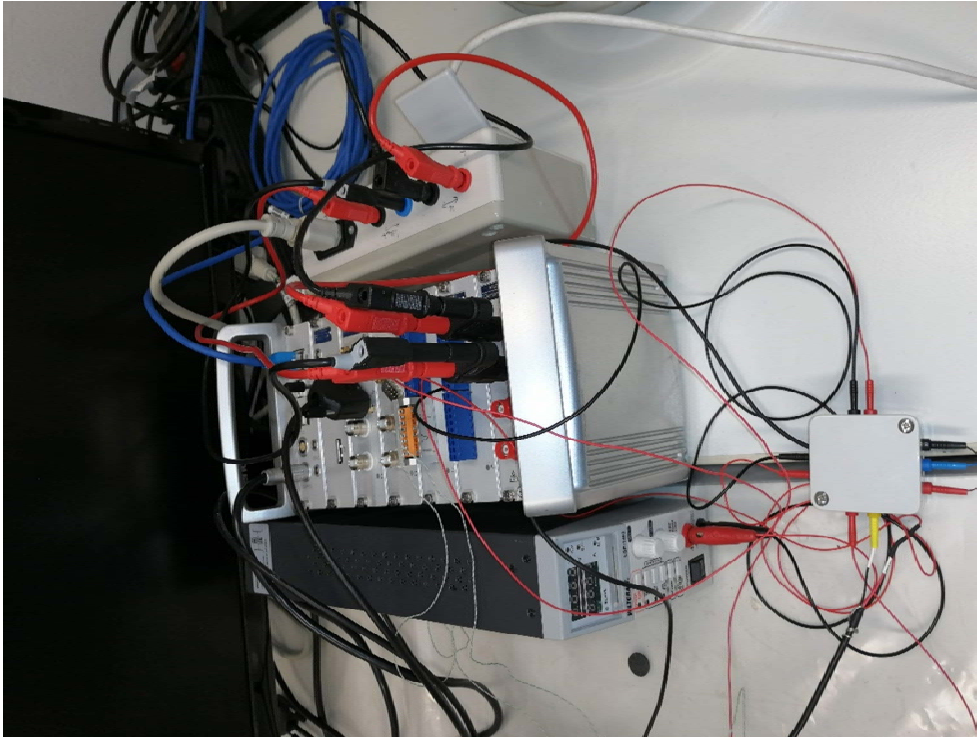


Abb. 8: Messverstärkersystem Q-Brixx

5.4 Implementierung der Mess- und Steuersequenzen

Mittels Skriptprogrammierung in der Benutzeroberfläche des Messsystems wurde eine automatisierte Auswertung ermöglicht. Anschließend wurden die Daten in die Software DIADEM portiert und dort über ein Skript die Lastdaten analysiert. Hierzu kam der sog. Rainflow-Algorithmus zum Einsatz [3]. Die Rainflow-Zählung erfolgt wie beim Regenfluss von Dach zu Dach (siehe Abb. 9). Trifft der Regen auf ein überhängendes Dach, tropft der Regenfluss nach rechts ab und trifft auf das darunter liegende Dach. Der Regen kann durch Überwindung von Barrieren weiter fließen, bis dieser wieder auf ein Dach trifft. Der Zählalgorithmus läuft wie folgt ab:

- Startpunkt: globales Maximum oder Minimum
- Ein voller Zyklus (Schwingspiel) ist definiert über die Umkehrpunkte (Minimum – Maximum – Minimum bzw. Maximum – Minimum – Maximum). Der volle Zyklus besteht aus zwei Halbzyklen, welche den Zyklus öffnen und schließen.
- Im Zählverfahren werden Paare aus öffnenden und schließenden Halbzyklen gesucht und deren Start- und Zielklasse gespeichert. Folgt auf einen öffnenden Zyklus nicht sofort ein schließender Zyklus, so werden die Ergebnisse zwischengespeichert, bis ein passender Halbzyklus gefunden ist.
- Zwei Halbzyklen ergeben einen vollen Zyklus. Übrig gebliebene Halbzyklen werden als *Residuen* bezeichnet.

Aus der Auflistung von Start und Ende jedes vollen Zyklus lassen sich Schwingbreite und Mittelwert errechnen (siehe Beispiel in Tab. 2).

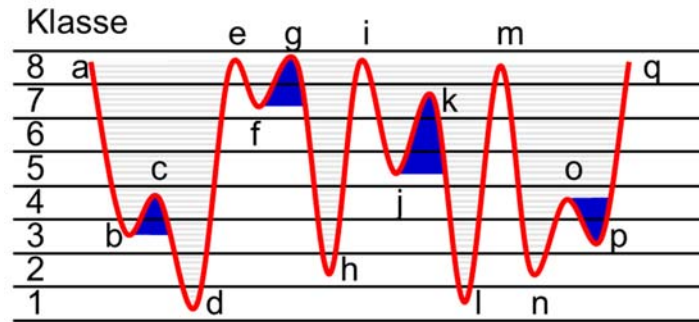


Abb. 9: Prinzip der Rainflow-Zählung

Tabelle 2: Ergebnisse der Rainflow-Zählung

Vollzyklus	von		nach	Schwingbreite	Mittelwert
a-d-e	8	→	1	7	5
b-c-b	3	→	4	1	4
e-h-i	8	→	2	6	5
f-g-f	7	→	8	1	7
i-l-m	8	→	1	7	5
j-k-j	5	→	7	2	6
m-n-q	8	→	2	6	5
o-p-o	4	→	3	1	4

Eine Form der Auftragung ist die sog. Rainflow-Matrix, bei der die Häufigkeiten über Start- und Endklasse aufgetragen werden (Abb. 10). Durch Spiegelung der oberen Dreiecksmatrix der Vollmatrix an der Diagonalen erhält man die Halbmatrix. Es geht durch diese Operation die Information verloren, ob der Zyklus von einem Maximum oder Minimum beginnend durchlaufen wird. Für die Betriebsfestigkeit ist diese Information jedoch ohne Belang und die Daten werden weiter verdichtet.

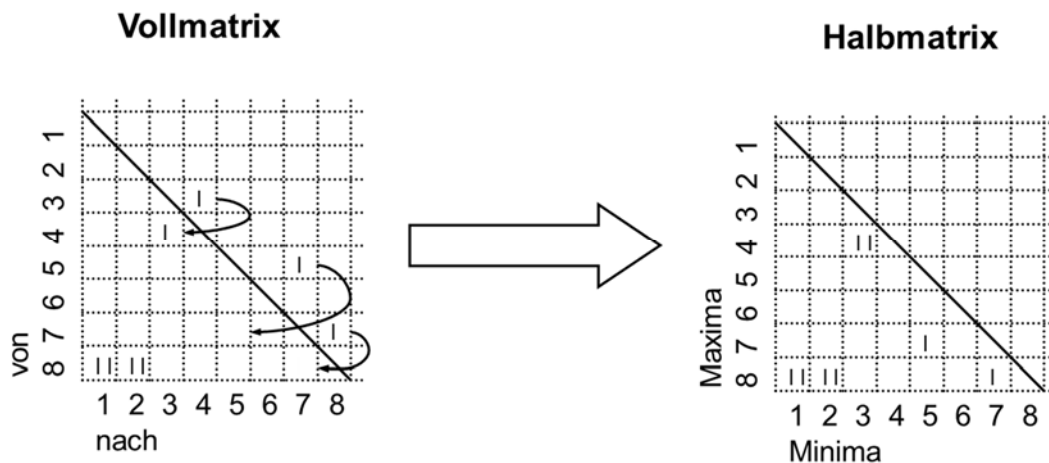


Abb. 10: Erzeugung der Halbmatrix aus der Vollmatrix

Aus der Halbmatrix werden aus jedem Matrixfeld die Schwingbreite, Mittelspannung und Häufigkeit für die Darstellung als Amplitudenkollektiv entnommen. Als Häufigkeit sind in den Halbmatrizen die Stufenhäufigkeiten h_i enthalten. Im Amplitudenkollektiv werden die Stufenhäufigkeiten zu den Summenhäufigkeiten H_i aufsummiert. Die Darstellung des Amplitudenkollektivs erfolgt über die Auftragung der Beanspruchungsamplituden (Klasse i oder Spannungsamplitude σ_i) über der Summenhäufigkeit (Abb. 11). Die Mittelspannung σ_m bzw. das R-Verhältnis ($R = \sigma_u / \sigma_o$) ist konstant.

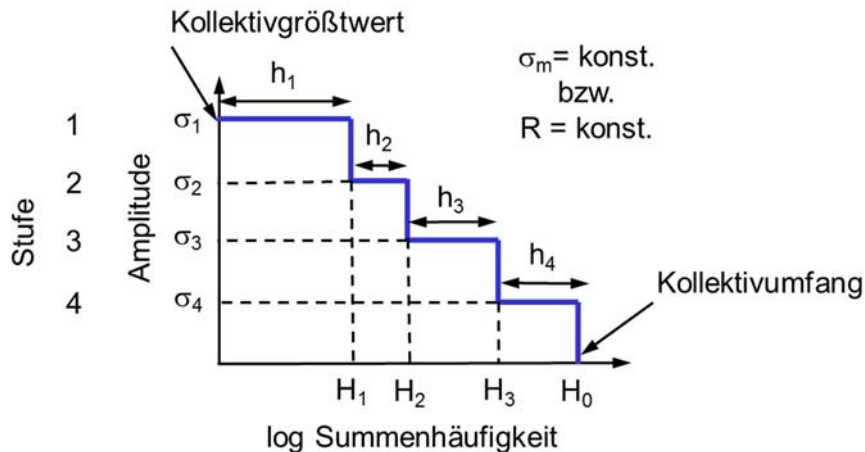


Abb. 11: Charakteristische Größen am Amplitudenkollektiv

5.5 Messung der Lasten aus der Testmatrix

Das umfangreiche Versuchsprogramm und dessen Ergebnisse sind in Anlage 1 enthalten.

Zunächst werden die Amplitudenkollektive am Kneithaken und an der Schüssel für die normmenge 1000 g dargestellt. Exemplarisch wird die Auswertung für Messung 18 (Brezelteig, 1000 g) beschrieben und der Messung 21 für Brotteig (1000g) gegenübergestellt.

Die Messungen werden in drei Abschnitten zu jeweils 5 min verglichen, um zeitliche Änderungen des Drehmomentes erfassen zu können (Abb. 12).

Das maximale Drehmoment dieser Messung für Brezelteig beträgt 28 Nm. Ab einer Knetzeit von 10 min sinkt das Drehmoment leicht ab. Dies entspricht der Erfahrungstatsache, dass der Teig bei längerer Knetzeit weniger elastisch ist und schließlich zerfällt. Mit ansteigender Knetzeit werden die Eiweißbrücken im Mehl erst aufgebaut, was einen zäh-elastischen Teig ergibt; mit weiter steigender Knetzeit zerfallen diese und der Teig verliert die gewünschten Eigenschaften.

In den Zeitscheiben von 5 min Dauer sind jeweils 5700, 3000 und 3200 Schwingspiele gemessen worden. Für die Form des Kollektivs ist auffällig, dass in der höchsten Beanspruchungsklasse 113, 13 und 2 Schwingspiele in den Zeitscheiben enthalten sind. Zu den geringeren Beanspruchungsklassen fällt das Kollektiv in Form einer Geradenverteilung (in der halblogarithmischen Darstellung) ab.

Für den Brotteig (Messung 21) erhält man ein maximales Drehmoment von 26 Nm und in den drei Zeitscheiben jeweils 5500 Schwingspiele (Abb. 13). Wiederum ist ein geringer Abfall des maximalen Drehmoments nach 10 min Knetzeit festzustellen. Die Verteilung ist wiederum ein Rechteckkollektiv mit überlagerter Geradenverteilung. In der höchsten Beanspruchungsklasse betragen die Schwingspielzahlen 60, 6 und 1.

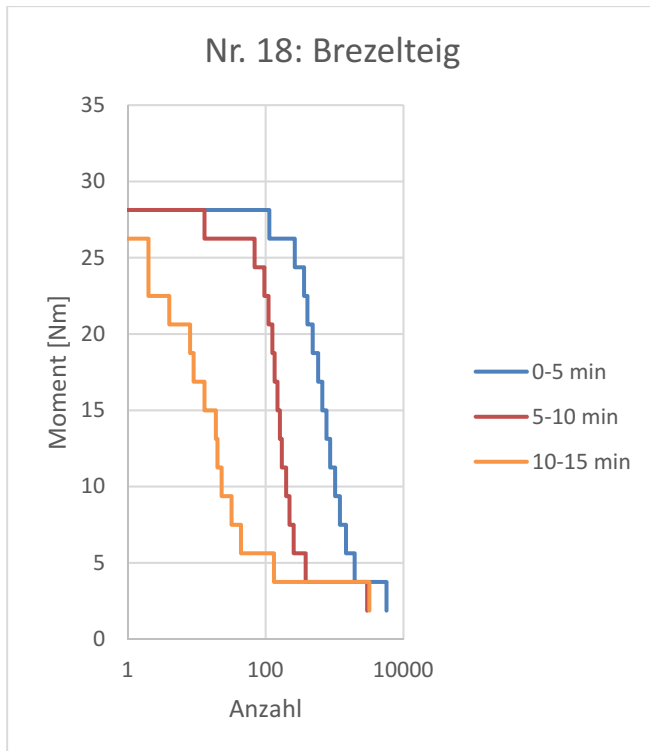


Abb. 12: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes am Kneithaken (Messung 18, Brezelteig, 1000 g)

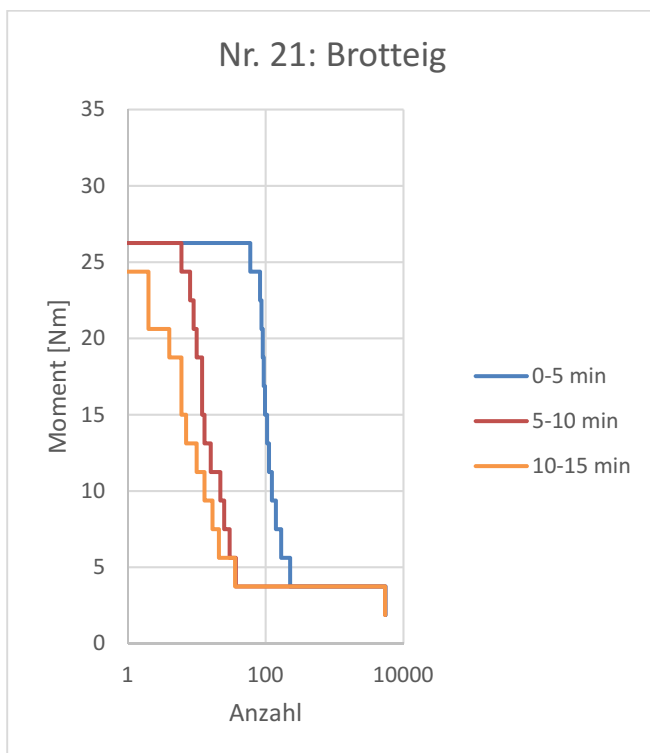


Abb. 13: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes am Kneithaken (Messung 21, Brotteig, 1000 g)

Vergleicht man den Brotteig mit der Messung für die Höchstmenge (Messung 24, 3500 g), so fällt auf, dass das maximale Moment sich nicht proportional zur Teigmenge erhöht hat, sondern ebenfalls 28 Nm beträgt (Abb. 14). Die Schwingspielzahl beträgt hier 7100 in den ersten 5 min und 11300 in den zweiten 5 min. In den höchsten beiden Beanspruchungsklassen lassen sich 19 und 13 Schwingspiele bzw. 513 und 606 Schwingspiele zählen.

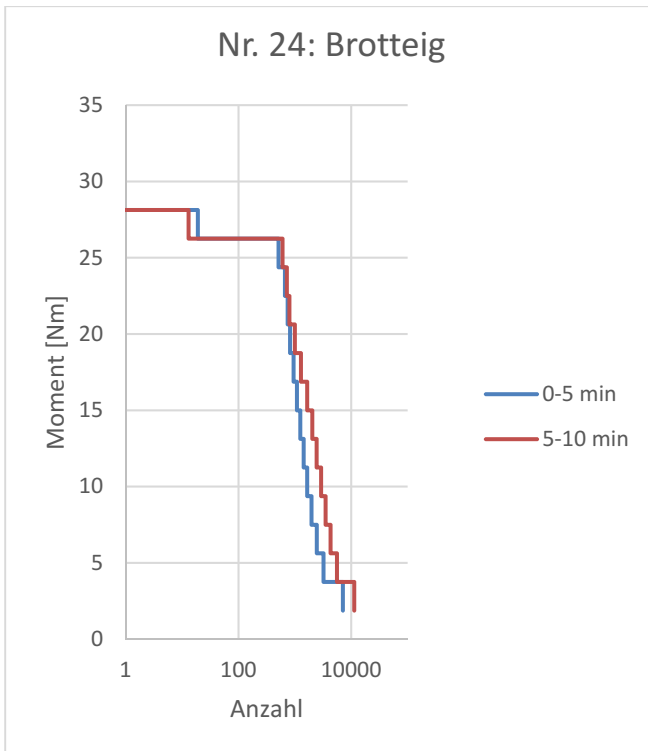


Abb. 14: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes am Kneithaken (Messung 24, Brotteig, 3500 g)

An der Schüssel sind ähnliche Amplitudenkollektive gemessen worden (Abb. 15-17). An dieser Messstelle sind die Drehmomente geringer, was durch die Übersetzung des Getriebes erklärbar ist. Die Kollektivform weicht deutlich von der des Kneithakens ab und weist ein Z-Form auf. Tendenziell ist wiederum für Brotteig ein geringeres maximales Drehmoment abzulesen und für die Höchstmenge ein höheres Drehmoment als für die Normmenge.

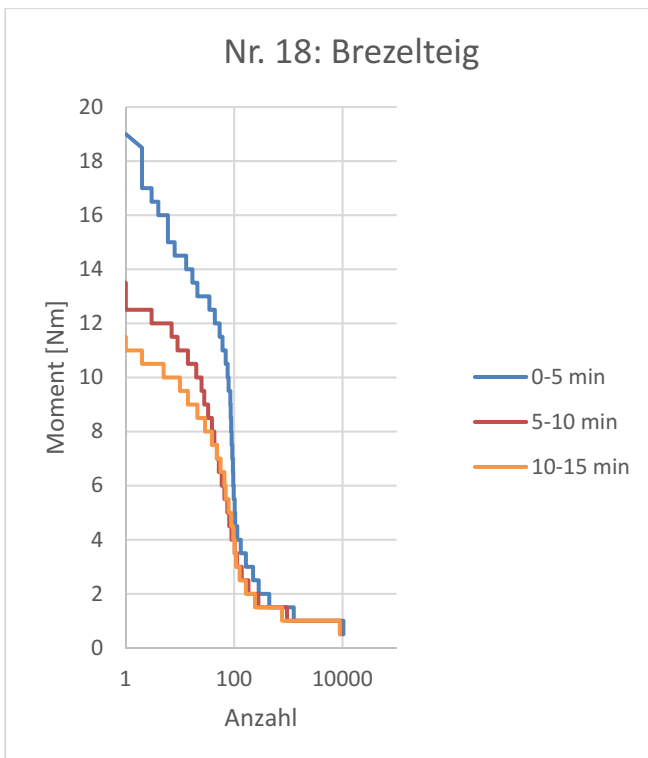


Abb. 15: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes an der Schüssel (Messung 18, Brezelteig, 1000 g)

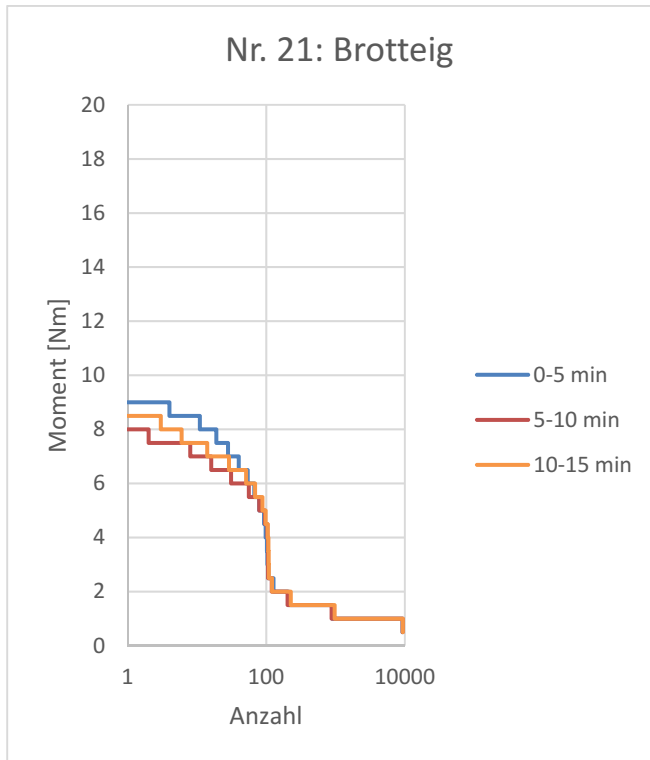


Abb. 16: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes an der Schüssel (Messung 21, Brotteig, 1000 g)

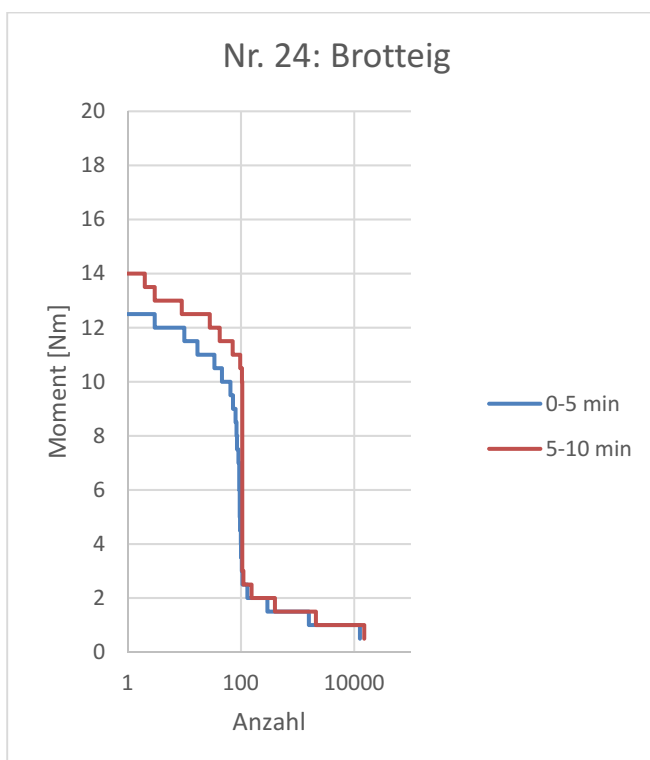


Abb. 17: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes an der Schüssel (Messung 24, Brotteig, 3500 g)

Des Weiteren werden die Temperaturmessungen exemplarisch für Messung 18 dargestellt (Abb. 18). Die Temperatur im Teig steigt nach Beginn des Knetens an und bleibt dann während des Knetvorganges konstant. Die einzelnen Impulsadeln sind auf das kurzzeitige Auf-

reißen des Teigklumpens und damit Messung des reflektierenden Schüsselbodens zurückzuführen. Die Temperatur am Gehäuse steigt während des Knetens von 40°C auf 50°C an. Die Motortemperatur steigt von 80°C bei Beginn auf 110°C an. Diese ungewöhnliche Temperaturentwicklung ist darauf zurückzuführen, dass es sich um eine Folgemessung mit einer bereits auf Betriebstemperatur von 80°C am Motor befindlichen Maschine handelte. Dennoch ist diese Temperaturentwicklung als kritisch zu betrachten und sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

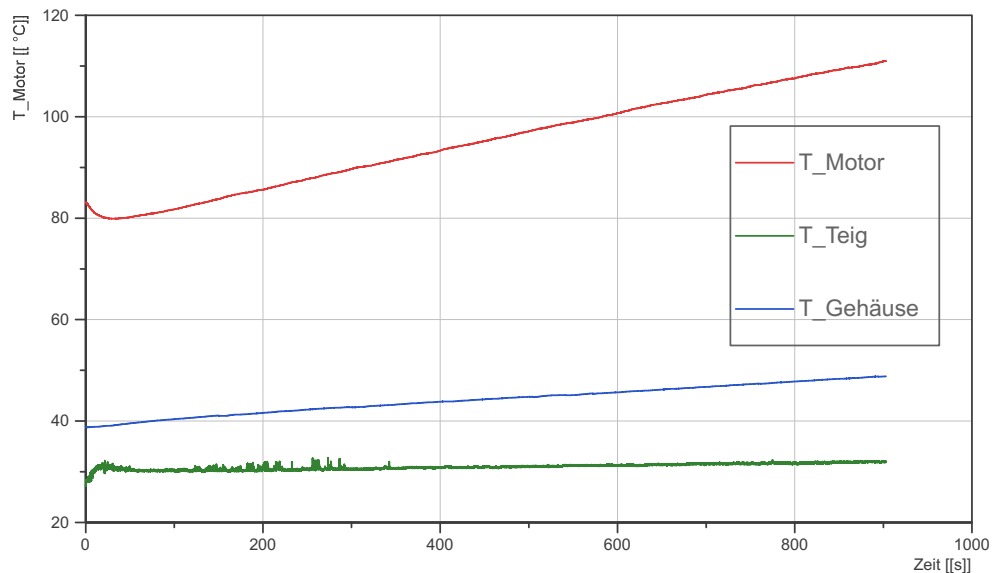


Abb. 18: Temperaturentwicklung am Motor, Gehäuse und im Teig
(Messung 18, Brezelteig, 1000 g)

Im Folgenden werden die Leistungen untersucht. Es werden die Scheinleistung (aus dem Netz aufgenommen Leistung), die elektrische Wirkleistung (am Motor bereitgestellte elektrische Leistung) und die mechanische Leistung am Kneithaken als Produkt aus Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit dargestellt (Abb. 19). Die Werte sind gemittelt worden mit einer Zeitkonstante von 1 s (entspricht 500 Datenpunkten). Bei Auftragen der Leistungen über der Zeit sind Scheinleistung und Wirkleistung nahezu konstant, wobei die Wirkleistung naturgemäß kleiner ist als die Scheinleistung. Die mechanische Leistung schwankt stark, was aus den Schwankungen im Drehmoment zu erklären ist. Auffällig ist, dass die mechanische Leistung in den ersten 50 s des Knetens ansteigt, dann ein Plateau erreicht und nach ca. 400 s auf einen kleineren Wert abfällt. Der Anstieg ist mit der Vermischung des Teiges zu erklären, nach Homogenisierung ist nur noch ein geringeres Moment für das Weiterkneten erforderlich.

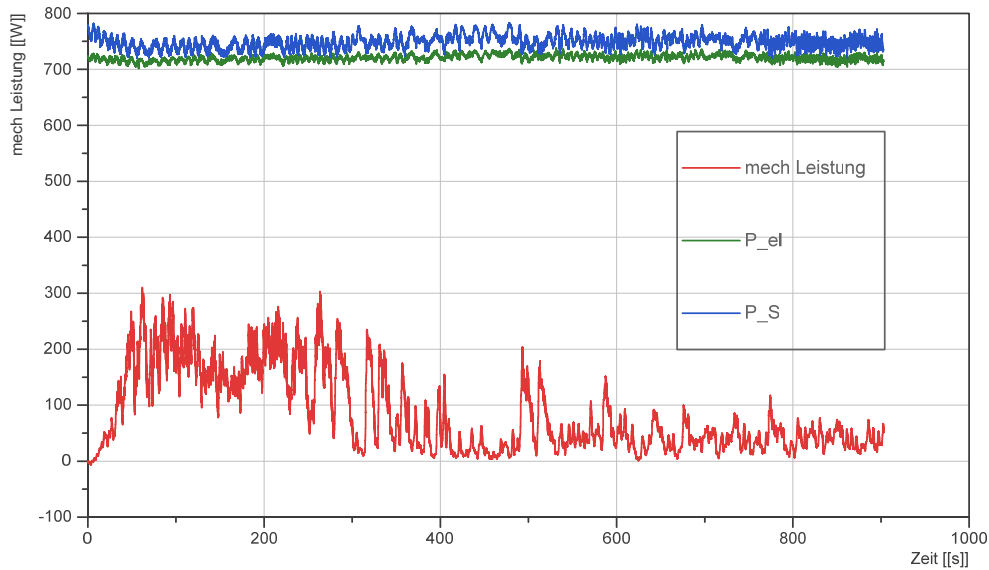


Abb. 19: Mechanische Leistung, Wirkleistung und Scheinleistung
(Messung 18, Brezelteig, 1000 g)

Dies spiegelt sich ebenfalls im Wirkungsgrad wieder (Abb. 20). Hier erhält man zunächst einen Anstieg auf 0,4 und dann bei dem geringeren Momentenabgriff Zahlenwerte um 0,1. Dies bedeutet, dass die Maschine für diesen Knetvorgang in den ersten 400 s den hauptsächlichsten Anteil der Bearbeitung verrichtet und danach - bei gleicher Leistungsaufnahme aus dem Netz - deutlich geringere Leistung (d. h. Drehmoment) an den Teig abgibt.

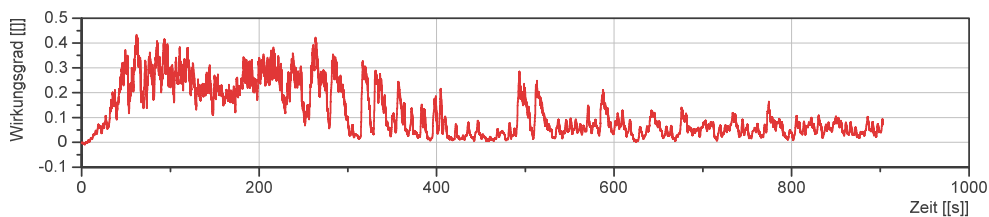


Abb. 20: Wirkungsgrad als Quotient von mechanischer Leistung und Wirkleistung
(Messung 18, Brezelteig, 1000 g)

5.6 Ableitung von Standard-Versuchen (Maximal-Lasten, äquivalente Dauerlasten)

Zunächst wurde untersucht, wie gut die Messungen reproduzierbar sind. Hierfür werden drei Messungen am Knetbacken mit Brezelteig und 1000 g Füllgewicht untersucht (Abb. 21-23).

Als konservative Näherung wird die Phase der höchsten Belastungen, also die ersten fünf Minuten des Knetprozesses betrachtet. Dieser Arbeitsprozess wird als repräsentativ für die gesamte Belastung angenommen. Der Vergleich der drei Messungen ergibt, dass die Maximalbelastung 30 Nm ist. Diese höchste Belastung tritt bei den betrachteten drei Messungen ca. 100x auf. Der gesamte Kollektivumfang liegt zwischen 1000 und 6000 Schwingspielen.

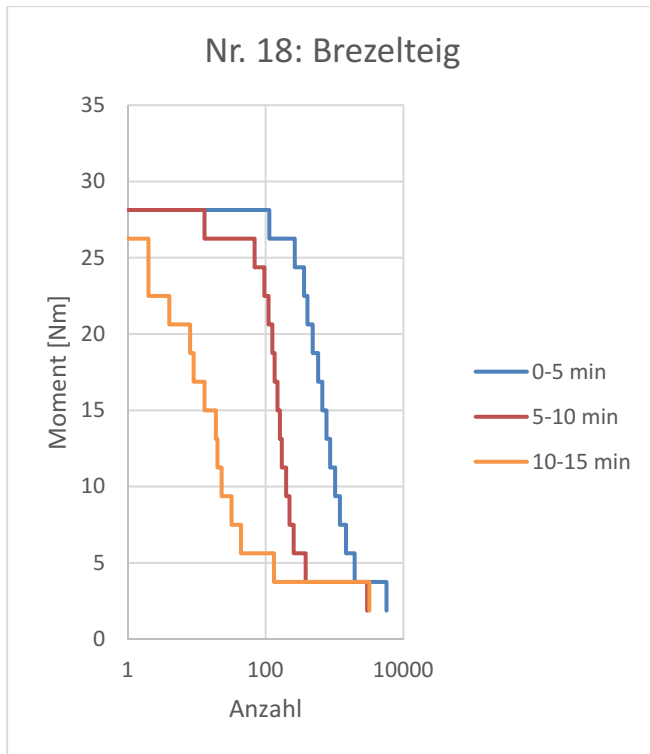


Abb. 21: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes am Kneithaken (Messung 18, Brezelteig, 1000 g)

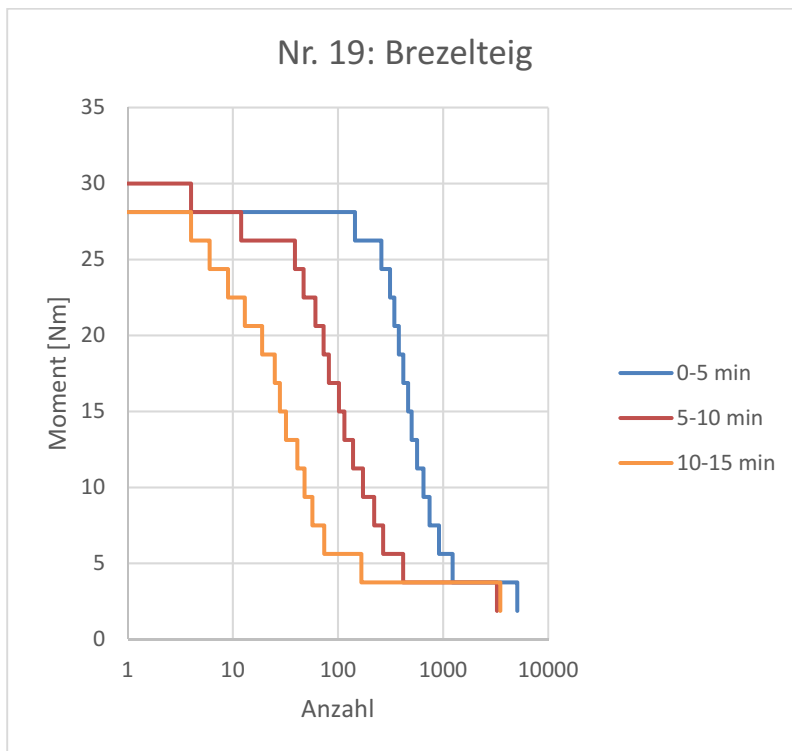


Abb. 22: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes am Kneithaken (Messung 19, Brezelteig, 1000 g)

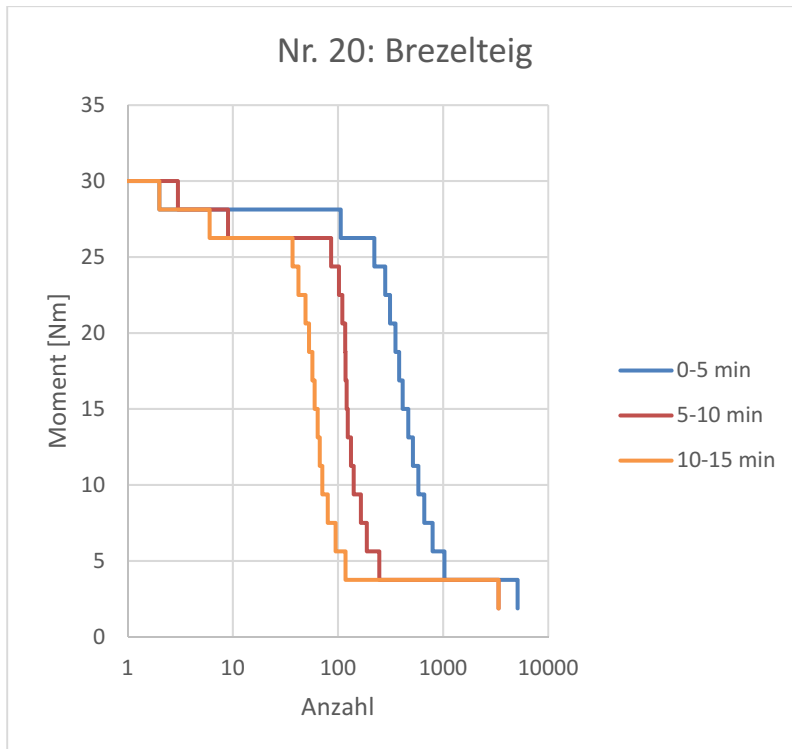


Abb. 23: Amplitudenkollektiv des Drehmomentes am Knethaken
(Messung 20, Brezelteig, 1000 g)

Aus den Messungen der Drehmomente am Knethaken lassen sich erste Schlussfolgerungen ableiten.

1. Das maximale Drehmoment beträgt 30 Nm.
2. Das maximale Drehmoment tritt in 5 Minuten Betrieb ca. 100x auf. Im zehninütigen Normalbetrieb entspricht dies 200 Schwingspielen.
3. Fünf Minuten Betrieb entsprechen ca. 6000 Schwingspielen. Der Normalbetrieb von 10 min entspricht damit 12000 Schwingspielen.

Legt man eine Nutzungsdauer von 10 Jahren mit einem Einsatz von 5x der Standardmenge wöchentlich zugrunde, so erhält man 2800 Nutzungen. Dies führt zu einem gesamten Kollektivumfang von $2800 \times 12000 = 33,6$ Mio. Schwingspielen und $100 \times 12000 = 1,2$ Mio. Schwingspielen in der höchsten Beanspruchungsklasse (Abb. 24). Diese Abschätzungen sind vorläufig, auf der vorhandenen Datenbasis und betreffen nur den Knethaken.

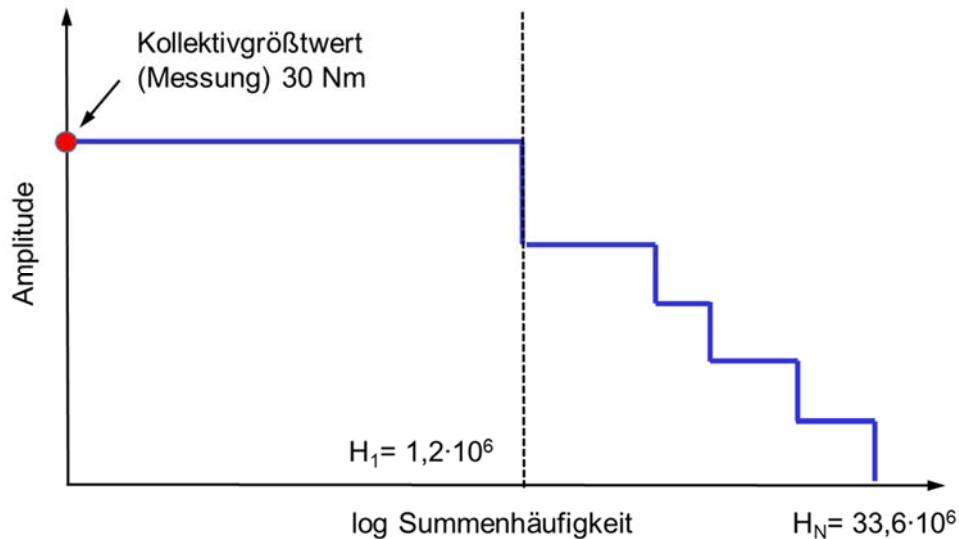


Abb. 24: Bemessungskollektiv für das Drehmoment am Knethaken

6 Literatur

- [1] Tiet, Alexander: Messung von Lastkollektiven in elektromotorischen Antriebssystemen, Bachelorarbeit (2019)
- [2] Ellinger, Maximilian: Konzept für Betriebsfestigkeit und Beanspruchungsmessung an Verarbeitungsmaschinen (2018)
- [3] Kuttner, T.. Praxiswissen Schwingungsmesstechnik. Springer-Vieweg Verlag, 341 S., ISBN: 978-3-658-04637-8, DOI: 10.1007/978-3-658-04638-5 (2015)

Anlage 1:

Nr.	Datum	Art	Mehl [g]	Wasser [ml]	Beginn Mes-sung	Ende Mes-sung	Dauer [min]	sonst. Anmerkungen
1	27.05.	Brötchen/ Brezel	1000	550	15.29 Uhr	15.44 Uhr	15	Teig wickelt sich um Knethaken be-reits zu Beginn, "alter" Brezelteig
2	28.05.	Brot	1000	700	9.38 Uhr	10.03 Uhr	24	Teig ab 130 s glatte Masse, ab 980 s wieder großer Klumpen um den Knet-haken
3	03.06.	Brot	1000	700	11.18 Uhr	11.24 Uhr	6	
4	03.06.	Brot	1000	700	14.02 Uhr	14.17 Uhr	15	
5	04.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	10.10 Uhr	10.24 Uhr	14	ab ca. 310 s mitdrehender Teigbatzen um den Haken, kein wirkliches Kneten mehr, "neuer" Brezelteig, Abdeckung beschlägt, Messung nach 860 s ge-stoppt, da Abdeckung nach oben ge-klappt wurde (Notaus)
6	04.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	14.01 Uhr	14.16 Uhr	15	ab ca. 310 s mitdrehender Teigbatzen um den Haken, kein wirkliches kneten mehr
7	05.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	8.52 Uhr	9.07 Uhr	15	Teig wickelt sich nicht um den Haken, evtl. zu wenig Wasser (450 ml)
8	05.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	9.36 Uhr	9.51 Uhr	15	Wiederholungsmessung von Versuch 7, ab ca. 450 s mitdrehender Teigbat-zen um den Haken, kein wirkliches kneten mehr
9	12.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	10.57 Uhr	11.12 Uhr	15	Testmessung Firma Häussler
10	17.06.	Brötchen/ Brezel	3500	1925	11.44 Uhr	11.49 Uhr	5	Volllastmessung 1/5, Zahnrad u. Knethaken genullt
11	17.06.	Brötchen/ Brezel	3500	1925	11.56 Uhr	12.01 Uhr	5	Volllastmessung 2/5

12	17.06.	Brötchen/ Brezel	3500	1925	12.09 Uhr	12.14 Uhr	5	Volllastmessung 3/5
13	17.06.	Brötchen/ Brezel	3500	1925	12.23 Uhr	12.28 Uhr	5	Volllastmessung 4/5, Wasser bei offener Abdeckung zugegossen (bessere Vermischung)
14	17.06.	Brötchen/ Brezel	3500	1925	12.34 Uhr	12.48 Uhr	5	Volllastmessung 5/5, ab ca. 810 s Teig oberhalb Teigschutz
15	17.06.	Brot	1000	700	13.02 Uhr	13.08 Uhr	6	Messung für max. Temp., neue Messung mit Nullung
16	19.06.	Brot	1000	700	8.46 Uhr	9.01 Uhr	15	mit genullten Signalen
17	19.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	10.25 Uhr	10.40 Uhr	15	mit genullten Signalen, eigentlich 500ml Wasser, nachträglich 50ml hinzugefügt
18	19.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	10.47 Uhr	11.02 Uhr	15	mit genullten Signalen, Temperatur am Motor über 100°C
19	25.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	9.47 Uhr	10.02 Uhr	15	mit genullten Signalen
20	25.06.	Brötchen/ Brezel	1000	550	11.31 Uhr	11.46 Uhr	15	mit genullten Signalen
21	25.06.	Brot	1000	700	13.13 Uhr	13.28 Uhr	15	mit genullten Signalen
22	28.07.	Brot	3500	2450	8.31 Uhr	8.41 Uhr	10	Volllastmessung 1/5
23	28.07.	Brot	3500	2450	8.55 Uhr	9.05 Uhr	10	Volllastmessung 2/5
24	28.07.	Brot	3500	2450	9.21 Uhr	9.31 Uhr	10	Volllastmessung 3/5
25	28.07.	Brot	3500	2450	9.42 Uhr	9.52 Uhr	10	Volllastmessung 4/5
26	28.07.	Brot	3500	2450	10.03 Uhr	10.13 Uhr	10	Volllastmessung 5/5
27	01.07.	Brötchen/ Brezel	3500	1925	12.25 Uhr	12.35 Uhr	10	Volllastmessung zur Überprüfung der Werte, Teig gerät an DMS-Messstelle und verfälscht damit Werte