

Masterarbeit

LEAN EFFEKTE DURCH LABORAUTOMATISIERUNG

VERSCHWENDUNGSMINIMIERUNG UND PRODUKTIVITÄTSSTEIGERUNG IN
RHEOLOGISCHEN LABORPROZESSEN DURCH AUTOMATISIERTE SYSTEME.

AUSGEFÜHRT AM



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Florian Grabler BSc.

2010321033

betreut und begutachtet von

Dr. techn. Mag. Gert Breitfuß

Graz, im November 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Florian", written over a horizontal dotted line.

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich

- die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst,
- andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt,
- die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht,
- den Einsatz von generativen KI-Modellen kenntlich gemacht
- und mich sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten elektronischen Version.

Florian Grabler BSc.

Vorname Nachname in Druckschrift

Graz, 24.11.24

Ort, Datum, Unterschrift



DANKSAGUNG

Hiermit möchte ich mich aufrichtig bei der Firma Anton Paar, aber insbesondere bei meinen Kollegen Rene Stöller, Michael Edler, Stefan Wurzer, Matthias Walluch, Georg Poprask und Karl Maier danken. Ich bedanke mich auch bei meinem Betreuer Gert Breitfuß für die großartige Unterstützung und Rat. Weiters ein großes DANKE für die moralische Unterstützung und für das Verständnis von meiner Familie und meiner Freundin.

KURZFASSUNG

Der fortschreitende Trend zu automatisierten Prozessen, auch in Laboren, in denen Rheologie zur Bestimmung von Materialeigenschaften eingesetzt wird, wirft die Frage auf, welche Herausforderungen bei der Umsetzung solcher Lösungen zu bewältigen sind. Anton Paar ist der führende Anbieter von Rheometern und stellt umfassende, automatisierte Rheologiesysteme für Platte/Platte- sowie Kegel/Platte-Geometrien bereit. Der HTR 7000 ist ein Beispiel für diese "High-Throughput-Rheologiesysteme", die sich durch ein integriertes, vollautomatisches Trimmtool und verschiedene integrierte Probenvorbereitungsschritten auszeichnen. Das Trimmen der Proben spielt eine wesentliche Rolle im Gesamtprozess, da es einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der resultierenden Messungen ausübt und zudem die Reproduzierbarkeit der Messungen beeinflusst. Es wird postuliert, dass die Automatisierung in diesem Kontext eine Prozessverbesserung darstellt, wodurch die Reproduzierbarkeit optimiert und Prozessverschwendungen im Vergleich zum manuellen Ablauf eliminiert werden. In der vorliegenden Arbeit wird mit Methoden aus dem „Lean Management“ der gesamte Laborarbeitsablauf analysiert. Ziel ist die Identifikation und Quantifizierung von Verschwendungen innerhalb des Prozesses. In Bezug auf das Trimmtool wird eine Studie zur Reproduzierbarkeit durchgeführt, wobei ein bereitgestelltes Polymer von Kund*innen verwendet wird. Um potenzielle Herausforderungen zu ermitteln, die mit der Implementierung der Automatisierung in der Rheologielaborverarbeitung verbunden sind, werden die Erkenntnisse aus der oben genannten Lean-Analyse zusammen mit einer Studie der Grenzen bei trimmbaren Proben berücksichtigt.

ABSTRACT

The ongoing shift towards automated processes, even in laboratories where rheology is employed to determine the characteristics of materials, gives rise to the question of which challenges must be addressed to effectively implement such solutions. Anton Paar, the market leader in rheology, offers conclusive automated rheology systems for both plate/plate and cone/plate geometries, namely the HTR 7000. The distinctive feature of these high-throughput rheology systems is the incorporation of a fully automated trimming tool and various sample preparation steps. The trimming of samples is crucial to the overall process, as it significantly influences the quality of the resulting measurement and has an impact on the reproducibility of measurements. The assertion is, that automation in this context represents a process improvement, whereby the reproducibility is enhanced, and process waste is eliminated in comparison to manual operation. This thesis employs the "lean management" method to analyse the entire laboratory workflow, with the objective of identifying and quantifying the sources of waste within the process. With regard to the trim tool, a study of reproducibility is conducted using a customer-standard polymer. To identify the potential challenges associated with the implementation of automation in rheology laboratory processing, the findings of the aforementioned lean analysis are considered alongside a study of the limitations of trimmable sample spectrum.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Motivation.....	2
1.3	Zielsetzung.....	3
2	Grundlagen der Rheologie	5
2.1	Grundbegriffe der Rheologie	5
2.1.1	Das Viskositätsgesetz.....	6
2.1.2	Schubspannung	9
2.1.3	Scherrate	9
2.2	Rotations-Rheometer	10
2.2.1	Software.....	10
2.2.2	Rheologische Messsysteme für Rotations-Rheometer	10
2.3	Der Trimmprozess	13
2.4	Rheologische Untersuchung von Polymeren	15
2.4.1	Oszillationsversuche für Polymerschmelzen	17
2.4.2	Korrelation aus Materialeigenschaften und der Trimmbarkeit	22
2.4.3	Temperatureinfluss bei Polymeren	23
2.4.4	Molmasse.....	25
2.4.5	Melt Flow Index – MFI	25
2.5	Schlussfolgerung	27
3	Lean Six Sigma als Methode zur Prozessoptimierung	28
3.1	Lean Management.....	29
3.1.1	Verschwendungsarten und deren Bedeutung im Labor	31
3.1.2	Verlustfaktoren: Muda, Mura und Muri	32
3.1.3	Die „5S“ Methode.....	34
3.1.4	SMED - Single Minute Exchange of Die	37
3.1.5	Poka Yoke.....	38
3.1.6	Line Balancing	39
3.1.7	Visualisierung und Analyse von Prozessen.....	40
3.2	Lean Six Sigma Methoden.....	41
3.2.1	Problemlösungskreisläufe PDCA und DMAIC	42
3.2.2	TCT – Total Cycle Time	43
3.3	Messung der Prozessqualität	45
3.4	Schlussfolgerung	47
4	Verschwendungsanalyse des Laborprozesses.....	48
4.1	Die manuelle Messung - Kund*in „Coatings“	48
4.1.1	Flussdiagramme der manuellen Messung	50
4.1.2	Spaghetti-Diagramm der manuellen Messung	52
4.1.3	Zeitverteilung der manuellen Messung.....	53

4.2	Die automatisierte Messung mittels HTR 7000	54
4.2.1	Flussdiagramm HTR 7000 Polymerkonfiguration	57
4.2.2	Spaghetti-Diagramm HTR 7000 Polymerkonfiguration	58
4.2.3	Zeitverteilung HTR 7000 Polymerkonfiguration	59
4.2.4	Flussdiagramm HTR 7000 mit Probenvorbereitung und pH-Messung	60
4.2.5	Spaghetti-Diagramm HTR 7000 mit Probenvorbereitung und pH-Messung	61
4.2.6	Zeitverteilung HTR 7000 mit Probenvorbereitung und pH-Messung	62
4.3	Wiederkehrende Probleme im Laborprozess	63
4.4	Lean Effekte durch Laborautomatisierung: Eliminierung spezifischer Verschwendungsarten ..	64
4.5	Die Prozessverbesserung	65
4.6	Herausforderungen und Grenzen der Automatisierung	68
4.7	Schlussfolgerung	70
5	Der Einfluss auf die Reproduzierbarkeit durch automatisiertes Trimmen	72
5.1	Das automatisierte Trimmtool	72
5.2	Aufbau für den Reproduzierbarkeitsvergleich	76
5.2.1	Die analysierte Probe	77
5.2.2	Prüfaufbau	78
5.2.3	Der Versuchsablauf	80
5.3	Datenanalyse	83
5.4	Schlussfolgerung	87
6	Ermittlung der Grenzen des automatisierten Trimmtools	89
6.1	Theoretische Gedanken zum Ablauf - Ausgangssituation	89
6.2	Trimmversuche mit einem repräsentativen Polymerspektrum	90
6.3	Definition der Grenzen des Trimmtools anhand rheologischer Parameter	93
6.3.1	Diskussion von rheologischen Parametern – Indizien für die Trimmbarkeit	94
6.3.2	Analyse von Frequenztest-Daten	95
6.3.3	Versuche bei unterschiedlichen Trimmtemperaturen	96
6.3.4	Auszugskraft der Trimmklinge	99
6.3.5	Umlegen der Auszugskraft des Trimmklingenhalters auf einen Viskositätswert	100
6.4	These für die Trimmgrenze des automatisierten Trimmtools	101
6.5	DMAIC für das Trimmtool	103
6.5.1	Anpassung der Trimmklingengeometrie	103
6.5.2	Anpassung des Trimmklingenhalters	104
6.5.3	Kerben in der Probe vor dem eigentlichen Trimmen	104
6.6	Schlussfolgerung	105
7	Fazit und Ausblick	106
7.1	Zusammenfassung und Beantwortung der Forschungsfragen	106
7.2	Praktische Implikationen, Empfehlungen und Ausblick	108
8	Literatur	109

1 EINLEITUNG

Die Anton Paar GmbH entwickelt und produziert Präzisionslaborgeräte sowie hochgenaue Prozessmesstechnik und liefert maßgeschneiderte Automations- und Robotik-Lösungen. Mit den Geräten aus den Bereichen Dichte- und Konzentrationsmessungen sowie Rheometrie und CO₂-Messungen ist Anton Paar die Nummer eins am Weltmarkt. Neben maßgeschneiderten Automations- und Robotik-Lösungen hat die Abteilung Automation and Robotics begonnen, aus dem Portfolio Standardisierte Automation Produkte zu entwickeln. Mit den automatisierten Rheometerprodukten *HTR 3000* und *HTR 7000* werden „High Throughput Rheometer“ angeboten, welche die MCR¹-Produkte von Anton Paar automatisieren. Die HTR-Produkte ermöglichen es den Kund*innen, das System mit den gewünschten Proben zu bestücken und anschließend anderen Tätigkeiten nachzugehen, anstatt jede Messung individuell zu überwachen sowie die Reinigung und Neubestückung manuell durchzuführen.

1.1 Ausgangssituation

Dieser Arbeit gehen die Entwicklung des vollautomatischen Trimmtools und der Bau einer Vielzahl von Systemen mit Trimmtool, mit den damaligen Namen von HTR, HTR 502 oder HTR 702 und seit Mitte 2024 HTR 7000 zuvor. Jetzt wo dieses System am Markt weiter Fuß fasst und kurz vor dem Produktstatus ist, steigt das Interesse merklich. Trotzdem zögern Kund*innen oft aufgrund fehlender Referenzen. Häufig werden Messdaten für die angepriesene Reproduzierbarkeitssteigerung gefordert. Daher ist es erforderlich, für nahezu jeden/jede Kund*in spezifische Probenmessungen durchzuführen, um nachzuweisen, dass das automatisierte Rheometer gleichwertig, oder sogar stabiler und reproduzierbarer misst und zudem in der Lage ist, diese spezifische Probe zuverlässig zu analysieren. Die in dieser Arbeit adressierte Forschungslücke befasst sich mit der Frage, welcher rheologische Parameter die Fähigkeit beschreibt, Polymerproben präzise und reproduzierbar zu trimmen, sowie die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Messergebnisse. Dies setzt fest, ob die Probe überhaupt vollautomatisch vermessen werden kann. Kund*innen sehen das Potential dieses Systems, häufig fehlt jedoch die wissenschaftlich fundierte, quantitativ belegte Evidenz der Prozessverbesserung sowie eine Dokumentation, bei welchem Probenspektrum mittels automatisierten Trimmens die gewünschte Prozessverbesserung geliefert werden kann. Weiters sind die gesamte Prozessverbesserung und Begründung der Automatisierung für den Vertrieb und den Kund*innen selbst nicht greifbar. Hierfür sollen die gefundenen Argumente aus dem „Lean“ Teil unterstützen, aufklären und eine bessere Argumentationsbasis schaffen. Für den Überblick wird der Gesamtprozess mit Lean analysiert und um eine technische Tiefe zu erhalten, wird der USP (unique selling proposition) des HTR 7000, das automatisierte Trimmtool, nachfolgend detailliert untersucht.

Der HTR 7000, welcher in der Arbeit oft als „System“ bezeichnet wird, ist das zentrale Element dieser Arbeit. Dieses System ist aktuell im Standardisierungs- und Überleitungsprozess vom Sondermaschinen Status, zu einem modularen Produkt im Serienstand. Zuvor wurde jedes ausgelieferte System an Kund*innenwünsche in einem Sondermaschinenbauprojekt angepasst und neuentwickelt. Der

¹ Modular Compact Rheometer

Serienüberleitungsprozess beinhaltet die Standardisierung der meistgefragten Module und ermöglicht eine Konfiguration mit Baukastensystem entsprechend Kund*innenwünschen ohne ständige Neuentwicklung.

Im HTR 7000 wird die Rheometer-Serie „MCR 702e“ von Anton Paar um gängige Probenvorbereitungsschritte, wie z. B. die Homogenisierung, Probenflaschen öffnen oder dispensieren, erweitert und der Charakterisierungsprozess mittels Rheometer vollständig bis zum Austausch der Messgeometrien automatisiert. In einem solchen System können neben bis zu zwei MCR 702e Rheometern, die Messgeometrien vollautomatisch gereinigt werden. Zusätzlich kann eine Messung des pH-Werts in einem optionalen Modul durchgeführt werden. Somit können Kund*innen eine große Probenanzahl ohne weiteren manuellen Aufwand vollautomatisch auf deren rheologische Eigenschaften reproduzierbar charakterisieren. Ein HTR 7000, welcher im Jahr 2023 an einen/eine Polymerkund*in geliefert wurde, ist nachfolgend dargestellt, siehe *Abb. 1*.

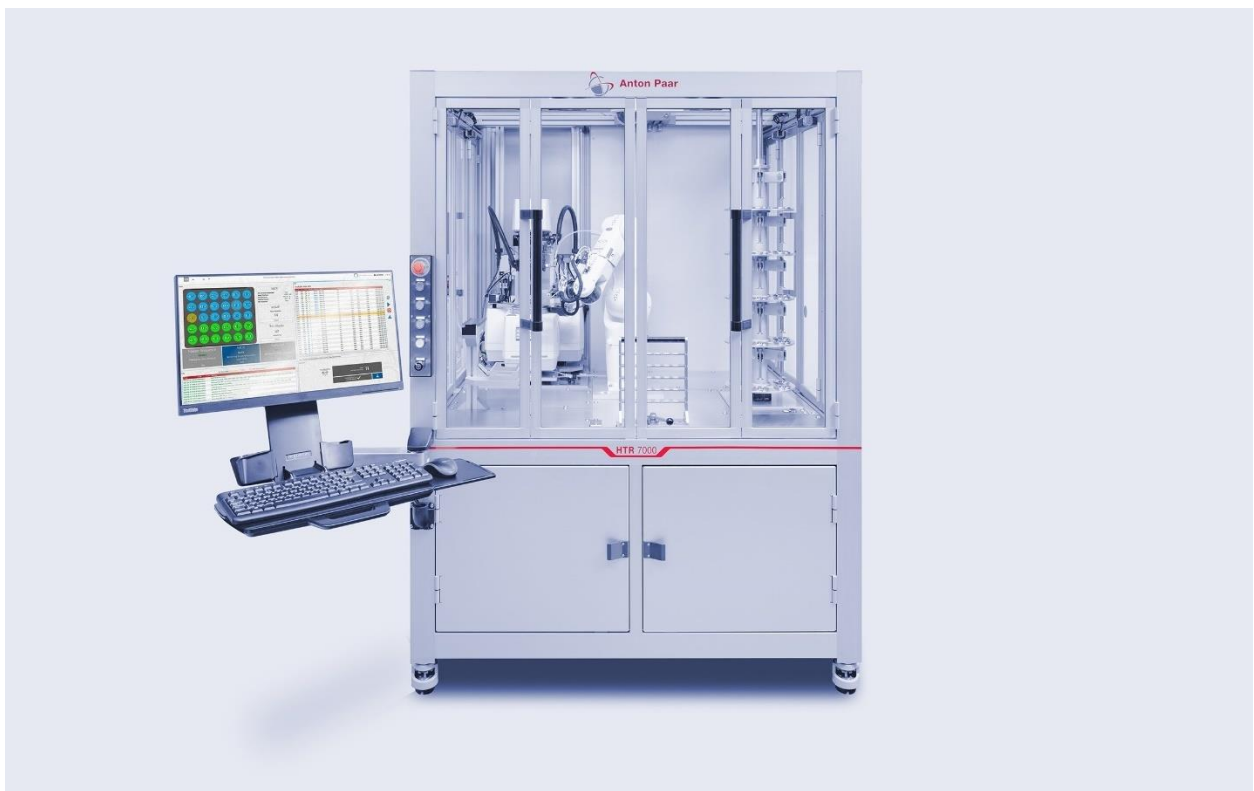


Abb. 1: HTR 7000 für die Polymerindustrie, die minimal Konfiguration, Quelle: (Anton Paar, 8. November 2024).

1.2 Motivation

Die Motivation dieser Arbeit kommt von dem Wunsch, die Prozessverbesserung der gesamten Automatisierung und Steigerung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durch automatisiertes Trimmen nennen zu können. Das technische und ökonomische Verständnis über das System soll erweitert werden. Vor allem sollen die Vorteile und der Einsatz bei Kund*innen und deren Prozesse besser verstanden werden. Der effektivste Weg, um dies zu erreichen, ist die Durchführung von Kund*innenbesuchen, bei denen die Prozessverbesserung herausgearbeitet wird. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen den Vertrieb aber auch die Weiterentwicklung des Systems unterstützen.

1.3 Zielsetzung

Ausgehend von dem persönlichen Ziel, die Prozessverbesserung in Laborprozessen durch den Einsatz von Automatisierung zu quantifizieren, haben sich folgende Fragen für diese Arbeit abgeleitet:

Wie wirken sich automatisierte Labore auf die Produktivität und in Anbetracht auf automatisiertes Trimmen, auf die Reproduzierbarkeit und Grenzen des Probenspektrums in rheologischen Charakterisierungsprozessen aus?

Um die Komplexität der definierten Forschungsziele bzw. der Hauptforschungsfrage zu verringern und ein strukturiertes Vorgehen zu ermöglichen, werden diese in vier Forschungsfragen untergliedert:

1. Welche Lean-Effekte treten durch die Automatisierung des rheologischen Charakterisierungsprozesses auf? Gibt es auch Lean-Effekte, die mit dem automatisierten Trimmen zusammenhängen? Welche Verschwendungen werden eliminiert? Welche Prozessoptimierungen treten auf?
2. Wie groß ist die Prozessverbesserung hinsichtlich der Zeit- und Kostenersparnis durch die Automatisierung des rheologischen Charakterisierungsprozesses?
3. Wie verändert sich die Reproduzierbarkeit der rheologischen Messdaten durch automatisiertes Trimmen im Vergleich zum manuellen Trimmen?
4. Was sind die Grenzen des automatisierten Trimmtools?
 - a. Lassen sich die Grenzen auf ein Rheologisches Messergebnis herunterbrechen?
 - b. Mit welchen Maßnahmen kann das Trimmtool weiterentwickelt werden, um eventuelle Grenzen zu überwinden?

Nicht- Ziele und Randbedingungen

Da zu dem Verfassungszeitpunkt dieser Arbeit kein HTR 7000 System für automatisierte Tests zur Verfügung steht, werden die Versuche auf einem teilautomatisierten Versuchsaufbau durchgeführt. Dieser weist das vollautomatisierte Trimmtool auf, jedoch müssen alle restlichen Prozessschritte manuell durchgeführt werden. Die Messbedingungen werden in *Kapitel 5, Abschnitt 5.2, Unterabschnitt 5.2.2*, näher erläutert. Weiters ist ein nicht-Ziel, das automatisierte Trimmtool konstruktiv anzupassen, Tests des veränderten Probenspektrums und die Untersuchung der Reproduzierbarkeitsänderung anhand verschiedener Probentypen oder Probenarten anhand der Anpassungen zu untersuchen.

Genutzte Methoden

Forschungsfrage 1 und 2: Im Rahmen der Quantifizierung der potenziellen Prozessverbesserung durch automatisierte Laborprozesse findet eine Fokussierung auf das Lean- und Six Sigma-Prinzip statt. Das von Toyota entwickelte Lean-Prinzip steht für höchste Produktivität und Effizienz und umfasst Methoden und Werkzeuge für die Analyse, darunter 5S, Poka Yoke, Line Balancing oder das Spaghetti-Diagramm. Die Zeit- und Kostenunterschiede zwischen dem manuellen und automatisierten Prozess werden quantitativ mittels ROI-Rechner und Zeiterfassung analysiert. Des Weiteren werden Kund*innenbefragungen durchgeführt, um etwaige Hindernisse für einen Automatisierungsschritt zu identifizieren sowie potenzielle Problembereiche im aktuellen manuellen Ablauf zu ermitteln. Forschungsfrage 3 und 4: Die praktischen Tests des Trimmtools werden an einem teilautomatisierten Versuchsaufbau durchgeführt. Die Reproduzierbarkeitsstudie sowie die Untersuchungen des Trimmtools werden an diesem Modul durchgeführt.

Die aktuell zur Verfügung stehenden Mittel von KI-Modellen wie Chat *GTP4o*, wurden dafür genutzt, um den Informationsfluss für die Arbeit zu beschleunigen. Es wurde für Ideen für Literaturschlüsselwörter, wenn das gesuchte Thema bereits bekannt war, für Zusammenfassungen von Berichten, für das Verständnis von Begriffen, aber meist in Form von *DEEPL/write* als Korrektur- und Formulierungshilfe genutzt. Jeder Austausch mit der KI wurde stets kritisch hinterfragt und überprüft, wodurch auch die Übernahme vieler falscher Aussagen vermieden werden konnte.

Aufbau der Arbeit

In den beiden Theorie-Kapiteln 2 und 3 erfolgt die Darlegung der für die Rheologie und die Lean-Six-Sigma-Methode erforderlichen Grundlagen sowie die Aufstellung erster Thesen. Zudem werden die Methoden für die nachfolgende Prozessanalyse erörtert. Im Rahmen der Verschwendungsanalyse des Laborprozesses (vgl. Kapitel 4) findet eine Anwendung des Lean-Prinzips statt, um potenzielle Verschwendungen im manuellen Prozess zu identifizieren und einen Vergleich mit dem automatisierten Ablauf zu ermöglichen. Der Versuch, eine Prozessverbesserung zu quantifizieren, mündet in der Aufdeckung erster Grenzen der Automatisierung. Im Anschluss erfolgt im 5. *Kapitel* eine Untersuchung des Einflusses auf die Reproduzierbarkeit rheologischer Messungen durch automatisiertes Trimmen. Gegenstand der Betrachtung ist dabei die Auswirkung des automatisierten Prozesses auf die eigentlichen Messdaten. Des Weiteren werden in *Kapitel 6* spezifische Eigenschaften der Proben untersucht, die zu einer erschwerten Trimmung führen und durch welche Maßnahmen diesem Umstand entgegenwirkt werden kann. Schlussendlich wird in *Kapitel 7* ein Fazit gezogen. Siehe nachfolgende *Abb. 2* für eine grafische Übersicht der Arbeit.

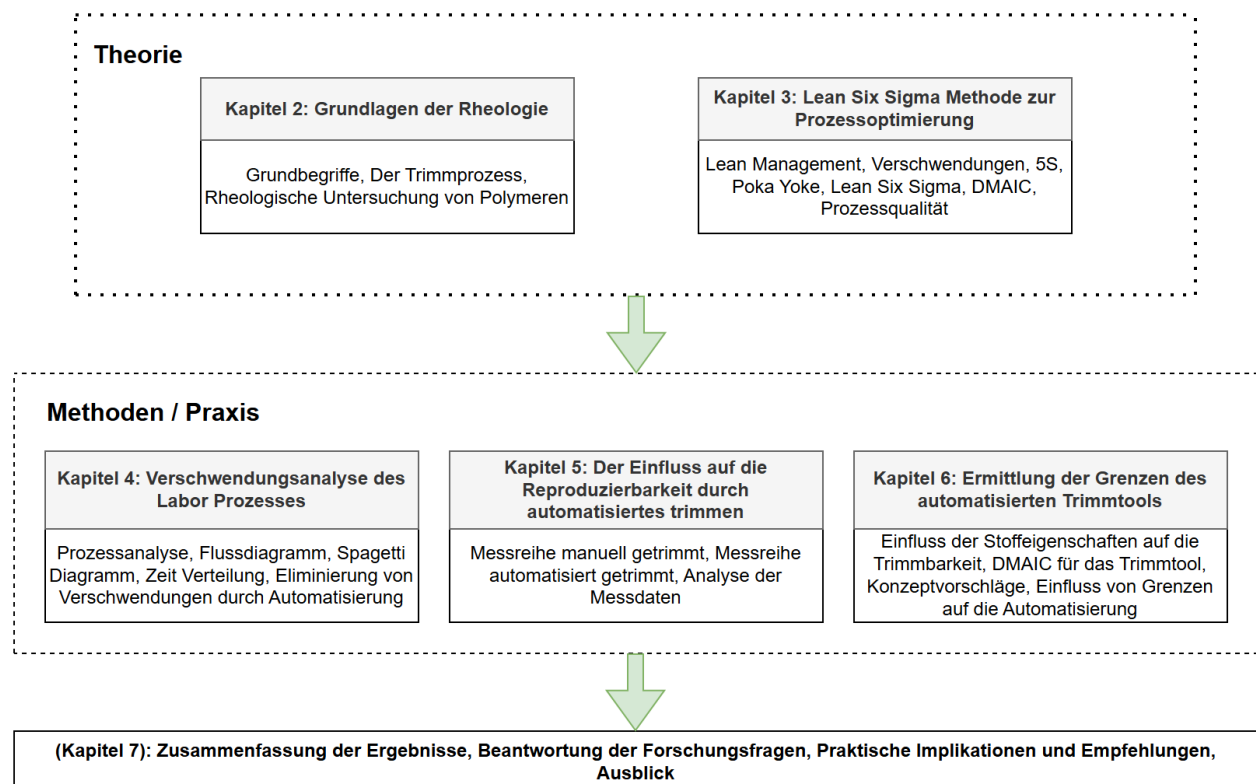


Abb. 2: Grafische Übersicht über den Aufbau der Arbeit, Quelle: Eigene Darstellung.

2 GRUNDLAGEN DER RHEOLOGIE

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den rheologischen Grundlagen und bietet eine Übersicht über die Materialeigenschaften der analysierten Polymerproben, die potenziell mit der Qualität der Trimmergebnisse korrelieren könnten. Des Weiteren soll durch die Forschungsergebnisse dieser Arbeit hervorgehen, wie sich ein automatisiertes Trimmtool sich auf die Reproduzierbarkeit von Messwerten auswirkt und welche Einschränkungen die Automatisierung bei dem möglichen Probenspektrum mit sich bringt. Es folgen theoretische Überlegungen zu den Grenzen des Trimmtools und auf welche Materialkennwerte dies bereits im Vorfeld ohne einen Trimmversuch festgemacht werden kann.

Der Begriff Rheologie wurde 1920 von Professor Eugene Bingham am Lafayette College in Indiana, USA, ins Leben gerufen. Die Silbe Rheo stammt von dem griechischen Wort „rhein“ ab, welches „fließen“ bedeutet, sodass der Name Rheologie die Theorie der Verformung und des Fließens von Materie bezeichnet. Bingham, ein Professor für Chemie, untersuchte neue Materialien mit seltsamem Fließverhalten, insbesondere Farben. Mittlerweile umfasst die Rheologie auch die Konstitutionslehre hochviskoser Flüssigkeiten und Feststoffe mit viskoelastischen und viskoplastischen Eigenschaften.² Die Rheologie ist die Messtechnik zur Bestimmung rheologischer Eigenschaften.

Es wird zwischen newtonsche Fluide und nicht newtonsche Fluide unterschieden. Newtonsche Fluide wie z.B. Wasser oder Luft haben unabhängig von der Scherrate eine konstante Viskosität, siehe Kapitel 2, Abschnitt 2.1, Unterabschnitt 2.1.3. Newtonsche Flüssigkeiten sind Flüssigkeiten, die dem linearen newtonschen Reibungsgesetz folgen, Gleichung (2.1) unten. Flüssigkeiten, die nicht dem linearen Gesetz folgen, werden als nicht newtonsche Flüssigkeiten bezeichnet. Nicht newtonsche Fluide zeigen eine Viskositätsänderung in Abhängigkeit von der Scherrate (z.B. Ketchup, Blut). Diese Flüssigkeiten sind in der Regel hochviskos und weisen zudem relevante elastische Eigenschaften auf. Typische nicht newtonsche Flüssigkeiten sind Polymerlösungen, Thermoplaste, Bohrspülungen, Farben, Frischbeton und biologische Flüssigkeiten.³

Rheometer bzw. die Rheologie wird in nahezu jeder Industrie genutzt, um Materialien zu analysieren und zu charakterisieren. Beispiele hierfür sind Kunststoffe, Farben und Beschichtungen, Produkte der Lebensmittelindustrie wie Jogurt oder neue Fleischersatzprodukte, Kosmetik und Pharmazeutika, Produkte aus der Petrochemie und Asphalt und Bitumen, Kleb- und Dichtstoffe oder Stoffe für die Bauindustrie.

2.1 Grundbegriffe der Rheologie

Zur wissenschaftlichen Beschreibung von rheologischen Messungen und Materialkennwerten werden rheologische Grundbegrifflichkeiten benötigt. Relevante Begriffe werden in den folgenden Kapiteln beschrieben und in weiterer Folge genauer erläutert. Um das rheologische Verhalten, das Fließ-Verhalten, wissenschaftlich beschreiben zu können, wird auf das Zwei-Plattenmodell, siehe Abb. 4, zurückgegriffen. Im Rheometer wird die Messprobe zwischen der unteren fixierten Messplatte und der oberen parallelen

² Vgl. Irgens (2014), S. 4.

³ Vgl. Irgens (2014), S. 4.

beweglichen Platte geschert, siehe Abb. 3. Die obere Messplatte mit der (Scher-) Fläche A wird die (Scher-) Kraft F bewegt und die resultierende Geschwindigkeit v wird gemessen. Im Messspalt mit der Höhe h wird somit die eingelegte Probe geschert.⁴

Folgende Bedingungen werden für den Scherversuch vorausgesetzt. Nur wenn beide Bedingungen erfüllt werden, können die rheologischen Parameter der Probe exakt ermittelt werden:⁴

- Die Probe hat an beiden Messflächen Wandhaftung und zeigt weder ein Abrutschen noch ein Gleiten auf den Messplatten.
- Es herrschen laminare Fließbedingungen. Es soll keine turbulente Strömung (Wirbelbildung) auftreten.

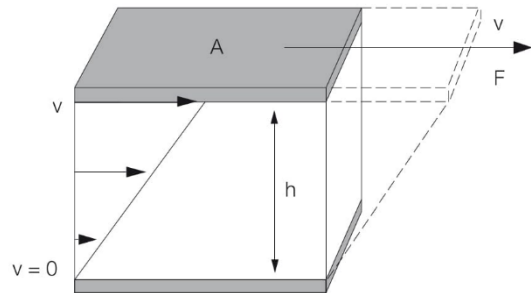


Abb. 4: Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit im Spalt des zwei-Platten-Modells für Scherversuche, Quelle: (Mezger2012, S. 23.)



Abb. 3: Zwei-Platten-Modell für Scherversuche: Messprobe wird zwischen den beiden Platten geschert, wenn die obere Platte verschoben wird, während die untere Platte ruht. Die Abbildung zeigt eine idealisierte Darstellung der einzelnen, gegeneinander verschoben Schichten, Quelle: Metzger (2021), S.21.

2.1.1 Das Viskositätsgesetz

Wie einleitend beschrieben beschäftigt sich die Rheologie mit dem „Fließen“ von Materialien. Die Viskosität ist ein essenzieller Begriff, der das Flussverhalten beschreibt. Die Viskosität einer Flüssigkeit oder Dispersion beschreibt den inneren Fließwiderstand. Dieser entsteht, wenn Moleküle und Teilchen in Bewegung versetzt werden. Alle Flüssigkeiten sind aus Molekülen aufgebaut. Dispersionen enthalten zusätzlich deutlich größere Teilchen und bestehen aus einem heterogenen Gemisch mindestens zweier Stoffe. Größere Moleküle eines Materials, einer Flüssigkeit oder Dispersion führen zu einem größeren Viskositätswert. Lösungsmittelmoleküle besitzen eine Größe von ca. 0,5 nm, Polymere ca. 50 nm (Durchmesser der aufgerollten Kugel im Ruhezustand) und Mineralpartikel ca. 5000 nm. Das Größenverhältnis zwischen Molekülen und Partikeln liegt somit im Bereich von 1:100 bis 1:10.000.⁵

⁴ Vgl. Mezger (2012), S. 23.

⁵ Vgl. Metzger (2021), S. 25 – S.26.

Für die Berechnung des Viskositätswert, muss das newtonsche Gesetz umformuliert werden. Das griechische Symbol η (eta) steht für die Scherviskosität (Viskosität), welche in Teilen der Literatur auch als dynamische Viskosität bezeichnet wird. Somit ergibt sich die Scherviskosität mit der Berechnung der Scherspannung geteilt durch die Schergeschwindigkeit.⁵

$$\tau = \eta * \dot{\gamma} \rightarrow \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1) \quad \begin{array}{ll} \eta/\text{Pas} & \text{Dynamische Viskosität oder Scherviskosität} \\ \dot{\gamma}/\text{s}^{-1} & \text{Scherrate} \\ \tau/\text{Pa} & \text{Scherspannung} \end{array}$$

Um den Begriff Viskosität greifbar einzuordnen, folgen Beispiele von üblichen Viskositätswerten:⁶

- Wasser bei 20 °C: 1 mPas
- Olivenöl bei 20 °C: 100 mPas
- Shampoo 20 °C: 3.000 mPas
- Polymerschmelzen bei Scherraten von 10 bis 1.000 s⁻¹ zwischen +150 °C und +300 °C: 50 mPas bis 10.000 mPas
- Polymerschmelzen bei Scherraten von <1 s⁻¹ (Nullviskosität) zwischen +150 °C und +300 °C: 1 kPas bis 1 MPas
- Bitumen bei +80 °C: 200 Pas
- Bitumen bei +40 °C: 20 kPas

Aus dieser Auflistung ist auch ersichtlich, dass Polymerschmelzen bei niedrigen Scherraten eine niedrigere Viskosität aufweisen. Außerdem kann pauschal gesagt werden, dass Stoffe mit einer hohen Viskosität sehr zähflüssig sind und meist eine höhere Dichte im Vergleich zu niederviskosen Stoffen besitzen, welche gut fließen und meist eine niedrigere Dichte aufweisen.

Niederviskose Materialien, wie beispielsweise Shampoo, lassen sich problemlos auch automatisiert trimmen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass eine Verfälschung des Messergebnisses durch ein suboptimales Trimmergebnis aufgrund der niedrigen Viskosität von 3.000 mPas in der Regel weniger gravierende Auswirkungen hat als bei höherviskosen Materialien. Dies ist mit ein Grund, weshalb in dieser Arbeit der Fokus auf der Charakterisierung und der Eingrenzung des Trimmergebnisses von Polymerschmelzen liegt.

Einfluss auf das Fließverhalten:

Verschiedene Umstände wirken sich direkt auf das Fließverhalten von Stoffen aus.

- Laminarer Fluss oder turbulente Strömung
Für die Analyse der Strömungsart wird ein Material bzw. Flüssigkeit in imaginären dünnen Schichten betrachtet, in denen es fließt. Laminarer Fluss bedeutet, dass sie die Moleküle eines

⁶ Vgl. Mezger (2021), S. 25.

Stoffes sich nicht von einer Schicht zur anderen bewegen, sondern ihre Bewegung ein regelmäßiges Strömungsmuster bildet, siehe links in Abb. 5. Eine turbulente Strömung ist nicht strukturiert, sie ist geprägt von nichtlinearen und instationären Bewegungen. Dies führt zu Wirbeln und Verwirbelungen und verursacht fehlerhafte Messergebnisse, siehe rechts in Abb. 5. Die Viskosität erscheint höher als sie tatsächlich ist, weil das Prüfgerät das zufällige Verhalten der Moleküle fälschlicherweise als höheren Strömungswiderstand registriert.

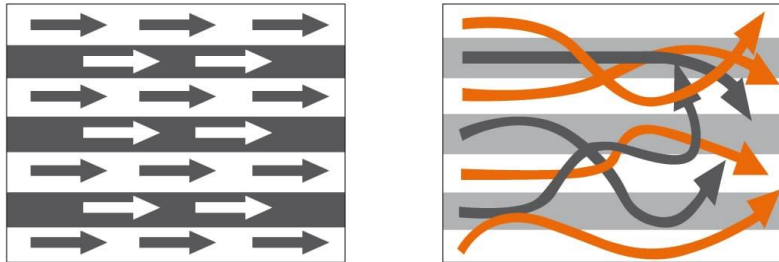


Abb. 5: Homogene Schichtströmung oder laminares Fließen (links) und turbulente Strömung mit Wirbelbildung (rechts), Quelle: Metzger (2021), S. 25.

- Temperatur

Neben der Schergeschwindigkeit ist auch die Temperatur ein wesentlicher Faktor, der die Viskosität einer Flüssigkeit beeinflusst. Die Viskosität einer Substanz nimmt mit steigender Temperatur ab, während sie umgekehrt proportional zur Temperatur zunimmt. Diese gegenläufige Korrelation ist für alle Stoffe gültig. Die Viskosität einer Flüssigkeit ist in hohem Maße von ihrer Temperatur abhängig.⁷ Im Rahmen der praktischen Anwendung wird der genannte Effekt genutzt, um mit einer Probe verschiedene Viskositäten zu simulieren und den Einfluss der Viskosität zu prüfen.

Arten von Viskositäten

Neben der kinematischen- und der der relativen Viskosität, die für diese Arbeit nicht von Relevanz sind, werden die komplexe- und die scheinbare Viskosität näher erläutert.

Komplexe Viskosität

Die Viskosität wird bei Oszillationsversuchen mittels der komplexen Viskosität $|\eta^*|$ ausgegeben.

$ \eta^* = \frac{G^*}{\omega}$	(2.2)	$ \eta^* /\text{Pas}$	Komplexe Viskosität
		G^*/Pa	Komplexes Schubmodul
		ω/s^{-1}	Kreisfrequenz

Für Proben mit $G' > G''$ sind die Angaben der komplexen Viskosität nicht brauchbar, da die $|\eta^*|$ -Kurve bei niedrigen Frequenzen gegen einen unendlich hohen Wert strebt. Bei solchen Proben sollte nur G' und G'' analysiert werden. Dies tritt auf die bisher untersuchten Polymere jedoch nicht zu.

⁷ Vgl. ksb (2024).

Scheinbare Viskosität

Im Idealfall haben viskose oder newtonsche Flüssigkeiten eine konstante Viskosität für alle Schergeschwindigkeitsstufen. Bei scherabhängigen Flüssigkeiten, wie bei Polymeren, variiert hingegen die Viskosität. Daher muss angegeben werden, bei welcher Scherrate bzw. Kreisfrequenz ein Viskositätswert ermittelt wird. Dies ist die "scheinbare Viskosität" oder "scheinbare Scherviskosität". Jeder scheinbare Wert ist ein Punkt der Viskositätsfunktion.

Bei Rotationsversuchen kann hiermit ein scherverdünnendes- oder scherverdickendes Verhalten beobachtet werden. Scherverdickendes Verhalten bedeutet, dass die Viskosität bei höherer Schergeschwindigkeit zunimmt. Scherverdünnendes Verhalten bedeutet, dass die Viskosität bei höherer Schergeschwindigkeit abnimmt.

2.1.2 Schubspannung

Die Schubspannung, oder auch teils als Scherspannung bezeichnet, wird vom Auswerteprogramm des Rheometers berechnet. Im Falle eines Anton Paar MCR ist dies die Software „Rheo Compass“. Bei jedem Messpunkt wird von dem Rheometer das Drehmoment gemessen. Falls das Drehmoment vorgegeben werden soll, wird die Drehzahl ermittelt, um den Fließwiderstand der Messprobe zu erhalten. Die Fläche resultiert aus dem verwendeten Messsystem und wird auch als Scherfläche bezeichnet. Die Schubspannung ist mit der Gleichung (2.3) definiert und hat als Einheit Pa (Pascal).⁸

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

τ/Pa	Schubspannung
F/N	Kraft
A/m^2	Fläche

2.1.3 Scherrate

Die Scherrate wird ebenso von Rheo Compass berechnet. Hierfür wird bei jedem Messpunkt die Geschwindigkeit vom Rheometer in Form der Drehzahl erfasst. Falls die Drehzahl vorgegeben werden soll, wird stattdessen die resultierende Scherkraft gemessen. Der Messspalt ist aufgrund des Messsystems bzw. der Definition in dem Prüfablauf bekannt. Für die Scherrate wird auch der bedeutungsgleiche Begriff „Deformationsrate“ verwendet. Die Scherrate wird durch die Gleichung (2.4) ermittelt und hat als Einheit 1/s.⁹

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad (2.4)$$

$\dot{\gamma}/\frac{1}{\text{s}}$	Scherrate
$v/\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Geschwindigkeit
h/m	Messspaltweite

⁸ Vgl. Mezger (2021), S. 22.

⁹ Vgl. Mezger (2021), S. 22–23.

2.2 Rotations-Rheometer

Es gibt zahlreiche Hersteller von Rheometern am Markt. Unternehmen wie TA Instruments, Netzsch oder Brookfield verfügen über ein großes Angebot und agieren weltweit. Das Unternehmen Anton Paar GmbH konnte sich jedoch als Marktführer mit seinem Rheometer-Portfolio durchsetzen. Die Rheometer der MCR-Serie (engl. Modular Compact Rheometer) finden ihren Einsatz in der Routine-QC (Qualitätskontrolle) bis zu Spitzenanwendungen in der F&E (Forschung und Entwicklung). Der luftgelagerte EC-Motor gewährleistet die Genauigkeit über einen großen Viskositätsbereich. Er ermöglicht die Messung von Flüssigkeiten mit einer Viskosität, die unterhalb derjenigen von Wasser liegt, sowie die Charakterisierung steifer Materialien wie Polymerverbundwerkstoffe und Stahl, einschließlich aller Zwischenstufen, mittels DMA (Dynamisch Mechanische Analyse) zu charakterisieren.¹⁰

Die Analyse der verschiedenen Stoffe wird entsprechend der jeweiligen Probeneigenschaften durchgeführt. Basierend auf den zu untersuchenden Probeneigenschaften erfolgt eine Auswahl des Rheometers aus einem Portfolio, welches verschiedene Modelle mit unterschiedlichem Funktionsumfang, unterschiedlichen Messsystemen sowie optionalen Zusatzmodulen, wie Temperier-Elementen, umfasst. Wie bereits in der Einleitung beschrieben, werden mit den automatisierten Systemlösungen Proben aus der Polymerindustrie, Farben und Lacke, Proben aus der Lebensmittelindustrie, Kleb- und Dichtstoffe und Proben aus der Kosmetikindustrie, wie Cremen oder Shampoo untersucht. Für Proben aus anderen Bereichen bestehen entweder eine zu geringe Nachfrage am Markt oder eine zu hohe Komplexität für eine Automatisierung.

2.2.1 Software

Die Software mit der das MCR gesteuert werden kann heißt „Rheo Compass“. In dieser Software werden Messprofile angepasst und erstellt sowie Ergebnisse berechnet und verwaltet.

Im Aufbau des HTR 7000 läuft eine Instanz von Rheo Compass, welche das Rheometer steuert. Alle Befehle für das Verfahren des MCR oder das Starten einer Messung werden von der internen Speicherprogrammierenden Steuerung (SPS) gesendet und durch Rheo Compass ausgeführt.

Die Messprofile, die den Messprozess definieren werden als „Template“ bezeichnet. In diesen Templates werden alle Messprozessschritte wie die Temperatur, Messpunkte, Wartezeiten und das Messprofil bzw. die schlussendliche Auswertung definiert. Messungen werden in Projekten gespeichert, in denen die Ergebnisse analysiert werden können.

Weitere Inhalte zu den verwendeten Templates und Messabläufen werden in Abschnitt Kapitel 5 erläutert.

2.2.2 Rheologische Messsysteme für Rotations-Rheometer

Für die rheologische Charakterisierung gibt es eine Vielzahl von Messsystemen, in dieser Arbeit meist als „Messgeometrie“ bezeichnet. Neben Rotationsversuchen sind mit Rheometern eine Vielzahl an Versuchen möglich, wie zum Beispiel ein 3-Punkt Biegeversuch von Polymeren. In den automatisierten Systemen der

¹⁰ Vgl. Anton Paar (06/09/2024).

Abteilung Automation and Robotics werden zum Verfassungszeitpunkt jedoch nur Rotationssysteme verwendet. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit nur auf diese Systeme eingegangen.

Es gibt Rotationsversuche mit Spindeln, diese werden als Relativmesssysteme bezeichnet. Die Spindel wird in den Becher samt Probe getaucht. Bei konstanter Drehzahl der Spindel wird das anliegende Drehmoment gemessen. Typische Spindelgeometrien sind Zylinder, Scheiben, Stifte und kreuzförmige T-Stab Rührer. Das Ergebnis gilt als „relativ“ da die Ergebnisse mit der Größe der Geometrie zusammenhängen. Diese Messsysteme sollten nur für einfache Qualitätskontrollprüfungen verwendet werden.¹¹ Spindel Geometrien kommen beispielsweise bei dem HTR 3000 von Anton Paar zum Einsatz. Dies ist die automatisierte Einstiegslösung der Abteilung A&R. Mit einem automatisierten MCR 102 oder MCR 302 wird von Kund*innen die relative Viskosität von Lacken vor dem Auftragen an der Fertigungslinie geprüft.

Im HTR 7000 System werden hingegen werden Absolut-Messsysteme verwendet. Deswegen werden die Geometrien „Platte-Platte“ und „Kegel/Platte“ näher beschrieben. Mit Absolut-Messsystemen ist die Bestimmung von Absolutwerten, wie der Viskosität, möglich. Diese Absolutwerte sind von der Größe des Messsystems unabhängig. Diese Geometriepaare weisen einen engen Scherspalt auf, dieser wird durch Normen wie die ISO 3219-2 und DIN 53019 definiert. In Abb. 6 findet sich links oben eine symbolhafte Darstellung von Kegel/Platte mit Radius R , Kegelwinkel α , und Kegelspitzenabnahme a . Links unten ist ein Symbolbild von einem Platte/Platte Messsystem mit Radius R und Messspalt (Plattenabstand) H . Auf der rechten Seite im Bild ist ein konzentrisches Zylindersystem mit Messkörperradius R_i , Messbecherradius R_e und Innenwinkel α an der Messkörperspitze.¹²

Das Absolut-Messsystem konzentrischer Zylinder kommt aktuell nur im HTR 3000 zur Anwendung.

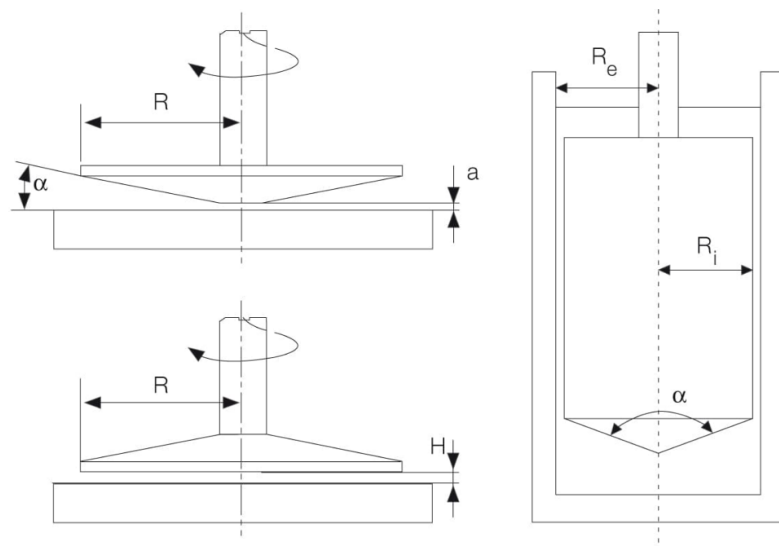


Abb. 6: Absolut-Messsysteme Kegel/Platte, konzentrische Zylinder und Platte/Platte, Quelle: (Mezger2021, S. 16.)

¹¹ Vgl. Mezger (2021), S. 13.

¹² Mezger (2021), S. 16.

PP-Geometrien

PP, Platte/Platte, steht im Englischen für plate-and-plate. Der Durchmesser variiert von 10 mm bis 50 mm. So kann als Beispiel PP 25 für die in der Arbeit untersuchten Polymerschmelzen verwendet werden, dieses System hat einen Durchmesser von 25 mm (R12,5 mm). Die Messsysteme für die Automatisierung unterscheiden sich zu den Geometrien im manuellen Betrieb. Regulär wird für die untere Platte eine im Durchmesser größere Platte verwendet. Dies erleichtert die manuelle Befüllung des Systems. Für die Automatisierung waren geometrische Anpassungen für das Roboterhandling und den Trimmvorgang notwendig. Die Schaftlänge der oberen Geometrie wurde gekürzt, um sie automatisiert ein- und ausnehmen zu können. Bei der



Abb. 7: PP25 Messgeometrien angepasst für die Automatisierung, (links- untere Geometrie), (rechts- obere Geometrie), Quelle: Eigene Darstellung.

unteren Plattengeometrie wurde am äußeren Rand eine radiale Nut hinzugefügt, um diese mit dem Roboter greifen zu können. Der Durchmesser wird dem dazugehörigen Durchmesser der oberen Geometrie angepasst. Siehe Abb. 7. Erst durch diesen Absatz ist das automatisierte Trimmen möglich.

*"PP-Messsysteme sind empfehlenswert zur Prüfung von Pasten, Gelen, weichen Festkörpern und hochviskosen Polymerschmelzen. Sie sind in den Messsystemnormen ISO 3219-2, ISO 6721-10 und DIN 53019 beschrieben. Empfohlen werden hier Spaltweiten von 0,5 mm bis 1,0 mm."*¹³

Für die vermessenen Polymerschmelzen werden in der Praxis, aufgrund der Kund*innendefinition jedoch Spaltweiten von beispielsweise 1,6 mm verwendet.

Vor- und Nachteile¹⁴

Vorteile des Messsystems sind die kleine Menge an benötigtem Probenmaterial, die leichte Einstellung des Messspalts für die Messung von niederviskosen bis zu hochviskosen Proben und die leichte Reinigung.

Nachteile sind die ungleichmäßig auftretenden Scherbedingungen im Messspalt. Außen am Plattenrand wird stärker geschert als in der Plattenmitte. Am Plattenrand können Effekte wie Spaltentleerung und das Eintrocknen der Messprobe auftreten. Dies weist auch auf die Wichtigkeit einer sauberen Trimmung hin. Es lässt sich der Schluss ziehen, dass der Probenrand einen großen Einfluss auf das Messergebnis hat. Zudem muss mit einer ungleichmäßigen Temperatur gerechnet werden. Dem kann und wird im HTR 7000 aber mit einer gleichmäßigen Temperierung von oben und unten und ausreichenden Temperierzeiten entgegengewirkt.

¹³ Mezger (2021), S. 18.

¹⁴ Vgl. Mezger (2021), S. 18–19.

CP-Geometrien

Cone Plate (CP), steht im Englischen für cone-and-plate und bedeutet Kegel/Platte. Diese Messsysteme sind für alle Arten von Flüssigkeiten geeignet, für Dispersionen jedoch nur bis zu einer begrenzten Partikelgröße. Sie sind in den Normen ISO 3219-2 und DIN 53019 beschrieben. In der Norm wird ein Kegelwinkel $\alpha = 1^\circ$ empfohlen und betrachtet den Kegel mit Winkeln von über 4° als nicht normgemäß. Für die exakte Messung werden CP-Messsysteme mit abgenommener Kegelspitze verwendet. Das Maß a aus Abb. 6 ist entscheidend für die maximal zulässige Partikelgröße (d), mit dem Richtwert von $d \leq (a/10)$. Bei dem beispielhaften Messsystem CP25-1, Durchmesser 25 mm mit dem Kegelwinkel $\alpha = 1^\circ$, ist der Einstellspalt meist $a = 50 \mu\text{m}$. Damit wäre die maximale Partikelgröße d nach Richtwert etwa $5 \mu\text{m}$.¹⁵

Auch CP-Geometrien wurden für die Automatisierbarkeit, ident wie oben bei den PP-Geometrien angeführt, angepasst.

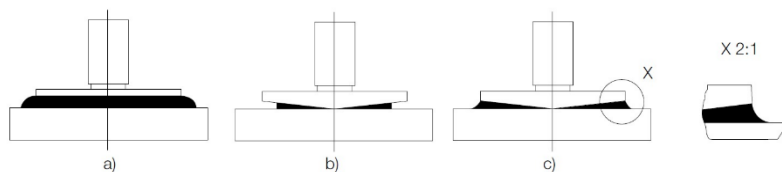


Abb. 8: Befüllung des Kegel/Platte-Messsystems nach der Spalteinstellung, Quelle: (Mezger2021, S. 17.)

Für eine korrekte Messung ist sowohl bei PP-Geometrien als auch bei CP-Geometrien, die korrekte und blasenfreie Füllung des Messspalts mit der richtigen Probenmenge entscheidend. In Abb. 8 sind beispielhaft bei a) zu viel Probe, bei b) zu wenig Probe und bei c) die richtige Menge der Probe im Messspalt nach DIN 51810-1 gefüllt. Meist wird die Probe in Überschuss gefüllt und anschließend „getrimmt“ dieser Vorgang wird in 2.3 Der Trimmprozess näher erläutert.

Vor- und Nachteile

Vorteile von CP-Messsystemen sind gleichmäßige Scherbedingungen im gesamten konzentrischen Messspalt. Durch das geringe benötigte Probenvolumen, bei CP25-1 ist das Volumen geringer als 0,1 ml, ist eine schnelle homogene Temperierung und Reinigung möglich.

Durch den engen Spalt in der Mitte ist nur eine begrenzte Partikelgröße zulässig. Am Kegelrand können erneut Effekte wie Spaltentleerung oder das Eintrocknen der Probe auftreten.¹⁶

2.3 Der Trimmprozess

Der Trimmprozess ist aus dem rheologischen Teil das Kernelement dieser Arbeit. Als trimmen wird im Betrachtungsrahmen von rheologischen Messungen das „Wegschneiden“ oder Stutzen der Probe um den Geometriedurchmesser verstanden. Dies führt bei präziser Durchführung zu einem definierten Messquerschnitt der Probe im Messspalt zwischen dem Geometriepaar. Im manuellen Messablauf werden meist Spatel oder Wattestäbchen, abhängig vom Probentyp, verwendet. In der automatisierten Lösung, dem „Trimmtool“, werden Trimmklingen aus Federstahl verwendet. Diese sind als Einwegprodukt gedacht,

¹⁵ Vgl. Mezger (2021), S. 16.

¹⁶ Vgl. Mezger (2021), S. 17.

können aber von Kund*innen, sofern diese beim Trimmprozess nicht verbogen wurden, auch wiederverwendet werden.

Zum Verfassungszeitpunkt ist ausschließlich das Unternehmen Anton Paar in der Lage, eine Probe automatisiert und präzise zu trimmen. Diese Lösung wurde auch patentrechtlich geschützt. Ob und welche Grenzen das Trimmtool aufweist wird in dieser Arbeit untersucht. Die These ist, dass durch automatisiertes Trimmen die Reproduzierbarkeit der erzielten Messergebnisse im Vergleich zu manuellem Trimmen maßgebend gesteigert werden kann. Das bedeutet konstantes präzises Trimmen.

*"Die Reproduzierbarkeit einer Messmethode bezeichnet den Grad, zu dem die Resultate übereinstimmen, wenn der Messvorgang unter den gleichen Bedingungen wiederholt wird."*¹⁷

Der Fokus wird in dieser Arbeit auf synthetische Polymere gelegt, da bis zu dem Verfassungszeitpunkt keine Schwierigkeiten mit anderen Probenarten im Trimmvorgang festgestellt wurden. Die Verarbeitung niederviskoser Proben wie Shampoo oder Cremen der Körperpflegeindustrie funktionieren problemlos. Zudem zeigen Erfahrungswerte, dass ein ungenaues Trimmergebnis bei niederviskosen Stoffen einen geringeren negativen Einfluss aufweist als bei hochviskosen Materialien, wie den in dieser Arbeit untersuchten Polymerschmelzen.

Interpretation des Trimmergebnisses:

Die Trimmergebnisse aus der Trimmbarkeitsstudie werden im praktischen Teil einer optischen Bewertung unterzogen, da eine vollständige Versuchsreihe für jeden Probentyp den vorgegebenen Rahmen überschreiten würde. Dafür werden vorab die Begriffe „OK“ und „NOK“ definiert:

Folgendes wird als gutes Ergebnis „OK“ gewertet:

- Homogenes Bild des Probenrandes
- Korrekt gefüllter Messspalt (keine Probe wurde herausgezogen)
- Keine Fadenbildung
- Kein Probenrückstand des Trimmvorgangs berührt den Messkörper

Beispiele für ein gutes Trimmergebnis ist in *Abb. 55* ersichtlich.

Folgendes wird als schlechtes Ergebnis „NOK“ gewertet:

- Inhomogenes Bild des Probenrandes
- Inkorrekt gefüllter Messspalt (Probe wurde herausgezogen)
- Fadenbildung mit Kontakt zur Probe oder Messkörper
- Probenrückstand des Trimmvorgangs berührt den Messkörper

¹⁷ springermedizin.de (24/04/2018).

Beispiele für schlechte Trimmergebnisse sind in *Abb. 9* und *Abb. 10* ersichtlich:

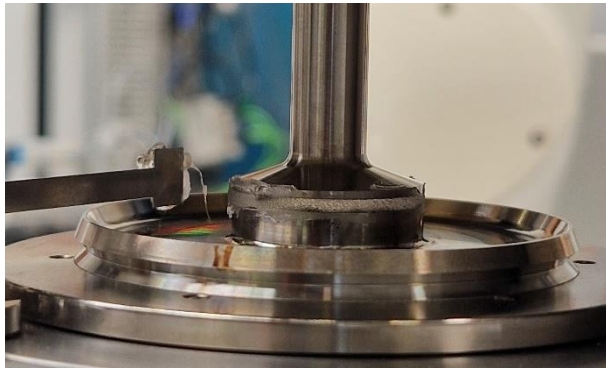


Abb. 9 Beispiel für ungenaues Trimmergebnis mit Probenrückstand auf der oberen Messgeometrie, Quelle: Eigene Darstellung.

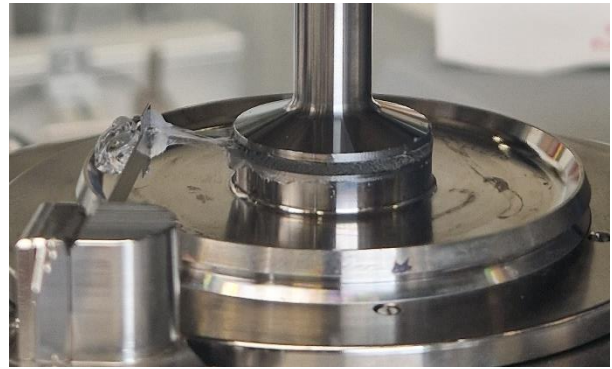


Abb. 10 Beispiel für ungenaues Trimmergebnis mit Faden zur Messgeometrie, Quelle: Eigene Darstellung.

Einfluss auf das Messergebnis bei nicht korrekten Trimmergebnissen bzw., über- oder unvollständig gefülltem Messspalt:

- Messspalt überfüllt: Ein höherer Viskositätswert zu dem realen Wert wird gemessen → Der Probenrand beeinflusst die Messung. Dies wird in *Kapitel 5, Abschnitt 5.3*, mit einer Messung ohne Trimmung praktisch getestet.
- Messspalt unterfüllt: Niedrigere Viskositätswerte zu dem realen Wert werden gemessen

Die Berechnung durch die auswertende Software nimmt einen korrekt gefüllten Messspalt an. Eine Veränderung der Probenmenge, beziehungsweise des Volumens oder der Auflagefläche, führt zur Ermittlung von Messergebnissen, die einen Offset im Vergleich zum tatsächlichen Ergebnis aufweisen. Wie groß dieser Offset ist, hängt von der Über- bzw. Unterfüllung ab.

2.4 Rheologische Untersuchung von Polymeren

Polymere zählen heutzutage zu den wichtigsten Materialien für den technischen Gebrauch und spielen eine sehr wichtige Rolle im täglichen Leben. Deren Eigenschaften können an nahezu jedes Anwendungsgebiet angepasst werden. Neben natürlichen Polymeren wie Proteine, Stärke, Zellulose usw. gibt es viele verschiedene Arten von synthetisch hergestellten Polymeren wie Nylon, Silikone, PVC, PMMA oder PE. Einige Polymere sind hart und spröde, andere zäh und stoßfest, während wieder andere weich und flexibel sind, siehe *Abb. 11*. Die Herstellung und Charakterisierung von Polymeren steht daher im Fokus zahlreicher Industrien und spezialisierter Forschungseinrichtungen.¹⁸

¹⁸ Vgl. Anton Paar (28/09/2024).

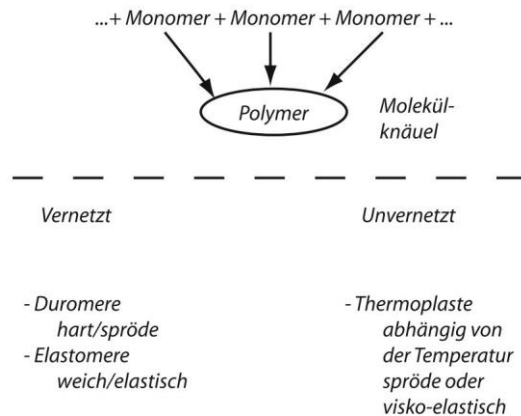


Abb. 11: Vernetzung von Polymermolekülen, Quelle: (Weißbach, Dahms und Jaroschek 2018, S. 368.)

„Kunststoffe sind molekular: Moleküle sind Ansammlungen von Atomen, die über die Elektronen der Hülle fest miteinander verbunden sind.“¹⁹

In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf Thermoplaste gelegt, da diese Gruppe der Polymere aktuell am häufigsten für die Charakterisierung in einem HTR 7000 System nachgefragt wird. Die für die Untersuchung herangezogenen Proben wurden von Kund*innen aus der Polymerindustrie zur Verfügung gestellt.

Thermoplaste, in der Fachliteratur auch als "Thermoplastics" bezeichnet, sind Kunststoffe, die aus physikalisch untereinander verbundenen linearen oder verzweigten Makromolekülen bestehen. Bei Raumtemperatur weisen sie eine hohe Festigkeit auf, während sie sich bei Erwärmung bis in einen plastischen Zustand vergleichsweise leicht verformen lassen. Der Vorgang ist reversibel, d. h., beim Abkühlen erstarren sie wieder. In Thermoplasten können sich lineare Makromoleküle ohne oder mit regelmäßig angeordneten, nicht zu sperrigen Substituenten in mikroskopischen Bereichen gleichmäßig parallel zueinander lagern und Kristallite bilden. Hierbei handelt es sich um kleine einzelne Kristallkörner mit unregelmäßiger Oberfläche, die oft im Wachstum behindert sind. Polymerwerkstoffe, die kristalline Bereiche aufweisen, enthalten zusätzlich amorphe Gebiete, in denen eine Ordnung der Makromoleküle nicht möglich ist. Diese werden als teilkristallin (semicrystalline) bezeichnet. Darüber hinaus existieren amorphe Thermoplaste (amorphous). Duroplaste und Elastomere weisen ebenfalls eine amorphe Struktur auf, wobei hier lediglich wenige Ausnahmen zu nennen sind.²⁰

Polymere weisen ein komplexes rheologisches Verhalten auf, das bei der Verwendung oder Herstellung solcher Materialien zu beachten ist. Polymere sind große Moleküle, die aus vielen sich wiederholenden Untereinheiten bestehen, die Monomere genannt werden. Die Länge der Molekülketten und die Verschlaufungen zwischen ihnen sind entscheidend für die Eigenschaften des Materials. Viele relevante Polymereigenschaften können durch rheologische Tests charakterisiert werden. Für die Beschreibung dieser Eigenschaften sind verschiedene Prüfverfahren erforderlich, um die gewünschten Informationen zu

¹⁹ Weißbach, Dahms und Jaroschek (2018), S. 8.

²⁰ Vgl. Ehrenstein (2011), S. 32–33.

erhalten. Mithilfe rheologischer Methoden können die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Polymeren charakterisiert werden. Dazu gehören die Viskosität der Schmelze, das Fließverhalten, die viskoelastischen Eigenschaften, das temperaturabhängige Verhalten, die Glasübergangstemperatur, das Alterungsverhalten und vieles mehr. Rheologische Prüfverfahren werden sowohl in der Qualitätskontrolle als auch bei der Optimierung von Kunststoffendprodukten eingesetzt, beispielsweise zur Bestimmung der Viskosität, viskoelastischer Parameter und molarer Masse. Weiters wird die rheologische Analyse für die Verbesserung des Verarbeitungsverhalten genutzt um Methoden wie Spritzguss, Extrusion oder Faserspinnen zu optimieren.²¹

2.4.1 Oszillationsversuche für Polymerschmelzen

Für die Analyse von Polymerschmelzen werden anstelle von reinen Rotationsversuchen, Oszillationsversuche verwendet. Polymerschmelzen haben sowohl viskose (fließende) als auch elastische (speichernde) Eigenschaften, wodurch sie als viskoelastische, nicht newtonsche Materialien klassifiziert werden. Oszillationsversuche ermöglichen die Trennung von elastischen und viskosen Anteilen ($G' = \text{Speichermodul}$ und $G'' = \text{Verlustmodul}$). Des Weiteren gestatten Oszillationsversuche die Aufdeckung der Frequenzabhängigkeit sowie die Bereitstellung struktureller Informationen, welche mittels Rotationsversuchen nicht zugänglich sind.²²

Der Stimulus, bzw. die Vorgabe der Deformation durch das Rheometer mittels der oberen Messgeometrie, ist bei Oszillationsversuchen sinusförmig, siehe Abb. 12. Diese Sinuskurve wird durch die Amplitude (wird mittels Amplitudentest ermittelt) und die Schwingungsdauer festgelegt. Die Schwingungsfrequenz ist der reziproke Wert der Schwingungsdauer. Es wird die Kraft F , welche bei dem Zwei-Platten-Modell an der unteren starren Messplatte wirkt, gemessen. Diese Kraft ist als Gegenkraft erforderlich, um die untere Messgeometrie festzuhalten. Das Signal wird in der Rheologie als Schubspannung τ ausgewertet. Beide Sinuskurven, die erregende und die resultierende, schwingen mit der Frequenz f . Dies gilt aber nur bis zu

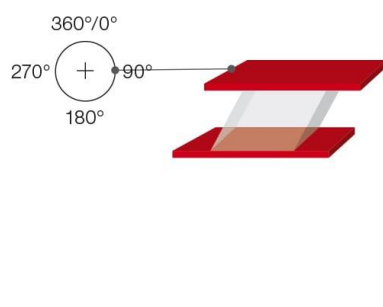


Abb. 13: Oszillationsversuch mit dem Zwei-Platten-Modell, rechts dargestellt ist der zeitabhängige Deformationswert mit der Amplitude γ_A der oberen Platte. Während einer vollen Umdrehung des Antriebsrades ergibt sich über die Zeitachse eine vollständige Sinusschwingung, Quelle: Metzger (2021), S. 90.

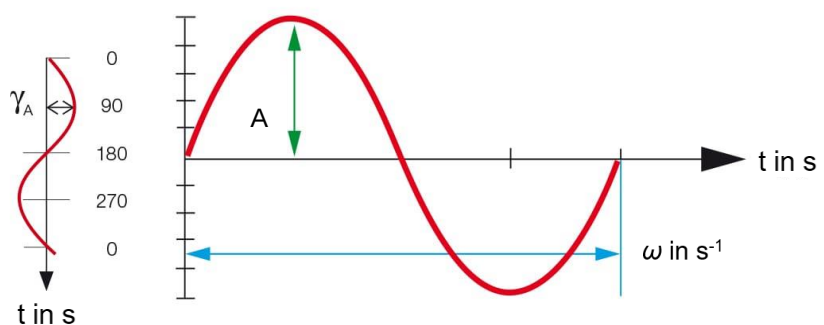


Abb. 12: Eine Sinuskurve, beschrieben über die Amplitude A und die Frequenz ω , Quelle: Metzger (2021), S. 90.

²¹ Anton Paar (28/09/2024).

²² Vgl. Mezger (2021), S. 89–121.

jener Verformung, bei welcher die Messprobe nicht ihre innere Struktur verliert, siehe Abb. 13. Bei einer zerstörten Probe wäre die Ergebniskurve nicht mehr sinusförmig.²³

Oszillationsversuche ermöglichen Messungen im linearen viskoelastischen Bereich (LVE). Dies impliziert, dass das Material in kleinen Amplituden geschert wird, ohne dass es zu einer plastischen Verformung oder Zerstörung kommt. Diese Amplitude wird, wie bereits zuvor beschrieben, zuerst bei unbekannten Proben mittels eines Amplitudentests ermittelt. Die Materialantwort bleibt linear, was eine ideale Voraussetzung darstellt, um die intrinsischen rheologischen Eigenschaften zu erfassen.²⁴

Die Sinusfunktionen der Erregerfunktion und der Antwort werden in nachfolgender Grafik dargestellt. Hier ist auch die resultierende Phasenverschiebung δ zu sehen, welche die viskoelastischen- und viskoplastischen Eigenschaften zusammenfasst.

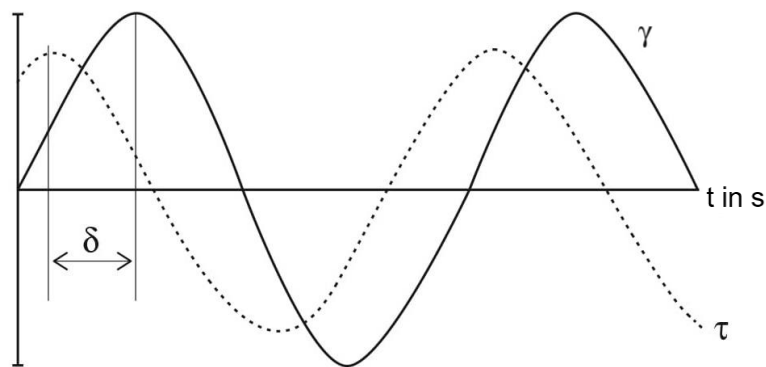


Abb. 14: Oszillationsversuch, dargestellt als Sinusfunktion über die Zeit mit vorgegebener Scherdeformation γ und Schubspannung τ , zwischen den beiden Funktionen tritt die Phasenverschiebung δ auf, Quelle: Metzger (2021), S. 91.

Phasenwinkel δ

Der Phasenwinkel δ ist wie einleitend beschrieben die Phasenverschiebung aus der Erregerschwingung und der Materialantwort. Dieser Winkel, zu sehen in Abb. 14, ist zugleich die Beziehung aus $G' = \text{Speichermodul}$ und $G'' = \text{Verlustmodul}$. Siehe Gleichung (2.5)

$$\tan(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad (2.5) \quad \delta^\circ \quad \text{Phasenwinkel}$$

G''/Pa Verlustmodul

G'/Pa Speichermodul

*"Es gilt für die Phasenverschiebung: $\delta = 0^\circ$ für ideal-elastisches Deformationsverhalten und $\delta = 90^\circ$ für ideal-viskoses Fließverhalten. Viskoelastisches Verhalten liegt zwischen diesen beiden Extremen."*²⁵

Der $\tan(\delta)$ wird als Verlustfaktor oder Dämpfungsfaktor bezeichnet. Diese Größe beschreibt das Verhältnis aus dem Verlust- und Speichermodul.²⁶ Wie aus dem Zitat von Metzger oben ersichtlich, gibt dieses

²³ Vgl. Metzger (2021), S. 89–91.

²⁴ Vgl. Metzger (2021), S. 102–105.

²⁵ Metzger (2021), S. 91.

²⁶ Vgl. Metzger (2021), S. 99.

Verhältnis Auskunft über das Deformationsverhalten der Probe. Polymere sind viskoelastisch, bei geringen Kreisfrequenzen (z.B. bei 0,01 bis 0,5 rad/s) ist meist $G'' > G'$, bei hohen Frequenzen (z.B. bei 10 rad/s) meistens $G' > G''$.

Der Übergangspunkt bei dem sich $G'' > G'$ in $G' > G''$ ändert, wird Sol-/ Gel-Übergang genannt und stellt einen Phasenübergang vom flüssigen Sol-Zustand zum festen Gel-Zustand dar.²⁶

Bei Raumtemperatur sind Polymere Festkörper. Nach der Glasübergangstemperatur beginnen Polymere in der Erweichungstemperatur den elastischen Teil zu erhöhen um anschließend bei der Schmelztemperatur zu fließen.

Komplexes Schubmodul G^*

G^* ist das Elastizitätsgesetz für Oszillationsversuche bei Scherung. Dieser Wert repräsentiert das gesamte viskoelastische Verhalten der Probe. G^* charakterisiert die „Steifigkeit“ der Probe.²⁷

$$G^* = \frac{\tau_A}{\gamma_A} \quad (2.6)$$

G^*/Pa	Komplexes Schubmodul
τ_A/Pa	Schubspannung
$\gamma_A/1$	Scherdeformation

Bei Oszillationsversuchen werden bei konstanter Deformation und Frequenz das Drehmoment in Nm gemessen. Vorgegeben wird der Auslenkwinkel mit der Amplitude $\varphi_A = \pm 1^\circ$. Aus rheologischer Sicht steuert hierbei das Rheometer die Deformation mit der Amplitude $\pm \gamma_A$ (in %). Die Software berechnet daraus die Schubspannungsamplitude τ_A in Pa. Daraus ergibt sich schlussendlich das Elastizitätsgesetz G^* .²⁷

Speichermodul G' und Verlustmodul G''

Das Rheometer berechnet aus dem ermittelten komplexen Schubmodul G^* und dem Phasenwinkel δ mittels Vektoren den Speichermodul G' und den Verlustmodul- G'' -Anteil. Die Vektoren werden in Abb. 15 veranschaulicht.²⁸

Der Phasenwinkel δ ist immer zwischen 0° und 90° . Der x- Achsen-Anteil von G^* stellt den elastischen Anteil des viskoelastischen Teils als G' dar. Der korrelierende y- Achsen-Anteil von G^* stellt den viskosen Anteil als G'' dar.²⁸

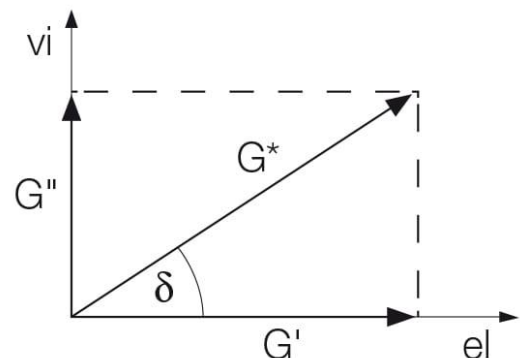


Abb. 15: Vektordiagramm mit der Beziehung zwischen dem komplexen Schubmodul G^* , Speichermodul G' und Verlustmodul G'' mit Hilfe des Phasenwinkels δ . X- Achse: elastischer Anteil, y-Achse: viskose Anteil, Quelle: Metzger (2021), S 96.

Der Speichermodul G' in Pa repräsentiert den Anteil des Festkörpers in der Messprobe und steht für die gespeicherte Deformationsenergie. In der Literatur wird der Speichermodul G' zudem als elastisches Schubmodul bezeichnet.²⁸

²⁷ Vgl. Metzger (2021), S. 95.

Der Verlustmodul G'' in Pa hingegen charakterisiert den flüssigen Anteil, d. h. das Flüssigkeitsverhalten der Messprobe. Der Speichermodul G' steht für die beim Fließen der Probe verlorene Deformationsenergie, welche durch innere Reibung verursacht wird. In der Literatur findet sich zudem die Bezeichnung "Schubverlustmodul" für den viskosen Schubmodul.²⁸

Amplitudentests

Mittels Amplitudentests wird das Verformungsverhalten von Messproben im zerstörungsfreien Bereich bestimmt bzw. das Limit dessen erörtert.

*"Beim Amplitudensweep wird der Ausschlag des Messsystems von einem Messpunkt zum nächsten schrittweise erhöht, während die Frequenz konstant gehalten wird."*²⁹

Siehe hierfür Abb. 16.

Auch im deutschsprachigen Raum wird das

englische Wort „sweep“ verwendet, welcher die Bedeutung des „Durchlaufens“ oder „Abtastens“ eines Frequenzbands impliziert.

Die Darstellung der Messergebnisse von Amplitudendurchläufen erfolgt üblicherweise in Form von Diagrammen, bei denen beide Achsen logarithmisch skaliert sind. Dabei werden auf der x-Achse die Dehnung, bzw. Scherspannung, und auf der y-Achse der Speichermodul G' sowie der Verlustmodul G'' aufgetragen.³⁰ Ein beispielhafter Amplitudentest einer Polymerschmelze ist in Abb. 17 zu sehen. Die viskoelastische Messprobe ist in einem flüssigen Zustand, da $G'' > G'$, sowohl innerhalb als auch außerhalb des LVE-Bereichs.

*„Der LVE-Bereich gibt den Bereich an, in dem der Versuch durchgeführt werden kann, ohne die Struktur der Probe zu zerstören. Es ist der Bereich, der auf der linken Seite des Diagramms dargestellt ist, also der Bereich mit den geringsten Dehnungswerten. Zur Auswertung wird von Anwendern oft die Kurve der G' -Funktion bevorzugt. Diese Funktion zeigt im LVE-Bereich einen konstanten Wert, den sogenannten Plateauwert. Der Grenzwert des LVE-Bereichs, auch Linearitätsgrenze genannt, wird mit einem Lineal, einem Analyse-Softwareprogramm oder der Datentabelle ermittelt. Die Linearitätsgrenze wird zunächst in Bezug auf die Dehnung γ_L in Prozent berechnet. Den Toleranzbereich der Abweichung von G' um den Plateauwert kann der Anwender entweder selbst wählen oder der Auswertesoftware überlassen, zum Beispiel ± 5 % Abweichung (gemäß den Normen ISO 6721-10 und EN/DIN EN 14770) oder ± 10 % Abweichung (gemäß ASTM D7175 und DIN 51810-2).“*³¹

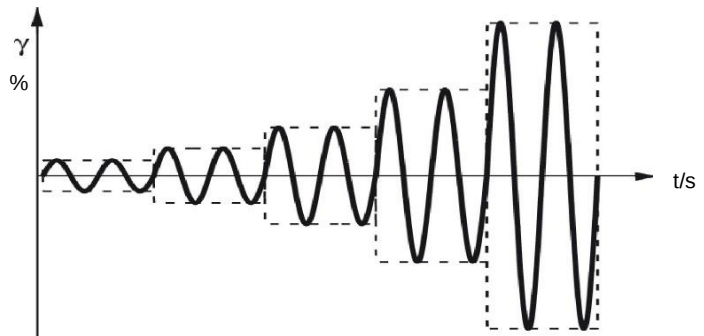


Abb. 16: Vorgabe eines Amplitudensweeps: Hier mit kontrollierter Dehnung und einer Erhöhung der Amplitude in fünf Schritten. Die Frequenz wird an allen fünf Messpunkten konstant gehalten, Quelle: (Anton Paar, 14. Oktober 2024)].

²⁸ Mezger (2021), S. 95–98.

²⁹ Anton Paar (14/10/2024)

³⁰ Vgl. Anton Paar (14/10/2024).

³¹ Anton Paar (14/10/2024).

In der folgenden Grafik ist bei der Deformation γ_L , die Grenze des LVE-Bereichs erreicht. Bei beispielsweise Polyethylen (PE) kann dies im Bereich von $\omega = 10$ rad/s bei $\gamma = 10$ % liegen.

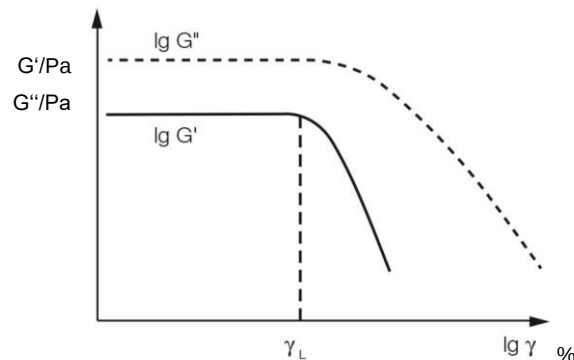


Abb. 17: Beispielhafter Amplitudentest einer Polymerschmelze, Quelle: (Anton Paar, 14. Oktober 2024).

WICHTIG: Die Durchführung eines Amplitudentests bzw. die Ermittlung des LVE-Bereichs stellt eine obligatorische Vorgehensweise vor sämtlichen weiteren Oszillationsmessungen dar. Folglich muss bei allen nachfolgenden Oszillationsversuchen sichergestellt werden, dass die Messung im Deformations- oder Schubspannungswert im LVE-Bereich erfolgt.³²

Frequenztests

Frequenzdurchläufe dienen im Allgemeinen der Beschreibung des zeitabhängigen Verhaltens einer Probe im zerstörungsfreien Deformationsbereich. Die Verwendung hoher Frequenzen dient der Simulation schneller Bewegungen auf kurzen Zeitskalen, während niedrige Frequenzen zur Simulation langsamer Bewegungen auf langen Zeitskalen oder im Ruhezustand eingesetzt werden. In der Praxis haben sich Frequenzdurchläufe als bewährte Methoden etabliert, um Informationen über das Verhalten und die innere Struktur von Polymeren sowie über die Langzeitstabilität von Dispersionen zu gewinnen.³³

Über eine vorgegebene Scherverformung (CSD - controlled shear deformation) oder eine kontrollierte Scherspannung (CSS - controlled shear stress) werden bei jedem Messpunkt die Parameter G' und G'' mit einer veränderten Kreisfrequenz ermittelt. Die Veränderung von ω ist in Abb. 18 ersichtlich.

Das Messergebnis, ein Beispiel von fünf unterschiedlichen Polymeren in Abb. 61, liefert die Erkenntnis über das komplexe Schubmodul G^* mit der Phasenverschiebung δ , woraus auch das Verlustmodul G' und das Speichermodul G'' , bzw. deren Schnittpunkt und die komplexe Viskosität abgeleitet werden kann.

Der Schnittpunkt von $G' = G''$ wird in der Literatur auch als "Crossover point" bezeichnet. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass der Schnittpunkt von der mittleren Molmasse M des Polymers abhängig ist. Somit lässt sich feststellen, dass bei einem Schnittpunkt im unteren Frequenzbereich die Molmasse höher ist als

³² Mezger (2021), S. 103.

³³ Vgl. Anton Paar (20/10/2024).

im höheren Frequenzbereich.³⁴ Somit hat das Test12-Standard Sample eine niedrigere Molmasse im Vergleich zu den beiden Proben 0321-054 und 0321-055.

Weiters kann durch $G'' > G'$ im unteren Frequenzbereich darauf geschlossen werden, dass das vermessene Polymer unvernetzt ist.³⁵

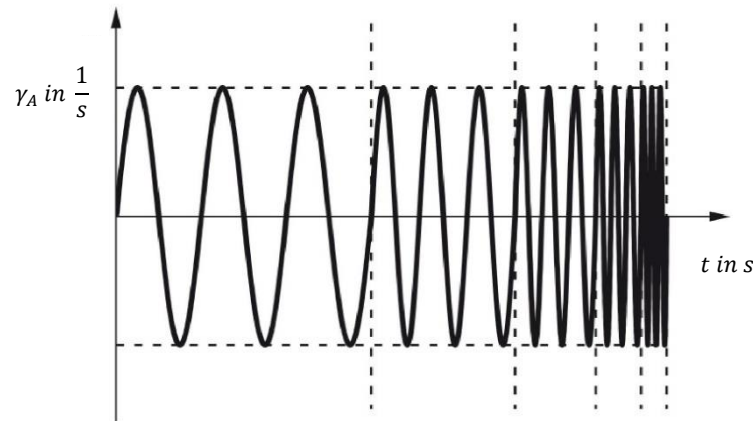


Abb. 18: Vorgabe eines Frequenzdurchlaufs, hier mit kontrollierter Scherdehnung und einer Erhöhung bzw. Verringerung der Frequenz in fünf Schritten. Die Dehnungsamplitude γ_A wird über alle fünf Messpunkte konstant gehalten, Quelle: Anton Paar, Internet-Quelle: (Anton Paar, 20. Oktober 2024).

2.4.2 Korrelation aus Materialeigenschaften und der Trimmbarkeit

Kern dieser Arbeit ist mitunter das Ziel, die Grenzen des Trimmtools herauszufinden und die Trimmbarkeit einer Probe auf Materialkennwerte herunterzubrechen. Im praktischen Teil, *Kapitel 5 Der Einfluss auf die Reproduzierbarkeit durch automatisiertes Trimmen*, wird versucht, eine Korrelation aus Trimmbarkeit und Materialkennwerten zu finden.

Neben dem korrekt gefüllten Messspalt sind die größten Einflussfaktoren auf das rheologische Endergebnis eine homogene Temperatur in der Probe und der Probenrand. Der Probenrand wird durch den Trimmvorgang definiert. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Luftsauerstoff, welcher zur Alterung der Probe und ebenfalls zu falschen Messergebnissen führt. Wird der Messablauf betrachtet, fällt auf, dass durch das Herauffahren des oberen Heizelements die Probentemperatur rapide um 1°C bis 3°C abfällt. Zur Relation: Die Temperatur bei der Vermessung von Polymeren wird in einem Toleranzbereich von $\pm 0,03^\circ\text{C}$ gehalten. Bei der Vermessung von Polymerschmelzen ist das Fluten der Haube mit Stickstoff üblich, um die Oxidation der Probe mit dem Umgebungssauerstoff zu unterbinden. Somit ist die Probe zum Zeitpunkt des Trimmvorgangs mit einem kurzfristigen Temperatursturz und Oxidation der Probenoberfläche konfrontiert. Die Probenbedingungen sind im Vergleich zu einem manuellen Ablauf jedoch bis auf die Zeit ident. Je nach Erfahrung des bedienenden Personals wird durch den automatisierten Trimmvorgang Zeit gespart und die

³⁴ Vgl. Mezger (2021), S. 115.

³⁵ Vgl. Mezger (2021), S. 116.

Probe dem Luftsauerstoff kürzer exponiert. Der Zeitunterschied wird auf Seite 80 in der *Tabelle 5* und der *Tabelle 6* analysiert.

Um ein besseres Verständnis dafür zu bekommen, welche Eigenschaften sich auf die Trimmbarkeit auswirken, werden nachfolgend verschiedene Materialeigenschaften erläutert. Es gibt eine Vielzahl von Kennwerten, mit denen Materialien beschrieben werden können. Der Fokus liegt auf den Parametern, die für die untersuchten Polymere wichtig sind.

2.4.3 Temperatureinfluss bei Polymeren

Bei Polymeren gibt es mehrere charakteristische Temperaturen, die verschiedene Phasenübergänge beschreiben, darunter die Glasübergangstemperatur (T_{mg}), die Erweichungstemperatur (T_g) und die Schmelztemperatur (T_m). Da Polymerschmelzen stets über dem Glasübergangsbereich bzw. im Schmelzbereich vermessen und bearbeitet werden, werden im Folgenden die relevanten Temperaturen und Bereiche kurz erörtert.

"Bei Kunststoffen unterscheidet man zwischen:

- *energieelastischem oder festem Zustand, auch Glaszustand,*
- *gummi- oder entropieelastischem Zustand,*
- *Fließ- oder Schmelze-Zustand.*

Zwischen diesen Zustandsbereichen gibt es zwei, sich über einen Temperaturbereich erstreckende Übergangsbereiche, den

- *Glasübergangsbereich (Erweichungs- oder Einfrierbereich) und den*
- *Schmelzbereich (nur bei Thermoplasten)."*³⁶

Die **Glasübergangstemperatur** (T_{mg}) ist der Temperaturbereich, bei dem sich das mechanische Verhalten eines Polymers deutlich ändert. Ein festes, sprödes Material, das bei Raumtemperatur glasartige Eigenschaften aufweist, transformiert sich in einen zäh-elastischen, gummiartigen Zustand. Beim Erreichen der Glasübergangstemperatur T_{mg} verfügen die Polymerketten über ausreichend Energie, um begrenzte Bewegungen innerhalb ihrer Struktur auszuführen.³⁷

*"Der Glasübergangsbereich (E: glass transition range) ist der Übergang vom energie- in den entropie-/gummielastischen Bereich, beim Abkühlen aus der Schmelze auch Einfrierbereich oder beim Erwärmen Erweichungsbereich genannt."*³⁸

Wie der Name „Glasübergangsbereich“ vermuten lässt, ist T_{mg} nicht eine konkrete Temperatur, sondern ein Bereich. Dieser Bereich ist je nach Werkstoff unterschiedlich hoch und erstreckt sich über unterschiedliche Temperaturbereiche. Die daraus resultierende Problematik bei der Auswertung führt zu unterschiedlichen Angaben.³⁷ Ein exemplarischer Werkstoff für diesen Temperaturbereich ist PMMA. Die Temperaturwerte werden mittels dynamisch-mechanischer Analyse (DMA) bestimmt: Die

³⁶ Ehrenstein (2011), S. 31.

³⁷ Vgl. Ehrenstein (2011), S. 193.

³⁸ Ehrenstein (2011), S. 193.

Anfangstemperatur T_{eig} beträgt 104 °C, die Glasübergangstemperatur T_{mg} liegt bei 112 °C und die Endtemperatur von T_{efg} bei 119 °C. Dies ergibt einen Bereich von ΔT mit 15 °C.³⁹

Dies ist für den Trimmprozess insofern relevant, da das „Wegschneiden“ durch das Trimmtool in diesem Temperaturbereich oder darüber erfolgt. In diesem Zustand weist das Material keine festen Eigenschaften auf, wodurch der Trimmvorgang nicht mit einem zerspanenden Verfahren gleichgesetzt werden kann.

Der Temperaturbereich zwischen Glasübergang und Schmelze, in dem das Polymer in einem gummi- oder entropieelastischen Zustand ist, beschreibt den Erweichungsbereich.

Der **Schmelzbereich**, der sich ebenfalls über einen größeren Temperaturbereich erstreckt, ist bei den amorphen Thermoplasten dadurch gekennzeichnet, dass mit zunehmender Bewegung der Makromoleküle die Verschlaufungen leichter gelöst und ganze Makromoleküle gegeneinander verschoben werden können. Bei teilkristallinen Thermoplasten setzt die Schmelze zunächst bei Kristalliten mit geringerer Lamellendicke ein, während mit steigender Temperatur sukzessive auch Kristallite mit größerer Lamellendicke aufgelöst werden. Der Schmelzbereich erstreckt sich dabei über ca. 15 °C. Der Übergang vom Schmelzbereich in den Fließzustand erfolgt kontinuierlich, wobei der Kunststoff mit steigender Temperatur zunächst aus einer kohäsiven Masse mit weicher Konsistenz in einen zunehmend zähflüssigen Zustand übergeht, der schließlich in einen leichter fließenden Zustand übergeht.⁴⁰

Die Schmelztemperatur liegt in der Regel deutlich über der Glasübergangstemperatur. Typischerweise ist T_m etwa 50–100°C höher als T_g , wobei die exakte Höhe von der Struktur des Polymers abhängt. Ein Beispiel hierfür ist PE (Polyethylen), welche eine häufig angefragte Polymergruppe für den HTR 7000 ist, insbesondere in den beiden Varianten LDPE (Low-Density Polyethylene) und HDPE (High-Density Polyethylene):

- Glasübergangstemperatur T_{mg} :
 - LDPE -120 °C bis -110 °C
 - HDPE: -110 °C bis -100 °C
- Erweichungstemperatur T_g :
 - LDPE 85 °C bis 95 °C
 - HDPE: 110 °C bis 130 °C
- Schmelztemperatur T_m :
 - LDPE 105 °C bis 115 °C
 - HDPE: 130 °C bis 135 °C

Der Glasübergang bei Polymeren wie Polyethylen tritt bei äußerst niedrigen Temperaturen auf (im Bereich von etwa -120 °C bis -100 °C), was auf die halbkristalline Struktur dieses Materials zurückzuführen ist. Diese verleiht Polyethylen bereits bei Raumtemperatur eine bemerkenswerte Flexibilität. Die Ursache für diese geringe Glasübergangstemperatur ist in der Molekülstruktur sowie den thermischen Eigenschaften von Polyethylen zu finden. Für die Anwendung des Trimmprozesses ist primär die Kenntnis der

³⁹ Vgl. Ehrenstein (2011), S. 193.

⁴⁰ Vgl. Ehrenstein (2011), S. 34.

Erweichungs- und Schmelztemperaturen sowie des Verhaltens des Polymers bei der vorgesehenen Mess- bzw. Trimmtemperatur, beispielsweise bei 190 °C, erforderlich. Somit wird beim Trimmen eine viskoelastische Polymerschmelze getrimmt, die je nach Werkstoff eine entsprechende Viskosität sowie ein G' - und G'' -Modul aufweist.

2.4.4 Molmasse

Das Molekulargewicht eines Moleküls entspricht der Summe der Atomgewichte der enthaltenen Atome. Bei niedermolekularen Verbindungen ist das Molekulargewicht eindeutig bestimmbar, beispielsweise beträgt es für Styrol 104 g/mol. Im Falle von Polymeren existieren hingegen keine einheitlichen Molekulargewichte, da die Kettenlängen variieren. Die genaue Molmasse ist schwer eindeutig zu bestimmen. Dies resultiert in einer Molekulargewichtsverteilung, die von der angewandten Polymerisationsmethode abhängig ist. Während die ionische Polymerisation eine enge Verteilung erzeugt, führt die radikalische Polymerisation zu einer deutlich breiteren Verteilung. Eine schmale Verteilung resultiert in homogenen Materialeigenschaften, während eine breite Verteilung Verarbeitungseigenschaften optimiert und die Sprödigkeit des Materials reduziert. Die mechanischen Eigenschaften von Polymeren sind maßgeblich von ihrem Molekulargewicht abhängig.⁴¹

Dabei weisen Polymere mit hohem Molekulargewicht in der Regel eine höhere Festigkeit und Zähigkeit auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass längere Ketten stärker miteinander vernetzt und verknäuel sind, wodurch die intermolekularen Wechselwirkungen erhöht werden und folglich die mechanische Integrität des Materials verbessert wird. Ein Polymer mit einem niedrigen Molekulargewicht weist kürzere Ketten auf, was zu einer reduzierten Zugfestigkeit und Zähigkeit führt. Dies ist auf eine Verringerung der intermolekularen Wechselwirkungen und die daraus resultierende erleichterte Ausbreitung von Brüchen zurückzuführen. Darüber hinaus zeigen sich Bruchdehnung und Elastizität bei steigendem Molekulargewicht zunehmend verbessert, da längere Ketten eine höhere Beweglichkeit und damit verbesserte Deformationsfähigkeiten aufweisen.⁴²

Die Schmelzviskosität von Polymeren ist abhängig von deren Molekulargewicht. Dabei weisen Polymere mit höherem Molekulargewicht eine deutlich höhere Schmelzviskosität auf. Dies lässt sich durch die stärkere Verknäuelung der langen Polymerketten im geschmolzenen Zustand erklären, wodurch die Beweglichkeit erschwert wird. Die Viskosität nimmt exponentiell mit zunehmendem Molekulargewicht zu, was eine erhebliche Herausforderung bei der Verarbeitung von hochmolekularen Polymeren darstellt.⁴²

2.4.5 Melt Flow Index – MFI

Aufgrund der variierenden Molekülkettenlängen zeigen Polymere ein Fließverhalten, das stark von der jeweiligen Kettenlänge abhängt. Die Herausforderung, die Kettenlänge während der Polymerisation präzise zu kontrollieren, führt zur Entstehung einer Mischung unterschiedlicher Kettenlängen, die als Molekulargewichtsverteilung bezeichnet wird. Die resultierende Verteilung wirkt sich sowohl auf die

⁴¹ Vgl. Ehrenstein (2011), S. 69–72.

⁴²Vgl. Ehrenstein (2011), S. 73–76.

Fließeigenschaften als auch auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Polymers aus. Die praktischen Untersuchungen zielen darauf ab, zu klären, ob die mit dem Melt Index (MI) bzw. dem High Load Melt Index (HLMI) charakterisierten Eigenschaften von Polymerschmelzen auch Rückschlüsse auf deren Trimmbarkeit ermöglichen. Die Bestimmung des Melt Flow Index (MFI) erfolgt durch ein vergleichsweise einfaches Verfahren. Die zu untersuchenden Polymerharze, Flocken, Pellets oder Pulver werden in einen beheizten Zylinder eingefüllt, an dessen Boden sich eine Düse mit bekanntem Bohrungsdurchmesser befindet (Standard: 2,095 mm). Es ist essenziell, dass beim Befüllungsprozess eingeschlossene Luft entfernt wird, da ansonsten fehlerhafte Messergebnisse resultieren können. Im Anschluss an die Befüllung des Zylinders erfolgt die Installation eines Kolbens mit 3,2 Kg. Nachdem die Schmelze kontinuierlich fließt, wird die Probe bei der Düse abgeschnitten und 10 Minuten gewartet. Die über diese Dauer extrudierte Polymerprobe wird gewogen. Der Melt Index (MI) wird dann berechnet, indem die extrudierte Masse in Gramm auf 10 Minuten hochgerechnet wird. Somit wird der MFI nicht mittels Rheometer bestimmt, sondern dem Schmelzkolben, Stoppuhr und Waage.⁴³

Im Rahmen eines Vergleichs der Indizes MI und HLMI, lässt sich festhalten, dass der HLMI das Fließverhalten unter höheren Belastungen beschreibt, während der MFI die Fließrate bei Standardbedingungen in Gramm pro 10 Minuten angibt. In Abb. 19, (unten), ein repräsentatives Probenspektrum eines/einer Kund*in mit den zugehörigen MI und HLMI-Werten der Proben zu sehen. Der HLMI erweist sich insbesondere bei hochviskosen Materialien als maßgeblich, da er den MFI unter erhöhten Prüfdrücken ermittelt. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Schmelzdichte eines Polymers nicht mit der in Materialdatenblättern angegebenen spezifischen Dichte übereinstimmt. Ein Beispiel hierfür ist Polypropylen, dessen spezifische Dichte 0,91 g/cm³ beträgt, während die Schmelzdichte näherungsweise 0,70 g/cm³ beträgt. Weiters zeigt dies, dass Kund*innen den Wert aktiv nutzen und schon vor einer Verarbeitung in einem HTR 7000 System kennen.



Abb. 19: Sample A bis Sample J von einem/einer Polymerkund*in, mit MI-Werten von 0,02 g/10 min bis 49,68 g/10 min und HLMI-Werten von 0,5 g/10 min bis 765,8 g/10 min, Quelle: Eigene Darstellung.

Ein niedriger MI sowie ein niedriger HLMI erlauben jeweils eine Aussage über die Fließfähigkeit eines Polymers, jedoch unter unterschiedlichen Bedingungen. Ein niedriger MI indiziert eine erhöhte Viskosität des geschmolzenen Polymers, was eine verminderte Fließfähigkeit zur Folge hat. Ein niedriger HLMI

⁴³ Vgl. Cogswell (19.10.2024).

hingegen beschreibt hingegen die Fließfähigkeit unter erhöhten Belastungen und Temperaturen, wobei das Polymer selbst auch unter diesen Bedingungen eine hohe Viskosität aufweist. In beiden Fällen kann ein niedriger Wert als Indiz für ein höheres Molekulargewicht gewertet werden, da längere Polymerketten stärker miteinander verflochten sind, was zu einer Verringerung der Fließfähigkeit führt. Die höhere Viskosität resultiert üblicherweise in verbesserten mechanischen Eigenschaften, insbesondere in einer erhöhten Zähigkeit, Festigkeit und einer besseren Beständigkeit gegen Spannungsrisssbildung. Dies trifft insbesondere auf hochdichte Polymere wie HDPE.

2.5 Schlussfolgerung

Auf Grundlage, der im Kapitel zur Rheologie dargelegten Erkenntnisse lässt sich schlussfolgern, dass Polymere ein komplexes rheologisches Verhalten aufweisen. Für den Trimmvorgang ist das Verhalten der Probe bei der Mess- und Trimmtemperatur von entscheidender Bedeutung. Das Verhalten von Polymeren ist von der Scherung und der Temperatur abhängig. Der Einfluss des atmosphärischen Drucks auf die untersuchten Objekte wird vernachlässigt, da dieser als konstant angenommen werden kann. Zudem ist zu berücksichtigen, dass sich das mechanische Verhalten und die Viskosität in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung verändern.

Im Rahmen der praktischen Tests erfolgt eine Fokussierung auf die Viskosität bei Trimmtemperatur unter den Scherbedingungen des Trimmtools. Mit den zur Verfügung stehenden rheologischen Kurven des Amplitude Sweeps und der Frequency Sweeps wird der Versuch unternommen, Grenzen zu finden und eine Korrelation zwischen einem Materialparameter oder einer ermittelten rheologischen Messgröße herzustellen. Des Weiteren erfolgt eine Analyse des Verhältnisses von G' zu G'' sowie des Einflusses des Übergangspunkts von $G'' > G'$ zu $G'' < G'$ und der ermittelten komplexen Viskosität.

Die Parameter der molekularen Masse respektive des MFI lassen zudem Rückschlüsse auf die Viskosität des Polymers zu. Die Berücksichtigung dieser Parameter dient dem Ziel, weitere Korrelationen zur Trimmbarkeit abzuleiten.

Im Rahmen der praktischen Tests wird ein PP25-Geometriepaar verwendet.

3 LEAN SIX SIGMA ALS METHODE ZUR PROZESSOPTIMIERUNG

Die These, die dieser Arbeit voraus geht, ist, dass die Laborautomatisationsprodukte der Anton Paar GmbH, eine signifikante Prozessoptimierung mit sich bringen. Zudem wird angenommen, dass diese Produkte, zumindest aktuell unbeabsichtigt, Lean-Prinzipien umsetzen und Verschwendung reduzieren. In dieser Arbeit soll eine Prozess- und Verschwendungsanalyse von rheologischen Messprozessen durchgeführt werden, um einen Vergleich aus einem manuellem und einem automatisierten Prozess ziehen zu können. Die Ansätze der Lean Six Sigma Methode sollen auf das Konzept „Lean Quality Control“ umgelegt und erörtert werden. Die Analyse und die potenziellen Verbesserungen beziehen sich auf den Teilprozess der Materialcharakterisierung mittels Rotationsrheometer. Eine symbolhafte Darstellung des Teilprozesses findet sich in *Abb. 20*.

In diesem Kapitel wird eruiert, wie dieser Teilprozess mit Lean- und Six Sigma Methoden und Werkzeugen analysiert, bewertet und im Anschluss potenziell verbessert werden kann.

Es werden verschiedene Werkzeuge der Lean Six Sigma Methode vorgestellt. Die angeführten Methoden schließen sich nicht aus, sondern ergänzen sich. Aufgrund ihrer Überschneidung in den Anwendungsfeldern und dem erläuterten Wirkungszusammenhang von Prozesserneuerung und – Verbesserung dürfen die Methoden nicht isoliert eingesetzt werden, sondern sind in das Geschäftsprozessmanagementsystem zu integrieren. Das gemeinsame Ziel der Verbesserungsmethoden besteht in der Identifizierung und Eliminierung von „Ersatzprozessen“ und Verschwendungen. Ersatzprozesse sind Aktivitäten, deren Aufgabe es ist, Fehler zu korrigieren und vorhandene Probleme zu umgehen. Diese Ansätze beseitigen die zugrunde liegenden Probleme im Unternehmen nicht, sondern maskieren sie und tragen zur Stabilisierung der bestehenden Defizite bei.⁴⁴ Am Ende des Kapitels werden die passenden Methoden für die Analyse des Laborprozesses ausgewählt und im anschließenden Kapitel 4 angewendet.

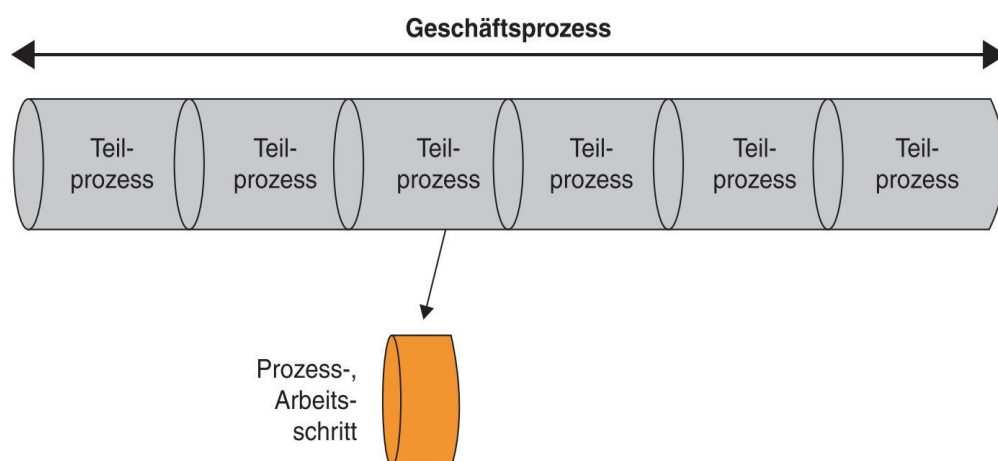


Abb. 20: Abgrenzung der Anwendungsfelder. (In Anlehnung an Schmelzer und Sesselmann (2001, S. 205)), Quelle: (Koch2015, S. 118.)

⁴⁴ Vgl. Koch (2015), S. 118.

3.1 Lean Management

Die Begriffe „Lean“, „Lean Production“ und „Lean Manufacturing“ wurden von Forschern des MIT (Massachusetts Institute of Technology) ins Leben gerufen. Wissenschaftler haben in einer Studie untersucht, mit welchen Besonderheiten und welche Art und Weise das japanische Unternehmen Toyota derart außergewöhnlich effizient Autos baut. Diese Prinzipien sind auch unter TPS (Toyota-Produktionssystem) bekannt. Lean ist ein ganzheitlicher systematischer Ansatz, der durch KVP (kontinuierliche Verbesserungsprozesse) Verschwendungen identifiziert und beseitigt. Die Methoden des TPS werden in Abb. 21 in Form eines Hauses visualisiert. Diese Darstellung verschafft einen Überblick über die Lean- Philosophie.

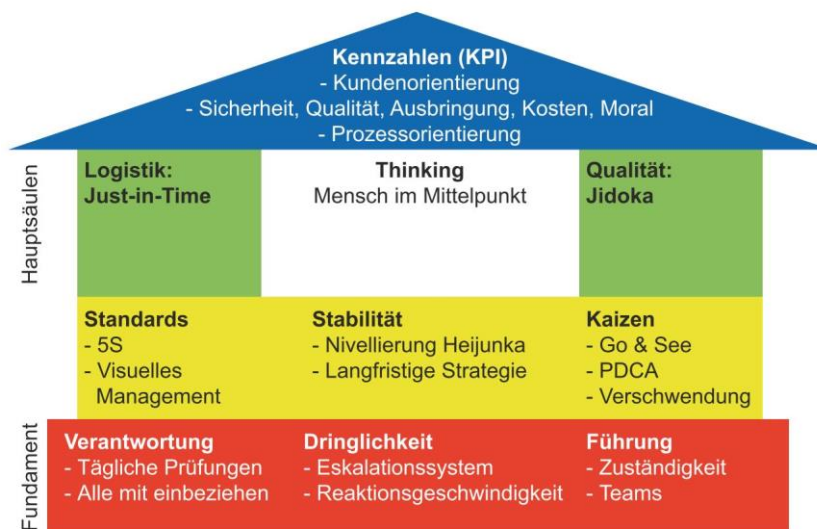


Abb. 21: Darstellung des Toyota-Produktionssystems (TPS) in Form eines Hauses, Quelle: (Bertagnolli2020, S. 212.).

Lean ist ein integriertes System von Prinzipien, das die Verfolgung der perfekten Kund*innenwertschöpfung verfolgt. Lean ist mehr als nur eine Ansammlung von Methoden, die ein Unternehmen oder deren Prozesse schlank machen. In Abb. 21 finden sich die Säulen der Lean Methode. angewandten Methoden, die auf die Eliminierung von Verschwendung und die konsequente Ausrichtung auf die Kund*innenbedürfnisse abzielen. Das Fundament wird durch die kontinuierliche Verbesserung „Kaizen“ und das Leben der Philosophie aller Mitarbeiter*innen gebildet.⁴⁵

„Lean bedeutet, alles das zu beseitigen, was einen stört. So wird Verschwendung eliminiert.“⁴⁶

In schlanken Prozessen ist neben der Verschwendungsfreiheit auch der Begriff Ressourceneffizienz zu erwähnen. Es geht um den optimierten Einsatz von Ressourcen wie z. B. Material, Zeit, Fläche, und im Fall der Automatisierung auch um Arbeitszeit.⁴⁷

⁴⁵ Vgl. Bertagnolli (2020), S. 206.

⁴⁶ Akers (2016).

⁴⁷ Vgl. Bertagnolli (2020), S. 4.

Auch wenn „Lean“ aus dem Produktionsumfeld entstanden ist, kann diese Methode auf nahezu jeden Unternehmensbereich angewendet werden. In dieser Arbeit wird versucht „Lean Production“ auf „Lean Quality Control“ umzulegen.

„Die Vision von Lean sind die Ziele als „Nordstern“:

- *Qualität: Null Fehler*
- *Kosten: 100% Wertschöpfung (Null Verschwendung)*
- *Zeit: Ein-Stück-Fluss (kurze Durchlaufzeit)*
- *Mitarbeiter: Sicherheit für Menschen“⁴⁸*

Das Prinzip der kontinuierlichen Verbesserung wird unter dem Begriff „Kaizen“ zusammengefasst. Der Begriff „Kaizen“ stammt aus dem Japanischen und setzt sich aus den Worten „Kai“ (Veränderung) und „Zen“ (zum Besseren) zusammen, was sinngemäß „Wandel zum Besseren“ bedeutet. Im Deutschen wird hierfür häufig die Bezeichnung KVP verwendet. Dieser Prozess bewegt sich dabei stets im Spannungsfeld bzw. den Zielgrößen der Verbesserung der Durchlaufzeit, der funktionalen Flexibilität des Produktionssystems sowie der Steigerung der Produktqualität. Die Methoden von Lean Six Sigma stellt hierzu Werkzeuge und Methoden bereit, mit dem diese Transformation gelingen soll.⁴⁹ Dieses Spannungsfeld wird in *Abb. 22 Das magische Dreieck des Kaizen* dargestellt.

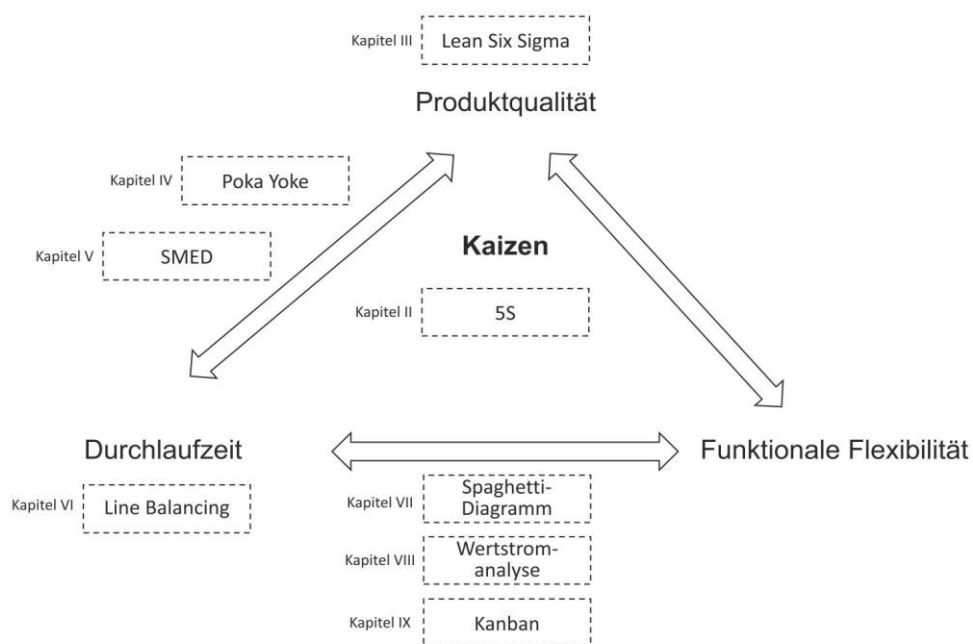


Abb. 22: Das magische Dreieck des Kaizen, Quelle: Niemann, Reich und Stöhr (2021, S. 3.)

Ohne die Implementierung eines KVP, auch bekannt als Kaizen, nimmt die Prozessleistung nach jeder durchgeführten Erneuerung sukzessive wieder ab. Dies bestärkt die Aussage, dass nach der erfolgreichen Implementierung neuer und besserer Prozesse weiter verbessert werden muss. In *Abb. 23* wird verdeutlicht, dass das Fehlen eines KVP einen Leistungsabfall zur Folge hat, wodurch weitere

⁴⁸ Bertagnolli (2020), S. 212.

⁴⁹ Vgl. Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 2.

Prozesserneuerungen lediglich das Leistungsniveau der vorhergehenden Erneuerung annähernd wiederherstellen können.

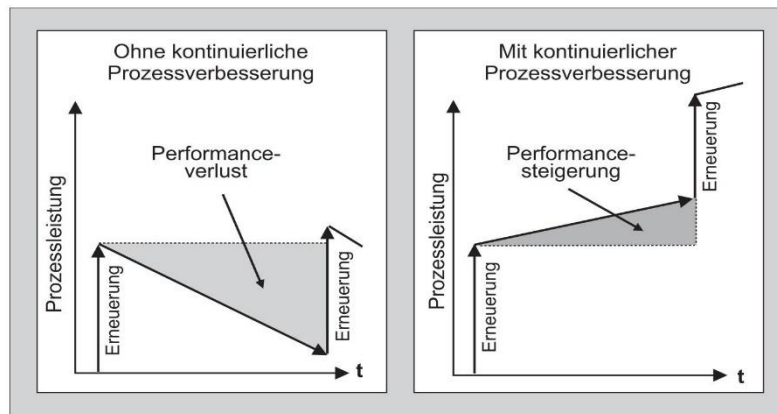


Abb. 23: Zusammenspiel von Prozesserneuerung und -verbesserung, Quelle: in Anlehnung an Imai 1992, S. 47 ff. (Schmelzer und Sesselmann2020, S. 509.)

Auch wenn das Fazit dieser Arbeit zeigt, dass der HTR 7000 und möglicherweise weitere Laborautomationsprodukte der Anton Paar GmbH eine deutliche Prozessverbesserung bewirken und Lean-Effekte erzielen, ist dies nicht als endgültiger Zustand zu betrachten. Ein nachhaltiger Erfolg setzt voraus, dass der zugrunde liegende Prozess kontinuierlich überwacht, analysiert und optimiert wird. Nur durch einen fortlaufenden Verbesserungszyklus kann gewährleistet werden, dass die erzielten Effekte langfristig erhalten bleiben und auf veränderte Anforderungen reagiert werden kann.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden für die Arbeit relevante Begriffe vorgestellt sowie Methoden und Werkzeuge von Lean erläutert, mit denen der Prozess analysiert und verbessert werden soll.

3.1.1 Verschwendungsarten und deren Bedeutung im Labor

Wertschöpfung vs. Verschwendungen

Wertschöpfung ist bzw. sollte für jedes gewinnorientierte Unternehmen, einer der wichtigsten Begriffe sein. Das Ziel von Lean sind 100% Wertschöpfende Prozesse. Dies ist in der Praxis jedoch nicht umsetzbar. Die Aufteilung der Arbeit wird in Abb. 24 symbolisch beschreiben:

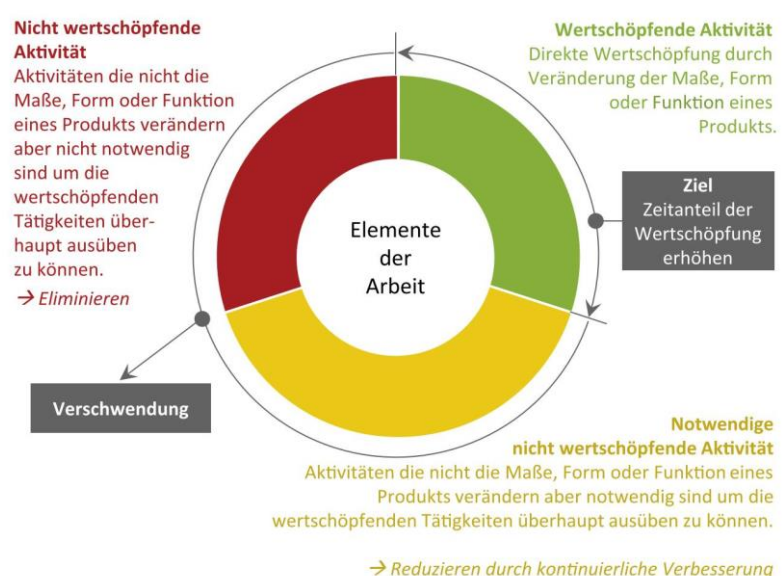


Abb. 24: Wertschöpfung und Verschwendungsanteil in Prozessen, Quelle: (Metternich, Meudt und Hartmann2022, S. 21.)

„Alles wofür ein Kunde bereit ist zu zahlen, kann als wertschöpfend bezeichnet werden. Alles andere ist Verschwendung. Alle Tätigkeiten und Produktionsschritte im Wertstrom lassen sich damit in drei Kategorien einteilen:

- *Wertschöpfende Aktivitäten (jede einzelne Tätigkeit, für die die Kunden bereit sind zu zahlen)*
- *notwendige nicht wertschöpfende Aktivitäten (bspw. das Be- und Entladen einer Maschine oder das Greifen eines Werkzeugs) und*
- *nicht wertschöpfende Aktivitäten (bspw. unnötig lange Transportwege von Werkzeugen, die zu weit vom Ort der Wertschöpfung gelagert sind).“⁵⁰*

Der Prozess im Labor ist somit von außen betrachtet laut „Lean“ nicht wertschöpfend. Ausgenommen von F&E-Dienstleistungen, welche die F&E Leistung verkaufen, sind Qualitätskontroll- und F&E-Prozesse verdeckte Verschwendung. Der/die Kund*in zahlt für das Produkt mit den versprochenen Funktionen und Features. Ob dazu viel wenig, keine F&E oder Messen notwendig ist, ist dem/der Kund*in gleichgültig. Der Wunschgedanke von Lean ist, dass alle Produktionsprozesse derart eingestellt sind, dass keine Ersatzprozesse wie Messen durch ein weiteres Labor notwendig sind. In der Praxis ist der Qualitätskontrollprozess jedoch unverzichtbar. In manchen Prozessen müssen während der Produktion Stichproben gezogen werden, in anderen reicht die Endkontrolle.

Um somit den notwendigen Ersatzprozess so effizient wie möglich zu gestalten, wird dieser mit den Lean Methoden analysiert. Es finden sich auch hier verdeckte Verschwendung und offensichtliche Verschwendung. Das Beladen des Rheometers, die Auswahl des richtigen Mess-Templates oder beispielsweise das Putzen des Arbeitsplatzes ist für den/die Kund*in nicht wertschöpfend, aber notwendig, somit eine verdeckte Verschwendung. Das Suchen von Messgeometrien ist beispielsweise eine offensichtliche Verschwendung.

Das Ziel ist es, die offensichtlichen Verschwendungen zu eliminieren, die notwendigen Verschwendungen zu minimieren und gegen wertschöpfende Tätigkeiten zu ersetzen. Die Gesamtarbeitsmenge bleibt konstant, jedoch wird sie effizienter und führt potenziell zu einer höheren Zufriedenheit des Personals.

3.1.2 Verlustfaktoren: Muda, Mura und Muri

Die drei Begriffe, die auch die „3 Mu“ genannt werden, fassen Zustände zusammen, bei denen Verbesserungsbedarf besteht.⁵¹

- Muda steht für Verschwendung.
- Muri steht für Überlastung von Prozessen, Menschen, Maschinen oder Organisationen. Nicht ergonomische Tätigkeiten, einseitige Belastungen und Überlastung können zu einem Ausfall oder Burnout führen. Dies kann sich negativ auf die Lieferkette auswirken und den Prozess aufhalten.
- Mura beschreibt die Unausgeglichenheit. Schwankungen, Ungleichgewicht, Instabilität oder Variabilität im Prozess sind weitere Beschreibungen. Die Folge von azyklischen Tätigkeiten sind meist Arbeitsunterbrechungen. Schwankende Prozesse bringen Unruhe in ein System. Dies geht so weit bis hin zu Beschleunigungswechseln oder z.B. dem Tausch eines leeren Behälters durch einen vollen.

⁵⁰ Metternich, Meudt und Hartmann (2022), S. 20-21.

⁵¹ Vgl. Bertagnolli (2020), S. 44.

Um daraus resultierende Verschwendungen zu vermeiden, müssen folgende Themen geprüft werden: Mitarbeiter*innen, Technik, Methode, Zeit, Möglichkeit, Vorrichtungen und Werkzeuge, Material, Produktionsvolumen, Umlauf, Platz und die Denkweise. Die 3 Mu's beeinflussen sich gegenseitig. So führt Mehrarbeit (Muri) an anderen Stellen zu Nichtauslastung. Das ist dann eine offensichtliche Verschwendung (Mura). Falls diese Arbeitslast zusätzlich azyklisch schwankt, ist dies (Mura) ein Wechselspiel aus Verschwendung und Überlast.

Muda - die 7+1 Verschwendungsarten

"Taiichi Ohno definierte vermutlich zusammen mit dem Japaner Shigeo Shingo (1909-1990) die sieben Arten von Muda. ... Die sieben Arten der Verschwendung (Muda) sind:

- *Überproduktion*
- *Überflüssige Bewegung*
- *Wartezeit*
- *Transport*
- *Prozessüberfüllung*
- *Bestände*
- *Fehler, Ausschuss und Nacharbeit*

Die zusätzlich 8. Verschwendung:

- *Verlust von Ideen, nicht genutztes Mitarbeiterwissen"*⁵²

Verschwendungen im rheologischen Charakterisierungsprozess:

Nicht wertschöpfende Tätigkeiten sollten vollständig eliminiert oder, sofern dies nicht möglich ist, auf ein Minimum reduziert werden. Im Betrachtungsfall von rheologischen Charakterisierungsprozessen lässt sich die Verschwendung nicht immer von der Instrumentenseite und dessen Prozess lösen. Es folgen Beispiele von Verschwendungen in diesem Teilprozess.

In diesem Kontext kann unter Überproduktion eine zu groß gemessene Losgröße an Proben verstanden werden. Diese Verschwendung kann durch den HTR 7000 nur bedingt minimiert werden, da nicht kontrolliert oder vorgeschrieben wird, welche Probe wie oft vermessen werden „darf“ oder soll. Wie bei jedem Instrument oder jeder Maschine hängt die effektive Nutzung maßgeblich vom Anwender und der Gestaltung der zugehörigen Prozesse ab. Hier kann jedoch argumentiert werden, dass mehr Messpunkte eine bessere Datenqualität und Modelle erlaubt.

Für Bestände funktioniert die Minimierung bedingt. Im Beschaffungsprozess von Rohmaterial, welches anschließend vom HTR 7000 untersucht werden soll, wird nicht eingegriffen. Das System verfügt über eine definierte Anzahl von Lagerplätzen von Probengefäßen. Dies zwingt den Anwender zu der definierten Durchlaufmenge. In der Praxis werden Systeme auf die bereits bekannten Mengen ausgelegt. Somit werden potenzielle „Überbestände“ in den neuen Prozess übernommen.

⁵² Bertagnolli (2020), S. 26-27.

Gleiches gilt für die Prozessüberladung/Überfüllung. Darunter versteht man, dass in einem Prozess mehr Schritte durchgeführt werden, als eigentlich von Kund*innen gefordert werden. Die Rheologie findet Anwendung sowohl in F&E- als in QC-Prozessen. F&E-Prozesse zeichnen sich häufig durch eine höhere Komplexität aus, erfordern einen erhöhten menschlichen Input sowie eine intensive Betreuung des Messprozesses. Aufgrund der umfangreicheren Prozesse und der Integration mehrerer manueller Arbeitsschritte ergibt sich ein erhöhtes Potenzial für ineffiziente Prozesskomponenten und Verschwendung.

Wie bereits bei der automatisierten Messung beschrieben, verfügt der HTR 7000 je nach Konfiguration über eine Probenvorbereitung und die zusätzliche Messung des pH-Werts. Eine Prozessüberfüllung wäre, wenn der pH-Wert einer Probe gemessen wird oder länger gerührt wird als erforderlich. Das System liefert vorkonfigurierte Prozesse für Probentypen, aber der Benutzer wird nicht davon abgehalten, trotzdem Schritte oder Parameter anzupassen. Letztendlich besteht das Ziel eines Messinstruments darin, die Möglichkeit zur präzisen Durchführung der erforderlichen Einstellungen bereitzustellen. Die Verantwortung für die Vermeidung von Verschwendung liegt dabei erneut auf der Seite der Anwender.

Bei den „Mudas“ überflüssige Bewegung, Wartezeit, Transport, Fehler und Ausschuss bzw. auch schlussendlich bei nicht genutztem Mitarbeiter*innenpotential findet sich latentes Verbesserungspotential durch die Automatisierungslösung.

Weiters wird vermutet, dass der Punkt, wie die Laborfläche, ein wichtiger Aspekt in den meistbegrenzten Laborräumen ist. Inwieweit sich der Platzbedarf manuell bzw. automatisiert unterscheidet muss neben der Relevanzfrage bei einem/einer Symbolkund*in vor Ort geprüft werden.

Datenverlust ist ein Punkt, der sich bei der Verschwendungsart „Fehler“ einordnet. Häufig erfolgt die Übertragung von Daten weiterhin manuell. Dies stellt eine Fehlerquelle dar und ist ein verschwendungsbehafteter Ersatzprozess. Eine direkte Übertragung in ein LIMS-System eliminiert diese Fehlerquelle und die dazu gehörigen Wege, Zeiten und steigert die Nachverfolgbarkeit.

Ob sich diese Thesen in der Verschwendungsanalyse bestätigt oder ändert, wird in Kapitel 4 eruiert.

3.1.3 Die „5S“ Methode

Durch die Anwendung dieser Lean-Methode, die den Schwerpunkt auf Sauberkeit und Ordnung legt, lassen sich potenzielle Verschwendungen wie Suchzeiten, Fehler durch Fremdkörper, ineffiziente Flächennutzung, Unfälle oder vermeidbare Mehrarbeit signifikant reduzieren. In diesem Abschnitt wird die Methode erläutert und anschließend in Kapitel 4 *Verschwendungsanalyse des Laborprozesses* angewendet. Der Titel dieser Arbeit deutet darauf hin, dass die Implementierung von Automatisierung im Labor, insbesondere durch den Einsatz des Systems HTR 7000, mit der Anwendung des 5S-Prinzips einhergeht. Durch dieses Prinzip sollen Ordnung und Effizienz gefördert werden, was zur Minimierung von Verschwendungen im Arbeitsprozess beiträgt. Es wird erwartet, dass durch die Automatisierung unnötige Tätigkeiten und Fehlerquellen reduziert werden.⁵³

Die 5S-Methode ist eine systematische Vorgehensweise, welche fünf Stufen zur Schaffung eines nachhaltig ordentlichen und sauberen Arbeitsplatzes durchläuft. An Arbeitsplätzen sollte gewährleistet sein, zuverlässig und verschwendungsfrei nach Standards zu arbeiten und damit eine gute Qualität

herzustellen. 5S wurde bei Toyota entwickelt, somit wurden die fünf Stufen mit japanischen Begriffen beschrieben, die jeweils mit einem „S“ beginnen. Diese wurden ins Englische und Deutsche mit Wörtern übersetzt, die ebenso mit einem S beginnen. Im deutschen Sprachraum haben sich auch Begriffe, welche mit einem „A“ beginnen, durchgesetzt. In diesem Sprachraum existiert das Synonym „5A“. Die fünf Stufen werden nacheinander und regelmäßig durchlaufen. Zur Übersicht wurden die Begriffe in Tabelle 1 aufgelistet. Die Arbeitsplätze werden mitarbeiter*innenfreundlich, ergonomisch und sicher gestaltet. Dies erlaubt eine sichere Arbeit und ermöglicht. Verschwendungen bei Mitarbeiter*innen, Maschinen und Material zu eliminieren.⁵³

Die Methode 5S verfolgt klare Ziele, die mit Standards, Qualität und Verschwendungsvermeidung verknüpft sind:⁵³

- Steigerung der Arbeitseffizienz durch Standards und prozessorientierte Anordnung aller Gegenstände
- Sofortige Sichtbarkeit von Abweichungen mittels Markierungen (Minimum/Maximum, Soll/Ist)
- Verbesserte Flächennutzung durch eine effiziente Anordnung von Gegenständen und Maschinen und die Beseitigung von unnötigen Dingen
- Stärkung des Teamgeists und der Arbeitsmoral durch die Einbindung der Mitarbeiter*innen ins Team
- Bessere Qualität durch höhere Genauigkeit durch regelmäßiges Reinigen

Stufe	Japanisch	Englisch	Deutsch	Deutsche 5A Variante
1	Seiri	Sort	Sortieren/Selektieren	Aussortieren
2	Seiton	Set in order	Systematisieren	Aufräumen
3	Seiso	Shine/Sweeping	Säubern	Arbeitsplatz sauber halten
4	Seiketsu	Standardize	Sauberkeit bewahren	Anordnung als Regel
5	Shitsuke	Sustain	Selbstdisziplin leben	Alle Schritte wiederholen

Tabelle 1: Begriffe für 5S bzw. 5A in unterschiedlichen Sprachen, Quelle: Bertagnolli (2020), S. 140 (leicht modifiziert).

Beschreibung der 5S Schritte:⁵⁴

1. Stufe: Seiri – Sortieren / Aussortieren

Das Seiri beschreibt die Trennung von Notwendigem und Nichtnotwendigem am Arbeitsplatz. Nicht benötigtes Material oder Gegenstände werden vom Arbeitsplatz entfernt. Dies bezieht sich auf überzähliges und defektes Werkzeug, unnötige Maschinen, in diesem Kontext Messgeräte, sowie auf nicht benötigte Papiere und Dokumente aber auch auf zu hohe Umlaufbestände (alte oder kaputte Proben, ...). Ziel ist es, den Arbeitsplatz hierdurch übersichtlich zu halten und Verschwendungen für das Heraussuchen eines Werkzeugs zu vermeiden. Hierdurch erhöht sich zudem die Qualität, indem Schäden am Produkt durch die Verwendung eines falschen Werkzeugs vermieden werden.

Die Automatisierungslösung nimmt die Entscheidung des Messgeräts und der verwendeten Messgeometrien ab. Sofern der zuvor verwendete Messplatz entfernt oder dem „Seiri“ unterzogen

⁵³ Vgl. Bertagnolli (2020), S. 139.

⁵⁴ Vgl. Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 5-7.

wird erfüllt das automatisierte System bereits die erste Anforderung – nur das notwendige Material wird verbaut.

2. Stufe: Seiton – Systematisieren / Aufräumen

Das Seiton beschreibt die Herstellung einer sichtbaren Ordnung, die den Prozess unterstützt. Dies umfasst die Bereitstellung der Arbeitsmittel in einwandfreiem Zustand sowie ergonomisch griffbereit an einem festgelegten und standardisierten Platz. Es ist sinnvoll, die Plätze zu markieren, da dadurch fehlende Werkzeuge bemerkt werden.

Ebenso wie bei „Seiri“ unterstützt ein automatisiertes Messsystem bei der 2. Stufe. Alle Arbeitsmittel wie die Trays für Proben und beispielsweise die Messgeometrien, haben in der Automation einen definierten Platz, es herrscht Ordnung.

3. Stufe: Seiso – Säubern / Arbeitsplatz sauber halten

Das Seiso beschreibt die allgemeine Sauberkeit des Arbeitsplatzes. Durch die Sauberkeit werden Fehler schneller erkannt und Qualitätsmängel durch Verschmutzungen und Fremdkörper vermieden. Abnutzungserscheinungen an der Betriebsausrüstung werden sofort ersichtlich und ungeplante Maschinenstopps sowie kostenintensive Schäden können vermieden werden. Ein geordneter Arbeitsplatz führt demnach nachweislich zu einer höheren Mitarbeiter*innenzufriedenheit.

Ein HTR 7000 erfüllt dies, sofern das Laborpersonal das System ab und zu reinigt. Alle Stationen reinigen sich weitestgehend selbst und eine Absaugung verringert das Absetzen von Staub. Trotzdem müssen auch hier regelmäßig vor allem die Reinigungsstationen überprüft werden.

4. Stufe: Seikutsu – Sauberkeit bewahren / Anordnung als Regel

Mit dem japanischen Begriff Seiketsu ist die Standardisierung von Arbeitsabläufen in einzelnen Prozessschritten gemeint. Neue Mitarbeiter*innen können durch eine vorherige Standardisierung der Tätigkeit besser trainiert werden. Es gilt hierbei, dass Arbeitsanweisungen und Abläufe zur Routine werden. Im Bereich der Mitarbeiter*inneneinweisung verfolgt das Lean-Management den Ansatz, dass ein neuer Mitarbeiter*innen so lange eingearbeitet wird, bis er ohne Unterlagen den Standard einhalten kann. In der westlichen Welt wird Seiketsu vor allem hinsichtlich der Einarbeitung der Mitarbeiter*innen falsch verstanden. Seiketsu soll keine möglichst schnelle Einarbeitung gewährleisten, sondern eine höchstmögliche Qualität der Arbeit und gesteigerte Motivation der Mitarbeiter*innen.

Eine automatisierte Lösung baut auf Standardisierung auf. Durch die standardisierten Abläufe ist es leicht, neue Mitarbeiter*innen, auch solche die kein rheologisches Fachwissen haben, auf einen automatisierten rheologischen Arbeitsplatz einzuschulen. Das Arbeiten ist auch ohne die Verwendung einer Anleitung schnell möglich, da die Prozesse intuitiv aufgebaut sind und nur wenige Handgriffe notwendig sind den Prozess zu starten.

5. Stufe: Shitsuke – Selbstdisziplin leben / Alle Schritte wiederholen

Im Rahmen von Shitsuke haben Mitarbeiter*innen und Führungskräfte dafür Sorge zu tragen, dass die erreichten Standards nicht mehr unterschritten werden. Darüber hinaus soll der kontinuierliche Verbesserungsprozess initiiert werden, indem Mitarbeiter*innen Vorschläge zur Eliminierung von Muda erarbeiten.

Bei der Verwendung von Laborautomationsprodukten ist es zwar notwendig weiterhin Selbstdisziplin zu leben. Jedoch vielmehr bei den zuführenden Prozessen um das automatisierte System. Wie in den zuvor beschriebenen Schritten erläutert, führt die Standardisierung zu einer klaren Struktur, die Unordnung systematisch verhindert. Ungenau beschriftete Probenbecher werden z.B. nicht erkannt und somit ausgeworfen.

5S ist jedoch mehr als eine Methode zu Schaffung von Ordnung. 5S ist eine Grundlage jedes Lean-Management-Ansatzes und für die Anwendung der PDCA-Methodik (Plan, Do, Check, Act) eine Voraussetzung.⁵⁵

3.1.4 SMED - Single Minute Exchange of Die

SMED (Single Minute Exchange of Die) steht für den Werkzeugwechsel innerhalb einer Minute und kommt aus der Entwicklung zu immer kleineren Produktionslosen durch den Wandel zu individualisierten Produkten. Rüsten beschreibt die Tätigkeiten, die Betriebsmittel eines Arbeitssystems für einen bestimmten Arbeitsvorgang einrichten. Auch wenn in rheologischen Messprozessen keine Maschinen mit „Werkzeugen“ vorliegen, kann in dem Rheometer die Messgeometrie oder ein Endeffektor wie eine Dispensierspritze getauscht werden. Dieses „Umrüsten“ benötigt Zeit. Für das Ziel der Minimierung der Rüstzeit kann die SMED-Methode eingesetzt werden. Dabei werden Verschwendungen durch den Einsatz organisatorischer und technischer Maßnahmen reduziert und die Produktionszeit sowie Gesamtanlageneffizienz erhöht.⁵⁶

In der technischen Lösung bzw. Maßnahme, im Falle eines HTR 7000, werden die Messgeometrien von dem Industrieroboter automatisch getauscht (meist in einem parallellaufenden Prozess automatisiert gereinigt). In diesem Zusammenhang liegt SMED vor.

Es kann argumentiert werden, dass der Wechsel im manuellen Prozess rasch von sich geht. Jedoch geht die Automatisierungslösung so weit, dass durch den kontinuierlichen Prozess das „Werkzeug“ und die Probe getauscht werden und die Arbeitszeit hier zu 100 % entfällt. Somit entfällt die gesamte Wartezeit.

Wenn weiters das Be- und Entladen der Proben Trays betrachtet wird, ist bei der Benutzung eines HTR 7000 auch das sogenannte externe Rüsten möglich. *„Der Unterschied zwischen internen- und externen Rüstvorgängen ist, dass bei internen Rüstvorgängen der Prozess der Leistungserstellung angehalten wird und bei externen Rüstvorgängen nicht.“*⁵⁷ Neue Proben können während des laufenden

⁵⁵ Vgl. Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 5.

⁵⁶ Vgl. Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 73.

⁵⁷ Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 74.

Betriebs außerhalb des Systems in die Trays geladen werden (offline Beladung). Dies ermöglicht eine zeitoptimierte Nachbestückung des Systems mit minimaler Unterbrechung des Betriebsablaufs.

3.1.5 Poka Yoke

„Das japanische „Poka“ steht für einen unachtsamen bzw. zufälligen Fehler und „Yoke“ bedeutet „verhindern“ oder „vermeiden“. Das Prinzip wird als Fehlervermeidung oder Fehlerverhinderung beschrieben.“⁵⁸

Es wird zwischen Fehlervermeidung und Fehlerverhinderung unterschieden. Die Beseitigung von Fehlern wird tendenziell kostspieliger, je weiter fortgeschritten der Fehler im Herstellungsprozess erkannt wird. Das primäre Ziel der Fehlervermeidung besteht darin, Qualität nicht erst durch abschließende Prüfungen sicherzustellen, sondern bereits während des Produktionsprozesses zu gewährleisten. Nur fehlerfreie Teile sollen in den nächsten Prozess weitergegeben werden. Die Fehlerverhinderung stellt einen strikt präventiven Ansatz dar, bei dem durch geeignete Maßnahmen sichergestellt wird, dass Fehler von vornherein nicht entstehen können. Der Prozessablauf beim Auftreten eines Fehlers ist festgelegt: 1) Fehler wird erkannt, 2) Qualitätsalarm wird ausgelöst (z. B. durch Stopp des Vorgangs), 3) der Fehlerort wird auf dem Andon-Board angezeigt (ggfs. akustische Unterstützung), 4) zur Unterstützung und zur Problemlösung kommt ein Unterstützer (meistens eine Führungskraft, jap. Hancho) dorthin.⁵⁹

*„**Andon-Board** Der Zusammenschluss von mehreren Informationslampen an einem zentralen Ort. Dies dient der Übersicht, der Steuerung und der Transparenz einer Produktion im Sinne des Shopfloor Managements. Weitere Kennzahlen, wie die Ist- und Sollstückzahl sowie die sich daraus ergebende Differenz, werden aktuell angezeigt.“⁶⁰*

Poka Yoke nutzt drei Gruppen/Prinzipien für die Fehlervermeidung:⁵⁹

- Das Kontaktprinzip nutzt die Form und Abmessungen der Werkstücke. Diese werden durch physikalische Merkmale identifiziert. Mit diesem Verfahren können Formen sortiert werden. Fehlerhafte Teile können aussortiert werden, wenn Merkmale fehlen oder ein Werkstück falsch in eine Vorrichtung eingelegt wurde. Es wird nicht weiter transportiert.
- Das Festwertprinzip überwacht Parameter und erkennt Abweichungen von definierten Werten. Dies können Parameter, Gewicht oder Zählmenge sein. Bei der Kommissionierung von Teilen kann das Gewicht überprüft werden und Mengenabweichungen über oder unter der Sollmenge können erkannt werden.
- Das Prozessschrittprinzip folgt der Reihenfolge eines Prozessflusses oder von Programmschritten. Ein nachfolgender Prozess kann nicht vor dem vorhergehenden Prozess durchgeführt werden. Auf diese Weise werden Abweichungen von der Prozessnorm erkannt. Wird bei einer Montage die

⁵⁸ Bertagnolli (2020), S. 129.

⁵⁹ Vgl. Bertagnolli (2020), S. 129–131.

⁶⁰ Bertagnolli (2020), S. 127.

Schrittfolge nicht eingehalten und ein Werkzeug nicht verwendet, erfolgt kein Weitertransport des Werkstücks zur nächsten Station.

Fehler werden durch Absicherung vermieden. Ein Beispiel aus dem Alltag ist der USB-A Anschluss, dieser funktioniert nur in einer Richtung. Ein Vergleich aus dem HTR 7000 ist beispielsweise die Absicherung gegen inkorrektes Einsetzen der Proben-Trays. Die Orientierung wird mithilfe von Stiften sichergestellt. Wird das Tray ordnungsgemäß eingesetzt, aktiviert es einen Schalter, der dem System das Einlegen des Trays signalisiert. Jede Position im Tray ist eindeutig. Mit dieser Absicherung wird vermieden, dass Proben mit einem falschen SOP (Standard Operating Procedure) oder Template vermessen werden. Zur zusätzlichen Absicherung bei der Analyse von Proben, die in Probengefäßen in das System geladen werden, kommen Code-Reader zum Einsatz. Diese erfassen den auf den Probengefäßen angebrachten Data-Matrix-Code durch einen Scanvorgang. Ist dieser Code nicht lesbar, oder wird kein Auftrag dazu im System gefunden, wird diese Probe nicht verarbeitet, zurück auf ihre ursprüngliche Position gelegt und als fehlerhaft (rote Farbe) in der Software des HTR 7000 markiert. Im HTR 7000 ist somit die Kontroll-Software auch gleichzeitig das Andon-Board. Bei Fehlern werden die Fehlermeldungen in den „Fehler Log“ gesammelt und der Lösungsprozess kann selbstständig vom bedienenden Personal durchgeführt werden.

3.1.6 Line Balancing

Für eine effiziente Produktionsauslastung sind Maßnahmen erforderlich, um Konflikte wie z. B. Engpässe, Minderauslastungen oder Wartezeiten in der Fertigung zu eliminieren. Ein Engpass (oder auch Bottleneck) entsteht in der Regel an der Arbeitsstation, an der die Bearbeitung der Prozessschritte (die Arbeitslast) am längsten dauert. In diesem Zusammenhang steht meist der Messvorgang des Rheometers im Fokus, wobei dies von der Templatedauer der jeweiligen Methode abhängt. Durch die Bearbeitung der Prozessschritte an dieser Station entsteht der sogenannte „Work-In-Progress-(WIP-Bestand)“. Er beinhaltet alle Güter, die sich noch in der Bearbeitungsphase befinden. An den Arbeitsstationen mit einer geringeren zeitlichen Arbeitslast entstehen umgekehrt ungenutzte Zeiten (Leerlaufzeiten), denn diese Arbeitsstationen müssen stets auf die weitere Zuweisung von Arbeiten durch die vorgeschalteten Arbeitsstationen mit zeitlich längeren Prozesszeiten warten. Mit der Leerlaufzeit bezeichnet man dann die Zeit, in der eine Einheit unproduktiv bzw. ungenutzt, aber betriebsbereit ist. Genau hier setzt die Methode des Line Balancing an. Das Ziel von Line Balancing ist es, die Wertschöpfungskette zu optimieren und Verschwendung zu eliminieren. Produktionstechnisch zielt das Line Balancing darauf ab, die Produktionskette auf Fließproduktion im One-Piece-Flow (Einzelstückfertigung) auszurichten und das TPS-typische Pull-Prinzip zu implementieren. Der Begriff Line Balancing lässt sich ins Deutsche mit „Austaktung“ übersetzen. Im Wesentlichen bezeichnet Line Balancing die Anpassung der Taktzeiten aller Arbeitsstationen innerhalb eines Prozesses an den geplanten Kund*inbedarf.⁶¹

Dieses Kapitel wird erwähnt, da die Frage aufgeworfen wird, inwieweit diese Konzepte bereits in manuellen Prozessen bei den Kund*innen implementiert sind. Die Nachfrage für Systeme, wie den HTR 7000 kommt oft von dem Bedarf eines höheren Durchsatzes. Somit stellt sich die Frage, ob mit effizienteren manuellen

⁶¹ Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 89.

Prozessen das auch abbildbar wäre. Ein weiterer entscheidender Vorteil der Automatisierung besteht in der Minimierung der zuvor identifizierten Verschwendung durch „Warten“. Während der Messzeiten des Rheometers ermöglicht die Automatisierung, parallel andere Tätigkeiten auszuführen, wodurch die Produktivität erheblich gesteigert wird. Zudem entfallen Wartezeiten vollständig, da das System, einmal beladen, kontinuierlich und ohne weiteren manuellen Eingriff arbeitet. Im Rahmen der Automatisierung werden Taktzeitanalysen durchgeführt, sodass im Verlauf des Entwicklungsprozesses dieses Produkts eine Parallelisierung, auch als "Line Balancing" bezeichnet, erfolgt. Im Falle der vermessenen Proben in einem HTR 7000 ist meist der längste Prozess der Messvorgang des Rheometers selbst, stellt aber kein Problem dar, da niemand warten muss und alle anderen Prozessschritte auch automatisiert ablaufen.

3.1.7 Visualisierung und Analyse von Prozessen

Für die Analyse und Optimierung von Prozessen ist die Visualisierung von Material- und Informationsflüsse, bzw. der „Fluss“ der Tätigkeiten notwendig und verschafft einen guten Überblick. Außerdem ist mit diesen Methoden der für diese Arbeit notwendige Vorher/nachher Vergleich möglich. Die Methode der Wertstromanalyse und das Spagetti Diagramm werden nachfolgend erläutert.

Wertstromanalyse

Diese Methode hat ihre Wurzeln im Toyota-Produktionssystem (TPS). Dabei bedeutet die Methode, das Ganze zu sehen, um das Ganze zu verbessern. Das Ganze steht hierbei im Fokus und bedeutet, dass auch außerhalb der Produktion analysiert werden soll, um ein ganzheitliches Verständnis der Situation und Verbesserungsmöglichkeiten zu erhalten. Das Ziel ist eine ganzheitliche transparente Abbildung der Prozesse. Es gilt Verschwendungen zu beseitigen und somit das Reaktionsvermögen der Produktion wesentlich zu verbessern sowie die Wirtschaftlichkeit und Effizienz zu erhöhen. Die Wertstromanalyse fokussiert sich damit primär auf die Optimierung der Durchlaufzeiten bei einer gleichzeitigen Steigerung der Flexibilität des Produktionssystems bei der Fertigung unterschiedlicher Produkte gemäß den Kund*innenvorgaben. Bei der Erstellung einer Wertstromanalyse ist es nötig, mit einer Kategorisierung der vorherrschenden Produkte zu beginnen. Es sollte nach Möglichkeit ein Produkt oder eine Produktfamilie gewählt werden, die es bei dem Produktionsprozess zu analysieren gilt. Dann sollte eine Kund*innenbedarfsanalyse folgen, die anhand der Verkaufszahlen des abgelaufenen Geschäftsjahrs durchgeführt werden kann. Im nächsten Schritt kann mit der eigentlichen Wertstromaufnahme in der Produktion begonnen werden, an der anschließend Verbesserungspotenziale analysiert werden.⁶²

Die ganzheitliche Betrachtung kann von Vorteil sein, jedoch wird in dieser Arbeit ein Qualitätskontrollprozess (QC – engl. für Quality Control) oder Forschungs- und Entwicklungsprozesse (F&E) betrachtet. Der Zusammenhang mit Verkaufszahlen ist aus der Sicht des Lieferanten schwer zu ziehen. Diese Methode ist eher komplex, hat aber Schlüsselkomponenten wie die Analyse der Verschwendungen (Potentialanalyse) und die Taktzeit.

⁶² Vgl. Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 129.

Spaghetti- Diagramm

Neben der Wertstromanalyse ist ein sogenanntes „Spagetti-Diagramm“ ein schneller Weg Verschwendungen in einem Prozess zu analysieren und darzustellen. So werden mit dem Diagramm Materialflüsse dargestellt, um die Verschwendungsarten „Transport“ und „Bewegung“ zu eliminieren und somit einen möglichst schlanken Prozess zu erzeugen. Das Diagramm zielt primär auf eine Senkung der Durchlaufzeit ab. Ausgangspunkt für die Analyse ist ein Layout des Arbeitsbereiches. Diese Abgrenzung ist in diesem Fall das Labor bei Kund*innen, in dem das Rheometer platziert wird bzw. im Falle von externer Auswertung inklusive der zugehörigen Büroräume. Auch hier eignet sich ein sogenannter „Gemba-Walk“ – ein japanischer Begriff und bedeutet „der reale Ort“ – um den Prozess zu erfassen.⁶³

Vorteile der Methode sind, dass kein Vorwissen benötigt wird. Es visualisiert optimal den Prozess und viel wichtiger, dessen Ausführung für den Anwender. Ein Nachteil ist die schnell auftretende Unübersichtlichkeit. Mit einer klaren Definierungsphase kann dem entgegengewirkt werden.⁶⁴

Zu Beginn ist eine Definition der örtlichen, zeitlichen und gegenständlichen Aspekte erforderlich, um die Analyse abzugrenzen und die mit ihrer Unübersichtlichkeit einhergehenden Schwierigkeiten zu überwinden. Der Prozess erinnert mit seinen Schritten, siehe *Abb. 25*, an den PDCA bzw. DMAIC Prozess. Auch diese Methode soll zyklisch wiederholt und angewandt werden, um sich kontinuierlich zu verbessern.

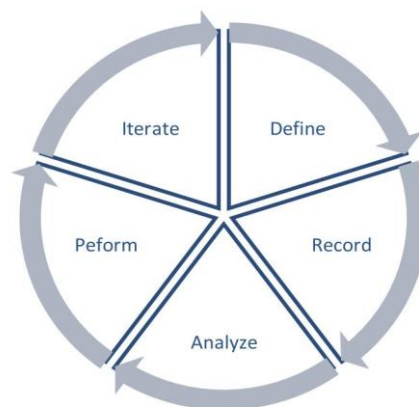


Abb. 25: Anwendungsschritte des Spaghetti-Diagramms, Quelle: (Niemann, Reich und Stöhr2021, S. 122.)

3.2 Lean Six Sigma Methoden

Innerhalb der Prozessverbesserung existiert neben dem Lean-Ansatz zudem der Six-Sigma-Ansatz. In der Praxis wird aufgrund des gemeinsamen Ziels von einer Kombination der Ansätze "Lean Six Sigma" gesprochen. Im Rahmen dessen erfolgt sowohl eine Optimierung der Prozesseffizienz als auch der Prozessqualität. Wie zuvor dargelegt, zielt Lean darauf ab, Verschwendungen (Muda) zu identifizieren und zu beseitigen sowie die Wertschöpfung zu maximieren. In Ergänzung zu den Prinzipien von Lean

⁶³ Vgl. Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 120–121.

⁶⁴ Vgl. Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 123–124.

beschäftigt sich der Six Sigma-Ansatz mit dem Ziel, die Prozessqualität durch die Reduzierung von Variabilität und Fehlern zu steigern. Die statistische Auswertung von Prozessdaten dient der Identifikation und, sofern möglich, der Behebung von Problemen. Im Rahmen von Six Sigma finden Methoden Anwendung, die auf dem DMAIC-Zyklus (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) basieren. Darüber hinaus werden statistische Tools wie Control Charts, Pareto-Analysen und Hypothesentests genutzt.⁶⁵ In der Literatur wird häufig der Begriff "Tools" (zu Deutsch: Werkzeuge) im Kontext von Lean Six Sigma verwendet. Dabei handelt es sich um eine Art technische Instrumente, während der Begriff "Methoden" die Vorgehensweise oder Technik beschreibt, somit also oft die Anwendung von Tools. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Methoden als unterstützende Mittel für Prozesse und Tools dienen.

3.2.1 Problemlösungskreisläufe PDCA und DMAIC

Die Ziele der Problemlösungsprozesse ist die Verbesserung und Steigerung der Prozessleistung. Die Methoden zielen hierbei auf die Beseitigung der Probleme, Schwachstellen und Fehler ab.⁶⁶ Plan-Do-Check-Act (PDCA) und Define, Measure, Analyse, Improve, Control (DMAIC) sind beides Problemlösungskreisläufe, wobei in dieser Arbeit vertieft auf den Six Sigma Ansatz DMAIC eingegangen wird. PDCA kommt ursprünglich aus dem Qualitätsmanagement und der Verbesserung dessen Prozesse. DMAIC betont ausgeprägter die Planungsphase im Vergleich zu PDCA.

Der DMAIC-Zyklus ist auf die Verbesserung bestehender Produkte und Prozesse ausgerichtet. Der Zyklus, *siehe Abb. 26* besteht aus folgenden Phasen:⁶⁷

- Definieren (Define)
Bestimmen der Prozesse, die wertentscheidend sind; Benchmarking; Definieren der Performancestandards.
- Messen (Measure)
Messen von FpMM (Fehler pro Million Möglichkeiten) und Streuung für die kritischen Qualitätsmerkmale; Bestimmen der Prozessfähigkeit.
- Analysieren (Analyze)
Beurteilen der Prozessperformance; Bestimmen der Fehler- und Abweichungsursachen mithilfe statistischer Methoden und Werkzeuge; Bestimmen der Faktoren mit dem größten Einfluss auf die kritischen Qualitätsmerkmale; Aufdecken besonderer und allgemeiner Ursachen für Variation; Festlegen der Verbesserungsziele; Einstellen der finanziellen Verbesserungsziele in das Budget.
- Verbessern (Improve)
Identifizieren der Verbesserungsmöglichkeiten; Auswählen von Verbesserungsprojekten, welche die höchste Wirkung auf Kund*innenzufriedenheit und das wirtschaftliche Ergebnis haben; Durchführen der Verbesserungsprojekte.

⁶⁵ Vgl. Niemann, Reich und Stöhr (2021), S. 11.

⁶⁶ Vgl. Koch (2015), S. 118.

⁶⁷ Vgl. Schmelzer und Sesselmann (2020), S. 540.

- Überprüfen (Control)

Kontrollieren, ob die Verbesserungsziele erreicht werden; dauerhafte Verankerung der Verbesserungen in den Prozessen; Standardisieren erfolgreicher Verbesserungsmaßnahmen; Bestimmen der Prozessfähigkeit; Überprüfen des Messsystems.

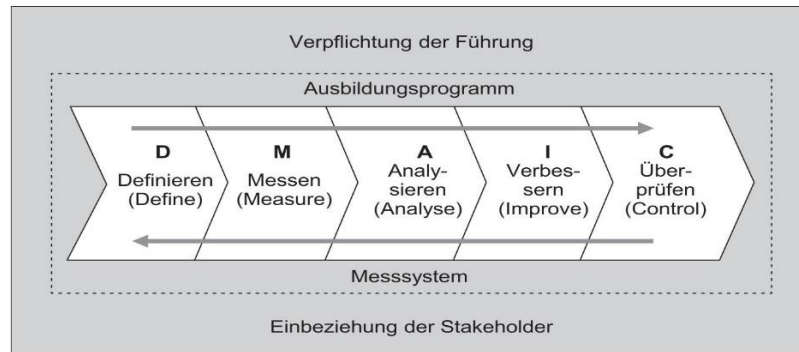


Abb. 26: Rahmenkonzept von Six Sigma (Quelle: in Anlehnung an Magnusson/Kroslið/Bergman 2001), Quelle: (Schmelzer und Sesselmann2020, S. 539.)

Dieser Verbesserungsprozess wird später im praktischen Teil, in Kapitel 6.5, auf das Trimmtool angewandt.

3.2.2 TCT – Total Cycle Time

Eine Methode zur Prozessverbesserung ist das Beseitigen von Prozessbarrieren und die Eliminierung von nicht wertschöpfenden Prozessen, siehe *Kapitel 3, Abschnitt 3.1, Unterabschnitt 3.1.1 Verschwendungsarten und deren Bedeutung im Labor*, und vor allem der Prozesszeit (Zykluszeit).⁶⁸

Das Hauptaugenmerk wird bei der TCT-Methode (Total Cycle Time) auf die Prozesszeit gelegt. Prozesszeiten werden so verkürzt, dass damit zugleich Steigerung der Qualität, Erhöhung der Termintreue und Senkungen der Prozesskosten verbunden sind. Wesentliche **Merkmale der TCT-Methode** sind:⁶⁹

- Ermitteln von Barrieren, die den Prozessablauf und die Verbesserung der Prozessleistung behindern.
- Beseitigen von Barrieren und Ersatzprozessen durch Prozessteams und Barrierenbeseitigungsteams.
- Messung der Auswirkungen der Beseitigung von Barrieren anhand von Prozesskennzahlen, die die Performanceparameter Prozesszeit, Termintreue und Prozessqualität erfassen.
- Vergleich der Messergebnisse mit den Zielwerten für die Performanceparameter Prozesszeit, Termintreue und Prozessqualität.

*"TCT ist auf die Verbesserung von Teilprozessen fokussiert. Die Prozessverbesserungen werden durch die Eliminierung nicht wertschöpfender Prozesse (-Ersatzprozesse) sowie die Beseitigung von Prozessbarrieren erreicht."*⁷⁰

⁶⁸ Vgl. Koch (2015), S. 117.

⁶⁹ Vgl. Schmelzer und Sesselmann (2020), S. 521.

⁷⁰ Schmelzer und Sesselmann (2020), S. 558.

Es wird davon ausgegangen, dass der HTR 7000 oder Laborautomatisierungssysteme im Allgemeinen nicht wertschöpfende Ersatzprozesse entweder vollständig eliminieren oder durch Automatisierung effizient gestalten und somit optimieren.

„In dieser Methode wird zwischen drei „Barriere-Arten“ unterschieden:

Sachbarrieren

- *fehlende Teile,*
- *fehlende Informationen,*
- *fehlerhaftes Material.*

Prozessbarrieren

- *Doppelarbeiten,*
- *komplexe Abläufe,*
- *Wartezeiten.*

Kulturbarrieren

- *unklare Ziele,*
- *wechselnde Prioritäten,*
- *mangelhafte Kundenorientierung,*
- *Probleme in der Zusammenarbeit.*⁷¹

Aus diesen Barrieren ist der Effekt der Beseitigung der Kulturbarrieren am höchsten. Dies ist jedoch mit der höchsten Komplexität der Umsetzung verbunden. Prozessbarrieren hingegen haben einen nur minimal geringeren Effekt, sind aber aus der Sicht der Automatisierungslösung umsetzbar. Sofern der Prozess Sach- oder Kulturbarrieren aufweist, wird vermutet, dass mit der Implementierung eines HTR 7000 zwar unterstützt werden kann, jedoch bei diesen Punkten nur bedingt in das Kund*innensystem eingegriffen werden kann. Aus vergangenen Projekten kann berichtet werden, dass die Kulturbarrieren schon vor der Implementierung die größte Barriere von Kund*innenseite sind. Die zuvor aufgeführten Unsicherheitsfaktoren, wie etwa unklare Zielvorgaben oder wechselnde Prioritäten seitens der Kund*innen, stellen signifikante Herausforderungen für eine effiziente Zusammenarbeit dar. Durch die Implementierung eines HTR 7000 Systems wird allerdings behauptet, dass Prozessbarrieren in den komplexen Abläufen, wie Doppelarbeiten und Wartezeiten eliminiert werden können. Diese These und ob diese Barrieren im manuellen Prozess überhaupt vorliegen, wird im praktischen Teil dieser Arbeit überprüft.

Durchlaufzeit und Zykluszeit

Die Durchlaufzeit sagt aus, wie lange die Bearbeitung eines Objektes bzw. einer Messung dauert, bis das Ergebnis vorliegt. Die Zeitdauer wird erfasst, indem der Zeitraum vom Beginn bis zum Abschluss der Messung gemessen wird. Dabei werden zeitparallele Teilprozesse nicht berücksichtigt.⁷²

⁷¹ Schmelzer und Sesselmann (2020), S. 522.

⁷² Vgl. Schmelzer und Sesselmann (2020), S. 406.

*"Die Zykluszeit errechnet sich durch Addition der Prozesszeiten aller Teilprozesse, auch die der zeitparallelen Teilprozesse. Die Zykluszeit gibt Auskunft über den gesamten Zeitaufwand und die gesamte Zeitdauer der Ressourcenbindung. Sie bietet die Möglichkeit, die Effizienz eines Prozesses zu messen. Gelingt es, die Zykluszeit zu verkürzen, erhöht sich dadurch die Prozesseffizienz."*⁷³

Durch diesen Unterschied der Zeitnahme wird in dieser Arbeit nur die Durchlaufzeit berücksichtigt, da die Zykluszeit der Kund*innen keinen Mehrwert bringt. Das Ziel ist ein schnelles Messergebnis. Die Zeit für dieses Ergebnis ist sowohl manuell als auch automatisiert die Durchlaufzeit. Die Ressourcenbindung sollte sich im Vergleich nur bei den Arbeitszeiten unterscheiden, allerdings nicht bei den Maschinen und Anlagen.

3.3 Messung der Prozessqualität

Um die Prozessqualität von dem manuellen Ablauf und der automatisierten Lösung bewerten und vergleichen zu können, werden messbare Parameter benötigt. *„Lean nutzt das Kennzahlenset aus den Kategorien Sicherheit, Qualität, Ausbringung, Kosten und Moral.“*⁷⁴ Die Gewährleistung der Sicherheit ist die höchste Priorität, weshalb die entsprechenden Kennzahlen den Anfang der Betrachtung bilden (engl. Safety). Im Anschluss werden die Themenfelder Qualität (engl. Quality) und Ausbringung (engl. Delivery) mit Fokus auf die Durchlaufzeit erörtert. Dies entspricht den beiden Hauptsäulen des Toyota-Produktionssystems, welches auf den Prinzipien Jidoka und Just-in-Time basiert. Im Anschluss werden die Kosten thematisiert (engl. Cost). Unter dem Themenfeld "Moral" oder "Mensch" (engl. "Moral") werden kulturelle Themen zusammengefasst. Die Abkürzungen der Kennzahlen sowie deren Reihenfolge ergeben folglich die Buchstabenfolge SQAKM (engl. SQDCM).⁷⁵

Innerhalb der einzelnen Kennzahlenkategorien finden je nach Bereich passende Prozesskennzahlen Anwendung. Kennzahlen können aus zwei Perspektiven betrachtet und entsprechend eingesetzt werden. Negativ klingende Einheiten können umgekehrt positiv eingesetzt werden. Dies kann anhand von Beispielen verdeutlicht werden: Anstatt eines Fehleraufkommens kann die Gutstückzahl oder statt eines Krankenstandes die Gesundheitsquote herangezogen werden. In *Tabelle 2* werden Beispiele zu jeder

Kategorie	Beispiel für Kennzahlen
Sicherheit	Arbeitsunfälle, Gesundheit, Ergonomie, Sicherheitsunterweisung, Umwelt
Qualität	Fehler, Ausschuss, Nacharbeit, Geradeauslauf, Kundenzufriedenheit, Retouren
Ausbringung	Stückzahlen, Durchlaufzeit, Liefertermine, Liefertreue, Produktivität, Flexibilität
Kosten	Budget, Werkzeuge, Material, Teile, Transport, Bestände, Schichten, Personal
Moral	Mitarbeiter, Führung, Kultur, Erfolge, Qualifizierung, Feedback, Verbesserungen

Tabelle 2: Beispiele zu den Kennzahlenkategorien, Quelle: (Bertagnolli 2020, S. 317).

⁷³ Schmelzer und Sesselmann (2020), S. 406.

⁷⁴ Bertagnolli (2020), S. 315.

⁷⁵ Vgl. Bertagnolli (2020), S. 316.

Kategorie aufgeführt. Nachfolgend wird aus jeder Kategorie mindestens eine Kennzahl für die Bewertung ausgewählt.⁷⁵

Im Rahmen des Praxisteils erfolgt in Kapitel 4.5 die Erhebung der in Tabelle 2 aufgeführten Parameter, welche im Anschluss einer Bewertung unterzogen werden. Die Bewertung erfolgt für jeden Parameter unter Berücksichtigung der folgenden, selbst interpretierten Auslegung:

Sicherheit

Die Anzahl der Arbeitsunfälle und der Einfluss auf die Gesundheit des Prozesses wird erhoben. Das Ziel besteht darin, keinen negativen Einfluss auf die menschliche Gesundheit auszuüben. Es wird die Summe der Arbeitsunfälle und der potenzielle längerfristige Einfluss auf die Gesundheit, durch beispielsweise den Einsatz von Lösungsmitteln, verglichen.

Qualität - Fehlerrate

Bei der Fehlerrate wird der Ausschuss gemessen, wie viele Messergebnisse aufgrund von Fehlern nicht verwendet werden können und wiederholt werden müssen. Hierfür wird die erstmalige Durchführungsrate (First Pass Yield) gemessen. Das ist der Anteil der Produkte, in diesem Fall Messungen, die den Prozess ohne Nacharbeit durchlaufen. Ein hoher Wert zeigt eine hohe Prozessqualität.

Ausbringung - Prozesszeit

Es wird die Zeit aller Teilprozesse, vor allem aber die Durchlaufzeit eines Messablaufs und der Durchsatz von einem 24-Stunden-Tag gemessen. Hierdurch wird auch ersichtlich, ob die Automatisierungslösung effizienter aufgrund der Parallelisierung ist. Ein wichtiger Indikator ist hier der Anteil der manuellen Arbeitszeit und Verschwendungen wie Wartezeiten. Eine kurze Durchlaufzeit und ein geringer Anteil manueller Arbeitszeit ist das Ziel.

Kosten

Für die Prozesskosten wird ein ROI (return on investment) analysiert, in der die Automatisierung dem manuellen Ablauf gegenübergestellt wird. Niedrige Kosten und somit ein niedriger ROI werden bevorzugt.

Moral

Die Kund*innenzufriedenheit ist ein wichtiger Indikator für die Prozessqualität. Sie lässt sich durch eine Kombination aus direkten Umfragen, Feedback-Analysen und Verhalten (z. B. Wiederkäufe) berechnen. Hierfür wird bei dem „Gemba Walk“ das Feedback von einem/einer Kund*in aus der Polymerindustrie, der bereits mehrere HTR 7000 Systeme nutzt, erhoben. Dies gibt auch Auskunft über Hürden für die Implementierung von automatisierten Laborlösungen und die Grenzen der Systeme.

Als zusätzliche Kennzahl wird der Prozentsatz der Wertschöpfung im Prozess herangezogen, da die Verschwendungsanalyse ein zentrales Element dieser Arbeit widerspiegelt.

Aufteilung in Wertschöpfung und Verschwendung

Aus beiden Prozessen wird eine Aufteilung von wertschöpfenden Tätigkeiten und notwendiger Verschwendung bzw. offensichtlicher Verschwendung erstellt. Der Prozess mit der höheren Wertschöpfung und der geringeren Verschwendung weist eine höhere Prozessqualität auf.

3.4 Schlussfolgerung

Die Erkenntnis dieses Kapitels ist, dass ein automatisierter Laborarbeitsplatz voraussichtlich eine signifikante Reduktion der Verschwendungsarten wie Wartezeiten, Platzbedarf, manueller Arbeitszeit (nicht genutzte Mitarbeiter*innenkapazitäten) und Transport zur Folge hat, während er gleichzeitig die Prinzipien von 5S implementiert. Inwieweit das der Realität entspricht und ob noch weitere Verbesserung, insbesondere die Steigerung der Reproduzierbarkeit (Kapitel 5) der Messung selbst vorliegen, wird im anschließenden Kapitel geprüft. Mit den Methoden aus Lean und Six Sigma werden im praktischen Teil dieser Arbeit ein manueller Rheometer-Arbeitsplatz und der Prozess mit einem HTR 7000 verglichen (Kapitel 4). Es bleibt zu prüfen, inwieweit die Lean-Ziele aus Kapitel 3.1, Qualität, Kosten, Zeit und Sicherheit – durch den HTR 7000 erfüllt werden.

Hierfür wird aufgrund geringer Barrieren ein Spaghetti-Diagramm und eine Prozessschrittkette in Form eines Flussdiagramms für die Zeit und erweiterte Verschwendungsanalyse erstellt. In der Auswertungsphase werden die Ergebnisse auf Lean Effekte untersucht, die Parameter aus der Messung der Prozessqualität evaluiert und geprüft, ob und wie weit sich die angeführten Methoden SMED, 5S und TCT unterscheiden. Durch die Implementierung von Automatisierung kann häufig ein gewisser Grad an Flexibilität verloren gehen. In diesem Kontext wird untersucht, inwieweit dies tatsächlich eine Barriere für die potenzielle Prozessverbesserung darstellt oder ob es den Wandel hin zu einer Optimierung des Prozesses gänzlich ausschließt.

4 VERSCHWENDUNGSANALYSE DES LABORPROZESSES

In diesem Praxis Teil werden die Methoden des 3. *Kapitels* angewendet, um in bestehenden Laborprozessen bei Kund*innen sowie durch Vor-Ort-Analysen potenzielle Verschwendungen zu identifizieren. Dabei wird untersucht, ob die Prozesse eine tatsächliche Verbesserung oder gegebenenfalls eine Verschlechterung erfahren haben. Es wird der Frage nachgegangen, welche Verschwendungen im manuellen Prozess auftreten, die durch die automatisierte Lösung beseitigt werden. Dafür wird ein Spaghetti-Diagramm und der Input aus zahlreichen Kund*innenmeetings und Laborbegehungen herangezogen. In diesem Kapitel wird der Begriff "Go To Gemba" aus dem Lean-Kapitel, *Kapitel 3*, als Referenzpunkt verwendet. Dies bedeutet an den Ort zu gehen, wo die eigentliche Arbeit geschieht, an den Ort der „Wahrheit“.

Im Allgemeinen wird der Laborprozess von der Produktion des eigentlichen Produkts abgegrenzt betrachtet. Wie einleitend in Kapitel 3.1.1 beschrieben, ist der Messprozess grundsätzlich schon als verdeckte Verschwendung einzuordnen. Dennoch ist die Durchführung von Messungen in F&E und QC-Prozessen unverzichtbar. Sowohl im manuellen als auch im automatisierten Laborprozess, ist der Startblock immer der Eingang einer zu vermessenden Probe. Die Rheologie findet dabei Anwendung in Prozessen der F&E als auch in QC-Prozessen. F&E-Prozesse zeichnen sich häufig durch höhere Komplexität aus, erfordern verstärkten menschlichen Input sowie eine intensive Betreuung des Messvorgangs. Aufgrund der umfangreicheren Abläufe und der Einbindung mehrerer manueller Arbeitsschritte entsteht hierbei ein erhöhtes Potenzial für ineffiziente Prozessbestandteile und Verschwendung.

4.1 Die manuelle Messung - Kund*in „Coatings“

Ein Kunde, der besucht wurde und auch ein Spaghetti-Diagramm gestattet hat, ist ein Hersteller von Harzen, Beschichtungen und Additiven. Dieser/diese Kund*in besitzt bereits zwei MCR-Modelle von Anton Paar und zahlreiche weitere Messinstrumente. Viele davon von Anton Paar, aber auch andere Hersteller sind vertreten. Die gesamt 20 Instrumente werden alle manuell bedient und laut Laborleiter werden etwa 40 verschiedene Methoden durchgeführt. Die Viskositätsmessung mittels MCR und CP 40-2 Geometrien ist eine der am häufigsten durchgeführten Messung mit durchschnittlich 150 Proben in 24 Stunden. Der Umstieg von den davor genutzten Brookfield-Spindeln zu den jetzt genutzten Anton Paar Rheometern war bereits eine deutliche Prozessverbesserung für den/die Kund*in. Die Gründe hierfür sind die höhere Genauigkeit, Benutzerfreundlichkeit und Fähigkeiten des Rheometers. Manche Proben erfordern Trimmen, jedoch nicht alle. Die Viskosität der Farben, Resins oder der Additive ist im niederviskosen Bereich und geht von etwa 200 mPas zu ca. 1000 mPas. Gewisse Proben haben eine weit höhere Viskosität, werden aber nicht in den Rheometern analysiert. Das Labor ist jederzeit mit mindestens zwei Personen, teils auch drei Personen, im Dreischichtbetrieb besetzt. Die Chemiker im Labor überwachen den Leitstand, messen In-Prozess Proben für die Justierung des Produktionsprozesses, die Fertigprüfung des Produkts vor dem Weitertransport, aber auch Verifikationsmessungen von Lagerständen (Rückhaltemuster) oder Kund*innen Applikationen. Die In-Prozessproben kommen mittels Rohrpost direkt ins Labor, diese haben oberste Priorität und müssen rasch vermessen werden. Proben für die Fertigprüfung oder Verifikationsmessung sind weniger zeitkritisch und kommen mittels internem Haustransport in Schütten geliefert.

Das Labor ist sehr gepflegt, sauber und aufgeräumt. Auch wenn nicht direkt an die 5S-Methode gedacht wird, ist dieses umgesetzt. Suchen nach benötigtem Material tritt in der Regel nicht auf. Jeder Gegenstand hat einen definierten Platz. Das Lager von Verbrauchsmaterial ist direkt angrenzend an das Labor.

Zu dem Zeitpunkt des „Gemba-Walks“ war noch kein LIMS-System vorhanden. Es gibt jedoch Pläne, ein solches System innerhalb der nächsten zwei Jahre bei dem weltweit agierenden Unternehmen zu implementieren. *„LIMS steht für „Labor-Information- und -Management-System“. Es handelt sich hierbei um eine Art von Software, die in Laboren verwendet wird, um die im Zusammenhang mit den durchgeführten Tests und Experimenten stehenden Daten zu erfassen, zu verwalten und zu analysieren. Ein LIMS kann beispielsweise verwendet werden, um Probenaufträge zu verwalten, Probenidentifikation und -verfolgung durchzuführen, Testergebnisse zu dokumentieren und zu speichern, Prozessabläufe und Qualitätssicherungsmaßnahmen zu verwalten, Berichte zu generieren und statistische Analysen durchzuführen.“*⁷⁶ Allerdings ist SAP bereits implementiert. Die Prüfanweisungen werden hingegen ausgedruckt und als Laufzettel verwendet. Die Ergebnisse werden darauf händisch notiert und anschließend eingescannt, eine potenzielle Fehlerquelle. Die Kalibrierung der Rheometer wird einmal pro Woche mit einem Prüf-Öl durchgeführt, der Nullspalt für die CP 40-2 wird täglich neu gesetzt. Die Messergebnisse streuen laut dem Personal im Bereich von lediglich 2 % bis 3 %. Dies ist mitunter auf die niedrige Viskosität der Proben zurückzuführen.

Bei der Analyse des Ablaufs konnte die Verschwendungsart „Mura“ festgestellt werden. Der Ablauf sowie die Arbeitslast im Labor unterliegen starken Schwankungen. Das Unternehmen produziert eine Vielzahl von Produkten, deren Anzahl in die Tausende geht. Die Produktionszeiten, Probenmengen sowie Methoden zur Analyse und Verifikation variieren jedoch erheblich.

Das Thema Personalmangel ist aktuell kein Problem.

Der Platz im Labor wird gut genutzt, fast jede Fläche ist mit einem Instrument belegt oder wird für manuelle Tätigkeiten freigehalten. Laut Laborpersonal sind dennoch genug Ausweichmöglichkeiten bei wachsendem Bedarf vorhanden.

Auf die Frage, welcher Prozessschritt in einer automatisierten Form den größten Nutzen für den Ablauf hätte, nannte der Laborleiter die Anlöse-Station. In dieser sind etwa 40 verschiedene Lösemittel verfügbar, aus denen das Personal die für die jeweilige Probe geeignete Substanz auswählen und dosieren kann. Dies benötigt Zeit, ist eine potenzielle Fehlerquelle und auch ein Sicherheitsrisiko.

⁷⁶ Klinkner & Partner Shop (30/10/2024).

4.1.1 Flussdiagramme der manuellen Messung

Der Prozess des/der Kund*in wird in den nachfolgenden Flussdiagrammen beschrieben. In der ersten Grafik, Abb. 27, wird der Prozess von „In-Prozess“ Messungen während der Produktion dargelegt.

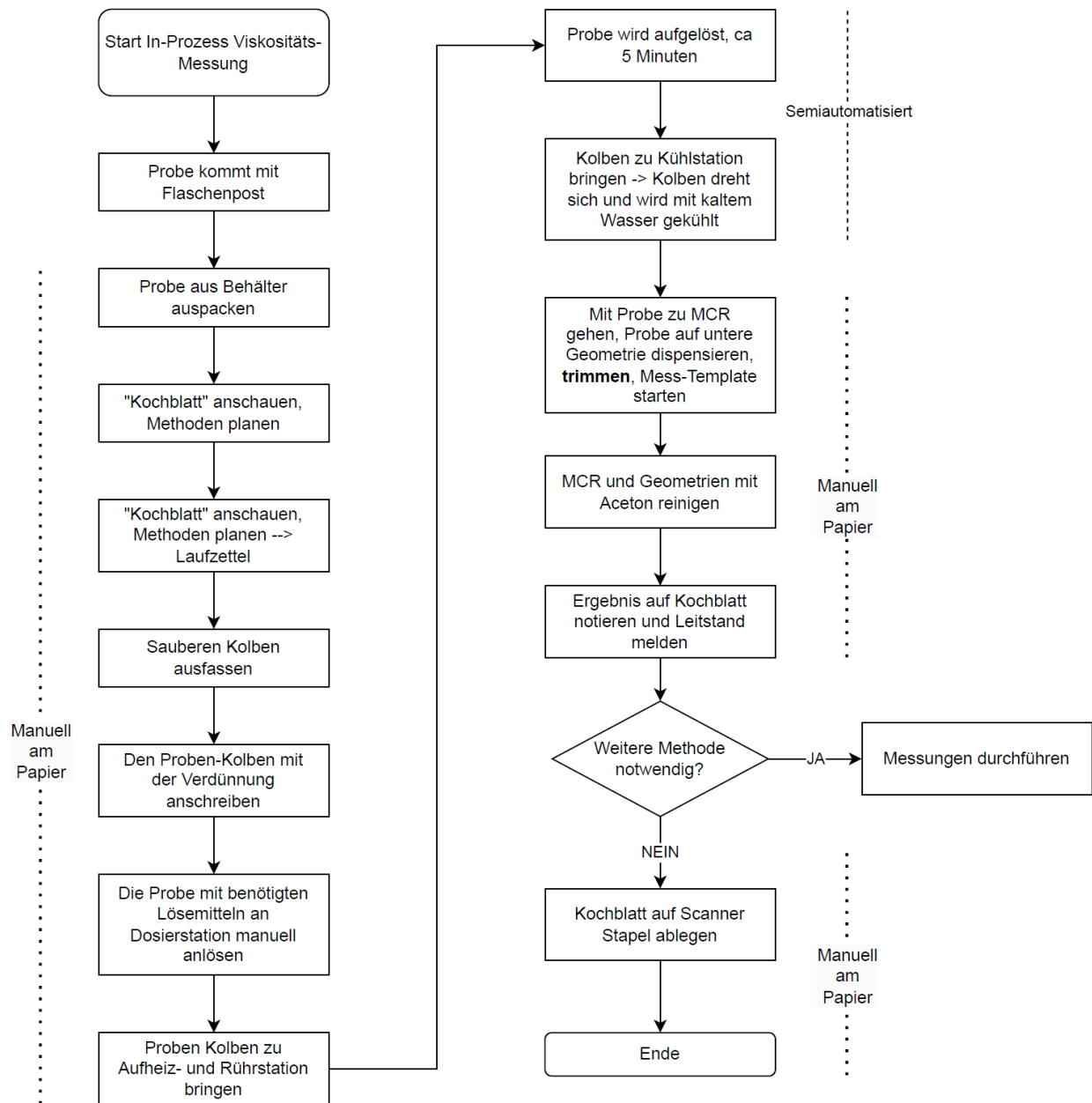


Abb. 27: Flussdiagramm In-Prozess Proben, Viskositätsmessung von Lacken, Quelle: Eigene Darstellung.

In der nachfolgenden Grafik, Abb. 28, wird der Prozess von Verifikationsmessungen erläutert.

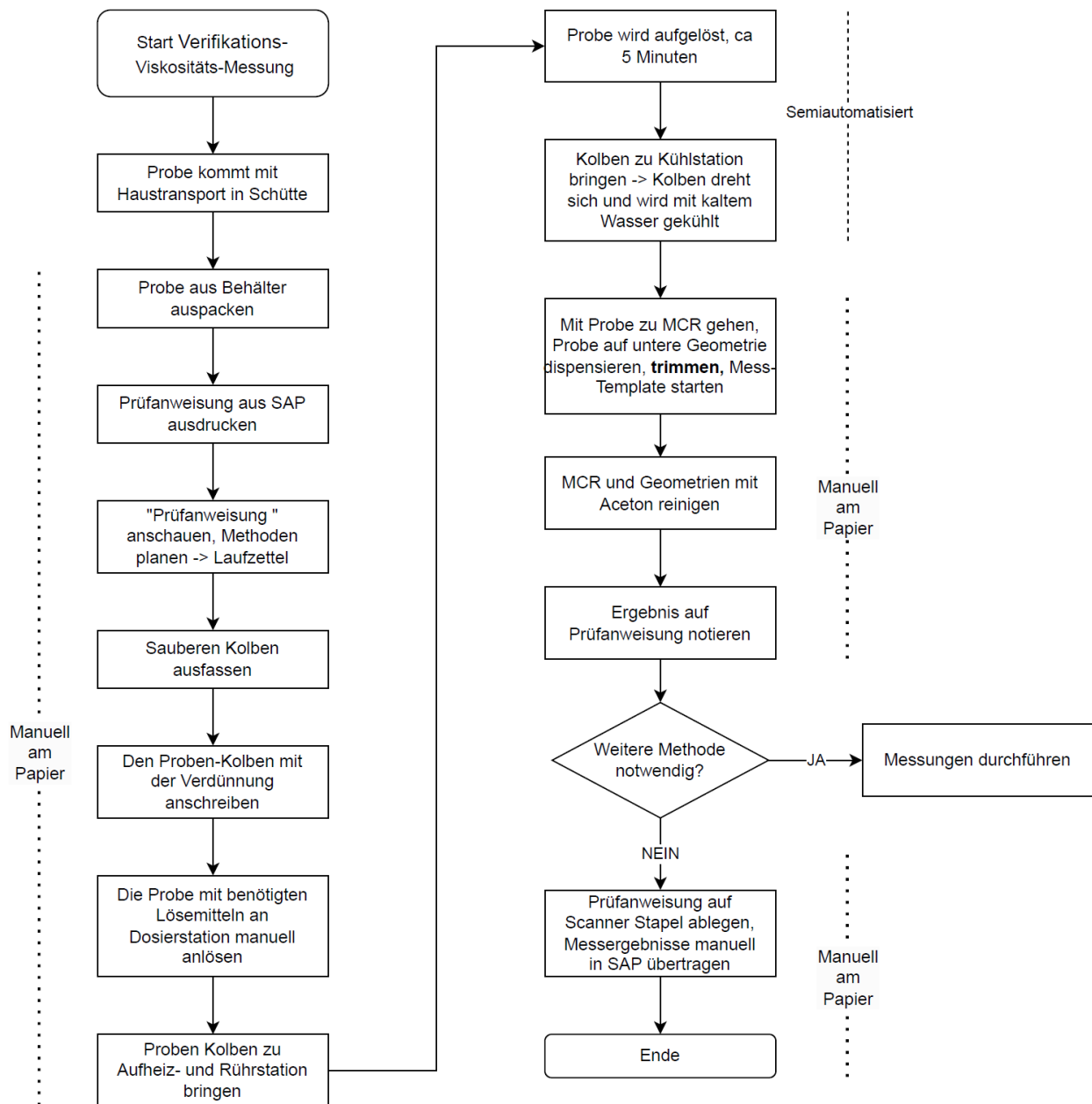


Abb. 28: Flussdiagramm Verifikation- Proben, Viskositätsmessung von Lacken, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus beiden Abläufen ist der Großteil der manuellen Tätigkeiten auffällig. Ausschließlich während dem Aufheizen und Abkühlen kann für jeweils 5 Minuten anderen Tätigkeiten nachgegangen werden. Diese Zeit wird für andere Proben oder Methoden genutzt. So bearbeitet jede Person im Labor zeitgleich verschiedene Aufträge. Die Wege zwischen den Stationen sind vorteilhaft kurz, <5 m. Die Notierung der Ergebnisse auf einem Laufzettel, welcher anschließend eingescannt wird, ist eine ineffiziente Vorgehensweise, die den heutigen Anforderungen nicht mehr gerecht wird. Die reine Messung am MCR dauert ca. 2 Minuten, die Vorbereitung am Instrument ca. 1 Minute sowie die Reinigung und die Dokumentation anschließend 3 Minuten. Der gesamte Prozess nimmt im Durchschnitt von Beginn bis Ende 18 Minuten in Anspruch, lediglich für die Bestimmung eines einzelnen Viskositätswerts.

4.1.2 Spaghetti-Diagramm der manuellen Messung

Der gesamte Prozess, beschrieben in Abb. 28, ist nachfolgend, Abb. 29, auch als Spaghetti-Diagramm abgebildet. Hier wird das gesamte Labor skizziert und die Wege des Prozesses visualisiert. Die Wege für die reine Viskositätsmessung sind bei diesem/dieser Kund*in sehr optimiert und kurz. Die Lieferung der Probe kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen, nämlich mittels Flaschenpost oder durch einen Haustransport. Beide Varianten haben den Vorteil, dass lange Holwege und Suchzeiten vermieden werden. Angenommen die Person, die im Leitstand 2 sitzt, führt die Messung einer in-Prozess Probe durch:

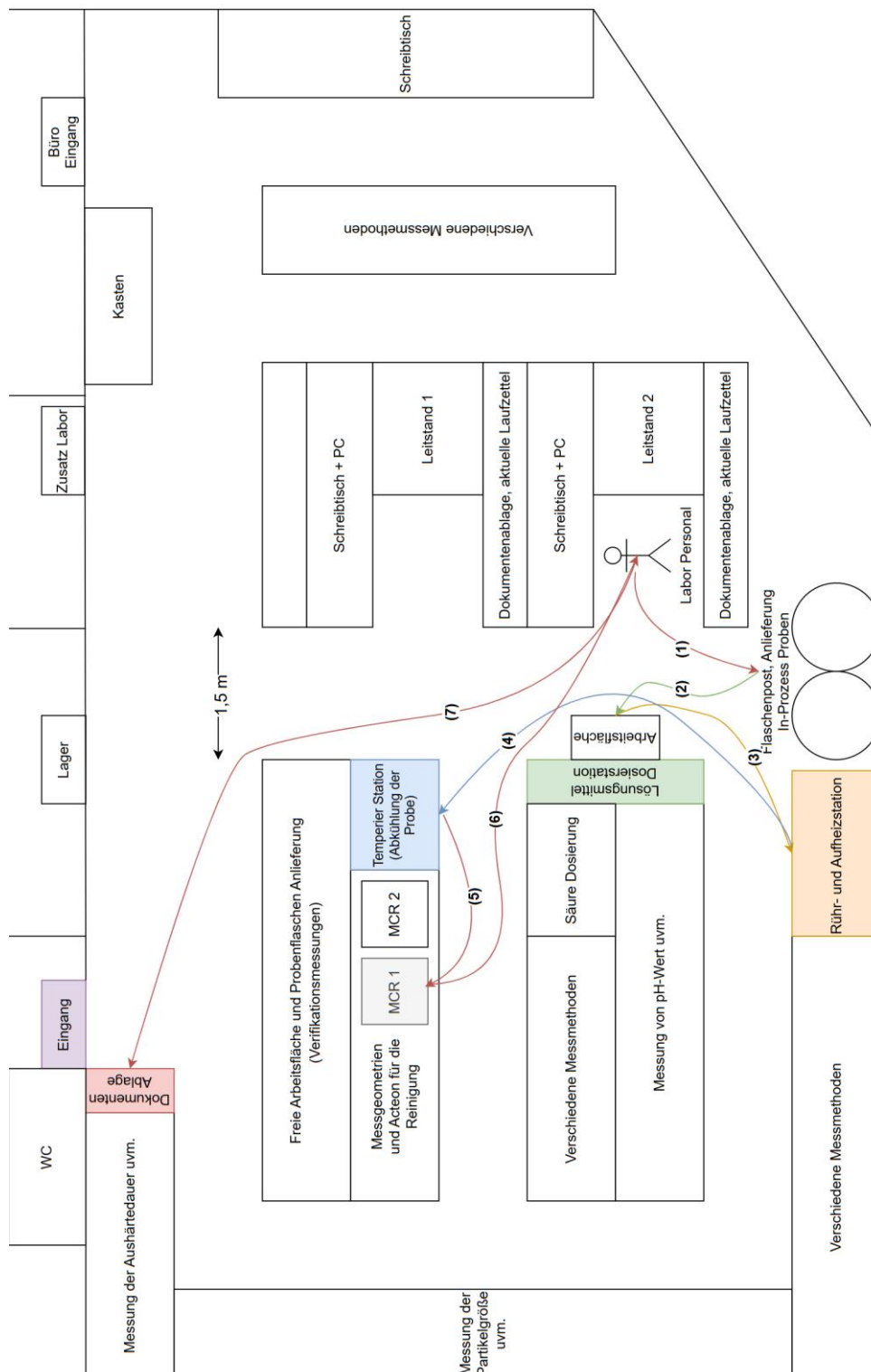


Abb. 29: Spaghetti-Diagramm eines/iner Rheometer Kund*in von Anton Paar, Arbeitsschritte und Bewegungen für eine reine Viskositätsmessung inklusive Anliöseprozess von Harzen, Beschichtungen und Additiven, Quelle: Eigene Darstellung.

- Gehweg 3 m zur Entnahme der Probe aus der Flaschenpost
- Gehweg 3 m zur Dosier- / Anlösestation (Anlöseprozess) – Prozessdauer: 2-3 Minuten; **(1)**
- Gehweg 3 m zur Rühr- und Aufheizstation – Prozessdauer: 5 Minuten; **(2)**
- Gehweg 5 m zur Abkühlstation – Prozessdauer: 5 Minuten; **(3)**
- Gehweg 1,5 m zu den Rheometern (MCR) – Prozessdauer: Dauer: 5 Minuten; **(4)**
- Gehweg (xx) m zu nächstem Messinstrument, wenn gefordert, oder ca. 4 m zu Leitstand für Ergebnisübermittlung und anschließend 7 m zur Dokumentablage

4.1.3 Zeitverteilung der manuellen Messung

Die benötigte Zeit für eine Messung ist nachfolgend als Kuchendiagramm, in *Abb. 30*, mit der prozentuellen Verteilung dargestellt. Die eigentliche Messdauer dieser Probe am Rheometer beträgt 60 Sekunden. Unter Berücksichtigung der Vorbereitungszeit am Instrument sowie der Reinigungszeit verlängert sich die Dauer vor dem MCR auf 210 Sekunden. Folglich nimmt die reine Viskositätsmessung lediglich einen Anteil von 5,45 % des Gesamtprozesses ein, während der Rest für die Datenerfassung, Probenvorbereitung oder Reinigung des MCR und der Geometrien verwendet wird.

Wie schon einleitend beschrieben, werden in diesem Labor die "Leerzeiten" für produktive Zwecke genutzt. Für den hier beschriebenen Anwendungsfall erscheint ein HTR 7000 daher nicht als optimale Lösung. Die angewandten Methoden sind vielseitig und aufgrund der einfachen und zeitnahen Messung bietet der HTR 7000 nur einen geringen Mehrwert.

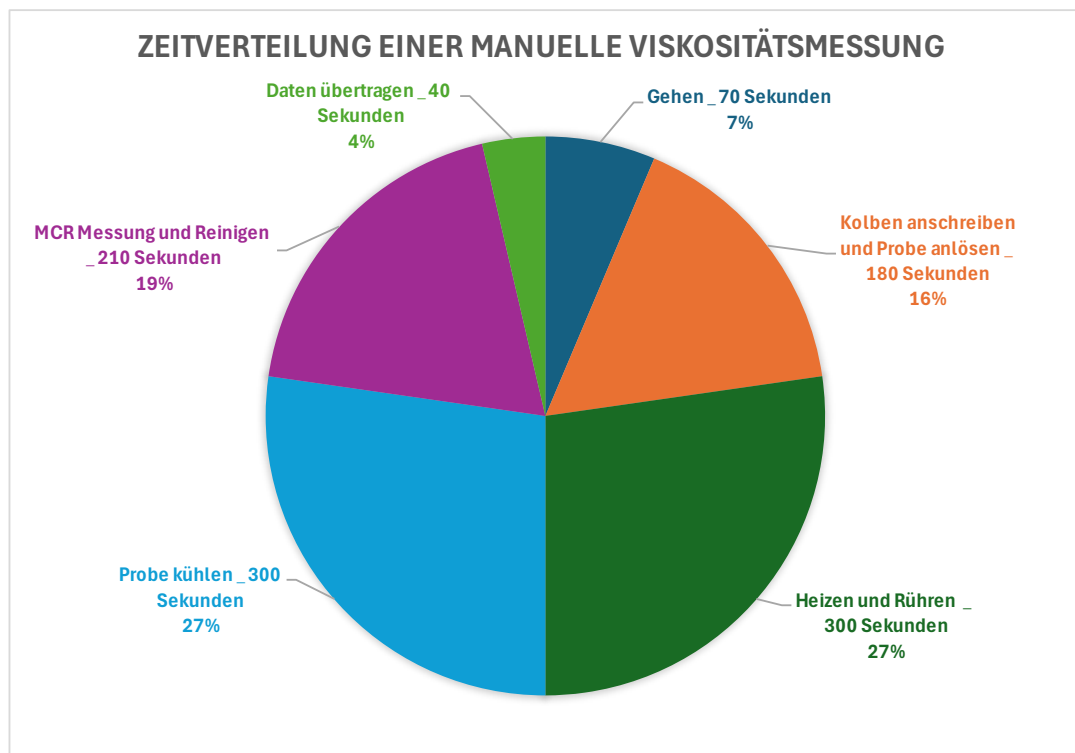


Abb. 30: Zeitverteilung einer manuellen Viskositätsmessung, Quelle: Eigene Darstellung.

Aus diesem Gamba Walk konnten drei Erkenntnisse mitgenommen werden. Der manuelle Datentransfer ist mit Verschwendung behaftet. Es treten viele, auch wenn kurze Gehwege auf und es herrscht „Mura“ – Unausgeglichenheit des Gesamtprozesses. Wie schon erwähnt kommt diese Unausgeglichenheit vom

Produktionsprozess. Um dies zu optimieren, muss tiefer in die Kund*innenprozesse eingegriffen werden. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass mit der Implementierung eines HTR 7000 alle drei Verschwendungen beseitigt werden können. Der Datentransfer geschieht automatisch als .csv, oder in der nächsten Ausbaustufe direkt an ein LIMS-System. Die Gehwege müssen nur einmal zum System vollbracht werden. Die Unausgeglichenheit Mura wird beseitigt, indem ein einheitlicher Mess-Takt Einzug nimmt.

4.2 Die automatisierte Messung mittels HTR 7000

In dem automatisierten Produkt HTR 7000 wird das High-End-Rheometer MCR 702e verbaut. Der Gedanke ist, dass in der Highend Automatisierung das fähigste Rheometer mit dem größten Anwendungsfeld verbaut wird. Von der Produktbezeichnung 7XX des MCR's stammt auch die Bezeichnung HTR 7000. Das MCR 702e kann einen Drehmomentbereich von 0,5 nNm bis 230 mNm abdecken, ist aufrüstbar mit einem zweiten EC-Antrieb oder Linearantrieb, kann eine maximale Drehzahl von 6.000 U/min für Anwendungen mit hohen Scherraten erreichen und verfügt über Arbeitsmodi wie CMT, SMT, sowie Counter-Movement-Modus. Die patentierte Toolmaster™-Technologie erkennt Messgeometrien und Zubehör automatisch, überträgt alle relevanten Parameter fehlerfrei an die Software und speichert den Nullspalt, um beim Beladen der nächsten Probe Zeit zu sparen. Durch die Quick Connect-Schnellkupplung können Messgeometrien innerhalb einer Sekunde mit einer Hand ausgewechselt werden. Primär wurde dieses Instrument primär für den manuellen Laboreinsatz entwickelt. So ermöglicht der Trimm Spiegel eine 360°-Sicht auf die Probe, vermeidet Fehler bei der Probenvorbereitung und unterstützt eine hohe Wiederholbarkeit von Messungen.¹⁰

Für die Polymerkonfiguration im HTR 7000 wird der Rheometermessplatz um eine automatisierte Temperierhaube H-ETD400 und die untere Heizplatte P-ETD300 samt Trimmtool erweitert. Im manuellen Betrieb erfolgt das Senken und Heben der Temperierhaube händisch, während in der automatisierten Variante dieser Vorgang durch eine pneumatische Achse vollständig automatisiert ausgeführt wird. Dort wo sonst die untere Heizplatte ihren Platz findet, wird eine angepasste Temperierung verbaut, die das Trimmtool beherbergt und die austauschbaren unteren Geometrieplatten mittels eines Vakuums fixiert. Zudem wurde die Kupplung für die obere Messgeometrie für den Geometriewechsel durch den Industrieroboter automatisiert. Abgesehen von diesen austauschbaren Komponenten ist das Rheometer ident zu dem Serienmodell.

Im HTR 7000 ist der große USP das vollautomatisierte Trimmen, welches bei z.B. Polymerproben oder Proben aus Körperpflegeindustrie notwendig ist. „Trimmen“ bezeichnet, wie schon in Kapitel 2.3 näher erläutert, das kontrollierte Entfernen/ Wegschneiden des Probenüberstands neben den rheologischen Mess-Geometrien, um den definierten Querschnitt zwischen dem Geometrie-Paar messen zu können. Die Messergebnisse können aufgrund der personenabhängigen Trimmergebnisse im manuellen Ablauf schwanken. Das Trimmen erfordert zwar vergleichbar wenig Zeit, aber Präsenz und Sorgfalt am Messgerät. Der Vorteil der Automatisierung liegt in diesem Fall darin, dass sowohl das Trimmen als auch die Probenvorbereitung standardisiert und konsistent durchgeführt werden, wodurch der Prozess wiederholbar und nachvollziehbar wird.

Es wird versucht einen Bezug und Vergleich zu der Automatisierungslösung, dem HTR 7000 herzustellen. Die Hürde hierbei ist, dass das System in unterschiedlichen Anwendungsbereichen eingesetzt wird. In der

Polymerindustrie beschränkt sich die Probenvorbereitung auf das Trimmen, während die Reinigung der Messgeometrien optional ist. Im Gegensatz dazu umfasst die Konfiguration des HTR 7000 für die

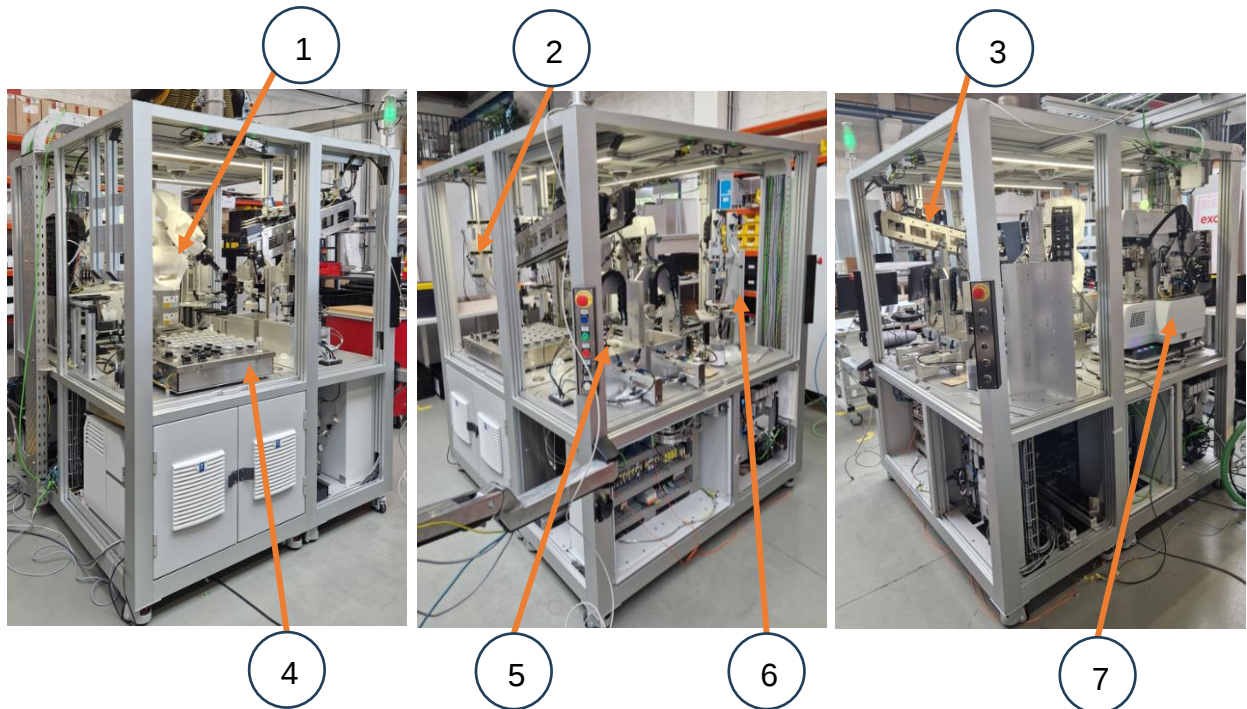


Abb. 31: HTR 7000 in dem laufenden Montageprozess, mit dem 6-achs Roboter (1) als Haupthandling, Einem Geometriespeicher (2), einem Speicher für Einweg-Spritzen (3), einem temperierten Probenrack (4), Reinigungsstation für die Messgeometrien (5) und Dosierstation (6), Quelle: Eigene Darstellung.

Körperpflegeindustrie zusätzliche Schritte wie Homogenisieren, Schütteln, Dispensieren, Kühlen/Vorheizen sowie optionale Zusatzfunktionen wie pH-Messung, Barcodelesen oder das Öffnen geschlossener Probenbecher. Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 31 einen HTR 7000 mit temperiertem Probenrack, Dosier- und Reinigungsstation während des Montageprozesses. Der vollständige Konfigurationsbaum des Systems ist auf der nächsten Seite dargestellt.

Die Konfigurationsmöglichkeiten werden in dem nachfolgenden Konfigurationsbaum, siehe Abb. 32, erläutert:

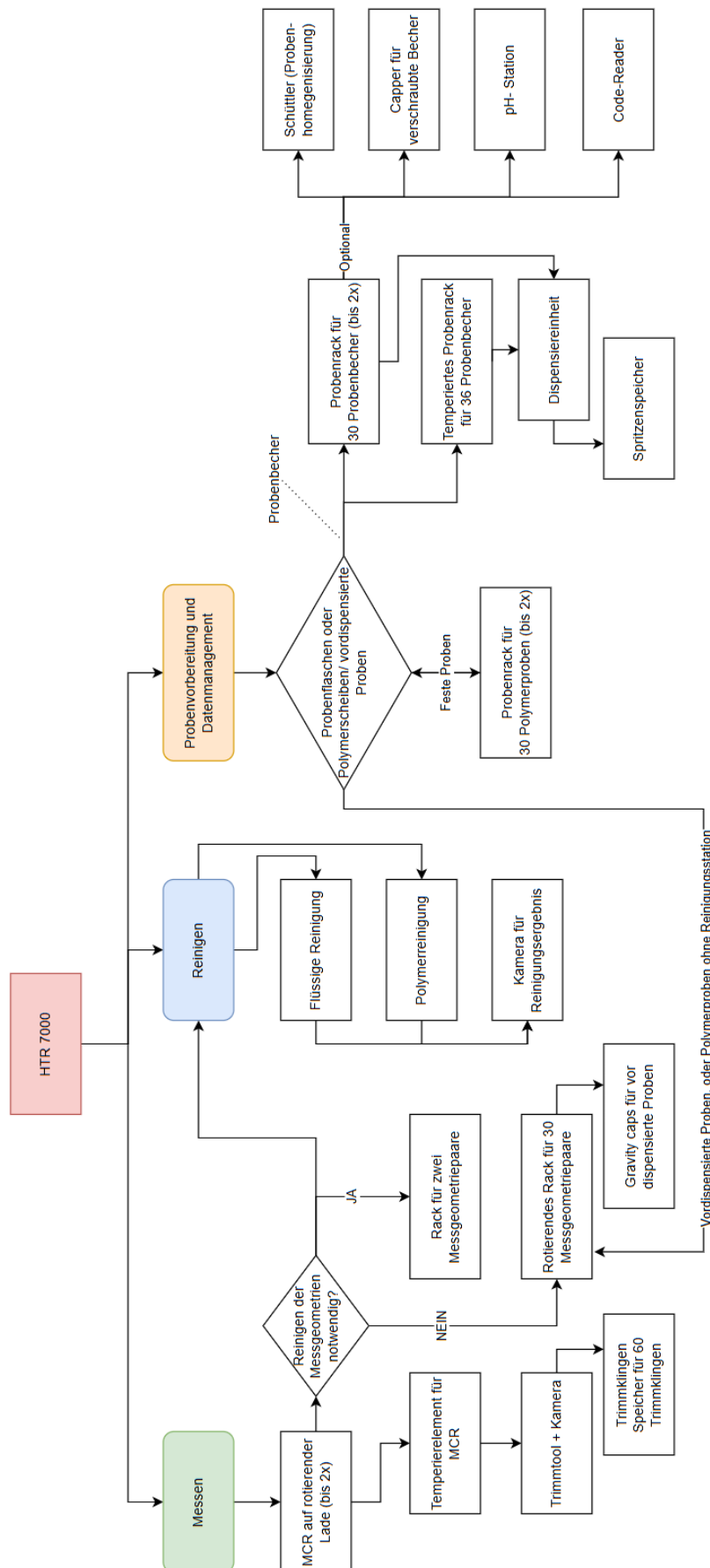


Abb. 32: Konfigurationsbaum des HTR 7000, die möglichen Module für MCR, Reinigen und Probenvorbereitung, Quelle: Eigene Darstellung.

Um eine valide Vergleichsbasis zu schaffen, wird der manuelle Prozess zunächst der Minimalkonfiguration des HTR 7000, spezifisch der Polymerkonfiguration, gegenübergestellt. Die Reinigung des Messgeometriepaars ist optional, wird den Kund*innen aber empfohlen, da dies einen erheblichen manuellen Aufwand erspart. Eine beispielhafte Konfiguration mit Probenvorbereitungsschritten folgt nach der Minimalkonfiguration. Das Ziel ist die Lean Effekte durch Laborautomatisierung zu finden.

4.2.1 Flussdiagramm HTR 7000 Polymerkonfiguration

Der Prozessablauf eines HTR 7000 in der Polymerkonfiguration wird in dem nachfolgenden Flussdiagramm beschrieben. In der Abb. 33, wird der Prozess der Messung von bis zu 30 Polymerschmelzen in einem Bestückungsdurchlauf dargelegt, in der doppelten MCR-Konfiguration sind bis zu 60 Proben möglich.

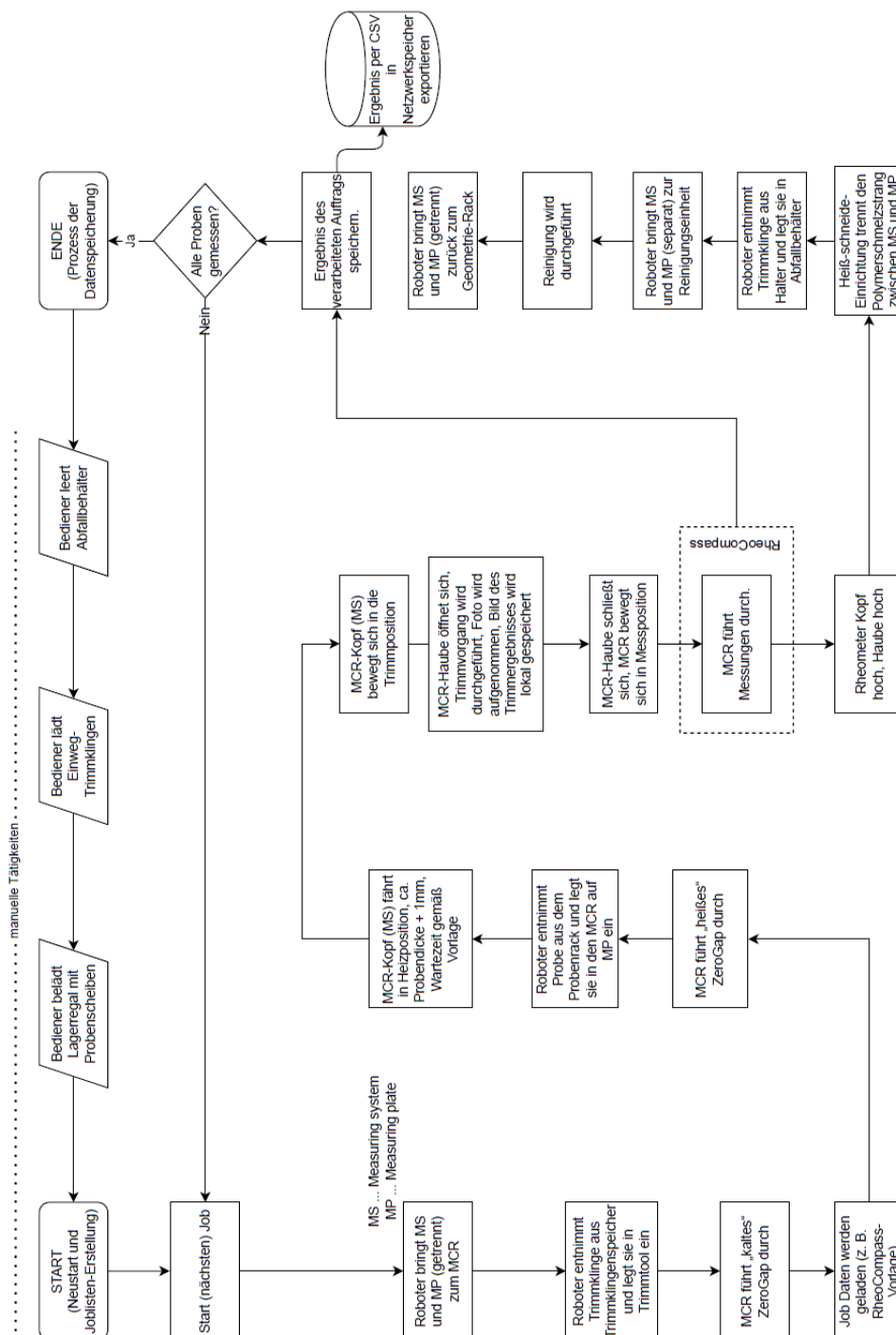


Abb. 33: Flussdiagramm Prozessablauf HTR 7000 Polymerkonfiguration mit Reinigungsstation der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.

4.2.2 Spaghetti-Diagramm HTR 7000 Polymerkonfiguration

Der gesamte Prozess, beschrieben in 4.2.1, ist nachfolgend, Abb. 34, auch als Spaghetti-Diagramm abgebildet. Hier wird das gesamte Labor skizziert und die Wege des Prozesses visualisiert.

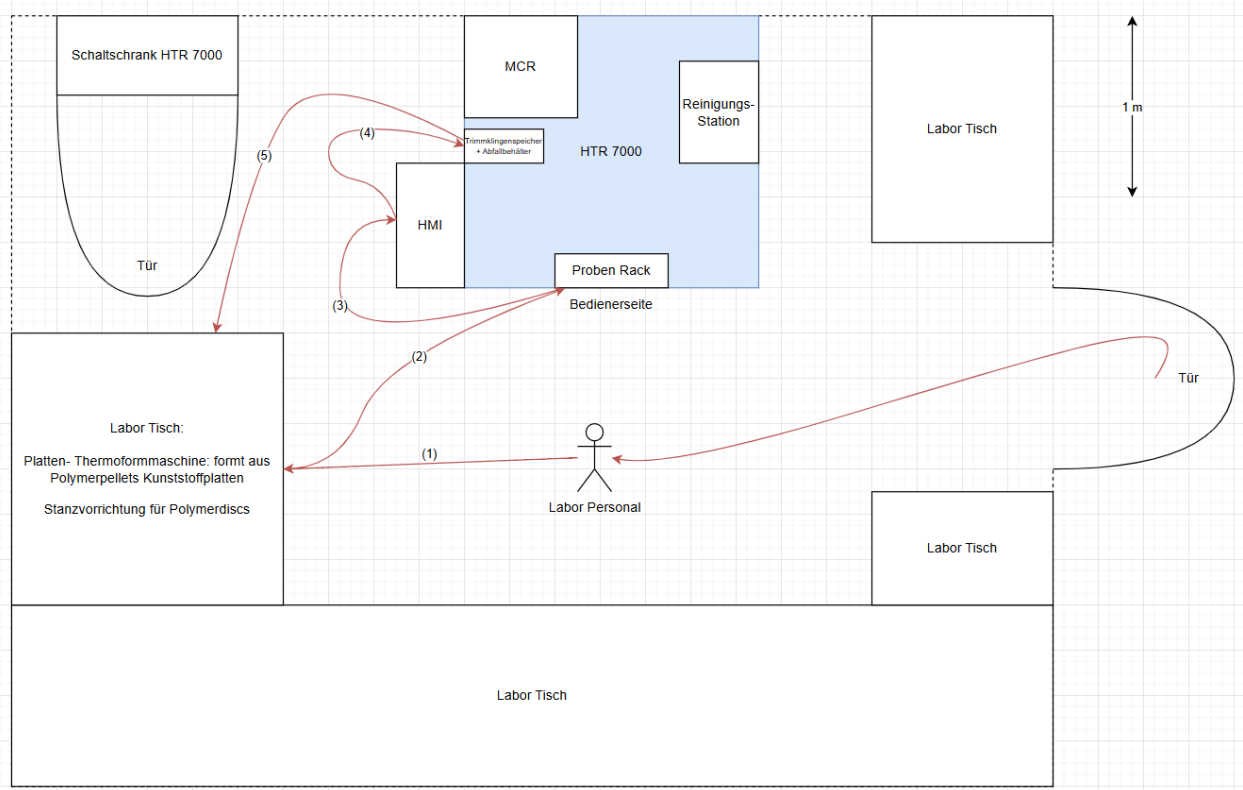


Abb. 34: Spaghetti-Diagramm eines beispielhaften Arbeitsablaufs von Polymerproben mit einem HTR 7000, Quelle: Eigene Darstellung.

Ablauf des Beladens eines HTR 7000 mit Polymerdiscs und Start des Messablaufs, benötigt wird eine Person:

- (1) - Gehweg 5 m von Tür zu Arbeitstisch
 - Probenvorbereitung: Polymerdiscs ausstanzen
 - Proben in 2. Probenrack einschichten
- (2) - Gehweg 2 m zu HTR 7000, Tür öffnen, leeres Probenrack entnehmen
 - Neues Probenrack einsetzen
 - Tür schließen
- (3) Gehweg 1 m zu HTR 7000 HMI
 - Job Daten anlegen, Definition welche Probe mit welchem Prozess vermessen werden soll
- (4) Gehweg 1 m zu seitlicher Tür des HTR 7000
 - Tür öffnen
 - Gebrauchte Trimmklingen aus Abfallbehälter entnehmen
 - Neue Trimmklingen in Rack legen
 - Tür schließen
 - Automatisierung an HMI starten
- (4) Gehweg 2 m zu Arbeitstisch, Entsorgung der gebrauchten Trimmklingen

4.2.3 Zeitverteilung HTR 7000 Polymerkonfiguration

Die benötigte Zeit für das Anlegen einer Messreihe ist nachfolgend als Kuchendiagramm, in *Abb. 35*, mit der prozentuellen Verteilung dargestellt. Die eigentliche Messdauer am Rheometer kann variieren und wird in diesem Kontext nicht weiter dargestellt, da der Zweck des Systems darin besteht, den HTR 7000 zu beladen und anschließend anderen Aufgaben nachzugehen. Die Messung von Polymerproben kann von 45 Minuten bis zu 3 Stunden pro Probe in Anspruch nehmen. Aus der Verteilung ist ersichtlich, dass für das Bestücken von 30 Polymerproben nur in etwa 14,2 Minuten benötigt werden. Die Messergebnisse werden jeweils nach der Fertigstellung übertragen. Somit wird bei einer vollen Beladung, abhängig der verschiedenen Messdauern, das letzte Ergebnis nach 23 Stunden bis 90 Stunden an das Netzlaufwerk der Kund*innen übertragen.

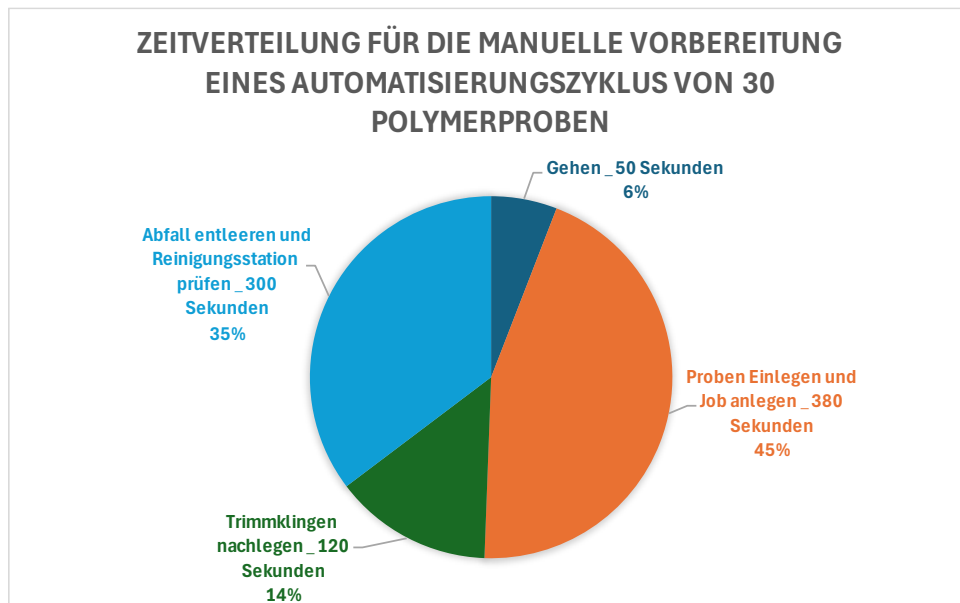


Abb. 35: Zeitverteilung für das manuelle Beladen eines HTR 7000, um 30 Polymerproben automatisiert zu vermessen, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Zeitverteilung des HTR 7000 Prozesses, siehe *Tabelle 3*, zeigt, dass trotz parallellaufender Reinigung der Engpass die MCR-Messung ist. In dieser Konfiguration kommt es durch die langen Messzeiten zu wiederholenden Stillständen des Roboters und der Reinigung. Es ist möglich zwei MCR-Module zu verbauen, damit wird die Reinigungsstation besser ausgenutzt wird. Trotzdem ist die Messdauer der Engpass im Prozess.

Prozessschritt	Zeit in Sekunden	Zeit in Minuten	Prozessschritt parallelisiert	Zeit in Sekunden	Zeit in Minuten
Template-dauer der Messung (inkl. automatisiertem Trimmen)	2.700,0	45,0	Reinigung der Messgeometrien (parallel)	900,0	15,0
Roboter Handling tauscht Messgeometrien aus und bestückt MCR mit neuer Probe	360,0	6,0			
Summe MCR Prozess: Messung des MCR	3.060,0	51,0	Summe: Parallelisierte Arbeitsschritte während der Messung	900,0	15,0

Tabelle 3: Durchlaufzeit einer beispielhaften Polymer Probe im HTR 7000, mit anschließender Reinigung der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.

4.2.4 Flussdiagramm HTR 7000 mit Probenvorbereitung und pH-Messung

Der Prozessablauf eines HTR 7000 in der Körperpflegekonfiguration wird im nachfolgenden Flussdiagramm beschrieben. In der Grafik, *Abb. 36*, wird der Prozess der Messung von bis zu 30, (60 Proben in doppelter MCR-Konfiguration), Cremes, Shampoos oder Conditionerproben dargelegt.

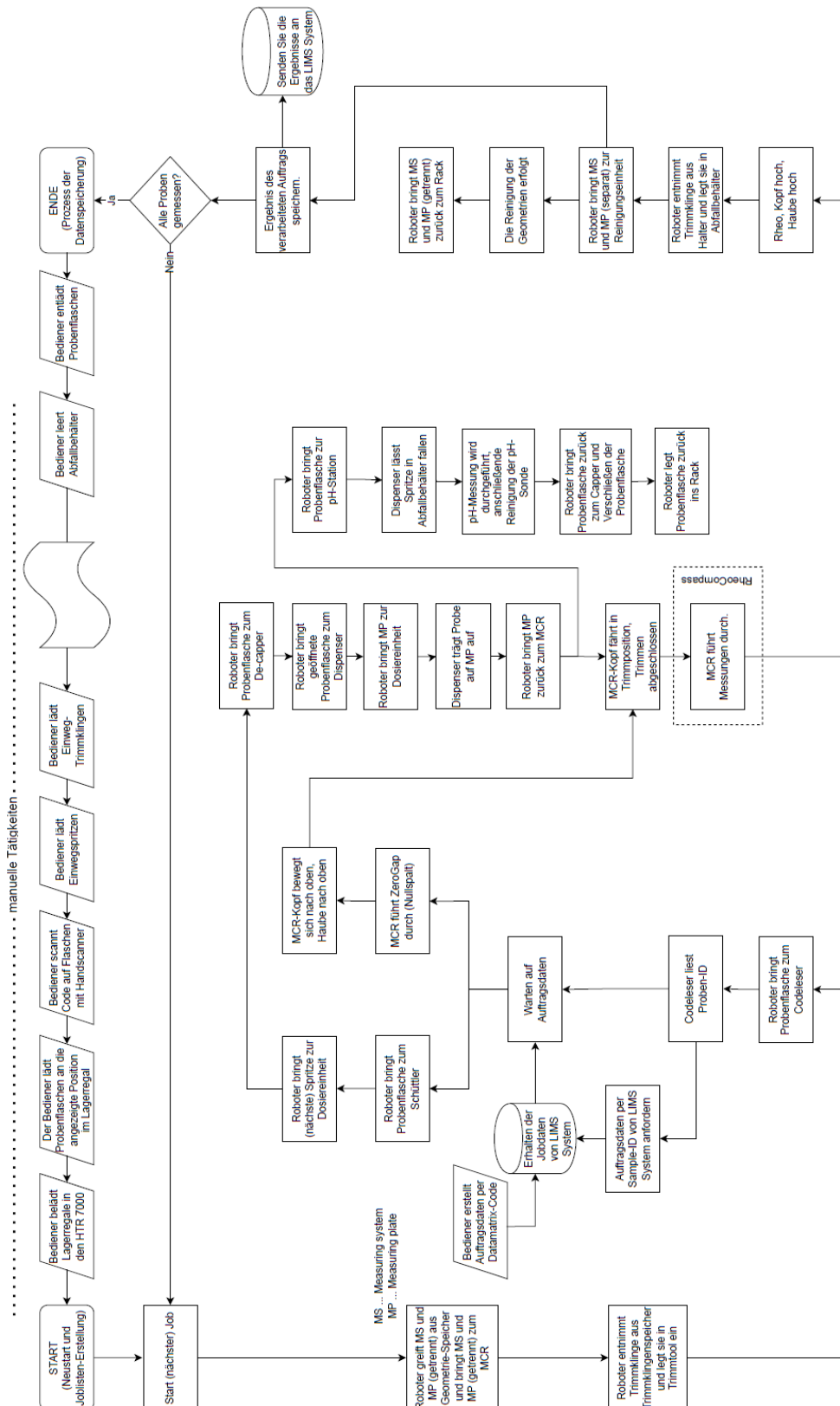


Abb. 36: Flussdiagramm des HTR 7000 mit Probenvorbereitung, pH-Messung und Reinigung der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.

4.2.5 Spaghetti-Diagramm HTR 7000 mit Probenvorbereitung und pH-Messung

Der gesamte Prozess, beschrieben in 4.2.4, ist nachfolgend, Abb. 37, auch als Spaghetti-Diagramm abgebildet. Hier wird das gesamte Labor skizziert und die Wege des Prozesses visualisiert.

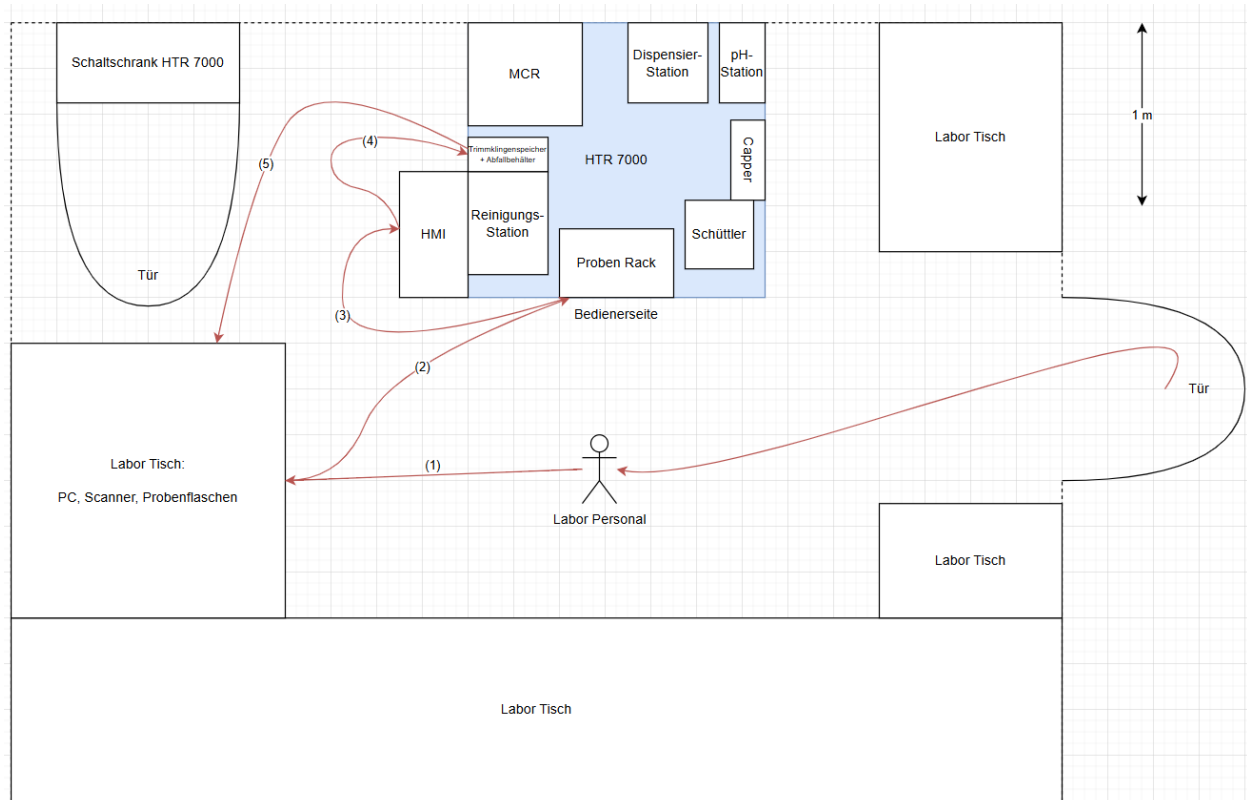


Abb. 37: Spaghetti-Diagramm eines beispielhaften Arbeitsablaufs von Körperpflegeprodukten mit einem HTR 7000, samt Probenvorbereitung, automatischer Probendispensierung, LIMS-Anbindung und Reinigung der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.

Ablauf des Beladens eines HTR 7000 mit Probenflaschen und Start des Messablaufs, benötigt wird eine Person:

- (1) - Gehweg 5 m von Tür zu Arbeitstisch
 - Prozessvorbereitung: Job im LIMS anlegen und Data Matrix Code ausdrucken
 - Code auf Probenflasche kleben
- (2) - Gehweg 2 m zu HTR 7000, Tür öffnen, leere Probenflaschen entnehmen, neue einsortieren, Tür schließen
- (3) Gehweg 1 m zu HTR 7000 HMI
 - Job Daten anlegen, Definition der Job-Prioritäten falls gegeben
- (4) Gehweg 1 m zu seitlicher Tür des HTR 7000
 - Tür öffnen
 - Gebrauchte Trimmklingen aus Abfallbehälter entnehmen
 - Neue Trimmklingen in Rack legen
 - Tür schließen
 - Automatisierung an HMI starten
- (4) Gehweg 2 m zu Arbeitstisch, Entsorgung der gebrauchten Trimmklingen

4.2.6 Zeitverteilung HTR 7000 mit Probenvorbereitung und pH-Messung

Die Konfiguration für Körperpflegeprodukte wie Cremes, Shampoo oder Conditioner, verfügt über ein Rheometer (MCR 702e). Aufgrund der zahlreichen Probenvorbereitungsmodulen und den Reinigungsstationen erlaubt der Platz in der Zelle nur ein Rheometer. Durch die Lagerkapazität von 60 Proben kann eine „Walk-Away-Time“ von etwa 25 Stunden erzielt werden, was bedeutet, dass das System autonom arbeitet, während in diesem Zeitraum andere Tätigkeiten ausgeführt werden können anstelle selbst zu messen. Die tatsächliche Durchlaufzeit ist aber immer abhängig von der tatsächlichen Messdauer des MCR's. Die in *Tabelle 5* angeführten 20 Minuten sind ein Richtwert.

Die manuellen Schritte, die für einen Messdurchlauf benötigt werden, sind im Kuchendiagramm, *Abb. 38*, aufgelistet. Für das Bestücken von 60 Proben auf einmal werden gesamt 57,3 Minuten benötigt. Das ergibt im Schnitt weniger als eine Minute pro Probe. Im eigentlichen Ablauf ist das Nachbestücken von einzelnen Proben oder Batches aber jederzeit möglich. Mit der Verbindung zu einem LIMS-System in dieser Ausstattung, wird die meiste Zeit für das Anlegen der Job Daten im LIMS-System und das Etikettieren der Probenbecher benötigt.



Abb. 38: Manuelle Zeitverteilung für das Beladen eines HTR 7000, um 60 Körperpflege Produkten wie Shampoo automatisiert zu vermessen, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Zeitverteilung des HTR 7000 Prozesses zeigt, dass trotz parallellaufender Probenvorbereitung, pH-Messung und Reinigung der Engpass die MCR-Messung ist. Diese Konfiguration ist von allen Abläufen perfekt aufeinander abgestimmt und es gibt kaum Stillstands Zeiten von Stationen im System.

Prozessschritt	Zeit in Sekunden	Zeit in Minuten	Prozessschritt parallelisiert	Zeit in Sekunden	Zeit in Minuten
Template-dauer der Messung (inkl. automatisiertem Trimmen)	1.200,0	20,0	pH-Messung und Reinigung der Elektrode (parallel)	240,0	4,0
Roboter Handling tauscht Messgeometrien aus und bestückt MCR mit neuer Messplatte samt Probe	300,0	5,0	Probenvorbereitung wie schütteln, Flasche öffnen und dispensieren (parallel)	300,0	5,0
			Reinigung der Messgeometrien (parallel)	480,0	8,0
Summe MCR Prozess: Messung des MCR	1.500,0	25,0	Summe: Parallelisierte Arbeitsschritte während Messung	1.020,0	17,0

Tabelle 4: Durchlaufzeit einer Körperpflege- Probe im HTR 7000, mit Probenvorbereitung und Reinigung der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.

4.3 Wiederkehrende Probleme im Laborprozess

Kund*innen teilten mit, dass erfahrenes Personal durch einen frühzeitigen Messabbruch Zeit sparen kann. Dies ist zum Verfassungszeitpunkt der Arbeit mit dem HTR 7000 noch nicht möglich. Das System schließt jeden Messablauf vollständig ab und liefert den digitalen Datenexport, jedoch nicht die Analyse und Bewertung der Daten. Außerdem werden in F&E-Prozessen meist verschiedene Methoden (Messinstrumente), zusätzlich zu der Rheologie, gefordert. Dennoch lässt sich feststellen, dass für Formulierungen sowie den Rheologieteil des F&E-Prozesses, Anwendungen für die HTR-Produkte von Anton Paar zu finden sind. Die Vorteile dieses Systems liegen einerseits in der hohen Durchsatzleistung, während bei langen Messzeiten das "Load-and-Go"-Prinzip zum Tragen kommt. Dieses Prinzip erlaubt es, das System zu beladen und anschließend anderen Tätigkeiten, wie der Interpretation der Messergebnisse, nachzugehen. Wiederkehrende Kund*innenprobleme sind die folgenden:

- Messgeräte werden nicht sauber vom Personal gewartet/ gereinigt/ gepflegt
→ Messgeräte liefern verfälschte Messergebnisse.
- Das Laborpersonal ist hochqualifiziert und auf die Interpretation von Daten geschult und soll nicht die Zeit mit Probenvorbereitung und Versuchsdurchführung „verschwenden“
- Es wird grundsätzlich kein Personal gefunden, dass wiederholende Tätigkeiten durchführen will, oder die Personalkosten sind zu hoch.
- Die Nachfrage nach Daten steigt rapide an, mit gleichen oder weniger Ressourcen. Es kann der Trend beobachtet werden, dass Kund*innen mit nachverfolgbaren und reproduzierbaren Daten KI-Modelle trainieren wollen, um noch schneller den Entwicklungsprozess vorantreiben zu können.
- Benutzerabhängige Messergebnisse durch inkonsistentes Trimmen, oder andere Probenvorbereitungsschritte, welche durch das Laborpersonal Einflüsse auf das Ergebnis haben.
- Der Datentransfer erfolgt nach wie vor manuell mittels USB-Stick. Ebenso sind Verfahren wie das Ausdrucken von Messergebnissen und das anschließende Einscannen bzw. die manuelle Eingabe in eine andere Software noch immer in Gebrauch.

4.4 Lean Effekte durch Laborautomatisierung: Eliminierung spezifischer Verschwendungsarten

Folgende Verschwendungen bzw. Lean Effekte konnten im Prozess erörtert werden, die ein automatisiertes System potenziell lösen kann:

- **Verschwendung: Muda**
 - Verdeckte Verschwendung
 - Probenvorbereitung
 - Messgeometrien reinigen
 - Offensichtliche Verschwendung
 - nicht genutztes Mitarbeiter*innenpotential
 - Manueller Datentransfer
 - Geometrien oder Hilfsmittel suchen
 - Gehen zwischen den Stationen
 - Trainieren von neuen Mitarbeiter*innen aufgrund von Fluktuation
 - Wartezeit am Messgerät
 - Nicht eingehaltene oder sauber durchgeführte Messstandards
 - Fehler durch zuvor nicht korrekt gereinigte Messgeometrien
 - Fehler durch falsche manuelle Probenvorbereitung, Trimmen oder der Verwendung eines falschen Templates
- **Überlastung: Muri**
 - Durch hohes Probenaufkommen können Labormitarbeiter*innen überlasten werden
- **Unausgeglichenheit / Prozessschwankungen: Mura**
 - Durch unterschiedliche Template-Zeiten und unterschiedliche Probenvorbereitungsschritte mit unterschiedlichen Prüfanweisungen ist der Prozess nicht in einem einheitlichen Fluss
- **5S**
 - Standards werden umgesetzt
 - Prozessorientierte Anordnung aller Gegenstände
 - Jeder benötigte Gegenstand hat seinen definierten Platz
 - Nur das benötigte Material wird verbaut
 - Sensoren prüfen ob benötigtes Verbrauchsmaterial in der benötigten Menge vorhanden ist
- **Fehlervermeidung – Poka Yoke**
 - Der menschliche Einfluss in die Messung wird beseitigt
 - Ein Andon-Board visualisiert in der HTR 7000 Software die Fehler und gibt gleichzeitig einen Lösungsweg für die Fehlerbehebung aus
 - Nur vorselektierte Templates stehen zu Auswahl. Wenn das System den Probenotyp kennt, werden die entsprechend passenden Templates vorgeschlagen
 - Sensoren prüfen den Zustand der einzelnen Stationen

- Codereader übernimmt die Zuweisung von Prüfanweisungen an den automatisierten Ablauf direkt von der verarbeiteten Probe
 - Racks können aufgrund von Pins nicht falsch eingelegt werden
- **SMED – Single Minute exchange of die**
 - Das benötigte Werkzeug (die Messgeometrien) werden von dem 6-Achs Roboter direkt nach der Messung getauscht.
 - Die Messung kann annähernd kontinuierlich fortgesetzt werden
- **Line Balancing**
 - Schritte wie die Probenvorbereitung oder die Reinigung laufen parallelisiert ab
 - Produktion (Messung) im Takt mit Parallelisierung liegt vor
- **TCT-Methode**
 - Die Methode wird umgesetzt da nur die benötigten Prozessschritte automatisiert werden
 - Diese erfolgen in einer optimierten Zeit, reproduzierbar und in der angemessenen Qualität

4.5 Die Prozessverbesserung

Neben dem Personal, dass durch die Automatisierung frei für neue Tätigkeiten ist, einem höheren Durchsatz, vermeintlich besserer Datenqualität und Nachverfolgbarkeit sinken auch die Gesamtkosten. Für die Bewertung der Prozessverbesserung werden die Kennzahlen aus *Kapitel 3.3 Messung der Prozessqualität*, nachfolgend kritisch analysiert und näher bewertet:

Sicherheit

Trotz einer umfassenden Recherche konnten keine öffentlich zugänglichen Datenquellen identifiziert werden, die Informationen über die üblicherweise auftretende Häufigkeit von Laborunfällen bereitstellen. Das übergeordnete Ziel ist es, jeglichen Einfluss auf die menschliche Gesundheit zu vermeiden. Der potenzielle längerfristige Einfluss auf die Gesundheit, beispielsweise durch den Einsatz von Lösungsmitteln, wird durch ein automatisiertes System samt Absaugung jedoch auf ein Minimum reduziert. Des Weiteren ist bei Messungen mit dem HTR 7000 ein Kontakt des Personals mit Messgeometrien mit einer Temperatur von 190°C oder darüber hinaus nicht möglich, da eine Sicherheitsverriegelung den Zugang dazu verhindert.

Qualität - Fehlerrate

Der First-Pass-Yield in den automatisierten Systemen von Anton Paar erreicht aktuell einen Wert von 98 %. Dies entspricht dem Anteil der Produkte, im vorliegenden Fall Messungen, die den Prozess ohne Nacharbeit durchlaufen. Ein hoher Wert indiziert eine hohe Prozessqualität. Eine Nennung von Werten seitens der Kund*innen ist bedauerlicherweise nicht möglich, da diese aktuell keine Preisgabe vornehmen. In Bezug auf manuelle Abläufe wird seitens Chat GPT ein üblicher First-Pass-Yield von 80 % bis 90 % angenommen. *„Ein üblicher First Pass Yield (FPY) für rheologische Messungen in einem manuellen Laborablauf mit Trimmen liegt oft zwischen 80% und 90%. Dieser Wert kann jedoch je nach Komplexität der Proben, der Erfahrung der Bediener, den spezifischen Messanforderungen und der Genauigkeit des Trimmvorgangs schwanken. In manuellen Abläufen kann die FPY durch inkonsistentes Trimmen oder*

kleine Fehler während der Probenvorbereitung beeinträchtigt werden, was zu Wiederholungsmessungen führt und den First Pass Yield senkt.“⁷⁷

Dies deutet darauf hin, dass die automatisierte Lösung einen weitaus stabileren Prozess bietet.

Ausbringung

In der Tendenz ist die Ausbringung des automatisierten Systems höher als der manuelle Ablauf. Die Messung erfolgt durch das System mit gleicher Geschwindigkeit. Der Vorteil besteht in der Fähigkeit des automatisierten Systems, einen Dreischichtbetrieb zu simulieren und auch am Wochenende zu arbeiten. In der Konsequenz ermöglicht das System, je nach gewähltem Arbeitsmodell der Kund*in, eine signifikant höhere Ausbringung. Zur Veranschaulichung ist das System mit dem Messablauf aus der ROI-Kalkulation (siehe Abb. 39) verglichen. In der vorliegenden Untersuchung werden drei Labormitarbeiter*innen mit einem Acht-Stunden-Tag im Einschichtbetrieb berücksichtigt. In der Folge resultiert eine Zykluszeit von 25 Minuten. Hier ist wichtig anzumerken, dass diese auch drei Rheometer benötigen. Die Probenvorbereitung wird dabei als parallel durchgeführte Tätigkeit angenommen. Infolgedessen kann ein Labormitarbeiter*innen, mit einem Rheometer, 19 Messungen pro Schicht durchführen, wobei lediglich fünf Minuten für persönliche Verteilzeit anfallen. Dies resultiert in einer Anzahl von 57 Messungen pro Tag mit drei Mitarbeiter*innen, die jeweils an einem Rheometer arbeiten. Nach fünf Arbeitstagen werden somit 285 Messungen durchgeführt. Der HTR 7000 ist hingegen in der Lage bis zu 71 Messungen pro Tag, mit nur einem Rheometer, an sieben Tagen pro Woche durchzuführen. Dies resultiert in einer Gesamtzahl von 497 Messungen innerhalb eines Zeitraums von sieben Tagen. Dies entspricht einer Steigerung von 212 Messungen pro Woche bzw. einer Steigerung der Ausbringung um etwa 74,39 % im Vergleich zum manuellen Ablauf.

Kosten

Das Themengebiet „Kosten“ wird mit einer beispielhaften „Return on Investment“ (ROI)-Rechnung dargelegt. In der Kalkulation wird der geforderte Probendurchsatz im manuellen Ablauf und mit einem HTR 7000 verglichen. Darüber hinaus werden weitere Aspekte wie Mitarbeiter*innentraining, falsche Ergebnisse und Sicherheitskosten berücksichtigt. Es wird angenommen, dass der/die Kund*in bereits zwei Rheometer besitzt, aber ein neues anschaffen möchte, um den möglichen Probendurchsatz zu steigern. Falls noch kein Rheometer vorhanden ist, muss der Vergleich der entsprechenden Rheometeranzahl angepasst werden. Der Vergleich des manuellen Ablaufs mit der automatisierten Lösung zeigt zudem, dass ein HTR 7000 mit einem Rheometer, den Durchsatz von drei manuell bedienten Rheometern im Einschichtbetrieb übertrifft. Dies wurde in dem vorherigen Absatz „Ausbringung“ diskutiert.

Die in Abb. 39 gezeigte ROI-Kalkulation kommt zu dem Ergebnis, dass sich das HTR 7000 System nach 1,83 Jahren rechnet. Ab diesem Zeitpunkt ist der Prozess, verglichen mit dem manuellen Ablauf günstiger. In dem Zeitraum von 10 Jahren nach der Anschaffung können somit € 3.060.000, - eingespart werden. Alle verwendeten Werte sind Richtwerte und können sich Kund*innen- bzw. probenabhängig ändern. Trotz dessen entspricht der Erfahrung nach ein ROI von 2 Jahren der Praxis und ist für ein System dessen Größe

⁷⁷ ChatCPT-4o, Prompt FPY [12.11.2024].

angemessen. Der ROI von 1,83 Jahren demonstriert, dass die Automatisierung auch mit signifikanten Kostenvorteilen einhergeht.

ROI Calculator HTR 7000		
Return On Investment Rechner für den HTR 7000		
Kosten für ein neues MCR 702e + Haube	€ 100.000,0	
Kosten für die jährliche Wartung des MCR standalone	€ 5.000,0	
Anschaffungskosten für den HTR 7000	€ 900.000,0	
Kosten für die jährliche Wartung des HTR 7000 incl. Verlängerung der Garantie	€ 39.000,0	
Stundensatz für einen Laboranten (Europa)	€ 70,0	
Mögliche Arbeitstage pro Jahr	250	
Aktuelle Situation (manuelle Messung)		
Benötigter Probendurchsatz pro Tag	60	#
Zeit für Probenvorbereitung je Probe	8	Minuten
Messdauer des MCR Templates	20	Minuten
Dauer des manuellen Reinigungsprozesses der Messgeometrien	7	Minuten
Dauer einer manuellen pH-Messung	4	Minuten
Dauer des manuellen Reinigungsprozesses der pH-Sonde	2	Minuten
Zeit der Labortechniker am Rheometer zur Messung samt Probenvorbereitung der oben genannten Proben	25,0	Arbeitszeit pro Tag
Employee costs per year	€ 437.500,00	€/Jahr
Benötigte Mitarbeiter für den Durchsatz	2,9	MA / Tag
HTR 7000 Konfiguration		
Dauer einer Probemessung im HTR 7000 inkl. Probenvorbereitung, pH-Wert und Reinigung	20	Minuten
Manuelle Zeit der Laboranten an dem HTR 7000 (beladen und Job Management)	1,0	Stunden / Tag
Resultierende Personalkosten	17.500,0	
Möglicher Probendurchsatz in 24h mit dem HTR 7000	71	Proben
Zusammenfassung und Einsparungen		
Jährliche Betriebskosten Rheometer Standalone	€ 442.500,0	€/Jahr
Jährliche Betriebskosten HTR 7000	€ 56.500,0	€/Jahr
Kosteneinsparungen pro Jahr	€ 386.000,0	€/Jahr
Der Wert erhöhter Sicherheit für Labortechniker	€ 10.000,0	€/Jahr
Wert darauf, dass der Labortechniker andere Arbeiten erledigen kann	€ 20.000,0	€/Jahr
Wert einer besseren Formulierung/kürzeren Markteinführungszeit	€ 10.000,0	€/Jahr
Kosten für die Einstellung und Schulung neuer Labortechniker.	€ 10.000,0	€/Jahr
HTR 7000 ist abbezahlt in...		
Wie schnell wird sich die Investition auszahlen?	1,83	Jahre
Gesamtkosteneinsparungen nach 10 Jahren mit HTR 7000		
	€ 3.060.000,00	

Abb. 39: Beispielhafte Kalkulation des Return on Investment (ROI) eines HTR 7000 (mit Probenvorbereitung und pH-Messung) im Vergleich zu dem manuellen Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.

Moral

Die Erfassung der aktuellen Moral ist mit Schwierigkeiten verbunden. Die Implementierung solcher Systeme führt zu einer signifikanten Veränderung des Tätigkeitsbereichs. Es lässt sich festhalten, dass ein Großteil der Betroffenen die bevorstehenden Veränderungen begrüßt und aktiv vorantreibt. Allerdings gibt es in jedem Unternehmen auch Personen, die eine derartige Umstellung nicht gänzlich befürworten. Die Tätigkeit verändert sich grundlegend in Richtung eines Daten-Spezialisten sowie einer Person, die für die Bestückung und Wartung des HTR 7000 zuständig ist. Die signifikant erleichterte Zugänglichkeit zu Messergebnissen resultierte in einer 30-prozentigen Steigerung der Nachfrage nach Messungen im Vergleich zum Status quo ante der Automatisierung. Diese Entwicklung lässt auf eine hohe Akzeptanz innerhalb des Teams schließen. Es kann angenommen werden, dass die Zufriedenheit, insbesondere bei

denjenigen, die von den Ergebnissen profitieren, zunächst sinkt, während sie bei den Nutznießern der Ergebnisse steigt. Dabei ist zu beobachten, dass auch das Laborpersonal, ein Jahr nach der Implementierung, eine hohe Zufriedenheit mit den neuen Umständen aufweist.

Aufteilung in Wertschöpfung und Verschwendung

Im manuellen Prozess ist nur das Starten des Rheometers und die nachfolgende Datenauswertung Wertschöpfend. Hierfür wird aus dem Beispiel der Laborbegehung die Dauer von 3,5 Minuten herangezogen. Folglich nimmt die Wertschöpfung der manuellen Viskositätsmessung lediglich einen Anteil von 5,45 % des Gesamtprozesses ein, somit 94,55% verdeckte und offensichtliche Verschwendung.

Die Wertschöpfende Tätigkeit übernimmt in der Automatisierung, der HTR 7000. Für den Vergleich der manuell benötigten Zeit, wird die Ladezeit für die gleiche Probe benötigt. Für 30 Proben, ohne Barcode, werden 15 Minuten angenommen. Mit einer Zykluszeit von 10 Minuten pro Probe, die Probenvorbereitungsschritte laufen parallelisiert, ergibt sich eine „walkaway time“ von 5 Stunden. Somit ist die verdeckte Verschwendung im automatisierten Prozess durch das Laden 5 %.

Daraus zeigt sich eine offensichtliche Prozessverbesserung in allen geprüften Punkten.

4.6 Herausforderungen und Grenzen der Automatisierung

Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, welche Hindernisse der Implementierung automatisierter Systeme entgegenstehen. Diesbezüglich sei auf *Kapitel 3, Abschnitt 3.2, Unterabschnitt 3.2.2* verwiesen.

In Laboren werden Forschungs- und Entwicklungsprozesse (F&E), sowohl als auch Prozesse der Qualitätskontrolle (QC), durch Messungen unterstützt. Prozesse der Qualitätskontrolle sind in der Regel einfach gestaltet, da die zu untersuchenden Proben in der Regel standardisiert und bekannt sind. Forschungs- und Entwicklungsprojekte sind in der Regel durch eine hohe Komplexität gekennzeichnet. Die zu reproduzierenden Abläufe sind von einem größeren Umfang geprägt, wobei eine Vielzahl unterschiedlicher Messmethoden zum Einsatz kommt. Zudem umfasst das gewünschte Probenspektrum eine Vielzahl verschiedener Probentypen. Dies trifft insbesondere zu, wenn ein großes Unternehmen die Bereitstellung einer solchen Automatisierung für mehrere Abteilungen plant. Im Falle von Formulierungen, beispielsweise Farben oder Joghurt, sind die zu messenden Proben in der Regel so ähnlich, dass diese Hürde nicht besteht. Die Herausforderung in diesem Kontext liegt in der präzisen Definition und Spezifikation des Systems, einschließlich der Schnittmenge potenzieller Proben und der vom/von Kund*innen bereitgestellten finanziellen Mittel.

Die Thematik der finanziellen Ressourcen stellt ebenfalls eine Herausforderung dar. Für Systeme, deren Kosten 500.000 € übersteigen, ist eine Freigabe der entsprechenden Position erforderlich. In der Regel sind in den Budgetzyklen keine unmittelbaren Käufe vorgesehen. Ein weiterer Aspekt, der gegen eine Umsetzung spricht, ist die Gefahr, dass Entscheidungsträger oder die treibende Person für das Projekt die Position oder gar das Unternehmen wechselt. Dadurch kann es zu einem Scheitern der Umsetzung kommen.

In Bezug auf den technischen Aspekt ist festzuhalten, dass das Trimmen der Probe, sofern dies erforderlich ist, in Abhängigkeit von der konkreten Probe eine Herausforderung darstellen kann. In diesem Kontext stellt

die Fähigkeit des automatisierten Trimmens eine grundlegende Voraussetzung für die Automatisierung dar. Allerdings ist zu beachten, dass wenn die Probe nicht trimmbar sein sollte, dies die Umsetzung der gesamten Lösung verhindern würde. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass nicht alle rheologischen Methoden automatisiert sind. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt stehen ausschließlich die Geometrien CC, CP und PP zur Auswahl. Weitergehend ist zu berücksichtigen, dass eine Automatisierung lediglich innerhalb eines eingeschränkten Temperaturspektrums möglich ist. So können Hochtemperaturkammern bis zu einer Temperatur von +1000°C im manuellen Aufbau realisiert werden, wohingegen in der Automatisierung als Standardlösung lediglich ein Temperaturbereich von +300°C abgedeckt wird.

In Bezug auf den benötigten Platz ist festzuhalten, dass ein HTR 7000 minimal mehr Fläche in Anspruch nimmt, als die gleichen Instrumente auf einem Labortisch einnehmen würden. Das System hat eine Fläche von 1,6 m x 1,7 m am Boden und die Höhe von 2 m, mit der Option eines Ventilationsflansches kommen weitere 0,5 m hinzu. Zusätzlich benötigt der HTR 7000 Platz für das Öffnen der Türen und den externen Schaltschrank (1 m x 0,4 m x 2 m; LxBxH). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der zur Verfügung stehende Platz in Laboren häufig begrenzt ist, wobei insbesondere der Formfaktor von entscheidender Bedeutung ist. Derzeit werden vermehrt "modulare" Labore errichtet, die sich durch große Räumlichkeiten und mobile Trennwände auszeichnen. Auch die Ausstattung mit Transportrollen ist ein wesentliches Element dieser Labore, sodass auch Gegenstände wie Tische und bodengebundene Instrumente flexibel bewegt werden können. Folglich kann das Labor kontinuierlich an etwaige Veränderungen adaptiert werden. Insofern stellt die Installation in älteren Räumen, die bereits mit einem manuellen Aufbau zu wenig Platz bieten, eine größere Herausforderung dar als die Einrichtung neuer Labore. Der HTR 7000 ist so konzipiert, dass er mit der modularen Bauweise und Rollen ausgestattet ist, um die Einbringung so unkompliziert und zugänglich wie möglich zu gestalten.

Die Hürden zusammengefasst:

- Skepsis gegenüber der Automatisierung in Unternehmen
 - Die Impression von Komplexität im Umgang mit der Automatisierung
 - Verifizierung der Ergebnisse vor der Investition
 - Konsistenz mit alten Messdaten
- Kosten des automatisierten Labors
 - Budgetgenehmigungszyklen, wechselnde Entscheidungsträger
- Platzbedarf automatisierter Systeme
- Spezifikation:
 - Ungewisser Probenbedarf in der Zukunft
 - Großes Probenspektrum vs. zunehmende Komplexität
 - Mit unterschiedlichen Probentypen in einem System steigen die Anforderungen, ein System kann nicht „alles“
 - Trimmen kann eine Hürde darstellen
 - Noch nicht umgesetzte rheologische Methoden werden gefordert

4.7 Schlussfolgerung

Potenzielle Kund*innen sind vermehrt mit Problemen wie hohen Personalkosten oder Personalfuktuation konfrontiert. Das hoch qualifizierte Personal soll präzises Daten auswerten und nicht die Zeit mit der Messdurchführung, Probenvorbereitung oder Reinigen verbringen. Der Trend geht in naher Zukunft dahin, dass Kund*innen der HTR 7000 Systeme mit reproduzierbaren und nachverfolgbaren Messdaten KI-Modelle trainieren wollen. Dadurch steigt der Bedarf an Messdaten. Hierfür wurde die HTR 7000 Plattform entwickelt.

Eine sinnngemäße Aussage eines/einer Kund*in: *„Durch die leichte Zugänglichkeit zu Messdaten durch die Automatisierung steigt der Bedarf merklich. Jeder der zu faul war zuvor zu Messen, aber eigentlich auf Daten angewiesen ist, hat nun die Möglichkeit dazu.“* Allein diese Aussage bestätigt, dass mit einem Automatisierten Labor, positive Effekte und eine Prozessverbesserung durch Automatisierung im Labor umgesetzt werden kann.

Identifizierte „Lean Effekte“ durch Laborautomatisierung welche den Prozess „schlanker machen:

- Verringerung von Verschwendung
 - Wartezeiten werden dermaßen verlängert, dass das Personal anderen Tätigkeiten nachgehen kann und nicht ständig abgehalten wird, oder tatsächlich vor dem Instrument wartet.
 - Transport und Bewegung wird auf einen Vorgang minimiert
 - Nicht genutztes Mitarbeiter*innen Know-how kann nun sinnvoll eingesetzt werden
 - Parallelisierung der Probenvorbereitungs- und Reinigungsprozesse
 - Fehler werden mit Adonboard visualisiert und sind dadurch schnell lösbar
- Standardisierung und Qualitätsverbesserung
 - Weniger Messfehler durch menschlichen Einfluss
 - Automatisierter Datentransfer
 - Automatisches Protokollieren von Trimm- und Reinigungsergebnissen
 - Standardisierte Templates und Arbeitsabläufe (Probenvorbereitung)
 - Qualitätsverbesserung durch mehr produzierte Daten
- Durchlaufzeit
 - Erhöhter Durchsatz: Durch eine 24 Stunden Auslastung der Systeme kann auch gemessen werden, wenn sonst kein Personal im Labor ist
 - Effizientere Abläufe:
 - Keine Wartezeiten nach Probenvorbereitung
 - Parallelisierte Abläufe
- Reduktion der Betriebskosten
 - Reduktion der Personalkosten
 - Fokus auf Wertschöpfende Tätigkeiten des Personals
- Personal Entlastung
 - Die Messung sowie das Messergebnis werden leichter zugänglich
 - Reduktion des Sicherheitsrisikos

- Reduktion von schwankender Arbeitslast
- Eliminierung von eintönigen Arbeiten

Dieses Resümee zeigt klar, dass eine Prozessverbesserung vorliegt. Dies gilt, sofern es gelingt die Hürden vor der Implementierung zu überwinden. Aus diesem Grund wird das USP, das automatisierte Trimmtool näher betrachtet. Für viele Abläufe steht und fällt die Umsetzung aufgrund der vorhandenen Trimmgrenzen. Es gilt im folgenden Kapitel 5 *Der Einfluss auf die Reproduzierbarkeit durch automatisiertes Trimmen* und dem Kapitel 6 *Ermittlung der Grenzen des automatisierten Trimmtools* noch näher auf die Prozessverbesserung der Messdaten durch die Automatisierung, sowie die vorliegenden Grenzen zu analysieren. Die Prozessverbesserung ist abhängig von dieser Funktion und wirkt sich sehr positiv, oder auch negativ auf das Gesamtergebnis aus.

5 DER EINFLUSS AUF DIE REPRODUZIERBARKEIT DURCH AUTOMATISIERTES TRIMMEN

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Analyse einer manuell getrimmten sowie einer automatisiert getrimmten Messreihe. Ziel ist die Darstellung des Einflusses auf die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Die Analyse der zusammenhängenden Standardabweichung dient der Quantifizierung des Einflusses des Trimmens auf das Messergebnis. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung soll die Frage erörtert werden, inwiefern sich die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei Messreihen derselben Probe verändert. Es bleibt zu klären, welcher konkrete Einfluss auf das rheologische Messergebnis resultiert, wenn das Trimmen im Prozess vollautomatisch anstatt manuell durchgeführt wird. Die Versuche werden am teilautomatisierten Versuchsaufbau des Rheometers mit dem automatisierten Trimmtool durchgeführt. Als "Standardpolymer" wird ein/eine Kund*innen Material verwendet.

Fragen die in diesem Kapitel beantwortet werden sollen:

- Wird die Reproduzierbarkeit durch automatisiertes Trimmen verbessert oder verschlechtert?
- Gibt es durch automatisiertes Trimmen Lean Effekte?

5.1 Das automatisierte Trimmtool

Das automatisierte Trimmtool besteht aus der Zustelleinheit (1), dem Trimmklingenhalter (2), der Rotationseinheit (3), der Vakuumplatte (4) und der austauschbaren Trimmklinge selbst (5), zu sehen in *Abb. 41*. Die Zustelleinheit (1) besteht aus einem Motor mit Spindel, welcher das Deckblech, das simultan auch die Kulisse selbst ist, vor und zurück bewegen kann. Mit dieser Kulisse wird der Trimmklingenhalter (2) von der Geometrie weggeschwenkt. Dies beschreibt die Neutralposition. Fährt die Zustelleinheit nach hinten, ist der Trimmklingenhalter in der Lage, durch die verbaute Blattfeder, die Trimmklinge mechanisch zu dem Geometriepaar zu schwenken. Im Trimmklingenhalter wird die Trimmklinge (5) mit Formschluss und gefederten Druckstücken fixiert, siehe *Abb. 40*. Nachdem die Zustelleinheit vom Trimmklingenhalter wegfährt und die Trimmklinge in die Probe eindringt, beginnt die Rotationseinheit, mit dem Schrittmotor im Unterbau, die Trimmklinge um die Geometrie zu bewegen. Nach einer Drehung von 400° wird die Zustelleinheit wieder in die Ausgangsposition gebracht, wodurch die Trimmklinge von der Geometrie entfernt wird. Die Überschneidung ist entscheidend für ein präzises Trimmergebnis, damit keine Rückstände hinterlassen werden. Die untere Messgeometrie selbst ist mittels Vakuums (4) fixiert, wobei diese Platte gleichzeitig als unteres Heizelement fungiert.

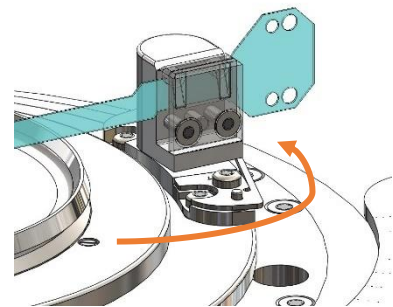


Abb. 40: Trimmklingenhalter (2) mit Blattfeder, mit transparent dargestellten Klemmelementen für die Trimmklinge, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Parameter Umdrehungsgeschwindigkeit und Umdrehungsanzahl können individuell in der Software angepasst werden. Jedoch ist für den Kund*innen nur die Einstellung der Umdrehungsanzahl, mit der Bedingung ≥ 1 , frei wählbar. Intern wurde die Geschwindigkeit auf $n = 6$ Umdrehungen/Minute als Standard

definiert, da damit zuvor das größte Probenspektrum abgedeckt werden konnte. Langsames Schneiden funktioniert sowohl für Proben wie Shampoo, als auch für niederviskose Polymerschmelzen.

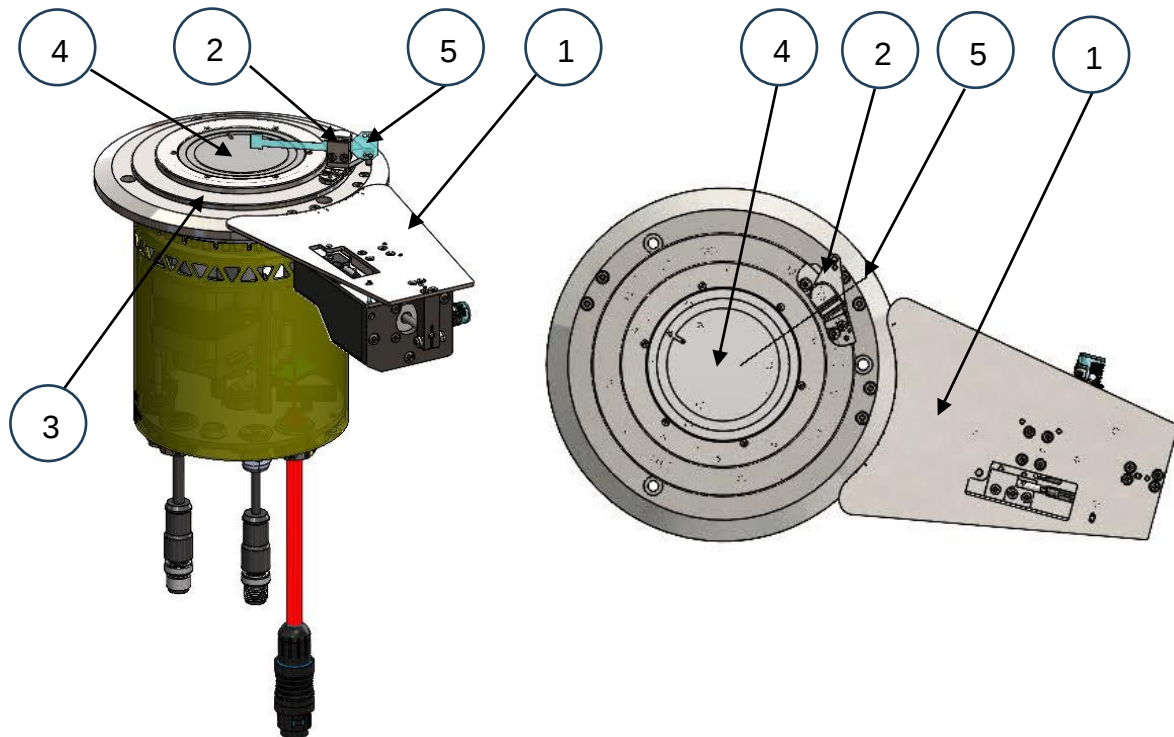


Abb. 41: Das automatisierte Trimmtool, links 3D-CAD Ansicht, rechts Draufsicht, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Trimmtool (7) ist als Modul aufgebaut, sodass es in den Standardflansch des MCR 702e für Optionen passt. In eingebauter Form ist das Trimmtool in Abb. 42 zu sehen. Die Rheometerbaugruppe ist auf einer Lade (10) montiert, welche nach Entriegelung eine 90°-Drehung des Rheometers erlaubt, mit der das MCR aus der HTR 7000 Zelle in eine Serviceposition gezogen werden kann. Aus diesem Grund befinden sich alle Leitungen und Kabel in einer Schleppkette (6). In der Darstellung ist auch der bewegliche MCR-Kopf (9) und das obere Temperierelement (8) zu sehen.

Der automatisierte Trimmablauf von Polymerschmelzen:

Im ersten Schritt wird das Rheometer mit einem sauberen Geometriepaar von dem 6-Achs-Roboter bestückt. Anschließend wird die Probe, in Form von zylindrisch ausgestanzten Scheiben, auf der unteren Geometrie platziert, das obere Messsystem auf 1 mm Abstand zur Probe gesenkt, die Temperierhaube geschlossen und das Messsystem auf die gewünschte Messtemperatur vorgeheizt. Ist die gewünschte Temperatur von beispielsweise 190°C erreicht, wird das Rheometer mit der oberen Geometrie, beispielsweise PP25, auf die Trimmposition bewegt. Diese Position ist 25 µm über dem eigentlichen Messspalt. Nach einer weiteren Wartezeit von 5 Minuten wird die Temperierhaube für eine homogene Probentemperatur angehoben. Das Trimmtool fährt auf die Startposition, taucht mit der Trimmklinge in die Probe ein und führt den Trimmvorgang mit der eingestellten Geschwindigkeit und Umdrehungsanzahl aus. Nach dem Trimmvorgang senkt sich die Haube und das Rheometer wird auf die Messposition mit dem definierten Messspalt gesenkt. Dies hat das Ziel, dass die Probe am Rand annähernd konvex ist und der Messspalt geringfügig überfüllt ist. Trimmen wird in dieser Arbeit der Probenvorbereitung zugeordnet, da dieser Schritt eine Vorbereitung zur eigentlichen Messung ist. Es ist zu vermeiden bei dem Trimmvorgang

Probe aus dem Messspalt zu ziehen. Fäden, andere Rückstände, die das Geometriepaar berühren, Blasen oder ein nicht vollständig gefüllter Messspalt beeinflussen das Messergebnis.

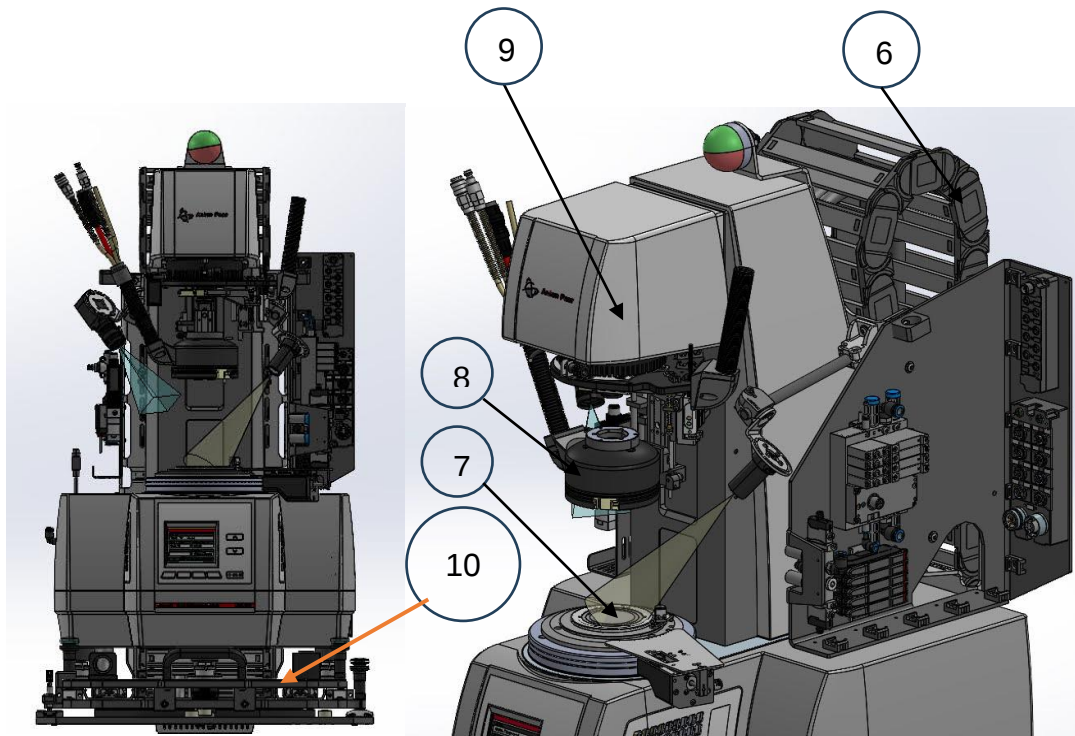


Abb. 42: Die Rheometer Baugruppe samt Trimmtool auf der rotierbaren MCR-Lade, Quelle: Eigene Darstellung.

Trimmklinge – IST-Stand

Die Trimmklinge besteht aus Federstahlblech mit einer Materialstärke von 0,3 mm. Der Grund für die dünne Blechstärke wurde durch den „anfedernden“ Effekt begründet. Dadurch wird die Klinge jedoch zum Einwegprodukt, da diese nach wenigen Einsätzen verbiegt und Anton Paar nur einen erfolgreichen Einsatz garantieren kann. Der Roboter greift die Klinge mittels Vakuumgreifer am Kopf (a) und den Orientierungspins (b). Durch den Absatz (c) und federnde Druckstücke im Trimmklingenhalter selbst wird die Klinge im Trimmtool nach dem Einlegen fixiert. Die Trimmklinge ist dargestellt in Abb. 43. Das Material wird durch die Spitze (d) entfernt.

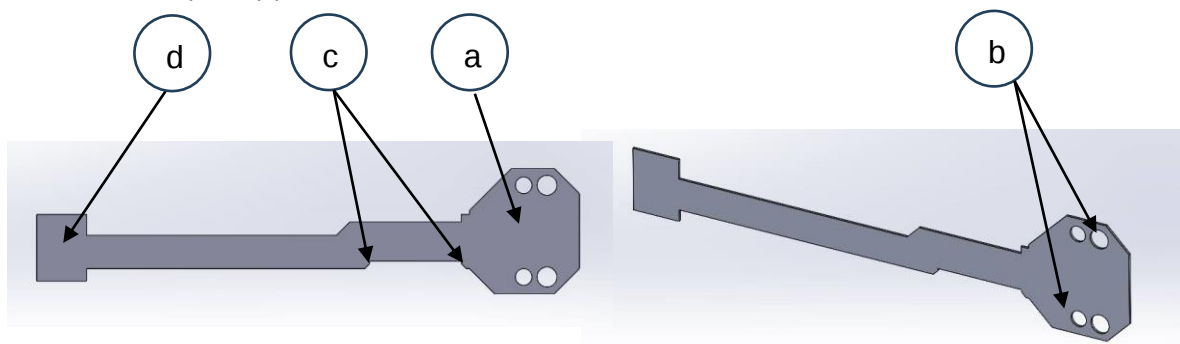


Abb. 43: Die Trimmklinge mit Orientierungspins (b) und Fixierungs-Absatz (c), Quelle: Eigene Darstellung.

Kreisfrequenz des Trimmtools

Das Trimmtool ist frei Parametrierbar. Jedoch haben sich im Laufe der Zeit drei verschiedene Trimmgeschwindigkeiten als „Standard“ etabliert. Bei der Analyse von Polymeren zeigt sich ein höheres Speicher-Modul G' und Verlust-Modul G'' bei höheren Frequenzen im oszillierenden Frequenztest. Auf dies wird auch in 2.4.1 näher eingegangen und erläutert. Somit ergibt sich im Umkehrschluss ein höherer Widerstand gegen das Trimmen bei höheren Trimmgeschwindigkeiten. Somit wird pauschal auf die aktuell niedrigste Standard-Trim-Geschwindigkeit zurückgegriffen. Theoretisch kann diese auch weiter gesenkt werden, jedoch wird bei dem Trimmvorgang, wie bereits oben erwähnt, die Probe dem Luftsauerstoff aus der Umgebung ausgesetzt. Das Polymer reagiert mit diesem und die Probe „altert“. Dies ist zu vermeiden und der Prozess sollte möglichst rasch von sich gehen, um die Probe wieder in die reine Stickstoffatmosphäre unter der Temperierhaube zu bringen.

Bei den in 2.4.1 Oszillationsversuche erläuterten Frequenz-Tests, werden die Materialparameter bei verschiedenen Frequenzen ermittelt. Ursprünglich bestand der Ansatz die Kreisfrequenz des Trimmtools zu berechnen, um bei einem definierten Messpunkt das Ergebnis und anschließend die Grenze der Trimmbarkeit ermitteln zu können. Dieser Zugang ist jedoch nicht umsetzbar. In den Oszillationsversuchen schwingt die obere Messgeometrie mit der vorgegebenen Frequenz in einer Sinusschwingung. Der zurückgelegte Weg ist jedoch nur die Amplitude, sprich die vorgegebene Dehnung. Diese kommt aus dem zuvor ermittelten LVE- Bereich. Das Trimmtool aber arbeitet mit einer, oder sogar einer Vielzahl von vollständigen Rotationen. Dies zeigt eine Hürde des Vergleichs auf.

Berechnung der betrachteten Kreisfrequenz:

Die aktuelle Umdrehungszahl des Trimmtools auf der Einstellung „Slow“ ist 10 s/Umdrehung.

Somit ist die Drehzahl n : 6 Umdrehungen/Minute

Daraus ergibt sich eine Frequenz f : $n/60 = 6/60 = 0,1 \text{ Hz}$

Die Kreisfrequenz ω für das Trimmtool lässt sich somit mit *Formel (2.3)* berechnen:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.3)$$

$$\omega = 2\pi * 0,1 \text{ Hz} = 0,2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 0,628 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Dies ist für die spätere Berechnung der Schergeschwindigkeit in *Unterabschnitt 6.3.5* relevant.

5.2 Aufbau für den Reproduzierbarkeitsvergleich

In diesem Kapitel werden die manuellen und automatisierten Versuchsbedingungen beschrieben und anschließend die Messreihen für den Vergleich der Reproduzierbarkeit durchgeführt.

Verwendete Mess-Geometrien

Als Messgeometriepaar wird das PP 25/HTR-Set aus Titan von Anton Paar verwendet.

Um potenzielle Einflüsse durch die Wahl des Geometriepaars auszuschließen, wird sowohl im manuellen als auch im automatisierten Aufbau dasselbe Messgeometriepaar verwendet. Dabei handelt es sich um die obere Messplatte mit der Seriennummer SN112894 und die untere Messplatte mit der Seriennummer SN115318-8018, siehe *Abb. 44*. Die untere



Abb. 44: Geometriepaar für automatisierte Rheometer, links: Proben in Form von Polymerscheiben, Mitte: obere Messgeometrie PP25, rechts: untere Messplatte PP25, Quelle: Eigene Darstellung.

Messplatte hat wie in Kapitel 2, Abschnitt

2.2, Unterabschnitt 2.2.2 beschrieben,

mechanische Anpassungen für die Bewegungsabläufe in der Automatisierung. PP25 wird einerseits meist von den Kund*innen selbst gefordert, wird aber zusätzlich für Polymerschmelzen bzw. für hochviskose und viskoelastische Materialien mit Partikeln $> 5 \mu\text{m}$ empfohlen.⁷⁸ Es sei angemerkt, dass das Trimmen auch im manuellen Ablauf durch den Absatz begünstigt wird.

Verwendete Hilfsmittel für die Versuche:

- Trimmklingen:
 - In den automatisierten Versuchen wird auf die Standardtrimmklinge zurückgegriffen, siehe *Abb. 43*.
- Handschuhe:
 - Da die Messgeometrien nach Abschluss des Messvorgangs noch eine Temperatur von 190°C aufweisen, ist die Verwendung hitzebeständiger Schutzhandschuhe erforderlich.
- Messing-Drahtbürste:
 - Für die Reinigung der Geometrien nach der Messung wird eine Drahtbürste verwendet. Die Reinigung findet unmittelbar nach der Messung im heißen Zustand der Geometriein statt.
- PC:
 - Auf dem PC wird die Software Rheo Compass benötigt. Darüber wird das MCR gesteuert und das Template, bzw. die Messung gestartet.
 - Für die automatisierten Versuche wird das Trimmtool über die Beckhoff-Visualisierung im Browser gesteuert

⁷⁸ Mezger (2012), S. 356.

- Spachtel:
 - Für das manuelle Trimmen kommt ein Trimm-Spatel der Firma Anton Paar zum Einsatz. Der Trimmvorgang erfolgt mithilfe der im zweiten Bild von links dargestellter geschärften Kante des Spatels in Abb. 45.



Abb. 45: Trimmspatel von Anton Paar für manuelles Trimmen, Quelle: Eigene Darstellung.

- Kamera+ Stativ:
 - Für Fotos und Videos des Trimmvorgangs und zur Dokumentation wird ein Smartphone inklusive Stativ verwendet.
- Rheometer:
 - MCR 702e
 - Beheizte Haube: H-ETD400
 - Beheizte Platte: P-ETD300
 - Integriertes automatisiertes Trimmtool
 - Stickstoff
 - Polymerproben müssen unter Stickstoffatmosphäre gemessen werden.
 - Die Haube wird mit einem Stickstoff-Durchfluss von 726 L_N/h geflutet

5.2.1 Die analysierte Probe

Bei der analysierten Probe handelt es sich um ein Standardpolymer eines/einer Kund*in. Dieses wird als repräsentativ angesehen, da es häufig in dem QC-Prozess der Kund*innen vermessen werden soll. Das genaue Polymer ist nicht bekannt, jedoch wird aufgrund der analysierten Daten davon ausgegangen, dass es sich um einen Polyethylen (PE) Kunststoff handelt. PE-Kunststoffe weisen eine amorphe Struktur auf. Die bereits ausgestanzten Polymerscheiben haben einen Durchmesser von 24,95 mm, (Toleranz $\pm 0,05$ mm) und eine Stärke von 1,6 mm, (Toleranz -0,05 mm, + 0,1 mm), siehe Abb. 46.

Die bereitgestellten Materialkennwerte durch die Kund*innen vor der Messdurchführung sind:

- MI/MFI: 0,82 Gramm/10 Minuten
- HLMI/HLMFI: 43,3 Gramm/10 Minuten
- Template: Frequenz-Sweep bei 190°C

Die benötigte Stichprobe:

Nach einer Reihe von Gesprächen mit Rheolog*innen von Kund*innen sowie drei firmeninternen Experten des Bereichs der Produktfachkompetenz Rheologie, dem Manager und zweier Teamkollegen, die über Expertise im Bereich Polymerrheologie verfügen, lässt sich ein repräsentatives Ergebnis hinsichtlich der Reproduzierbarkeit von rheologischen Messungen ab fünf Ergebnissen ableiten. Da die Automatisierung jedoch eine kontinuierliche Messung einer Vielzahl von Proben ermöglicht, wurde für die Untersuchung eine Losgröße von jeweils zehn Messungen für den manuellen und den automatisierten Ablauf gewählt.



Abb. 46: Proben-Discs mit Durchmesser 25 mm und Stärke von 1,6 mm, Kund*in Standard-Polymer, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.2 Prüfaufbau

Die Versuche werden am teilautomatisierten MCR 702 Versuchsaufbau durchgeführt. Der Aufbau ist in *Abb. 47* dargestellt. Links im Bild ist eine Detailansicht des Rheometers mit dem beweglichen Kopf (1), der automatisierten Haube (2), der Stickstoffflasche (3) im Hintergrund und dem Geometriepaar (4). Der Rheometerkopf verfügt über einen Hub von bis zu 200 mm, wobei die daran befestigte, mit Stickstoff durchflutete Haube (Durchflussrate: 760 L/h) synchron mitgeführt wird. Die Haube kann in jeder Position durch Betätigung des Knopfs (7) angehoben oder abgesenkt werden. Im rechten Bild sind das Stativ (5) für die Foto- und Videodokumentation, das Trimmtool (6) und der Knopf für die Vakuumplatte (8) für die untere Messplatte zu sehen. Die Kupplung der oberen Messgeometrie wird manuell bedient.



Abb. 47: Teilautomatisierter Prüfaufbau des Rheometers mit automatisiertem Trimmtool und automatisierter Haube, Quelle: Eigene Darstellung.

Rheo Compass Template für das MCR:

Das verwendete Template für die Messung besteht den Bausteinen zu sehen in Abb. 48. Im Vergleich zur Standardvorlage des Frequenz-Sweeps wurden zusätzliche Bausteine integriert. Diese beinhalten eine Wartezeit mit einer Temperaturstabilitätskontrolle von $\pm 0,03$ °C über ein Zeitfenster von 300 Sekunden, den Datenexport als .csv-Datei auf den PC sowie das automatische Anheben des MCR-Kopfes nach Abschluss der Messung. Das Template ist für beide Abläufe ident und wird, wie im Prozess in Abb. 49 zu sehen, erst nach dem Trimmen manuell gestartet.

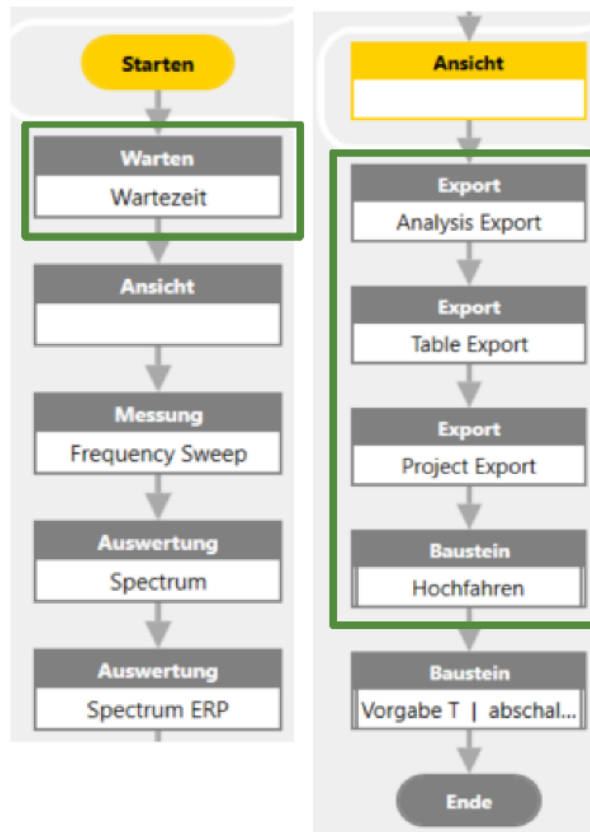


Abb. 48: Prozessablauf des Mess-Templates, Standard Frequenz-Sweep bei 190°C, Quelle: Eigene Darstellung.

5.2.3 Der Versuchsablauf

Der Prozess des Versuchs ist nachfolgend als Flussdiagramm in *Abb. 49* dargestellt. Die beiden Versuchsanordnungen unterscheiden sich ausschließlich hinsichtlich der Durchführung der Trimmung, die entweder manuell oder automatisiert erfolgt. Dieser Aspekt wird im Prozess unter der Fragestellung „Automatisierte Trimmung?“ abgefragt.

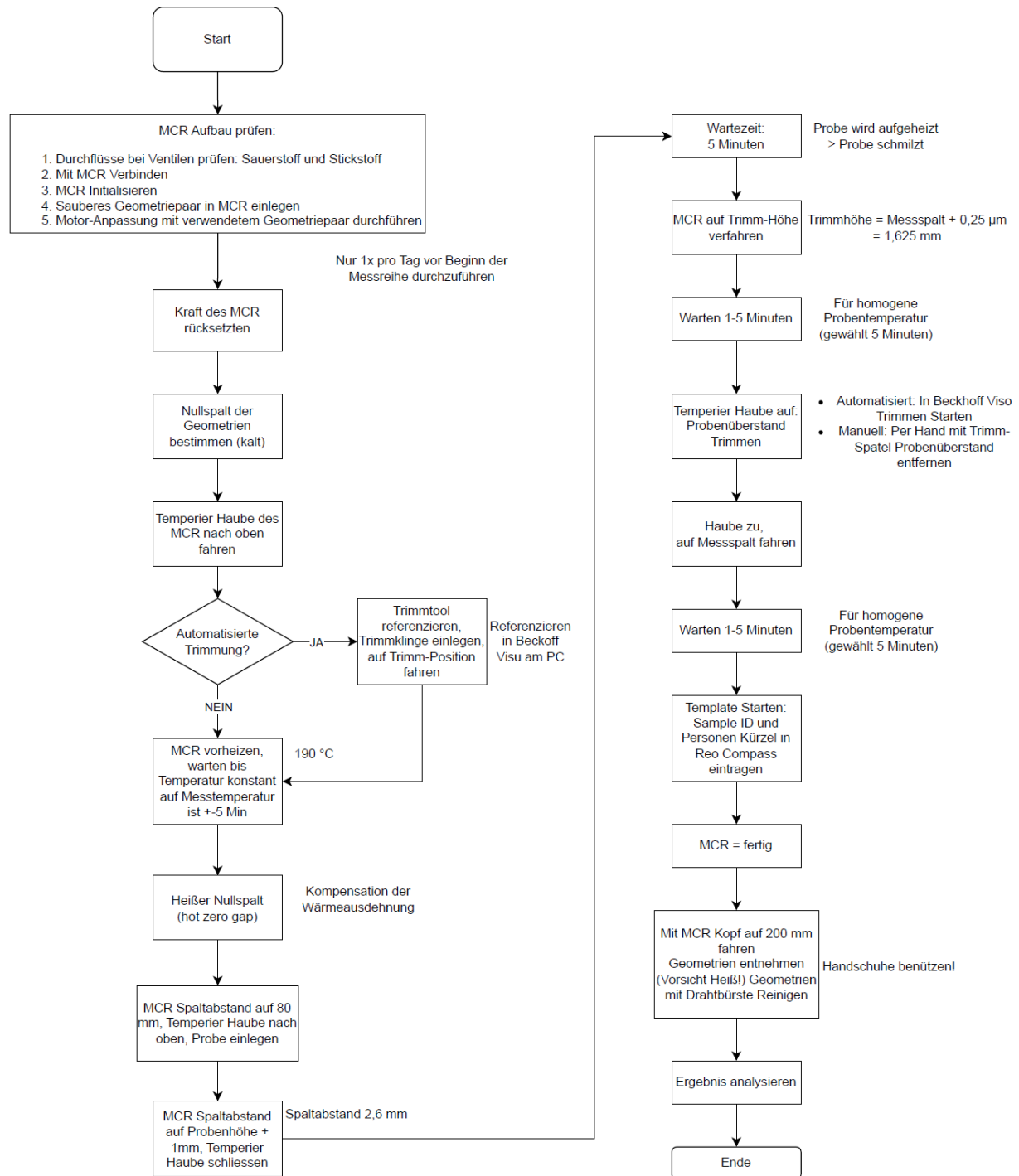


Abb. 49: Flussdiagramm des Versuchsablaufs der Reproduzierbarkeitsmessungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Beobachtungen und Notizen aus den Versuchen:

Der manuelle Spatel erwies sich als effektives Instrument zur Bearbeitung der Probe. Allerdings war eine wiederholte Justierung um den Geometriezylinder erforderlich, um ein präzises Resultat zu erzielen. In einigen Fällen wurde das getrimmte Material auf die obere Geometrie geschoben, sodass es dort wieder entfernt werden musste, was zu einem erhöhten Zeitaufwand führte. Des Weiteren ist festzustellen, dass die untere Messgeometrie im eigentlichen manuellen MCR-Setup eine durchgängige Platte ist. Das aus der Automatisierung stammende Geometriepaar stellt im manuellen Ablauf eine wesentliche Erleichterung für die Trimmung dar. Diese Variation wurde im Rahmen der Untersuchung jedoch homogenisiert, um potenzielle Einflussfaktoren auszuschließen.

Dauer des Versuchs und Expansionszeit manuell getrimmt:

Trimmdauer manuell											
Versuch ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Arithmetisches Mittel
Trimmdauer in Sekunden	43	30	25	20	30	31	34	35	30	22	30
Haube geöffnet in Sekunden	48	36	31	26	34	38	41	41	37	29	36,1

Tabelle 5: Übersicht der Dauer des Trimmvorgangs und der Dauer der geöffneten Haube-manuell, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Auflistung zeigt Trimmzeiten mit einer Spannweite von mindestens 20 Sekunden bis maximal 43 Sekunden. Die Varianz kommt von den oben angesprochenen Komplikationen. Teilweise war es erforderlich, Rückstände von der oberen Geometrie zu entfernen oder kleinere Unebenheiten nachträglich präzise nachzutrimmen. Es kann angenommen werden, dass ein erfahreneres Laborpersonal hier Zeiten im Mittelwert von unter 20 Sekunden erreichen kann.

Dauer des Versuchs und Expansionszeit automatisiert getrimmt:

Trimmdauer mit automatisiertem Trimmtool											
Versuch ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Arithmetisches Mittel
Trimmdauer in Sekunden	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Haube geöffnet in Sekunden	20	20	19	19	19	20	19	19	18	20	19,3

Tabelle 6: Übersicht der Dauer des Trimmvorgangs und der Dauer der geöffneten Haube-automatisiert, Quelle: Eigene Darstellung.

Entgegen den Erwartungen zeigen die Zeiten des automatisierten Versuchs eine konstante Dauer. Die Trimmdauer wird dabei durch das Trimmtool festgelegt. In diesem Versuch bleibt jedoch die Öffnungszeit der Haube weiterhin durch den Bediener beeinflusst.

Der Vergleich der beiden Expansionszeiten zeigt, dass in diesem Versuch das manuelle Trimmen 273% länger dauert, im Mittelwert um 29 Sekunden länger. Dies führt dazu, dass die Probe durchschnittlich 16,8 Sekunden länger dem Luftsauerstoff ausgesetzt bleibt, was einer Zunahme von 187 % entspricht.

Methode	Automatisiert	Manuell	Prozent Unterschied
Parameter	Arithmetisches Mittel	Arithmetisches Mittel	
Trimmdauer in Sekunden	11	30	273%
Haube geöffnet in Sekunden	19,3	36,1	187%

Tabelle 7: Vergleich der Dauer des Trimmvorgangs und der Dauer der geöffneten Haube, automatisiert und manuell, Quelle: Eigene Darstellung.

Beispiele der Trimmergebnisse folgen in den unteren Abbildungen. Das manuelle Ergebnis aus *Abb. 50* weist teils Inhomogenitäten im Trimmbild auf, kann jedoch als zufriedenstellend bewertet werden. Zur vollständigen Dokumentation findet sich in *Abb. 51* das Ergebnis vor dem Trimmen bzw. der Zustand der Messung ohne Probentrimmung.



Abb. 50: Trimmergebnis nach manueller Trimmung, die getrimmte Probe liegt auf der unteren Messgeometrie, Quelle: Eigene Darstellung.

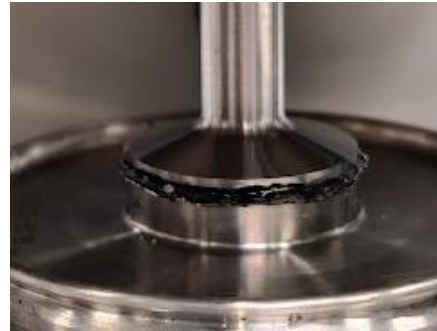


Abb. 51: Geometriepaar mit Polymerschmelze auf Trimmspalt, Versuch ohne Trimmen, Quelle: Eigene Darstellung.

Optisch bewertet sind die Ergebnisse des automatisierten Trimmtools, *Abb. 52* und *Abb. 53* konsistenter. Bei dieser Probe blieb der getrimmte Rückstand an der Trimmklinge haften. Verschmutzungen der oberen Messgeometrie durch getrimmte Probenrückstände konnten nicht beobachtet werden.

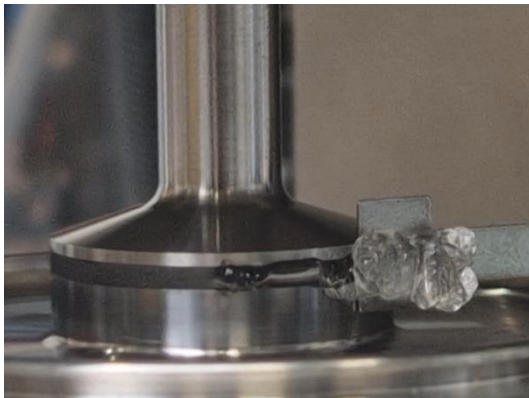


Abb. 52: Standbild während eines automatisierten Trimmvorgangs, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. 53: Vollendete automatisierte Trimmung, die entfernte Probe haftet auf der Trimmklinge, Quelle: Eigene Darstellung.

5.3 Datenanalyse

Die erfassten Daten wurden aus der Rheo Compass Software exportiert und anschließend mithilfe von Excel analysiert. Im Rahmen der Untersuchung wurde ein besonderes Augenmerk auf das Speichermodul G' , siehe *Tabelle 8*, sowie das Verlustmodul G'' , siehe *Tabelle 9*, gelegt. Für jeden Datensatz und jeden Messpunkt wurden aus den zehn Messungen der MIN- und MAX-Wert bzw. das arithmetische Mittel ermittelt. Des Weiteren wurde die Abweichung, das Toleranzband, in Prozent aus dem MIN- und MAX-Wert ermittelt. Im Anschluss erfolgt ein Vergleich dieser Standardabweichung aus den manuell getrimmten und den automatisiert getrimmten Daten. Zusätzlich wurde eine Probe ohne jegliches Trimmen vermessen, um eine etwaige Verfälschung des Ergebnisses besser beurteilen zu können.

Die aufbereiteten Rohdaten des Speichermoduls G' wie folgt:

Rohdaten												
		Manuell getrimmt Speichermodul G'					Automatisiert getrimmt Speichermodul G'					ungetrimmt Speichermodul G'
Rohdaten	Kreisfrequenz	Maximalwert	Minimalwert	Mittelwert	Speichermodul $G'_{\%}$ ABW MAX/MIN	Standardabweichung	Maximalwert	Minimalwert	Mittelwert	Speichermodul $G'_{\%}$ ABW MAX/MIN	Standardabweichung	Speichermodul G'
Messpunkt	rad/s	Pa	Pa	Pa	%		Pa	Pa	Pa	%		Pa
1	0,0	405,9	346,9	374,1	14,54%	16,64	406,1	366,5	379,5	9,75%	10,5	433,4
2	0,1	610,2	542,1	576,4	11,16%	18,57	599,2	570,1	577,9	4,86%	8,1	664,0
3	0,1	925,1	840,6	887,2	9,13%	22,95	905,8	873,0	885,6	3,62%	9,9	1.022,0
4	0,2	1.406,0	1.296,0	1.359,8	7,82%	30,18	1.378,0	1.338,0	1.355,3	2,90%	14,8	1.566,0
5	0,3	2.128,0	1.984,0	2.070,0	6,77%	40,76	2.102,0	2.032,0	2.062,3	3,33%	23,3	2.387,0
6	0,6	3.201,0	3.007,0	3.124,6	6,06%	55,53	3.179,0	3.065,0	3.114,1	3,59%	36,3	3.608,0
7	1,0	4.776,0	4.515,0	4.673,0	5,46%	77,34	4.759,0	4.582,0	4.659,8	3,72%	54,2	5.403,0
8	1,8	7.064,0	6.708,0	6.922,9	5,04%	106,13	7.058,0	6.790,0	6.909,2	3,80%	81,6	8.021,0
9	3,2	10.350,0	9.870,0	10.161,0	4,64%	150,22	10.370,0	9.969,0	10.147,9	3,87%	120,7	11.780,0
10	5,6	15.030,0	14.370,0	14.767,0	4,39%	206,72	15.080,0	14.510,0	14.761,0	3,78%	171,2	17.140,0
11	10,0	21.610,0	20.710,0	21.251,0	4,16%	281,92	21.700,0	20.890,0	21.261,0	3,73%	249,2	24.680,0
12	17,8	30.740,0	29.520,0	30.240,0	3,97%	402,19	30.880,0	29.740,0	30.266,0	3,69%	349,7	35.140,0
13	31,6	43.210,0	41.580,0	42.524,0	3,77%	569,80	43.410,0	41.820,0	42.567,0	3,66%	487,1	49.420,0
14	56,2	59.910,0	57.730,0	58.983,0	3,64%	754,53	60.200,0	58.070,0	59.074,0	3,54%	668,5	68.530,0
15	99,9	81.830,0	79.030,0	80.600,0	3,42%	969,20	82.210,0	79.410,0	80.749,0	3,41%	921,7	93.690,0
16	177,7	110.000,0	106.500,0	108.330,0	3,18%	1.267,59	110.300,0	106.600,0	108.410,0	3,35%	1.187,4	126.000,0
17	316,0	145.500,0	139.800,0	142.750,0	3,92%	1.802,01	144.800,0	140.200,0	142.430,0	3,18%	1.537,0	166.500,0

Tabelle 8: Die aufbereiteten Rohdaten des Speichermoduls G' , Quelle: Eigene Darstellung.

Die aufbereiteten Rohdaten des Verlustmoduls G'' wie folgt:

Rohdaten												
		Manuell getrimmt Verlustmodul G''					Automatisiert getrimmt Verlustmodul G''					ungetrimmt Verlustmodul G''
Kreisfrequenz		Maximalwert	Minimalwert	Mittelwert	Verlustmodul $G''_{\%}$ ABW MAX/MIN	Standardabweichung	Maximalwert	Minimalwert	Mittelwert	Verlustmodul $G''_{\%}$ ABW MAX/MIN	Standardabweichung	Verlustmodul G''
Messpunkt	rad/s	Pa	Pa	Pa	%		Pa	Pa	Pa	%		Pa
1	0,0	733,3	699,5	720,4	4,61%	9,92	732,0	705,0	715,5	3,69%	8,1	829,8
2	0,1	1.105,0	1.053,0	1.084,4	4,71%	15,66	1.104,0	1.061,0	1.078,4	3,89%	12,6	1.251,0
3	0,1	1.641,0	1.565,0	1.611,3	4,63%	23,07	1.642,0	1.578,0	1.604,6	3,90%	19,2	1.862,0
4	0,2	2.406,0	2.301,0	2.365,6	4,36%	32,49	2.412,0	2.319,0	2.359,1	3,86%	28,0	2.737,0
5	0,3	3.491,0	3.346,0	3.434,1	4,15%	46,41	3.504,0	3.370,0	3.428,4	3,82%	40,4	3.978,0
6	0,6	5.012,0	4.812,0	4.931,5	3,99%	64,49	5.035,0	4.843,0	4.928,5	3,81%	57,8	5.718,0
7	1,0	7.117,0	6.844,0	7.005,1	3,84%	91,48	7.156,0	6.884,0	7.006,8	3,80%	81,4	8.128,0
8	1,8	9.999,0	9.627,0	9.844,3	3,72%	124,52	10.060,0	9.684,0	9.855,6	3,74%	114,8	11.430,0
9	3,2	13.890,0	13.390,0	13.682,0	3,60%	176,69	13.980,0	13.460,0	13.704,0	3,72%	160,2	15.890,0
10	5,6	19.070,0	18.400,0	18.789,0	3,51%	233,35	19.210,0	18.500,0	18.832,0	3,70%	220,0	21.830,0
11	10,0	25.850,0	24.950,0	25.473,0	3,48%	309,52	26.050,0	25.100,0	25.549,0	3,65%	301,9	29.600,0
12	17,8	34.550,0	33.370,0	34.052,0	3,42%	421,08	34.820,0	33.540,0	34.156,0	3,68%	402,5	39.560,0
13	31,6	45.460,0	43.960,0	44.829,0	3,30%	569,84	45.840,0	44.150,0	44.968,0	3,69%	529,1	52.060,0
14	56,2	58.880,0	56.920,0	58.041,0	3,33%	709,45	59.380,0	57.200,0	58.249,0	3,67%	680,3	67.360,0
15	99,9	74.970,0	72.450,0	73.852,0	3,36%	855,96	75.600,0	72.850,0	74.173,0	3,64%	893,5	85.730,0
16	177,7	93.700,0	90.510,0	92.210,0	3,40%	1.063,08	94.310,0	90.940,0	92.660,0	3,57%	1.134,3	107.100,0
17	316,0	114.300,0	110.100,0	112.180,0	3,67%	1.479,34	114.100,0	110.100,0	112.730,0	3,51%	1.340,9	130.500,0

Tabelle 9: Die aufbereiteten Rohdaten des Verlustmoduls G'' , Quelle: Eigene Darstellung.

Die Ergebnisse des prozentuellen Toleranzfeldes des Minimal- und Maximalwerts in % werden nachfolgend jeweils vom Verlustmodul G'' und Speichermodul G' aus der manuellen Messung und der automatisierten Messung gegenübergestellt:

		Manuell	Automatisiert	Differenz	Manuell	Automatisiert	Differenz
Messpunkt	Kreisfrequenz	Speichermodul G' Abw. In % (max-min)	Speichermodul G' Abw. In % (max-min)		Verlustmodul G'' Abw. In % (max-min)	Verlustmodul G'' Abw. In % (max-min)	
Einheit	rad/s	%	%	%	%	%	%
1	0,0316	14,54%	9,75%	4,78%	4,61%	3,69%	0,92%
2	0,0562	11,16%	4,86%	6,30%	4,71%	3,89%	0,81%
3	0,0999	9,13%	3,62%	5,51%	4,63%	3,90%	0,73%
4	0,1777	7,82%	2,90%	4,92%	4,36%	3,86%	0,51%
5	0,3160	6,77%	3,33%	3,44%	4,15%	3,82%	0,33%
6	0,5619	6,06%	3,59%	2,47%	3,99%	3,81%	0,18%
7	0,9993	5,46%	3,72%	1,75%	3,84%	3,80%	0,03%
8	1,7770	5,04%	3,80%	1,24%	3,72%	3,74%	-0,02%
9	3,1600	4,64%	3,87%	0,77%	3,60%	3,72%	-0,12%
10	5,6190	4,39%	3,78%	0,61%	3,51%	3,70%	-0,18%
11	9,9930	4,16%	3,73%	0,43%	3,48%	3,65%	-0,17%
12	17,7700	3,97%	3,69%	0,28%	3,42%	3,68%	-0,26%
13	31,6000	3,77%	3,66%	0,11%	3,30%	3,69%	-0,39%
14	56,1900	3,64%	3,54%	0,10%	3,33%	3,67%	-0,34%
15	99,9300	3,42%	3,41%	0,02%	3,36%	3,64%	-0,28%
16	177,7000	3,18%	3,35%	-0,17%	3,40%	3,57%	-0,17%
17	316,0000	3,92%	3,18%	0,74%	3,67%	3,51%	0,17%
min:		3,18%	2,90%	-0,17%	3,30%	3,51%	-0,39%
max:		14,54%	9,75%	6,30%	4,71%	3,90%	0,92%
Mittelwert		5,95%	3,99%	1,96%	3,83%	3,73%	0,10%

Tabelle 10: Gegenüberstellung des Toleranzfeldes des Verlust- und Speichermoduls aus manuellem und automatisiertem trimmen, Quelle: Eigene Darstellung.

Zu Tabelle 10: Die Messpunkte, in denen das Toleranzfeld der automatisiert getrimmten Probe kleiner ist, ist in der automatisierten Farbe eingefärbt (hellrot). Ist der Wert negativ, ist die manuelle Messung besser (blau) eingefärbt. Die Hohe Abweichung beider Messungen in den ersten beiden Messpunkten ist auf die niedrige Kreisfrequenz zurückzuführen. Es zeigt sich, dass im (arithmetischen) Mittelwert für beide Parameter die automatisierte Trimmung konstantere Werte liefert. Interessant ist, dass das Verlustmodul im Frequenzbereich von 1,77 rad/s bis 177,7 rad/s marginal besser ist. Für diesen Frequenzbereich ist somit der viskose Anteil der Probe mit der manuellen Trimmung reproduzierbarer. Über das gesamte Frequenzband schneidet das automatisierte Trimmtool jedoch besser ab. Beim Verlustmodul beträgt die Verbesserung jedoch nur 0,1 %, was als nicht signifikant einzustufen ist. Im Gegensatz dazu weist das Speichermodul eine Reproduzierbarkeit von 1,96 % auf, was zwar ein geringer Wert ist, jedoch rheologisch signifikant.

Die Ergebnisse der Standardabweichung in Pa für das Verlustmodul G'' und das Speichermodul G' werden im Folgenden für die manuelle und die automatisierte Messung gegenübergestellt:

Messpunkt	Kreisfrequenz	Manuell	Automatisiert	Differenz	Manuell	Automatisiert	Differenz
		Standard- abweichung G'	Standard- abweichung G'		Standard- abweichung G''	Standard- abweichung G''	
Einheit	rad/s	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
1	0,0316	16,64	10,5	- 6,11	9,92	8,1	- 1,80
2	0,0562	18,57	8,1	- 10,44	15,66	12,6	- 3,02
3	0,0999	22,95	9,9	- 13,07	23,07	19,2	- 3,83
4	0,1777	30,18	14,8	- 15,39	32,49	28,0	- 4,46
5	0,3160	40,76	23,3	- 17,47	46,41	40,4	- 6,04
6	0,5619	55,53	36,3	- 19,21	64,49	57,8	- 6,69
7	0,9993	77,34	54,2	- 23,12	91,48	81,4	- 10,03
8	1,7770	106,13	81,6	- 24,58	124,52	114,8	- 9,69
9	3,1600	150,22	120,7	- 29,52	176,69	160,2	- 16,53
10	5,6190	206,72	171,2	- 35,55	233,35	220,0	- 13,36
11	9,9930	281,92	249,2	- 32,67	309,52	301,9	- 7,62
12	17,7700	402,19	349,7	- 52,52	421,08	402,5	- 18,61
13	31,6000	569,80	487,1	- 82,72	569,84	529,1	- 40,72
14	56,1900	754,53	668,5	- 86,06	709,45	680,3	- 29,17
15	99,9300	969,20	921,7	- 47,51	855,96	893,5	37,51
16	177,7000	1.267,59	1.187,4	- 80,20	1.063,08	1.134,3	71,24
17	316,0000	1.802,01	1.537,0	- 265,02	1.479,34	1.340,9	- 138,49
min:		16,64	8,13	- 265,02	9,92	8,13	- 138,49
max:		1.802,01	1.536,99	- 6,11	1.479,34	1.340,85	71,24
Mittelwert		398,37	348,89	- 49,48	366,26	354,41	- 11,84

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Standardabweichung des Verlust- und Speichermoduls aus manuellem und automatisiertem Trimmen in Pa, Quelle: Eigene Darstellung.

Zu Tabelle 11: Die Standardabweichung zeigt ein ähnliches Bild im Vergleich zu *Tabelle 10*, ist allerdings statistisch aussagekräftiger. In den Messpunkten, in denen die Standardabweichung der automatisiert getrimmten Probe kleiner ist, ist der Wert negativ und in der automatisierten Farbe eingefärbt (hellrot). Ist der Wert positiv, ist die manuelle Messung besser (blau) eingefärbt. Da hier nicht die Maximal- und Minimalausschläge der Messpunkte, sondern das gesamte Messfeld in Betracht gezogen wird, ist der Wert der Standardabweichung für jeden Frequenzpunkt aussagekräftiger. Die automatisierten Trimmergebnisse zeigen insgesamt eine höhere Konstanz. Insbesondere im Fall des Verlustmoduls weisen die Messpunkte bei $\omega=99,93$ rad/s und $\omega=177,77$ rad/s eine höhere Reproduzierbarkeit auf. Für alle anderen Messpunkte ist die Standardabweichung des automatisierten Trimmtools geringer, somit besser. Auch der Mittelwert des Speichermoduls der gesamten Standardabweichung ist mit 398,37 Pa für das Trimmtool um 49,48 Pa besser als aus der manuellen Trimmung. Für das Verlustmodul ist die Standardabweichung des Trimmtools mit 366,26 Pa geringer als die des Speichermoduls und zudem um 11,84 Pa besser als das korrelierende manuelle Ergebnis.

In einem letzten Schritt erfolgt ein Vergleich der automatisiert getrimmten Messdaten mit den ungetrimmten Daten. Da bei der Messung ohne Trimmen lediglich ein Messwert vorliegt, erfolgt ein Vergleich des Mittelwerts bzw. der Prozentabweichung zwischen dem automatisierten und dem ungetrimmten Ergebnis, sofern das automatisierte Ergebnis als Nulllinie herangezogen wird. In Bezug auf die ungetrimmte Probe ist festzuhalten, dass der Mittelwert gleichzeitig der einzige Messpunkt ist.

		Automatisiert	ungetrimmt	Differenz	Automatisiert	ungetrimmt	Differenz
Messpunkt	Kreisfrequenz	Speichermodul G'_Mittelwert	Speichermodul G'_Mittelwert		Verlustmodul G''_Mittelwert	Verlustmodul G''_Mittelwert	
Einheit	rad/s	Pa	Pa		Pa	Pa	
1	0,0	379,5	433,4	12,43%	715,5	829,8	13,78%
2	0,1	577,9	664,0	12,97%	1.078,4	1.251,0	13,80%
3	0,1	885,6	1.022,0	13,35%	1.604,6	1.862,0	13,82%
4	0,2	1.355,3	1.566,0	13,45%	2.359,1	2.737,0	13,81%
5	0,3	2.062,3	2.387,0	13,60%	3.428,4	3.978,0	13,82%
6	0,6	3.114,1	3.608,0	13,69%	4.928,5	5.718,0	13,81%
7	1,0	4.659,8	5.403,0	13,76%	7.006,8	8.128,0	13,79%
8	1,8	6.909,2	8.021,0	13,86%	9.855,6	11.430,0	13,77%
9	3,2	10.147,9	11.780,0	13,85%	13.704,0	15.890,0	13,76%
10	5,6	14.761,0	17.140,0	13,88%	18.832,0	21.830,0	13,73%
11	10,0	21.261,0	24.680,0	13,85%	25.549,0	29.600,0	13,69%
12	17,8	30.266,0	35.140,0	13,87%	34.156,0	39.560,0	13,66%
13	31,6	42.567,0	49.420,0	13,87%	44.968,0	52.060,0	13,62%
14	56,2	59.074,0	68.530,0	13,80%	58.249,0	67.360,0	13,53%
15	99,9	80.749,0	93.690,0	13,81%	74.173,0	85.730,0	13,48%
16	177,7	108.410,0	126.000,0	13,96%	92.660,0	107.100,0	13,48%
17	316,0	142.430,0	166.500,0	14,46%	112.730,0	130.500,0	13,62%
	min:	379,53	433,40	12,43%	715,47	829,80	13,48%
	max:	142.430,00	166.500,00	14,46%	112.730,00	130.500,00	13,82%
	Mittelwert	31.153,50	36.234,38	13,67%	29.764,58	34.444,93	13,70%

Tabelle 12: Vergleich des Arithmetischen Mittels der automatisiert getrimmten Messung und einer Messung ohne Trimmen, Quelle: Eigene Darstellung.

Zu *Tabelle 12*: Das Ergebnis ist eindeutig. Die Messergebnisse der ungetrimmten Probe liegen über den gesamten Frequenzbereich konsistent um 12,43 % bis 14,46 % über den Messwerten der korrekt getrimmten Probe. Dies führt bei dieser Untersuchung zu einer systematischen Messabweichung von durchschnittlich +13,67 % für das Speichermodul und +13,7 % für das Verlustmodul. Diese deutliche Abweichung unterstreicht den signifikanten Einfluss des Probenrandes auf die Messung und bestätigt die essenzielle Bedeutung eines präzisen und korrekten Trimmprozesses.

5.4 Schlussfolgerung

Die durchgeführte Untersuchung der Probe hat eine marginale Reduktion der Standardabweichung sowie eine Verringerung der MIN- und MAX-Werte ergeben. Die Resultate legen nahe, dass das automatisierte Trimmen einen positiven Einfluss auf die statistische Streuung der Messwerte ausübt. Die Relevanz des Trimmens wurde durch zusätzliche Versuche ohne jegliche Trimmung bestätigt, was die Bedeutung dieser Methode zur Optimierung der Datenqualität hervorhebt. Zusätzlich muss gesagt werden, dass das erzielte Ergebnis für rheologische Messdaten sowohl für das manuelle als auch für die automatisierte Trimmung ausgesprochen gut ist. In der Versuchsbeschreibung wurde erwähnt, dass durch die Verwendung derselben Messgeometrie versucht wird einen Messunterschied auszuschließen. Jedoch wird nun vermutet, dass das Geometriepaar der Automatisierung durch den Absatz das manuelle Trimmen erleichtert und verbessert. Somit sollte dies in Zukunft in den manuellen Aufbauten zum Standard werden. In der Praxis wird ein Toleranzband von $\pm 3\%$ als gut anerkannt. Derzeit werden Abweichungen von $\pm 5\%$ für Polymere mit einer Viskosität von $60.000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ bis hin zu $\pm 10\%$ oder mehr für Proben aus der Petrochemie aus manuellem Trimmen beobachtet. Der Einfluss des Parameters Viskosität und G^* auf die Reproduzierbarkeit wurde erst gegen Ende der Arbeit bewusst und konnte somit nicht mehr berücksichtigt werden.

In künftigen Untersuchungen könnte der Fokus auf die Analyse einer Probe mit höherer Viskosität, beispielsweise $70.000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, gelegt werden, um die Auswirkung der Viskosität auf die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse weiter zu erforschen. Eine derartige Erweiterung der Studie würde eine bessere Evaluierung der gewonnenen Ergebnisse im Kontext der Viskosität der Probe ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit wurde dieser Aspekt jedoch nicht berücksichtigt, da nicht genügend Material für eine viskosere Probe zur Verfügung stand. Des Weiteren erforderte die vollständige Messreihe eine Bearbeitungszeit von etwa 40 Stunden. Durch den Einsatz eines HTR 7000 könnte die benötigte Zeit auf etwa 26 Stunden reduziert werden, da in diesem Fall lediglich die manuellen Schritte wie das Beladen des HTR 7000 sowie die anschließende Auswertung und Analyse erforderlich wären. Im Gegensatz dazu müssten bei den manuellen Versuchen 10 Messungen mit manueller Trimmung und 10 Messungen mit automatisierter Trimmung jeweils manuell betreut werden.

Die genannten Einschränkungen verdeutlichen den hohen zeitlichen und materiellen Aufwand der Studie und liefern wesentliche Anhaltspunkte für künftige, methodisch verfeinerte Untersuchungen.

Prozessverbesserung und Lean Effekte durch automatisiertes Trimmen:

Innerhalb der Lean-Thematik kann das Trimmen als eine Art kleinerer Messfehler bzw. Messung ohne den Varianzfaktor "Mensch" bezeichnet werden. Des Weiteren ist der Prozess aufgrund der konstanten Dauer des Trimmens und der Haubenöffnung als konstant zu bezeichnen, Mura wird ausgeschlossen. Infolgedessen erfolgt eine kürzere Exposition der Probe gegenüber dem Luftsauerstoff, was insbesondere bei reaktiven Proben von großem Vorteil ist.

- Standard kann eingeführt werden: immer gleich
 - Reproduzierbarkeit
 - Gleiche oder bessere Ergebnisse
- Prozessverbesserung durch schnelleren und konstanten Ablauf:

- Eliminierung von Mura -> Prozess mit gleichem Takt
- Zeit, die die Probe dem Luftsauerstoff exponiert ist, wird drastisch reduziert
 - Kritisch bei reaktiven Materialien
- Keine Zeit und Anwesenheit am Messgerät erforderlich
- Automatisiertes Trimmen ermöglicht erst die Automatisierung von Proben, die getrimmt werden müssen
- Ergebnis wird automatisch protokolliert
 - Durch Kamera ist ohne Mehraufwand jede Messung nachverfolgbar und sauber dokumentiert

Ein Blick auf die Konkurrenz:

Das Unternehmen TA Instruments hat eine eigenständige Trimmlösung für Polymerproben entwickelt. Ein Vergleich ist an dieser Stelle nicht möglich, da auf dieses System nicht zurückgegriffen werden kann. Eine optische Begutachtung des öffentlich verfügbaren Videomaterials zeigt, dass der Querschnitt der Geometrien nach dem Trimmvorgang keine klare und definierte Struktur aufweist. Es lassen sich Einschlüsse sowie eine inhomogene Fläche beobachten. Diese Beobachtung lässt auf ein fehlerbehaftetes Trimmergebnis schließen, auch wenn mit einer Verbesserung um den Faktor 5 geworben wird. Eine vergleichbare Messung kann anhand der vorliegenden Daten nicht durchgeführt werden. Eine Analyse der Trimmergebnisse des Trimmtools von Anton Paar zeigt, dass der beworbene Faktor nicht nachvollziehbar ist. Selbst eine niederviskose, ungetrimmte Polymerprobe zeigt eine Messabweichung von lediglich 18,7 %. Es sei jedoch ein Vorteil des Systems angemerkt: Das System ermöglicht die Messung sowie die automatisierte Trimmung von Polymer-Pellets. In einem HTR 7000-System ist die Automatisierung von Polymeren lediglich in Form von vorgestanzten Scheiben möglich. Der Vergleich ist in der nachfolgenden Gegenüberstellung, siehe *Abb. 54* und *Abb. 55*, dargestellt. Die Abbildung zeigt das Trimmergebnis von TA (links) sowie das Resultat der Analyse mit dem Anton Paar Trimmtool (rechts).



Abb. 54: Trimmvorrichtung des Unternehmens TA, Quelle: Internet-Quelle: TA, YouTube Sekunde 68.

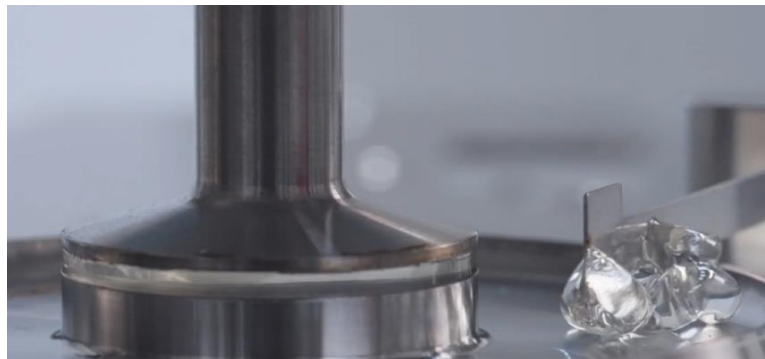


Abb. 55: Trimmtool von Anton Paar, Ergebnis einer Polymerschmelz-Trimmung, Quelle: Internet-Quelle: Anton Paar GmbH.

6 ERMITTLUNG DER GRENZEN DES AUTOMATISIERTEN TRIMMTOOLS

Die Ausgangssituation, die dieser Arbeit zugrunde liegt, besteht darin, dass für jeden/jede Kund*in regelmäßig automatisierte Trimmtests durchgeführt werden müssen, um die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Automatisierung sicherzustellen. Dabei zeigt sich, dass es immer wieder Proben gibt, die sich nicht trimmbar erweisen. Diese stammen zumeist aus dem Bereich der Polymere. Das vorliegende Kapitel hat zum Ziel, folgende Fragen zu beantworten:

- Was sind die Grenzen des automatisierten Trimmtools?
- Gibt es einen rheologischen Parameter, der von Kund*innen selbst mittels eines Rheometers und manuellem trimmen bestimmt werden kann, der die trimmbare Grenze beschreibt?
- Wie könnte das Trimmtool verbessert werden, um das mögliche Spektrum zu erweitern?

6.1 Theoretische Gedanken zum Ablauf - Ausgangssituation

Der Ablauf des Trimmtools wurde bei Proben die trimmbar und denen die nicht möglich sind, beobachtet. Folgende Grenzen und Erfahrungen konnten daraus gewonnen werden:

Das Trimmtool hat folgende Prozessschrittkette:

1. Trimmprozess Start
2. Haube öffnet sich
3. Trimmklinge fährt auf Startposition
4. Zustelleinheit fährt nach hinten → Trimmklinge taucht in die Probe ein
 - a. Rein mechanische Zustellung mittels Blattfeder
5. Trimmprozess in der Probe wird mit $\omega_{\text{Trimmtool}} = 0,628 \text{ rad/s}$ gestartet.
6. Zustelleinheit fährt nach vorne → Trimmklinge wird von dem Geometriepaar weggezogen → Klinge in Neutralposition.
7. Haube schließt sich.

Folglich sind zwei Prozessschritte näher aufgefallen. Diese beiden Schritte könnten auch in einem kombinierten Bewegungsablauf vereint werden, jedoch ist der IST-Stand getrennt:

1. Eintauchen der Klinge in die Probe.
 - a. Bei den Proben, die nicht trimmbar sind, kann die Trimmklinge nicht zu dem Geometrierand vordringen, da die Viskosität zu hoch ist.
2. Das Trimmen selbst.
 - a. Bei den Proben, die nicht trimmbar sind, kann die Trimmklinge nach oben oder hinten aus dem Trimmklingenhalter geschoben werden. Die Klinge „kratzt“ nur an der Oberfläche, schafft es jedoch nicht die Probe zu penetrieren oder trimmen.

Grenzen des Trimmtools

Ein Problem ist scheinbar, dass die Trimmklinge nur mit Formschluss im Halter fixiert wird und das Ausschieben bei zähen Proben leicht möglich ist. Die Kraft wird mittels einer Waage als „Auszugskraft F_{Auszug} “ in N ermittelt. Weiters ist die Stärke der Klinge zu überdenken da die Klinge aufgrund ihrer Flexibilität gar nicht erst in die Probe kommt.

6.2 Trimmversuche mit einem repräsentativen Polymerspektrum

Von dem/der Kund*in, von dem die „Standard Probe“ für den Reproduzierbarkeitsversuch stammt, wurden neun weitere Proben zur Verfügung gestellt. Eine Trimmversuchsstudie wurde für alle Proben durchgeführt. Die vorgegebenen Parameter umfassten eine Messtemperatur von 190 °C, was für die Trimmtemperatur galt. In einigen Fällen besteht die Möglichkeit, die Trimmtemperatur um 10 °C bis 20 °C zu erhöhen und im Anschluss auf die Messtemperatur abzukühlen. Allerdings birgt diese Vorgehensweise das Risiko einer Degradation der Probe. Aus diesem Grund wurde bei der gewünschten Messtemperatur der Trimmversuch durchgeführt.

Die Auflistung mit den Probenbezeichnungen, mit bekannten Probeneigenschaften und dem korrelierenden OK-, oder NOK-Ergebnis findet sich in den beiden nachfolgenden Tabellen, siehe *Tabelle 13* und *Tabelle 14*. Aus Platzgründen wurden die Ergebnisse in zwei Tabellen geteilt:

Proben ID	Einstellungen	Bekannte Probeneigenschaften	Trimmergebnis
A 0321-054	Temperatur: 190°C 1,625 mm Trimmspalt Trimmgeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 0,03 HLMFI 0,6 Scheibendicke in kalter Form: 1,88 mm Durchmesser: 25 mm	NOK!
B 0321-055	Temperatur: 190°C 1,625 mm Trimmspalt Trimmgeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 0,02 HLMFI 0,5 Scheibe Dicke in kalter Form: 1,79 mm Durchmesser: 25 mm	NOK!
C 0321-056	Temperatur: 190°C 1,625 mm Trimmspalt Trimmgeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 0,02 HLMFI 0,5 Scheibendicke in kalter Form: 1,81 mm Durchmesser: 25 mm	NOK!

Tabelle 13: Trimmversuche von einem repräsentativen Probenspektrum eines Polymer Kund*in, Probe A bis C, Proben ID, Trimmeinstellungen, bekannte Probeneigenschaften und Trimmergebnis, Quelle: Eigene Darstellung.

Sample ID	Einstellungen	Bekannte Probeneigenschaften	Trimmergebnis
D	Temperatur: 190°C 1,625 mm Trimmspalt Trimmggeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 0,1364 HLMFI 2,18 Scheibendicke in kalter Form: 1,72 mm Durchmesser: 25 mm	OK
E	Temperatur: 190°C 1,625 mm Trimmspalt Trimmggeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 0,6078 HLMFI 9,73 Scheibendicke in kalter Form: 1,6 mm Durchmesser: 25 mm	OK
F	Temperatur: 190°C 1,525 mm Trimmspalt Trimmggeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 1,2890 HLMFI 20,85 Scheibendicke in kalter Form: 1,63 mm Durchmesser: 25 mm	OK Folgende Höhen werden empfohlen: 1,525 mm Trimmspalt 1,5 mm Messspalt
G	Temperatur: 190°C 1,425 mm Trimmspalt Trimmggeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 49,68 HLMFI 795,8 Scheibendicke in kalter Form: 1,53 mm Durchmesser: 25 mm	OK Folgende Höhen werden empfohlen: 1,425 mm Trimmspalt
H	Temperatur: 190°C 1,425 mm Trimmspalt Trimmggeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 14,27 HLMFI 245,0 Scheibendicke in kalter Form: 1,43 mm Durchmesser: 25 mm	OK Folgende Höhen werden empfohlen: 1,425 mm Trimmspalt 1,4 mm Messspalt
I 0321-057	Temperatur: 190°C 1,425 mm Trimmspalt Trimmggeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 0,0243 HLMFI 0,39 Scheibendicke in kalter Form: 1,63 mm Durchmesser: 25 mm	NOK!
J Standard Probe EHM6007- BNJ224461	Temperatur: 190°C 1,625 mm Trimmspalt Trimmggeschwindigkeit: langsam ($\omega=0,628$ rad/s) Eine Umdrehung	MFI 0,82 HLMFI 43,3 Scheibendicke in kalter Form: 1,78 mm Durchmesser: 25 mm	OK

Tabelle 14: Trimmversuche von einem repräsentativen Probenspektrum eines/einer Polymerkund*in, Probe D bis J, Proben ID, Trimmeinstellungen, bekannte Probeneigenschaften und Trimmergebnis, Quelle: Eigene Darstellung.

Kommentare zu den NOK-Ergebnissen:

Probe A:

Probe A, siehe Abb. 56, war zu hart, als dass die automatische Trimmklinge in das Material hätte schneiden können. Die Klinge schafft es zwar zu Beginn einzutauchen, wird dann aber ausgeschoben. Das Trimmtool schaffte es lediglich eine 3 mm große Kerbe in dem Probenüberstand zu hinterlassen. Es konnte kein Material getrimmt werden. Es wurden hohe Normalkräfte beim Eintauchen in die Probe am MCR (ca. 42 N) und eine lange Zeit zum Erreichen der Trimmposition festgestellt. Um das MCR wieder öffnen zu können, musste die Temperatur auf 210 °C erhöht werden.

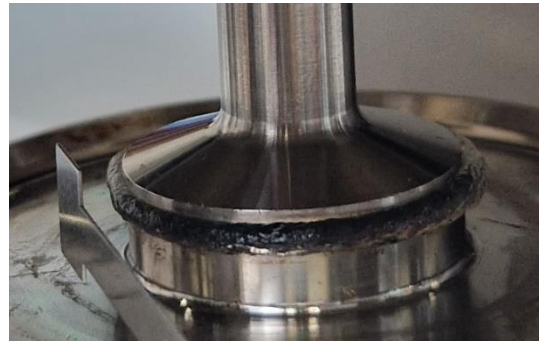


Abb. 56: Probe A vor dem Trimmvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.

Probe B:

Bei Probe B, siehe Abb. 57, zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei Probe A mit dem Unterschied, dass die Klinge nicht aus dem Halter geschoben wurde, sondern noch oben ausgedrückt wurde. Das Trimmtool schaffte es lediglich eine 4 mm große Kerbe in dem Probenüberstand zu hinterlassen.



Abb. 57: Probe B vor dem Trimmvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.

Probe C:

Bei Probe C, siehe Abb. 58, zeigt sich erneut ein ähnliches Bild wie bei Probe A und B. In diesem Versuch bleibt die Klinge in ihrer Sollposition im Trimmklingenhalter, ist jedoch nicht in der Lage in die Probe einzutauchen und schrammt nur an der Oberfläche.

In Abb. 58 ist der Zustand sowohl vor der Trimmung als auch nach der Trimmung zu sehen. Die Probe zeigt keine Veränderung.



Abb. 58: Probe C vor und nach dem Trimmvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.

Probe I:

Die Probe I zeigte ein identes Bild wie Probe C.

In Abb. 59 ist der Zustand sowohl vor der Trimmung als auch nach der Trimmung zu sehen. Die Probe zeigt keine Veränderung.



Abb. 59: Probe I vor und nach dem Trimmvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.

Eine Analyse der verfügbaren Daten zu MFI und HLMFI ergibt, dass diese von sehr geringer Größe sind. Eine detaillierte Beschreibung des MFI findet sich in *Kapitel 2.4.5*. In der Konsequenz lässt sich festhalten, dass ein niedriger MFI/HLMFI eine geringe Menge extrudierter Masse mit definierter Kraft pro definierter Zeit impliziert. Folglich lässt ein niedriger MFI/HLMFI auf eine hohe Zähigkeit des Materials sowie ein suboptimales Extrusionsverhalten schließen. Die zuvor erwähnte hohe Zähigkeit und Steifigkeit wurde zudem mit der Handspachtel überprüft. Selbst bei dem Versuch, die Proben manuell zu trimmen, konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Der Vorgang dauerte bis zu zwei Minuten pro Trimmung. Die Proben weisen eine zu hohe Festigkeit auf, sodass sie sich nicht mit der Standard-Trimmklinge bearbeiten lassen.

Kommentare zu den OK-Ergebnissen:

Die Proben D, E, F, G, H und J konnten allesamt ohne Komplikationen getrimmt werden. Es ist jedoch hervorzuheben, dass die Proben G und F aufgrund ihrer relativ hohen MFI- und HLMFI-Werte auffielen, was auf eine ausgesprochen niedrige Viskosität dieser Proben hinweist. Das Trimmen hat sowohl mit einer Kreisfrequenz von 0,628 rad/s als auch mit einer doppelten Geschwindigkeit von 1,256 rad/s erfolgreich funktioniert. Des Weiteren lässt sich bei der Probe F ein Trimmbild beobachten, welches darauf hindeutet, dass die Probe beim Trimmvorgang mehr gerissen als geschnitten wurde. Das Trimmbild zeigt Rillen. Die Trimmklinge selbst besteht aus einem 0,3 mm starken Federblech ohne Fase. Das Trimmergebnis ist dennoch als zufriedenstellend einzustufen (siehe *Abb. 60*).



Abb. 60: Das Trimmergebnis der Probe F, Quelle: Eigene Darstellung.

Es lässt sich ein signifikanter Unterschied zwischen dem kleinsten MFI-Wert der trimmbaren Proben und dem größten Wert der untrimmbaren Proben beobachten. Der MFI-Wert der trimmbaren Proben ist um 467 % höher als der, der untrimmbaren Proben.

Ein vergleichbares Bild zeigt sich beim HLMFI: Der kleinste HLMFI-Wert der trimmbaren Proben ist um 363 % höher als der größte Wert der untrimmbaren Proben.

6.3 Definition der Grenzen des Trimmtools anhand rheologischer Parameter

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Ermittlung eines rheologisch bestimmbarer Parameter, der von Kund*innen selbst mittels eines Rheometers und manuellem Trimmen bestimmt werden kann. Dieser Parameter soll die trimmbare Grenze beschreiben. Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, werden Trimm-, Temperatur-, Amplituden- und Frequenztests durchgeführt, rheologische Eigenschaften und Parameter analysiert und diskutiert. Rheologische Parameter korrelieren direkt mit den Stoffeigenschaften und beschreiben diese. Ziel ist es, diejenige Eigenschaft der zu trimmenden Polymerprobe zu identifizieren, die den limitierenden Faktor darstellt.

6.3.1 Diskussion von rheologischen Parametern – Indizien für die Trimmbarkeit

Die benötigten rheologische Begriffe, Versuche, Parameter und Eigenschaften von Polymeren wurden in *Kapitel 2* erläutert. Dieser Teil der Arbeit baut darauf auf. Im Rahmen der Suche nach einem rheologischen Parameter, der die Trimmgrenze beschreibt, stellte der Umstand, dass kein Festkörper getrimmt wird, eine gewisse Schwierigkeit dar. Zu Beginn der Arbeit wurde in Erwägung gezogen, den Trimmvorgang mit einer zerspanenden Schnittdatenberechnung zu vergleichen. Für zerspanende Prozesse kann als Beispiel die spezifische Schnittkraft k_c in N/mm^2 genannt werden. Allerdings existieren keine Datenbanken, in denen die rheologisch vermessenen Materialien bei der jeweiligen Trimmtemperatur mit den benötigten Daten der erlaubten Geschwindigkeit oder Werten für die Schnittleistungsberechnung hinterlegt sind. Die Bearbeitung von Polymeren erfolgt, bis auf wenige Ausnahmen, nicht zerspanend. Auch für Kunststoffe wie POMC, welches ebenfalls von Anton Paar in der zerspanenden Fertigung von Teilen zum Einsatz kommt, erfolgt die Ermittlung der Schnittkräfte nicht im gesamten Temperaturbereich, in dem sie in rheologischen Prozessen getrimmt werden müssen. Die fehlenden Daten könnten grundsätzlich mit dem Rheometer selbst ermittelt werden. Allerdings unterscheidet sich der zugrunde liegende Prozess wesentlich vom spanabhebenden Drehen. Hierbei handelt es sich um das Trimmen einer viskoelastischen Polymerschmelze. Dies bringt spezifische Anforderungen und Eigenschaften mit sich. Es ist keine definierte Eintauchtiefe in das Material gegeben, da der Probenüberstand von der eingelegten Probendicke sowie dem Trimmspalt abhängig ist. Zudem wird als Schneidwerkzeug, mit der Trimmklinge, keine genormte Schneide und kein genormter Winkel wie bei üblichen Werkzeugen beim Drehen oder Fräsen verwendet. Folglich ist ein Vergleich nicht zulässig.

Wiederholend aus dem Rheologie-Kapitel (*Kapitel 2*):

- G^* = Der Komplexe Schubmodul in Pa
- $G' = G^* \times \cos(\delta)$ - dies ist der "Speicher"- oder "Elastizitäts"-Modul in Pa → Festkörper Probenanteil
- $G'' = G^* \times \sin(\delta)$ - das ist der „Verlust“- oder „Plastizitäts“-Modul in Pa → Viskoser Probenanteil
- $\tan(\delta) = G''/G'$ - ein Maß für die Elastizität ($\tan(\delta) < 1$) oder Plastizität ($\tan(\delta) > 1$)
- LVE-Bereich: Linear- viskoelastischer Bereich: Der Dehnungsbereich in %, in dem die Probe nach einer Dehnung/ Belastung wieder in ihren Ausgangspunkt zurück geht.
- MFI und HLMFI: Der *Meltflow Index* und der *High Load Meltflow Index* ist Maß für die Menge der Kunststoffextrusion pro Zeit bei einer definierten Kraft.
- Molmasse: Die Schmelzviskosität von Polymeren ist abhängig von deren Molekulargewicht.

Grundsätzlich zeichnen sich Polymerschmelzen durch scherverdünnende Eigenschaften aus. Beim Trimmen wird jedoch inkrementell betrachtet, dass neues Material im Ruhezustand bearbeitet. Durch die unmittelbare Krafteinwirkung erfolgt eine Änderung der Materialeigenschaften, die zu einer erhöhten Gegenkraft führt. Dies deutet darauf hin, dass sich die Versuche im Bereich des linearen viskoelastischen Verhaltens bewegen. Diese Vorgehensweise erleichtert den Ablauf, da nicht jeder Versuch aufgrund der möglichen Zerstörung der Probe neu gestartet werden muss, sondern auf „Sweeps“ zurückgegriffen werden kann. Das spricht für den größeren Erfolg beim Trimmen bei geringeren Geschwindigkeiten. Mit scherverdünnendem Verhalten wäre grundsätzlich eine schnellere Trimmgeschwindigkeit besser.

Der Widerstand einer Probe gegen eine mechanische Veränderung bei einer bestimmten Geschwindigkeit und angewandten Kraft wird durch den Parameter der Viskosität charakterisiert. Ein reiner Viskositätswert erlaubt jedoch keine Aussage über das Potenzial der Probe einer Fadenbildung. Bei einer zu ausgeprägten Fadenbildung ist das Trimmergebnis voraussichtlich als „NOK“ einzustufen. In diesem Zusammenhang kann die Phasenverschiebung δ eine unterstützende Rolle spielen. Im Rahmen einer Phasenverschiebung der Probe in einem Bereich von $\delta = 45^\circ$ bis 90° lässt sich ein größerer viskoser Anteil der Probe beobachten. Die Kombination zweier Parameter zur Beschreibung einer Probe lässt auf eine Abhängigkeit von mehreren Faktoren schließen. Im Falle einer mechanischen Drehbearbeitung genügt die Verwendung eines einzigen, aus einer Tabelle ablesbaren Parameters, beispielsweise k_c , zur Berechnung der Schnittkraft.

Nachfolgend werden die durchgeführten Tests und die gewonnenen Erkenntnisse beschrieben.

6.3.2 Analyse von Frequenztest-Daten

Mit demselben Messtemplate aus der Reproduzierbarkeitsstudie wurden die aus Kapitel 6.1 gescheiterten Trimmversuchproben vermessen. Oszillationsversuche dienen zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit für Langzeitverhalten oder Relaxationsprozesse. Die Ziele sind die Bestimmung der elastischen und viskosen Anteile des Materials und der Untersuchung der Struktur, mit dem Speicher- bzw. Verlustmodul. In dem folgenden Ergebnis, siehe Abb. 61, sind die Probe A (0321-054), B(0321-055), C(0321-056), I (0321-057) und die Standardprobe J (Test 12_Standard Sample) zu sehen. Das Diagramm weist für die y-Achse auf der Modulseite (links), sowie auf der x-Achse (Kreisfrequenz ω in rad/s) eine logarithmische Skala auf. Die x-Achse (Phasenwinkel, rechts) ist mit einer linearen Skala aufgelöst.

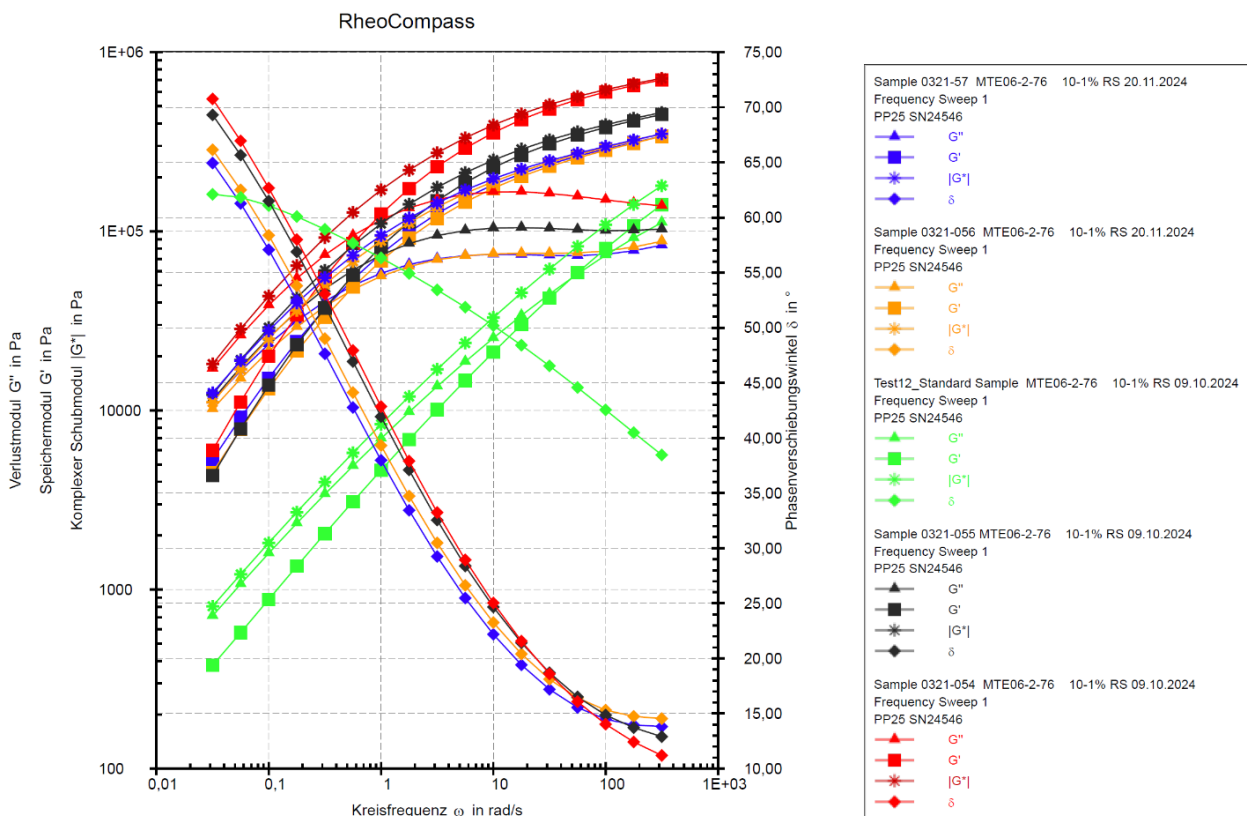


Abb. 61: Frequenztest der nicht trimmbaren Proben im Vergleich zu dem genutzten Standard-Polymer, Quelle: Eigene Darstellung.

G^* ist mit 11.111 Pa bei $\omega=0,0316$ rad/s für Probe C am niedrigsten für die nicht trimmbaren Proben. Das komplexe Schubmodul beträgt dafür bei Probe A bei demselben Messpunkt 18.155 Pa, wobei die Probe J lediglich 806,13 Pa aufweist. Somit ist G^* in diesem Punkt die Probe C am nächsten an Probe J, weist jedoch einen 13,78 mal so hohen G^* Wert auf. Die Probe A ist somit sogar das 22,52 fache der Probe J.

Die Phasenverschiebung δ ändert sich bei der Probe J von $62,1^\circ$ in niedrigen Frequenzen ($\omega=0,0316$ rad/s), hin zu $38,46^\circ$ in der höchsten Frequenz ($\omega=316$ rad/s). Folgende Vergleichspunkte für die nicht trimmbaren Proben:

Bei $\omega=0,0316$ rad/s (Probe I | $64,94^\circ$), (Probe C | $66,14^\circ$), (Probe B | $69,31^\circ$), (Probe A | $70,76^\circ$) und bei $\omega=316$ rad/s (Probe A | $11,2^\circ$), (Probe B | $12,9^\circ$), (Probe I | $13,82^\circ$), (Probe C | $14,54^\circ$).

Somit ist bei diesem Versuch $\tan(\delta)$ 2,14 bis 2,87 bei ω_{min} , und 0,2 bis 0,26 bei ω_{max} für Probe A, B, C und I. Mit einem flacheren Verlauf verhält sich $\tan(\delta)=1,88$ bei ω_{min} , und $\tan(\delta)=0,74$ bei ω_{max} bei der Probe J.

Der $\tan(\delta)>1$ sagt aus, dass das Material einen höheren Festkörperteil aufweist. Der $\tan(\delta)<1$ sagt aus, dass das Material einen höheren flüssigen Anteil (viskosen) aufweist. Somit sind beide Materialgruppen zu Beginn elastischer und anschließend viskoser. Bei hohen Kreisfrequenzen ist $\tan(\delta)$ bei den nicht trimmbaren Stoffen merklich kleiner, somit sind diese hier „flüssiger“.

6.3.3 Versuche bei unterschiedlichen Trimmtemperaturen

Der Effekt der Eigenschaftsänderung von Polymerproben bei Temperaturänderung wird für den Versuch genutzt, mit einer Probe verschiedene Zustände, Viskositäten und somit Fließwiderstände zu simulieren.

Es wurde wie folgt vorgegangen:

1. Die Trimmtemperatur einer Probe, (PE3), wird bis zu dem Punkt gesenkt, bis diese zuvor trimmbare Probe nicht mehr trimmbar ist. → Trimmergebnis NOK bei Temperatur x.
2. Bei der Grenztemperatur wird für das Ermitteln des LVE-Bereichs und der Auswertung der Materialparameter in diesem Zustand ein Amplitudentest durchgeführt.
3. Eine weitere Probe wird mit einem Temperatur-Sweep in dem LVE-Bereich getestet. Es werden die erhaltenen Werte im Temperaturverlauf untersucht, ob ein gleicher Materialzustand des komplexen Schubmoduls G^* und die Phasenverschiebung δ zu finden ist.
4. Wird diese Temperatur gefunden, wird bei der entsprechenden Grenztemperatur des zweiten Materials ein Trimmversuch durchgeführt, um die Hypothese zu prüfen. Funktioniert oder scheitert die automatisierte Trimmung?

Mit einer zur Verfügung stehenden PE3 Probe wurde in 15 Trimmdurchläufen mit verschiedenen Temperaturen und Trimmparametern der Geschwindigkeit und der Umdrehungszahl getestet, was die Grenztemperatur dieser Probe darstellt. Bei der eigentlichen Mess- und Trimmtemperatur von 190°C ist diese problemlos verarbeitbar. Es konnte die Temperatur auf bis 150°C gesenkt werden, mit einem weiterhin zufriedenstellenden Ergebnis. Das Trimmergebnis war bei 149°C als NOK einzustufen. Grundsätzlich hat das Eintauchen in die Probe und die Rotation funktioniert, jedoch wird das Polymer auf die obere Messgeometrie geschmiert und die Trimmklinge kommt aufgrund des vorgeschobenen Materials und der verwendeten Blattfeder im Trimmklingenhalter nicht von der Probe und dem Geometriepaar in die Neutralposition. Somit herrschte nach dem Trimmvorgang noch Kontakt der Trimmklinge mit den Trimmüberresten an dem Geometriepaar, was als NOK einzustufen ist. Wird die Temperatur weiter gesenkt verstärkt sich dieser Effekt. Es wird Probe aus dem Messspalt gezogen und die Probe erkaltet an der Trimmspitze, wodurch sie weiter verfestigt. Siehe hierfür Abb. 63. Es befindet sich der Trimmklingenhalter bereits in Endlage, jedoch ist die Trimmklinge selbst aufgrund der Blechstärke von 0,3 mm selbst so flexibel, dass diese verbogen wird und am Geometriepaar haften bleibt. Somit wird bei 149°C ein Amplitudentest mit der PE3 Probe durchgeführt, um die rheologischen Parameter bei der Grenztemperatur zu erhalten. Das Ergebnis ist nachfolgend in Abb. 62 dargestellt.



Abb. 63: Trimmbild bei 145 °C einer PE3 Probe, mit festgeklebter Trimmklinge an dem Geometriepaar/ der Probe im Messspalt, in Endlage des Trimmtools, Quelle: Eigene Darstellung.

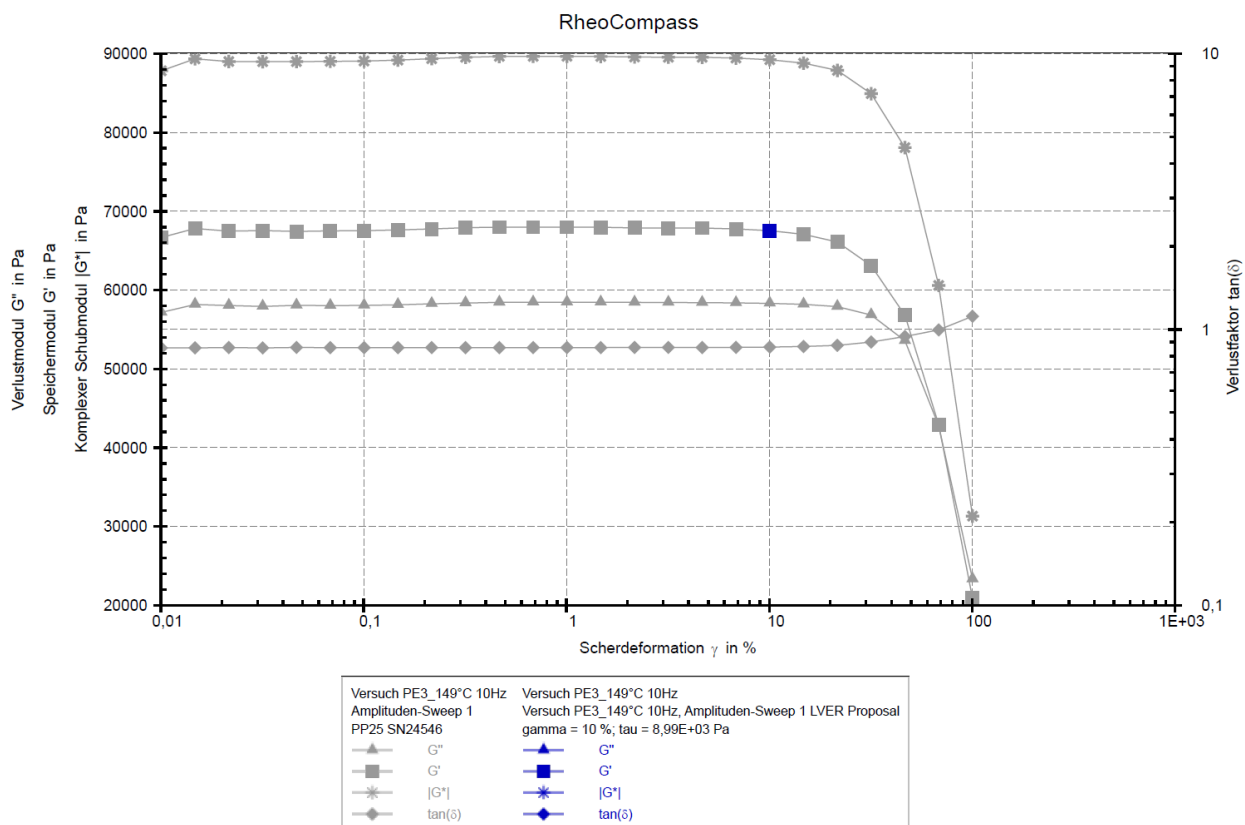


Abb. 62: Amplituden-Sweep einer PE3 Probe bei 149°C bei einer Frequenz von 10 Hz, Quelle: Eigene Darstellung.

Als Referenz und Hypothesentest wird erneut die Probe J herangezogen. Bei 190°C wird automatisiert ein hervorragendes Trimmergebnis erzielt. Aus den ersten Trimmversuchen ohne anschließende Messung mittels des Rheometers kann der Schluss gezogen werden, dass die Grenztemperatur für diese Probe zwischen 140°C und 170°C liegen muss. Somit wurde ein Temperatur-Sweep mit 10% Dehnung bei 10 Hz, was der LVE-Empfehlung aus der Reproduzierbarkeitsstudie entspricht, durchgeführt. Das Ergebnis ist folgend in Abb. 64 dargestellt.

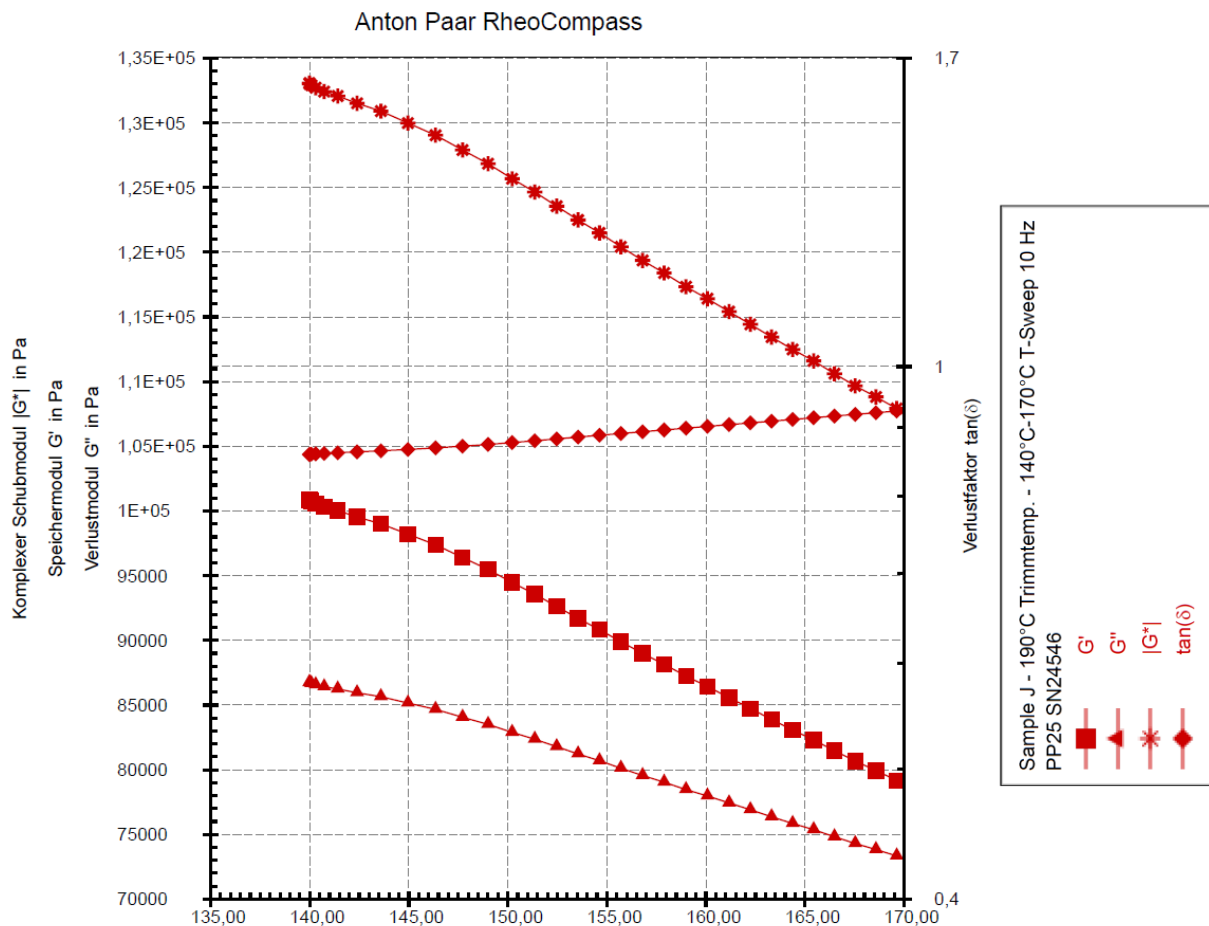


Abb. 64: Temperatur-Sweep der Probe J von 140 °C bis 170 °C, Quelle: Eigene Darstellung.

In dem Verlauf konnte kein deckender Probenzustand zu dem Punkt, an dem die PE3 Probe bei 149°C gescheitert ist, gefunden werden. Somit wurde die Trimmgrenze für die Probe J erneut manuell ermittelt. Die Grenztemperatur beträgt mit den durchgeführten Versuchen bei 162°C. Bei diesem Punkt scheitert die Trimmung und ist als NOK einzustufen. Vergleichbar wie bei PE3, kann sich die Trimmklinge nicht mehr vom Geometriepaar lösen und es wird Probe aus dem Messspalt gezogen. Die Parameter bei der jeweiligen Trimmgrenze werden in der nachfolgenden *Tabelle 15* verglichen.

Aus diesem Vergleich wird ersichtlich, dass sich die rheologisch gemessenen Parameter nicht mit dem Trimmergebnis decken. Der Verlustfaktor $\tan(\delta) = G''/G'$ zeigt bei beiden Proben einen Wert, der den Schluss zulässt, dass es sich um ein elastisches Material handelt ($\tan(\delta) < 1$), jedoch ist das ebenfalls bei den möglichen Trimmtemperaturen von 165°C für die Probe J und 150°C für die PE3 Probe der Fall. Somit konnte bis dato keine Korrelation aus den rheologischen Parametern und dem Trimmergebnis gefunden werden.

In der nachfolgenden Tabelle 15 werden die gemessenen Werte für die beiden Trimmgrenzen der jeweiligen Probe gegenübergestellt:

Trimmgrenzen-Parameter	PE3 (149°C)	Probe J (162°C)
Komplexes Schubmodul G^* in Pa	89.234	114.430
Speichermodul G' in Pa	67.543	84.733
Verlustmodul G'' in Pa	58.316	76.904
Verlustfaktor $\tan(\delta)$	0,863	0,908
Komplexe Viskosität $ \eta^* $ in Pa*s	8.923,4	1.821,2
Schubspannung in τ Pa	8.968	11.500

Tabelle 15: Vergleich der gemessenen Parameter, bei der jeweiligen Grenztemperatur, für das automatisierte Trimmen von PE3 und der Probe J, Quelle: Eigene Darstellung.

6.3.4 Auszugskraft der Trimmklinge

Eine der offensichtlichen Schwachstellen des Trimmtools scheint der Trimmklingenhalter selbst zu sein. Bei einem gewissen Widerstand wird die Trimmklinge nach hinten ausgeschoben. Daher wird die Kraft, die benötigt wird, um die Trimmklinge in Stoßrichtung aus der Fixierung zu lösen, als „ F_{Auszug} “ in N bestimmt.

Für diesen Versuch wurde der Trimmklingenhalter vom Trimmtool am Rheometer entfernt. Der Halter samt eingespannter Trimmklinge wurde in einer Schraubzwinde fixiert. An der Trimmklinge wurden die Orientierungsbohrungen genutzt, um einen dünnen Draht daran zu befestigen. An diesem Draht wurden Plastikbeutel als Behälter angebracht. Nachdem die Trimmklinge in einem Winkel von 90° vertikal ausgerichtet worden war, wurden schrittweise Schrauben in den Beutel eingefüllt, bis die Klinge durch das Gewicht der Masse aus ihrer Position gelöst wurde. Sobald die benötigte Menge an Schrauben zur Lösung der Trimmklinge identifiziert war, wurde der Versuch mehrfach mit einer reduzierten Anzahl an Schrauben durchgeführt, um die exakte Auszugskraft zu bestimmen. Nach fünf konsistent reproduzierbaren Versuchen wurde der Draht von der

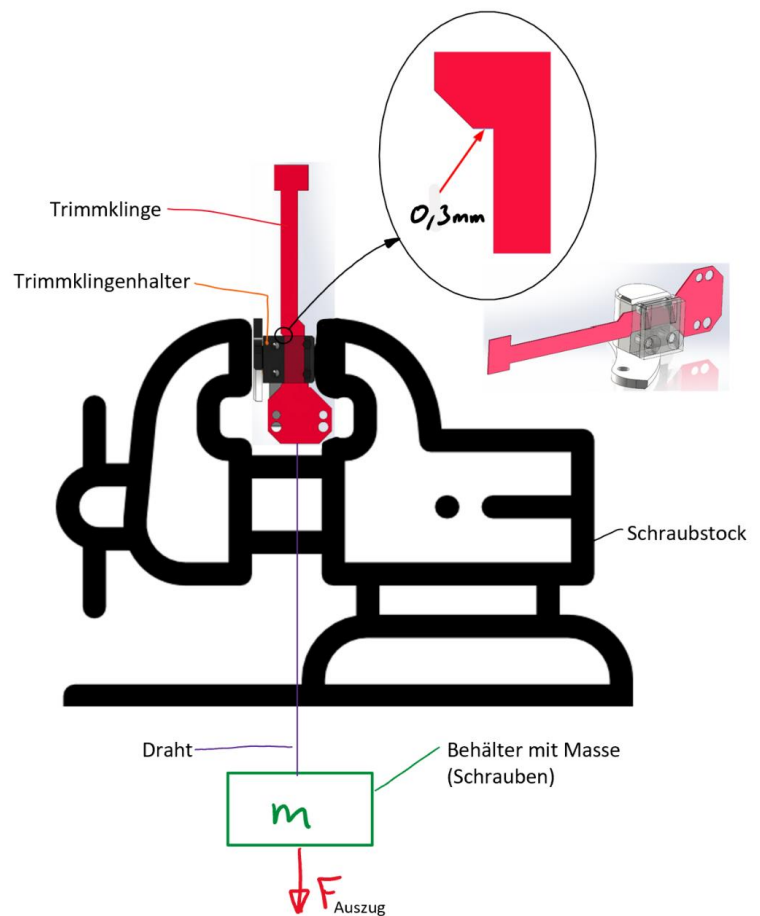


Abb. 65: Skizze des Versuchsaufbaus für die Ermittlung der kritischen Auszugsmasse, Quelle: Eigene Darstellung.

Trimmklinge entfernt, und die gesamte Auszugsmasse mithilfe einer Feinwaage präzise gewogen. Die gemessene Auszugsmasse beträgt 380,57 g, somit 0,38057 kg.

Mit der Formel $F_{\text{Auszug}} = m \times g$ kann somit die Kraft berechnet werden:

$$F_{\text{Auszug}} = 0,38057 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ ms/s}^2 = 3,733 \text{ N}$$

Somit wird ab der Krafteinwirkung in Auszugsrichtung von 3,733 N auf die Trimmklinge, die Klinge ausgeschoben und ein erfolgreicher Trimmprozess ist nicht mehr möglich. Der oben beschriebene Aufbau wird in der Skizze, siehe *Abb. 65*, dargestellt. In dieser Abbildung ist erneut der Trimmklingenhalter zu sehen. Hier fällt auf, dass die Trimmklinge nur mit einer 0,3 mm hohen Schulter gegen F_{Auszug} hält. Neben dieser Schulter wird die Klinge mit zwei federnden Druckstücken im Trimmklingenhalter fixiert. Diese bringen zwar Reibeffekte, reichen aber nicht, um eine maßgeblich höhere Auszugskraft zu erreichen.

6.3.5 Umlegen der Auszugskraft des Trimmklingenhalters auf einen Viskositätswert

Es wird die These aufgestellt, dass das Limit der Trimmklinge dargestellt durch die Auszugskraft F_{Auszug} , auf einen spezifischen Viskositätswert übertragbar ist. Hierfür werden die Begriffe aus Kapitel 2.1 benötigt. Die Viskosität ist, wie bereits erläutert, der durch die Molekülreibung entstehende Fließwiderstand einer Probe bei einer Schergeschwindigkeit v und einem Spaltabstand h , siehe hierfür das Plattenmodell auf *Seite 6*. Somit sind alle benötigten Parameter, bis auf der exakte Spaltabstand h , im Trimmvorgang bekannt. Der Zusammenhang $\eta = \sigma / \gamma$, Gleichung (6.1) für die Viskosität wird genutzt.

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (6.1) \quad \begin{array}{ll} \eta / \text{Pa} \cdot \text{s} & \text{Dynamische Viskosität} \\ \gamma / \frac{1}{\text{s}} & \text{Schergeschwindigkeit} \\ \tau / \frac{\text{N}}{\text{m}^2} & \text{Scherspannung} \end{array}$$

Die Werte für den Berechnungsansatz sind wie folgt:

- Fläche $A = 0,000.000.48 \text{ m}^2$ (0,3 mm x 1,6 mm)
- Kraft bei der die Klinge ausgeschoben wird: $F_{\text{Auszug}} = 3,733 \text{ N}$
- Schergeschwindigkeit: $v = 0,007.854 \text{ m/s}$ ($r = 12,5 \text{ mm}$; 10s pro Umdrehung)
- Scherspalt $h \rightarrow$ Annahme: $0,028 \text{ mm} \pm 0,000.028 \text{ m}$

Kommentare zu der Annahme des Spaltabstands h : Der Scherspalt ist grundsätzlich der Abstand der unteren und oberen Platte bei der Scherung im Plattenmodell. In diesem Versuch ist die Scherung jedoch nur einseitig eingespannt. Theoretisch betrachtet würde in *Abb. 66* der Scherspalt einem Durchmesser von 25 mm entsprechen, also dem Geometriedurchmesser. Dieser Ansatz ist jedoch unzureichend, da das Material innerhalb des Geometriepaares im Ruhezustand verbleibt. Da die Trimmklinge in der aktuellen Konfiguration die Probe eher schiebt, anstatt sie zu schneiden, und dabei Material auch im radialen Bereich des Geometriepaares in Bewegung versetzt wird, somit „fließt“, lässt sich vermuten, dass der tatsächliche Scherspalt sehr klein, jedoch nicht null ist. Im Idealfall wäre h null, da dann keine Effekte auf die Probe im MCR-Messspalt auftreten. $H=0$ ist bei der Berechnung weiters nicht möglich, da das Ergebnis mit dieser Formel null wäre. Somit wurde ein sehr kleiner Wert gewählt, dieser basiert auf einer Annahme.

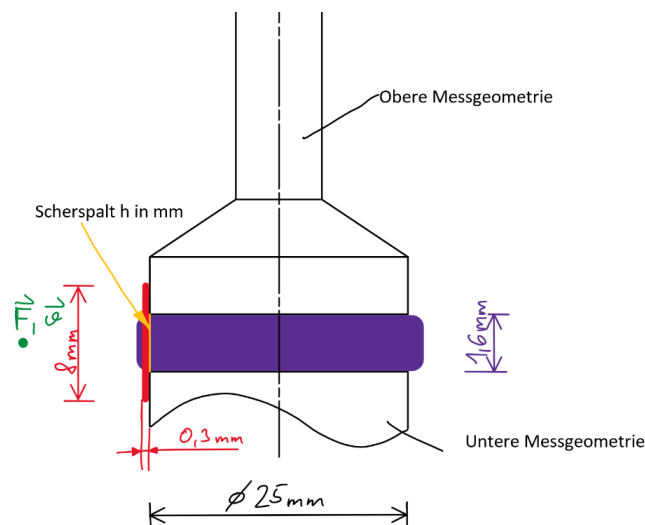


Abb. 66: Skizze, ohne realen Maßstab, des Berechnungsversuchs der Viskosität mit der Auszugskraft F_{Auszug} der Trimmklinge, (rot) Trimmklinge, (lila) Probe im Messspalt mit Spaltweite 1,6 mm, angenommener Scherspalt h in mm, (schwarz) die obere und untere Messgeometrie, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Spannung ergibt sich mit $\tau = F/A \rightarrow 3,733 \text{ N} / 0,00000048 \text{ m}^2 = 7.777.100 \text{ Pa}$

Die Schergeschwindigkeit $\gamma = v / h \rightarrow 0,007854 \text{ m/s} / 0,000028 \text{ m} = 280,5 \text{ s}^{-1}$

Mit der Formel (6.1) ist das Ergebnis für die Viskosität somit: $7,7771 \times 10^6 \text{ Pa} / 280,5 \text{ s}^{-1} = \underline{27.723,6 \text{ Pa}\cdot\text{s}}$

Der hier präsentierte Wert erscheint plausibel, da ein vergleichbarer komplexer Viskositätsbereich bei den oben angeführten Versuchen zu Trimmgrenzen geführt hat. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Wert von dem angenommenen Wert h abhängig ist und somit mit Vorsicht zu betrachten ist. In diesem theoretischen Versuch wird davon ausgegangen, dass der Scherspalt h von der Probe abhängt. Zudem kann es bei dem automatisierten Trimmvorgang dazu kommen, dass durch die getrimmte Probe ein Moment auf die Trimmklinge wirkt, welches dazu führt, dass die Trimmklinge über den Absatz geschoben wird und dadurch keinen Anker im Trimmklingenhalter besitzt. Dies konnte weder nachgestellt, noch simuliert werden.

Die Norm empfiehlt Spaltweiten über 0,5 mm, was sich jedoch auf den Abstand der PP-Geometrien bezieht.¹³ Wenn die gleiche Berechnung mit $h = 0,5 \text{ mm}$ durchgeführt wird, ergibt sich ein Viskositätswert von lediglich $4.951,03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, was im Vergleich zu den erhaltenen Erfahrungswerten als zu gering erscheint.

6.4 These für die Trimmgrenze des automatisierten Trimmtools

Die Versuche haben zahlreiche Erkenntnisse mit sich gebracht, wobei keine definitive Aussage durch einen rheologischen Parameter, welcher die Trimmgrenze beschreibt, getroffen werden konnte.

Das Trimmtool schert das Polymer in Ruhe. In diesem Zustand sind die Molekülketten unorientiert. Bei Rotationsversuchen mit gleicher Schergeschwindigkeit orientiert sich das Polymer (Vororientierung) und liefert einen abweichenden Viskositätswert in Bezug auf die Scherung des Trimmens. Es stellt sich die Frage, welche Viskosität als Basis- oder Referenzgröße herangezogen wird. Es wird vorgeschlagen, in Zukunft die Nullscherviskosität als Basisgröße zu verwenden.

Die elastischen Effekte des Polymers werden durch die Geschwindigkeit der Trimmklinge aufgelöst. Während der Scherung orientieren sich die Polymerketten des Materials, und somit des Polymers, in Richtung der Scherkräfte. Im integralen Kontext versucht die Trimmklinge kontinuierlich, eine ruhende Probe zu schneiden oder zu trimmen.

Das getrimmte Material wird vor der Trimmklinge hergeschoben anstatt geschnitten, wodurch sich zunehmend Material aufbaut. Dies führt zu einem fortschreitenden Anstieg des Widerstands gegen die Trimmklinge. Es gibt aktuell keinen alleinstehenden rheologischen Wert, mehr die Kombination aus dem komplexen Schubmodul G^* , dem Maß an elastischem und plastischen Anteil $\tan(\delta)$ und der Viskosität η .

Folgende Grenzen des Trimmtools konnten erörtert werden:

1. Das Material wird nicht fadenfrei von der Geometrie getrennt:
Probe ist niederviskos, aber sie „schmiert“, durch den hohen viskosen Anteil der Probe lässt sich das Material nicht präzise trennen. Die Probe wird aus dem Messspalt gezogen oder die getrimmte Probe wird vor der Trimmklinge hergeschoben. Dies erhöht den Widerstand und führt zum Ausschleichen der Trimmklinge.
2. Die Klinge kann nicht in die Probe eindringen:
Die Probe weist eine zu feste Oberfläche auf, sodass ein Eindringen der Trimmklinge in das Material nicht möglich ist. Es konnte lediglich ein oberflächlicher Kontakt zwischen Klinge und Material festgestellt werden.
3. Die Trimmklinge schiebt das Material vor sich her, anstatt es zu trennen:
Durch den Widerstand der Probe wird die Trimmklinge ausgeschoben.
4. Nach einer erfolgreichen Rotation der Trimmklinge hat sich an der Spitze das gesamte Material angehäuft.

Diese Probleme konnten auf folgende mechanische Schwächen des automatisierten Trimmtools zurückgeführt werden:

- Die Stabilität der Klinge selbst → Blechstärke von 0,3 mm
- Die Geometrie der Trimmklinge gegen die Auszugsrichtung → Die Geometrie der Trimmklinge in Auszugsrichtung weist lediglich eine 0,3 mm starke Schulter auf.
- Die Geometrie der Trimmspitze → keine Fase
- Die Feder des Trimmklingenhalters für die Zustellung der Klinge während einer Rotation ist zu schwach.

Die potenziellen Hürden des Trimmens für die Prozessautomatisierung

Dies ist ein Zusatz zum Kapitel 4.6. Eine eindeutige Hürde für die Implementierung eines solchen automatisierten Prozesses ist es, wenn das gewünschte Probenspektrum nicht verarbeitet werden kann. Dies ist für folgende Fälle gegeben:

1. Sofern die Probe nicht automatisiert trimmbar ist und trimmen gefordert wird, ist eine Hürde gegeben.
2. Die Probe kann nicht über einen längeren Zeitraum von beispielsweise 24 Stunden gelagert werden. Dies trifft auf flüchtige und reaktive Proben zu sowie auf Proben, die in einem Temperaturbereich liegen, der nicht abgedeckt werden kann und daher einer Lagerung bedürfen.

Aktuell ist das Lagern zwischen +4°C und + 45°C möglich. Für flüchtige Proben besteht die Möglichkeit eines „Gravity caps“ für vordispensierte Proben. Diese Kappe schützt die Probe vor den Umgebungseinflüssen, dichtet aber nicht zu 100%. Der Einfluss der Umgebung wird lediglich verzögert. Für Proben, die im System dispensiert werden können, besteht die Möglichkeit der Lagerung in verschraubten Probengefäßen. Die Viskositätsgrenze für das Dispensieren im automatisierten System liegt bei 20.000 mPa*s.

6.5 DMAIC für das Trimmtool

Mit dem Problemlösungskreislauf DMAIC aus *Kapitel 3.2.1* werden nachfolgend die gefundenen Grenzen des Trimmtools auf den Punkt „Improve“ umgelegt. Dieses Kapitel knüpft an das zuvor gezogene Zwischenfazit, *Kapitel 6.4* an. Das Ziel ist die limitierenden Faktoren von der automatisierten Trimmtoolseite zu eliminieren. Mit den vorgeschlagenen Adaptionen soll das mögliche Probenspektrum erweitert werden.

Die Schritte D, M, A sind bereits durch die Analyse der Grenzen des Trimmtools abgeschlossen. Dieses Kapitel soll einen Handlungsvorschlag für den Punkt „I“ darstellen. Damit der DMAIC-Zyklus abgeschlossen ist, müssen die Effekte erneut mit dem Schritt „C“ überprüft werden.

- Definieren (Define) – **D** - abgeschlossen: siehe *Seite 89 bis 101*
- Messen (Measure) – **M** - abgeschlossen: siehe *Seite 89 bis 101*
- Analysieren (Analyse) – **A** - abgeschlossen: siehe *Seite 89 bis 101*
- Verbessern (Improve) – **I** – Inhalt dieses Kapitels: Identifizieren der Verbesserungsmöglichkeiten, Auswählen von Verbesserungsobjekten, Entwicklung des Handlungsempfehlung.
- Überprüfen (Control) – **C** – nach dieser Arbeit: Die Umsetzung der Handlungsempfehlung kontrollieren, ob die Verbesserungsziele erreicht werden; dauerhafte Verankerung der Verbesserungen in den Prozessen; Standardisieren erfolgreicher Verbesserungsmaßnahmen; Bestimmen der Prozessfähigkeit; Überprüfen des Messsystems. Dieser Schritt ist nicht im Umfang der Arbeit integriert, da als Nicht-Ziel gesetzt wurde das Trimmtool konstruktiv anzupassen und die Veränderung zu testen.

6.5.1 Anpassung der Trimmklingengeometrie

Die Trimmklinge stellt den Endeffektor dar. Die Versuche haben gezeigt, dass die aktuelle Geometrie maßgebliche Schwachstellen aufweist. Die Klinge ist über die Zeit entwickelt worden und da diese grundsätzlich funktioniert und Anton Paar bis dato automatisiertes Trimmen immer noch am besten beherrscht, wurde diese nicht verändert. Um das gesamte Potential auszuschöpfen, werden folgende Punkte empfohlen in einer Weiterentwicklung umzusetzen:

- Nutzen von einer größeren Blechstärke – Handlungsempfehlung 0,5 mm Trimmklingen
Die Klinge ist in der Form eines 0,3 mm Blechs zu flexibel.
- Mehr Schulterfläche für den Trimmklingenhalter – Der Absatz, mit der die Klinge gegen die Auszugsrichtung hält, muss maßgeblich vergrößert werden. Aktuell gleitet die Klinge bei Krafteinwirkung aus dem Halter, somit die Handlungsempfehlung von einer Schulter mit der Höhe von 5 mm.
- Trimmklinge mit Fase – Die aktuelle Klinge ist aus einem gestanzten Blech. Üblicherweise benötigen Schneidprozesse eine Fase. Mit der vergrößerten Blechstärke kann somit an der

Trimmspitze eine 45° Fase geschliffen werden. Dies führt im Umkehrschluss zu einer Erhöhung der Stückkosten, jedoch wird aufgrund der erweiterten Blechstärke voraussichtlich eine signifikante Steigerung der Standzeit und der Leistungsfähigkeit erzielt.

6.5.2 Anpassung des Trimmklingenhalters

Auch bei dem Trimmklingenhalter selbst wurde Verbesserungspotential gefunden. So wird empfohlen die Blattfeder, zu sehen in *Abb. 67* und *Abb. 68*, welche die mechanische Zustellung der Klinge zum Geometriepaar zum Zweck hat, mit einer größeren Federrate auszuführen. Damit würde die Klinge fester an die zu trimmende Probe gedrückt werden. Wird die Blechstärke wie oben empfohlen angepasst, kann die Klinge dadurch das Material leichter schneiden und kommt zugleich aufgrund der erhöhten Festigkeit leichter in die Neutralposition. Die Federrate des Ist-Stands beträgt 0,5 N/mm. Es werden zumindest 0,8 N/mm empfohlen.



Abb. 67: Trimmklingenhalter, in der Neutralposition, der Pfeil zeigt auf die Blattfeder für die Klingenzustellung, Quelle: Eigene Darstellung.

Zusätzlich zur Verstärkung der Blattfeder wird empfohlen, den selbstgebaute Klemmmechanismus für die Trimmklinge im Halter, der mit gefederten Kugeln arbeitet, durch ein extern zugekauft Bauteil zu ersetzen. Hier könnte ein standardisiertes federndes Druckstück verbaut werden. Der Aufnahmespalt sollte auf 0,55 mm für die stärkeren Trimmklingen aufgeweitet werden. Mit dieser Kombination ist sogar die Aufnahme von beiden Blechstärken denkbar. Dies hätte zum Vorteil, dass eine preiswerte Klinge mit 0,3 mm Stärke und die kostenintensivere Klinge für zähe Proben verarbeitet werden kann.



Abb. 68: Demontierter Trimmklingenhalter, Ansicht von unten, der Pfeil zeigt auf die Blattfeder für die Klingenzustellung, Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.3 Kerben in der Probe vor dem eigentlichen Trimmen

Eine Anpassung, die eine tiefgreifende Modifikation des Trimmprozesses erforderlich machen würde und zudem mit einem erheblichen Entwicklungsaufwand verbunden wäre, wäre das Setzen einer Kerbe als Startpunkt für die Trimmklinge. Im Rahmen der Iststandanalyse konnte festgestellt werden, dass die Trimmklinge aufgrund ihrer geringen Dicke sowie der verwendeten Blattfeder im Trimmklingenhalter nicht in zähe Proben eindringen kann. Sollten die Verbesserungen aus 6.5.1 und 6.5.2 nicht ausreichend sein, wäre dies der nächste Schritt. Das zugrunde liegende Konzept basiert auf der Idee, dass durch den Einsatz einer Keramikspitze – einem Material, an dem Polymerschmelzen keine Haftung zeigen – vor der Trimmrotation eine Kerbe im Probenüberstand gesetzt wird. Die Führung des Werkzeugs durch den vorhandenen 6-Achs-Roboter, ausgestattet mit einem Wechselflansch, ist grundsätzlich möglich. Ob dieser Schritt nach den oben genannten Anpassungen jedoch notwendig ist, werden erst praktische Versuche mit neuen Trimmklingen und korrelierenden Anpassungen der Trimmklingenhalter zeigen.

6.6 Schlussfolgerung

Die Iststandanalyse des automatisierten Trimmtools hat ergeben, dass insbesondere zähe und harte, d. h. hochviskose Proben aufgrund der Eigenschaften der Trimmklinge sowie der Blattfeder im Trimmklingenhalter mit dem aktuellen Stand der Technik nicht bearbeitet werden können.

Bezugnehmend auf einen rheologischen Parameter für die Trimmgrenze, muss der Schluss gezogen werden, dass diese Korrelation noch nicht greifbar gefunden werden konnte.

Nach den absolvierten Trimmversuchen und der Analyse der rheologischen Kurven wird folgende Korrelation vermutet:

- Wenn $G^* > 110.000 \text{ Pa}$ $\rightarrow \delta > 45^\circ$ ist voraussichtlich eine Trimmgrenze
- Wenn $G^* > 110.000 \text{ Pa}$ $\rightarrow \delta < 45^\circ$ ist die automatisierte Trimmung voraussichtlich möglich
- Wenn $G^* < 88.000 \text{ Pa}$ $\rightarrow \delta$ ist egal und Trimmen ist voraussichtlich möglich

Diese Grenzen spiegeln die Daten der durchgeführten Versuche wider. Um diese These zu testen sind Materialien mit diesen Eigenschaften notwendig. Diese stehen zum Verfassungspunkt der Arbeit jedoch nicht zu Verfügung.

Die Hoffnung besteht, dass die Erkenntnisse dieser Arbeit die Grundlage für die Methoden- und Modellbildung für die Bestimmung des rheologischen Parametersets der Trimmgrenze bilden.

Ausblick in den Schritt „C“ – Control

Aus dem großen Interesse heraus, ob diese Anpassungen so effektiv wie erhofft sind, wurde eine Trimmklinge in der Blechstärke 0,5 mm mit einer 45° Fase an der Trimmspitze in Auftrag gegeben. Die Außenkontur ist ident zur Iststand Klinge. Die weiteren Verbesserungsvorschläge konnten erst danach entwickelt werden. Das Resultat ist sehr positiv. Jedes in dieser Arbeit getestete Material konnte mit dieser Klinge getrimmt werden, dies inkludiert die Proben A, B, C und I. Letztlich hat erst dieser Schritt die Durchführung der Messungen an diesen Proben zur Validierung der Trimmgrenzen ermöglicht. Somit trimmt diese Klinge nicht nur leichter und schneller durch diese zähen Proben, sondern das Trimmergebnis ist weit ansprechender. Dies stellt eine große Verbesserung dar und erweitert das Spektrum maßgeblich.

Trotz dessen wäre ein rheologischer Parameter der Trimmgrenze, vor allem für diese neue Ausgangssituation wichtig, sofern es dieses nach allen Verbesserungen des Trimmtools noch gibt. Da es nicht zu erwarten ist, dass im HTR 7000 Produkte der Asphaltindustrie verarbeitet werden, sollte ein Polymerhersteller kontaktiert werden, um die härtesten Polymere testen zu können.

7 FAZIT UND AUSBLICK

Das abschließende Kapitel zieht ein Resümee der Arbeit und fasst die Ergebnisse nochmals übersichtlich zusammen. Bis auf eine Fragestellung, nämlich die Bestimmung eines rheologischen Parameters für die Trimmgrenze, konnten alle Aufgabenstellungen vollständig erfüllt werden. Die Ergebnisse, die Handlungsempfehlung und der Ausblick folgen in den anschließenden Unterkapiteln.

7.1 Zusammenfassung und Beantwortung der Forschungsfragen

Die definierten Forschungsfragen aus dem einleitenden Kapitel 1.3 werden nachfolgend zusammengefasst beantwortet:

1. Welche Lean-Effekte treten durch die Automatisierung des rheologische Charakterisierungsprozesses auf? Welche Verschwendungen werden eliminiert? Welche Prozessoptimierungen treten auf?

Die Implementierung von Automatisierung in rheologischen Charakterisierungsprozessen bringt signifikante Lean-Effekte mit sich. Die Reduzierung von Verschwendung wird durch die Minimierung von Wartezeiten und Transportvorgängen sowie die optimierte Nutzung des Mitarbeiter*innen-Know-hows erzielt. Die Parallelisierung von Arbeitsprozessen sowie die Implementierung visueller Fehleranzeigen resultieren in einer Beschleunigung der Problemlösungsprozesse. Die Standardisierung und Qualitätsverbesserung manifestiert sich in einer Reduktion von Messfehlern, einem automatisierten Datentransfer sowie in standardisierten Arbeitsabläufen, welche die Datenqualität erhöhen. Im Bereich der Durchlaufzeit führt die 24/7-Systemauslastung zu einer Steigerung des Durchsatzes, während parallelisierte und effiziente Abläufe Wartezeiten eliminieren. Die Reduktion der Betriebskosten wird durch eine Verringerung der Personalkosten sowie eine Fokussierung auf wertschöpfende Tätigkeiten erreicht. Die Automatisierung führt zu einer Entlastung des Personals, da Messungen und Ergebnisse leichter zugänglich sind. Zudem werden Sicherheitsrisiken und Arbeitslastschwankungen reduziert und monotone Aufgaben eliminiert.

Fokus auf das Trimmtool:

Das automatisierte Trimmtool stellt eine Optimierung des Prozesses in Hinblick auf Zeit und Qualität dar und trägt zudem zu einer Steigerung der Effizienz bei. Der konstante, automatisierte Ablauf eliminiert menschliche Einflussfaktoren und Prozessschwankungen (Mura) und verringert die Exposition empfindlicher Proben gegenüber Luftsauerstoff, was insbesondere bei reaktiven Materialien von Vorteil ist. Dies resultiert in einer höheren Reproduzierbarkeit sowie einer Beschleunigung des gesamten Messprozesses, da keine Anwesenheit am Instrument erforderlich ist und somit keine Wartezeiten und eine automatische Dokumentation der Ergebnisse erfolgt.

2. Wie groß ist die Prozessverbesserung hinsichtlich der Zeit- und Kostenersparnis durch die Automatisierung des rheologischen Charakterisierungsprozesses?

Die mittels ROI ermittelte Kostenersparnis beläuft sich im Falle eines HTR 7000 mit einer Konfiguration samt Probenvorbereitung, pH-Messung und Reinigung der Messgeometrien auf 3.060.000 € über einen Zeitraum von zehn Jahren nach der Anschaffung. Der ROI-Wert beträgt lediglich 1,83 Jahre. Für weiterführende Informationen wird auf Kapitel 4.5, „Die Prozessverbesserung“, verwiesen. In Bezug auf die Zeitersparnis zeigt sich, dass bei Betrachtung der automatisierten Lösung lediglich 57,3

Minuten manueller Arbeitsaufwand für das Bestücken und Anlegen der Arbeitsanweisung von 60 Proben erforderlich sind. Die Messung erfolgt innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden. Im Vergleich zum manuellen Ablauf wird eine Kapazität von 25 manuellen Arbeitsstunden für den gleichen Probendurchsatz pro Tag benötigt.

Bei Betrachtung der Polymerkonfiguration des HTR 7000 wird ersichtlich, dass für das Beladen von 30 Proben lediglich etwa 14,2 Minuten manueller Arbeitszeit erforderlich sind. Die Dauer des Messprozesses ist von der Zykluszeit des Rheometers abhängig. Auch bei der automatisierten Variante bleibt die Messgeschwindigkeit des Rheometers unverändert. Infolgedessen wird bei einer vollständigen Beladung, in Abhängigkeit der unterschiedlichen Messdauern, das finale Resultat nach einem Zeitraum zwischen 23 und 90 Stunden an das Netzlaufwerk der Kund*innen übertragen. In einem Vergleich zum rein manuellen Messablauf zeigt sich, dass die gleiche Zeitspanne erforderlich ist. Die lange Messdauer erlaubt eine Rotation des Personals, wobei jedoch die anderen Tätigkeiten auf die Taktzeit des Rheometers abgestimmt werden müssen, um Stillstandszeiten des Instruments zu vermeiden. In Bezug auf Meetings ist eine Umsetzung nicht durchgängig möglich. Im schlimmsten Fall ist das Personal während der Messung anwesend und wartet auf die Fertigstellung. Folglich erweist sich in diesem Kontext der automatisierte Prozess als effizienter und somit "schlanker".

Des Weiteren lassen sich die Vorteile der Automatisierung in Bezug auf die Punkte Ausbringung, Kosten, Sicherheit, Qualität/Fehlerrate, Moral und Wertschöpfungsanteil feststellen. In Bezug auf jeden Parameter lässt sich ein Vorteil durch die Automatisierung feststellen.

3. Wie verändert sich die Reproduzierbarkeit der rheologischen Messdaten durch automatisiertes Trimmen im Vergleich zum manuellen Trimmen?
 - a. Vergleich der Reproduzierbarkeit der Messdaten anhand eines „Standardpolymers“ eines/einer Kund*in.

Die Untersuchung zeigt, dass automatisiertes Trimmen die Reproduzierbarkeit der rheologischen Messdaten der untersuchten Probe marginal verbessert. Der Mittelwert des Speichermoduls der gesamten Standardabweichung ist mit 398,37 Pa für das Trimmtool um 49,48 Pa besser als aus der manuellen Trimmung. Die Standardabweichung des Verlustmoduls ist mit 366,26 Pa geringer als die des Speichermoduls und zudem um 11,84 Pa besser als das korrelierende manuelle Ergebnis. Für das Verlustmodul ist die Standardabweichung des Trimmtools geringer als die des Speichermoduls. Das automatisierte Trimmen führt zu einer konsistenteren und präziseren Datenstreuung, was sich in einer geringeren Standardabweichung in fast allen Messpunkten widerspiegelt.

Zukünftige Untersuchungen könnten sich auf Proben mit höherer Viskosität konzentrieren, um die Auswirkungen der Viskosität auf die Reproduzierbarkeit zu erforschen. Die Studie liefert wesentliche Erkenntnisse zur Prozessverbesserung und schafft eine Grundlage für weitere Tests und den Beleg der effizienteren und konsistenten Messmethode.

Als Kommentar des Verfassers ist festzuhalten, dass durch die Durchführung der benötigten Messungen das Kund*innenproblem und der Bedarf eines HTR 7000 für den Prozess noch besser verstanden wurde und sich dieses Produkt für die Messungen selbst gewünscht hätte.

4. Was sind die Grenzen des automatisierten Trimmtools?

- a. Lassen sich die Grenzen auf ein Rheologisches Messergebnis herunterbrechen?
- b. Untersuchung möglicher Hürden bei der Umstellung von manuellen auf automatisierte Prozesse und deren Einfluss auf die Prozessverbesserung.
- c. Mit welchen Maßnahmen kann das Trimmtool weiterentwickelt werden, um eventuelle Grenzen zu überwinden?

Der Ansatz, die Trimmgrenze anhand eines rheologisch bestimmbarer Parameter zu definieren, musste aufgrund der Komplexität und der Wechselwirkungen der verschiedenen Einflussfaktoren verworfen werden. Die ersten Tests einer modifizierten Trimmklinge haben jedoch ergeben, dass durch Anpassungen der Klingenstärke und einer 45° Fase an der Trimmspitze das Spektrum maßgeblich erweitert werden kann. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob auf den gewonnenen Erkenntnissen aufgebaut und eine weitere Arbeit zur vertiefenden Analyse verfasst wird oder ob die bestehenden Einschränkungen im hochviskosen Bereich akzeptiert werden und stattdessen lediglich die Handlungsempfehlung für die Adaptionen der Trimmklinge und des Trimmklingenhalters umgesetzt wird. Die Grenzen der Trimmklinge mit den neuen Adaptionen sind gegenwärtig noch nicht bekannt. Es kann jedoch bereits festgestellt werden, dass alle Proben, die bisher nicht trimmbar waren, nun realisiert werden können.

7.2 Praktische Implikationen, Empfehlungen und Ausblick

Als Handlungsempfehlung für das Unternehmen wird nahegelegt, das Trimmtool mit den in Kapitel 6.5 angesprochenen Anpassungen weiterzuentwickeln. Die ersten Tests haben den positiven Effekt einer stärkeren Klinge mit Trimmfase klar belegt. Mit einem weiterentwickelten Trimmtool gilt es Tests der Reproduzierbarkeit mit einem höherviskosen Material durchzuführen, um auch diesen Effekt darlegen zu können.

Aufbauend auf den ersten Erkenntnissen zu den Grenzen des Trimmtools besteht die Möglichkeit, in einer vertiefenden Studie die Spezifikation eines optimierten Trimmtools weiterzuentwickeln. Dabei könnten insbesondere die Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Probeneigenschaften und deren Einfluss auf die Trimmbarkeit detailliert untersucht werden – vorausgesetzt, dass zu diesem Zeitpunkt noch bestehende Grenzen identifiziert werden können.

Die gewonnenen Erkenntnisse des Lean-Teils, Kapitel 3 und Kapitel 4, können für die Schulung des Vertriebspersonals, Kund*innen Gespräche, die Weiterentwicklung des Gesamtsystems und Marketingunterlagen verwendet werden. Mit den Erkenntnissen dieser Arbeit kann gerechtfertigt werden, das Produkt HTR 7000 als „Lean solution through automated rheology“ als Werbeslogan zu verwenden.

8 LITERATUR

AKERS, P.A.2016. *2 second lean, akers PA // 2 second lean. How to grow people and build a fun lean culture at work & at home*. 3rd edition. [Bellingham, Washington]: FastCap Press. ISBN 0984662286.

ANTON PAAR, 14 Oktober 2024, 12:00. *Amplitude sweeps* | *Anton Paar Wiki* [online] [Zugriff am: 14. Oktober 2024]. Verfügbar unter: <https://wiki.anton-paar.com/de-de/amplituden-sweeps/>

ANTON PAAR, 20 Oktober 2024, 12:00. *Frequency sweeps* | *Anton Paar Wiki* [online] [Zugriff am: 20. Oktober 2024]. Verfügbar unter: <https://wiki.anton-paar.com/at-de/frequenz-sweeps/>

ANTON PAAR, 28 September 2024, 12:00. *Rheologische Untersuchung von Polymeren* | *Anton Paar Wiki* [online] [Zugriff am: 28. September 2024]. Verfügbar unter: <https://wiki.anton-paar.com/at-de/grundlagen-der-rheologie/rheologische-untersuchung-von-polymeren/>

ANTON PAAR, 6 September 2024, 12:00. *Rheometer* | *Anton Paar* [online] [Zugriff am: 6. September 2024]. Verfügbar unter: <https://www.anton-paar.com/corp-de/produkte/gruppe/rheometer/>

ANTON PAAR, 8 November 2024, 12:00. *Automatisierung für hohen Probendurchsatz und komplexes Probenhandling: HTR* | *Anton Paar* [online] [Zugriff am: 8. November 2024]. Verfügbar unter: https://www.anton-paar.com/at-de/produkte/details/htr-rheometer-automatisierung-fuer-hohen-probendurchsatz-und-komplexes-probenhandling/?srsltid=AfmBOorLw4WWLiTw-posUQjMsew96lIH_zHWaQsiPoTZQIPZY5MrQzlv

BERTAGNOLLI, F.2020. *Lean Management. Einführung und Vertiefung in die japanische Management-Philosophie*. 2., erweiterte Auflage 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Gabler. ISBN 978-3-658-31239-8.

COGSWELL, F.N., 19 Oktober 2024, 12:00. *Experimental Investigations for Development of Hybrid Feed Stock Filament of Fused Deposition Modeling* [online]. *Melt Flow Index* [Zugriff am: 19. Oktober 2024]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/melt-flow-index>

EHRENSTEIN, G.W.2011. *Polymer-Werkstoffe. Struktur - Eigenschaften - Anwendung*. 3. Aufl. München: Hanser. ISBN 3446422838.

IRGENS, F.2014. *Rheology and Non-Newtonian Fluids*. Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-01052-6.

KLINKNER & PARTNER SHOP, 30 Oktober 2024, 12:00. *LIMS - Das Werkzeug zur Digitalisierung von Laborprozessen* [online] [Zugriff am: 30. Oktober 2024]. Verfügbar unter: <https://www.klinkner.de/Wissensseite/LIMS/>

KOCH, S.2015. *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-44449-8.

KSB2024. *Viskosität* [online]. 7. November 2024 [Zugriff am: 7. November 2024]. Verfügbar unter: <https://www.ksb.com/de-global/kreiselpumpenlexikon/artikel/viskositaet-1074736>

METTERNICH, J., T. MEUDT und L. HARTMANN 2022. *Wertstrom 4.0. Wertstromanalyse und Wertstromdesign für eine schlanke, digitale Auftragsabwicklung*. München: Hanser; Carl Hanser Verlag Gmbh & Co. KG. ISBN 978-3-446-47314-0.

MEZGER, T. 2012. *Das Rheologie-Handbuch. Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*. 4. Auflage. Hannover: Vincentz Network. Farbe und Lack Edition. ISBN 978-3-86630-863-3.

MEZGER, T. 2021. *Angewandte Rheologie. Mit Joe Flow auf der Rheologie-Straße*. 6. Auflage. Graz: Anton Paar GmbH. ISBN 978-3-200-03652-9.

NIEMANN, J., B. REICH und C. STÖHR 2021. *Lean Six Sigma. Methoden zur Produktionsoptimierung*. Berlin: Springer Vieweg. ISBN 9783662630075.

SCHMELZER, H.J. und W. SESSELMANN 2020. *Geschäftsprozessmanagement in der Praxis. Kunden zufriedenstellen, Produktivität steigern, Wert erhöhen*. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser. ISBN 9783446446250.

SPRINGERMEDIZIN.DE, 24 April 2018, 12:00. *Reproduzierbarkeit - Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik - eMedpedia* [online] [Zugriff am: 8. Oktober 2024]. Verfügbar unter: https://www.springermedizin.de/emedpedia/detail/lexikon-der-medizinischen-laboratoriumsdiagnostik/reproduzierbarkeit?epediaDoi=10.1007%2F978-3-662-49054-9_2675

WEIßBACH, W., M. DAHMS und C. JAROSCHEK 2018. *Werkstoffe und ihre Anwendungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-19891-6.

Online Videos

TA Instruments (2023): *Auto-Trim Accessory for the Discovery Hybrid Rheometer* <https://www.youtube.com/watch?v=4HML0xN0O2o&t=68s> [Stand: 17.05.2024]

Anton Paar (2023): *Polymer Industry Features of HTR 7000: Fully Automated Benchtop Rheometer* | Anton Paar <https://www.youtube.com/watch?v=O5ZpG-PuJtg> [Stand: 17.05.2024]

KI-Prompts (1)

ChatGPT-3.5 Turbo, Prompt Cha24 [31.01.2024]: *Wie sieht ein Beispiel für ein KI-Prompt aus*

Chat GPT: Ein üblicher First Pass Yield (FPY) für rheologische Messungen in einem manuellen Laborablauf mit Trimmen liegt oft zwischen **80% und 90%**. Dieser Wert kann jedoch je nach Komplexität der Proben, der Erfahrung der Bediener, den spezifischen Messanforderungen und der Genauigkeit des Trimmvorgangs schwanken.

In manuellen Abläufen kann die FPY durch inkonsistentes Trimmen oder kleine Fehler während der Probenvorbereitung beeinträchtigt werden, was zu Wiederholungsmessungen führt und den First Pass Yield senkt.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: HTR 7000 für die Polymerindustrie, die minimal Konfiguration, Quelle: (Anton Paar, 8. November 2024).....	2
Abb. 2: Grafische Übersicht über den Aufbau der Arbeit, Quelle: Eigene Darstellung.....	4
Abb. 4: Fließgeschwindigkeit einer Flüssigkeit im Spalt des zwei-Platten-Modells für Scherversuche, Quelle: (Mezger2012, S. 23.)	6
Abb. 3: Zwei-Platten-Modell für Scherversuche: Messprobe wird zwischen den beiden Platten geschert, wenn die obere Platte verschoben wird, während die untere Platte ruht. Die Abbildung zeigt eine idealisierte Darstellung der einzelnen, gegeneinander verschoben Schichten, Quelle: Metzger (2021), S.21.	6
Abb. 5: Homogene Schichtströmung oder laminares Fließen (links) und turbulente Strömung mit Wirbelbildung (rechts), Quelle: Metzger (2021), S. 25.	8
Abb. 6: Absolut-Messsysteme Kegel/Platte, konzentrische Zylinder und Platte/Platte, Quelle: (Mezger2021, S. 16.)	11
Abb. 7: PP25 Messgeometrien angepasst für die Automatisierung, (links- untere Geometrie), (rechts- obere Geometrie), Quelle: Eigene Darstellung.	12
Abb. 8: Befüllung des Kegel/Platte-Messsystems nach der Spalteinstellung, Quelle: (Mezger2021, S. 17.)	13
Abb. 9 Beispiel für ungenaues Trimmergebnis mit Probenrückstand auf der oberen Messgeometrie, Quelle: Eigene Darstellung.....	15
Abb. 10 Beispiel für ungenaues Trimmergebnis mit Faden zur Messgeometrie, Quelle: Eigene Darstellung.	15
Abb. 11: Vernetzung von Polymermolekülen, Quelle: (Weißbach, Dahms und Jaroschek2018, S. 368.)	16
Abb. 12: Eine Sinuskurve, beschrieben über die Amplitude A und die Frequenz ω , Quelle: Metzger (2021), S. 90.....	17
Abb. 13: Oszillationsversuch mit dem Zwei-Platten-Modell, rechts dargestellt ist der zeitabhängige Deformationswert mit der Amplitude γ_A der oberen Platte. Während einer vollen Umdrehung des Antriebsrades ergibt sich über die Zeitachse eine vollständige Sinusschwingung, Quelle: Metzger (2021), S. 90.	17
Abb. 14: Oszillationsversuch, dargestellt als Sinusfunktion über die Zeit mit vorgegebener Scherdeformation γ und Schubspannung τ , zwischen den beiden Funktionen tritt die Phasenverschiebung δ auf, Quelle: Metzger (2021), S. 91.	18
Abb. 15: Vektordiagramm mit der Beziehung zwischen dem komplexen Schubmodul G^* , Speichermodul G' und Verlustmodul G'' mit Hilfe des Phasenwinkels δ . X-Achse: elastischer Anteil, y-Achse: viskose Anteil, Quelle: Metzger (2021), S 96.	19

Abb. 16: Vorgabe eines Amplitudensweeps: Hier mit kontrollierter Dehnung und einer Erhöhung der Amplitude in fünf Schritten. Die Frequenz wird an allen fünf Messpunkten konstant gehalten, Quelle: (Anton Paar, 14. Oktober 2024)].	20
Abb. 17: Beispielhafter Amplitudentest einer Polymerschmelze, Quelle: (Anton Paar, 14. Oktober 2024).	21
Abb. 18: Vorgabe eines Frequenzdurchlaufs, hier mit kontrollierter Scherdehnung und einer Erhöhung bzw. Verringerung der Frequenz in fünf Schritten. Die Dehnungsamplitude γ_A wird über alle fünf Messpunkte konstant gehalten, Quelle: Anton Paar, Internet-Quelle: (Anton Paar, 20. Oktober 2024).	22
Abb. 19: Sample A bis Sample J von einem/einer Polymerkund*in, mit MI-Werten von 0,02 g/10 min bis 49,68 g/10 min und HLMI-Werten von 0,5 g/10 min bis 765,8 g/10 min, Quelle: Eigene Darstellung.	26
Abb. 20: Abgrenzung der Anwendungsfelder. (In Anlehnung an Schmelzer und Sesselmann (2001, S. 205)), Quelle: (Koch2015, S. 118.).	28
Abb. 21: Darstellung des Toyota-Produktionssystems (TPS) in Form eines Hauses, Quelle: (Bertagnolli2020, S. 212.).	29
Abb. 22: Das magische Dreieck des Kaizen, Quelle: Niemann, Reich und Stöhr (2021, S. 3.).	30
Abb. 23: Zusammenspiel von Prozesserneuerung und -verbesserung, Quelle: in Anlehnung an Imai 1992, S. 47 ff. (Schmelzer und Sesselmann2020, S. 509.).	31
Abb. 24: Wertschöpfung und Verschwendungsanteil in Prozessen, Quelle: (Metternich, Meudt und Hartmann2022, S. 21.).	31
Abb. 25: Anwendungsschritte des Spaghetti-Diagramms, Quelle: (Niemann, Reich und Stöhr2021, S. 122.).	41
Abb. 26: Rahmenkonzept von Six Sigma (Quelle: in Anlehnung an Magnusson/Kroslid/ Bergman 2001), Quelle: (Schmelzer und Sesselmann2020, S. 539.).	43
Abb. 27: Flussdiagramm In-Prozess Proben, Viskositätsmessung von Lacken, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Abb. 28: Flussdiagramm Verifikation- Proben, Viskositätsmessung von Lacken, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Abb. 29: Spaghetti-Diagramm eines/einer Rheometer Kund*in von Anton Paar, Arbeitsschritte und Bewegungen für eine reine Viskositätsmessung inklusive Anlöseprozess von Harzen, Beschichtungen und Additiven, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Abb. 30: Zeitverteilung einer manuellen Viskositätsmessung, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abb. 31: HTR 7000 in dem laufenden Montageprozess, mit dem 6-achs Roboter (1) als Haupthandling, Einem Geometriespeicher (2), einem Speicher für Einweg-Spritzen (3), einem temperierten Probenrack (4), Reinigungsstation für die Messgeometrien (5) und Dosierstation (6), Quelle: Eigene Darstellung.	55
Abb. 32: Konfigurationsbaum des HTR 7000, die möglichen Module für MCR, Reinigen und Probenvorbereitung, Quelle: Eigene Darstellung.	56

Abb. 33: Flussdiagramm Prozessablauf HTR 7000 Polymerkonfiguration mit Reinigungsstation der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Abb. 34: Spaghetti-Diagramm eines beispielhaften Arbeitsablaufs von Polymerproben mit einem HTR 7000, Quelle: Eigene Darstellung.	58
Abb. 35: Zeitverteilung für das manuelle Beladen eines HTR 7000, um 30 Polymerproben automatisiert zu vermessen, Quelle: Eigene Darstellung.	59
Abb. 36: Flussdiagramm des HTR 7000 mit Probenvorbereitung, pH-Messung und Reinigung der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.	60
Abb. 37: Spaghetti-Diagramm eines beispielhaften Arbeitsablaufs von Körperpflegeprodukten mit einem HTR 7000, samt Probenvorbereitung, automatischer Probendispensierung, LIMS-Anbindung und Reinigung der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.	61
Abb. 38: Manuelle Zeitverteilung für das Beladen eines HTR 7000, um 60 Körperpflege Produkten wie Shampoo automatisiert zu vermessen, Quelle: Eigene Darstellung.	62
Abb. 39: Beispielhafte Kalkulation des Return on Investment (ROI) eines HTR 7000 (mit Probenvorbereitung und pH-Messung) im Vergleich zu dem manuellen Ablauf, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Abb. 40: Trimmklingenhalter (2) mit Blattfeder, mit transparent dargestellten Klemmelementen für die Trimmklinge, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Abb. 41: Das automatisierte Trimmtool, links 3D-CAD Ansicht, rechts Draufsicht, Quelle: Eigene Darstellung.	73
Abb. 42: Die Rheometer Baugruppe samt Trimmtool auf der rotierbaren MCR-Lade, Quelle: Eigene Darstellung.	74
Abb. 43: Die Trimmklinge mit Orientierungspins (b) und Fixierungs-Absatz (c), Quelle: Eigene Darstellung.	74
Abb. 44: Geometriepaar für automatisierte Rheometer, links: Proben in Form von Polymerscheiben, Mitte: obere Messgeometrie PP25, rechts: untere Messplatte PP25, Quelle: Eigene Darstellung.	76
Abb. 45: Trimmspatel von Anton Paar für manuelles Trimmen, Quelle: Eigene Darstellung.	77
Abb. 46: Proben-Discs mit Durchmesser 25 mm und Stärke von 1,6 mm, Kund*in Standard-Polymer, Quelle: Eigene Darstellung.	78
Abb. 47: Teilautomatisierter Prüfaufbau des Rheometers mit automatisiertem Trimmtool und automatisierter Haube, Quelle: Eigene Darstellung.	78
Abb. 48: Prozessablauf des Mess-Templates, Standard Frequenz-Sweep bei 190°C, Quelle: Eigene Darstellung.	79
Abb. 49: Flussdiagramm des Versuchsablaufs der Reproduzierbarkeitsmessungen, Quelle: Eigene Darstellung.	80

Abb. 50: Trimmergebnis nach manueller Trimmung, die getrimmte Probe liegt auf der unteren Messgeometrie, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Abb. 51: Geometriepaar mit Polymerschmelze auf Trimmspalt, Versuch ohne Trimmen, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Abb. 52: Standbild während eines automatisierten Trimmvorgangs, Quelle: Eigene Darstellung.....	82
Abb. 53: Vollendete automatisierte Trimmung, die entfernte Probe haftet auf der Trimmklinge, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Abb. 54: Trimmvorrichtung des Unternehmens TA, Quelle: Internet-Quelle: TA, YouTube Sekunde 68..	88
Abb. 55: Trimmtool von Anton Paar, Ergebnis einer Polymerschmelz-Trimmung, Quelle: Internet-Quelle: Anton Paar GmbH.	88
Abb. 56: Probe A vor dem Trimmvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.....	92
Abb. 57: Probe B vor dem Trimmvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.....	92
Abb. 58: Probe C vor und nach dem Trimmvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.....	92
Abb. 59: Probe I vor und nach dem Trimmvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.	92
Abb. 60: Das Trimmergebnis der Probe F, Quelle: Eigene Darstellung.	93
Abb. 61: Frequenztest der nicht trimmbaren Proben im Vergleich zu dem genutzten Standard-Polymer, Quelle: Eigene Darstellung.....	95
Abb. 62: Amplituden-Sweep einer PE3 Probe bei 149°C bei einer Frequenz von 10 Hz, Quelle: Eigene Darstellung.	97
Abb. 63: Trimmbild bei 145 °C einer PE3 Probe, mit festgeklebter Trimmklinge an dem Geometriepaar/ der Probe im Messspalt, in Endlage des Trimmtools, Quelle: Eigene Darstellung.....	97
Abb. 64: Temperatur-Sweep der Probe J von 140 °C bis 170 °C, Quelle: Eigene Darstellung.....	98
Abb. 65: Skizze des Versuchsaufbaus für die Ermittlung der kritischen Auszugsmasse, Quelle: Eigene Darstellung.	99
Abb. 66: Skizze, ohne realen Maßstab, des Berechnungsversuchs der Viskosität mit der Auszugskraft F_{Auszug} der Trimmklinge, (rot) Trimmklinge, (lila) Probe im Messspalt mit Spaltweite 1,6 mm, angenommener Scherspalt h in mm, (schwarz) die obere und untere Messgeometrie, Quelle: Eigene Darstellung.	101
Abb. 67: Trimmklingenhalter, in der Neutralposition, der Pfeil zeigt auf die Blattfeder für die Klingenzustellung, Quelle: Eigene Darstellung.	104
Abb. 68: Demontierter Trimmklingenhalter, Ansicht von unten, der Pfeil zeigt auf die Blattfeder für die Klingenzustellung, Quelle: Eigene Darstellung.	104

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Begriffe für 5S bzw. 5A in unterschiedlichen Sprachen, Quelle: Bertagnolli (2020), S. 140 (leicht modifiziert).	35
Tabelle 2: Beispiele zu den Kennzahlenkategorien, Quelle: (Bertagnolli 2020, S. 317).....	45
Tabelle 3: Durchlaufzeit einer beispielhaften Polymer Probe im HTR 7000, mit anschließender Reinigung der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.....	59
Tabelle 5: Durchlaufzeit einer Körperpflege- Probe im HTR 7000, mit Probenvorbereitung und Reinigung der Messgeometrien, Quelle: Eigene Darstellung.....	63
Tabelle 5: Übersicht der Dauer des Trimmvorgangs und der Dauer der geöffneten Haube-manuell, Quelle: Eigene Darstellung	81
Tabelle 6: Übersicht der Dauer des Trimmvorgangs und der Dauer der geöffneten Haube-automatisiert, Quelle: Eigene Darstellung.....	81
Tabelle 7: Vergleich der Dauer des Trimmvorgangs und der Dauer der geöffneten Haube, automatisiert und manuell, Quelle: Eigene Darstellung.	81
Tabelle 9: Die aufbereiteten Rohdaten des Speichermoduls G', Quelle: Eigene Darstellung.	83
Tabelle 10: Die aufbereiteten Rohdaten des Verlustmoduls G'', Quelle: Eigene Darstellung.	83
Tabelle 11: Gegenüberstellung des Toleranzfeldes des Verlust- und Speichermoduls aus manuellem und automatisiertem trimmen, Quelle: Eigene Darstellung.	84
Tabelle 12: Gegenüberstellung der Standardabweichung des Verlust- und Speichermoduls aus manuellem und automatisiertem Trimmen in Pa, Quelle: Eigene Darstellung.....	85
Tabelle 13: Vergleich des Arithmetischen Mittels der automatisiert getrimmten Messung und einer Messung ohne Trimmen, Quelle: Eigene Darstellung.....	86
Tabelle 14: Trimmversuche von einem repräsentativen Probenspektrum eines Polymer Kund*in, Probe A bis C, Proben ID, Trimmeinstellungen, bekannte Probeneigenschaften und Trimmergebnis, Quelle: Eigene Darstellung.	90
Tabelle 14: Trimmversuche von einem repräsentativen Probenspektrum eines/einer Polymerkund*in, Probe D bis J, Proben ID, Trimmeinstellungen, bekannte Probeneigenschaften und Trimmergebnis, Quelle: Eigene Darstellung.....	91
Tabelle 15: Vergleich der gemessenen Parameter, bei der jeweiligen Grenztemperatur, für das automatisierte Trimmen von PE3 und der Probe J, Quelle: Eigene Darstellung.	99

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ω	kleines Omega. Frequenz, Kreisfrequenz
°C	Grad Celsius
μm	Mikrometer
Abb	Abbildung
bzw.	Beziehungsweise
ca.	Circa
CMT	Combined Motor Transducer
CP	Cone and Plate (Kegel und Platte Messsystem)
CSD	Controlled Shear Deformation
CSS	Controlled Shear Stress
d.h.	das heißt
DMAIC	Define, Measure, Analyse, Improve, Control
DMA	Dynamisch-Mechanische Analyse
EC-Antrieb	Electronically Commutated (Gleichstrommotor)
ERP	Enterprise Ressource Planning
FpMM	Fehler pro Million Möglichkeiten
F&E	Forschung und Entwicklung
h	Höhe
HDPE	High Density Polyethylen
HLMI/HLMFI	High Load Melt Index/ High Load Melt Flow Index
HMI	Human Machine Interface
Hz	Herz
Kaizen/KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LDPE	Low Density Polyethylen
LIMS	Labor-Informations- und Management-System
LVE	Linear viskoelastischer Bereich
M	Mohlmasse
MCR	Modular Compact Rheometer
MI/MFI	Melt Index / Melt Flow Index

MIT	Massachusetts Institute of Technology
ml	Milliliter
mm	Millimeter
Muda	Verschwendung
Mura	Überlastung von Prozessen
Muri	Unausgeglichenheit
N	Newton
nm	Nanometer
Pa	Pascal
PDCA	Plan Do Check Act
PE	Polyethylen
PMMA	Polymethylmethacrylat
POMC	Proopiomelanocortin
PP	Plate and Plate (Platte Platte Messsystem)
PVC	Polyvinylchlorid
Q&C	Quality Control (Qualitätskontrolle)
SAP	ERP-Software, Systemanalyse Programmentwicklung
Seiketsu	Sauberkeit bewahren
Seiri	Sortieren/Selektieren
Seiso	Säubern
Seiton	Systematisieren
Shitsuke	Selbstdisziplin leben
SMED	Singe Minute Exchange of Die
SMT	Separate Motor Transducer
SOP	Standard Operating Procedure
SQAKM	Sicherheit, Qualität, Ausbringung, Kosten, Moral
TA-Instruments	Rheometer Hersteller
Tg	Erweichungstemperatur
Tmg	Glasübergangstemperatur
Tmg	Schmelztemperatur

TPS	Toyota-Produktionssystem
USP	unique selling proposition
WIP	Work In Progress
z.B.	zum Beispiel