

**Nachhaltige Produktion hoch feststoffhaltiger Wandfarben durch
Umstellung von absatzweiser auf kontinuierliche Fertigung**

Deutsche Bundesstiftung Umwelt - AZ 32590/01-31

Abschlussbericht

Berichtszeitraum 02.10.2015 – 01.10.2018

Projektlaufzeit

02.10.2015 – 01.10.2018

Antragsteller

AURO Pflanzenchemie AG (AURO)
Helmut Nieder, Betriebsleiter
Alte Frankfurter Straße 211
38122 Braunschweig
Tel.: +49 (0)531 28141-19
Fax: +49 (0)531 28141-72
E-Mail: nieder@auro.de

Forschungspartner

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
Institut für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik (ICTV)
Prof. Dr.-Ing. Stephan Scholl
Langer Kamp 7
38106 Braunschweig
Tel.: +49 (0)531 391-2780
Fax: +49 (0)531 391-2792
E-Mail: s.scholl@tu-braunschweig.de



Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	3
1 Zusammenfassung	4
2 Anlass und Zielsetzung	5
3 Projektablauf	7
4 Darstellung der Ergebnisse	8
4.1 AP1: Analyse des derzeitigen Prozesses und Datensammlung	8
4.2 AP 2: Konzeption des kontinuierlichen Prozesses und Reinigung, Prüfung der Rezepturadaption	10
4.3 AP 3: Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme der Laboranlage	12
4.4 AP 4: Ausarbeitung einer qualitätssichernden kontinuierlichen Prozessführung	13
4.5 AP 5: Experimentelle Ausarbeitung und Untersuchung des Neuverfahrens	14
4.6 AP 6: Ausarbeitung von Produktwechsel- und Reinigungsstrategien	18
4.7 AP 7: Pilotanlage zur Absicherung besonders kritischer Prozessschritte	19
4.8 AP 8: Design der Produktionsanlage	19
4.9 Vergleichende ökonomische, ökologische Bewertung der Produktionsverfahren	22
5 Fazit und Ausblick	26
6 Literaturverzeichnis	27

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2–1 Blockfließbild des aktuellen Prozesses zur Wandfarbenherstellung.....	5
Abbildung 3–1 Zeitplan des Projekts mit Meilensteinen.....	7
Abbildung 4.5–1 Vergleich verschiedener Produkteigenschaften von Proben aus absatzweiser und kontinuierlicher Produktion mit Prozessparametern: a) Viskosität, b) Trockensubstanzgehalt, c) pH-Wert und d) Partikelgrößenverteilung.....	15
Abbildung 4.5–2 Entwicklung der Viskosität in Abhängigkeit der Quellzeit.....	16
Abbildung 4.5–3 Rheologische Messung der kontinuierlich hergestellten Wandfarbe mit Verweilzeitstrecke im Vergleich zu einer Wandfarbe aus dem absatzweisen Herstellungsverfahren	17
Abbildung 4.8–1 Fließbild der Produktionsanlage	22
Abbildung 4.9–1 Systemgrenzen der Untersuchung zum kontinuierlichen Herstellungsverfahren [6]	23
Abbildung 4.9–2 Schwerpunktanalyse des prozentualen Anteils der Einsatzstoffe auf das Gesamtindikatorergebnis in den fünf ausgewählten Wirkungskategorien terrestrische Ökotoxizität (TET), globale Erwärmung (GW), Humantoxizität (HT), Salzwasserökotoxizität (MET) und Frischwasserökotoxizität (FET)	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1–1 Materialkosten des absatzweisen Herstellungsverfahrens für einen Batch Dispersionsfarbe	8
Tabelle 4.1–2 Übersicht der allgemeinen Materialflusskosten des bestehenden, absatzweisen Herstellungsprozess	9
Tabelle 4.1–3 Produktkennzahlen und deren zulässige Werte für spezifikationsgerechte Wandfarbe [4]	10
Tabelle 4.4–1: Ablauf der Produktcharakterisierung im Batch-Verfahren sowie Übertragung auf den kontinuierlichen Produktionsbetrieb.....	13
Tabelle 4.5–1 Vergleich der Qualitätseigenschaften der kontinuierlichen Versuche C1 bis C3 mit den Prozesskennzahlen der Viskosität Partikelgröße, Trockensubstanz und pH-Wert aus Kapitel 4.1	15
Tabelle 4.5–2 Geschätztes Hold-up der einzelnen Anlagenkomponenten und Leitungen	17
Tabelle 4.8–1 Berechnungen zur Vorlagengröße und Reichweite in der Produktionsanlage.....	20
Tabelle 4.9–1 Auszug aus den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung [6]	24

1 Zusammenfassung

Die AURO Pflanzenchemie AG produziert am Standort Braunschweig fast ausschließlich mit nachwachsenden, nachhaltig produzierten Roh- und Hilfsstoffen ökologische Farben und Lacke sowie Dispersionsfarben, letztere mit einem Feststoffgehalt von etwa 50%. Durch das absatzweise Herstellverfahren und aufgrund der natürlichen Inhaltsstoffe kommt es unvermeidlich zu Schwankungen in den Produkteigenschaften. Die Qualitätsprüfung erfolgt durch Verarbeitung des fertigen Produktes und kann nur orientierend an Prozessparametern festgemacht werden. Dies erhöht das Risiko von Fehlchargen. Zudem müssen viele Verfahrensschritte wie auch die nach jedem Batch erforderliche aufwändige Reinigung der Anlagenteile manuell durchgeführt werden. Aufgrund der aktuellen Produktionsbedingungen und eingesetzten Rohstoffe müssen die Mitarbeiter umfangreiche persönliche Schutzausrüstung tragen.

Zur Verbesserung dieser wirtschaftlichen, ökologischen wie auch aus Bediener Sicht unbefriedigenden Situation soll ein neues nachhaltiges Herstellverfahren für hoch feststoffhaltige Wandfarbe entwickelt werden. Dies kann insbesondere durch die Umstellung des heute absatzweisen auf einen kontinuierlichen Fertigungsprozess mit einer Produktionskapazität von etwa 100 kg/h erreicht werden. Damit soll der Herstellungsprozess energie- und ressourceneffizienter, ergonomischer sowie noch qualitätsgesicherter gestaltet werden. Es sind Parameter zu identifizieren, zu quantifizieren und in der Verfahrensweise zu verankern, anhand derer eine qualitätssichernde Betriebsweise kontinuierlich eingehalten werden kann. Konkret werden folgende Ziele verfolgt:

- *Ersatz der händischen Zugabe von Edukten und Hilfsstoffen durch kontinuierliche Dosierung*
- *Reduzierung des Energieeinsatzes durch alternative Mischmethoden*
- *Reduzierung der Wartezeiten und Lagerhaltungskosten vor Abfüllung durch parametergeführte Qualitätssicherung*
- *Ressourcenschonendere Produktion mit weniger Fehlchargen bzw. geringerem Produktinhalt der Produktionsanlage*
- *Reduzierung der Reinigungsaufwendungen und des Abwasseranfalls*
- *Produktionsflexibilität durch Mehrproduktanlage*
- *Nachweis der ökologischen Vorteilhaftigkeit des neuen gegenüber dem bisherigen Verfahren*

Zur Erreichung dieser Ziele werden experimentelle und theoretische Arbeiten durchgeführt. Diese sind in neun Arbeitspakete unterteilt, die von der Analyse des derzeitigen Prozesses über eine Pilotanlage bis zum ökologischen, ökonomischen und sozialen Vergleich der Verfahren reichen. Das Projekt adressiert alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, Ökonomie, Ökologie und soziale Verträglichkeit. Abschließend werden die Ergebnisse der kontinuierlichen Herstellung im Labormaßstab auf eine Produktionsanlage mit einer Kapazität von 100 kg/h übertragen.

2 Anlass und Zielsetzung

Die größte Produktgruppe der AURO Pflanzenchemie AG sind Dispersionsfarben. Diese Wandfarben haben einen Feststoffgehalt von bis zu 50% und werden derzeit absatzweise nach dem in Abbildung 2–1 dargestellten Verfahren produziert.

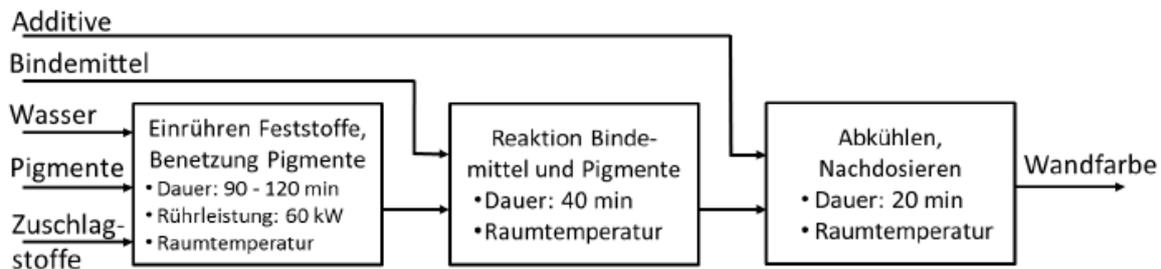


Abbildung 2–1 Blockfließbild des aktuellen Prozesses zur Wandfarbenherstellung

Zunächst wird Wasser in einem Ansatzbehälter bei Raumtemperatur vorgelegt. Dispergiermittel und Entschäumer werden hinzugegeben. Unter Rührer werden verschiedene Füllstoffe und Pigmente zugegeben und mit einem Zahnscheibenrührer untergerührt, bis keine Knoten mehr vorhanden sind. Die Partikel müssen durch die Mischdauer ausreichend benetzt werden. Eine vollständige Benetzung der Partikel ist notwendig, um Agglomerate aufzubrechen, eine erneute Agglomeration zu verhindern und so eine geringe Partikelgröße bei gleichzeitig enger Partikelgrößenverteilung zu erreichen. Einerseits ist es nötig, schnell zu rühren, andererseits muss darauf geachtet werden, nicht zu viel Luft in das Produkt einzutragen. Die Zugabe geschieht derzeit manuell aus 25 kg-Sackgebinden. Hier ergeben sich Verluste durch Staubbildung und Absaugung. Aufgrund der hohen Staub- und Lärmbelastung sowie dem Umgang mit Chemikalien sind dabei Mund-, Ohren-, Augen- und Handschutz als persönliche Schutzausrüstung zu tragen. Nach der Feststoffzugabe folgen weitere Additive zur Verdickung und Stabilisierung der Dispersion. Hier muss ebenfalls auf eine ausreichende Mischdauer geachtet werden um die gewünschten Qualitätseigenschaften der Farbe zu erreichen. Die Zugabe aus 20 L-Gebinden erfolgt ebenfalls händisch durch den Anlagenbediener. Diese Arbeit ist für den anlagenbetreuenden Mitarbeitenden sehr zeit- und arbeitsaufwendig.

Die Rührleistung von etwa 60 kW über 45 bis 60 Minuten führt zu einem hohen Energieeintrag, welcher in einem unerwünschten Anstieg der Temperatur im Rührkessel ausgehend von etwa 15 K auf über 40 °C resultiert. Zusätzlich zur vom Antrieb des Rührwerks abgegebenen Abwärme des Motors wird auch hier ein erheblicher Anteil an Energie im Medium dissipiert.

Am Ende des Prozesses wird eine Qualitätsprüfung durchgeführt. Diese Vorgehensweise ist aufgrund der Wartezeit bis zur vollständigen Trocknung zeitaufwändig und sorgt für erhöhte Lagerhaltungskosten, bis die Produkte seitens der Qualitätssicherung freigegeben werden können. Nach Freigabe wird der Rührkessel zur Abfüllstation transportiert und händisch angeschlossen. Danach erfolgt die Abfüllung in 5 L- bzw. 10 L-Gebinde und Stapelung der Gebinde auf Paletten. Dieser Vorgang wird mit Hilfe von Robotern durchgeführt. Sobald ein Rührkessel vollständig entleert ist, reinigen die Mitarbeiter diesen händisch. Das hierbei anfallende Abwasser wird gegebenenfalls neutralisiert und kann anschließend entsorgt werden. Trotz genauen Einhaltens des Produktionsrezeptes kommt es aufgrund des absatzweisen Herstellverfahrens bei Verwendung wechselnder Rohstoffchargen mit natürlichen Inhaltsstoffen unvermeidlich zu geringen Schwankungen im Endprodukt.

Gegenstand des Forschungsprojekts war die Entwicklung eines neuen, nachhaltigen Herstellverfahrens für hochfeststoffhaltige Dispersionswandfarbe. Dies sollte durch die Umstellung der heute absatzweisen auf eine kontinuierliche Betriebsweise erreicht werden. Mit einer kontinuierlichen Herstellung und damit verbundener Automatisierung kann eine Prozessintensivierung geschaffen werden. So wird nicht nur eine gleichbleibende Qualität durch geregelte Dosierung der Edukte erreicht, sondern auch ein verringerter Energiebedarf [1]. Durch den dauerhaften Betrieb der Anlage werden Reinigungs- und Produktwechselstrategien notwendig, die die Abfall- und Fehlchargenproduktion minimieren. Außerdem können somit War-

tezeiten und Lagerhaltungskosten reduziert werden [2]. Das dauerhafte Tragen der Schutzausrüstung sowie das Handling der Eduktgebände fordert viel Kraft und Anstrengung von den Anlagenbedienenden. Das Neuverfahren erlaubt auch älteren Mitarbeiter, ihren wertvollen Erfahrungsschatz weiterhin einzubringen und an jüngere Generationen weiterzugeben. Nicht zuletzt ist die Höherqualifikation des Arbeitsplatzes durch Einsatz moderner Produktions- und Steuerungssysteme zu nennen. Mit dem Forschungsprojekt wurde ein energie- und ressourceneffizienter, ergonomischer sowie qualitätsgesicherter Herstellungsprozess entworfen und experimentell ausgearbeitet. Das Projekt adressiert damit alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, Ökonomie, Ökologie und soziale Verträglichkeit. Insbesondere die mit der technologischen Weiterentwicklung verbundene Erhöhung der Arbeitssicherheit und der Arbeitsplatzergonomie zeichneten das Projekt aus.

3 Projektablauf

Die Erreichung der zuvor genannten Ziele erfordert experimentelle wie theoretische Untersuchungen bei der Forschungspartner. Diese wurden in Arbeitspakete unterteilt und chronologisch oder parallel bearbeitet. Im nachfolgenden Kapitel 4 werden die Forschungsergebnisse des Projekts anhand der Arbeitspakete dargestellt. Alle Arbeitspakete bis auf Arbeitspaket 7 wurden erfolgreich bearbeitet. Die Planung und der Bau einer Pilotanlage (AP7) konnte aufgrund einer Verschiebung der Produktionskapazitäten vernachlässigt werden. Entsprechend der Bearbeitung der Arbeitspakete konnten ebenfalls die Meilensteine M1 bis M3 erreicht werden. Durch im Projektverlauf entstandene, zeitliche Verschiebungen der Bearbeitung der Arbeitspakete wurden die Meilensteine ebenfalls in erst zu späteren als geplanten Zeitpunkten erfolgreich abgeschlossen. Dies hatte dennoch keine Auswirkungen auf den gesamten Projektablauf und die erfolgreiche Beendigung des Forschungsprojekts.

Projektzeitplan		1. Projektjahr				2. Projektjahr				3. Projektjahr		
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3
Meilensteine			M1			M2		M2	M3	M3		
AP1: Analyse des derzeitigen Prozess und Datensammlung	AURO											
	ICTV											
AP2: Konzeption kontinuierlicher Prozesses und Reinigung, Prüfung Rezepturadaption	AURO											
	ICTV											
AP3: Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme der Laboranlage	AURO											
	ICTV											
AP4: Ausarbeitung einer qualitätssichernden kontin. Prozessführung	AURO											
	ICTV											
AP5: Experimentelle Ausarbeitung und Untersuchung des Neuverfahren	AURO											
	ICTV											
AP6: Ausarbeitung von Produktwechsel- und Reinigungsstrategien	AURO											
	ICTV											
AP7: Pilotanlage zur Absicherung besonders kritischer Prozessschritte	AURO											
	ICTV											
AP8: Design der Produktionsanlage	AURO											
	ICTV											
AP9: Vergleichende ökonomische und ökologische Bewertung der Produktionsverfahren	AURO											
	ICTV											
Arbeitstreffen, Projektkommunikation und Berichterstattung	AURO											
	ICTV											

Abbildung 3–1 Zeitplan des Projekts mit Meilensteinen

4 Darstellung der Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse des Projekts dargestellt. Orientiert an den einzelnen Arbeitspaketen werden diese chronologisch der Bearbeitung vorgestellt. Es werden alle relevanten Erkenntnisse und daraus resultierenden Schlussfolgerungen aufgezeigt.

4.1 AP1: Analyse des derzeitigen Prozesses und Datensammlung

Im Rahmen einer studentischen Arbeit wurden die ökonomischen, ökologischen und prozessbezogenen Daten und Kennzahlen des derzeitigen Herstellungsverfahrens aufgenommen [3]. Aufbauend hierauf wurde in einer weiterführenden Zusammenschau und Bewertung der aktuelle Prozess tiefgreifend analysiert und vollständig dokumentiert.

Für die Erfassung und Bewertung des Produktionsverfahrens und Ermittlung möglicher Einsparpotentiale wird eine Materialflusskostenrechnung durchgeführt. Mit ihrer Hilfe wurden Prozessschritte aufgegliedert und die Material- und Energieverbräuche analysiert.

Ausgangsprozess war die in Kapitel 2 beschriebene absatzweise Produktion von Dispersionsfarbe der Firma AURO Pflanzenchemie AG. Für die Analyse wurden die einzelnen Verfahrensschritte ermittelt und deren entsprechenden Materialflüsse, Energieverbräuche und zugehörige Kosten bestimmt. Die zugehörige Kostenrechnung betrachtete die Material-, Energie-, System- und die Abfallmanagementkosten. Die Kosten wurden dem Materialfluss zugeordnet und anhand der Materialverteilung zwischen Produkt und Verlust auf die Ströme umgerechnet.

Die erforderlichen Daten wurden von der AURO Pflanzenchemie AG zur Verfügung gestellt. Daten, die nicht erfasst werden konnten, wurden mit Annahmen ergänzt. Die Materialflusskostenrechnung der folgenden ermittelten Kostenstellen werden in Kapitel 4.9 für die vergleichende ökonomische Bewertung der Herstellungsverfahren verwendet.

Tabelle 4.1–1 Materialkosten des absatzweisen Herstellungsverfahrens für einen Batch Dispersionsfarbe

Edukt	Masse [kg]	Stückkosten [€/n]	Gesamtmaterialkosten [€]
Wasser	490,00	0,01	4,90
Additiv 1	2,5,	6,10	15,25
Additiv 2	1,00	8,31	8,31
Füllstoff 1	25,00	1,76	44,00
Füllstoff 2	100,00	0,84	83,50
Füllstoff 3	325,00	0,19	62,08
Pigment	125,00	1,94	242,50
Verdicker	10,10	11,14	112,51
Additiv 4	3,70	5,30	19,61
Additiv 5	1,30	1,08	1,41
Bindemittel	157,00	4,67	733,19
Summe	1253,02		1327,26

Während des Projektverlaufs kam es zu einer Rezepturumstellung und damit verbundenen Verschiebung der Mengenstellen der einzelnen Eduktpositionen. Diese Umstellung wurde nicht in der Materialkostenrechnung betrachtet. Für die vergleichende Prozessbewertung wird davon ausgegangen, dass der Austausch einzelner Rohstoffe eine zu vernachlässigende Änderung an den Materialkosten hervorruft. Da für

beide Verfahren das gleiche, neue Rezept verwendet wird, können die weiteren Kostenrechnungen trotzdem übertragen und verglichen werden.

Die Energiekosten des absatzweisen Verfahrens setzen sich aus dem Betrieb eines Rohrkettenförderers und des Dissolvers anteilig der Betriebszeit und unter Vollast zusammen. Bei Energiekosten pro kWh von 0,179 €/kWh und einer Nennleistung der Geräte von 60 kW für den Dissolver und 5 kW für den Förderer, belaufen sich die Energiekosten eines Absatzes auf 16,57€.

Die Systemkosten addieren sich aus den Personalkosten, Raumkosten, Abschreibungen und Wartungskosten. Die Personalkosten und Raumkosten belaufen sich auf insgesamt 49,01€. Die Abschreibungen und Wartungskosten, errechnet anteilig auf einen hergestellten Absatz, betragen 11,11€.

Die Abfallmanagementkosten beinhalten die Materialströme des Reinigungswassers und der Reinigungsmittel. Da nicht nach jedem Batchprozess die Behälter gereinigt werden, werden diese Kosten ebenfalls je Absatz umgelegt. Verlustmassenströme der Rohstoffe wie beispielsweise in der Staubabsaugung der Eduktzugabe, werden nicht berücksichtigt. Ein Erfassen dieser pro Ansatz geringen Mengen wurde als zu großer Aufwand im Verhältnis zur Verbesserung der Genauigkeit des Modells gesehen. Die aus den Abwassermengen und Reinigungsmittelaufwendungen resultierenden Kosten belaufen sich auf 3,73€. Ein Teil des produzierten Abwassers wird aufgefangen und für den nächsten absatzweisen Ansatz als Wasservorlage wiederverwendet. Diese Menge wird in der Kostenrechnung nicht betrachtet, hat aber Einfluss auf die ökologische Vorteilhaftigkeit des Verfahrens.

Ein Großteil der durch den Prozess entstehenden Kosten entfallen auf die Rohstoffe; etwa 94,54% der Gesamtkosten des Prozesses sind den Materialkosten zuzurechnen (Tabelle 4.1–2). Hierdurch besteht nur wenig Optimierungsmöglichkeit zur kosteneffizienteren Gestaltung des Prozesses.

Tabelle 4.1–2 Übersicht der allgemeinen Materialflusskosten des bestehenden, absatzweisen Herstellungsprozess

Kostenstelle	Kosten pro Batch-Ansatz [€]	Prozentualer Anteil an den Gesamtkosten [%]
Materialkosten	1327,26	94,29
Energiekosten	16,57	1,18
Personal- und Raumkosten	49,01	3,48
Wartungskosten und Abschreibung	11,11	0,79
Abwasserkosten (excl. Gesamt)	3,73	0,26
Summe	1407,68	100

Neben der Analyse der derzeitigen Produktion, wurden detaillierte Untersuchungen der absatzweisen Herstellung im Labormaßstab durchgeführt. Dabei konnten maßgebende Erkenntnisse für die Konzeptionierung des kontinuierlichen Prozesses gewonnen werden. Hierzu wurden Qualitätskriterien wie Dichte, pH-Wert, Viskosität, Partikelgrößenverteilung und Trockensubstanz von qualitätsgerechten Rückstellproben sowie im Labor hergestellter Proben verglichen. Dies erlaubte die Entwicklung von Qualitätsstandards (Tabelle 4.1–3) mit zugehörigen Prüfverfahren [4].

Tabelle 4.1–3 Produktkennzahlen und deren zulässige Werte für spezifikationsgerechte Wandfarbe [4]

Produkteigenschaft	Bedingung oder Anmerkung	Zulässige Werte		Einheit
		min	max	
Viskosität	bei $\dot{\gamma} = 100 [s^{-1}]$	1295	5935	$mPa \cdot s$
	bei $\dot{\gamma} = 400 [s^{-1}]$	605	993	
Dichte		1,40	1,43	$g \cdot cm^{-3}$
Partikelgröße (Summenverteilung Partikelvolumen Q_3)	$x_{3,10}$	0,16	0,18	μm
	$x_{3,25}$	0,30	0,37	
	$x_{3,50}$	1,00	1,30	
	$x_{3,75}$	4,90	6,50	
	$x_{3,90}$	10,00	20,0	
Trockensubstanz		51	54	%
pH-Wert		9,0	9,8	-
Farbabstand ΔE		0	1,0	-

4.2 AP 2: Konzeption des kontinuierlichen Prozesses und Reinigung, Prüfung der Rezepturadaption

Parallel zur Untersuchung des bestehenden Prozesses wurde mit der Entwicklung des kontinuierlichen Prozesses begonnen.

Vorversuche zum Dispergieren der eingesetzten Rohstoffe in Wasser mit verschiedenen Konzentrationen wurden anhand von Kriterien, wie Neigung zur Agglomeration und Sedimentation sowie Benetzbarkeit, bewertet. Ziel ist es, eine Pigmentslurry zu erhalten, die während eines kontinuierlichen Prozesses leicht dosier- und handhabbar ist. Hierbei wurde ein Mindestverhältnis von Masse des Fluids zu Feststoff festgelegt. Die Einhaltung des Mindestverhältnisses garantiert eine agglomeratfreie Slurry, die in einem kontinuierlichen Prozess weiterverarbeitet werden kann. Allerdings übersteigt die Summe an benötigtem Fluid zur Herstellung der Slurries die Gesamtmasse an Fluid im Endprodukt. Dies hat zur Folge, dass ein nachträgliches Entziehen von Flüssigkeit im Prozess notwendig wäre, was sich technik- sowie energieintensiv auf das Gesamtkonzept auswirkt. Entsprechend wurde im weiteren Verlauf auf die kontinuierliche Dosierung von Feststoffen verfolgt.

In Versuchen zur Untersuchung der Dosierung der pulverförmiger Rohstoffe wiesen die eingesetzten Labordosierer eine ungenügende Dosierleistung auf. Diese konnten weder mit mechanischen Austragshilfsmitteln noch mit Druckluft gesteigert bzw. auf einem konstanten Level gehalten werden. Grund hierfür waren Kompaktierungen und Feststoffbrückenbildung in den Vorlagebehältern, die durch eine geringe Fließfähigkeit der Pulver entstehen. Erst für ein Verhältnis f_c von Verfestigungsspannung σ_1 zu Druckfestigkeit σ_c größer als 4 ist eine Fließfähigkeit gegeben, darunter ist das betrachtete Pulver kohäsiv. Wie in Abbildung 4.2-1 zu sehen ist, ist lediglich im Fall des Verdickers E eine gute Rieselfähigkeit zu erwarten, die sich auch in einer zur Dosierdrehzahl proportionalen Dosierleistung widerspiegelt. Für die pulverförmigen Edukte A bis D wird eine alternative Dosiervorrichtung mittels einem Doppelschneckendosierer auf einer Wiegeeinheit gewählt. Durch den Transport über die Doppelkonkavschnecke und die Detektion des Differenzgewichts der Vorlage auf der Wiegeeinheit, kann eine hinreichend genaue Dosierung gewährleistet werden. Der größere Mindestdurchsatz der Industriedosierer erlaubt keine Feststoffdosierung einzelner Edukte, sodass in der Laboranlage eine homogene Pulvermischung, exklusive des Verdickers, eingesetzt wird.

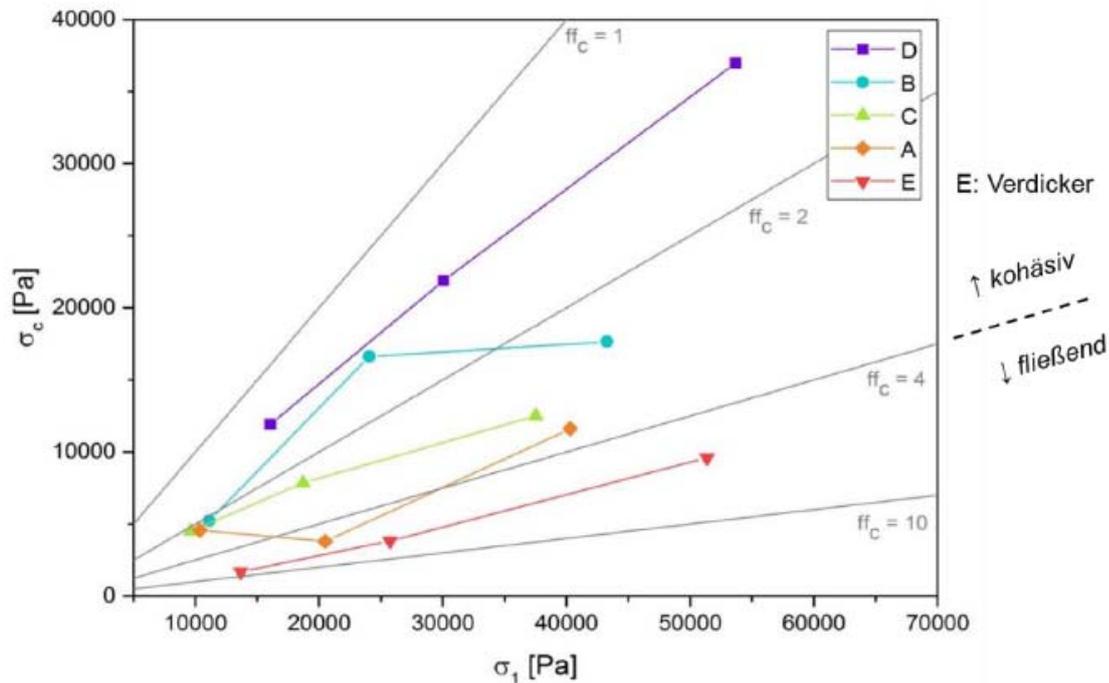


Abbildung 4.2-1: Fließverhalten der pulverförmigen Einsatzstoffe [5]: Auftragung der Verfestigungsspannung σ_1 und Druckfestigkeit σ_c

Die Untersuchung der Dispergierung der Einsatzstoffe zeigte des Weiteren, dass mit dem verwendeten aktiven Rotor-Stator-Dispergierer das Bindemittel und der Verdicker nicht zeitgleich dispergiert werden können. Bei Zugabe und Einmischung des Verdickers in den Mischer führt die verdickende Fähigkeit des Additivs zu einer ansteigenden Produktviskosität. Dies resultiert in einer hohen Leistungsanforderung zur Durchmischung der Dispersion. Die Zugabe des Bindemittels in den sehr intensiven Mischprozess verursacht eine Auspolymerisierung des Additivs. Dies führt zu einer Überlastung und folglich zum Ausfall des Dispergierers. In beiden Fällen ist ein Auseinanderbauen und händisches Reinigen des aktiven Mixers unumgänglich. Um dies zu vermeiden werden Verdicker sowie Bindemittel nach der Pigmentdispergierung zudosiert.

Für die spezifikationsgerechte Dosierung des Bindemittels wurden verschiedene Dosiereinheiten untersucht. Das Verwenden einer Schlauchpumpe im Labormaßstab in Verbindung des Vorlagegefäßes auf einer Wiegeeinheit erwies sich als am Geeignetsten. Da das Bindemittel bei Filmbildung und Sauerstoffkontakt zur schnellen Polymerisation neigt, ist ein größtmöglicher Schlauchdurchmesser zu wählen. Auch bringen das Begasen mit Stickstoff sowie Abkühlen der Vorlage Vorteile in der Verarbeitung des Einsatzstoffes. Die zeitliche Gewichtsabnahme einer sich auf einer Waage mit digitalem Ausgang befindlichen Vorlage regelt deren Drehzahl zur Einhaltung des Rezepturmassenstroms.

Die Zugabe des Verdickers erfolgt über gravimetrische Dosierung aus einem Labordosierer. Das verwendete Additiv benötigt eine Quellzeit von ca. 25 Minuten um seine Zielviskosität einzustellen. In der absatzweisen Herstellung wird der Batchkessel ohne Zugabe weiterer Einsatzstoffe konstant gerührt. Da sich dies in einem kontinuierlichen Prozess nur schwer realisieren lässt, wird eine Verweilzeitstrecke installiert. Das Produkt benötigt bei maximalem Prozessmassenstrom 25 Minuten um die Strecke zu passieren. So wird sichergestellt, dass vor der abgeschlossen Quellzeit keine weiteren Edukte hinzugefügt werden.

Ähnlich wie bei den pulverförmigen Rohstoffen erwies es sich von Vorteil, die Fluidkomponenten, bis auf das Bindemittel, aufgrund der stark unterschiedlichen Massenanteile im Endprodukt in Form einer verdünnten Vormischung vorzulegen und dem Prozess gemeinsam zuzuführen.

Auf diese Weise können alle notwendigen Edukte bereitgestellt und rezepturgerecht dosiert werden. Die manuelle Zugabe während des Produktionsprozesses kann so vermieden werden. Lediglich das Bereitstellen der Einsatzstoffe als Reinstoff oder Gemischvorlage muss von Mitarbeitern vorbereitet werden. Hier können, gerade im Hinblick auf einen größeren Produktionsmaßstab, aber geeignete Geräte beschafft werden, die diese Aufgaben erleichtern.

Durch die erfolgreiche Bearbeitung der ersten beiden Arbeitspakete konnte Meilenstein eins des Projekts erreicht werden. Die Untersuchungen des derzeitigen Prozesses und die Charakterisierung der Edukte und Produkte fanden in der Entscheidung und Auswahl der Komponenten der Laboranlage Beachtung. Es hat sich herausgestellt, dass die Verarbeitung der pulverförmigen Edukte in der Anlage nicht als Slurry möglich ist. Daher werden die Feststoffe dosiert und direkt dispergiert.

4.3 AP 3: Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme der Laboranlage

Ausgehend von den Ergebnissen aus dem vorherigen Arbeitspaket wurde ein kontinuierlicher Fertigungsprozess entwickelt. Die verfahrenstechnischen Operatoren orientieren sich an dem Batchprozess. Um einen kontinuierlichen Prozessablauf (Abbildung 4.3-2) der Mischanforderungen zu erreichen wird ein Kaskadenaufbau gewählt.

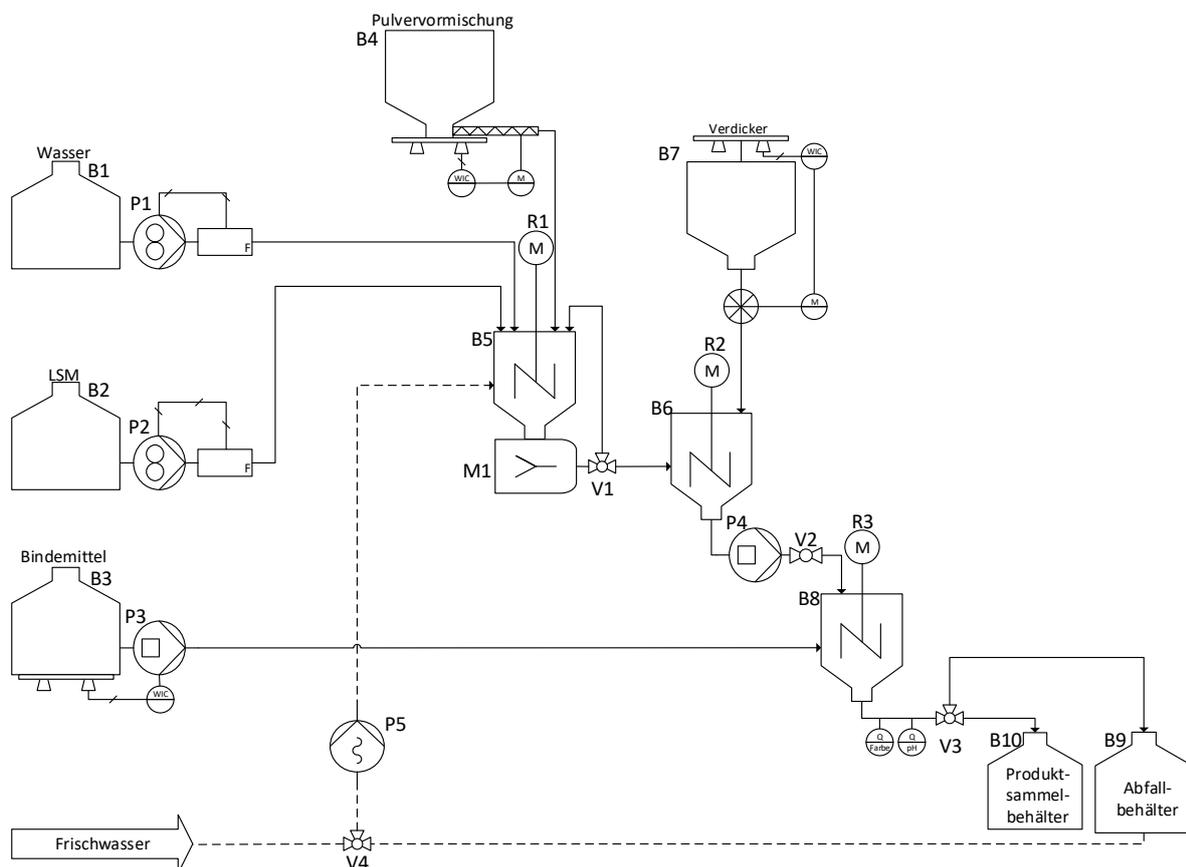


Abbildung 4.3-2: Finales Prozessfließbild der Laboranlage zur kontinuierlichen Herstellung von Dispersionsfarbe

Die Fluidvorlage und zusätzlich benötigtes Wasser werden aus den jeweiligen Vorlagebehältern B1 und B2 mittels Mikrozahnradpumpen P1 und P2 in den ersten Mischprozess im Behälter B5 geleitet. Zusätzlich werden aus der Feststoffvorlage B4 alle notwendigen Pigmente und Füllstoffe gravimetrisch zudosiert. Aufgrund der Dosiererwahl im Industriemaßstab erhöht sich die Produktionskapazität der Laboranlage von $1 - 5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ auf $5 - 15 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Da dieser Betriebsbereich mit stabilen Prozessparametern erreicht werden kann, ist der geplante Aufbau einer Pilotanlage mit einem Durchsatz von $20 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ nicht erforderlich.

Die in Behälter B5 produzierte Pigmentflüssigvordispersion wird in dem Inline-Labormischer dispergiert. Die sehr hohen Drehzahlen und die kleinen Abmessungen zwischen Rotor und Stator im Dispergierer erzielen eine gute Durchmischung. Mit einer Teilrückführung der Rohdispersion zur Vormischung in B5 wird eine ausreichende Vermischung von Flüssig- und fester Vorlage gewährleistet. Nach der Dispergierung und Rückführung über V1 gelangt ein Teil der noch dünnflüssigen Rohdispersion in Behälter B6. Mittels gravimetrischer Dosierung wird dem Produktstrom der Verdicker zugegeben. Nach Scherung durch ein mit einer Dispergierscheibe bestücktes Rührwerk wird das Rohdispersion-Verdicker-Gemisch mittels einer Schlauchpumpe (P4) durch eine Verweilzeitstrecke gepumpt. Diese besteht aus einer Leitung von 23m, in der bei einem maximalen Durchsatz von 15 kg/h der Produktstrom die mittlere Verweilzeit 25 min beträgt. Anschließend erfolgt in B8 die Zugabe des Bindemittels über eine gravimetrisch geregelte Schlauchpumpe P3. Das Einmischen des letzten Additivs erfolgt erneut durch ein Rührwerk mit Dispergierscheibe. Nach Prüfung von Qualitätseigenschaften wie Farbe und pH-Wert erreicht die Dispersion je nach Produkteigenschaften über das Ventil V3 den Abfall- oder Produktsammelbehälter B9 bzw. B10.

Die Behälter B5, B6 und B8 sind mit Füllstandsensoren ausgestattet.

4.4 AP 4: Ausarbeitung einer qualitätssichernden kontinuierlichen Prozessführung

Aus der Analyse des absatzweisen Prozesses ergaben sich die in Tabelle 4.4–1 angegebenen Prozessparameter, die auch für die Produktbewertung im Batch-Verfahren genutzt werden. Da sich nicht alle Messverfahren auf den kontinuierlichen Prozess übertragen lassen, sind in Tabelle 4.4–1 ebenfalls verschiedene Möglichkeiten aufgelistet und die finale Entscheidung markiert.

Tabelle 4.4–1: Ablauf der Produktcharakterisierung im Batch-Verfahren sowie Übertragung auf den kontinuierlichen Produktionsbetrieb

	Parameter	Batch-Produktion	kontinuierliche Produktion
zeitliche Reihenfolge des Batch-Prozesses	1. Trockensubstanz	Einwaage, Trocknung im Trockenschrank	Regelmäßige Probenahme, Einwaage, Trocknung im Trockenschrank
	2. Deckkraft und Farbe	Ausstreichen auf Prüfbogen	Farbe: Online mittels Farbsensor
	3. Viskosität	Nachträgliche Messung im Labor	In-line-Viskosimeter oder <u>At-line Analysesystem (Rheometer)</u>
	4. Dichte	Nachträgliche Messung im Labor	In-Line Coriolisdurchflussmesser oder <u>At-line Analysesystem</u>
	5. Größe und Verteilung der Partikel	Nachträgliche Messung im Labor	At-line-Analysesystem (Partikelgrößenmessgerät)
	6. pH-Wert	Nachträgliche Messung im Labor	In-line pH-Sonde
	7. Deckkraft und Farbe	Farbmessung nach der Trocknung	Deckkraft entfällt bei erfolgreicher Nassfarbwertaussage
	8. Trockensubstanz	Auswaage nach der Trocknung	At-line Auswaage im Trockenschrank

Die hohe Produktviskosität der Dispersionsfarbe kann zu einem hohen Druckverlust in Rohrleitungsschnitten führen, bei denen ein kleiner Durchmesser zur Einhaltung der Messgenauigkeit benötigt wird.

Beispielsweise berechnet sich der Druckverlust in einem teilweise zur Bestimmung des Produktmassenstroms verwendeten Massendurchflussmessers zu über 30 bar. Aus diesem Grund und einer möglichen Verblockung einzelner Kanäle durch schlecht dispergierte Agglomerate wurde auch auf die Verwendung von mikroverfahrenstechnischen Mischkomponenten verzichtet. Aufgrund der kleinen Abmessungen im Coriolis-Durchflussmesser sowie im In-line Viskosimeter können diese Verfahren keine Verwendung in der Laboranlage finden. Der Umbau des Viskosimeters zu einer Messeinheit in der vergrößerten Anlagenperipherie einer Produktionsanlage kann eine Nutzung ermöglichen. Eine Temperaturmessung während der kontinuierlichen Produktion ist nicht mehr erforderlich, da im Aufbau der Laboranlage keine Messung vorhanden ist, die temperaturabhängig ist. Lediglich ein Temperatursensor am Ausgang des In-line-Dispergierers ermöglicht die Überwachung einer möglichen Überhitzung des Geräts und des Produkts.

Die pH-Sonde sowie der Farbsensor konnten erfolgreich in die Anlage integriert werden. Mittels einem speziell gebauten Messhalter wird gewährleistet, dass der Messsensor und -bereich nicht benetzt bleibt, sondern jederzeit aktuell hergestelltes Produkt vermessen wird.

Viele der identifizierten Parameter lassen sich nur schwer In- oder On-line im Prozess messen. Produktparameter, wie Deckkraft und Trockensubstanz, können auch bei kontinuierlicher Betriebsweise nicht vollautomatisiert überprüft werden. Dies ist eine bekannte Herausforderung der Farben- und Lackherstellung. Regelmäßige Beprobung und anlagenexterne Analyse von Eigenschaften, wie dem Trockensubstanzgehalt oder der Deckkraft, sind auch weiterhin unverzichtbar. Dennoch können At-line Analysegeräte für viele Messparameter, wie Viskosität, Dichte und Partikelgrößenverteilung, im Vorfeld eine schnelle Aussage über die Spezifikation geben und andauernde Messungen auf ein Minimum reduzieren.

Neben qualitätssichernden Messstellen, werden auch prozesssichernde Parameter aufgezeichnet. Die Regelung der zugeführten Einzelmassenströme jedes Rohstoffs oder deren Mischungen sichert die Einhaltung der Gesamt Rezeptur. Die Vorlagebehälter B1 und B2 werden mittels kapazitiven Füllstandsensoren überwacht und somit vor einem vollständigen Entleeren bewahrt. Die Vorlagebehälter sind zur gravimetrischen Dosierung auf Wiegeeinheiten installiert und werden über die Massendifferenzen gesteuert. Zusätzlich sind in den Rührbehältern B5 Grenzstandschalter und in Behälter B6 und B8 Ultraschallsensoren zur Füllstandüberwachung montiert. Über den ermittelten Füllstand der Behälter B6 und B8 lässt sich das enthaltene Volumen abschätzen. Diese Werte dienen vor allem der Prozessregelung.

4.5 AP 5: Experimentelle Ausarbeitung und Untersuchung des Neuverfahrens

Der kaskadische Aufbau der Laboranlage, wie er in Kapitel 4.3 beschrieben ist, ermöglicht eine abschnittsweise In- und Außerbetriebnahme der Anlage. Dadurch kann, bei rezepturgetreuer Dosierung, von Beginn an mit spezifikationsgerechten Eduktverhältnissen produziert werden. Der Anfall von nicht spezifikationsgerechtem Produkt bleibt somit auf ein Minimum reduziert. Auch beim Beenden einer Produktion kann bis zum letzten Verfahrensschritt ein spezifikationsgerechtes Produkt hergestellt werden, das der Produktmenge hinzugefügt werden kann. Im Anlagensteuerprogramm sind die Schritte zur vollständigen Inbetriebnahme der Anlage in einem Protokoll hinterlegt. So wird dem Bediener der Anlage abschnittsweise erläutert, welche Aufgaben für die nächsten Schritte bearbeitet werden müssen. Automatisierte Schritte laufen bei Bestätigung der Bearbeitung nachfolgend ab. So wird sowohl die Abfallmenge reduziert, als auch die Inbetriebnahme der Anlage deutlich beschleunigt. Nach der Inbetriebnahme wird mittels Steuerprogramm die gravimetrische Zugabe der Edukte kontinuierlich gehalten. Die Pumpen werden über die Füllstandsensoren der Behälter geregelt, sodass ein Produktstrom von 15 kg/h konstant erfüllt wird. Bei der Qualitätsuntersuchung nach den gleichen Vorgaben, die auch bei der Absatzweise hergestellten Farbe verwendet wird, zeigt sich ein Trockensubstanzgehalt bei den ersten Versuchsfahrten, der im Qualitätsstandard des Produkts liegt (Abbildung 4.5–1, b). Der Aufbau und die gravimetrische Dosierung der Edukte erfolgt dementsprechend spezifikationsgerecht.

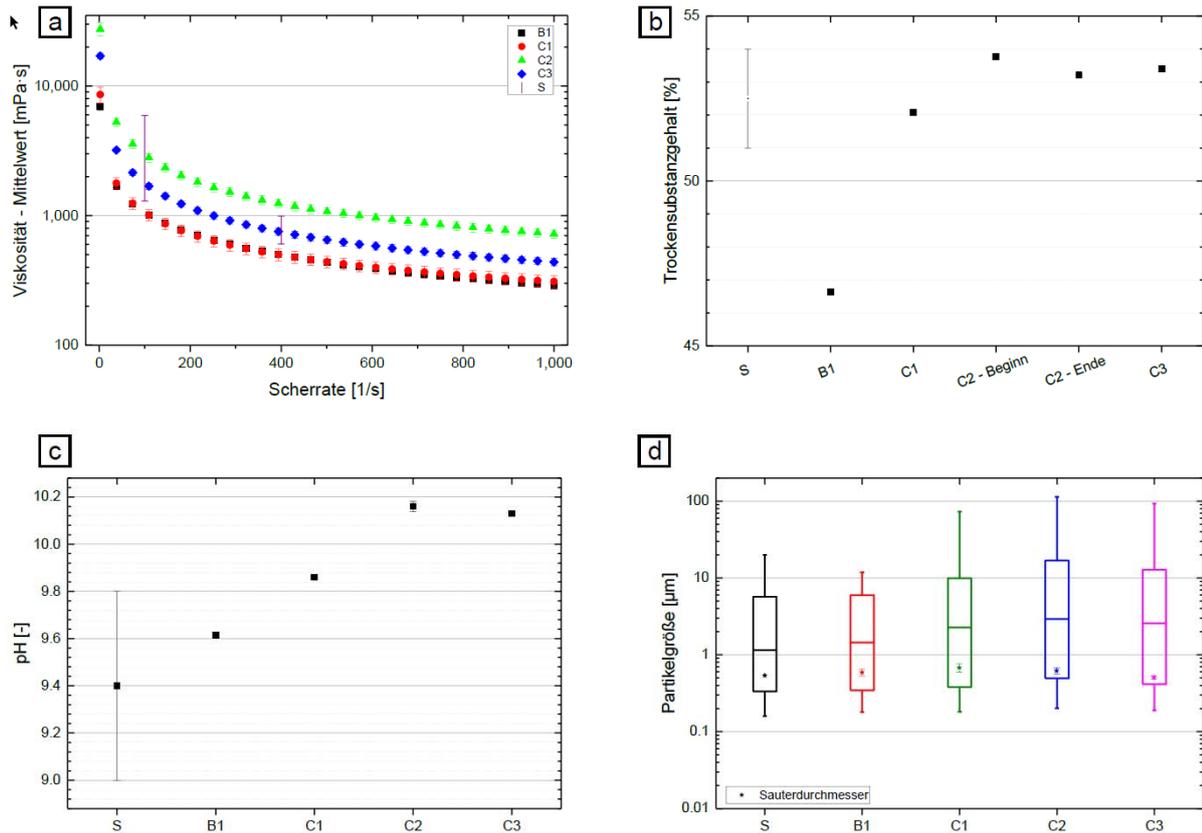


Abbildung 4.5–1 Vergleich verschiedener Produkteigenschaften von Proben aus absatzweiser und kontinuierlicher Produktion mit Prozessparametern: a) Viskosität, b) Trockensubstanzgehalt, c) pH-Wert und d) Partikelgrößenverteilung.

Bei den ersten kontinuierlichen Versuchsfahrten zeigten die meisten weiteren Eigenschaften der Wandfarbe keine spezifikationsgerechte Farbe laut Qualitätskennzahlen aus Kapitel 4.1, Tabelle 4.1–3. Zur Übersicht sind die erreichten Werte der drei kontinuierlichen Versuche und die Grenzen in Tabelle 4.5–1 aufgelistet.

Tabelle 4.5–1 Vergleich der Qualitätseigenschaften der kontinuierlichen Versuche C1 bis C3 mit den Prozesskennzahlen der Viskosität Partikelgröße, Trockensubstanz und pH-Wert aus Kapitel 4.1

Eigenschaft	Zulässige Werte		C1	C2	C3	Einheit
	min	max				
Trockensubstanz	51	54	52,08	53,77	53,38	%
pH-Wert	9,0	9,8	9,86	10,16	10,13	-
Viskosität bei $\dot{\gamma} = 100 [s^{-1}]$	1295	5935	1009	2800	1690	$mPa \cdot s$
Partikelgröße ($x_{3,50}$)	1,0	1,3	2,266	2,918	2,576	μm

In der Dispersionsfarbe wird eine basische, wässrige Lösung verwendet um den gewünschten pH-Wert einzustellen. Da die basische Komponente in der Lösung flüchtig ist, verringert sich bei Verwendung mit der Zeit der pH-Wert. Im absatzweisen Verfahren wird die Komponente zwar im letzten Schritt hinzugegeben, allerdings handelt es sich hierbei um einen offenen Behälter, in dem sich das Produkt unter Rühren erwärmt. Durch die Erwärmung wird der Effekt der Verflüchtigung der Komponente verstärkt. Der pH-Wert

sinkt auf den gewünschten und durch Rezepturanpassungen ermittelten Wert. Im neuen Verfahren wird der Produktstrom ebenfalls durch offene Behälter geleitet, die Oberfläche ist aber durch das verringerte Anlagenvolumen deutlich kleiner. Die Erwärmung ist durch ein anderes Mischverfahren ebenfalls geringer. Somit kann während des Prozesses eine geringere Menge des basischen Additivs verdunsten und der pH-Wert bleibt höher. Mit einer Rezepturadaptation lässt sich diese Qualitätseigenschaft an die neuen Gegebenheiten anpassen.

In den ersten kontinuierlichen Produktionen konnte keine oder eine sehr grenznahe spezifikationsgerechte Viskosität erreicht werden (Abbildung 4.5–1, a). Für die Verwendung der Cellulose als verdickendes Additiv wurde eine Verweilzeitstrecke implementiert, die das Quellen der Fasern erlauben soll bevor die nächsten Edukte hinzugegeben werden. Bei gleichzeitiger Zugabe von Verdicker und Bindemittel kam es zu einem ungenügenden Qualitätsergebnis der Farbe. Die Dispersion wies unerwünschte Agglomerate auf und trennte sich nach einer gewissen Zeit in zwei Phasen. Dies erklärt auch die ungenügende Partikelgrößenverteilung der ersten kontinuierlichen Versuche in Tabelle 4.5–1. Orientiert an die absatzweise Herstellung wurde eine Verweilzeit von ca. 30 min eingeführt, die der Einmischdauer im Batchverfahren entspricht. In einem Laborversuch wurde die zeitliche Entwicklung der Viskosität zwischen Zugabe des Verdickers und Zugabe des Bindemittels beobachtet. Die Abbildung 4.5–2 zeigt diese Viskositätsmessungen.

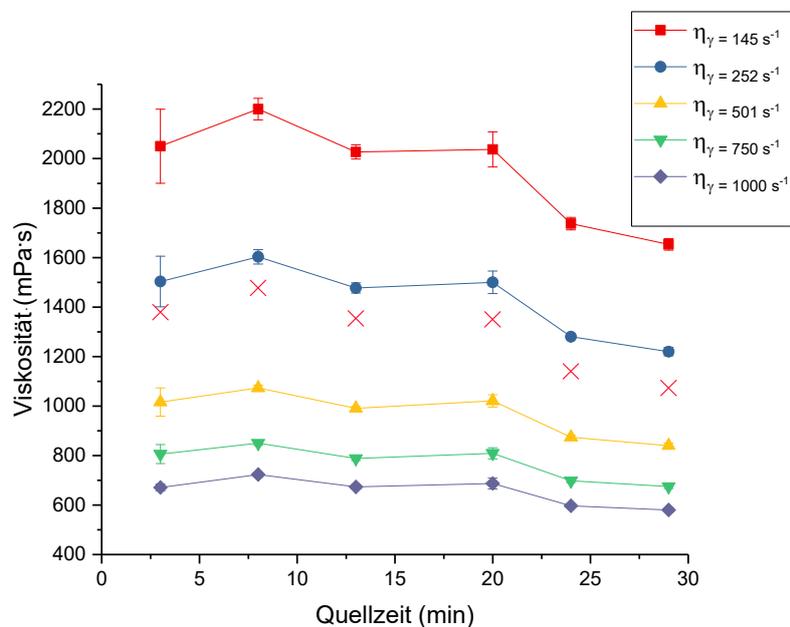


Abbildung 4.5–2 Entwicklung der Viskosität in Abhängigkeit der Quellzeit

Mit zunehmender Quelldauer zeigen die Messungen der Viskosität eine geringer werdende Standardabweichung. Die Messwiederholungen sind deutlich weniger beeinflusst durch Agglomerate in der Messprobe. Visuell verbessert sich auch die Stabilität der Farbe und zeigt nach ca. einer Woche Lagerung eine geringere Phasenseparation bei zunehmender Quellzeit. Allerdings zeigte sich, dass trotz ausreichender Quelldauer, die gewünschte Viskosität der Farbe nicht erreicht wurde (Abbildung 4.5–3).

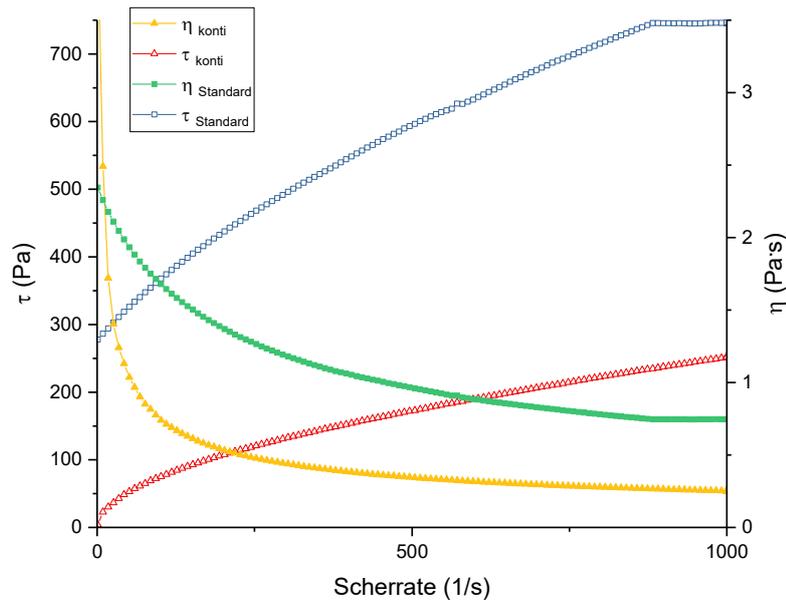


Abbildung 4.5–3 Rheologische Messung der kontinuierlich hergestellten Wandfarbe mit Verweilzeitstrecke im Vergleich zu einer Wandfarbe aus dem absatzweisen Herstellungsverfahren

Es ist zu vermuten, dass durch den fehlenden Energieeintrag die vollständige verdickende Eigenschaft nicht zur Wirkung kommt. Folgend aus einer nicht erreichten Viskosität, lassen sich die anwendungsorientierten Eigenschaften wie Farbverlauf, Glanzgrad und Deckfähigkeit nicht vorherbestimmen. Anlagenbezogene Lösungsansätze sind einen Rückfluss nach der Verweilzeit in den Behälter B6 zu legen oder die Verweilzeitstrecke zu unterbrechen um einen zusätzlichen Behälter und Mischer einzubauen. Darüber hinaus kann durch eine Rezepturadaption während der Auswahl der Rohstoffe auf die neuen Prozessbedingungen und fehlende Mischzeit eingegangen werden. Zum Ende des Projekts wurde beschlossen, Cellulose als Verdicker durch ein anderes, flüssiges Additiv zu ersetzen, sodass diese Ansätze nicht weiter verfolgt wurden. Die Alternative, ein Assoziativverdicker, bildet seine verdickende Fähigkeit unabhängig der eingetragenen Energie aus. Es ist zu vermuten, dass somit sowohl ein Teil der Verweilzeitstrecke als auch zusätzliche Mischvorgänge entfallen.

Tabelle 4.5–2 Geschätztes Hold-up der einzelnen Anlagenkomponenten und Leitungen

Anlagenkomponenten	Geschätzter Hold-up (cm ³)
B5	3500
Dispergierer	100
Dispergiererrückführung	28
Leitung vom Dispergierer zu B6	60
B6	4000
Leitung von B6 zur Verweilzeitstrecke	120
Verweilzeitstrecke	7100
B8	4000
Leitung aus B8 zum Produktbehälter/Abfallbehälter	65

Bei möglichen Produktionsfehlern und eventuell eintretendem Stopp der Anlage wirkt sich das verringerte Anlagenvolumen positiv auf die Fehlchargenbilanz aus. Die derzeitige absatzweise Herstellung hat ein Gesamtvolumen von circa 1000 L. Im Fall eines Produktionsstopps, entspricht dies der Größe der Fehlcharge. Das Anlagenvolumen der kontinuierlichen Laboranlage lässt sich auf circa 19 L schätzen. Zwar wird sich durch ein Scale-up zur Produktionsanlage dieses vergrößern, dennoch wird es deutlich geringer ausfallen als das Anlagenvolumen des alten Herstellungsverfahrens. Zusätzlich reduziert sich das Anlagenvolumen

des neuen Herstellungsverfahrens, sobald das neue verdickende Additiv verwendet wird. Eine Verweilzeitstrecke, die in der Laboranlage ein Drittel des Volumens darstellt, würde damit wegfallen.

Für das kontinuierliche Verfahren werden neben den verfahrenstechnischen und prozesstechnischen Komponenten auch eine Anlagensteuerung und -regelung benötigt. Im nachfolgenden Kapitel werden weitere Aufgaben der Anlagensteuerung beschrieben. Dabei sollten alle Einstellungen über ein Programm überwacht und versendet werden können. Die Ventile der kontinuierlichen Laboranlage werden derzeit manuell betätigt. Dies hat zur Folge, dass kein computergesteuerter Durchfluss durch die Ventile gelangt. Dies genügt für den Funktionsnachweis der kontinuierlichen Anlage. Für die Bedienerfreundlichkeit und spezifikationsgerechten Dauerbetrieb werden regelbare Ventile benötigt, die in Abhängigkeit der aktuellen Prozessdaten in der Anlage angesteuert werden können. Vor allem Ventil V1, das den Produktstrom in Rückstrom und Rohdispersion teilt, muss einen definierten Strom der Rohdispersion in den weiterführenden Behälter leiten. Für das Design der Produktionsanlage in Kapitel 4.8 werden daher elektrisch betätigte Membranventile betrachtet.

Mit Beendigung des Arbeitspakets vier und fünf ist die Laboranlage erfolgreich in Betrieb genommen und es konnten durch das Betreiben der Anlage und Untersuchen der Dispersionsfarbe Ergebnisse über den kontinuierlichen Prozess gewonnen werden. Mit den Ergebnissen ist Meilenstein zwei erreicht.

4.6 AP 6: Ausarbeitung von Produktwechsel- und Reinigungsstrategien

Der modulare Anlagenaufbau, der sich durch geringfügige Änderungen anpassen oder durch Hinzufügen neuer Komponenten erweitern lässt, ermöglicht die Produktion verschiedener Rezepturen in derselben Anlage. Weitere Produkte derselben Familie können durch Austausch und Ergänzung der zugeführten Rohstoffe in der Anlage gefertigt werden. Auch Adaptionen in den Rezepten der Dispersionswandfarbe bereiten keine Probleme und wurden erfolgreich implementiert. Um ein neues Rezept kontinuierlich produzieren zu können, muss vorab das Regel- und Steuerprogramm angepasst werden. Hierzu sind die Dosier- und Pumpeinstellungen entsprechend der Rohstoffverhältnisse festzulegen. Das An- sowie Abfahrprotokoll muss ebenfalls überarbeitet werden. Zusätzlich müssen neue Rohstoffvorlagen hergestellt werden, welche möglichst stabil sind. Eine hohe Dispersionsstabilität und die Abneigung zur Präzipitation ermöglichen ein Vorbereiten der Feststoff- sowie Flüssigvorlagen und damit eine unterbrechungsfreie kontinuierliche Produktion. Durch die Verdünnung mit einem bestimmten oder dem gesamten Anteil an Wasser bei der Herstellung der flüssigen Rohdispersion, kann der zu dosierende Volumenstrom rezeptspezifisch angepasst werden. Dies ermöglicht ebenfalls bei Zu- oder Abschaltung bestimmter Anlagenkomponenten eine reibungslose Rezeptumstellung.

Das implementierte Programm zur Steuerung und Regelung der Anlage umfasst nicht nur die Dosierung und Überwachung der Füllstände, sondern auch akustische und visuelle Signale, die den Bediener bei häufiger auftretenden Unregelmäßigkeiten alarmieren. Die Bindemittelzugabe, die gravimetrisch geregelt wird, wird mittels Schlauchpumpe realisiert. Da das Additiv zur Polymerisation neigt, kann es zur Blockade des Schlauchs kommen und damit zur nicht spezifikationsgerechten Dosierung des Stoffes. Da ein Drucksensor bei den herrschenden kleinen Komponentenabmessungen zu überflüssigen Angriffsstellen potentieller Präzipitation führt, wird die Blockade des Schlauchs über die Drehzahl der Pumpe überwacht. Bei zuwachsendem Schlauchquerschnitt, sinkt der von der Waage dosierte Massenstrom. Da der Regler im Programm so eingestellt ist, dass ein definierter Massenstrom eingehalten werden soll, wird die Pumpenleistung hochgeregelt und die Drehzahl des Pumpkopfs steigt. Bei Überschreitung einer bestimmten Grenzdrehzahl wird dem Anlagenbediener signalisiert, dass die Drehzahl ungewöhnlich hoch ist. Dieser kann das Problem nun bewerten und im Einzelfall über die Lösung bestimmen und diese einleiten. Es zeigte sich, dass zugesetzte Bindemittelschläuche auch durch eine frühzeitige Reinigung nicht wieder verwendet werden konnten. Daher ist bei Auftreten dieses Problems nur ein Austausch des Schlauchs möglich. Schläuche, die nach dem Betrieb der Anlage noch intakt sind, werden in Wasser gelagert. Dies verhindert den Kontakt mit Luftsauerstoff und damit das Polymerisieren und Zusetzen des Förderquerschnitts. Alle weiteren Komponenten lassen sich durch die folgende Reinigungsstrategie nach Betreiben der Anlage reinigen und für den nächsten Betrieb vorbereiten.

Die Anlage lässt sich nach Vollendung des Abfahrprotokolls mit normalem Leitungswasser reinigen. Spülung und Reinigung unterscheiden sich durch den zu betreibenden Aufwand. Im Gegensatz zur Reinigung ist beim Spülen ein Auseinanderbau der Anlage nicht erforderlich. Es genügt, Wasser als Reinigungsmittel mehrfach und einige Minuten lang durch die entleerten Anlagenbehälter zirkulieren zu lassen. Dabei werden alle Rührer und Pumpen auf eine größtmögliche Leistung gestellt, um mögliche Partikelablagerungen entfernen zu können. Stark verschmutztes Wasser wird verworfen, nachfolgendes weniger verschmutztes Wasser kann gesammelt und für die folgende Produktion wiederverwendet werden. Die Spül- und Reinigungsvorgänge werden von der schnelltrocknenden Produkteigenschaft stark beeinflusst. In belüfteten, ungereinigten Leitungsabschnitten reduziert sie den Querschnitt durch Anhaftungen. Dies führt wiederum zu einem erhöhten Druckverlust und höherem Energiebedarf der jeweiligen Pumpe. Daher sollten diese Vorgänge unverzüglich nach Beendigung der Produktion durchgeführt werden. Kurze Standzeiten der Anlage erfordern keine umfassende Reinigung. Es genügt die produktberührenden Komponenten der Anlage mit Wasser zu füllen. Dies verhindert in den Behältern, an den Rührern sowie in den Pumpen das Antrocknen und Ablagern fester, nicht wieder lösbarer Dispersionsfarbe durch Luftkontakt. So kann auch bei einem zeitversetzten Produktwechsel der Reinigungsaufwand vermieden werden.

Ist eine Reinigung nötig, werden nach intensiven Spülzirkulationen die meisten Anlagenteile entfernt, um diese dem umfassenden Reinigungsvorgang zu unterziehen. Dies betrifft vor allem die Bestandteile des Dispergierers M1 und die Dispergierscheiben. In der Regel genügt auch hier der Einsatz von, ggf. erwärmtem, Wasser als Reinigungsmittel sowie die Nutzung von Bürsten. Das anfallende Reinigungsmittel könnte ebenfalls aufgefangen und wieder in den Prozess integriert werden. Bezüglich des Strangs der Fluidvormischung genügt es, wenn Pumpe P2 kurzzeitig von Wasser durchflossen wird. Diese Vorgehensweise entfernt eventuelle Reste aus Pumpe und Leitungen.

4.7 AP 7: Pilotanlage zur Absicherung besonders kritischer Prozessschritte

Wie in Kapitel 4.3 erläutert, sind die Planung und der Bau einer Pilotanlage mit einer Produktionskapazität von 20 kg/h nicht notwendig. Die personellen und finanziellen Ressourcen wurden für den Aufbau, die Inbetriebnahme und experimentelle Untersuchungen der Laboranlage verwendet. Dadurch war eine detaillierte Untersuchung der Eduktzugabe und der Einbindung des Verdickers möglich.

Die Kapazität der untersuchten Laboranlage liegt bei 5 bis 15 kg/h fertige Dispersionsfarbe. Mit diesem Produktionsbereich ist die technologische Machbarkeit vom Laborprinzip zur Pilotanlage gezeigt und eine Absicherung der Prozessschritte nicht mehr notwendig. Das Einmischen der Feststoffe sowie kritische Prozessparameter wie die Quellzeit des Verdickers konnten weitreichend untersucht und realisiert werden. Meilenstein drei ist damit ebenfalls erfolgreich erreicht. Die möglichen Feststoffdosierungen konnten hinreichend untersucht werden, sodass die Erkenntnisse auf die Konzeptionierung der Produktionsanlage übertragen werden können.

4.8 AP 8: Design der Produktionsanlage

Auf Basis der Ergebnisse der Laboranlage und den Untersuchungen zum Prozess wird eine Produktionsanlage mit einer Kapazität von 100 kg/h bei der Firma AURO Pflanzenchemie AG entworfen. Diese Produktionsanlage soll in der Lage sein, im Dauerbetrieb von montags bis freitags zu arbeiten, sodass innerhalb einer Arbeitswoche 12 t Farbe produziert werden können. Da es sich bei der Dispersionsfarbe um eines der Hauptprodukte handelt beziehungsweise in Kombination mit Abtönfarben diesen als Grundlage dient, nimmt es die größte Produktionskapazität in Anspruch. Daher soll die Anlage im Dauerbetrieb einzig dieses Produkt herstellen. Eine Mehrproduktanlage im Produktionsmaßstab ist hier nicht rentabel.

Das Prozessführungskonzept orientiert sich stark an dem Prozess der Laboranlage. Die überwiegenden Anlagenkomponenten können mittels Scale-up die gewünschte Produktionskapazität erreichen. Komponenten, bei denen dies nicht möglich oder vorteilhaft ist, werden durch Numbering-up ergänzt.

Um ein möglichst arbeitnehmerfreundliches Arbeitsumfeld zu schaffen, sollten so wenige Vorbereitungen wie möglich getroffen werden müssen. So lassen sich die Vorbereitungszeit und der damit verbundene

Stillstand der Anlage verringern. Bei einer Produktion von 100 kg/h sind die Massenströme der pulverförmigen Pigmente und Füllstoffe so groß, dass diese jeweils einzeln über gravimetrische Schneckendosierung zugegeben werden können. Dabei lohnt sich eine BigBag-Entleerstation für die Füllstoffe und Pigmente, die oberhalb der gravimetrischen Dosierer die Vorlagebehälter befüllt. Integriert in die Anlagensteuerung kann so auch das Entleeren der BigBags und Befüllung der Behälter auf den Wiegeeinheiten angepasst werden. Bei Entleerung des Vorlagebehälters des Dosierers werden aus dem BigBag Edukte nachgegeben. Die Regelung des Massenstroms anhand der Gewichtsänderung kann in dieser Zeit ausgesetzt und im Nachhinein an das neue Vorlagegewicht angepasst werden. Die Dosierung läuft während der Zeit bei einer definierten Geschwindigkeit weiter. Ist der Schüttgutbehälter während der Produktion vollständig entleert, können Mitarbeiter neue Edukt-Großgebilde anschließen, ohne die kontinuierlichen Produktion zu unterbrechen. Ein Wechsel der Gebinde ist beispielsweise bei den Füllstoffen von alle zwei Tage bis alle zwei Wochen notwendig (Tabelle 4.8–1). Das Farbpigment benötigt in der Regel jede Woche eine neue Vorlage. Bei der kontinuierlichen Befüllung der Anlage ist eine Staubabsaugung zu integrieren, die die Mitarbeitenden und die Umwelt vor entweichenden Feststoffen schützt.

Tabelle 4.8–1 Berechnungen zur Vorlagengröße und Reichweite in der Produktionsanlage

	Massenanteil im Produkt	Vorlagengröße in der Produktionsanlage	Reichweite der Vorlage
Wasser	30,43 %	kontinuierlicher Zulauf	--
Flüssigvorlage 1	4,04 %	IBC	über zwei Wochen
Pigment	9,87 %	BigBag	min. 4 Tage
Füllstoff 1	4,34 %	BigBag	min. 9 Tage
Füllstoff 2	4,74 %	BigBag	min. 8 Tage
Füllstoff 3	27,64 %	BigBag	min. 1 ½ Tage
Verdicker	0,77 %	25 kg Sack	min. 1 Tag
Flüssigvorlage 2	7,66 %	IBC	min. 5 Tage
Bindemittel	10,50 %	IBC	min. 3 ½ Tage

Die flüssigen Komponenten werden wie auch in der Laboranlage als Mischvorlagen verwendet. Aufgrund der großen Differenz zwischen der benötigten Menge führt die gemeinsame Verdünnung mit Wasser zu vergleichbaren Dosierraten und die Zugabe der Additive wird stabiler. Es wird eine Flüssigvorlage mit Additiven im Verhältnis 1:15 und eine Vorlage im Verhältnis 1:2 geben, in denen die jeweiligen Zusatzstoffe keine Wechselwirkungen untereinander eingehen und eine stabile Dispersion ergeben. Diese lassen sich, unabhängig der Produktionsanlage, vorbereiten und bei Bedarf anschließen. Um eine spezifikationsgerechte Farbe zu gewährleisten, werden in den Großgebilden Rührer integriert, um eine vollständige Vermischung der Additive und des Wassers zu erreichen. Für die beiden Flüssigvorlagen sollen Zahnradpumpen mit eingebautem Coriolis-Durchflussmesser verwendet werden. Da das Bindemittel zum Auspolymerisieren neigt, werden bei der Dosierung kleine Innendurchmesser vermieden. Sowohl eine Zahnradpumpe als auch ein Coriolis-Durchflussmessgerät sind nicht geeignet. Deshalb soll, ebenfalls wie in der Laboranlage, eine Schlauchpumpe verwendet werden, bei der der Schlauch schnell ausgetauscht werden kann. Der Schlauch sollte einen Mindestdurchmesser von 4,8 mm nicht unterschreiten. Anders als in der Laboranlage muss für eine gravimetrische Dosierung des Bindemittels ähnlich der BigBag-Entleerstationen eine doppelte Vorlage errichtet werden. Die Beschaffung einer Waage, die ein IBC-Gebinde Bindemittel als Maximallast zulässt und zusätzlich eine hohe Auflösung hat, ist sehr kostspielig. Ein kleineres Gebinde als Vorlage erhöht allerdings den Arbeitsaufwand der Mitarbeitenden drastisch. Mit der Lagerung des IBC-Behälters oberhalb einer Vorlage, die auf einer Wiegeeinheit implementiert ist, kann diese ausreichend befüllt werden ohne, dass Mitarbeiter diese Arbeit manuell verrichten müssen.

Bei geplanter Rezepturumstellung auf ein anderes verdickendes Additiv, wie in Kapitel 4.7 beschrieben, wird keine fünfte Feststoffzugabe benötigt. In diesem Fall wird eine weitere flüssige Vorlage benötigt, in der

der Assoziativverdicker in einer wässrigen Lösung vorliegt. Dieser kann mittels Zahnradpumpe und Coriolis-Durchflussmessgerät spezifikationsgerecht dem Produktstrom hinzugefügt werden. Da der Verdicker keiner besonderen Energiezufuhr benötigt, kann dieser in einem einfachen Rührbehälter hinzugefügt werden. An der Position der Additivzugabe verändert sich nichts, da auch in der Produktionsanlage die verdickende Wirkung erst nach dem Dispergieren im Rotor-Stator-Mischer erwünscht ist.

Neben dem Auslegen der Eduktzugaben, sind die richtigen Behälter und Dispergierer ebenfalls festzulegen. Der aktive Rotor-Stator-Mischer in der Laboranlage lässt sich hochskalieren auf die nächst größere Bauform des Herstellers. Mit diesem Gerät lassen sich Volumenströme bis zu 300L/h realisieren. Um gerade bei dem hohen Feststoffgehalt einen ausreichenden Energieeintrag zu gewährleisten, sollte der Dispergierer mit einem größeren Motor ausgestattet werden. Dieser, wie auch die Motoren der gravimetrischen Dosierung lassen sich über Frequenzumrichter ansteuern und regeln. Dies ermöglicht eine einheitliche und einfache Prozessführung. Unterhalb des Dispergierers dient ein elektrisch betätigtes Membranventil dazu den Füllstand im Behälter oberhalb des Mixers konstant zu halten und damit den Massenstrom zum nächsten Behälter auf den benötigten Wert einzustellen. Nachfolgend an die kommenden Behälter werden Pumpen verwendet wie zum Beispiel Exzentrerschneckenpumpen, die für hochviskose und partikelbeladene Medien geeignet sind. Mittels Durchflussmessgeräten, die magnetisch-induktiv oder mittels Ultraschall messen, wird auch hier der Massenstrom konstant gehalten. Zusätzlich implementierte Füllstandsensoren in den Behältern dienen als Kontrollwerte und Überwachung vor Über- oder Leerlaufen.

Die Behälter zur weiteren Zugabe der Edukte werden entsprechend des höheren Massenstroms und dem daraus resultierenden beinhaltenen Vorhaltevolumen dimensioniert. Dadurch ergeben sich ein Behälterdurchmesser von mindestens 33 cm sowie ein Flüssigkeitsstand von mindestens 19 cm im Behälter. Die Höhe des Behälters sollte mindestens das Doppelte betragen.

Durch die Einbaubedingungen von Rührern in Rührbehältern nach [7] werden für die Dimensionierung der Dispergierscheiben die Verhältnisse analog zu einem Scheibenrührer gewählt. Dabei ergeben sich folgende Bedingungen:

$$\frac{\text{Behälterdurchmesser}}{\text{Rührerdurchmesser}} = 3,33 \quad [-] \quad (4.8.1)$$

$$\frac{\text{Rührerabstand zum Behälterboden}}{\text{Rührerdurchmesser}} = 1 \quad [-] \quad (4.8.2)$$

$$\frac{\text{Rührerdurchmesser}}{\text{Dispergierscheibendicke}} = 5 \quad [-] \quad (4.8.3)$$

Mittels der volumenspezifischen Rührerleistung ε kann die Übertragung der Laborrührer auf die Produktionsanlage angenommen werden [8].

$$\varepsilon = \frac{\text{Leistungseintrag des Rührers}}{\text{Volumen der Suspension}} \quad [kW/m^3] \quad (4.8.4)$$

Bei einer Rührerleistung von 80 W in der Laboranlage, sollte die Leistung der Rührer in der Produktionsanlage mindestens 500 W betragen.

Neben dem funktionierenden Produktionszyklus soll des Weiteren ein Reinigungszyklus für Spülwasser integriert werden. Über die Wasserzuleitung können die einzelnen Behälter oder aber die gesamte Anlage gereinigt werden. Mit Drei-Weg-Hähnen lassen sich die einzelnen Module der Anlage individuell reinigen.

In Abbildung 4.8–1 ist das Design der Produktionsanlage in einem Fließbild zusammengefasst.

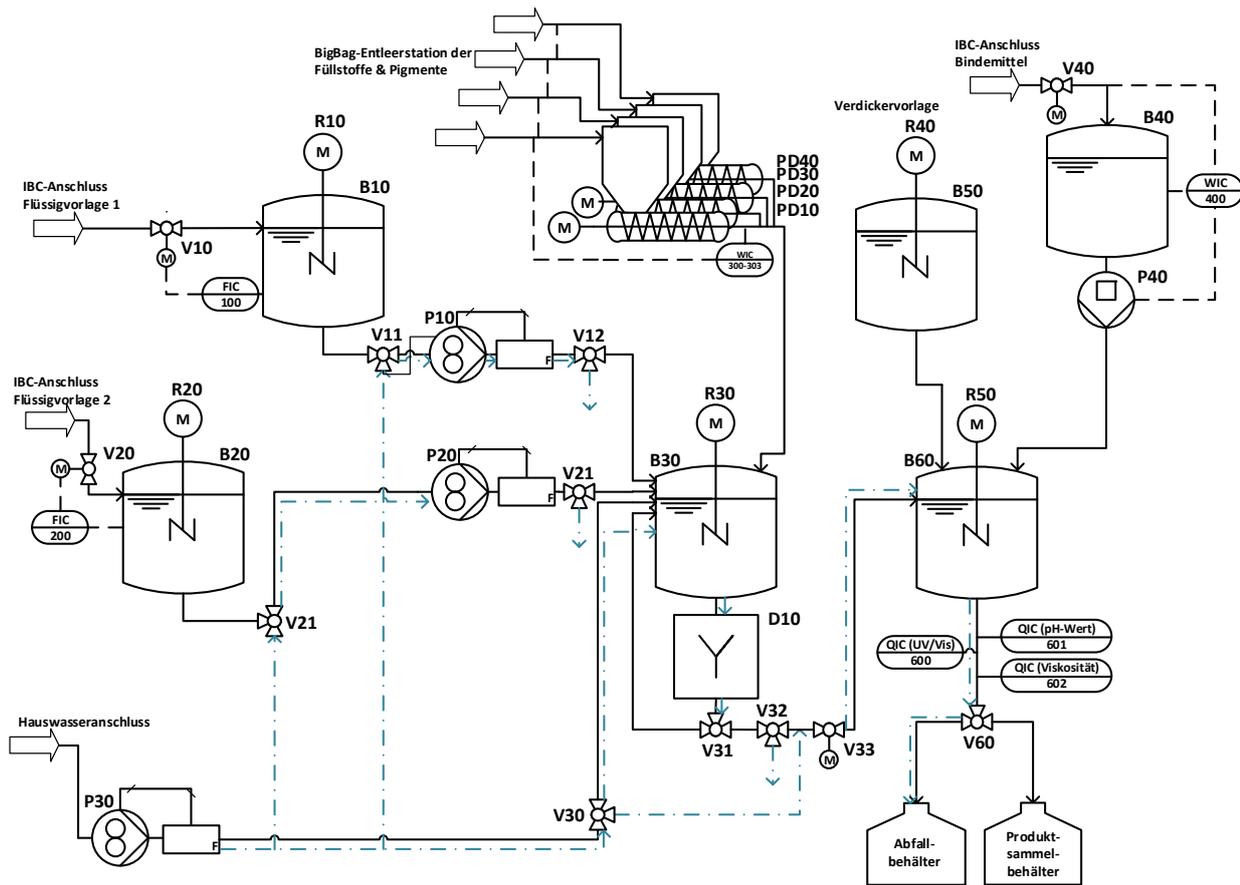


Abbildung 4.8–1 Fließbild der designten Produktionsanlage

4.9 Vergleichende ökonomische, ökologische Bewertung der Produktionsverfahren

Die experimentellen Arbeiten wurden begleitet durch die Betrachtung der beiden Produktionsverfahren hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte. Dazu wurden, wie in Kapitel 4.1 beginnend beschrieben, vor allem die ökonomische Bewertung des absatzweisen Verfahrens sowie die ökologische Bewertung des neuen Verfahrens betrachtet. Aus den experimentellen Daten lassen sich Prozesskennzahlen ermitteln, die eine erste Abschätzung bezüglich der Wirtschaftlichkeit des neuen Verfahrens erlauben.

Der Materialeinsatz stellt einen beträchtlichen Teil der Herstellkosten dar (siehe Kapitel 4.1). Bei beiden Verfahren werden die gleichen Einsatzstoffe verwendet. Die genutzten Rezepte unterscheiden sich nicht für die beiden Betriebsweisen, absatzweise oder kontinuierlich. Die Prozessumstellung hat demnach keinen Einfluss auf die Materialkosten. Weiterhin liegen die Werte für Rohstoffverluste sowie für Fehlchargen sowohl im Batch- als auch im kontinuierlichen Betrieb auf sehr niedrigem Niveau. Die Betriebskosten lassen sich daher nur in geringem Umfang senken. Die Energiekosten hingegen können durch die Intensivierung des Prozesses und damit verbundenen kleineren Gerätschaften reduziert werden. Dabei verringert sich der spezifische Energiebedarf in der Laboranlage im Vergleich zur absatzweisen Produktion um 33%. Die Standortkosten bleiben von der Prozessumstellung unberührt. Im Falle der industriellen Implementierung eines kontinuierlichen Verfahrens sind zudem Investitionen nötig, welche durch kapitalabhängige Kosten in die Herstellkosten mit einfließen. Da die Anlage automatisiert betrieben werden soll, reduzieren sich die Personalkosten der Produktion erheblich. In Kombination ist aufgrund der geringen Veränderung der Herstellkosten nicht damit zu rechnen, dass durch den kontinuierlichen Prozess eine große wirtschaftliche Verbesserung des Herstellverfahrens erreicht werden kann.

Bei der Betrachtung der sozialen Aspekte der Prozessumstellung zeigte sich, dass durch die Umstellung auf eine kontinuierliche Fahrweise eine verbesserte Sicherheit am Arbeitsplatz durch das geschlossene Produktionssystem und die genauere, vollautomatisierte Prozessüberwachung erreicht werden kann. Die

Mitarbeiter sind den staubenden Einsatzstoffen in deutlich kürzerem Zeitfenster bei der Befüllung der automatischen Dosiereinrichtung ausgesetzt. Darüber hinaus ist die Dosierung weniger körperlich beanspruchend, sodass auch ältere Arbeitnehmer weiterhin in der Produktion eingesetzt werden können. Durch die Schulungen zur Überwachung der Anlage qualifizieren sich die Arbeitnehmer auch an weiteren kontinuierlichen Anlagen zu arbeiten. Die Arbeitnehmer können so flexibler eingesetzt werden, was zur Sicherung des Arbeitsplatzes beiträgt und zugleich die Chancen auf dem Arbeitsmarkt verbessert. Darüber hinaus ermöglicht die Anlagenautomatisierung die gezielte Prozesssteuerung und -überwachung auch bei 24h/7d Betrieb ohne dauerhafte Anwesenheit vor Ort.

Neben den ökonomischen und sozialen Untersuchungen der Prozessumstellung, wurde der neue Prozess auch ökologisch bewertet. Ziel der ökologischen Bewertung ist die Identifikation potentieller Umweltwirkungen des Herstellungsprozesses. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen den Entscheidungsprozess bezüglich einer Umstellung auf eine kontinuierliche Produktion unterstützen. Die Systemgrenzen in der Studie des Produktionsverfahrens umfassen den Herstellungsprozess und alle vorgelagerten Prozesse der Rohstoff- und Primärenergieträgerbereitstellung. Dazu gehören deren Gewinnung, Herstellung, Bearbeitung und Transport. Die Reststoffbehandlung wird auf Grund vernachlässigbarer Kleinstmengen nicht berücksichtigt. In Abbildung 4.9–1 sind die gewählten Systemgrenzen für die Untersuchung der Dispersionsfarbenherstellung dargestellt.

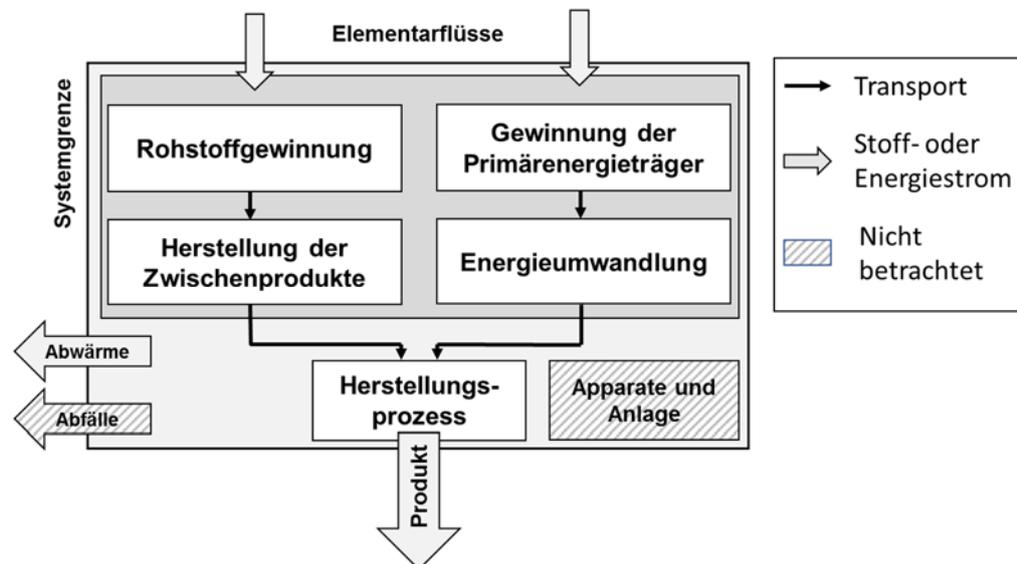


Abbildung 4.9–1 Systemgrenzen der Untersuchung zum kontinuierlichen Herstellungsverfahren [6]

Für die ökologische Betrachtung des kontinuierlichen Produktionsverfahrens wurden die anlagenspezifischen Daten des Energiebedarfs und der Stoffströme durch Messungen erfasst und anschließend mit Hilfe der Stoffstromnetzmodellierungssoftware Umberto ökologisch bewertet. Die für die Sachbilanz benötigten Daten der Elementarflüsse wurde durch Vorketten aus der Datenbank Ecoinvent [9] zusammengestellt. Für die Mehrzahl der Einsatzstoffe konnten auf Grund vieler im Prozess verwendeter AURO-eigener Chemikalien keine Datensätze gefunden werden, die direkt mit in Datenbank enthaltenen Bulkchemikalien übereinstimmen. Aus diesem Grund wurde auf Datensätze von strukturverwandten Molekülen/Molekülgruppen ausgewichen.

In der Wirkungsabschätzung mit der Bewertungsmethode ReCiPe 2016 [10] und anschließender Normierung auf die durchschnittlichen Umweltwirkungen eines Europäers pro Stunde zeigte sich, dass die potenziellen Umweltwirkungen des kontinuierlichen Prozesses in 15 der 17 betrachteten Wirkungskategorien ein Vielfaches des Normierungswertes betragen. Die Normierung zeigte, dass vor allem die Ergebnisse in den Wirkungskategorien „Humantoxizität“, „terrestrische Ökotoxizität“, „Salzwasser Ökotoxizität“ und „Friskwasser Ökotoxizität“ auffällig hoch sind (Tabelle 4.9–1) und deshalb neben der gängigen Wirkungskategorie „Globale Erwärmung“ für weitere Untersuchungen herangezogen werden. Die Ergebnisse wurden im weiteren Vorgehen mittels detaillierter Schwerpunkt- und Sensitivitätsanalyse im Hinblick auf aussichtsreiche Verbesserungspotentiale untersucht.

Tabelle 4.9–1 Auszug aus den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung [6]

Wirkungskategorie	Einheiten	Indikatorwert	Normierungsfaktor	Indikatorwert (normiert)
terrestrische Ökotoxizität (TET)	kg 1,4-DCB Äq.	0,0023	0,0009	240%
Globale Erwärmung (GW)	kg CO ₂ Äq.	12,4366	1,2803	971%
Humantoxizität (HT)	kg 1,4-DCB Äq.	1,8743	0,0716	2617%
Frischwasserökotoxizität (FET)	kg 1,4-DCB Äq.	0,0926	0,0013	7369%
Salzwasserökotoxizität (MET)	kg 1,4-DCB Äq.	0,0917	0,0010	9202%

Die Schwerpunktanalyse im Hinblick auf den prozentualen Anteil der Einsatzstoffe am Gesamtindikatorwert ergab, dass die zugegebene Menge des Feststoffs, vor allem des Pigments, einen großen Einfluss auf die Wirkungsindikatorwerte hat, während der Einfluss des Energieeinsatzes sehr gering ist (Abbildung 4.9–2). Der vernachlässigbare Umwelteinfluss der elektrischen Energie ist vor allem auf den bei AURO verwendeten zertifizierten Ökostrom zurückzuführen.

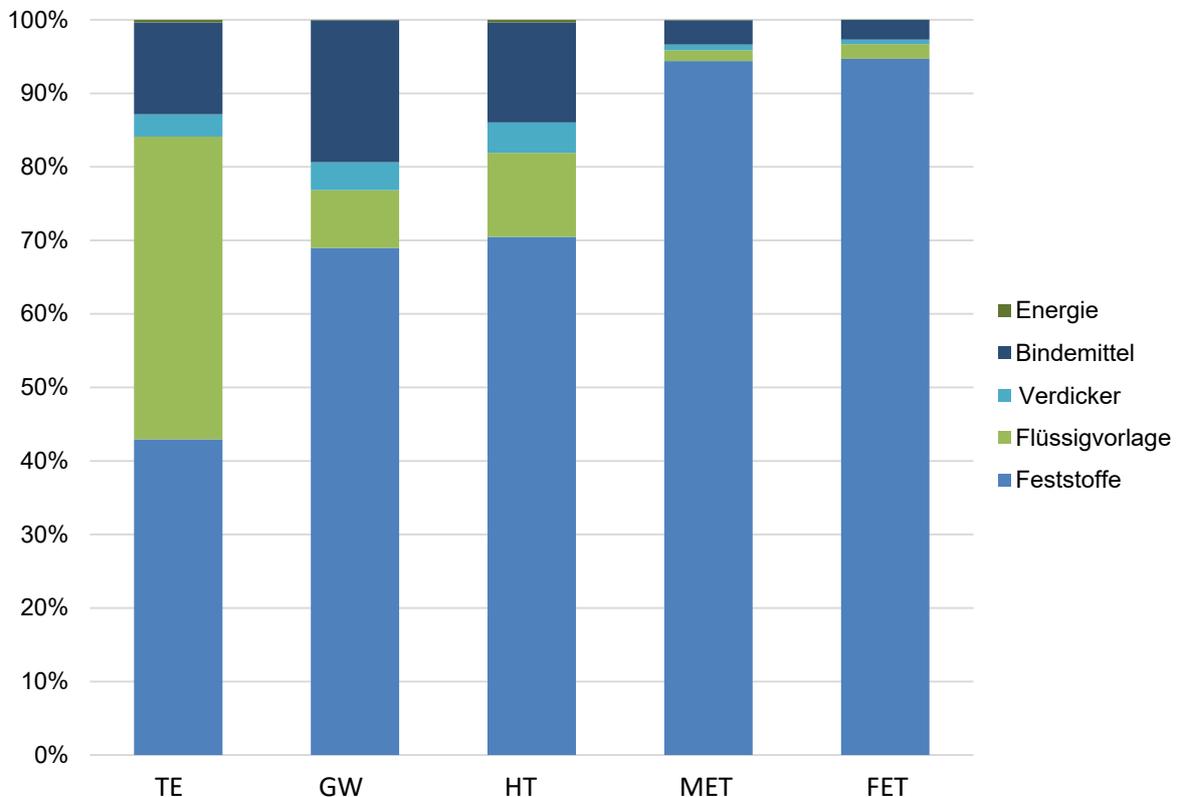


Abbildung 4.9–2 Schwerpunktanalyse des prozentualen Anteils der Einsatzstoffe auf das Gesamtindikatorergebnis in den fünf ausgewählten Wirkungskategorien terrestrische Ökotoxizität (TET), globale Erwärmung (GW), Humantoxizität (HT), Salzwasserökotoxizität (MET) und Frischwasserökotoxizität (FET)

Die weiteren Untersuchungen beinhalten die Analyse der Empfindlichkeit des Produktsystems auf die Variation der Pigmentmenge, da die Umweltwirkungen dieses Edukts den größten Anteil an den Wirkungsindekatoren ausmachen. Dafür wurde die Einsatzmenge in drei Schritten um jeweils 5% auf 85% der ursprünglichen Menge reduziert. Die Schrittweite wurde so festgelegt, dass sie sich in einem realistischen Rahmen einer möglichen Rezepturänderung befindet, gleichzeitig nicht zu klein ist, um Auswirkungen identifizieren zu können. Durch die Reduktion der Menge in der Wandfarbe um 5% [10%; 15%] reduziert sich der Anteil des Pigments in den betrachteten Wirkungskategorien jeweils um circa 3% [9%; 14%]. Die Ergebnisse zeigen, dass die potenziellen Umweltwirkungen stark von dem Pigmentanteil abhängen. Ob und inwiefern eine Änderung des Farbmittelanteils oder der Ersatz durch ein anderes Pigment möglich ist, ohne die Qualität der Wandfarbe grundsätzlich zu beeinträchtigen, wurde nicht untersucht.

Während der Prozessumstellung von Labor- zu Produktionsanlage erhöht sich die Produktionskapazität und damit verbunden die Materialkosten linear. Durch andere Apparate und Wirkungsgrade in der Produktionsanlage lässt sich der Gesamtenergiebedarf im Gegensatz zu der Menge der Einsatzstoffe nicht linear von der Produktionsmenge ableiten. Daher wurde mit Hilfe einer weiteren Sensitivitätsanalyse der Einfluss des Energiebedarfs auf die Umweltwirkungen des Produktsystems ermittelt. Um den Einfluss des Energiebedarfs in Relation zu dem des Pigments setzen zu können, wurde der Gesamtenergiebedarf für die Sensitivitätsanalyse ebenfalls um 5%, 10% und 15% gesenkt. Durch die Reduzierung des Energiebedarfs auf 85% wird beispielsweise der Indikatorwert der terrestrischen Ökotoxizität lediglich um 0,013% verringert. Eine Änderung des Energiebedarfs hat somit einen vermeintlich geringen Einfluss auf die Umweltwirkungen des Produktsystems, sodass sich diese auch bei einem Anstieg des Energiebedarfs aufgrund einer größeren Produktionsanlage nur marginal verändern werden. Die ökologische Betrachtung ergab, dass die potenziellen Umweltwirkungen des kontinuierlichen Prozesses in 15 der 17 betrachteten Wirkungskategorien ein Vielfaches der Werte eines durchschnittlichen Europäers betragen. Jedoch wurden Rezeptur und Herstellungsmethode noch mit keiner anderen Herstellungsmethode und Rezeptur der Wandfarbenproduktion verglichen, sodass noch keine Aussage dazu getroffen werden kann, inwiefern die betrachtete Herstellungsmethode ökologisch vorteilhaft gegenüber anderen Herstellungsmethoden ist.

5 Fazit und Ausblick

Das Forschungsprojekt „Nachhaltige Produktion hoch feststoffhaltiger Wandfarben durch Umstellung von absatzweiser auf kontinuierliche Fertigung“ hatte die Entwicklung eines neuen nachhaltigen Herstellungsverfahrens für Dispersionsfarbe zum Gegenstand.

Neben der Analyse des bestehenden Prozesses, der Ausarbeitung eines neuen Produktionsverfahrens als kontinuierlicher und automatisierter Prozess, war vor allem die Nachhaltigkeit leitender Gegenstand der Arbeiten. Das Projekt umfasst alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, Ökonomie, Ökologie und soziale Verträglichkeit. Letzteres wird insbesondere erreicht durch die Erhöhung der Arbeitssicherheit und der Arbeitsplatzergonomie. Durch Einsatz moderner Produktions- und Steuerungssysteme wird eine Höherqualifikation des Arbeitsplatzes erreicht. Das konzipierte Neuverfahren erlaubt auch älteren Mitarbeitern, ihren wertvollen Erfahrungsschatz weiterhin einzubringen.

Es wurde gezeigt, dass die Produktion hochfeststoffhaltiger Wandfarbe grundsätzlich kontinuierlich möglich ist. Als wesentliche Herausforderungen wurden die spezifikationsgerechte Dosierung und das Einmischen von verschiedenen Edukten unterschiedlicher Massenströme, die gelöst wurden. Eine parametergeführte Qualitätsüberwachung konnte nur bedingt implementiert werden. Inline-Qualitätsmessungen der flüssigen Eigenschaften, wie pH-Wert und Farbwert des flüssigen Produkts, können zur kontinuierlichen Überwachung des Produktionsprozess genutzt werden. Die Übertragung der gemessenen Eigenschaften auf die Qualität des fertigen, finalen Produkts lässt sich nur schwer tätigen. Gerade Qualitätseigenschaften wie Glanzgrad, Deckkraft und Farbverlauf sind von einer Vielzahl an Parametern abhängig. So kann während der kontinuierlichen Produktion zwar eine verbesserte Voraussage der Qualität getroffen werden, eine komplette Qualitätsprüfung im Labor ist dennoch unersetzlich.

Die Umwelt kann durch die Verfahrensumstellung in verschiedenen Bereichen entlastet werden. Der Einsatz an Primärenergie wird durch einen intensivieren Mischprozess deutlich reduziert. Zudem werden Reinigungsaufwendungen durch das verringerte Anlagenvolumen minimiert. Das Produzieren von Fehlchargen kann durch das kontinuierliche Verfahren ebenfalls reduziert werden.

Aufgrund des großen Einflusses des Pigments auf das ökologische Profil des Prozesses sind weitere Untersuchungen zu empfehlen, in denen die Auswirkungen eines verringerten Anteils oder eines anderen Pigments auf die Qualität der Wandfarbe untersucht werden. Im Bearbeitungszeitraum des Projekts ist ein umsetzungsreifes Konzept entstanden, dass mit weiteren Untersuchungen bezüglich der Implementierung am Standort AURO Pflanzenchemie AG übertragen werden kann. Eine kontinuierliche Produktion im Dauerbetrieb stellt für AURO eine gänzlich neue Produktionsweise dar. Um diesen kontinuierlichen - und nachts ohne personelle Überwachung laufenden - Prozess letztendlich in die Realität zu übertragen, ist eine entsprechende Anpassung der Produktionsinfrastruktur notwendig.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Anderson, N. G. 2012. Using Continuous Processes to Increase Production. *Org. Process Res. Dev.* 16, 5, 852–869.
- [2] Grundemann, L., Fischer, N., and Scholl, S. 2009. From Macro Batch to Micro-conti Manufacturing. A New Eco-Friendly Production Process for Writing Ink Employing Micro-process Engineering. *Chem. Eng. Technol.* 32, 11, 1748–1756.
- [3] Plogstert, Stefan (2016): *Materialflusskostenrechnung eines Batch-Prozesses zur Herstellung hoch feststoffhaltiger Wandfarbe*. Studienarbeit, TU Braunschweig, ICTV.
- [4] Wiese, Hanna (2016): *Erarbeitung eines Qualitätsstandards und zugehörigen Prüfverfahrens für hoch feststoffhaltige Wandfarbe*. Studienarbeit, TU Braunschweig, ICTV.
- [5] Schwerdtfeger, Natalie (2016): *Entwicklung einer Methodik zur rezepturgenauen Herstellung einer Pulvermischung*. Studienarbeit, TU Braunschweig, ICTV.
- [6] Martin, Johanna (2018): *Nachhaltigkeitsbetrachtung zu einer Farbproduktion auf Naturstoffbasis*. Studienarbeit, TU Braunschweig, ICTV.
- [7] Zlokarnik, M. 1999. Rührtechnik. Theorie und Praxis. Chemische Technik / Verfahrenstechnik. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [8] Kraume, M. and Zehner, P. 1995. Konzept der Maßstabsübertragung beim Suspendieren im Rührbehälter. *Chemie Ingenieur Technik* 67, 3, 280–288.
- [9] www.ecoinvent.org; zuletzt aufgerufen am 12.12.2018.
- [10] Huijbregts MAJ, Steinmann ZJN, Elshout PMF, Stam G, Verones F, Vieira MDM, Hollander A, Van Zelm R, 2016. ReCiPe2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. RIVM Report 2016-0104. Bilthoven, The Netherlands.

Weitere Literatur

- [11] Grundemann, L. 2013. *Zur Umstellung von chargenweise betriebenen Mehrproduktanlagen auf kontinuierliche Kampagnenfertigung*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2013. ICTV-Schriftenreihe 17. Cuvillier, Göttingen.
- [12] Grundemann, L., Gonschorowski, V., Fischer, N., and Scholl, S. 2012. Cleaning waste minimization for multiproduct plants. Transferring macro batch to micro conti manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 24, 92–101.
- [13] Wengerter, M., Scholl, S., and Nieder, H. 2017. Schneller, preiswerter, effizienter - kontinuierliche Bindemittelproduktion. *Farbe und Lacke*, 10, 48–53.