

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

Präzisionsdosierung mit Hilfe rheologischer Materialmodelle
- RheoDos –

in der Fördermaßnahme

KMU innovativ (Bundeshaushaltsjahr 2022, Einzelplan 30. Kapitel 04, Titel 68324)

Autor(en)

MARTIN GmbH, Industriestrasse 17, 82110 Germering, Alpeskumar Radadiya,
alpesk.radadiya@martin-smt.de

Finetech GmbH & Co. KG, Boxberger Str. 14, 12681 Berlin, Oliver Schadow,
oliver.schadow@finetech.de

Finetech GmbH & Co. KG, Boxberger Str. 14, 12681 Berlin, Michael Wolff,
michael.wolff@finetech.de

Fraunhofer IFAM, Wiener Straße 12, 28359 Bremen, Mathis Eppmann,
mathis.eppmann@ifam.fraunhofer.de

Fraunhofer IFAM, Wiener Straße 12, 28359 Bremen, Pascal Steinforth,
pascal.steinforth@ifam.fraunhofer.de

Fraunhofer IFAM, Wiener Straße 12, 28359 Bremen, Jonas Wirries,
jonas.wirries@ifam.fraunhofer.de

Projektlaufzeit: 01.08.2022 – 31.10.2024

Erstellungsdatum: 08.01.2025

Projektpartner

MARTIN GmbH, München (MARTIN); 02P21K070

Finetech GmbH & Co. KG, Berlin (Finetech); 02P21K071

Fraunhofer IFAM, Bremen (IFAM); 02P21K072

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

I.	Teil I Kurzfassung.....	3
I.1	Aufgabenstellung	3
I.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	3
I.3	Wesentliche Ergebnisse im Überblick	4
II.	Teil II Eingehende Darstellung.....	6
II.1	Motivation und Aufgabenstellung	6
II.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	7
II.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	9
II.4	Erzielte Ergebnisse	13
II.5	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	51
II.6	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	51
II.7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes	52
II.8	Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.	52
II.9	Literaturverzeichnis	52

I. Teil I Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des KMU-innovativ Projekts RheoDos ist die Entwicklung eines Technologie-Demonstrators für den Präzisionsauftrag von Klebstoffen und Lotpasten, welcher selbstständig Materialdaten erzeugt. Auf Grundlage dieser Daten werden im Gerät gespeicherte Materialmodelle ausgewählt. Mit Hilfe von diesen rheologischen Materialmodellen kann das Fließverhalten der Materialien beschrieben bzw. vorhergesagt werden. Auf diese Weise können eigenständig Prozessparameter für den hochpräzisen Auftrag optimiert werden. Das angestrebte Dosiersystem soll auf einer Zeit-Druck-Steuerung basieren, welche es erstmals ermöglicht die Vorteile dieser Technik, wie beispielsweise einfacher Aufbau, geringer Reinigungsaufwand sowie niedrige Investitionskosten, für das hochpräzise Auftragen von Klebstoffen und Lotpasten in der Mikroelektronik zu ertüchtigen.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Das Vorhaben basiert auf dem Gerät „CleverDispense 06“ (CD06) der Fa. MARTIN. Dieses Gerät ist in der 6. Revision am Markt etabliert und basiert auf dem Patent DE 42 18 064 A1 zum volumengenauen Dosieren mit Hilfe einer schnellen Überwachung der Druckverhältnisse und der empirischen Erarbeitung von Materialeigenschaften.

Der allgemeine Trend der Miniaturisierung in der Mikroelektronik und der Optik führt zunehmend zu kleineren Bauteilen und somit zu einem Bedarf an ein Dosiergerät für präzise dosierte Kleinstmengen von Klebstoffen und Lotpasten. Der CD06 kommt, aufgrund der gestiegenen Anforderungen, zunehmend an seine Grenzen und es bedarf eines neuen Ansatzes zur Ermittlung der Materialparameter und zur Optimierung der Dosierparameter. Weiterhin soll es Anwendern mit wenig Erfahrung in der Dosiertechnik sowie bei Materialien mit unbekanntem Dosierparametern ermöglicht werden, gute Ergebnisse bei der Dosierung ohne zeitintensive Einrichtung zu erzielen.

Übersicht über den Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn des Vorhabens hat sich das Konsortium mit den zu verwendenden Materialien beschäftigt. Es wurde definiert, welche Materialien in der Mikroelektronik für die Präzisionsdosierung relevant sind. Diese Materialauswahl wurde anschließend eingehend betrachtet und favorisierte Medien zur Verwendung innerhalb der Dosierversuche festgelegt.

Anschließend wurden durch die Fa. MARTIN und die Fa. Finetech technische Schnittstellen für den Demonstrator definiert, welche eine Verwendung des Demonstrators an Produktionsmaschinen, aber auch als Standalone-Lösung ermöglichen soll.

Es wurde experimentell der IST-Zustand der Dosiergenauigkeit unter verschiedenen Prozessparametern (wie z.B. Temperatur, Druck, Dosierzeit) durch die Fa. Finetech ermittelt, um einen Vergleich der Ergebnisse zwischen Projektanfang und Projektende ziehen zu können.

Vom Fraunhofer IFAM wurden danach die Arbeiten zur rheologischen Charakterisierung der ausgewählten Materialien und der Erstellung von Material-Clustern durchgeführt. Auf Basis dieser Untersuchung wurden materialwissenschaftliche Modelle zur Beschreibung des Fließverhaltens erstellt und validiert.

Weiterhin führte das Fraunhofer IFAM iterative Applikationsversuche zur Erstellung eines Algorithmus durch und erkannte währenddessen ein hardwaretechnisches Verbesserungspotenzial für den Demonstrator. Als Teil der Algorithmusentwicklung wurde eine ausgewählte Entwicklungsstufe in einem Ringversuch bei allen Projektpartnern getestet. Die Ergebnisse der umfassenden Untersuchungen wurden auf die materialwissenschaftlichen Modelle übertragen und in einen gemeinsamen Kontext gesetzt.

Im weiteren Projektverlauf kam es zu Verzögerungen, welche Änderungen an der Zeitplanung im Vorhaben nötig machten. Im Konsortium wurden Gegenmaßnahmen erarbeitet und dem Projektträger vorgestellt.

Durch die Fa. MARTIN wurde eine Beschreibung der für den Demonstrator notwendigen Hard- und Software erstellt und die Umsetzung des Demonstrators durchgeführt.

Abschließend erfolgten Validierungsversuche des entwickelten Algorithmus am Fraunhofer IFAM. Hierbei konnte eine verbesserte Dosiergenauigkeit im Vergleich zum Projektstart aufgezeigt werden.

I.3 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Im Konsortium wurde eine Übersicht von Klebstoffen und Lotpasten erarbeitet, welche für die Branche der Mikroelektronik als relevant bewertet wurde. Die Medien wurden anhand ihrer Anwendung (z.B. Underfiller, mech. Fixierung von Chips, elektrische Kontaktierung, etc.) gruppiert. Weiterhin wurden die am häufigsten verwendeten und schnell zugänglichen Standardmaterialien ausgewählt und auf dessen Basis ein Versuchsplan für die nachfolgenden, initialen Dosierversuche zur Bewertung des IST-Zustands erarbeitet. Diese Untersuchung der Dosiergenauigkeit hat gezeigt, dass im Soll/Ist-Vergleich Abweichungen von bis zu 250% vorliegen, d.h. es wurde das 1,5-fache Sollvolumen zu viel ausgetragen.

Zu Beginn der folgenden Entwicklung des Technologie-Demonstrators wurde durch die Fa. MARTIN und die Fa. Finetech ein Lastenheft erstellt, welches die Anforderungen an zukünftige Hard- und Software beschreibt. Dies beinhaltet die Beschreibung der technischen Schnittstellen zur Integration des Demonstrators in Produktionsmaschinen.

Durch das Fraunhofer IFAM wurden die zuvor ausgewählten Materialien rheologisch untersucht und in Materialcluster geordnet. Auf dieser Basis konnte eine materialwissenschaftliche Beschreibung der Cluster erfolgen und eine Vorhersage des Fließverhaltens in Abhängigkeit von Belastung und Temperatur ermöglicht werden.

Durch die materialwissenschaftlichen Beschreibungen der Materialcluster war das Fraunhofer IFAM in der Lage einen Algorithmus zur Steigerung der Dosierpräzision und eine Prozessbeschreibung für die Erstellung neuer Rezepte zur Dosierung neuer bzw. für die Steuerung unbekannter Materialien zu entwickeln. Kern dieses Algorithmus waren materialspezifische Dosierversuche.

Bei der Validierung der neuartigen Algorithmen wurde eine Unzulänglichkeit der Pneumatikeinheit des Demonstrators aufgedeckt. Es wurden Simulationen der Pneumatik durchgeführt und ein Ablaufdiagramm der CD06-Firmware erstellt. Die Fa. MARTIN hat die Unzulänglichkeiten durch Änderungen der Pneumatik und durch Anpassungen der Firmware beheben können. Die Fa. Finetech konnte durch Laborversuche die Wirksamkeit dieser Änderungen nachweisen. Der Nachweis erfolgte unter anderem durch die Integration einer externen Druckmessung seitens des Fraunhofer IFAM und der Fa. MARTIN.

Die vom Fraunhofer IFAM in den rheologischen Untersuchungen ermittelten Materialmodelle der *newtonschen* und *scherverdünnenden* Fluide konnten auf die Dosierversuche übertragen werden. Weiterhin wurde festgestellt, dass die beim Dosiervorgang vorliegenden Drücke in Scherratenbereichen resultieren, bei dem sich die Viskosität (auch bei scherverdünnenden Materialien) nur in geringem Maße ändert. Daher lassen sich die Viskositäten der untersuchten Materialien während des Dosierprozesses mit linearen Regressionen bzw. Materialmodellen beschreiben.

Zur Überprüfung des entwickelten Algorithmus, wurden verschiedene Dosiertests und Algorithmus-Durchläufe bei der Fa. Finetech, der Fa. MARTIN und dem Fraunhofer IFAM durchgeführt, was zu einer iterativen Verbesserung des Algorithmus führte. Die Ergebnisse der umfassenden Algorithmus-Dosierversuche wurden auf die Ergebnisse der Materialcharakterisierung übertragen und in einen gemeinsamen Kontext gebracht. So war es möglich mit Hilfe der Dosiererergebnisse Stützpunkte für rheologische Kurven zu erzeugen.

Eine Anpassung der Software als Grundlage für die Nutzung des neuartigen Algorithmus durch den Demonstrator (u.a. verbessertes Regelverhalten; optimierte Drucksteuerung) wurde durchgeführt und das Vorhaben damit abgeschlossen.

Die Validierungsversuche zum Vergleich der Dosiergenauigkeit zwischen Projektanfang und Projektende ergaben eine Verbesserung um den Faktor 3 – 7, abhängig von den gewählten Dosierparametern.

II. Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Mikroelektronik ist ein Innovationstreiber und eine Schlüsseltechnologie für die deutsche Wirtschaft und findet sich in Systemen für das autonome Fahren, in medizinischen Diagnosesystemen, Kommunikationsbausteinen für die Digitalisierung und Netzsteuerungen für die nachhaltige Energieversorgung. Die Anzahl der mikroelektronischen Komponenten pro System steigt mit den Anforderungen an ihre Funktionalität. Gleichzeitig müssen die Systeme immer höhere Leistungsdichten bei abnehmender Größe realisieren. Da diese Mikroelektronik-Systeme zentral für die Funktionalität von Produkten sind, steigen die Anforderungen an Ausfallsicherheit und Qualität rasant. Ein unerkannter Ausfall elektronischer Baugruppen kann z.B. beim autonomen Fahren zu schweren Unfällen führen. Durch Fortschritte der Halbleitertechnologie stehen miniaturisierte Bauelemente und Sensoren zur Verfügung, jedoch müssen diese elektronischen Komponenten hochgenau zu einer elektronischen Baugruppe verbunden und elektrisch kontaktiert werden, was vornehmlich durch die Fügetechnologien Kleben und Löten realisiert wird. Vermehrt werden neben leitfähigen Klebstoffen zur elektrischen Kontaktierung auch nicht elektrisch-leitende Klebstoffe zur Bauteilfixierung und Wärmeableitung eingesetzt. Für die Fixierung und Kontaktierung der immer kleineren Elemente ist ein sehr präziser Auftrag von sehr geringen Mengen an Klebstoff, bis hinab in den Nanoliterbereich, notwendig. Bei diesem sogenannten Präzisionsauftrag ist die Kontrolle der exakten Auftragsmenge eine bedeutende Herausforderung. In der Aufbau- und Verbindungstechnik können diese geringen Mengen nur automatisiert durch hochgenaue Dosiersysteme appliziert werden. Für die Applikation von diesen Kleinstmengen ist es vorteilhaft im industriellen Serienprozess ein Dosiersystem zu verwenden, das auf einer sogenannten Druck-Zeit-Steuerung basiert. Dabei wird für eine definierte Zeit ein vorgegebener Druck an die Dosierkartusche angelegt, wodurch sich mit entsprechend kleinen Kanülen kleinste Mengen applizieren lassen. Wesentliche Vorteile gegenüber anderen komplexeren volumetrischen Dosiermethoden sind z.B. der sehr einfache Aufbau und der fehlende Kontakt vom Dosiermedium zu Maschinenkomponenten, wodurch der Reinigungsaufwand minimal ist, und Kontaminationen vermieden werden. Durch die extremen Genauigkeitsanforderungen stoßen Druck-Zeit-Dosierungen jedoch an technische Grenzen, da die zu dosierende Menge vom Strömungswiderstand des Mediums und damit von dem oftmals komplexen rheologischen (Fließ-)Verhalten abhängt. Das Fließverhalten wiederum hängt vom Material und nicht-linear von angelegtem Druck, Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsprofil sowie äußeren Bedingungen wie Temperatur und bei härtenden Klebstoffen auch vom Härtingsfortschritt ab. Um die deutlichen Vorteile der Druck-Zeit-Steuerung weiterhin nutzen und andererseits die heutigen Anforderungen zur Präzisionsdosierung erfüllen zu können, müssen die beschriebenen Einflüsse bestmöglich in der Steuerung berücksichtigt werden. Grundlage dafür sind Modelle, welche die zugrundeliegenden rheologischen und prozesstechnischen Zusammenhänge beschreiben können. Derzeit lassen sich die rheologischen Abhängigkeiten von den Prozessparametern Strömungsgeschwindigkeit bzw. Scherrate, Temperatur und Applikationszeit sowie Härtingsfortschritt oder Chargenabweichungen nicht durch eine Softwaresteuerung der Dosieranlage kompensieren. Insbesondere existieren derzeit keine vereinfachenden Modelle für typische Medien in der Präzisionsdosierung und keine vereinfachte Versuchsführung zur Approximation dieser Einflüsse für eine technische Anwendung in einer Druck-Zeit Steuerung.

Das Ziel des KMU-innovativ Projekts RheoDos ist die Entwicklung eines innovativen, neuartigen Dosiersystems für den Präzisionsauftrag von Klebstoffen und Lotpasten, welches Materialdaten durch einfache Dosierversuche erzeugt. Auf Grundlage dieser Daten werden durch eine Algorithmus Regressionen bzw. Materialmodelle erstellt. Mit den sogenannten rheologischen Materialmodellen kann das Fließverhalten der Materialien beschrieben bzw. vorhergesagt werden, wodurch Prozessparameter für den hochpräzisen Auftrag optimiert werden können. Des Weiteren wird das angestrebte Dosiersystem auf einer smarten Zeit-Druck-Steuerung basieren. Dadurch wird es erstmals möglich, die Vorteile dieser Technik, wie beispielsweise einfacher Aufbau, geringer Reinigungsaufwand, geringe Investitionskosten etc., für das hochpräzise Auftragen von Klebstoffen und Lotpasten in der Mikroelektronik zu ertüchtigen.

Die Aufgabenstellung für die Entwicklung der innovativen Steuerung basiert auf drei Entwicklungsstufen. Zum einen werden durch Materialprüfungen im Labor Materialmodelle von typischen, in der Mikroelektronik eingesetzten Klebstoffen und Lotpasten aufgestellt und in Kategorien zusammengefasst. Im Anschluss wird eine Abfolge von Dosierversuchen erforscht, mit dessen Ergebnis das Material einer Kategorie zugeordnet werden kann und Dosierparameter optimiert werden können. Die dritte Entwicklungsstufe bringt einen Algorithmus hervor, welcher den Anwender durch die einfachen Dosierversuche leitet und mithilfe der Ergebnisse die Optimierung der Dosierparameter vollzieht. Die Ergebnisse der Dosierversuche sowie die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in einer Materialdatenbank für zukünftige Dosierungen abgespeichert. Auf Basis der Ergebnisse dieser Entwicklungsstufen werden Konzepte für die smarte Dosiersteuerung in Hardware und Software erstellt und durch den Bau eines Technologie-Demonstrators umgesetzt. Nach Fertigung dieses Demonstrators wird die Applikationsgenauigkeit bei variierenden Prozessparametern durch Versuche unter realen Bedingungen in einem Fertigungsbetrieb überprüft.

Die Projektpartner im Konsortium bieten alle Voraussetzungen, um das Vorhaben erfolgreich durchführen zu können. So hat das Fraunhofer IFAM in Bremen aufgrund der technischen Ausstattung, wie auch durch Erfahrungen in vorangegangenen Projekten das Knowhow und die Möglichkeiten die materialwissenschaftliche Basis zur Erstellung eines Algorithmus zu erarbeiten. Die Fa. MARTIN in München hat langjährige Erfahrung in der Konzeption und der Produktion von Dispensern. Ergänzt wird das vorhandene Knowhow durch das Applikationswissen und die Erfahrungen der Integration von Dispens-Systemen in automatischen und halbautomatischen Produktionsmaschinen bei Fa. Finetech in Berlin.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Das Vorhaben basiert auf dem Gerät „CleverDispense 06“ (CD06) der Fa. MARTIN. Dieses Gerät ist in der 6. Revision am Markt etabliert und basiert auf dem Patent DE 42 18 064 A1 zum volumengenauen Dosieren mit Hilfe einer schnellen Überwachung der Druckverhältnisse und der empirischen Erarbeitung von Materialeigenschaften.

Der fortschreitende Trend in der Miniaturisierung in der Mikroelektronik und der Optik führt zunehmend zu kleineren Bauteilen und somit zu einem Bedarf an ein Dosiergerät für präzise dosierte Kleinstmengen von Klebstoffen und Lotpasten. Der CD06 kommt, aufgrund der gestiegenen Anforderungen, zunehmend an seine Grenze und es bedarf eines neuen Ansatzes zur Ermittlung der Materialparameter und zur Optimierung der Dosierparameter.

Weiterhin soll es Anwendern mit wenig Erfahrung in der Dosiertechnik sowie bei Materialien mit unbekanntem Dosierparametern ermöglicht werden, gute Ergebnisse bei der Dosierung ohne zeitintensive Einrichtung zu erzielen. Weiterhin werden durch den einfachen Aufbau und die einfache Kalibrierung für den Anwender Zeit und Kosten gespart. Zudem ergeben sich umwelttechnische Vorteile durch einen geringeren Materialbedarf beim Anfahren der Prozesse und es sind wegen der smarten Steuerung wenig Fehlteile zu erwarten.

Die scherverdünnenden Eigenschaften der meisten Klebstoffe und Lotpasten können zudem die exakte Dosierung erschweren, da sich abhängig von den weiteren Dosierbedingungen, wie zum Beispiel Dosiernadelgröße und -länge, die Scherrate und damit auch die Viskosität des Materials ändern kann. Im Allgemeinen lässt sich das Fließverhalten und die Scherratenabhängigkeit von Polymeren bzw. Reaktionsklebstoffen in zeitabhängiges Verhalten und belastungsabhängiges Verhalten unterteilen. Die Abhängigkeit der Viskosität von der Zeit unter konstanter Scherbeanspruchung wird als *Thixotropie* oder *Rheopexie* bezeichnet, die Abhängigkeit vom Volumenstrom bzw. der Scherrate als *Dilatanz* oder *Strukturviskosität*. Sehr oft sind Klebstoffe vom Klebstoffhersteller thixotrop und strukturviskos eingestellt, um ein Abfließen des Klebstoffs auf den Substratoberflächen zu verhindern. Strukturviskoses (auch scherverdünnendes) Verhalten zeichnet sich dadurch aus, dass die Viskosität bei zunehmender Scherung abnimmt. Es handelt sich demnach um ein belastungsabhängiges Verhalten, dessen Hauptursache das Entwirren und Abgleiten von Polymerketten ist, welches bei hohen Scherraten begünstigt wird. Dem gegenüber steht die Thixotropie, bei der zusätzlich zur Strukturviskosität auch konstante Scherraten eine vorübergehende Reduzierung der Viskosität bewirken. Dieses Verhalten ist vorrangig auf die Auflösung intermolekularer Wechselwirkungen zurückzuführen.

Eine veränderte Viskosität führt bei einer einfachen Steuerung über Druck und Zeit zu geringeren Dosiergenauigkeiten. Momentan wird Anwendern zum einen Erfahrung in der Dosiertechnik und zum anderen Erfahrung mit den zu dosierenden Materialien abverlangt, um präzise Dosierergebnisse zu erzielen. Bei unerfahrenen Anwendern oder erfahrenen Anwendern ist bei neuen Materialien ohne Kenntnis der Dosierparameter mit einer zeitintensiven Einrichtung sowie einem erheblichen Materialaufwand zur Einrichtung zu rechnen.

Wie oben beschrieben ist die Motivation für dieses Forschungsprojekt die Entwicklung eines Technologie-Demonstrators, um Klebstoffe und Lotpasten präzise aufzutragen. Durch die einfache und angeleitete Erzeugung von Materialdaten und mit Hilfe von rheologischen Modellen sollen Prozessparameter optimiert werden. Dies ermöglicht eine präzisere Dosierung und eine einfache, wirtschaftliche Anwendung in der Mikroelektronik.

Die Entwicklung umfasst Laborprüfungen zu den rheologischen Eigenschaften der ausgewählten Materialien, Dosierversuche zur initialen Genauigkeit des Referenzgeräts sowie zu den erreichten Genauigkeitsverbesserungen zum Projektende. Weiterhin sind die Entwicklung von Hard- & Software des Technologie-Demonstrators, die Entwicklung eines Algorithmus zur geleiteten Ermittlung der Materialparameter und anschließender Anpassung der Dosierparameter Teil der Entwicklung.

Während des Projekts kam es, unter anderem durch erkannte Schwächen des Referenzgeräts CD06, zu Projektverzögerungen, da bei den Dosierversuchen hohe Druckabweichungen festgestellt wurden. Bis zur Korrektur dieser Unzulänglichkeit mussten weitere Dosierversuche verschoben werden, da die Ergebnisse nicht verlässlich waren. Dies führte zu Verzögerungen

im Projekt. Eine ausführliche Beschreibung des Projektablaufs inkl. aufgetretener Verzögerungen ist im folgenden Kapitel II.3 dargestellt.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablaufplan des Vorhabens ist in Abbildung 1 dargestellt. Die durchgeführten Arbeiten sind im Folgenden textlich beschrieben.

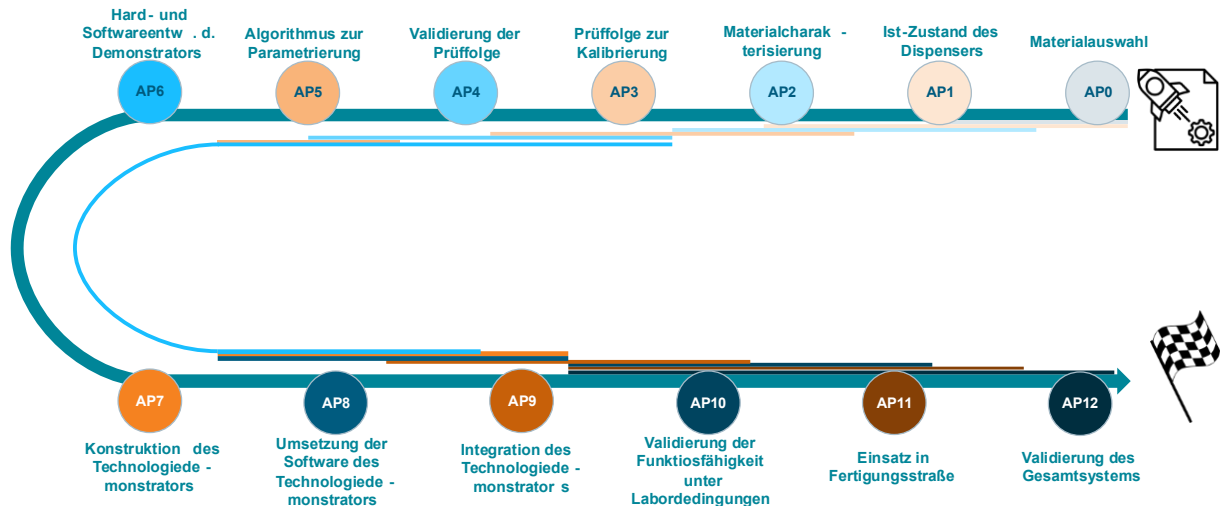


Abbildung 1: Ablaufplan des Vorhabens dargestellt anhand eines Zeitstrahls mit den geplanten Arbeitspaketen.

Begonnen wurde mit einer Sammlung von Materialkenndaten, anhand derer eine Vorauswahl getroffen wurde und Muster der entsprechenden Klebstoffe beschafft wurden. Entlang der einzelnen Komponenten des Dosierprozesses wurden verschiedene Einflüsse auf das rheologische Verhalten der Materialien identifiziert, die einen Einfluss auf das dosierte Volumen besitzen, und in einer Übersicht dargestellt (Abbildung 2). Zeitgleich wurden für den angestrebten Technologie-Demonstrator Schnittstellen zur Kommunikation, Energieversorgung und Druckversorgung definiert.

Zum Abprüfen der initialen Dosiergenauigkeit des Referenzgeräts zu Projektbeginn wurde ein umfangreicher Versuchsplan entwickelt. Es wurden 1620 Einzeldosierungen durchgeführt, um verschiedene Dosier- & Peripherie-Parameter abzudecken und statistisch gesicherte Ergebnisse zu erhalten.

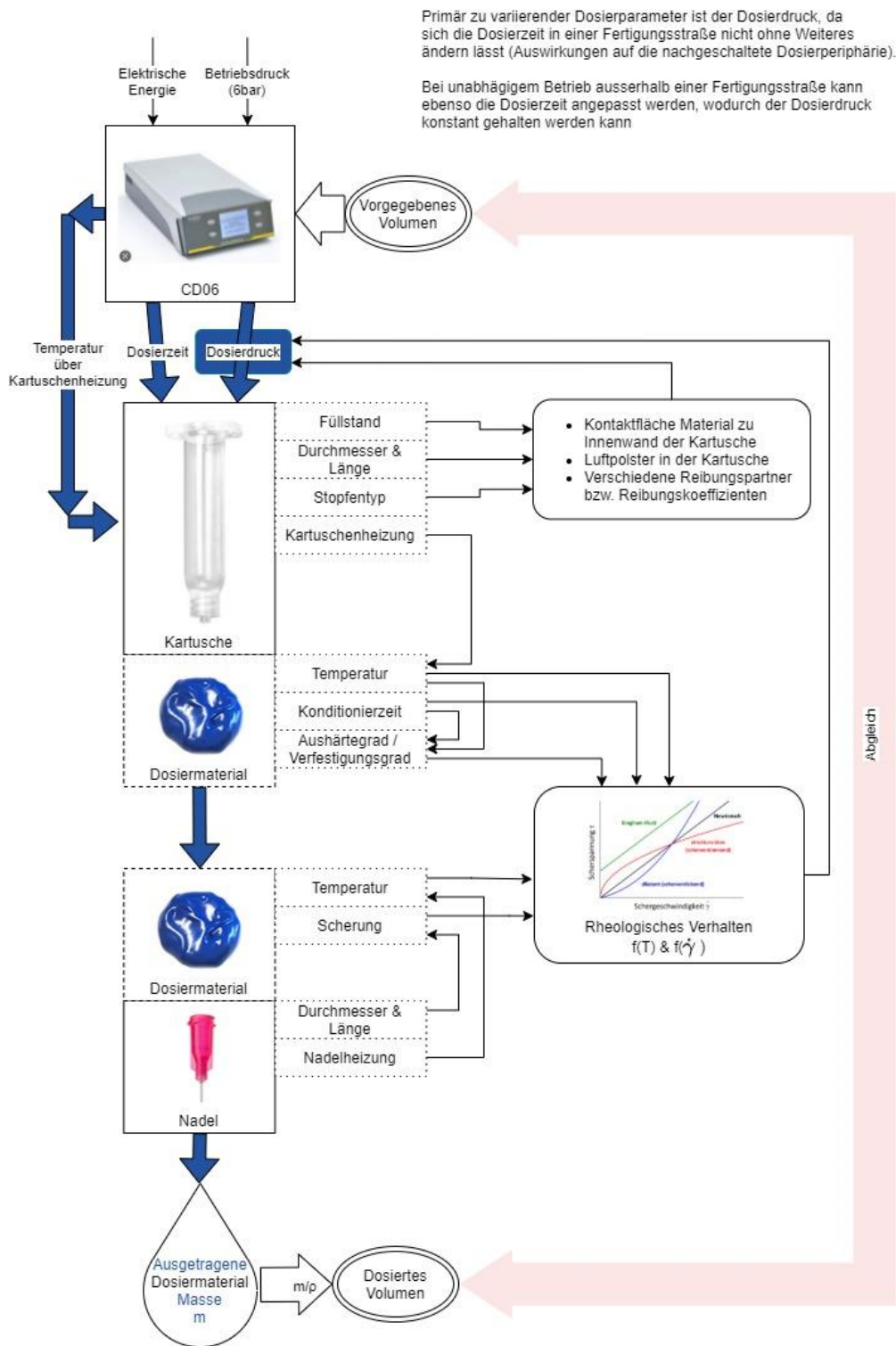


Abbildung 2: Schema über die bedeutenden Parameter bei der Dosierung entlang der Dosierhardware.

Die Materialien der Vorauswahl wurden hinsichtlich ihrer scherratenabhängigen Viskosität und ihrem Thixotropieverhalten mittels eines Rotationsrheometers sowie ihr Glasübergang und ihre Reaktionsenthalpie mit Hilfe einer DSC (*differential scanning calorimetry*) charakterisiert. Die rheologischen Messungen wurden mit etablierten rheologischen Modellen gefittet, während die Aushärtereaktion kinetisch modelliert wurde, um eine Vorhersage zur Vernetzung unter verschiedenen Temperaturen und zu verschiedenen Zeitpunkten treffen zu können.

Anhand dieser Daten wurde die Vorauswahl geclustert (newtonsch & scherverdünnend) und auf die finalen vier Klebstoffe eingeschränkt. Es wurden jeweils zwei Klebstoffe aus dem newtonschen bzw. dem scherverdünnenden Cluster ausgewählt. An diesen Klebstoffen wurden die zuvor beschriebenen Dosierversuche mit 1620 Einzeldosierungen und entsprechend 3240 Datenpunkten durchgeführt, um die rheologischen Modelle auf diese Daten anwenden zu können und eine geeignete Prüfabfolge zu entwickeln. Zunächst wurde das Volumen der einzelnen Dosierpunkte mit einem einfachen Volumenmessgeräts ermittelt, bei dem die dosierten Punkte durch eine Glasplatte auf eine definierte Höhe verpresst werden und das Volumen über den Durchmesser mit Hilfe einer Skala abgelesen werden kann. Diese Ergebnisse waren aber aufgrund zu großer Skalenschritte ungenügend genau für eine wissenschaftliche Untersuchung. Daher wurde mittels eines Pyknometers die Dichte der Klebstoffe bestimmt und fortan das dosierte Volumen über eine Analysenwaage ($d = 0,01$ mg) mit Hilfe der Dichte berechnet.

Während der Dosierversuche wurden unerwartete Effekte erkannt, die mit Hilfe eines Drucksensors auf Druckungenauigkeiten des Dispensers zurückgeführt werden konnten. Auch das Dosieren bei simultaner Druckmessung mittels eines eigens entwickelten Adapters war nicht erfolgreich, da die Druckabweichungen nicht reproduzierbar waren. Dieses Problem führte in der Folge zu Verzögerungen und Abweichungen im Projektablauf, da anhand von ungenauen Daten eine Verbindung zwischen rheologischen Modellen und den durchgeführten Dosierversuchen nicht möglich war.

Die benötigten Verbesserungen in Bereich der Druckgenauigkeit wurden in das Konzept und Lastenheft zur Erstellung des Technologie-Demonstrators eingearbeitet, während zeitgleich die iterative Entwicklung des Algorithmus begann. Sowohl hardware- als auch softwareseitig wurden nötige Verbesserungen zur Erhöhung der Druckgenauigkeit konzipiert und als Technologie-Demonstrator umgesetzt. Zur Überprüfung der erreichten Verbesserungen wurde zunächst ein Ringversuch durchgeführt, der auch die Prüfung des Demonstrators in fertigungsnaher Umgebung beinhaltete. Der in der Zwischenzeit finalisierte Dosieralgorithmus wurde abschließend mit erneuten Dosierversuchen validiert und die erreichten Verbesserungen der Dosiergenauigkeit mit denen zu Projektbeginn abgeglichen. Weiterhin wurden finale rheologische Messungen durchgeführt, mit denen erfolgreich die Ergebnisse der Dosierversuche in die rheologischen Kurven eingefügt werden konnten.

Die durchgeführten Arbeiten waren zur Erreichung des Projektziels sowohl notwendig als auch angemessen. Die Definitionsphase mit der Materialauswahl war notwendig, um die zu untersuchenden Materialien auf ein angemessenes Maß zu reduzieren. Die folgenden Dosierversuche deckten Probleme am Gerät auf, deren Lösung zur Zielerreichung unerlässlich war. Ebenso waren die iterative Erstellung des Algorithmus inklusive der dazugehörigen weiteren Versuche sowie der Validierung als eines der Kernelemente des Projektes notwendig. Die verschiedenen rheologischen Messungen waren zur Einstufung der Materialien und sowie zum Abgleich des Materialverhaltens angemessen.

Aufgrund der im Projektverlauf aufgetretenen Herausforderungen ergab sich ein geänderter Ablaufplan. Die hauptsächlichen Änderungen sind eine größere Parallelisierung vieler Arbeitspakete, dargestellt durch die großen, mehrere Arbeitspakete umfassenden Blasen sowie iterative Entwicklungsschritte für die Dosiersversuche und Algorithmusentwicklung (Abbildung 3).



Abbildung 3: Tatsächlicher Projektablauf mit iterativen Entwicklungsschritten

Ein entsprechend aktualisiertes Balkendiagramm, welches um die kostenneutrale 3-monatige Verlängerung ergänzt ist, ist in Abbildung 4 dargestellt.

Balkenplan	Projektmonat:	Projektverlauf																										
		Projektstart			1. Projektjahr												2. Projektjahr											
Beschreibung		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Projektmanagement		[Ganzes Projekt]																										
Materialauswahl		[Monat 1-3]																										
Bestimmung IST-Zustand der Referenz CD06		[Monat 1-4]																										
Charakterisierung der ausgewählten Materialien, Auswahl und Clusterung Materialmodelle		[Monat 1-5]																										
Erforschung einer Prüffolge von Applikationsversuchen zur Parametrisierung des passenden Materialmodells		[Monat 1-6]																										
Validierung der Prüffolge und Applikationsversuche von Referenzmaterialien zur Bestimmung der Dosierqualität		[Monat 1-7]																										
Entwicklung einer Automatisierung des Auswahl- und Parametrisierungsalgorithmus		[Monat 1-8]																										
Konzeptentwicklung zur Hard- und Software eines Technologiedemonstrators		[Monat 1-9]																										
Verbesserung der Druckgenauigkeit des Technologiedemonstrators		[Monat 1-10]																										
Ringversuche zur Ermittlung der Dosiergenauigkeit		[Monat 1-11]																										
Validierung des Algorithmus inkl. Anpassungen		[Monat 1-12]																										
Prüfung des Technologiedemonstrators in fertigungsnaher Umgebung		[Monat 1-13]																										

Abbildung 4: Aktualisiertes Balkendiagramm zum Projektverlauf wie durchgeführt.

II.4 Erzielte Ergebnisse

Materialauswahl von Klebstoffen und Lotpasten in der Mikroelektronik (MARTIN, Finetech, IFAM)

In gemeinsamer Absprache haben alle Partner (Fa. MARTIN, Fa. Finetech, Fraunhofer IFAM und der assoziierte Partner Fa. iCHaus) einen Marktüberblick mit über 70 verschiedenen Systemen generiert. Aus diesen wurde eine exemplarische Auswahl von 23 Klebstoffen getroffen, welche für verschiedene Anwendungen in der Mikroelektronik eingesetzt werden und für anstehende Charakterisierungen beschafft wurden (Abbildung 5). Dabei wurden überwiegend Systeme mit einer langen Topfzeit gewählt, um den Einfluss der Härtungskinetik zu minimieren.

Lfd.-Nr.	Materialkategorie	Chemische Basis	Hersteller	Name	Topfzeit	Viskosität / mPas	Tg	Aushärtung
1	Klebstoffe	2K Epoxy	APM Technica	APM Epsilon 2103	8 h	500	70 bis 80°C	RT oder heißhärtend
2	El. leitf. Klebstoffe	1K Epoxy, el. leitfähig	DELO	MONOPOX AC268	72h	28000	153°C	Heißhärtend
3	El. leitf. Klebstoffe	2K EP, el. leitfähig	Epotek	H20E	2,5d	2700	>80°C	3h@80°C; 45s@175°C
4	Klebstoffe	2K Epoxy	Epotek	H70E	56h	5500	>80°C	90min@80°C; 1min175°C
5	Underfiller	1K Epoxy	Henkel	Loctite ECCOBOND E 1173	48h	7500	160°C	Heißhärtend
6	El. leitf. Klebstoffe	1K Silikon	Henkel	Ablestik ICP4000	2d@RT	30000	-45°C	Heißhärtend
7	KS in Optoelectronic	UV Acrylat	Henkel	Ecobond LUX OGR150HTG	3m @25°C	1000	145°C	UV 365 nm
8	Underfiller	1K EP	Henkel	Ecobond UF3810	25% ink. Vis in3d	400	102°C	Heißhärtend
9	Klebstoffe	1K EP	Henkel	Loctite D125F	3m @RT	350000	85°C	Heißhärtend
10	Lotpaste - Kühlschrank	Sn95,5Ag4Cu0,5	Martin SMT	VD90.0320	k.A.	50000	k.A.	Abkühlen
11	Lotpaste - Kühlschrank	Sn96,5Ag3Cu0,5	Martin SMT	VD90.0317	>48h	90000	k.A.	Abkühlen
12	Sinterpasten - Temperatur und Druck für Prozess benötigt	k.A.	Nanojoin	NJ-Dispense	k.A.	17000	k.A.	Abkühlen
13	El. leitf. Klebstoffe	2K EP, el. leitfähig	Panacol	Elecolit 325	k.A.	45000	k.A.	4min@150°C
14	Klebstoffe	1K UV-EP	Panacol	Vitralit 1657	3d	10000	20-40°C	LED-Härtung
15	Klebstoffe	1K UV-EP	Panacol	Vitralit 2655	3d	250	30-40°C	UV+heißhärtend
16	El. leitf. Klebstoffe	1K Polyurethan, el. leitfähig	Polytec PT	PU 1000	-	15000	<23°C	23 °C, 4 h
17	El. leitf. Klebstoffe	2K Epoxy, el. leitfähig	Polytec PT	EC 101	48h	12000	74°C, TM 501	Heißhärtend
18	El. leitf. Klebstoffe	2K Epoxy, el. leitfähig	Polytec PT	EC 151 L	48h	5000	75°C, TM 501	Heißhärtend
19	Klebstoffe	2K Epoxy	Polytec PT	EP 601	4h	460	73°C	48h@RT
20	Klebstoffe	2K Epoxy	Polytec PT	EP 642	1d	1000	150°C	15min@180°C
21	El. leitf. Klebstoffe	1K Epoxy, el. leitfähig	Protavic	ACE 10131	48h	2000	75°C	30-60min@100°C
22	Klebstoffe	1K Epoxy	Protavic	ANE 10713	k.A.	11000	110°C	110s@130°C
23	Underfiller	1K Epoxy	Protavic	ANE 10932	3 days	25000@25°C; 580@70°C	145°C	30min@110°C

Abbildung 5: Finale Auswahl von 23 Klebstoffen, die in den ersten Untersuchungen verwendet werden sollen.

Bestimmung des IST-Zustands (MARTIN, Finetech, IFAM)

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde ein Testplan erstellt, welcher der Bestimmung des IST-Zustandes als Referenz dienen soll. Es wurden Dosiersversuche mit verschiedenen Dosierparametern wie *Sollvolumina*, *Umgebungstemperatur*, *Kartuschenfüllstand* und *Dosiernadelgröße* mit drei branchentypischen Dosiermedien geplant und durchgeführt. Dies diente zur Untersuchung des IST-Zustands der Dosiergenauigkeit der Referenz Clever Dispense 06. Die Dosierparameter wurden im Konsortium diskutiert und entsprechend des zu

dosierenden Materials gewählt. Die Übersicht der Dosierversuche ist in Abbildung 6 dargestellt.

Innerhalb der Studie zum IST-Zustand wurden insgesamt 1.620 Einzeldosierungen ausgewertet (4 Kartuschenvarianten x 3 Volumina x 3 Temperaturen x 15 Dosierungen = 540 Dosierungen pro Material x 3 Materialien = 1.620 Dosierungen).

Material 1: Loctite D125-F									
Dosiernadel		Füllstand		Sollvolumina			Temperaturen		
Groß, z.B. I-Ø=0,41 mm (blau)	Klein, z.B. I-Ø=0,31 mm (Orange)	Voll	Halbvoll	3 mm ³	1 mm ³	0,5 mm ³	30 °C	35 °C	40 °C
x		x							
x			x						
	x	x		x	x	x	x	x	x
	x		x						

Material 2 & 3: Lotpaste Typ 3&6									
Dosiernadel		Füllstand		Sollvolumina			Temperaturen		
Groß, z.B. I-Ø=0,41 mm (blau)	Klein, z.B. I-Ø=0,31 mm (Orange)	Voll	Halbvoll	1 mm ³	0,5 mm ³	0,1 mm ³	22 °C	28 °C	35 °C
x		x							
x			x						
	x	x		x	x	x	x	x	x
	x		x						

Abbildung 6: Übersicht der Dosierversuche zur Bestimmung des IST-Zustands für ein Material

Die Untersuchungen wurden sowohl bei der Fa. MARTIN als auch bei der Fa. Finetech durchgeführt. Die Versuchsaufbauten der beiden Firmen sind in der nachfolgenden Abbildung 7 dargestellt.

Die beim Dosierprozess applizierten Mengen wurden mit Hilfe einer Feinwaage bestimmt. Da die Massen der einzelnen Dosierpunkte sehr gering sind und handelsübliche Feinwaagen an die untere Grenze ihrer Auflösung gelangen, wird eine Applikationsreihe von 15 Einzeldosierungen gewogen. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse, wird der Abstand von Dosiernadel zum Substrat konstant gehalten bei 1/2 x Dosiernadeldurchmesser.

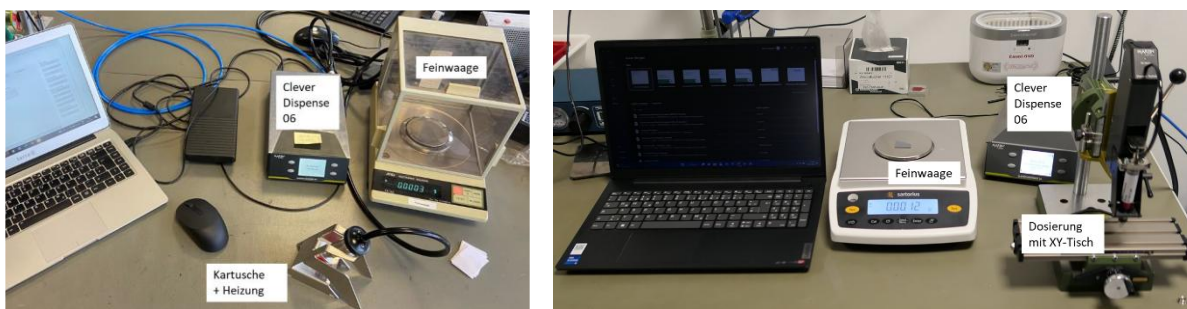


Abbildung 7: Aufbauten zur Durchführung der Testreihen; links: Fa. MARTIN, rechts: Fa. Finetech

Der Ist-Zustands des Referenz-Dosiergeräts Clever Dispense06 wird anhand eines Soll-Ist-Vergleichs des applizierten Gewichts beurteilt. Die anzustrebende Genauigkeit liegt bei 100% und entspricht folgender Gleichung

$$\frac{\text{Ist} - \text{Gewicht}}{\text{Soll} - \text{Gewicht}} = 1 \triangleq 100\%$$

Dieses Verhältnis kann als Maß der Dosiergenauigkeit verstanden werden.

Exemplarisch wird in der Abbildung 8 die erreichten Genauigkeiten beim Henkel Loctite D125-F in Abhängigkeit von Dosiernadelgröße sowie Temperatur dargestellt.

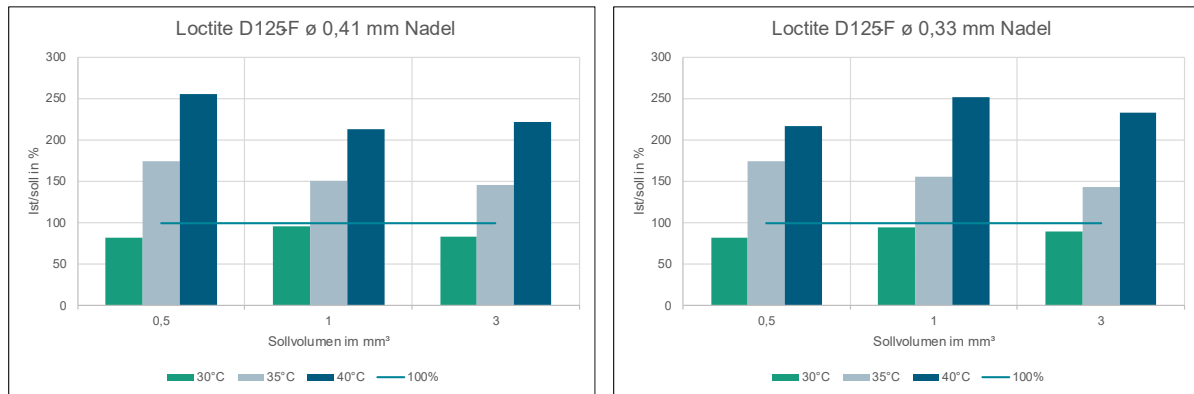


Abbildung 8: Darstellung des Einflusses des Dosiernadelinnendurchmesser (links: 0,41 mm; rechts: 0,33 mm) und der Temperatur auf die ausgetragene Menge

Es ist zu erkennen, dass die gewählte Nadelgröße kaum einen Einfluss auf das Ist-zu-Soll-Verhältnis nimmt, viel mehr wirkt sich die Temperatur auf die ausgetragene Menge aus. Je nach herrschender Umgebungstemperatur wurden Ist-zu-Soll-Verhältnisse von bis zu 250 % ermittelt. Dies bedeutet, dass das 1,5-fache Sollvolumen zu viel ausgetragen wurde.

In der folgenden Abbildung 9 links ist die Dosierreihe des SMD-Klebstoff Henkel Loctite D125F mit einem Sollvolumen von 1 mm³ bei 40 °C dargestellt. Neben den bereits erwähnten Einfluss des Nadeldurchmessers auf die Dosiergenauigkeit ist in der folgenden Abbildung-links ersichtlich, dass der Soll-Ist-Vergleich bei Martin und Finetech verschiedene Ergebnisse aufweist trotz gleicher Dosiernadelgröße und Dosierparameter. Als Erkenntnis kann hieraus gewonnen werden, dass auch die Peripherie der Dosiersystems wie *Stopfentyp*, *Kartuschenfüllstand*, *Art der Temperierung des Dosiermediums* einen starken Einfluss auf die ausgetragene Menge nimmt.

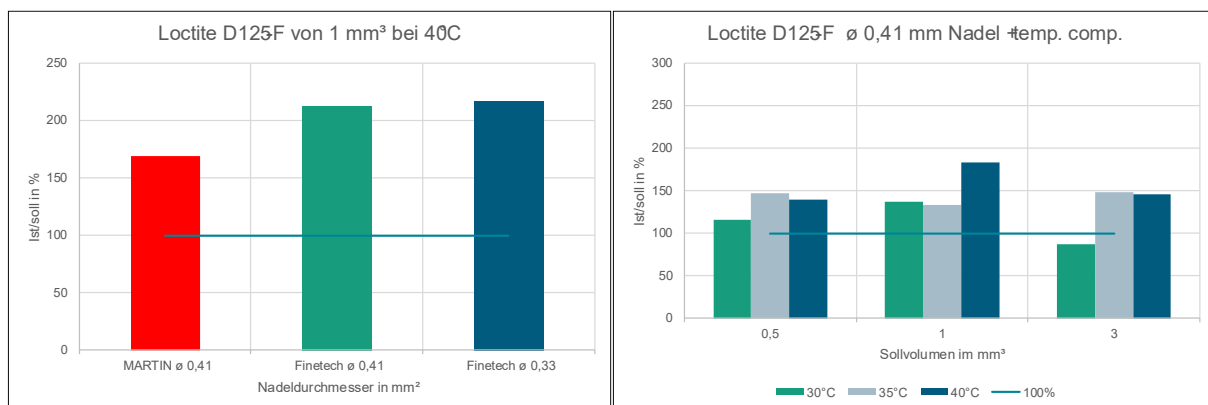


Abbildung 9: Beispielhafte Auswertungen des IST-SOLL-Vergleichs; links: Einfluss der Dosiergerät-Peripherie; rechts: Einfluss einer Temperaturkompensation

Abbildung 9 rechts zeigt die gleiche Versuchsreihe wie Abbildung 8 links, aber mit eingeschalteter Temperaturkompensation. Diese bereits im CD06 implementierte Temperaturkompensation verbessert die Dosierqualität, jedoch wurden auch bei aktivierter Kompensation Abweichungen vom Sollwert von bis zu 80 % erreicht.

Charakterisierung der ausgewählten Materialien, Auswahl und Clustering Materialmodelle (IFAM)

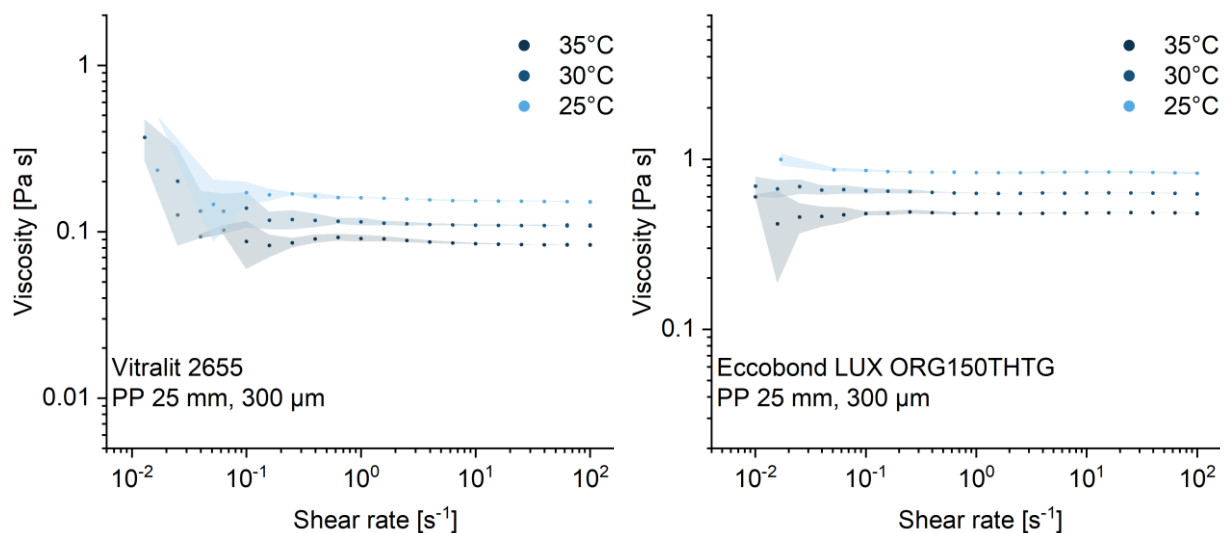
Es sind insgesamt 23 Materialien untersucht worden. Zur Charakterisierung der ausgewählten Materialien wurden folgende Untersuchungen durch das Fraunhofer IFAM durchgeführt:

- a) Rheologische Messungen am Rotationsrheometer für alle Materialien zwischen parallelen Platten ($\varnothing 25$ mm)
 - Scherraten-Sweeps: logarithmisch von $0,01$ bis 100 s^{-1} , 21 Messpunkte bei $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, Vorscherung bei $0,01 \text{ s}^{-1}$ für 30 s
 - ➔ Untersuchung der scherratenabhängigen Viskositätsänderung
 - Scherraten-Sprünge (Sprung 1: $0,1 \text{ 1/s}$ für 1 min; Sprung 2: 10 1/s für 10 min)
 - ➔ Untersuchung der zeitabhängigen Viskositätsänderung (Thixotropie-Test)

➔ Festlegung von Material-Clustern

Die Ergebnisse werden repräsentativ für zwei Materialien der Cluster „Newtonsches“ und „Scherverdünnend“ dargestellt, um die Ergebnisdarstellung übersichtlich zu gestalten.

Die Viskosität des Materialclusters „Newtonsches“ ist nicht abhängig von der Scherbelastung und konstant. Lediglich unter Temperatureinfluss verringert sich die Viskosität (vgl. Abbildung 10).

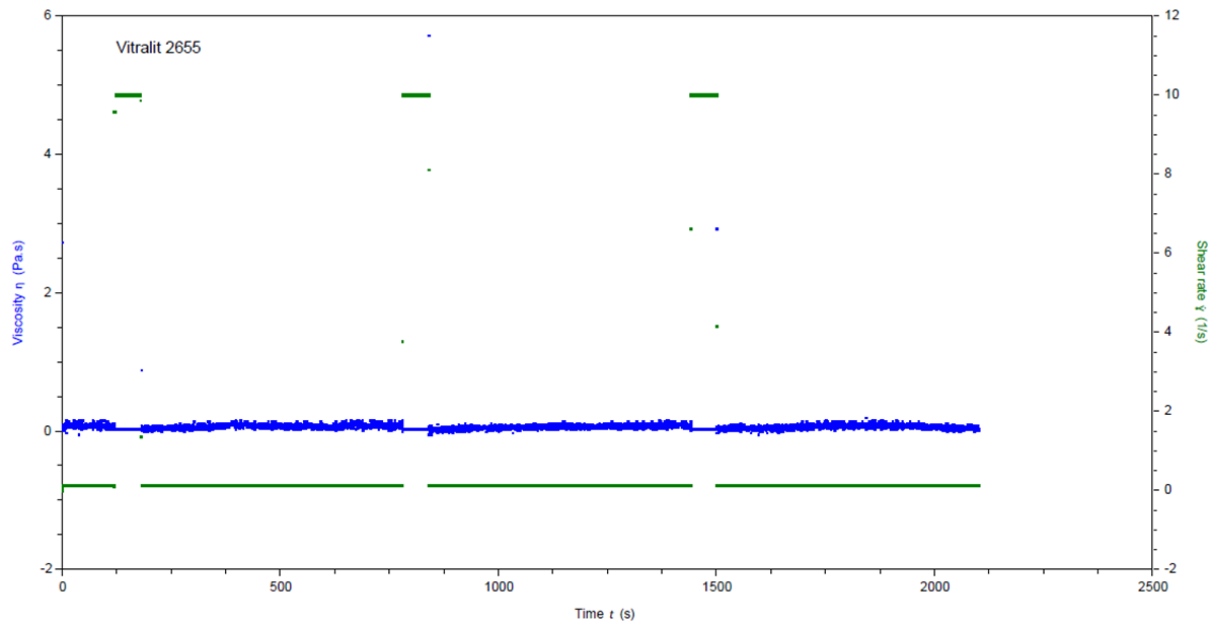


a) UV-Epoxidharz Vitralit 2655

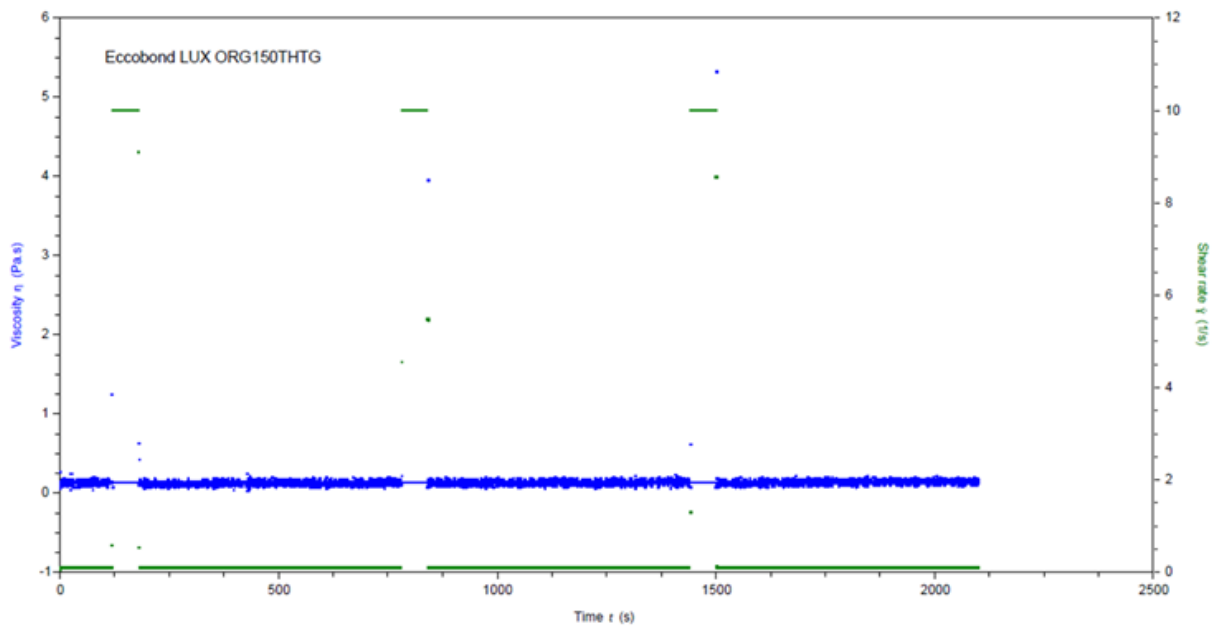
b) UV-Acrylat Eccobond LUX OGR150THTG

Abbildung 10: Temperatur- und scherratenabhängige Viskosität zweier Newtonscher Materialien

Eine Zeitabhängigkeit der Viskosität liegt nicht vor wie die Ergebnisse der Scherratensprünge in Abbildung 11 zeigen.



a) UV-Epoxidharz Vitralit 2655



b) UV-Acyrlat Ecobond LUX OGR150THTG

Abbildung 11: Zeitabhängige Viskosität zweier Newtonscher Materialien im Thixotropie-Test

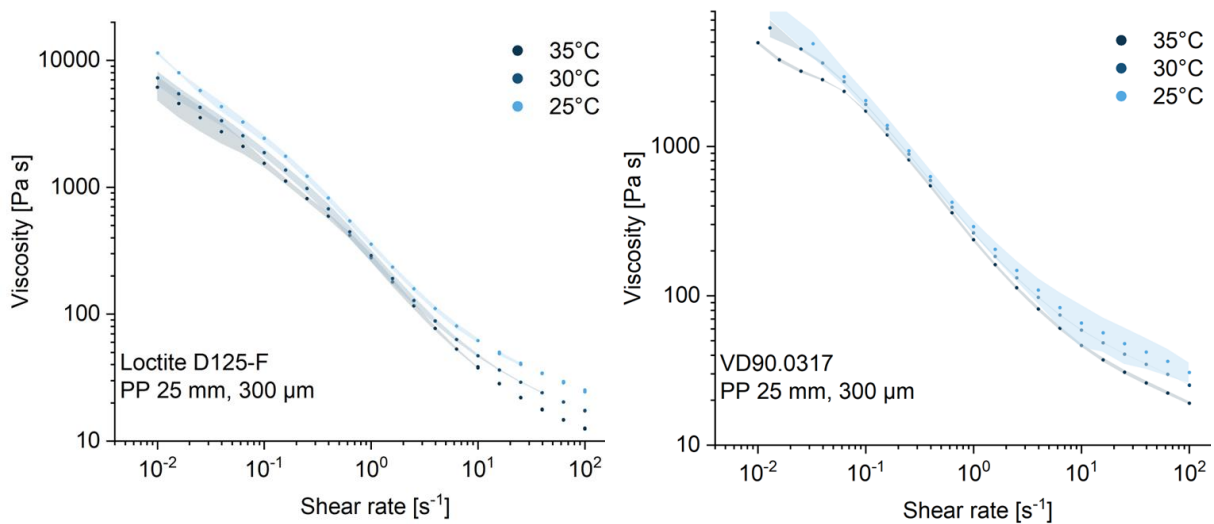
Für die Dosierung ist ein linearer Zusammenhang anzunehmen: $\sigma = \eta \dot{\gamma}$

Zum Cluster „Newtonsche Materialien“ gehören folgende, in der Tabelle genannten Materialien:

Tabelle 1: Materialcluster "Newtonsch"

ANE 10932	Eccobond UF3810
APM Epsilon 2103	Polytec EP 601

Die Viskosität der Materialien des Materialclusters "Scherverdünnend" ist scherratenabhängig und verringert sich mit zunehmender Scherbelastung. Auch unter Temperatureinfluss verringert sich die Viskosität (Kurvenshift), vgl. Abbildung 12.

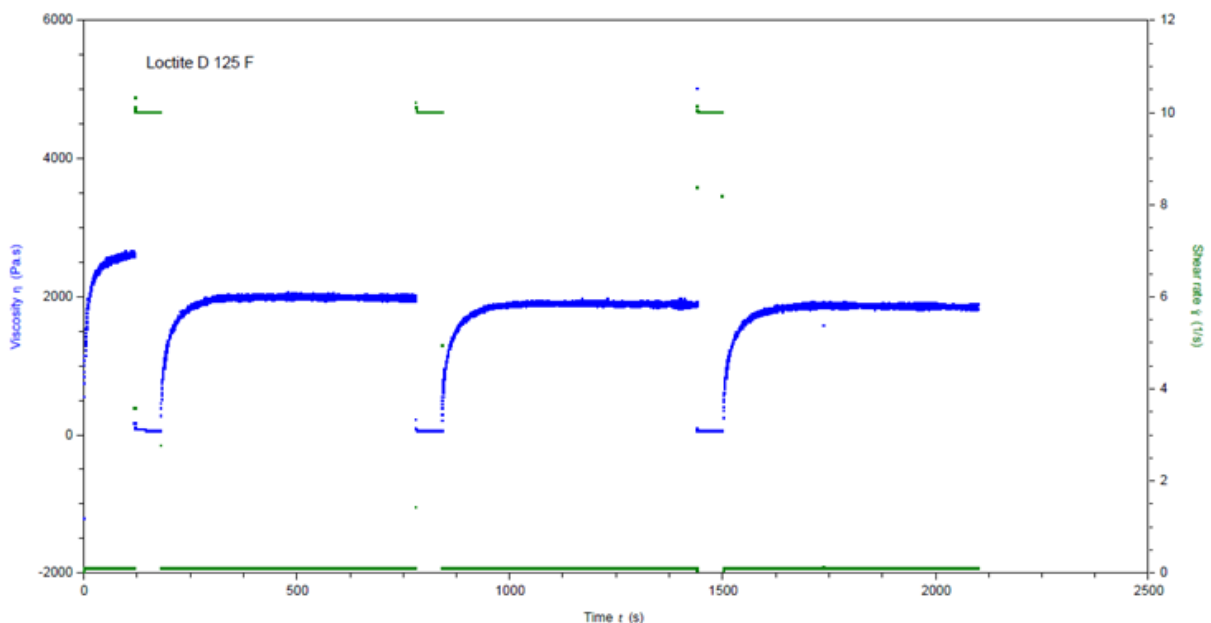


a) 1K-Epoxidharz Loctite D125-F

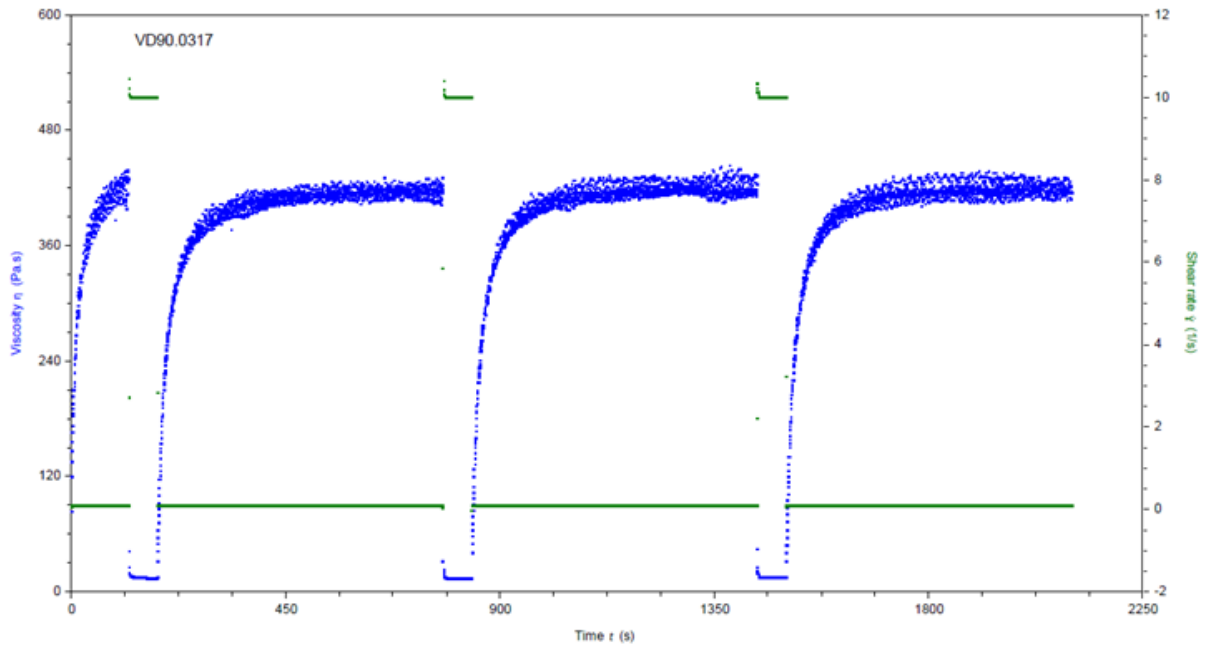
b) Lotpaste VD90.0317

Abbildung 12: Temperatur- und scherratenabhängige Viskosität zweier scherverdünnender Materialien

Eine Zeitabhängigkeit der Viskosität liegt vor; Die Rückbildung der Struktur bzw. das Erreichen von mind. 80% der Viskosität des ersten Messschrittes bei Low-Shear-Bedingungen ($0,1 \text{ s}^{-1}$) ist gut erkennbar (vgl. Abbildung 13).



a) 1K-Epoxidharz Loctite D125-F



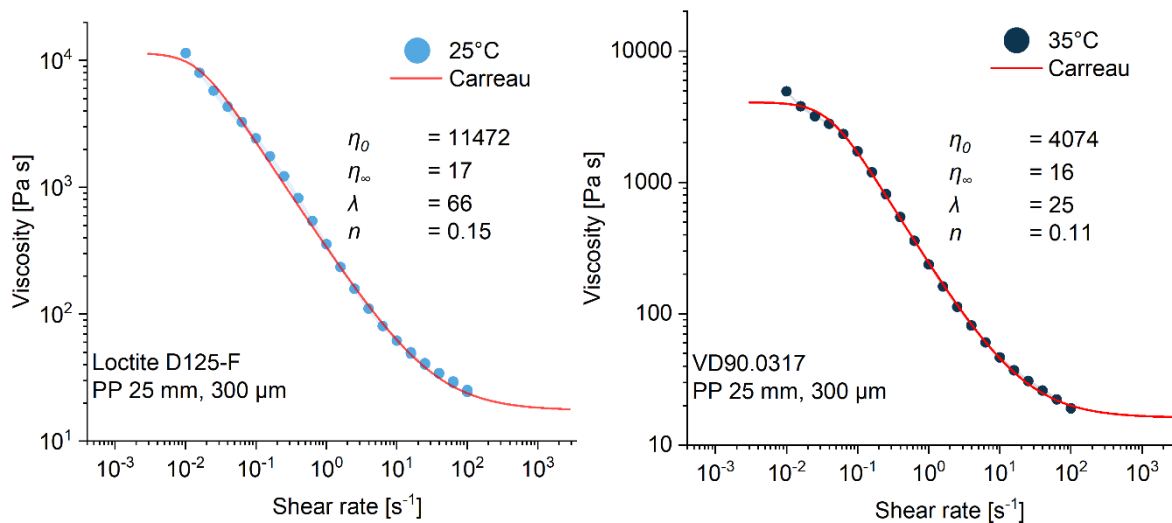
b) Lotpaste VD90.0317

Abbildung 13: Zeitabhängige Viskosität zweier scherverdünnender Materialien im Thixotropie-Test

Für die Dosierung ist ein nicht-linearer Zusammenhang der Viskosität mit den untersuchten Dosierparametern anzunehmen. Für diese Materialien eignet sich eine Beschreibung der scherratenabhängigen Viskosität mit dem rheologischen Modell nach Carreau (Carreau, 1972):

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}}$$

Das Modell mit materialspezifischen Koeffizienten der Nullviskosität bei keiner Scherung η_0 , der Viskosität bei unendlich großer Scherrate η_{∞} , der charakteristischen Zeit λ und dem Exponentialindex n , sind beispielhaft für jeweils eine Temperatur für die beiden repräsentativen scherverdünnenden Materialien in Abbildung 14 dargestellt. Die zum Cluster „Scherverdünnend“ zugeordneten Materialien sind in Tabelle 2 genannt.



a) 1K-Epoxidharz Loctite D125-F

b) Lotpaste VD90.0317

Abbildung 14: Mit dem rheol. Modell nach Carreau angepasste scherratenabhängige Viskosität für zwei Materialien

Tabelle 2: Materialcluster "Scherverdünnend"

Ablestik ICP4000	NJ-Dispense
ACE 10131	Polytec EC 101
ANE 10713	Polytec EC 151-L
Elecolit 325	Polytec PU1000
EPO-TEK H20E	Vitalit 1657
EPO-TEK H70E	VD90.0317
Loctite D125-F	VD90.0320
Monopox AC268	

Über diese Ergebnisse hinaus sind außerdem bei der Charakterisierung der Zeitabhängigkeit der Viskosität Materialien identifiziert worden, welche anhand verfügbarer rheologischer Modelle nicht zu beschreiben sind. Dieses besondere Verhalten wird im weiteren Projektverlauf nicht berücksichtigt, da das Prinzip der Beschreibung und Vorhersage von Materialverhalten bekannter Typen im Fokus des Projekts steht und die Materialien nur eine untergeordnete Rolle spielen.

b) Messung der Reaktionsenthalpie in der DSC für alle Materialien

- Kinetische Modellierung eines repräsentativen Materials zur Vorhersage der Vernetzung in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur

Mittels DSC-Messungen wurde die Reaktionsenthalpie des unausgehärteten Klebstoffs bestimmt. Die Proben wurden dazu mit mehreren Heizraten von 2, 3, 5, 10 und 20 K/min von

0 °C auf 200 °C aufgeheizt und der reaktionsbedingte Wärmefluss gemessen. Im Anschluss wurden die Messergebnisse mit dem kinetischen Modell nach *Kamal & Sourour* in sehr guter Übereinstimmung angepasst (vgl. Abbildung 15). Damit lässt sich für beliebige Zeit-Temperatur-Verläufe der Aushärtegrad des Klebstoffs vorhersagen.

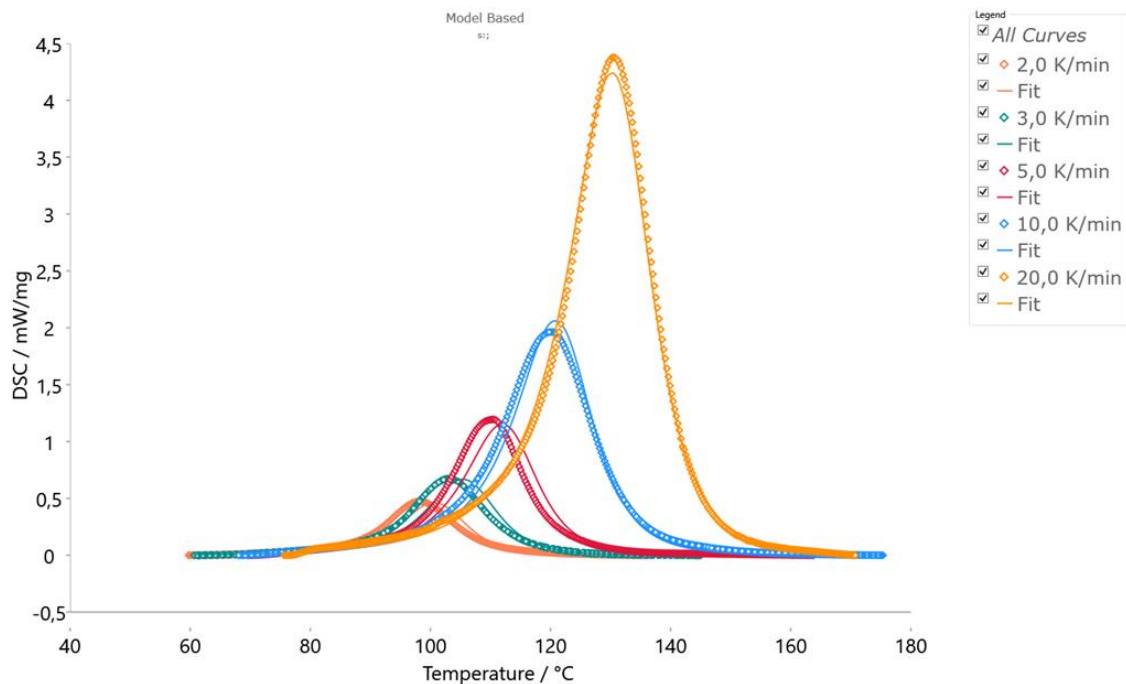


Abbildung 15: DSC-Wärmeströme sowie Anpassungen mit kinetischem Modell nach Kamal & Sourour

Die Vorhersage des Aushärtegrads für das repräsentativ modellierte 1K-Epoxidharz Loctite D125-F bei den im Projekt berücksichtigten Temperaturbereich von 25 bis 35 °C (vgl. Abbildung 16) hat ergeben, dass die Reaktionskinetik bzw. die Aushärtung im Rahmen der in AP0 spezifizierten maximalen Topfzeit von mind. acht Stunden bei Raumtemperatur nur eine untergeordnete Rolle spielt. Die Reaktion ist zu diesem Zeitpunkt kaum fortgeschritten (Vorhersage des Umsatzes bei max. 4% bei 35°C). Demnach spielt für die Materialien in diesem Projekt die Temperatur eine größere Rolle für die Viskosität als der Reaktionsfortschritt.

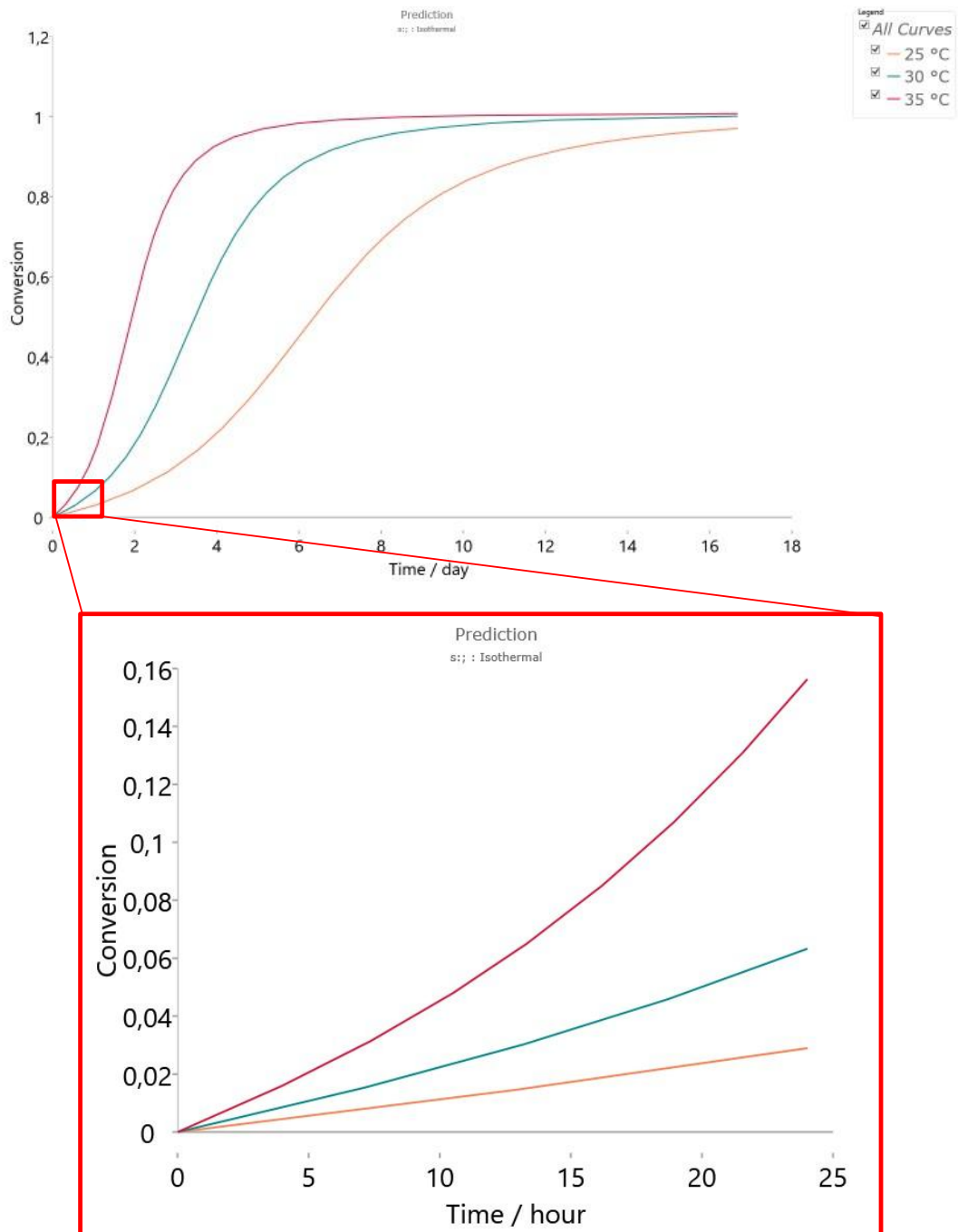


Abbildung 16: Vorhersage des Aushärtegrads von Loctite D125-F für 25, 30 und 35°C Aushärtetemperatur auf Basis des kinetischen Modells

Zusammenfassung der Charakterisierung:

- Belastungsabhängiges Materialverhalten lässt sich grundsätzlich in zwei Cluster einteilen:
Newtonsche und scherverdünnend
- Beide Materialtypen lassen sich mit rheologischen Modellen beschreiben
- Bei beiden Modellen kann die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt werden

- Zeitabhängiges Materialverhalten ist für scherverdünnende Materialien zu berücksichtigen und der Einfluss der „Materialerholung“ in Applikationsversuchen zu ermitteln
- Reaktionskinetik der Materialien wurde mittels DSC untersucht, spielt aber für den Projektverlauf nur eine untergeordnete Rolle und wird nicht weiter berücksichtigt

→ Ein Tracking der Dosierparameter ist erforderlich, um die Belastung zu jedem Dosierzeitpunkt zu kennen. Die Scherrate muss bekannt sein, um die Viskosität zu bestimmen.

→ Anwendungsnahe Applikationsversuche sind erforderlich, um ein zeitabhängiges Materialverhalten bestmöglich zu berücksichtigen. Wichtige Einflussgrößen bei diesen Applikationsversuchen sind Dosierdauer und Ruhezeit zwischen Dosierungen.

Erforschung einer Prüffolge für Applikationsversuche an Referenzmaterialien zur Kalibrierung des Dosiergeräts (MARTIN, Finetech, IFAM)

Für die zwei Materialcluster newtonsch und scherverdünnend wurden an je zwei Materialien Dosierversuche durchgeführt, um den Einfluss der Dosierparameter für die Auswahl des Materialmodells zu untersuchen. Die relevanten Parameter zur Parametrisierung der Materialmodelle sind *Zeit*, *Druck* und die *Temperatur* der Dosierung; als Ergebnis werden die ausgetragene Masse bzw. Volumen erhalten. Diese sollen als Grundlage für die Bestimmung des Materialmodells und den Abgleich mit den rheologischen Untersuchungen dienen. Zur Erweiterung des Scherratenbereichs wurde zudem der *Dosiernadeldurchmesser* variiert. Die Probenmatrix umfasst daher 4 Materialien x 3 Zeiten x 3 Drücke x 3 Temperaturen x 3 Nadeldurchmesser = 324 Parametersätze zu je 5 Messpunkten und 2 Ergebniswerten (Volumen und Masse), gesamt 3240 Datenpunkte. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit der direkten Vorgabe von Druck und Zeit beim Referenzgerät CleverDispense 06 wurde zunächst mit dem Schwestermodell SmartDispense gearbeitet.

In den folgenden Ergebnisdarstellungen wurde die ermittelte Masse über die Dichte in das Volumen umgerechnet, da die Ergebniswerte der Masse eine höhere Genauigkeit aufweisen als die Ergebniswerte der Volumina (das applizierte Volumen eines Dosierpunktes wurde visuell mit einem Dickstoff-Volumen-Messgerät der Fa. Martin bestimmt). Die Dichte der Materialien wurden zuvor mittels Pyknometrie bestimmt.

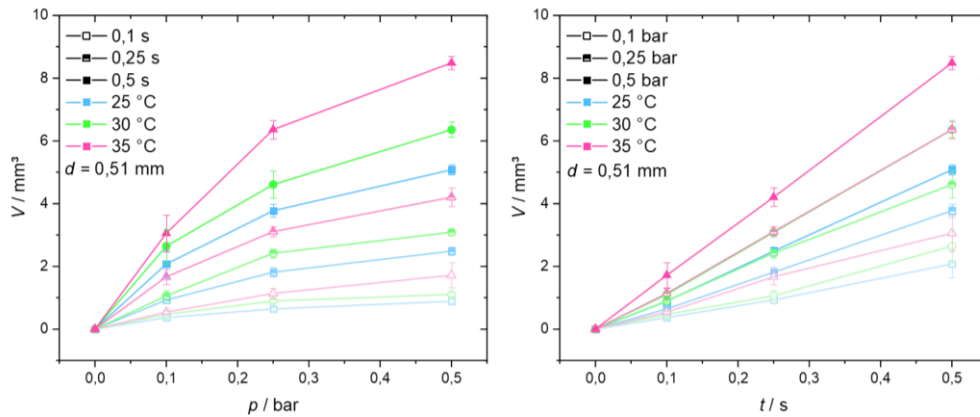


Abbildung 17: Beispiel für die Ergebnisse der Applikationsversuche für den newtonschen Klebstoff Eccobond Lux OGR150THGT für 0,51 mm Dosiernadeldurchmesser. Links: Ausgetragenes Volumen gegen Dosierdruck. Rechts: Ausgetragenes Volumen gegen Dosierzeit.

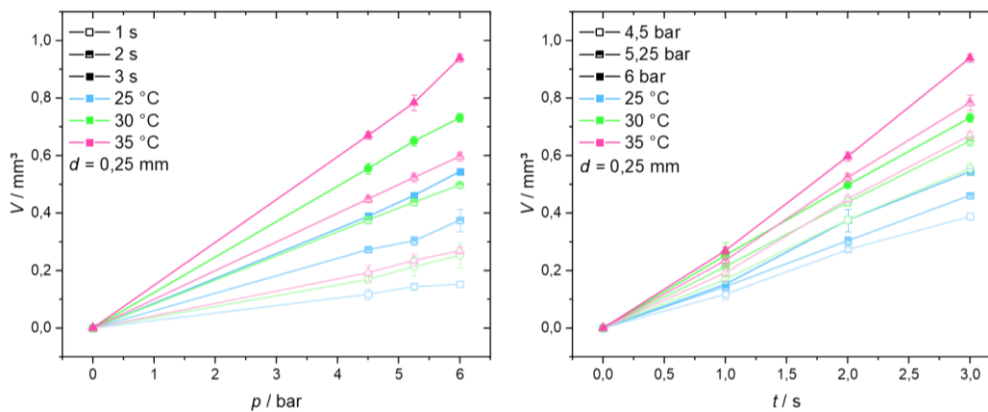


Abbildung 18: Beispiel für die Ergebnisse der Applikationsversuche für die scherverdünnende Lotpaste VD90-0317 für 0,25 mm Dosiernadeldurchmesser. Links: Ausgetragenes Volumen gegen Dosierdruck. Rechts: Ausgetragenes Volumen gegen Dosierzeit.

Bei newtonschen Materialien hängt die Viskosität nicht von der Scherrate ab, daher wurde ein linearer Zusammenhang zwischen Volumen und Zeit bzw. Volumen und Druck erwartet. In Abbildung 17 nimmt das ausgetragene Volumen jedoch mit steigendem Druck ab, während es sich linear zur Zeit verhält. Im Gegensatz dazu wurde für das scherverdünnende Material ein überproportionales großes Volumen in Abhängigkeit von Druck und Zeit erwartet (vgl. Abbildung 18). Es konnte jedoch ein nahezu linearer Verlauf beobachtet werden. Die Ergebnisse für die anderen Materialien und Dosiernadeldurchmesser sind vergleichbar, weshalb auf eine gesonderte Darstellung verzichtet wurde.

Zur Untersuchung dieser Abweichung zwischen Annahme und den Ergebnissen aus den Applikationsversuchen wurde ein Setup zur Überprüfung des Dosierdrucks des SmartDispense (SD) aufgebaut (vgl. Abbildung 19).

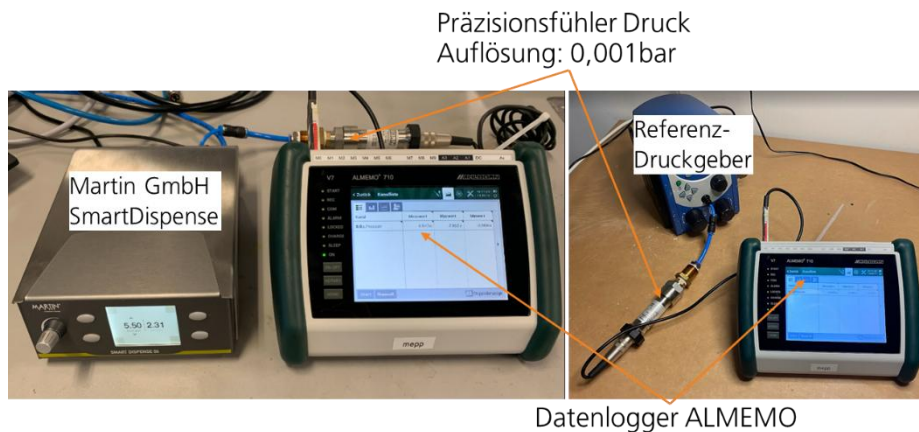


Abbildung 19: Aufbau zur Messung des Dosierdrucks mittels Almemo Datenlogger und Druckfühler.

Die Ergebnisse der Druckmessung des SmartDispense und eines Referenz-Druckgebers sind in Abbildung 20 dargestellt.

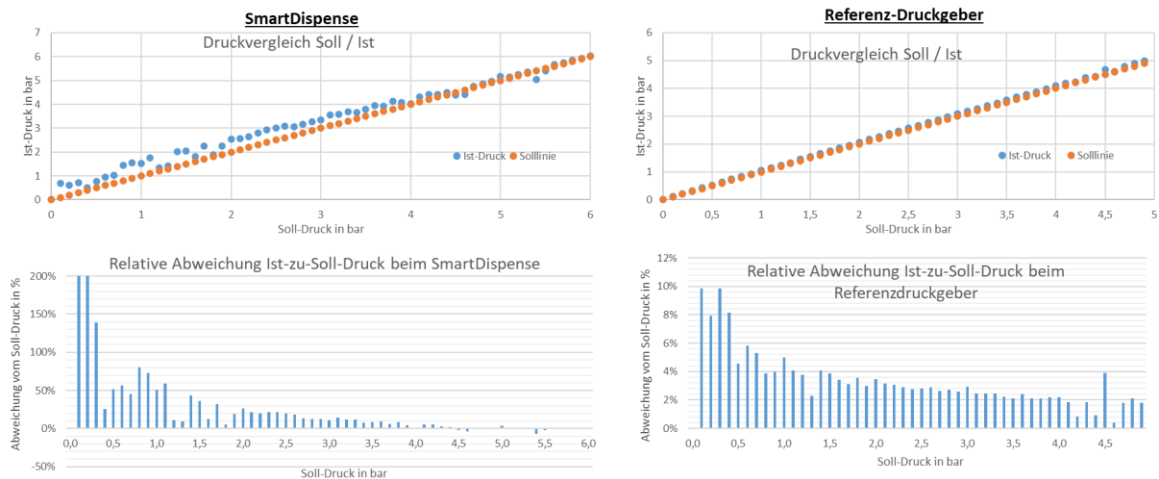


Abbildung 20: Druckmessung und relative Abweichung vom Soll-Druck für den Smart Dispense (links) und einen Referenzdruckgeber (rechts).

Es ist ersichtlich, dass die Abweichungen zum Soll-Druck beim Smart Dispense bis zu mehreren hundert Prozent betragen, während der Referenzdruckgeber über den gesamten Druckbereich Abweichungen von max. 10 % aufweist. Insbesondere bei geringem Dosierdruck sind die Abweichungen beider Geräte sehr hoch.

Falls die Druckabweichungen jedoch reproduzierbar sind, könnten sie über einen Korrekturterm berichtigt werden. Dazu wurde die Druckgenauigkeit des SmartDispense ein weiteres Mal überprüft und die Abweichungen der ersten von der zweiten Messung in Abbildung 21 links dargestellt. Die große Streuung der Datenpunkte zeigt an, dass der SmartDispense den Druck nicht reproduzierbar ausgeben kann. Daher können die Versuche mit dem SmartDispense nicht für die Ermittlung des rheologischen Materialmodells bzw. für den Übertrag der auf die rheologischen Untersuchungen herangezogen werden.

Nach einer rudimentären Softwareanpassung durch die Firma Martin konnten Zeit und Druck jetzt auch am CD06 vorgegeben werden. Die Druckgenauigkeit des CD06 wurde ebenfalls mit dem Drucksensor überprüft (vgl. Abbildung 21 rechts).

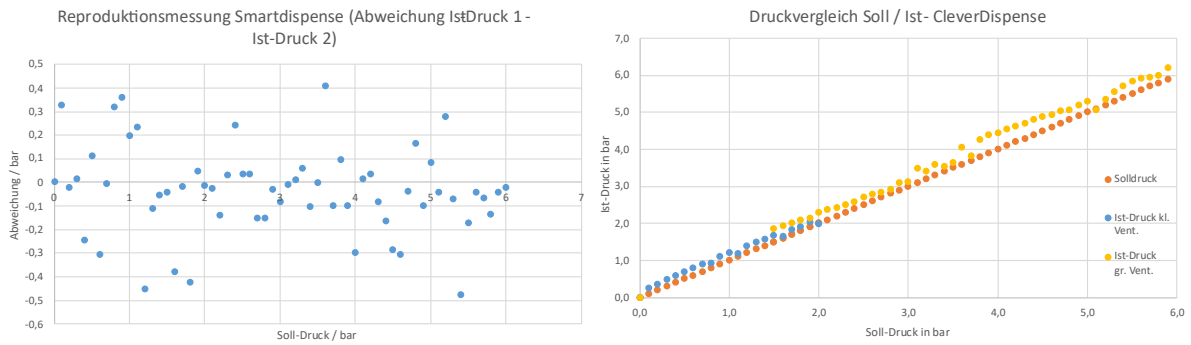


Abbildung 21: Darstellung der Reproduktionsgenauigkeit des SmartDispense (links) und Druckmessung des CleverDispense 06 (rechts).

Die Druckgenauigkeit des CD 06 ist zwar deutlich besser als die des SmartDispense, allerdings ist die Genauigkeit im Vergleich zum Referenzdruckgeber noch nicht ausreichend gut und nicht für den Übertrag in die rheologischen Materialmodelle geeignet. Um dennoch mit dem CD06 arbeiten zu können, wurde der Drucksensor mittels T-Stück in den Schlauch des CD 06 eingebunden, sodass eine simultane Dosierung und Druckmessung ermöglicht wird (vgl. Abbildung 22, Messintervall 50 ms).

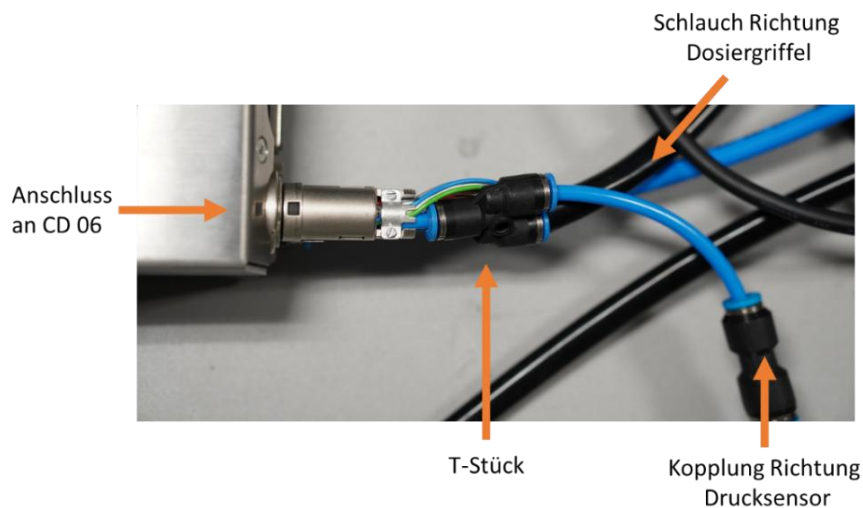


Abbildung 22: Vorrichtung zur simultanen Dosierung und Druckmessung am CD06.

Ein Beispiel für eine Messung des Drucks und der Temperatur während des Dosierens ist in Abbildung 23 dargestellt. Die Temperatur wurde dabei an der Außenseite der Nadelheizung erfasst. Es ist zu bemerken, dass die gemessenen Drücke etwas höher liegen als der eingestellte Soll-Druck (blaue Schrift), was sich mit den Ergebnissen der Überprüfung in Abbildung 21 deckt. Anzumerken ist, dass bei kurzen Zeiten der eingestellte Druck teils nicht erreicht werden kann. Innerhalb von 0,1 s konnte beispielsweise nur ein Druck von etwa 0,15 bar gemessen werden, anstatt der Vorgabe von 0,5 bar. Zudem war zu beobachten, dass bei größerem Dosierdruck die Druckvorgabe überschritten wird und langsam auf den gewünschten Wert abfällt, was auf einen nicht optimal abgestimmten Regelkreis zurückzuführen sein könnte.

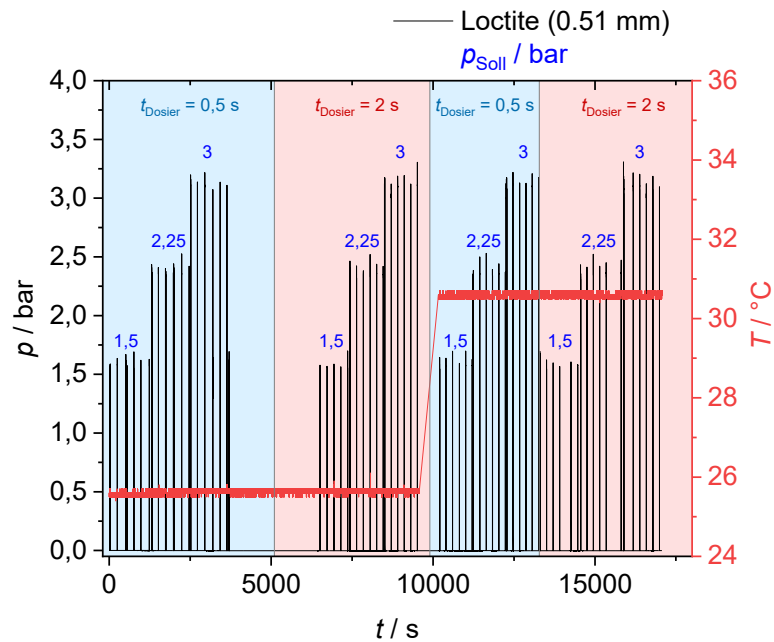


Abbildung 23: Druck- und Temperaturmessung während des Dosierens von Loctite D125F mit CD 06. Der Solldruck ist in blau über den jeweiligen Signalen notiert.

Zur Generierung von auswertbaren Daten für den Übertrag der Dosierergebnisse auf die rheologischen Materialmodelle wurden erneut Applikationsversuche (inkl. simultaner Druckmessung) mit verringerter Probenmatrix (3 *Drücke*, 2 *Zeiten*, 2 *Temperaturen*, 2 *Klebstoffe*) durchgeführt. Die Ergebnisse sind beispielhaft in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellt. In den Diagrammen wurde jeweils der Nullpunkt bei 0 bar bzw. 0 s mit einem Volumen von 0 mm³ hinzugefügt.

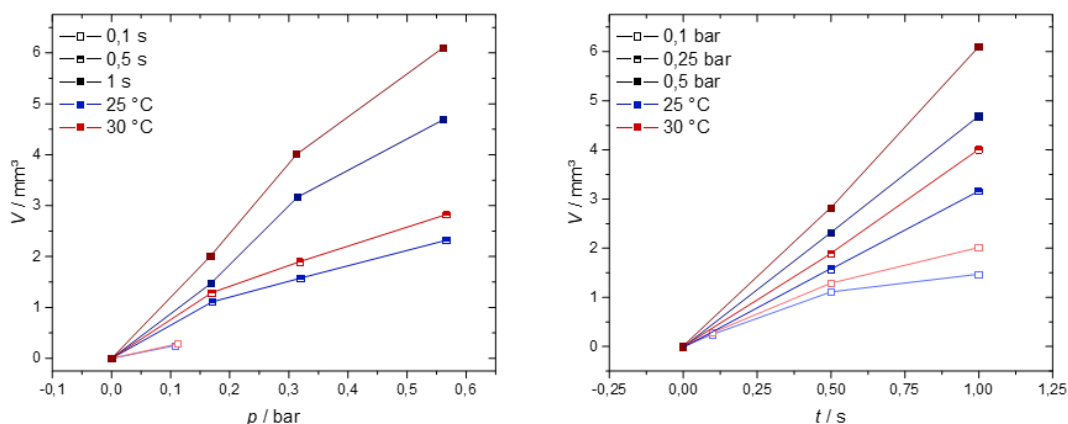


Abbildung 24: Links: V/p-Diagramm, Rechts: V/t-Diagramm vom newtonschen Klebstoff Eccobond Lux OGR150THTG mit einem Dosiernadelinnendurchmesser von 0,51 mm.

Für den newtonschen Klebstoff Eccobond wurde eine lineare Abhängigkeit zwischen Volumen und Druck bzw. Dosierzeit erwartet. Zwar konnte in den Versuchen kein exakt lineares Verhalten nachgewiesen werden, jedoch zeigen die Ergebnisse des CD06 eher einen linearen Verlauf als die des Smart Dispense (s. Abbildung 17).

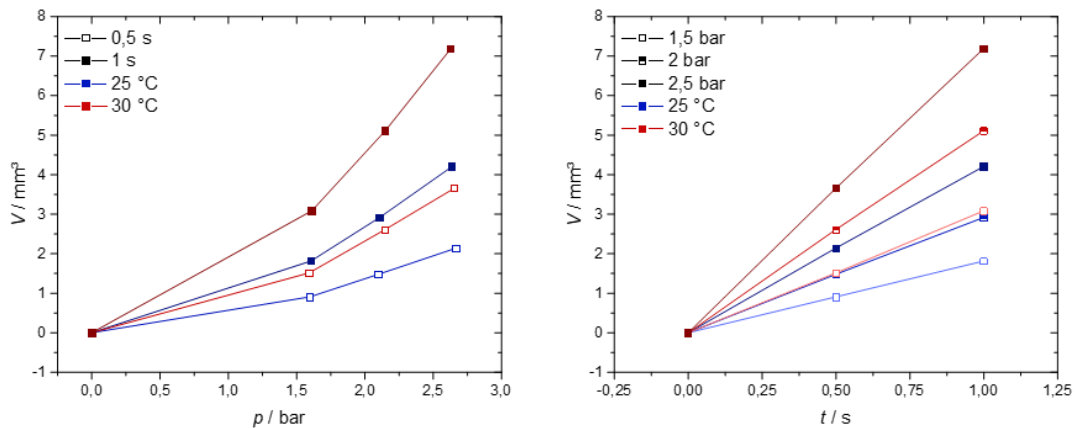


Abbildung 25: Links: V/p -Diagramm, Rechts: V/t -Diagramm des scherverdünnenden Klebstoffs Loctite D125F mit einem Dosieradelinnendurchmesser von 0,84 mm.

Für den scherverdünnenden Klebstoff Loctite D125F wurde eine überproportionale Zunahme des dosierten Volumens bei steigendem Druck bzw. Dosierzeit erwartet. Während bei steigendem Druck hierfür Hinweise in den Daten sichtbar sind, ist das Verhalten bei steigender Zeit linear.

Für beide Klebstoffe gilt, dass das erwartete Verhalten nur schwach ausgeprägt zu beobachten ist. Eine Ableitung auf ein rheologisches Materialmodell ist daher nur bedingt möglich. Zur Realisierung des Übertrags von Dosierergebnissen auf rheol. Materialmodelle sollen im weiteren Projektverlauf einzelne Kurven mit mehr Datenpunkten generiert werden, sodass die Druckverläufe detaillierter erfasst werden und so der Rückschluss auf das Materialverhalten besser realisiert werden kann.

Zusammenfassung

- Erhebliche Ungenauigkeiten bei den durch die Dosiergeräte bereitgestellten Drücken verfälschten die Ergebnisse und machten einen Übertrag auf die rheologischen Modelle nicht möglich.
- Ein externer Drucksensor wurde integriert und erlaubt eine simultane Messung des Drucks während des Dosierens.
- Das erwartete Materialverhalten ist nur in Ansätzen erkennbar, ein Übertrag auf rheologische Modelle ist so noch nicht möglich.
- Messungen mit mehr Datenpunkten in einer Messreihe könnten die Datenqualität verbessern und Rückschlüsse für das rheologische Modell erlauben. Daher werden ausgewählte Messreihen mit mehr Datenpunkten wiederholt.

Entwicklung eines Auswahl- und Parametrisierungs-Algorithmus (IFAM)

Die Anforderungen an den Auswahl- und Parametrisierungs-Algorithmus ergeben sich aus den grundlegenden Bedingungen, die für dessen Nutzung in einem Dispenser notwendig sind. Dazu gehören die folgenden:

- Datenverarbeitung: Der Algorithmus muss in der Lage sein, relevante Merkmale zu extrahieren, die eine Unterscheidung zwischen den Materialien der beiden Cluster – newtonschen und scherverdünnenden Flüssigkeiten – ermöglichen.
- Mustererkennung: Der Algorithmus sollte über eine Mustererkennungsfunktion verfügen, die es ihm ermöglicht, charakteristische Muster in den Daten zu identifizieren, die auf die Fließeigenschaften der Flüssigkeit bzw. das zugehörige Cluster hinweisen.
- Parameteranpassung: Basierend auf den erkannten Mustern und Merkmalen sollte der Algorithmus in der Lage sein, die Parameter des Dispensers anzupassen, um eine optimale Dosierung der jeweiligen Flüssigkeit zu gewährleisten. Dies könnte beispielsweise die Anpassung der Dosierdauer oder des -drucks sein.
- Echtzeitfähigkeit: Der Algorithmus sollte in Echtzeit arbeiten können, um eine schnelle und präzise Dosierung der Flüssigkeiten zu ermöglichen.
- Robustheit: Der Algorithmus sollte robust gegenüber Störungen und Variationen in den Messdaten sein, um eine zuverlässige Unterscheidung zwischen den Flüssigkeitstypen sicherzustellen.
- Schnittstellen: Schließlich sollte der Algorithmus über Schnittstellen verfügen, die eine einfache Integration in das Gesamtsystem des Dispensers ermöglichen, sowie Möglichkeiten zur Benutzerinteraktion und -steuerung bieten.

Der erarbeitete Prüfablauf nimmt für die Parametrierung eine entscheidende Rolle ein und soll im Algorithmus gemäß des Ablaufdiagramms in Abbildung 26 berücksichtigt werden.

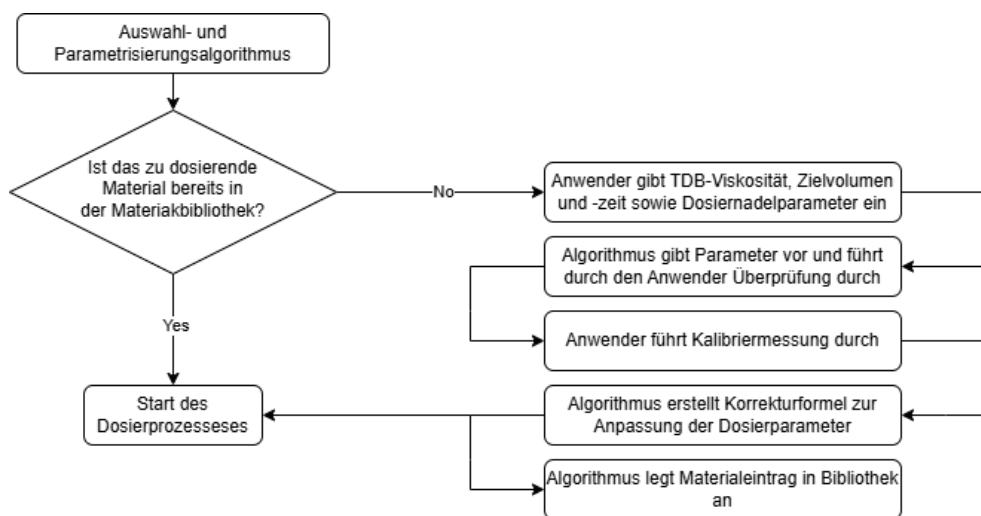
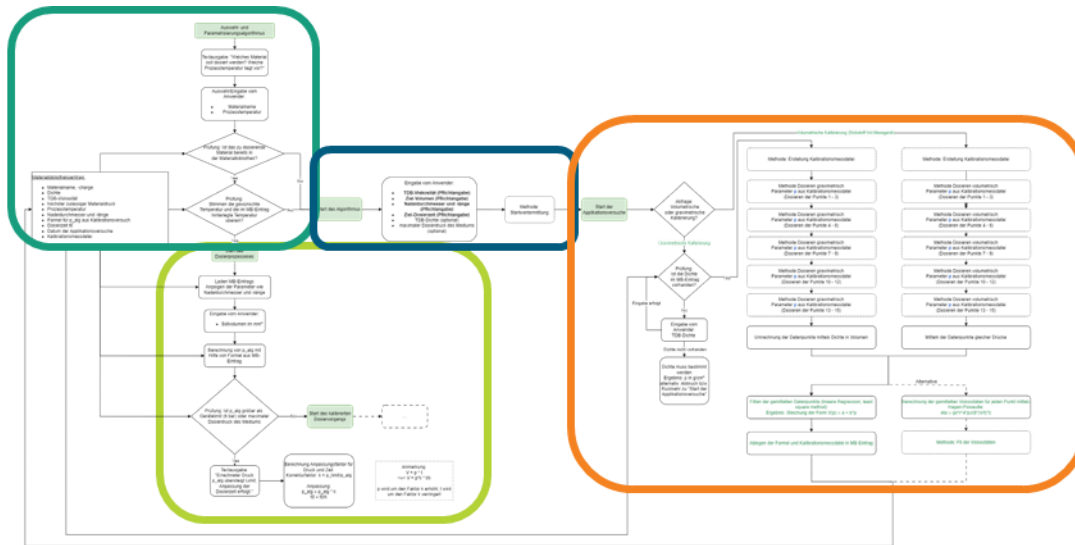


Abbildung 26: Ablaufdiagramm für den Prüfablauf innerhalb des Auswahl- und Parametrisierungs-Algorithmus

Im Folgenden ist der Algorithmus detailliert dargestellt und seine einzelnen Funktionen werden erläutert (Abbildung 27 bis Abbildung 33).



- **Start des Algorithmus (Materialangabe etc.)**
- **Vorbereitung der Applikationsversuche: Dateneingabe und Berechnung der Startwerte**
- **Applikationsversuche inkl. Berechnung der Kalibrierungsformel**
- **Beispielhafter Teil zur Dosierung nach der Kalibrierung**
- **Methoden: Ausgelagerte Funktionen, um den Algorithmus schlank zu gestalten**

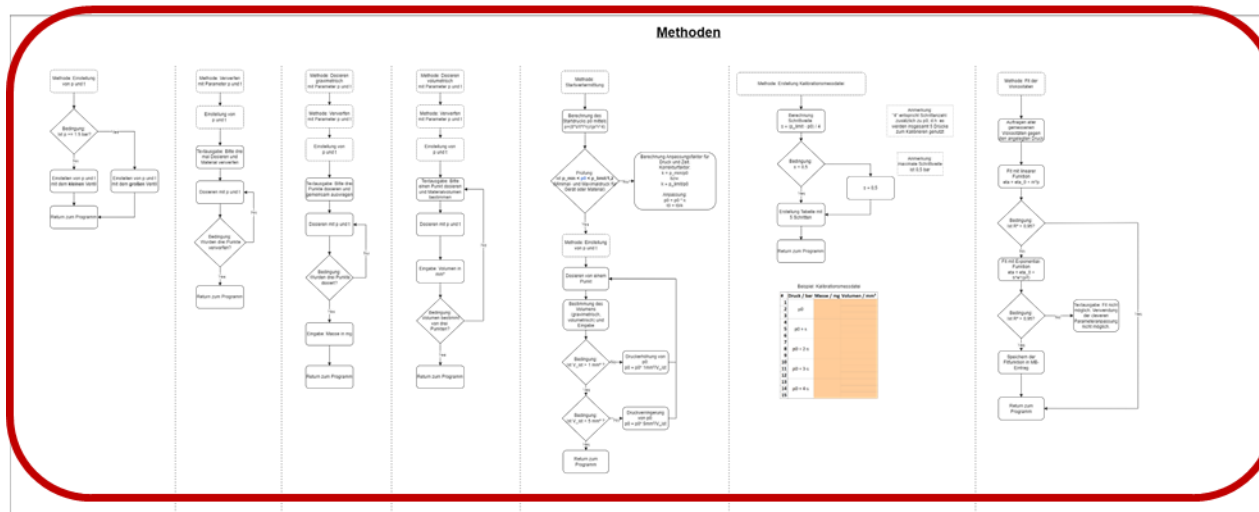
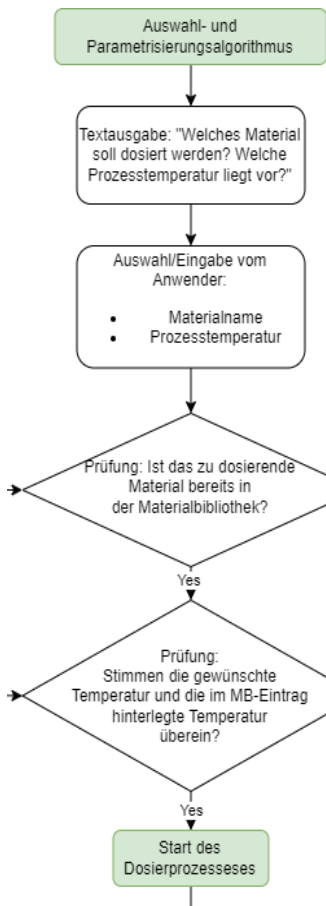


Abbildung 27: Gesamtüberblick des erstellten Algorithmus zur Kalibrierung des Dispensers durch einfache Applikationsversuche. Rechts: Farbliche Legende zu den entsprechend gefärbten Teilen.



- Eingabe des gewünschten Materials, falls nicht in Datenbank vorhanden, wird es neu angelegt und die Kalibrierung gestartet
- Der Anwender gibt nötige Daten des gewünschten Materials ein, wie z.B. Viskosität des Materials und Zielvolumen
- Aus diesen Daten wird über die Methode Startwertermittlung der Druck für den ersten Dosierpunkt bestimmt, dessen Volumen zwischen 1 mm³ und 5 mm³ betragen soll.

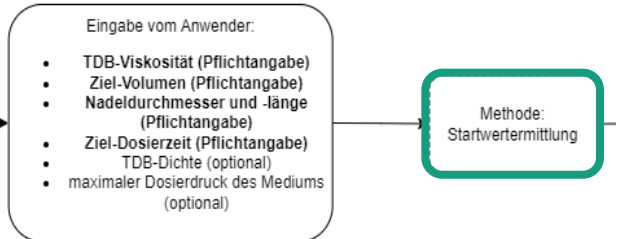
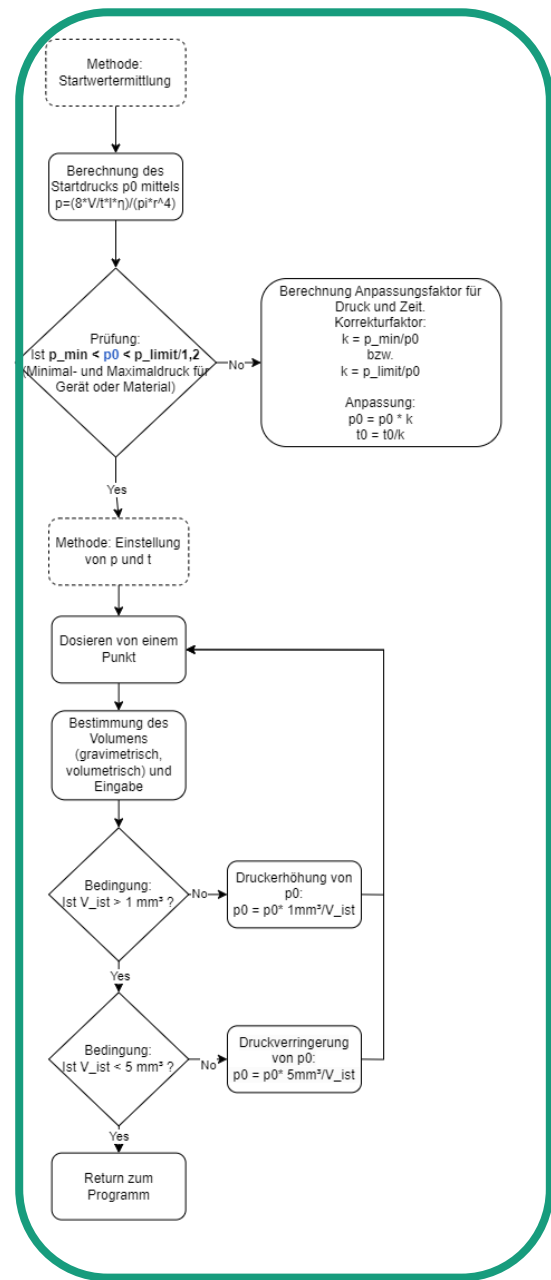


Abbildung 28: Start des Algorithmus mit Funktionen zur Materialangabe etc. und der Methode zur Startwertermittlung für die Kalibrierungsversuche (rechts).



- Der Anwender wählt entweder die Kalibrierung per Masse oder Volumen
- Falls per Masse kalibriert werden soll, muss die Dichte bekannt sein
- Die Kalibrierungstabelle wird mit Hilfe der Methode erstellt (siehe rechts)

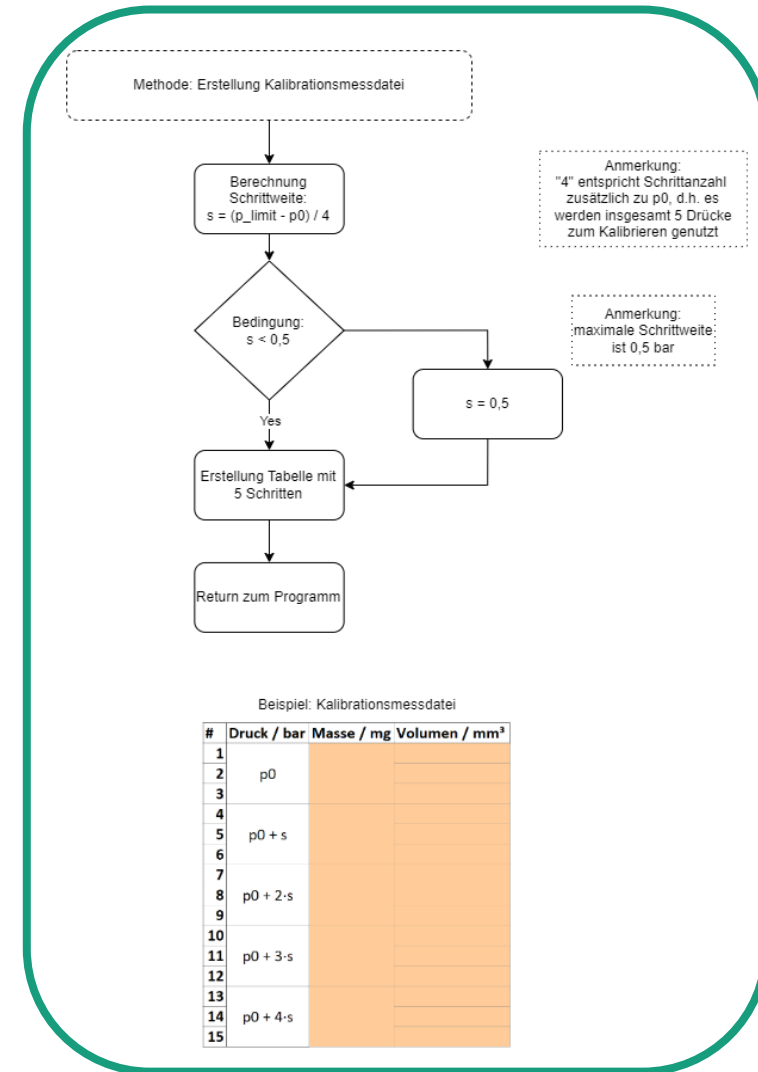
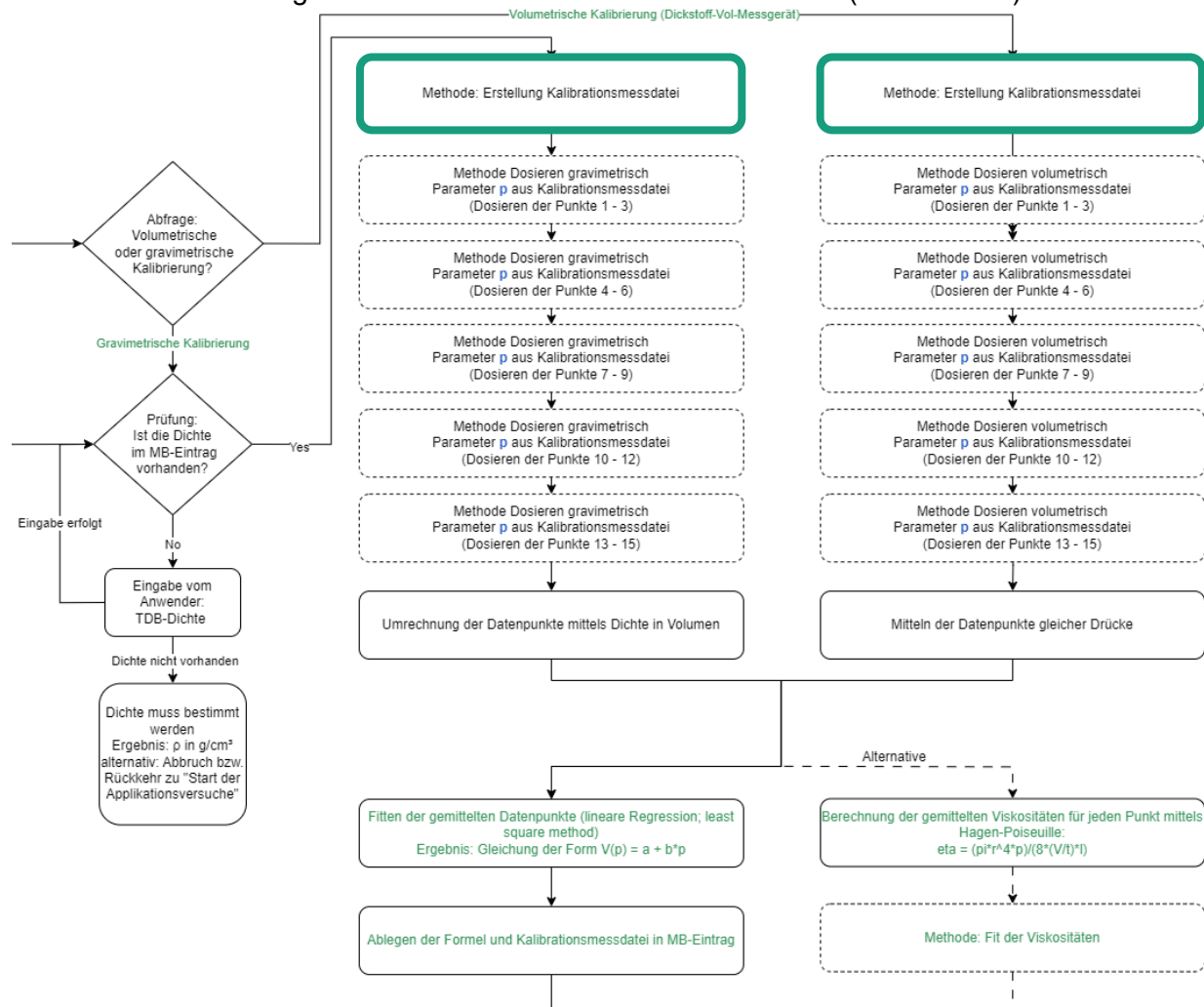


Abbildung 29: Links: Beginn der Kalibrierungsversuche; Rechts: Methode zur Erzeugung der Kalibrierungstabelle.

- Der Anwender dosiert mit Hilfe der entsprechenden Methoden für 5 verschiedene Drücke je 3 Punkte

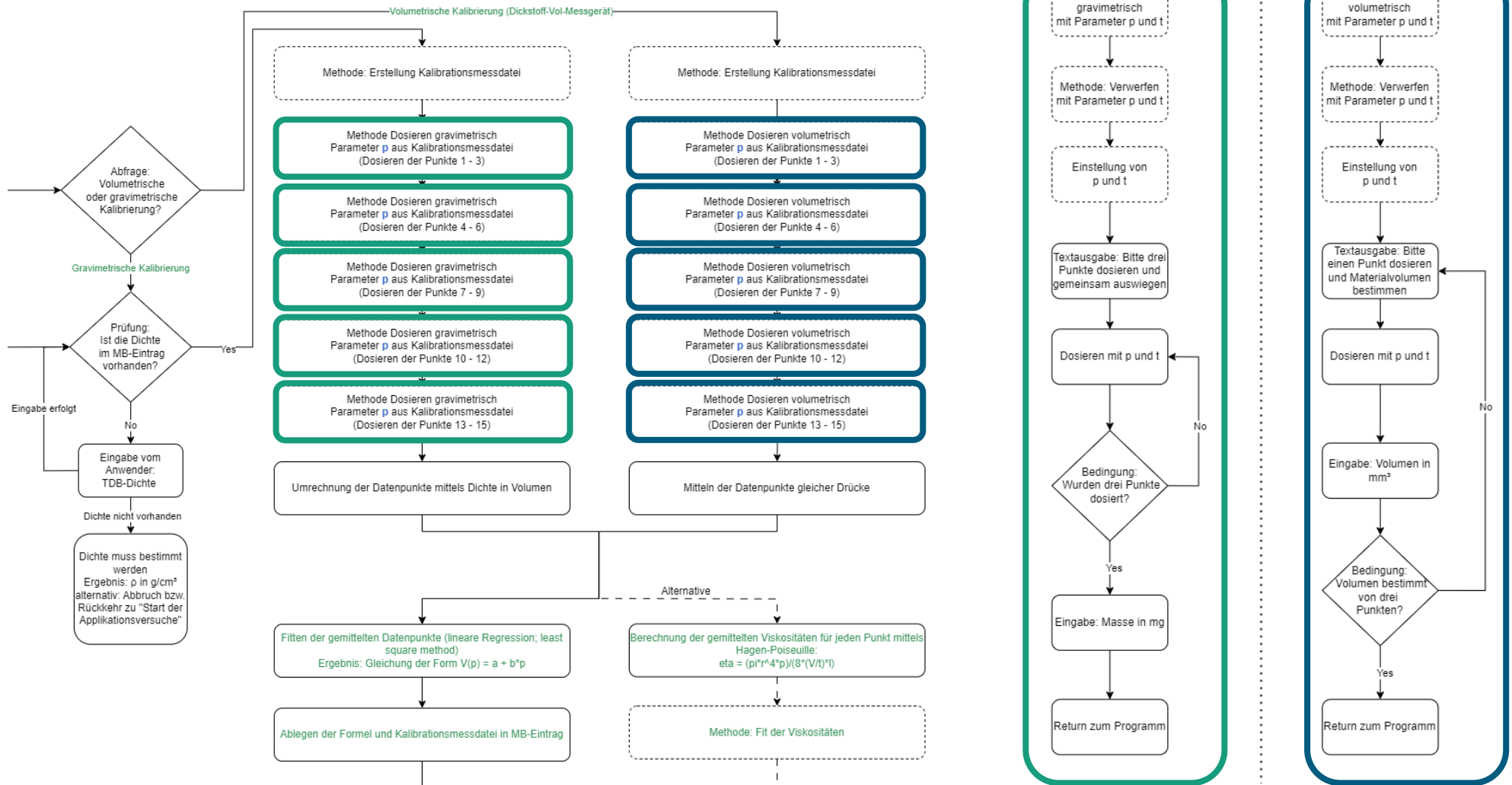
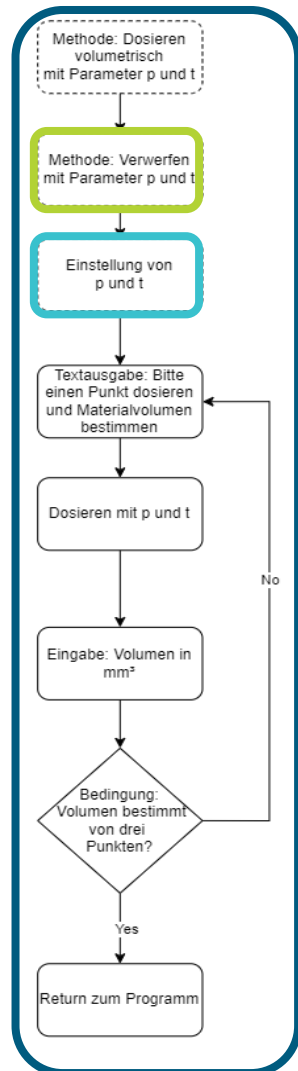
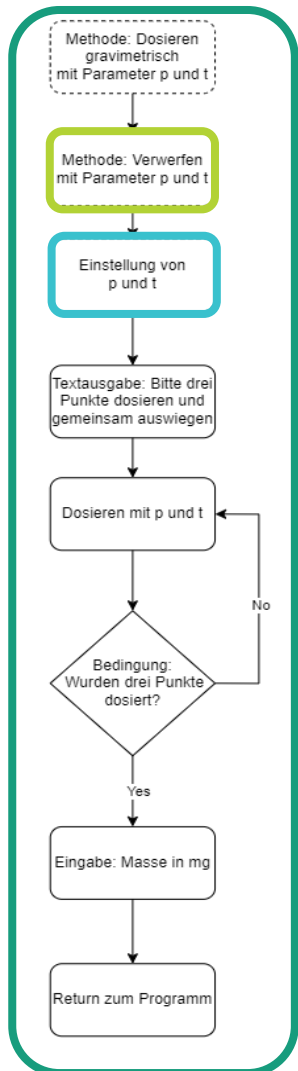


Abbildung 30: Links: Beginn der Kalibrierungsversuche. Rechts: Methoden zum Dosieren der Punkte.



- Bei jeder neuen Druckeinstellung werden zunächst 3 Punkte verworfen, um konstante Bedingungen zu erzeugen
- Das Ventil wird anhand des Druckes ausgewählt, Schwellenwert ist hier 1,5 bar.

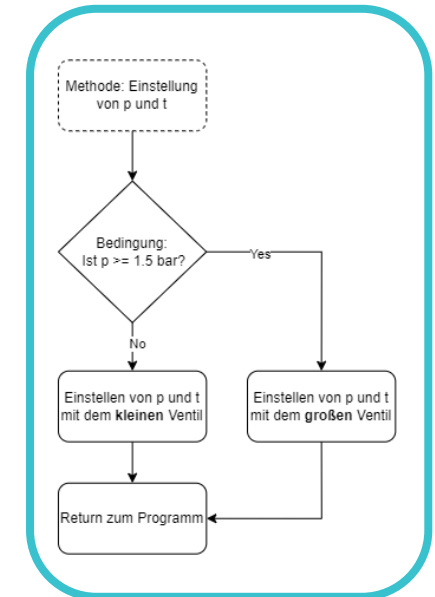
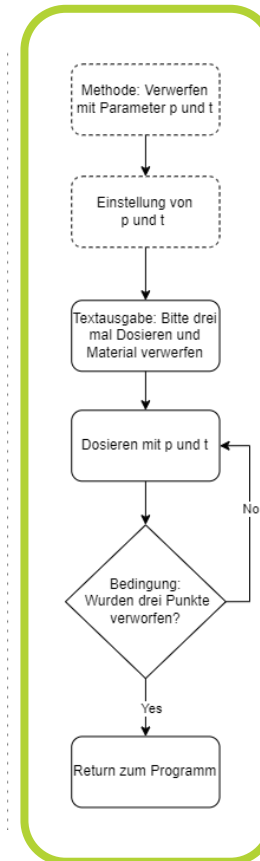
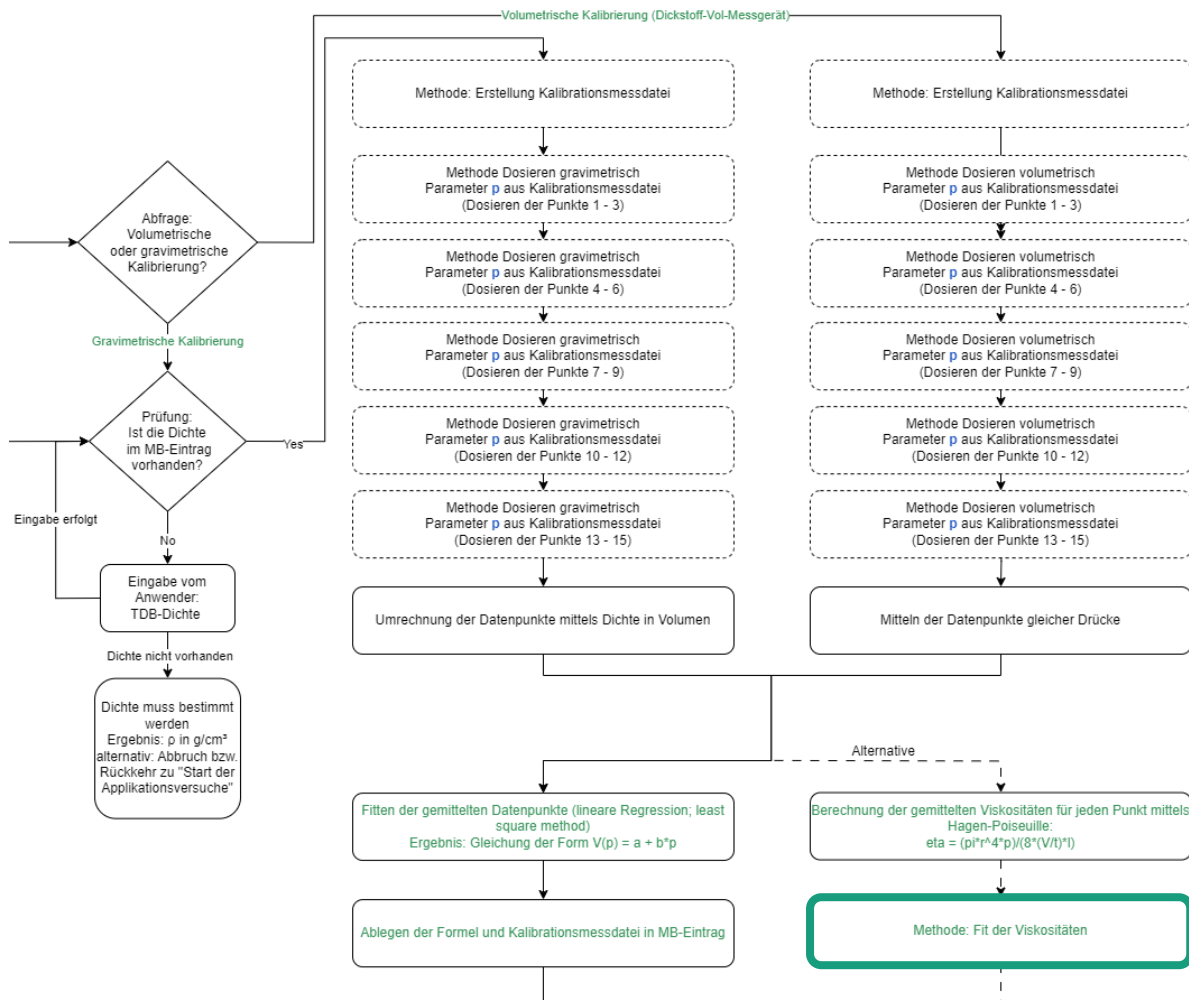


Abbildung 31: Links: Die Methoden zur Dosierung enthalten jeweils Methoden zum Verwerfen von Dosierpunkten zur Equilibrierung bzw. der Einstellung des Drucks und der Zeit.



- Der Algorithmus fittet am Ende der Applikationsversuche die erzeugten Daten und erstellt die Kalibrierungsformel
- Eine Alternative zur Kalibrierung ist die Berechnung der Viskositäten aus den Applikationsversuchen. Anhand dieser kann auch die spätere Dosierung kalibriert werden und ein Abgleich mit rheologischen Messungen stattfinden.

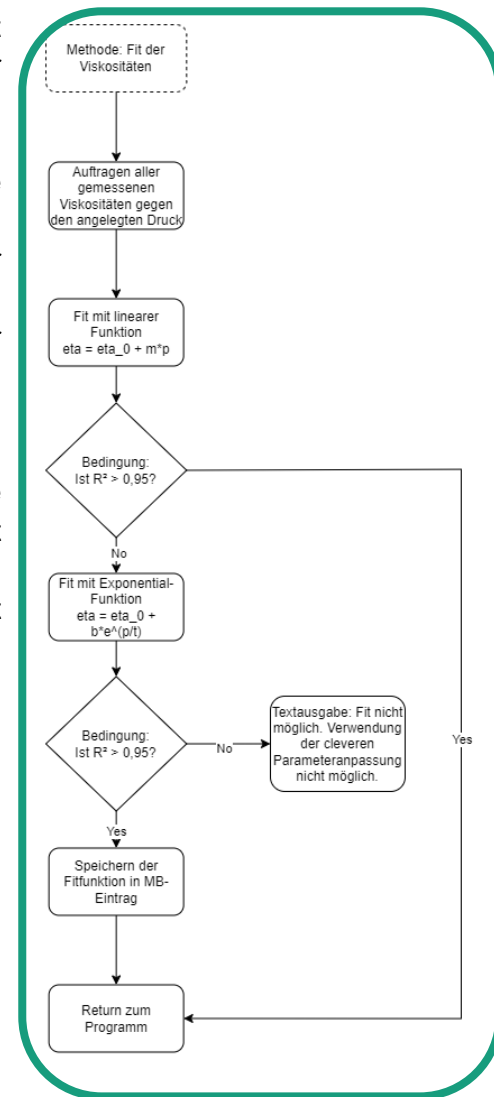
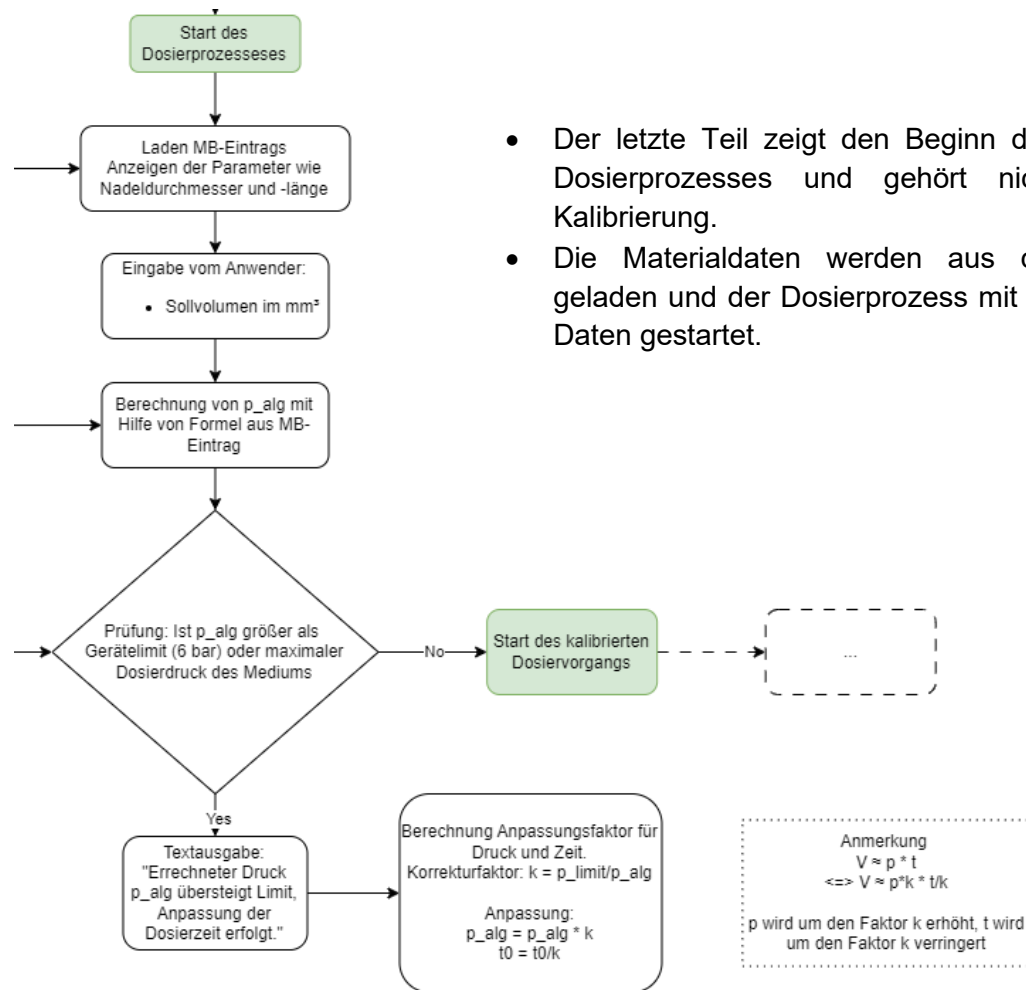


Abbildung 32: Nach den Kalibrierungsversuchen werden die erzeugten Datenpunkte gefittet. Wahlweise steht eine Methode zur Berechnung der Viskositäten zur Verfügung (rechts).



- Der letzte Teil zeigt den Beginn des eigentlichen Dosierprozesses und gehört nicht mehr zur Kalibrierung.
- Die Materialdaten werden aus der Datenbank geladen und der Dosierprozess mit den kalibrierten Daten gestartet.

Abbildung 33: Dosierprozess und Start des eigentlichen Dosiervorgangs im Algorithmus.

Konzeptentwicklung zur Hardware und Software eines Technologie-Demonstrators (MARTIN, Finetech)

Zentrales Element des Vorhabens auf Seiten der Fa. Martin, ist die Erarbeitung eines Konzepts für die Entwicklung eines Technologie-Demonstrators. Unterstützt wurde die Entwicklung auf Ebene der Softwareentwicklung durch die Fa. Finetech. Aufgrund von Personalwechsel bei der Fa. Martin, welche eine Einarbeitung eines neuen Mitarbeiters im Projekt nach sich zog, ergaben sich Verzögerungen im Projekt, welche sich auf ca. 6 Monate beziffern lassen.

Als Maßnahmen, welche einen Teil des Zeitverzugs kompensieren sollen, wurden die Vergabe von Teil-Arbeitspaketen an einen externen Dienstleister, wie auch Anpassungen im Umfang der Arbeitspakete identifiziert. Maßgeblich hierbei war, den Projekterfolg zu gewährleisten, definierte Projektziele zu erreichen, wie auch die bisher erbrachten Ergebnisse zu verwerten.

Um Teil-Arbeitspakete an einen Dienstleister zu vergeben, wurde auf Erfahrungen mit Dienstleistern durch die Fa. Finetech in vorherigen Projekten zurückgegriffen.

Es wurde ein Lastenheft für die Entwicklung eines Technologie-Demonstrators geschrieben (Auszug, siehe Abbildung 34). Weiterhin wurde von der Fa. Martin eine Kundenumfrage durchgeführt, dessen Ergebnisse in die Erstellung des Lastenheft eingeflossen sind.

Requirement lists_RheoDos		
1.	Hardware	
Subtopic	Current device (CD06)	Technology Demonstrator (CD07)
1.01 Sensors (pressure + temperatur	No temperature and pressure sensor integrated device outlet pressure sensor Blockschaltbild kann über Zlatan bereit gestellt werden	Temperature sensor for ambient temperature & device Outlet Pressure sensor
1.02 Volume measurement	External volume measuring device KVM 03 (MARTIN)	Optical Volume Measurement (OVM). [will be a separate project, but the interface in CD07 must be considered]
1.03 Housing	Current Dimensions 272 x 152 x 60 mm ² Raw material: AlMg3 Surface Finishing: anthracite anodised	Small footprint(X-Y max. 280mm) actual implementation after the project at MARTIN or Finetech Surface finishing (powder coating)
	Currently only one Housing with Display and button cut-outs	actual implementation after the project at MARTIN or Finetech Two different Housing: 1) without display and button cut-outs [need LED connection that show device] OEM-Gehäuse (Hutschiene, Ohne Bedienelemente) [LED connection feedback from FT machine] 2) with display and button cut-outs perhaps also standard industrial enclosure, bar profile? or similar housing as previously powder-coated

Abbildung 34: Auszug aus dem Lastenheft der Fa. MARTIN

Im Projektverlauf wurde festgestellt, dass die Genauigkeit der Druckregelung des CD06 zu starke Abweichungen aufweist. Zur Analyse des Fehlers und der Ursachen wurde ein Ishikawa-Diagramm erstellt (siehe Abbildung 35). Um die Ursachen zu identifizieren und die Ergebnisse zu validieren, wurde zusätzliches Mess-Equipment beschafft. Dabei wurde darauf Wert gelegt, dass bei den Projektpartnern identisches Equipment vorhanden ist, um Unregelmäßigkeiten in den Messungen zu vermeiden. Es wurde ein Testplan zur Isolierung der Fehlerursache erstellt und ein Zeitplan erstellt. Die Ergebnisse dieser zusätzlichen Untersuchungen an der Hardware des CD06 fließen direkt in die Konzept-Erstellung des Technologie-Demonstrators ein.

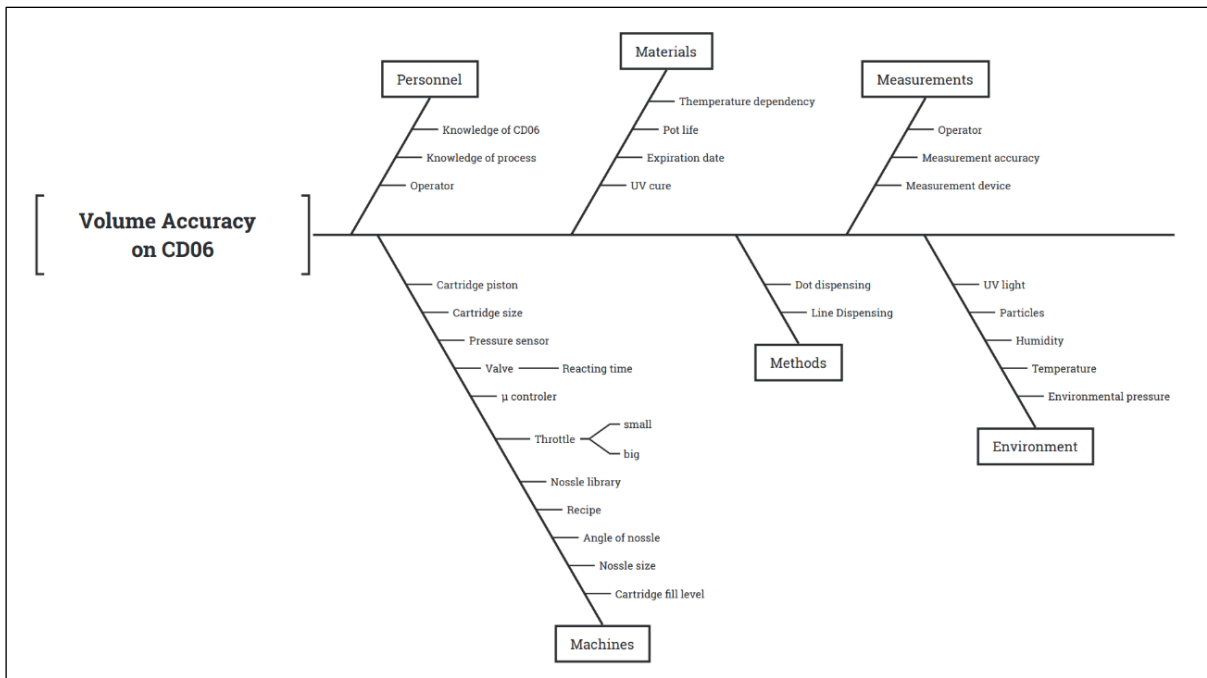


Abbildung 35: Einflussgrößen auf die Volumenausgabe des Gerätes CD06 der Fa. MARTIN

Um die Messungen und Validierungen im laufenden Projekt durchführen zu können, wurde die Software durch die Fa. Finetech erweitert. Fortan konnte ein direkter Zugriff auf die Parameter Druck und Zeit erfolgen.

Umsetzung der Konzepte

Die Umsetzung der erarbeiteten Konzepte erfolgte in Teilen in Zusammenarbeit mit einem externen Dienstleister. Es wurde eine Zeitplanung zur Umsetzung der Verbesserungen der Drucksteuerung erarbeitet und mit den Projektpartnern abgestimmt.

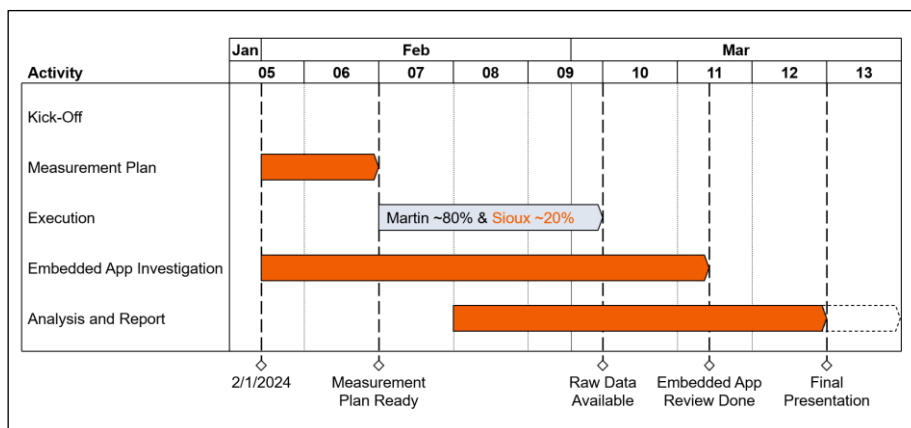


Abbildung 36: Projektplan inkl. Meilensteine zur Verbesserung der Drucksteuerung

Die Tätigkeiten mündeten in einer Simulation der Pneumatik-Einheit des CD06 und ergaben hieraus Handlungsempfehlungen zum Umbau von Hard- und Software, um die Präzision des CD06 zu verbessern.

Based on the volume estimation of hoses after the restriction ($V_2 = 4.35$ ml) the expected pressure increase (at 6 barG input pressure) is: 0.13 bar. This is slightly lower than measured 0.19 bar, supporting the suspicion that the estimate for the volume V_1 is low.

A similar situation occurs when the restriction is placed before the valve (see Figure 10).

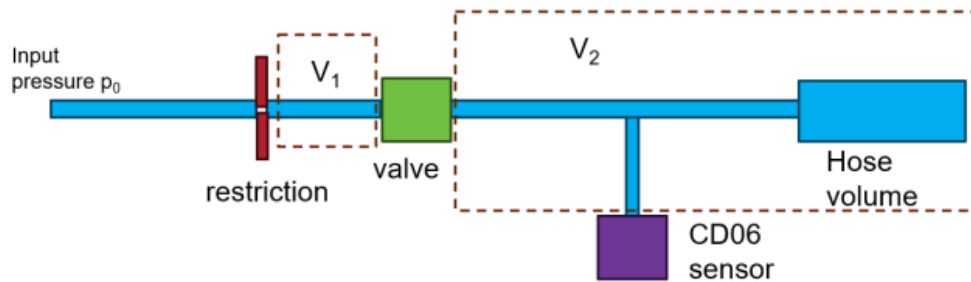


Abbildung 37: Auszug aus dem Report

Im Ergebnis der Simulationen wurde festgestellt, dass $V_1 \ll V_2$ zu einer Optimierung der Steuerung führen wird. Im konkreten Fall des CD06 bedeutet dies, dass die Pneumatik insofern angepasst werden musste, dass das Volumen vor dem Steuer-Ventil (hier V_1) deutlich kleiner sein muss als das Volumen hinter dem Steuer-Ventil (hier V_2).

Umsetzung Software

Die grundsätzliche Idee hinter der bisherigen softwareseitigen Umsetzung am CD06 ist das rezeptbasierte Arbeiten, unter der Vorgabe des zu applizierenden Volumens. Hierzu ist aktuell die Kenntnis der Materialeigenschaften Voraussetzung.

Um im laufenden Projekt Untersuchungen bei direkter Vorgabe von Druck und Zeit vornehmen zu können, mussten kleinere Änderungen an der Software vorgenommen werden. Der erarbeitete Algorithmus ist somit in der Lage direkt auf die Steuerung von Druck und Zeit zuzugreifen.

Validierung der Änderungen an Hard- und Software durch Durchführung von Ringversuchen bei allen Projektpartnern

Nach erfolgter Umsetzung aller Änderungen an Hard- und Software wurde im Konsortium ein Testplan erstellt, der Tests unter vergleichbaren Bedingungen und Parametern bei den Projektpartnern Fraunhofer IFAM, Fa. MARTIN und der Fa. Finetech vorsah. Ziel war es die Robustheit des Systems und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aufzuzeigen. Weiterhin lassen sich anhand dieser Tests die Verbesserungen der Dosierungen beim Technologie-Demonstrator gegenüber dem Ist-Zustand des CD06 aufzeigen. Die Ergebnisse der durchgeführten Tests und der errechneten dosierten Volumina wurden durch das Fraunhofer IFAM ausgewertet und bestätigten die signifikanten Verbesserungen der Genauigkeit und Verwertbarkeit für die Anwendung des Algorithmus. Im Verlauf dieser Tests zeigte sich ein Verbesserungspotential beim derzeitigen Stand des Algorithmus. Der Algorithmus wurde durch das Fraunhofer IFAM angepasst und erweitert.

Aufgrund der Verzögerungen konnten die ursprünglich geplanten Tests an produktiven Systemen beim Projektpartner iC-Haus nicht mehr durchgeführt werden.

Fertigung des Technologie-Demonstrators

Nach erfolgter Simulation und der Konzeption der Hardware des Demonstrators wurden Maßnahmen zur Umsetzung ergriffen. Es erfolgten Modifikationen an der Pneumatik und der Firmware des Demonstrators in folgender Weise.

Vor der Modifikation:

- In der ursprünglichen Konfiguration befand sich eine Drossel mit einem Durchmesser von 0,20 mm hinter dem Hauptventil V1. Diese Anordnung führte zu einer eingeschränkten Steuerung des Durchflusses, da die Drossel erst nach dem Ventil platziert war.

Nach der Modifikation:

- Die Drossel wurde vor das Hauptventil V1 verschoben, mit einem Abstand von 5 mm zur Ventilöffnung. Durch diese neue Positionierung kann der Durchfluss bereits vor dem Hauptventil kontrolliert werden, was die Präzision bei der Dosierung erheblich steigert.

Aus der vorgenommenen Modifikation ergeben sich folgende Vorteile:

- Verbesserte Durchflusskontrolle: Die Verlagerung der Drossel vor das Hauptventil ermöglicht eine genauere Steuerung des Mediums, bevor es das Ventil erreicht.
- Höhere Dosiergenauigkeit: Da die Durchflussrate schon vor dem Ventil reguliert wird, können kleinere Dosiermengen präziser gesteuert werden, was die Gesamtgenauigkeit der Dosierprozesse optimiert.

Austausch und Installation einer kürzeren Zuleitung zum Drucksensor

Vor der Modifikation:

- Der bisher verwendete Drucksensor war durch eine lange Schlauchleitung (ca. 60 cm) mit dem System verbunden, was zu Verzögerungen bei der Druckerfassung führte. Die Distanz zwischen Sensor und System verhinderte eine sofortige Erfassung von Druckänderungen, was die Reaktionsgeschwindigkeit beeinträchtigte.

Nach der Modifikation:

- Der Drucksensor wurde durch einen kürzeren Sensor ersetzt, und die Schlauchlänge wurde von 60 cm auf ca. 10 cm reduziert. Diese Anpassung verringert die Zeit, die benötigt wird, um Druckänderungen zu erfassen und das System entsprechend anzupassen.

Vorteile der Modifikation:

- Schnellere Reaktionszeit: Der kürzere Schlauch ermöglicht eine schnellere Signalübertragung, was zu einer unmittelbareren Reaktion des Systems auf Druckschwankungen führt.

- Erhöhte Genauigkeit: Durch die reduzierte Distanz zwischen Sensor und System werden Messungen präziser und schneller umgesetzt, was insbesondere in dynamischen Dosierprozessen von Vorteil ist.
- Verbesserte Prozesssteuerung: Die Anpassung führt zu einer genaueren Kontrolle der Systemreaktion, da Druckänderungen nun ohne Verzögerung erfasst und verarbeitet werden.

Erhöhung der Hysterese-Einstellung in der Firmware zur Optimierung der Korrekturen

Vor der Modifikation:

- Die ursprüngliche Hysterese war auf 0,01 bar eingestellt, was zu häufigen Korrekturmaßnahmen führte. Kleinste Druckschwankungen wurden als signifikant erkannt, wodurch unnötige Korrekturpulse ausgelöst wurden. Diese hohe Empfindlichkeit führte zu einer Überkorrektur des Systems.

Nach der Modifikation:

- Die Hysterese wurde auf 0,04 bar erhöht. Diese Anpassung stellt sicher, dass das System nur auf wesentliche Druckänderungen reagiert. Unbedeutende Schwankungen, die keine unmittelbare Korrektur erfordern, werden ignoriert, wodurch die Anzahl der Korrekturpulse erheblich reduziert wird.

Auswirkungen der Modifikationen

Nach den beschriebenen Modifikationen wurde eine signifikante Reduzierung der Abweichungen zwischen dem Soll- und Ist-Druck festgestellt.

Vor der Modifikation:

- Der Druck schwankte zwischen 0 bar und 2 bar, wobei die Abweichungen über 5 % lagen. Dies beeinträchtigte die Dosiergenauigkeit, insbesondere bei kleinen Mengen, und führte zu ungenauen Ergebnissen.

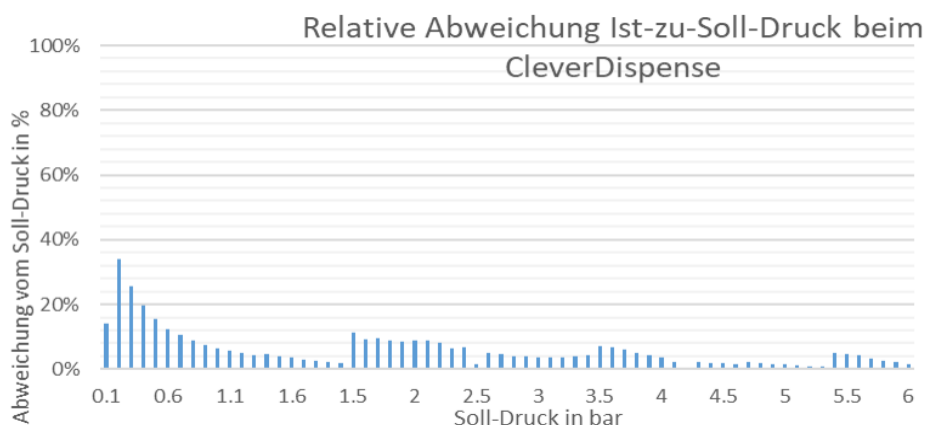


Abbildung 38: Abweichung des Ist-Drucks zu Soll-Druck vor Modifikation

Nach der Modifikation:

- Der Druckbereich liegt nun zwischen 0,5 und 2 bar, mit Abweichungen unter 5 %. Diese Reduktion der Druckabweichungen hat die Dosiergenauigkeit erheblich verbessert, insbesondere bei der Handhabung kleinerer Mengen. Die verbesserte Präzision stellt sicher, dass auch bei geringen Dosiermengen eine gleichbleibende und zuverlässige Leistung erreicht wird.

Ergebnisse der Modifikation:

- Deutliche Reduktion der Druckabweichungen: Die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Druck wurden erheblich reduziert, was die Präzision bei der Dosierung kleinster Mengen verbessert.
- Erhöhte Dosiergenauigkeit: Insbesondere bei Druckbereichen zwischen 0,5 und 2 bar konnte eine erhöhte Dosiergenauigkeit erzielt werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die durchgeführten Modifikationen am Demonstrator haben folgende signifikante Verbesserungen bewirkt:

- Präzisere Durchflusskontrolle: Durch die Verlagerung der Drossel vor das Ventil V1 wurde die Steuerung des Durchflusses optimiert.
- Schnellere Reaktionsfähigkeit: Der kürzere Sensor reduziert Verzögerungen bei der Druckerfassung, was zu einer schnelleren Systemreaktion führt.
- Optimierte Korrekturprozesse: Die Erhöhung der Hysterese auf 0,04 bar verringert unnötige Korrekturmaßnahmen, was die Effizienz des Systems steigert.

Fazit und Ausblick

Die vorgenommenen Modifikationen haben die Leistung des Demonstrators gegenüber dem CD06 deutlich verbessert. Durch die optimierte Steuerung der Druck- und Durchflussparameter, die verbesserte Reaktionsfähigkeit des Systems und die Reduktion der Druckabweichungen erfüllt der Demonstrator nun die Anforderungen an eine höhere Präzision und Effizienz. Diese Verbesserungen machen den Demonstrator zu einem optimalen Werkzeug für präzise Dosieranwendungen, insbesondere in Bereichen, in denen kleine Mengen mit hoher Genauigkeit dosiert werden müssen.

Überprüfung der Gerätefähigkeit (MARTIN, Finetech, IFAM)

Nach den Anpassungen an Hard- und Software des CD06 wurden Untersuchungen zur Gerätefähigkeit durchgeführt. Als erster Realversuch wurden die Ergebnisse des modifizierten und des unmodifizierten CD06 in einem Ringversuch zur Dosierung (Volumen gegen Druck) am Klebstoff Loctite D125-F untersucht (Abbildung 39). Der Ringversuch zeigt, dass das ausgetragene Volumen, unabhängig von der Modifikation und der simultanen Druckmessung stark anwenderabhängig ist. Während eine einzelne Messreihe in sich linear ist, gibt es zwischen den Messreihen deutliche Unterschiede. Dies ist auf den Anwenderfaktor zurückzuführen, wie z.B. das Abstreifverhalten des Klebstoffs von der Dosiernadel. Daher ist eine Kalibrierung bestenfalls geräte- und anwenderspezifisch. Eine Werkskalibrierung kann lediglich als sinnvolles Startniveau verwendet werden, muss aber in der Produktionsumgebung überprüft werden.

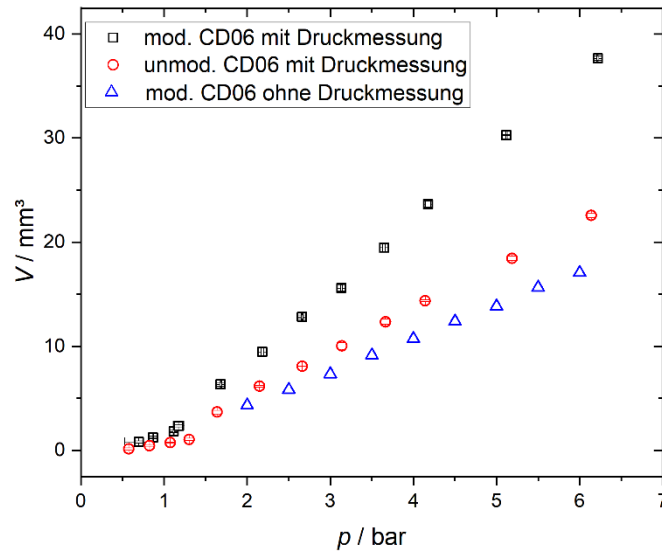


Abbildung 39: Ergebnisse des Ringversuch nach der Modifikation eines CD06, teils mit Druckmessung. Aufgetragen ist das ausgetragene Volumen gegen den eingestellten bzw. gemessenen Druck.

Die Ergebnisse des Ringversuchs wurden anschließend mit der rheologischen Messung abgeglichen. Dazu wurden sie in ein Viskositäts-Scherraten-Diagramm übertragen (Abbildung 40). Insbesondere im Bereich des kleinen Ventils (bei mittleren Scherraten) ist die Abweichung noch groß. Generell gilt aber, dass die Scherverdünnung mit beiden Methoden bestimmt werden kann. Die Ergebnisse aus den Ringversuchen weisen lediglich eine Verschiebung zu höheren Viskositäten auf, der qualitative Verlauf ist ähnlich wie bei der rheologischen Messung.

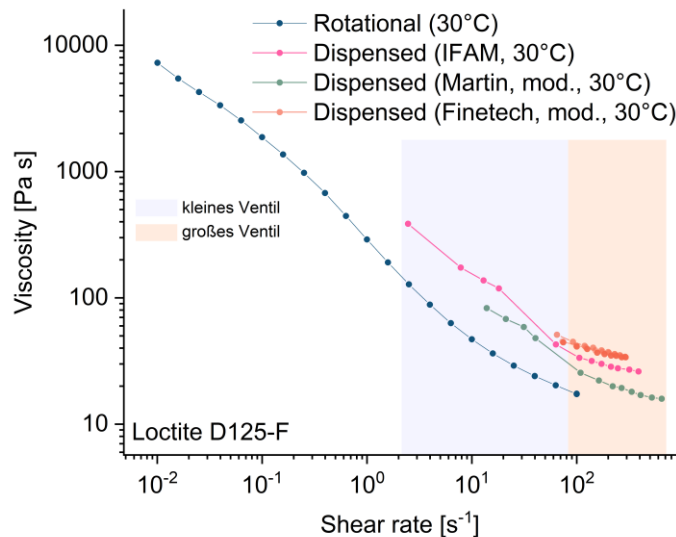


Abbildung 40: Viskositäts-Scherraten-Diagramm zum Abgleich der Ergebnisse der rheologischen Messung mit den Ergebnissen des Ringversuchs.

Als weitere Überprüfung der Gerätefähigkeit sollte das Druckintegral bestimmt und mit seinem Idealwert abgeglichen werden. Dazu wurde eine Druckmessung durchgeführt (Messintervall 50 ms). Aufgrund technischer Limitierungen kann kein idealer Druckpeak erreicht werden, sondern es ergibt sich z.B. durch eine langsamer steigende Flanke und ein Überschwingen zu Beginn eine reale Peakform wie in Abbildung 41 (rechts).

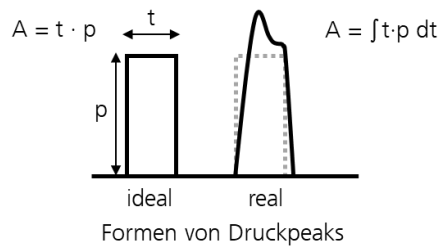


Abbildung 41: Erläuterung der Peakformen eines idealen und eines realen Druckpeaks inkl. dazugehöriger Formeln, mit denen das Druckintegral berechnet wurde.

Für das dosierte Volumen ist maßgeblich das Druckintegral relevant. Daher wurden die real aufgezeichneten Druckpeaks integriert und mit den theoretischen Werten idealer Druckpeaks abgeglichen (Abbildung 42). Während für das große Ventil die Real- und Idealwerte nahezu übereinstimmen, gibt es beim kleinen Ventil deutliche Abweichungen im höheren Druckbereich (0,8 bar bis 1,5 bar). Als Folge daraus müssen bei der folgenden Verifizierung des Algorithmus beide Ventile separat kalibriert werden. Es ist anzumerken, dass für diesen Vergleich nur die unmodifizierte Version des CD 06 zur Verfügung stand.

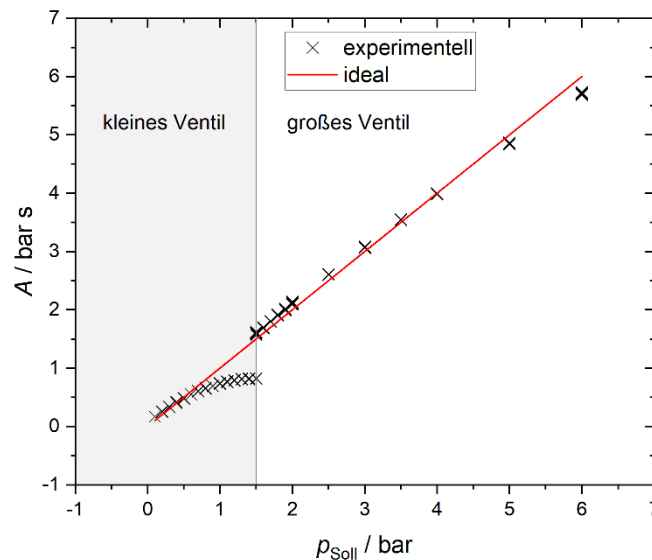


Abbildung 42: Auftragung des Druckintegrals gegen den Soll-Druck. Schwarze Kreuze: experimentelle Werte. Rote Linie: Ideale Werte.

Validierung des Algorithmus (IFAM)

Zur Validierung des Algorithmus und Untersuchung der erreichten Verbesserung der Dosiergenauigkeit wurden durch das IFAM zwei zuvor noch nicht charakterisierte Klebstoffe (Polytec UV 2137 DC und EPO-TEK H20E-PFC) mit Hilfe des Algorithmus kalibriert und dann die Dosiergenauigkeit an willkürlich gewählten Volumina geprüft. Zum Vergleich der Dosiergenauigkeit zwischen dem Stand zu Projektstart und dem Stand nach Projektende wurde zusätzlich der Klebstoff Henkel Loctite D125-F mit drei verschiedenen Nadelgrößen untersucht.

Zuerst wurde der unbekannte Klebstoff EPO-TEK H20E-PFC untersucht. Als Besonderheit bei diesem Klebstoff waren zwei Kalibrierungen nötig, jeweils für das kleine und große Ventil, abhängig von dem gewünschten Zielvolumen. In Abbildung 43 sind die Ergebnisse der Kalibrierung sowie der Punkte zur Überprüfung der Dosiergenauigkeit aufgetragen.

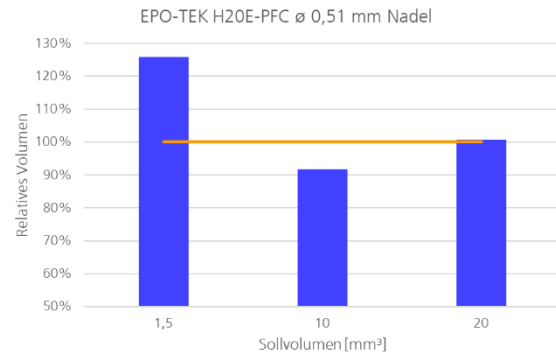
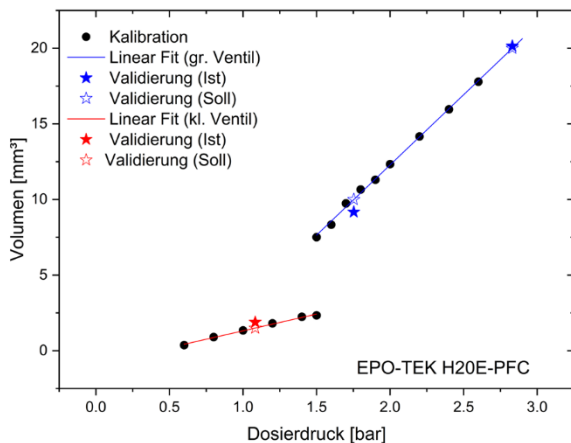


Abbildung 43: Links: Kalibrierungsmessung des EPO-TEK H20E-PFC (schwarze Punkte) inkl. Kalibrierungsgerade und den Validierungspunkten (Sterne). Rechts: Auftragung der ermittelten prozentualen Genauigkeit.

Während die Genauigkeit beim kleinen Ventil mit einer Abweichung (Ist-Volumen zu Soll-Volumen) von 26 % noch eher gering ist, sind die beiden Validierungspunkte beim großen Ventil mit einer Abweichung von 8 % und 1 % sehr genau.

Als zweiter unbekannter Klebstoff wurde Polytec UV 2137 DC eingesetzt, ein niedrigviskoser Klebstoff, der vollständig mit dem kleinen Ventil dosiert wurde. In Abbildung 44 ist zu sehen, dass die Datenpunkte aus der Kalibrierungskurve keinen linearen Verlauf aufweisen. Daher wurde sowohl eine lineare Anpassung verwendet wie sie Standard im Algorithmus ist, als auch eine exponentielle Anpassung – ebenfalls eine Fähigkeit des Algorithmus.

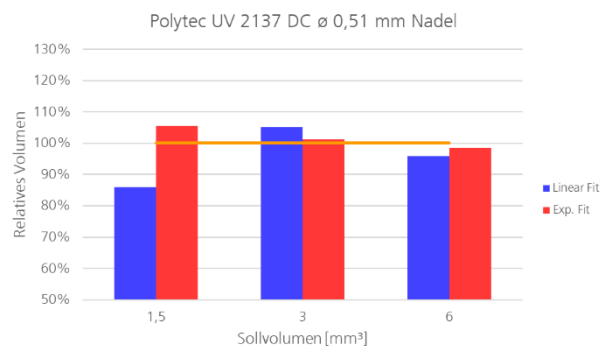
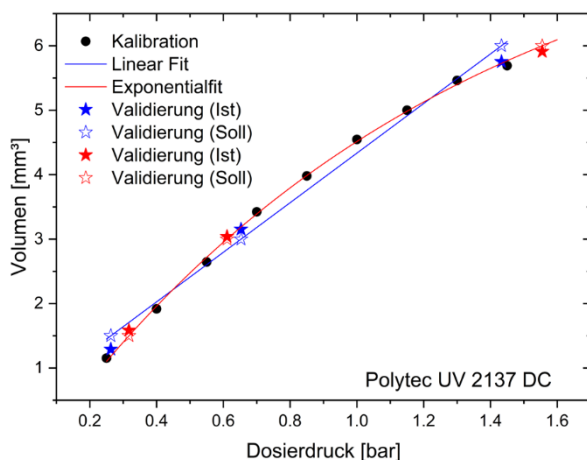


Abbildung 44: Links: Kalibrierungsmessung des Polytec UV 2137 DC (schwarze Punkte) inkl. Kalibrierungsgerade sowie exponentiellem Fit und den Validierungspunkten (Sterne). Rechts: Auftragung der ermittelten prozentualen Genauigkeit.

Die Auswertung der Dosiergenauigkeit mit Hilfe des Algorithmus zeigt, dass die lineare Anpassung bereits zu akzeptablen Abweichungen von Ist- zu Soll-Volumen von 4 % bis 14 % führt, die exponentielle Anpassung jedoch deutlich besser mit Abweichungen von 1 % bis 6 % ist. Diese Messung zeigt also nicht nur eine erneut hohe Dosiergenauigkeit, sondern auch die Robustheit des Algorithmus gegenüber Hardwarelimitationen wie etwa den hier auftretenden Druckabweichungen beim kleinen Ventil.

Zuletzt wurden am IFAM Messungen mit dem Klebstoff Henkel Loctite D125-F durchgeführt, um die Ergebnisse der Messungen mit denen vom Projektbeginn vergleichen zu können. Die

Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 45 bis Abbildung 47 dargestellt. Besonderes Augenmerk soll auf die ersten beiden Messungen gelenkt werden: Da die Zielvolumina so groß waren, wäre ein Dosierdruck über dem Gerätelimit nötig gewesen. Der Algorithmus hat daher den Dosierdruck auf das Gerätelimit gesetzt und die Dosierzeit entsprechend automatisch nach oben angepasst.

Die Dosiergenauigkeit aller Messungen ist mit einer maximalen Abweichung von 10,1 % und von unter 3 % bei fünf der neun Messungen exzellent. Hervorgehoben werden soll an dieser Stelle nochmals, dass die automatische Anpassung der Dosierzeit zur Kompensation des maximalen Gerätedrucks die Dosiergenauigkeit nicht beeinträchtigt und ebenfalls zu exzellenten Ergebnissen führt.

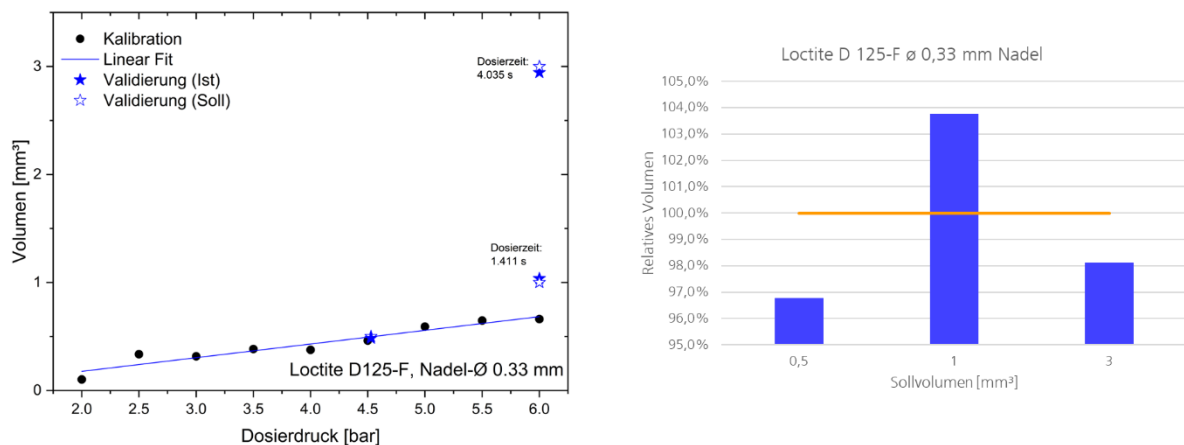


Abbildung 45: Links: Kalibrierungsmessung des Henkel Loctite D125-F (schwarze Punkte) mit einem Nadelinnendurchmesser von 0,33 mm inkl. Kalibrierungsgerade und den Validierungspunkten (Sterne). Rechts: Auftragung der ermittelten prozentualen Genauigkeit.

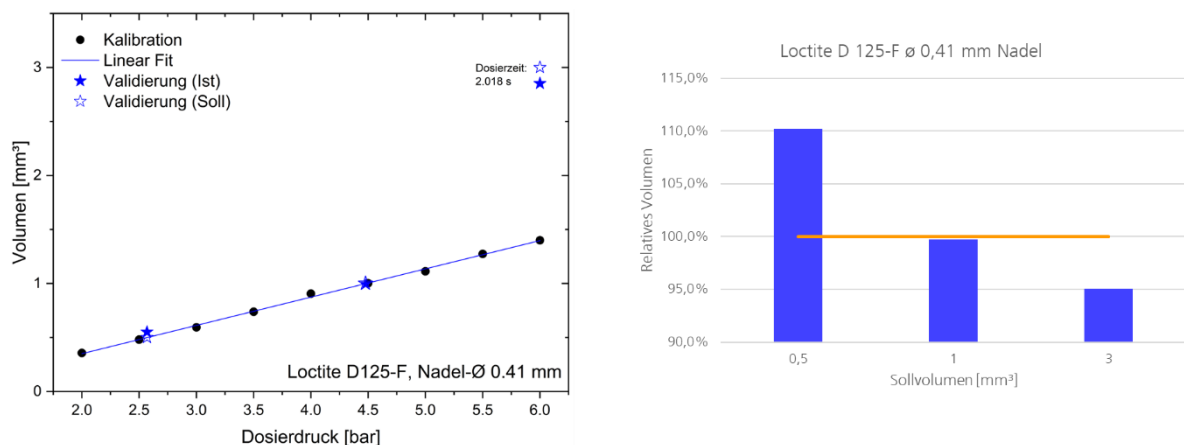


Abbildung 46: Links: Kalibrierungsmessung des Henkel Loctite D125-F (schwarze Punkte) mit einem Nadelinnendurchmesser von 0,41 mm inkl. Kalibrierungsgerade und den Validierungspunkten (Sterne). Rechts: Auftragung der ermittelten prozentualen Genauigkeit.

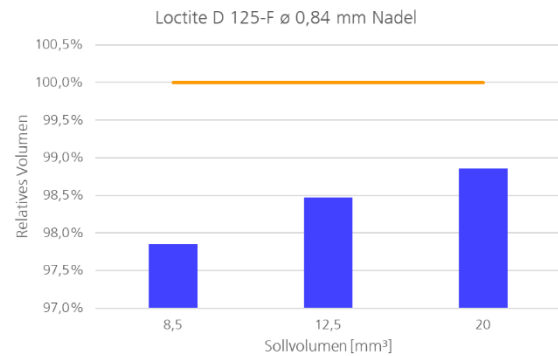
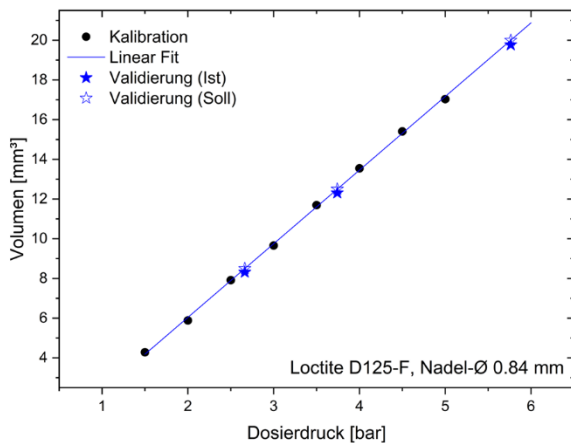


Abbildung 47: Links: Kalibrierungsmessung des Henkel Loctite D125-F (schwarze Punkte) mit einem Nadelinnendurchmesser von 0,41 mm inkl. Kalibrierungsgerade und den Validierungspunkten (Sterne). Rechts: Auftragung der ermittelten prozentualen Genauigkeit.

Die oben vom IFAM unter Anwendung des Algorithmus ermittelten Dosiergenauigkeiten wurden zusammen mit denen von Finetech und Martin zu Projektbeginn ermittelten Genauigkeiten in Abbildung 48 aufgetragen.

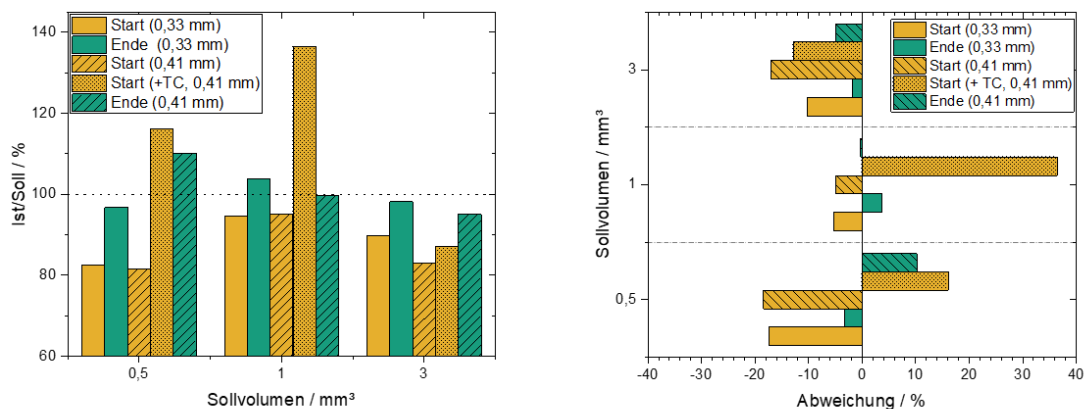


Abbildung 48: Links: Dosiergenauigkeiten der Messungen von Finetech und Martin zu Projektbeginn und dem IFAM unter Anwendung des Algorithmus. Rechts: Auftragung der Abweichungen der Experimente zur Dosiergenauigkeit.

Bei den Messungen mit einem Sollvolumen von 0,5 mm³ konnte die Abweichung mit Hilfe des Algorithmus von 17 % auf 3 % reduziert werden (Dosiernadeldurchmesser von 0,33 mm) bzw. bei einem Dosiernadeldurchmesser von 0,41 mm von durchschnittlich 17 % auf 10 % verbessert werden. Bei einem Sollvolumen von 1 mm³ liegen die Abweichungen mit der 0,33 mm Nadel bei nur 5 % ohne und 4 % mit Anwendung des Algorithmus. Ein hervorragendes Ergebnis lieferte der Algorithmus mit der 0,41 mm Nadel, hier betrug die Abweichung nur 0,3 %, während die Ergebnisse vor dem Projekt zu einer Abweichung von 5 % bzw. 36 % mit Temperaturkompensation führten. Bei dem dritten getesteten Sollvolumen von 3 mm³ setzen sich die guten Ergebnisse des Algorithmus fort: Mit der 0,33 mm Nadel wurde die Abweichung um den Faktor 5 von 10 % auf 2 % reduziert, mit der 0,41 mm Nadel verbesserte sich das Ergebnis von 17 % bzw. 13 % Abweichung zu 5 % Abweichung vom Sollwert. Die Ergebnisse des Algorithmus sind also in jeder Messung besser als die Ergebnisse zu Projektbeginn. Bei einer Gesamtbetrachtung aller Werte ergibt sich eine

durchschnittliche Abweichung von $14 \% \pm 7 \%$ vor Projektbeginn, mit dem Algorithmus wurden durchschnittlich $4 \% \pm 3 \%$ erreicht.

Die erreichte Genauigkeitsverbesserung entsprechend der einzelnen Soll-Volumina wird in Abbildung 49 besonders deutlich: In grau sind die gemittelten prozentualen Abweichungen vom Sollvolumen aufgetragen und in grün daneben die Ergebnisse zum Projektende. Der Algorithmus konnte die Dosiergenauigkeit also um Faktor 3 bis 7 verbessern. Das Projektziel einer verbesserten Dosiergenauigkeit bei kleinen Volumina wurde damit erreicht.

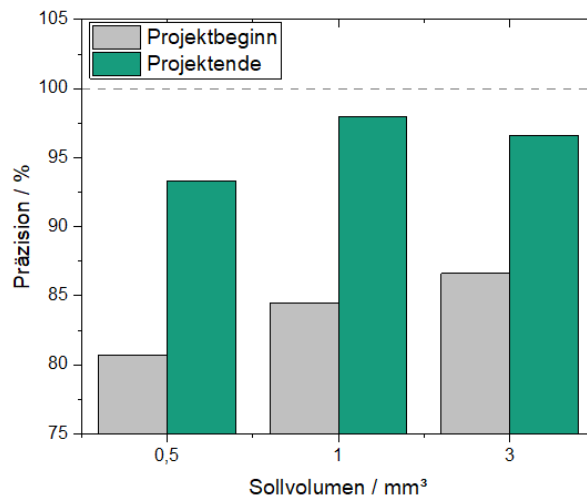


Abbildung 49: Vergleich der gemittelten Dosierpräzision zu Projektbeginn mit denen zu Projektende.

Viskositätsvergleich von rheol. Messungen mit errechneten Werten aus Kalibrierversuchen

Zusätzlich zu den Messungen der Dosiergenauigkeit wurde ein Abgleich von errechneten Viskositäten aus den Kalibrierungsmessungen (Einzeldosierungen innerhalb des Algorithmus; siehe schwarze Punkte Abbildung 43) mit rheologischen Messungen durchgeführt. Die Werte aus den Kalibrierungsmessungen wurden dabei über die Gleichung von *Hagen-Poiseuille* bestimmt.

In der Abbildung 50 bis Abbildung 52 sind die Viskositätskurven der rheologischen Messung und der Kalibrierungsmessung gegen die Scherrate aufgetragen. Für den Klebstoff Polytec UV 2137 DC stimmt nur der erste Punkt der Kalibrierungsmessung mit der rheol. Messung überein. Entgegen den Erwartungen zeigt sich statt des scherverdünnenden Verhaltens ein geringer Anstieg der Viskosität bei höheren Scherraten. Dies lässt sich auf die Abweichungen vom Solldruck des kleinen Ventils zurückführen. Es ist zu erwähnen, dass bei der Dosierung des Polytec UV 2137 DC lediglich das kleine Ventil zum Einsatz kam.

Für den Klebstoff EPO-TEK H20E-PFC stimmt die Viskosität der Kalibrierungsversuche im Bereich des großen Ventils (0,6 bar bis 2,6 bar; hoher Scherratenbereich) sehr gut mit der rheol. Messung überein. Für den niedrigen Druckbereich (kleines Ventil; geringe Scherraten) liegen die errechneten Werte über den gemessenen Werten. Vermutlich ist dies wieder mit der Abweichung vom Solldruck beim kleinen Ventil zu begründen.

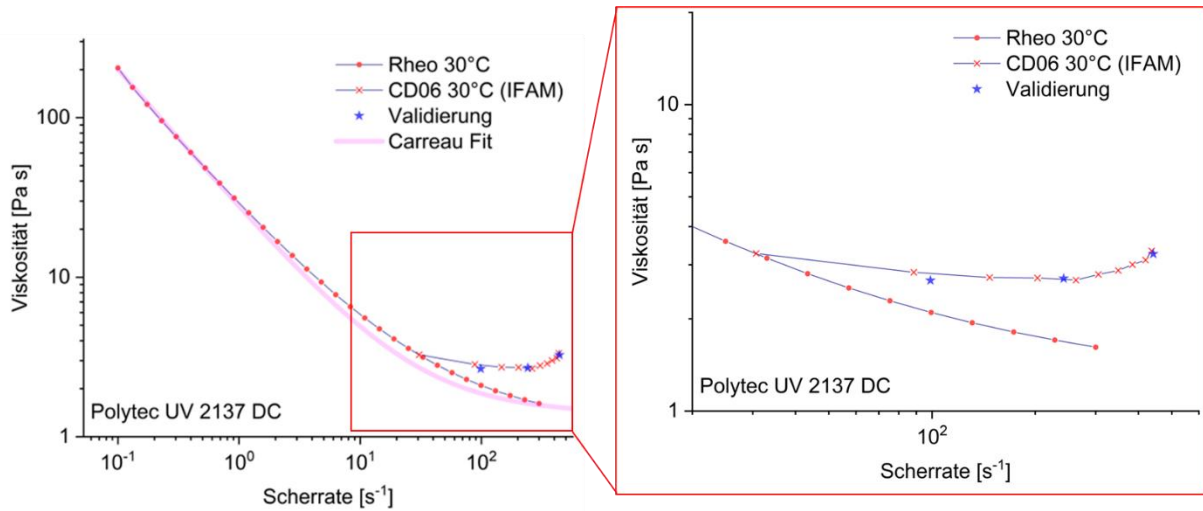


Abbildung 50: Auftragung der Viskosität gegen die Scherrate des Klebstoffs Polytec UV 2137 DC aus der rheol. Messung und den errechneten Werten der Kalibrierungsversuche.

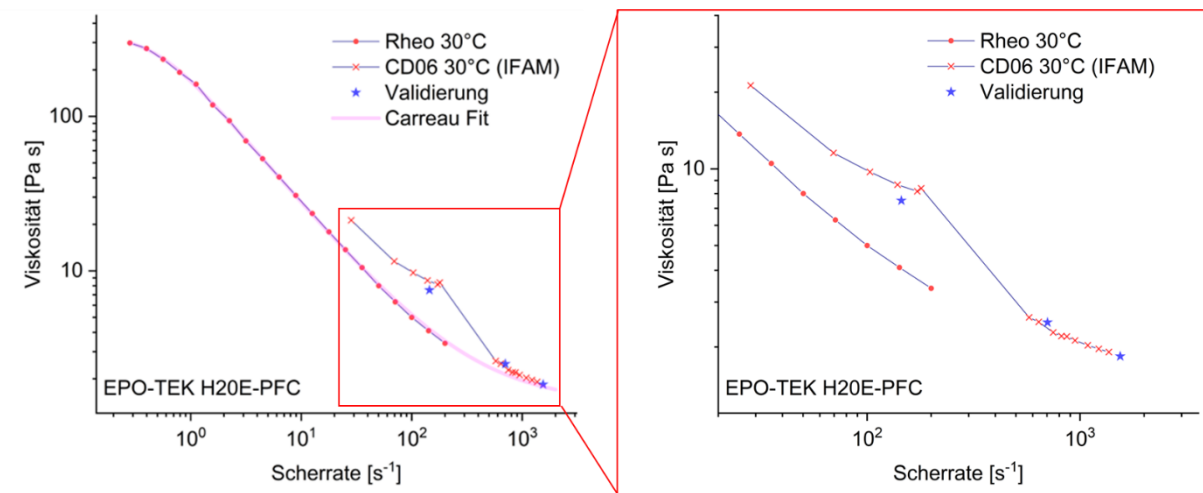


Abbildung 51: Auftragung der Viskosität gegen die Scherrate des Klebstoffs EPO-TEK H20E-PFC aus der rheol. Messung und den errechneten Werten der Kalibrierungsversuche.

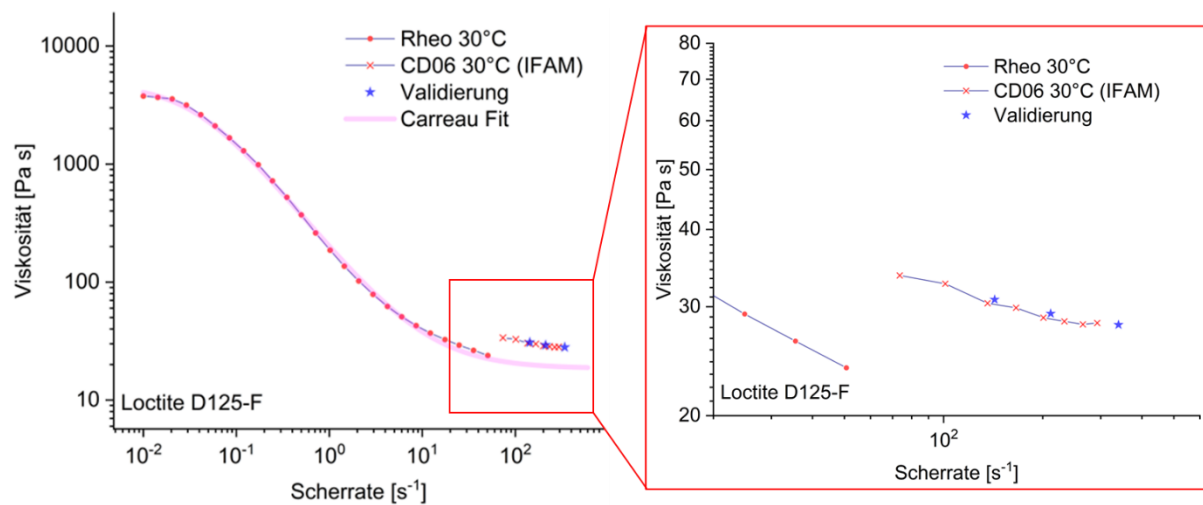


Abbildung 52: Auftragung der Viskosität gegen die Scherrate des Klebstoffs Henkel Loctite D125-F aus der rheol. Messung und den errechneten Werten der Kalibrierungsversuche.

Beim Henkel Loctite D125-F wurde ein Druckbereich von 1,5 bar bis 5 bar untersucht (großes Ventil; hoher Scherratenbereich). Die Viskosität der Kalibrierungsversuche zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die der rheol. Messungen, allerdings mit einem Versatz zu höheren Viskositäten. Dies kann durch die Zeitabhängigkeit der Viskosität begründet werden, da der Klebstoff in der rheologischen Messung konstanter Scherung ausgesetzt ist, während bei den Kalibrierungsversuchen der Klebstoff zwischen den einzelnen Punkten relaxieren kann und dann wieder eine höhere Viskosität aufweist.

Zur Bestätigung hiervon wurde von allen drei Klebstoffen eine Messung mit Scherraten sprüngen durchgeführt (Abbildung 53). Sowohl Polytec UV 2137 DC und Loctite D125-F kehren nach kurzer Erholungsphase (ca. 2 s beziehungsweise ca. 20 s) wieder zur Ausgangsviskosität bei niedriger Scherrate zurück. EPO-TEK H20E-PFC hingegen zeigt im zweiten Bereich niedriger Scherraten eine Viskositätsabnahme mit der Zeit, bis wieder das Ausgangsniveau erreicht wird. Ursache hierfür können die Silberfüllstoffe sein. Die Abweichung von der zuvor gezeigten Viskosität bei niedrigen Scherraten könnte daher, begünstigt durch das kleine Ventil, durch die Viskositätsabnahme im niedrigen Scherratenbereich begründet sein.

Während der Polytec UV 2137 DC seine Struktur im Bereich hoher Scherraten nahezu ohne Zeitverzug abbaut, geschieht die Viskositätsabnahme beim Loctite D125-F im Bereich hoher Scherraten kontinuierlich. Wie zuvor beschrieben, kann dies den Versatz zwischen rheol. Messung und Kalibrierungsmessung erklären, da der Klebstoff bei den rheol. Messungen stetig geschert wird und damit eine niedrigere Viskosität hat als bei den Kalibrierungsmessungen, in denen der Klebstoff zwischen den einzelnen 'Dosierpunkten (entspricht Bereichen hoher Scherrate) Zeit zum Strukturaufbau hat und damit wieder auf ein höheres Viskositätsniveau gelangt.

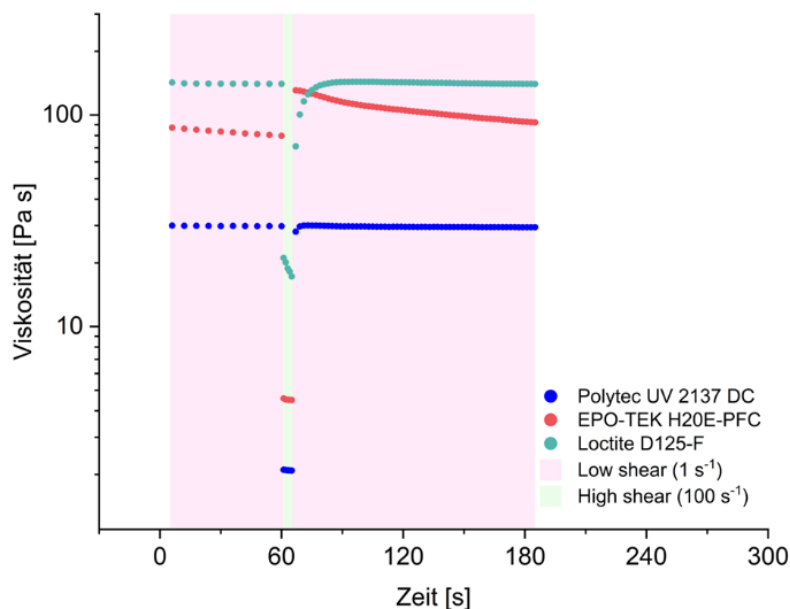


Abbildung 53: Messung der zeitabhängigen Viskosität durch Scherratensprünge im 3-Interval-Thixotropy-Test (3ITT).

Die Validierungsversuche des Algorithmus fügen sich also insbesondere für das große Ventil gut in die rheologischen Messungen ein. Abweichungen des kleinen Ventils können mit den noch vorhandenen Druckabweichungen erklärt werden. Weiterhin kann der Versatz zwischen rheologischer Messung und Dosierversuch beim Klebstoff Loctite D125-F mit seinem thixotropen Verhalten erklärt werden. Es ist bemerkenswert, dass die ermittelten Viskositäten trotz der nicht auf Viskositätsmessungen ausgelegten Hardware des Dispensers so gut mit den Daten des Rheometers übereinstimmen. Dies eröffnet Möglichkeiten zur Nutzung der Viskositätsdaten in zukünftigen Iterationen für eine noch präzisere Dosierung unter Beachtung der Materialeigenschaften.

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

- nicht zutreffend

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Zu Beginn des Vorhabens basierte die Erstellung von Materialrezepten für neue Materialien auf der Erfahrung des Anwenders sowie auf langwierige empirische Versuchsreihen. Aufgrund der Fülle neuer Materialien, kurzen Produktlebenszyklen und der zunehmenden Miniaturisierung, einhergehend mit gestiegenen Anforderungen an die Dispens-Systeme, ist dieser Aufwand nur noch schwer zu leisten. Die erarbeiteten Ergebnisse des Vorhabens, basierend auf neuesten materialwissenschaftlichen Erkenntnissen, ermöglichen einen schnellen Einsatz neuer Materialien, auch für unerfahrene Anwender.

Die erarbeitete Technologie, basierend auf einem Algorithmus sowie Anpassungen an der Pneumatik, kann nahtlos in die vorhandenen Automaten der Fa. Finetech für die Bestückung integriert werden.

Der Markt für die Bestückungsautomaten ist ein beständiger Wachstumsmarkt, befeuert durch immer neue Innovationen der Mikroelektronik-Industrie und der optischen Datenübertragung. Durch die Integration der erarbeiteten Technologie in die Maschinen der Fa. Finetech festigt und erweitert das Unternehmen seinen Kundenstamm im Bereich Forschung und Entwicklung.

Weiterhin ist die Fa. Finetech Anbieter von Serviceleistungen zur Erarbeitung von Produktionsprozessen. Hier fließen die Ergebnisse direkt in die Arbeit der Fa. Finetech ein. Eine Erstellung von Klebeprozessen für Kunden des Unternehmens wird eine deutliche Effizienzsteigerung erfahren, da die Schritte zur Erarbeitung der Materialrezepte deutlich verbessert worden sind.

Das IFAM als Forschungseinrichtung wird die Ergebnisse im wissenschaftlichen Kontext verwerten. Dazu gehören insbesondere Veröffentlichungen, Präsentationen auf Fachkonferenzen sowie die Akquisition neuer, thematisch darauf aufbauender Forschungsprojekte.

Zudem beabsichtigt das Fraunhofer IFAM eine Publikation der Projektergebnisse. Diese können nach Veröffentlichung auf entsprechenden Fachkonferenzen einem breiten Industrie- und Wissenschaftspublikum vorgestellt werden, z.B. auf der International Conference on Industrial Applications of Adhesives (2026, Portugal). Zurzeit werden zwei Ergebnisse als mögliche Publikationen in Betracht gezogen. Erstens, die Entwicklung des Algorithmus,

welcher den Nutzer durch einfache Dosierversuche leitet und mit deren Ergebnisse Materialmodelle fittet und optimierte Dosierparameter ableitet. Dieser Algorithmus kann nach Projektende für die Einrichtung von Zeit-Druck-Steuerungen mit neuen Materialien genutzt. Zweitens die Nutzung der Ergebnisse der einfachen Dosierversuche, welche mit einer Reihe von Umrechnungen als Stützpunkte für rheologische Kurven genutzt werden können.

Zudem werden die Projektergebnisse in die zertifizierten Weiterbildungskurse im Bereich Kleben am Fraunhofer IFAM einfließen. In dem Kurs zum Klebfachingenieur wird das Thema Mikrodosieren behandelt und die Geräte der Firma Martin werden in einem Teil der praktischen Arbeiten verwendet. In diesem Rahmen können die Projektergebnisse miteinbezogen werden; die Kursteilnehmer sind sowohl nationale als auch internationale Mitarbeitende aus der Klebstoffherstellenden sowie -verarbeitenden Industrie.

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

iC Haus hat zu Projektbeginn den Regeltelefonkonferenzen beigewohnt und hat Informationen aus der Perspektive eines Anwenders gegeben. Insbesondere bei der Materialauswahl sowie bei der Erarbeitung des Lastenhefts war die Zuarbeit sinnvoll und wertvoll.

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.

Das erste Kernergebnis für das IFAM ist der Algorithmus, welcher es zum einen ermöglicht mit einfachen Dosierversuchen Regressionen zu erzeugen, mit dessen Hilfe Dosierparameter angepasst werden können, sodass das Dosierergebnis deutlich präziser wird. Das zweite Kernergebnis des IFAM ist die Bestimmung der Viskosität unter Berücksichtigung der anliegenden Scherraten anhand der Ergebnisse der einfachen Dosierversuche. Weiterhin lassen sich hieraus rheologische Kurven generieren, welche im Wesentlichen mit den mittels Rotationsrheometer ermittelten Daten übereinstimmen.

Beide Kernergebnisse sollen in Fachzeitschriften, wie z.B. der „Adhäsion“, veröffentlicht werden.

II.9 Literaturverzeichnis

Carreau, P. J. (1972). Rheological Equations from Molecular Network Theories. *Transactions of the Society of Rheology*, 99–127.