

Ida Mathilda Luise Ulbricht

Färbeverfahren in der Textilindustrie –
Chancen und Grenzen alternativer Verfahren unter
besonderer Berücksichtigung
der Ressourcenschonung

Bachelorarbeit

eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Bekleidung – Technik und Management
an der Fakultät Design
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Markus Oberthür

Zweitgutachterin: Prof. Ulrike Schempp

Abgegeben am 19.08.2026

Danksagung

—

An dieser Stelle danke ich allen, die mich während meines Studiums und der Erstellung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem betreuenden Prüfer Herrn Prof. Dr. Oberthür für die fachliche Begleitung und die hilfreichen Anregungen sowie meinem Interviewpartner Herrn Dr. Opwis für seine Zeit und die wertvollen Einblicke.

Von Herzen danke ich meiner Familie und meinem Umfeld für ihre Geduld, ihr Vertrauen und ihre stetige Unterstützung während dieser Zeit.

—

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation zum Schreiben der Arbeit	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
1.4 Methodisches Vorgehen	4
2 Umweltrelevanz der Textilfärberei	6
3 Grundlagen der Textilfärberei	9
3.1 Einordnung in die textile Prozesskette	9
3.2 Chemisch-physikalische Grundlagen der Farbstoff-Faser-Bindung	11
3.3 Überblick Farbstoffklassen	14
3.4 Kontinuierliche und diskontinuierliche Färbeverfahren im Kontext der Prozessführung	15
3.5 Prozessparameter der Färberei	16
3.5.1 Temperatur	17
3.5.2 pH-Wert	18
3.5.3 Flottenverhältnis	19
3.5.4 Ausziehgrad	19
4 Konventionelle Färbe- und Druckverfahren als Referenzsystem	21
4.1 Überblick über relevante Verfahren	21
4.1.1 Jigger- und Jet-Färbung	21

4.1.2 Kontinuierliche Färbeverfahren: Thermosol- und Pad-Steam-Verfahren.....	24
4.1.3 Denim-Färbung	26
4.1.4 Siebdruckverfahren als Alternative zu Färbeprozessen	28
4.2 Ressourcenverbrauch konventioneller Verfahren	30
4.2.1 Wasserverbrauch	31
4.2.2 Energiebedarf	34
4.2.3 Chemikalieneinsatz	35
4.3 Einordnung des Ressourcenverbrauchs konventioneller Verfahren	36
5 Auswahl und Darstellung alternativer Färbeverfahren	40
5.1 Auswahlkriterien für die exemplarische Betrachtung alternativer Färbeverfahren	40
5.2 Verfahren I: scCO ₂ -basierte Färbung.....	41
5.3 Verfahren II: Biobasierte / enzymatische Färbung.....	44
5.4 Verfahren III: Digitaler Textildruck (Inkjet).....	48
6 Vergleichende Analyse der Verfahren hinsichtlich der Ressourcenschonung	51
6.1 Methodik und Vergleichsrahmen	51
6.2 Ressourcenproblem I: Wasserverbrauch.....	53
6.3 Ressourcenproblem II: Energiebedarf	58
6.4 Ressourcenproblem III: Chemikalieneinsatz.....	61
6.5 Gesamtbewertung der Ressourceneffizienz	64
7 Grenzen und Herausforderungen	66
7.1 Technologische Grenzen	66
7.2 Wirtschaftliche Aspekte und Skalierbarkeit.....	68
7.3 Markt- und Akzeptanzprobleme	70
8 Fazit und Ausblick.....	73
Literatur- und Quellenverzeichnis.....	78

Anhang.....	86
Selbstständigkeitserklärung	107

Abkürzungsverzeichnis

AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
BOD	Biochemischer Sauerstoffbedarf
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DOD	Drop-on-Demand (Tropfen-auf-Bedarf-Verfahren)
DTNW	Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West Krefeld
DTP	Digital Textile Printing (Digitaler Textildruck)
F&E	Forschung und Entwicklung
GVO	Gentechnisch veränderte Organismen
HT-	Hochtemperatur-
IL	Ionic Liquids (Ionische Flüssigkeiten)
LCA	Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse)
PET	Polyethylenterephthalat
PVA	Polyvinylalkohol
RSP	Rotary Screen Printing (Rotationssiebdruck)
scCO ₂	Supercritical Carbon Dioxide (Überkritisches Kohlenstoffdioxid)
SS	Suspendierte Feststoffe
TDS	Gesamte gelöste Feststoffe
TSS	Gesamte suspendierte Feststoffe

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozesskette der Textilproduktion (Faser-, Garn- und Flächenbildung sowie Nassveredelung)	9
Abbildung 2: Schematische Darstellung der drei Teilschritte der Farbstoff-Faser-Bindung	12
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Substantivität, Fixierungsgrad und Nachbehandlungsaufwand in der Textilfärbung	13
Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Jigger-Färbemaschine	22
Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Jet-Färbemaschine	23
Abbildung 6: Schema einer Pad-Steam-Anlage	25
Abbildung 7: Wasserverschmutzung während der Denim Verarbeitung	28
Abbildung 8: Querschnitt einer Rotationsdruckschablone mit Rakel und Druckpastenauftrag	30
Abbildung 9: Wärmebedarf und Farbabweichung (ΔE) in Abhängigkeit vom Flottenverhältnis, heller Farbton	33
Abbildung 10: Vereinfachtes Schema einer typischen Anlage zur Färbung mit überkritischem CO ₂	42
Abbildung 11: Der Colorifix-Prozess: Von der Pigmenterzeugung durch gentechnisch veränderte Mikroorganismen bis zum gefärbten Textil	46
Abbildung 12: Prozentuale Reduktion ausgewählter Umweltparameter bei digitalem Textildruck (DTP) gegenüber Rotationssiebdruck (RSP).....	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Nicht fixierter Farbstoffanteil (in %) ausgewählter Farbstoffklassen 31

Tabelle 2: Ressourcenprofil der betrachteten konventionellen Verfahren im
Überblick.....37

Tabelle 3: Ressourcenprofil der betrachteten alternativen Verfahren im
Überblick.....64

1 Einleitung

Das folgende Kapitel führt in die vorliegende Arbeit ein. Zunächst wird die Motivation für die Themenwahl dargelegt, bevor Zielsetzung, Aufbau und methodisches Vorgehen der Arbeit erläutert werden.

1.1 Motivation zum Schreiben der Arbeit

Die Frage nach einer nachhaltigeren Gestaltung industrieller Produktionsprozesse gewinnt in vielen Branchen zunehmend an Bedeutung.

So steht auch die Textilindustrie vor der Herausforderung, auf kritische Fragen nach ihren Produktionsmethoden hinsichtlich des Einsatzes von Ressourcen wie Wasser, Energie und chemischen Hilfsmitteln zu reagieren.¹

Insbesondere die Färbung von Textilien gilt innerhalb der textilen Prozesskette als ein ressourcenintensiver Produktionsschritt, der sowohl aus ökologischer als auch aus wirtschaftlicher Perspektive verstärkt in den Fokus von Forschung und Industrie rückt.²

Die Motivation für die vorliegende Arbeit entstand aus einer persönlichen Erfahrung außerhalb des universitären Kontextes.

Im März 2024 besuchte ich die Ausstellung „Waterpressure“ im Museum für Kunst und Gewerbe Hamburg. Die Ausstellung thematisierte den Umgang mit der Ressource Wasser und beleuchtete anhand verschiedener Beispiele aus Industrie, Design und Technologie die Auswirkungen industrieller Produktionsprozesse auf Umwelt und Gesellschaft. Ein Teil der Ausstellung widmete sich dabei der Textilproduktion und zeigte innovative Ansätze zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs innerhalb der textilen Wertschöpfungskette.

Besonders beeindruckte mich die Präsentation von Colorifix, einem Unternehmen, das neue Wege in der Entwicklung nachhaltiger Färbeprozesse verfolgt und biotechnologische Verfahren zur Herstellung und Anwendung von Farbstoffen entwickelt. Die dort vorgestellten Ansätze verdeutlichten, dass technologische Innovationen das Potenzial besitzen, etablierte Produktionsprozesse grundlegend

¹ Vgl. Umweltbundesamt (UBA) (2023)

² Vgl. Cole (2020)

zu verändern und gleichzeitig zur Reduzierung von Umweltbelastungen beizutragen.³

Der Besuch der Ausstellung motivierte mich dazu, mich intensiver mit den Hintergründen und Möglichkeiten solcher Technologien auseinanderzusetzen. Während mir durch mein Studium in Bekleidung – Technik und Management bereits grundlegende Kenntnisse zu textilen Materialien, Produktionsprozessen und Veredlungstechniken vermittelt wurden, eröffnete die Ausstellung eine neue Perspektive auf die praktische Bedeutung dieser Inhalte im Kontext aktueller Nachhaltigkeitsfragen. Sie machte deutlich, dass technisches Wissen über textile Prozesse nicht nur für die Produktion selbst relevant ist, sondern auch eine wichtige Grundlage bildet, um innovative und ressourcenschonende Lösungen bewerten zu können.

Aus dieser Erfahrung heraus entwickelte sich das Interesse, mich im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit vertieft mit Färbeverfahren in der Textilproduktion zu befassen. Vor dem Hintergrund einer kritischen Betrachtung des damit verbundenen Ressourcenverbrauchs möchte ich aktuelle Entwicklungen in diesem Bereich näher untersuchen.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit untersucht Färbeverfahren in der Textilindustrie unter besonderer Berücksichtigung ihres Ressourcenverbrauchs. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, in welchem Umfang konventionelle Prozesse durch alternative Technologien hinsichtlich einer ressourcenschonenderen Textilproduktion ergänzt oder teilweise ersetzt werden können.

Ziel der Arbeit ist es, konventionelle Färbeverfahren systematisch hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen zu analysieren und diesen ausgewählten alternativen Verfahren gegenüberzustellen. Dabei soll zunächst ein strukturiertes Verständnis der technischen Grundlagen und Prozessbedingungen konventioneller Färbeprozesse geschaffen werden. Darauf aufbauend erfolgt eine Betrachtung des damit verbundenen Einsatzes von Wasser, Energie und chemischen Hilfsmitteln, um zentrale Belastungsschwerpunkte zu identifizieren.

³ Vgl. MK&G Water Pressure (2024)

Im weiteren Verlauf werden verschiedene alternative Färbeverfahren dargestellt, die in Forschung und Industrie als innovative Ansätze zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs diskutiert werden.

Diese Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich ihrer technologischen Grundlagen und ihres Ressourceneinsatzes von etablierten Prozessen und werden im Rahmen dieser Arbeit vergleichend untersucht. Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist die Bewertung dieser Verfahren anhand definierter ökologischer Indikatoren. Neben quantitativen und qualitativen Aspekten der Ressourcennutzung werden auch technische Rahmenbedingungen sowie die industrielle Umsetzbarkeit berücksichtigt.

Die Arbeit verfolgt somit das Ziel, bestehende und alternative Färbeverfahren systematisch einzuordnen und ihren Beitrag zu einer nachhaltigeren Gestaltung textiler Produktionsprozesse kritisch zu bewerten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit folgt einem strukturierten Aufbau, der eine schrittweise Annäherung an die Bewertung von Färbeverfahren im Kontext der Ressourcenschonung ermöglicht.

Im Anschluss an die Einleitung beleuchtet das zweite Kapitel die Umweltrelevanz der Textilfärberei vor dem Hintergrund globaler Wasserknappheit und der ökologischen Belastungen konventioneller Färbeprozesse. Dieses Kapitel begründet die gesellschaftliche und ökologische Dringlichkeit, die der nachfolgenden technischen Analyse zugrunde liegt.

Das dritte Kapitel erläutert die grundlegenden Prozesse der Textilfärbung. Dabei stehen sowohl die Einordnung in die textile Prozesskette als auch zentrale verfahrenstechnische und chemisch-physikalische Grundlagen im Fokus. Ziel dieses Kapitels ist es, die Basis für das Verständnis der nachfolgenden Analyse zu schaffen.

Das vierte Kapitel ordnet konventionelle Färbeverfahren als etabliertes Referenzsystem ein. Hier werden typische industrielle Prozesse sowie deren spezifischer Ressourcenverbrauch dargestellt, um die ökologischen Ausgangsbedingungen der Analyse zu definieren.

Darauf aufbauend werden im fünften Kapitel alternative Färbeverfahren vorgestellt, die als potenzielle Ansätze zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs in der Textilindustrie gelten. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf unterschiedlichen technologischen Konzepten sowie deren funktionalen Eigenschaften.

Im sechsten Kapitel erfolgt die Entwicklung eines Bewertungsrahmens sowie eine systematische vergleichende Analyse der konventionellen und alternativen Verfahren. Hier werden insbesondere ökologische Indikatoren wie Wasser-, Energie- und Chemikalienverbrauch herangezogen, um die Verfahren objektiv gegenüberzustellen.

Das siebte Kapitel dient der kritischen Einordnung der Ergebnisse im Hinblick auf technologische, wirtschaftliche und strukturelle Rahmenbedingungen. Dabei werden insbesondere Grenzen der Umsetzbarkeit sowie bestehende Zielkonflikte diskutiert.

Abschließend werden die zentralen Erkenntnisse im achten Kapitel zusammengeführt und in einen übergeordneten Kontext zukünftiger Entwicklungen der Textilfärbung eingeordnet.

1.4 Methodisches Vorgehen

Die vorliegende Arbeit verfolgt einen analytisch-vergleichenden Ansatz zur Untersuchung von Färbeverfahren der Textilindustrie im Hinblick auf ihren Beitrag zur Ressourcenschonung. Konventionelle und alternative Verfahren werden zunächst getrennt voneinander charakterisiert (Kapitel 4 und 5), bevor sie in Kapitel 6 auf Basis ausgewählter ökologischer Indikatoren einander gegenübergestellt werden.

Die Untersuchung beschränkt sich auf die Prozessstufe der Textilfärbung beziehungsweise des Textildrucks. Vor- und Nachbehandlungsschritte werden der Vollständigkeit halber benannt, jedoch nicht vertiefend analysiert, da der Fokus der Arbeit auf den eigentlichen Färbe- und Druckprozessen liegt. Vorgelagerte Rohstoffgewinnung sowie nachgelagerte Nutzungs- und Entsorgungsphasen bleiben vollständig unberücksichtigt, da der Schwerpunkt der Arbeit auf der industriellen Produktionsphase liegt.

Die Auswahl der untersuchten Verfahren erfolgt auf Basis ihrer industriellen Relevanz, ihres Innovationsgrades sowie der Verfügbarkeit belastbarer Daten. Als konventionelle Referenzprozesse werden etablierte Färbeverfahren wie die Jigger- und Jet-Färbung, das Thermosol- und Pad-Steam-Verfahren sowie die Denim-Färbung betrachtet. Ergänzend wird das konventionelle Siebdruckverfahren als Referenz für die alternative Applikationstechnik des digitalen Textildrucks einbezogen. Diesen werden ausgewählte innovative Verfahren gegenübergestellt, darunter die scCO₂-basierte Färbung, biobasierte bzw. enzymatische Färbeansätze sowie der digitale Textildruck.

Die Datengrundlage der Arbeit bildet überwiegend wissenschaftliche Fachliteratur, ergänzt durch Studien von Forschungsinstitutionen, ausgewählte Unternehmensangaben sowie ein im Rahmen dieser Arbeit geführtes Experteninterview. Da für die betrachteten Verfahren keine durchgängig belastbaren und untereinander vergleichbaren quantitativen Daten vorliegen, wird der vergleichenden Analyse kein Anspruch auf eine vollständige, normgerechte Ökobilanz zugrunde gelegt. Stattdessen erfolgt in Kapitel 6 eine strukturierte qualitative Einordnung der Verfahren, ergänzt um punktuell verfügbare quantitative Werte. Die dafür herangezogene Methodik, einschließlich der zugrunde gelegten Bewertungsdimensionen, der funktionellen Einheiten, sowie der verwendeten Datenquellen, wird zu Beginn von Kapitel 6 im Detail erläutert.

Vor diesem Hintergrund sind die Ergebnisse der Arbeit als strukturierte Einordnung und nicht als quantitativ vollständig abgesicherter Verfahrensvergleich zu verstehen. Auf diese methodische Einschränkung wird an den entsprechenden Stellen der Arbeit erneut eingegangen.

2 Umweltrelevanz der Textilfärberei

Wasser gilt zunehmend als eine der knappsten Ressourcen des 21. Jahrhunderts. Nach Angaben von UN-Water lebten im Jahr 2021 rund 720 Millionen Menschen – etwa 10 % der Weltbevölkerung – in Ländern mit hohem oder kritischem Wasserstress.⁴

Diese globale Verknappung trifft die Textilindustrie in besonderem Maße, da ein erheblicher Teil der weltweiten Textilproduktion in Regionen stattfindet, die zugleich zu den am stärksten von Wasserstress betroffenen Gebieten zählen. In Südasien, einer der bedeutendsten Textilproduktionsregionen weltweit, sind nach Angaben des World Resources Institute rund 74 % der Bevölkerung von hohem Wasserstress betroffen.⁵

Die Textilfärberei trifft damit in vielen ihrer wichtigsten Produktionsstandorte auf ein Umfeld, in dem Wasser bereits ein knappes und umkämpftes Gut ist.

Innerhalb der Textilproduktion zählt die Färberei zu den Prozessstufen mit der höchsten Umweltrelevanz. Die Textilindustrie gilt nach der Landwirtschaft als größter Verursacher von Trinkwasserverschmutzung weltweit; schätzungsweise 17 bis 20 % des industriellen Abwassers stammen aus Färberei- und Veredelungsprozessen.⁶ Die dabei anfallenden Abwässer sind komplex zusammengesetzt und enthalten neben nicht fixierten Farbstoffen eine Vielzahl von Hilfsmitteln, Tensiden, Salzen, Schwermetallen und weiteren Prozesschemikalien, die als toxisch und teilweise karzinogen gelten. Global entsorgt die Textilindustrie jährlich rund 280.000 Tonnen Farbstoffe in Gewässer.⁷

Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) beschreibt die Menge an Sauerstoff, die zur vollständigen chemischen Oxidation der im Abwasser enthaltenen organischen Stoffe erforderlich wäre, und dient damit als Indikator für dessen organische Belastung. Der CSB des Abwassers der Textilindustrie liegt typischerweise zwischen 1.600 und 3.200 mg/L⁸ und damit um ein Vielfaches über dem kommunalen Abwasser (ca. 300–600 mg/L)⁹, was die hohe organische Belastung dieser Abwässer verdeutlicht.

⁴ Vgl. *Water Scarcity* (o. J.)

⁵ Vgl. Kuzma u. a. (2023)

⁶ Vgl. zum Ganzen: Kishor u. a. 2021, zit. n. De Oliveira u. a. (2024)

⁷ So auch: Hussain & Wahab 2018, zit. n. De Oliveira u. a. (2024)

⁸ Vgl. Gabris u. a. (2025)

⁹ Vgl. Metcalf and Eddy (2003), zit. n. Awuah 2006, S. 9

Problematisch ist dabei nicht nur die Konzentration, sondern auch die Persistenz dieser Stoffe: Synthetische Textilfarbstoffe weisen eine hohe Resistenz gegenüber mikrobiellem Abbau, Licht und Hydrolyse auf.¹⁰

In aquatischen Ökosystemen verhindern sie die Lichtdurchdringung des Wassers, hemmen dadurch die Photosynthese und senken den Sauerstoffgehalt, was sämtliche aquatischen Lebewesen beeinträchtigt. Zudem reichern sie sich über die Nahrungskette in Organismen höherer Ernährungsstufen an – ein Prozess, der als Bioakkumulation bezeichnet wird.¹¹ Auf zellulärer Ebene können Farbstoffrückstände zudem chromosomale Aberrationen, DNA-Schäden sowie endokrine Störungen verursachen.¹²

Neben diesen unmittelbaren Belastungen der Gewässer trägt die Textilfärberei auch zum Klimawandel bei. Färbeprozesse benötigen viel Energie, meist in Form von Dampf, der überwiegend aus fossilen Energieträgern wie Kohle erzeugt wird. Je nach eingesetztem Energieträger verursacht die Erzeugung einer Tonne Dampf durchschnittlich rund 400 kg Treibhausgasemissionen (gemessen als CO₂-Äquivalente).¹³ Zudem geht ein erheblicher Teil der eingesetzten Energie ungenutzt verloren: Etwa 24,9 % der in einer Färbereianlage eingesetzten thermischen Energie werden über das Abwasser abgeführt.¹⁴

Diese Belastungen entstehen in einem ökonomischen Umfeld, in dem ihre Folgekosten bislang kaum im Marktpreis textiler Produkte abgebildet sind. In der Forschung wird vor diesem Hintergrund zunehmend das Konzept des True Cost Pricing diskutiert, das versucht, ökologische Folgekosten, etwa für Wasserverbrauch, Abwasserbelastung und CO₂-Emissionen, in die Preisbildung von Textilprodukten einzubeziehen.¹⁵ Eine vertiefende Auseinandersetzung mit diesem Konzept ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, verdeutlicht jedoch zusätzlich, dass die ökologischen Kosten konventioneller Färbeverfahren bislang nur unzureichend in ökonomische Entscheidungsprozesse einfließen.

Prognosen des World Resources Institute deuten darauf hin, dass sich diese Ausgangslage in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich weiter

¹⁰ Vgl. zum Ganzen: Kishor u. a. (2021), zit. n. De Oliveira u. a. (2024)

¹¹ Vgl. Lellis u. a. (2019)

¹² Vgl. Chequer u. a. (2013), S. 161 f.

¹³ So auch: Li u. a. (2024)

¹⁴ Im Ergebnis ebenso: Hasanbeigi & Price 2012, zit. n. De Oliveira u. a. (2024)

¹⁵ Vgl. Cabrera-Jiménez u. a. (2025)

verschärfen wird. Bei einer Entwicklung ohne zusätzliche Maßnahmen zur Begrenzung des Klimawandels werden bis zum Jahr 2050 voraussichtlich knapp ein Drittel der untersuchten 164 Länder und Gebiete (51 Länder) von hohem bis extrem hohem Wasserstress betroffen sein. Damit würde sich die Zahl der stark wasserstressbelasteten Staaten gegenüber dem heutigen Stand deutlich erhöhen.¹⁶ Diese zunehmende Belastung der globalen Wasserressourcen bildet den Hintergrund für die in den folgenden Kapiteln vorgenommene technische Analyse konventioneller und alternativer Färbeverfahren.

¹⁶ Vgl. Zandt (2024)

3 Grundlagen der Textilfärberei

Die Bewertung des Ressourcenverbrauchs und der Umweltwirkungen textiler Färbeverfahren setzt ein Verständnis ihrer technischen, chemischen und verfahrenstechnischen Grundlagen voraus. Dieses Kapitel widmet sich daher zunächst der Einordnung der Färbung innerhalb der textilen Prozesskette. Anschließend werden die chemisch-physikalischen Mechanismen der Farbstoff-Faser-Bindung sowie wesentliche Farbstoffklassen, Verfahrensarten und Prozessparameter dargestellt, die die Ressourcenintensität der Färbeverfahren beeinflussen und den weiteren Betrachtungen zugrunde liegen.

3.1 Einordnung in die textile Prozesskette

Die textile Prozesskette umfasst eine Vielzahl aufeinanderfolgender Verarbeitungsschritte, die von der Rohfaser bis zum fertigen Textilprodukt reichen. Zu den zentralen Stufen zählen die Fasergewinnung, die Garnherstellung, die Flächenbildung (Weben oder Stricken), die textile Veredelung sowie die Konfektionierung.¹⁷

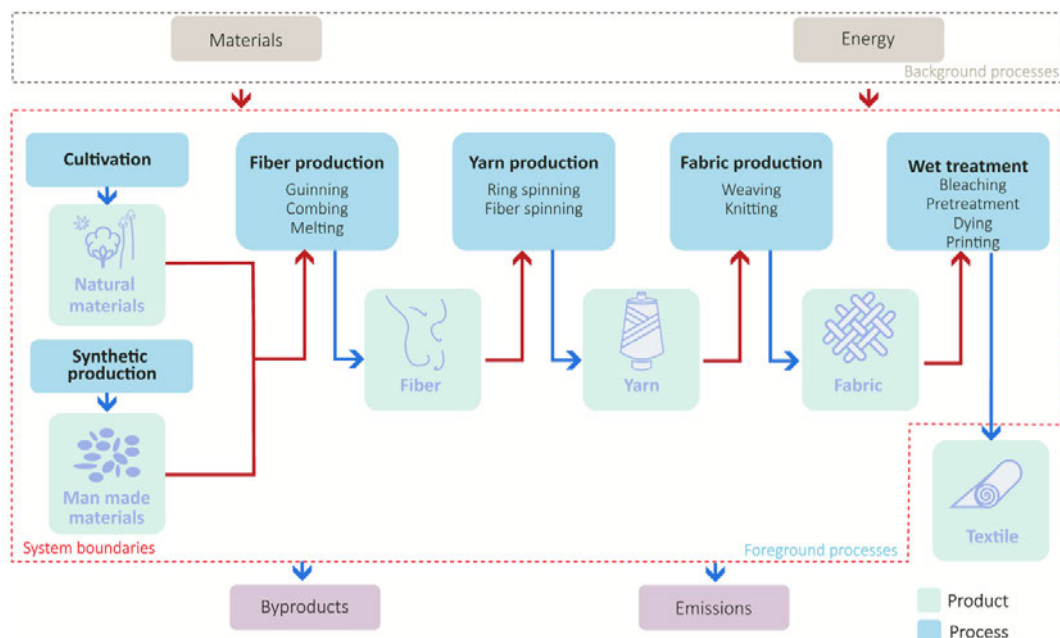


Abbildung 1: Prozesskette der Textilproduktion (Faser-, Garn- und Flächenbildung sowie Nassveredelung)¹⁸

¹⁷ Vgl. Bechthold & Pham (2023), S. 1 ff.

¹⁸ Vgl. Cabrera-Jiménez u. a. (2025); die Konfektionierung ist nicht dargestellt

Abbildung 1 veranschaulicht diesen Ablauf exemplarisch für den Fall der Flächenfärbung (Piece dyeing), bei der die Färbung im Anschluss an die Flächenherstellung (Fabric production) als Teil der Nassveredelung (Wet treatment) erfolgt. Die Abbildung beschränkt sich auf die ersten vier Prozessstufen; die Konfektionierung als fünfte Stufe ist nicht dargestellt, da die Färbung dort nur im Fall der Stückfärbung (Garment Dyeing) ansetzt. Wie im Folgenden gezeigt wird, kann die Färbung grundsätzlich an mehreren Stellen der Prozesskette erfolgen. Jeder dieser Prozessschritte erfüllt eine spezifische Funktion innerhalb der Herstellung und beeinflusst die Eigenschaften des Endprodukts.

Die textile Veredelung stellt dabei einen besonders bedeutenden Abschnitt dar, da hier die funktionellen und ästhetischen Eigenschaften der Textilien gezielt eingestellt werden. Neben mechanischen und chemischen Ausrüstungsprozessen nimmt die Färbung eine zentrale Rolle ein, da sie maßgeblich für das Erscheinungsbild und die Marktakzeptanz eines Produkts verantwortlich ist.

Grundsätzlich werden fünf Färbeverfahren unterschieden, die sich durch den Prozessschritt unterscheiden, in dem die Färbung erfolgt. Dabei sind nicht alle Verfahren für jede Faserart geeignet. So wird beim Dope dyeing (Spinnfärbung) der Farbstoff bereits der Spinnmasse vor deren Verspinnen zugesetzt, weshalb dieses Verfahren ausschließlich bei Chemiefasern angewendet werden kann. Fiber dyeing (Faserfärbung) erfolgt nach der Faserherstellung, Yarn dyeing (Garnfärbung) nach der Garnherstellung, Piece dyeing (Flächenfärbung) nach der Flächenbildung und Garment dyeing (Stückfärbung) nach der Konfektionierung des fertigen Kleidungsstücks. Diese vier zuletzt benannten Verfahren können, im Unterschied zum Dope dyeing, grundsätzlich bei unterschiedlichen Faserarten eingesetzt werden.¹⁹

Unabhängig davon, an welcher Stelle der textilen Prozesskette die Färbung erfolgt, sind in der industriellen Praxis Vorbehandlungsschritte erforderlich. Hierzu zählen insbesondere das Entschlichten (desizing), Waschen (scouring) sowie gegebenenfalls das Bleichen (bleaching) des Textilmaterials. Diese Prozesse dienen der Entfernung von Verunreinigungen, Schlichten, Fetten und Ölen aus vorgelagerten Verfahrensschritten und schaffen die Voraussetzungen für eine

¹⁹ Vgl. Wardman (2018), S. 176

gleichmäßige Farbstoffaufnahme. Sie stellen damit einen wesentlichen Bestandteil der textilen Prozesskette dar und beeinflussen sowohl die Qualität der Färbung als auch den Ressourcenverbrauch des Gesamtprozesses.²⁰

Die Färbung zählt als Bestandteil der textilen Nassveredelung zu den ressourcenintensivsten Prozessschritten der Textilproduktion. Die Nassveredelung verursacht rund 72 % des gesamten Wasserverbrauchs der Branche und bis zu 52 % ihrer Treibhausgasemissionen.²¹ Eine detaillierte Betrachtung des damit verbundenen Wasser-, Energie- und Chemikalienbedarfs erfolgt im Rahmen der vergleichenden Analyse konventioneller und alternativer Verfahren im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit.

Ein grundlegendes Verständnis der Position, Funktion und wesentlicher Parameter der Färbung innerhalb der Prozesskette ist daher eine wichtige Voraussetzung für die Analyse und das Verständnis konventioneller und alternativer Färbeverfahren im Hinblick auf ihre Ressourceneffizienz.

3.2 Chemisch-physikalische Grundlagen der Farbstoff-Faser-Bindung

Die Färbung textiler Materialien basiert auf der Wechselwirkung zwischen Farbstoff und Faser, deren Ziel in einer möglichst dauerhaften und gleichmäßigen Fixierung des Farbstoffs im Material liegt. Die Qualität der Färbung sowie die Echtheitseigenschaften werden dabei maßgeblich durch die Art der Farbstoff-Faser-Bindung beeinflusst.²²

Der Färbeprozess lässt sich dabei grundsätzlich in drei aufeinanderfolgende Schritte unterteilen: die Adsorption des Farbstoffs an der Faseroberfläche, die Diffusion in das Faserinnere sowie die anschließende Fixierung des Farbstoffs.²³

²⁰ So auch: Ebener & Schelz (1989), S. 260 ff.

²¹ Vgl. zum Ganzen: Khan u. a. 2023, zit. n. Catarino u. a. (2025)

²² So auch: Peter (1985), S. 154

²³ Vgl. Clark (2011), Volume 1, S. 3 f.

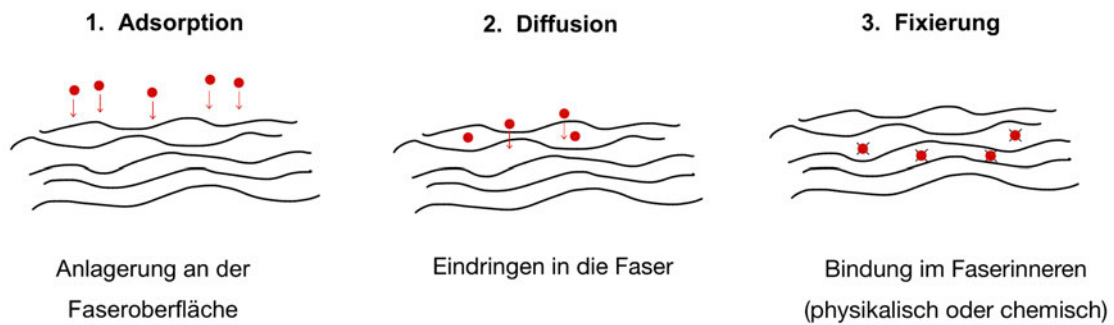


Abbildung 2: Schematische Darstellung der drei Teilschritte der Farbstoff-Faser-Bindung²⁴

Die Art der Bindung zwischen Farbstoff und Faser kann sowohl physikalischer als auch chemischer Natur sein. Physikalische Bindungen umfassen unter anderem Van-der-Waals-Kräfte²⁵, Wasserstoffbrückenbindungen, elektrostatische Wechselwirkungen sowie hydrophobe Wechselwirkungen, die insbesondere bei der Färbung von Polyester mit Dispersionsfarbstoffen eine zentrale Rolle spielen.²⁶ Diese Bindungsarten sind in der Regel schwach und reversibel, wodurch Farbstoffe leichter wieder aus der Faser gelöst werden können. Dies führt häufig zu geringeren Echtheiten und erhöhtem Aufwand in der Nachbehandlung.²⁷

Im Gegensatz dazu ermöglichen chemische bzw. kovalente Bindungen eine deutlich stabilere Verankerung des Farbstoffs in der Faser.

Ein typisches Beispiel hierfür sind Reaktivfarbstoffe, die kovalente Bindungen mit Cellulosefasern eingehen. Dadurch werden hohe Wasch- und Gebrauchsechtheiten erreicht sowie der Anteil nicht fixierter Farbstoffe reduziert.²⁸

Ein zentraler Begriff im Zusammenhang mit der Farbstoff-Faser-Wechselwirkung ist die sogenannte Substantivität.²⁹ Sie beschreibt die Affinität eines Farbstoffs zur Faser und damit dessen Fähigkeit, aus der Flotte auf die Faser überzugehen und dort zu verbleiben. Die Substantivität beeinflusst sowohl die Aufnahme- geschwindigkeit als auch den Fixierungsgrad eines Farbstoffs. Farbstoffe mit hoher Substantivität weisen eine starke Affinität zur Faser auf, wodurch ein größerer

²⁴ Eigene Darstellung in Anlehnung an Peter (1985), S. 154

²⁵ Umfassend hierzu: Turba & Rumpf (1964)

²⁶ Vgl. zum Ganzen: Bobeth (1993), S. 42 ff.

²⁷ Vgl. Rath (1972), S. 505

²⁸ Vgl. Ebener & Schelz (1989), S. 226 ff.

²⁹ So auch: Peter (1985), S. 154

Anteil des Farbstoffs während des Färbeprozesses aufgenommen wird. Im Gegensatz dazu verbleibt bei Farbstoffen mit geringer Substantivität ein erheblicher Teil des Farbstoffs in der Flotte oder an der Faseroberfläche.³⁰

Die Substantivität hat somit direkte Auswirkungen auf die nachfolgenden Prozessschritte, insbesondere auf den anschließenden Waschprozess. Nicht fixierter Farbstoff muss nach dem Färben durch mehrstufige Wasch- und Spülprozesse entfernt werden, um unerwünschte Effekte wie Ausbluten oder unzureichende Echtheiten zu vermeiden. Je geringer die Substantivität eines Farbstoffs ist, desto höher ist der erforderliche Aufwand für diese Nachbehandlungsschritte.³¹

Der Zusammenhang zwischen Substantivität, Fixierungsgrad und Nachbehandlungsaufwand ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Substantivität, Fixierungsgrad und Nachbehandlungsaufwand in der Textilfärbung³²

Zusammenfassend bestimmen die chemisch-physikalischen Grundlagen der Farbstoff-Faser-Bindung maßgeblich die Qualität und Echtheit textiler Färbungen. Insbesondere die Art der Bindung sowie die Substantivität beeinflussen den

³⁰ Vgl. Peter (1985), S. 154

³¹ Vgl. Rath (1972), S. 515 f.

³² Eigene Darstellung in Anlehnung an Peter (1985), S. 154

Fixierungsgrad des Farbstoffs und den Umfang notwendiger Nachbehandlungsschritte.

3.3 Überblick Farbstoffklassen

Die Auswahl geeigneter Farbstoffe erfolgt maßgeblich in Abhängigkeit von der jeweiligen Faserart sowie den aus der geplanten Verwendung und den Anforderungen an den Stoff resultierenden Gebrauchseigenschaften des Textils. Dabei unterscheiden sich Naturfasern wie Baumwolle in ihrem Färbeverhalten deutlich von synthetischen Fasern wie Polyester, wodurch unterschiedliche Farbstoffsysteme und Prozessbedingungen erforderlich werden.³³

Reaktiv- und Direktfarbstoffe kommen häufig für cellulosische Fasern zum Einsatz. Reaktivfarbstoffe bilden während des Färbeprozesses eine chemische Bindung mit der Faser und zeichnen sich durch gute Waschbeständigkeiten aus. Aufgrund nicht vollständig fixierter Farbstoffanteile sind jedoch anschließende Nachwaschprozesse erforderlich. Direktfarbstoffe besitzen in Abgrenzung zu den Reaktivfarbstoffen eine höhere Substantivität in Bezug auf Baumwolle und werden direkt aus der Flotte aufgenommen, weisen jedoch geringere Echtheitseigenschaften auf.³⁴

Dispersionsfarbstoffe werden überwiegend zur Färbung synthetischer Fasern eingesetzt. Dazu zählen insbesondere Polyester, aber auch Polyamid und Celluloseacetat. Dispersionsfarbstoffe sind hydrophob und nahezu wasserunlöslich. Im Färbeprozess werden sie durch Dispergiermittel in der Färbeflotte stabilisiert. Die eigentliche Farbstoffaufnahme in die Faser erfolgt durch Diffusion in die Polymerstruktur.³⁵

Küpenfarbstoffe werden vor allem für robuste und waschechte Färbungen eingesetzt, beispielsweise im Denim-Bereich. Sie zeichnen sich durch hohe Echtheiten aus, da der ursprünglich wasserunlösliche Farbstoff zunächst reduziert und nach dem Aufziehen auf die Faser durch Oxidation wieder in seine unlösliche Form überführt wird. Dies erfordert zusätzliche Prozessschritte zur Reduktion und Oxidation des Farbstoffs.³⁶

³³ Vgl. zum Ganzen: Chequer u. a. (2013), 154 f.

³⁴ Vgl. Ebener & Schelz (1989), S. 226 - 234

³⁵ Im Ergebnis ebenso: Ebener & Schelz (1989), S. 199 ff.

³⁶ Vgl. Catarino u. a. (2025)

Säurefarbstoffe kommen überwiegend bei Wolle, Seide und Polyamidfasern zum Einsatz. Durch den Einsatz eines sauren Färbebads wird die Bindung des Farbstoffs an die Textilfaser verbessert. Nach dem Färbeprozess sind Wasch- und Spülschritte erforderlich, um überschüssige Farbstoffreste aus dem Material zu entfernen und eine gleichmäßige Farbwirkung sicherzustellen.³⁷

Die verschiedenen Farbstoffklassen unterscheiden sich somit hinsichtlich ihrer Anwendung, Prozessführung, Substantivität und dem erforderlichen Nachbehandlungsaufwand.

3.4 Kontinuierliche und diskontinuierliche Färbeverfahren im Kontext der Prozessführung

Färbeverfahren lassen sich grundlegend in kontinuierliche und diskontinuierliche Prozesse einteilen. Diese Unterscheidung bezieht sich auf die Art der Prozessführung und hat wesentlichen Einfluss auf Produktionsabläufe und Prozesssteuerung.³⁸

Diskontinuierliche Verfahren, auch als Batch-Prozesse bezeichnet, zeichnen sich dadurch aus, dass einzelne Materialchargen nacheinander in einem abgeschlossenen Prozess gefärbt werden. Dabei durchläuft jede Charge definierte Prozessschritte wie Aufheizen, Färben, Abkühlen und Entleeren. Typische Vertreter dieser Verfahrensgruppe sind die Jet- und Jigger-Färbung.³⁹ Diese Verfahren bieten ein hohes Maß an Flexibilität hinsichtlich unterschiedlicher Materialien und Farbtöne, ferner eignen sie sich auch für kleinere Produktionsmengen, sind jedoch durch vergleichsweise lange Prozesszeiten gekennzeichnet.⁴⁰

Im Gegensatz dazu stehen kontinuierliche Verfahren, bei denen das Textilmaterial in einem fortlaufenden Prozess ohne Unterbrechung durch verschiedene Behandlungsstufen geführt wird. Beispiele hierfür sind das Pad-Dry- sowie das Pad-Steam-Verfahren. Diese Prozesse sind auf hohe Produktionsmengen ausgelegt und ermöglichen eine gleichbleibende Qualität bei effizienter Verarbeitung großer Stoffmengen.⁴¹

³⁷ So auch: Ebener & Schelz (1989), S. 214 ff.

³⁸ Vgl. Mikucioniene u. a. (2024)

³⁹ Vgl. Rouette (2006), S. 74 -83

⁴⁰ So auch: Chequer u. a. (2013), S. 153 f.

⁴¹ Vgl. Rath (1972), S. 543 f.

Zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Färbeverfahren bestehen deutliche Unterschiede hinsichtlich ihrer prozesstechnischen Charakteristika. Insbesondere die in Abschnitt 3.5 behandelten Kennwerte Flottenverhältnis und Ausziehgrad sind unmittelbar an die Prozesslogik diskontinuierlicher Verfahren gebunden, da sie ein abgegrenztes und über die Behandlungsdauer konstantes Flottenvolumen voraussetzen. Diskontinuierliche Verfahren arbeiten typischerweise mit höheren Flottenverhältnissen und sind durch wiederholte Aufheiz- und Abkühlzyklen gekennzeichnet. Kontinuierliche Verfahren benötigen hingegen pro Textilmasse geringere Flottenmengen, da das Material die einzelnen Prozessstufen fortlaufend durchläuft und nicht dauerhaft in der Flotte verweilt. Darüber hinaus unterscheiden sich die Verfahren in ihrer Flexibilität und ihrem Einsatzbereich. Wie erläutert, stehen dabei diskontinuierliche Verfahren besonders für kleinere Serien, wechselnde Artikel und unterschiedliche Farbstellungen. Kontinuierliche Verfahren kommen hingegen vor allem in der Massenproduktion standardisierter Textilien zum Einsatz.⁴²

Insgesamt zeigt sich, dass die Wahl zwischen kontinuierlicher und diskontinuierlicher Prozessführung wesentlichen Einfluss auf Produktionsabläufe, Flexibilität und Einsatzbereich hat.

3.5 Prozessparameter der Färberei

Während des Färbeprozesses spielen verschiedene Prozessparameter eine zentrale Rolle, da sie sowohl den Ablauf der Färbung als auch das erzielte Färbergebnis maßgeblich beeinflussen.

Zu den wichtigsten Parametern zählen die Temperatur, der pH-Wert, das Flottenverhältnis sowie der Ausziehgrad. Sie beeinflussen unter anderem die Aufnahmegeschwindigkeit des Farbstoffs, dessen Verteilung innerhalb der Faser sowie den Grad der Fixierung.⁴³

⁴² Vgl. zum Ganzen: Chequer u. a. (2013), 153 f.

⁴³ Vgl. Peter (1985), S. 145 ff.

3.5.1 Temperatur

Die Temperatur hat einen entscheidenden Einfluss auf den Färbeprozess, da sie die Farbaufnahme, die Färbegeschwindigkeit und die Gleichmäßigkeit des Färbeargebnisses maßgeblich beeinflusst. Mit steigender Temperatur erhöht sich die Bewegungsenergie der Moleküle, wodurch sowohl die Diffusion der Farbstoffe in die Faser als auch die Quellung der Faserstruktur begünstigt werden. Dadurch kann eine schnellere und intensivere Farbstoffaufnahme erreicht werden.⁴⁴

Die erforderliche Färbetemperatur hängt weniger von der Unterscheidung zwischen Natur- und Synthefasern ab als vielmehr vom jeweiligen Faser-Farbstoff-System. So werden Cellulosefasern mit Reaktivfarbstoffen typischerweise bei ca. 60 °C gefärbt, während die Färbung mit Direktfarbstoffen Temperaturen von 80-100 °C erfordert. Proteinfasern wie Wolle sowie Polyamid werden mit Säurefarbstoffen ebenfalls meist bei 80-100 °C gefärbt. Polyester nimmt aufgrund seiner besonderen Faserstruktur eine Sonderstellung ein. Ursächlich hierfür ist die Glasübergangstemperatur von Polyester (ca. 80-100 °C). Erst oberhalb dieser Temperatur werden die Polymerketten in den amorphen Bereichen der Faser beweglich genug, damit Dispersionsfarbstoffmoleküle in die Faserstruktur diffundieren können. Aufgrund der erforderlichen hohen Prozesstemperaturen erfolgt die Färbung daher in der Regel als Hochtemperaturverfahren unter Druck, typischerweise bei etwa 130 °C im Dampfdruckkessel.⁴⁵

Neben der ausreichenden Temperatur ist auch eine präzise Prozessführung entscheidend. Bei zu niedrigen Temperaturen kann die Farbstoffaufnahme unvollständig sein, was zu blassen oder ungleichmäßigen Färbungen führt. Gleichzeitig können überhöhte oder unkontrollierte Temperaturen negative Auswirkungen haben. Hierzu zählen beispielsweise eine Schädigung der Faserstruktur, ein Abbau empfindlicher Farbstoffe oder eine verminderte Echtheit der Färbung. Deshalb werden in industriellen Prozessen präzise Temperaturprofile eingesetzt, die sowohl Aufheiz-, Halte- als auch Abkühlphasen berücksichtigen.⁴⁶

Zusammenfassend sollte die Temperatur daher exakt an die Faser und den verwendeten Farbstoff angepasst werden.

⁴⁴ Vgl. Peter (1985), S. 145 ff.

⁴⁵ Vgl. Rath (1972), S. 626 ff.

⁴⁶ Im Ergebnis ebenso: Rath (1972), S. 516 f.

3.5.2 pH-Wert

Ein entscheidender Einflussfaktor im Färbeprozess ist der pH-Wert der Färbeflotte, da er die chemischen Reaktionsbedingungen im gesamten System steuert. Er beeinflusst sowohl die Eigenschaften der Farbstoffe als auch das Verhalten der Fasern und wirkt sich dadurch direkt auf die Farbaufnahme und Fixierung aus.⁴⁷

„Der pH-Wert ist eine Zahl zur Kennzeichnung der Wasserstoffionenkonzentration einer Flüssigkeit und damit der Stärke einer Säure oder einer Base“⁴⁸, hieraus ergibt sich somit auch, dass der pH-Wert unter anderem die Ladungsverhältnisse von Faser und Farbstoffmolekülen bestimmt. Je nach saurem oder alkalischem Milieu können sich diese unterschiedlich verhalten, wodurch sich die Intensität der Wechselwirkungen zwischen beiden verändert. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Geschwindigkeit und Gleichmäßigkeit der Färbung aus. Abhängig vom jeweiligen Fasertyp und Farbstoff werden unterschiedliche pH-Bereiche benötigt. So erfolgt das Färben von Baumwolle mit Reaktivfarbstoffen typischerweise unter alkalischen Bedingungen, da diese Umgebung die chemische Bindung zwischen Farbstoff und Faser begünstigt. Polyester wird häufig im leicht sauren Bereich (pH 4-5) gefärbt, um die Stabilität der Dispersionsfarbstoffe bei hohen Temperaturen zu gewährleisten und eine gleichmäßige Farbstoffaufnahme zu fördern.⁴⁹

Proteinfasern wie Wolle sowie Polyamid werden hingegen mit Säurefarbstoffen im sauren Milieu (pH < 7) gefärbt, da die positive Ladung der Fasergruppen unter diesen Bedingungen die Anlagerung der anionischen Farbstoffmoleküle begünstigt.⁵⁰

Wird der pH-Wert nicht korrekt eingestellt, kann es zu Problemen im Färbeprozess kommen. Dazu zählen beispielsweise eine unzureichende Fixierung des Farbstoffs, ungleichmäßige Färbungen oder eine verminderte Farbechtheit. Zudem können extreme pH-Werte sowohl die Faserstruktur als auch den Farbstoff selbst schädigen.⁵¹

⁴⁷ Vgl. Behr & Hanisch (1981), S. 25

⁴⁸ Ebd.

⁴⁹ Vgl. Ebener & Schelz (1989), S. 199 ff.

⁵⁰ So auch: Ebener & Schelz (1989), S. 214 ff.

⁵¹ Vgl. zum Ganzen: Lin u.a. (2022)

In industriellen Anwendungen wird der pH-Wert daher kontinuierlich kontrolliert und mithilfe von Säuren, Laugen oder Puffersystemen gezielt eingestellt, um stabile und reproduzierbare Färbeergebnisse zu erreichen.⁵²

3.5.3 Flottenverhältnis

In der Textilfärberei spielt das sogenannte Flottenverhältnis eine wichtige Rolle für den Ablauf und das Ergebnis des Färbeprozesses. Es beschreibt das Verhältnis zwischen der eingesetzten Textilmasse und der Menge der Färbeflotte, also der Flüssigkeit, in der der Färbeprozess stattfindet.

Dieser Parameter beeinflusst maßgeblich die Verteilung der Farbstoffe im Färbebad sowie deren gleichmäßige Aufnahme durch die Fasern. Ein hohes Flottenverhältnis begünstigt aufgrund der größeren verfügbaren Flüssigkeitsmenge die Beweglichkeit der Farbstoffe und damit eine gleichmäßigere Durchdringung des Materials.⁵³

Demgegenüber wird bei einem niedrigen Flottenverhältnis mit weniger Flüssigkeit gearbeitet, was jedoch höhere Anforderungen an die Prozesskontrolle stellt, da die Gefahr ungleichmäßiger Färbungen steigt.

In der Praxis hängt das optimale Flottenverhältnis stark vom jeweiligen Fasertyp, Farbstoffsystem und der eingesetzten Färbetechnologie ab.⁵⁴

3.5.4 Ausziehgrad

Der Ausziehgrad als weiterer wichtiger Kennwert in der Färberei beschreibt, wie viel Farbstoff aus der Färbeflotte tatsächlich von der Faser aufgenommen wird. Er wird meist in Prozent angegeben und berechnet sich nach der folgenden Formel:⁵⁵

$$\text{Ausziehgrad } (t) = \frac{(\text{Gehalt (Anfang)} - \text{Gehalt } (t))}{\text{Gehalt (Anfang)}} \times 100 \%$$

⁵² Im Ergebnis ebenso: Behr & Hanisch (1981), S. 25

⁵³ Vgl. Wardman (2018), S. 178

⁵⁴ Vgl. zum Ganzen: Ebener & Schelz (1989), S. 280 f.

⁵⁵ Vgl. Peter (1985), S. 147

wobei „Gehalt“ den Farbstoffgehalt in der Färbeflotte zum jeweiligen Zeitpunkt bezeichnet. Die Formel zeigt damit das Verhältnis zwischen dem ursprünglich im Bad vorhandenen Farbstoff und dem Anteil, der am Ende im Textil gebunden ist. Ein hoher Ausziehgrad bedeutet, dass ein großer Teil des Farbstoffs aus der Lösung in die Faser übergeht. Dies ist in der Regel erwünscht, da dadurch eine intensive Färbung bei geringem Farbstoffverlust erreicht wird.⁵⁶ In einzelnen Anwendungen, etwa bei der Indigofärbung von Denim, kann jedoch auch ein niedrigerer Ausziehgrad gezielt angestrebt werden (vgl. Kapitel 4.1.3).

Der Ausziehgrad wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören unter anderem der Fasertyp, die Art des Farbstoffs, die Temperatur, der pH-Wert sowie die Färbedauer. Auch die Bewegung der Färbeflotte spielt eine Rolle, da sie den Transport des Farbstoffs zur Faseroberfläche unterstützt.

Ist der Ausziehgrad zu gering, bleibt ein großer Teil des Farbstoffs ungenutzt in der Flotte zurück, was die Intensität und Gleichmäßigkeit der Färbung beeinträchtigt. Ein zu schneller Farbstoffaustritt kann jedoch ebenfalls problematisch sein, da er zu ungleichmäßigen oder fleckigen Färbungen führen kann.

In der industriellen Praxis wird der Ausziehgrad daher durch Anpassung von Temperatur, pH-Wert und Färbedauer gesteuert, um eine gleichmäßige Farbstoffaufnahme bei hoher Prozesssicherheit zu gewährleisten.⁵⁷

Zusammenfassend ist der Ausziehgrad somit ein zentraler Prozessparameter der Färberei, der angibt, wie effizient der Farbstoff von der Faser aufgenommen wird und damit die Qualität sowie die Gleichmäßigkeit des Färbeergebnisses wesentlich mitbestimmt.

⁵⁶ Vgl. Peter (1985), S. 147

⁵⁷ Ebd.

4 Konventionelle Färbe- und Druckverfahren als Referenzsystem

Die industrielle Farbgebung von Textilien erfolgt durch eine Vielzahl etablierter Färbe- und Druckverfahren. Für die vorliegende Arbeit wurden vier Verfahren als konventionelle Referenzsysteme ausgewählt, die zusammen unterschiedliche industrielle Prozesslogiken abdecken und somit repräsentative Betrachtungen zulassen.

Ergänzend werden Wasch- und Nachbehandlungsprozesse gesondert betrachtet, da diese bei allen vier Verfahren prozessnotwendig sind und einen eigenständigen Anteil am Gesamtressourcenverbrauch ausmachen.

Die Darstellung dieser Verfahren dient als Referenzsystem für die vergleichende Analyse alternativer Technologien in den folgenden Kapiteln.

4.1 Überblick über relevante Verfahren

Als Referenz für konventionelle Ausziehfärbeverfahren werden die Jigger- und Jet-Färbung betrachtet. Ergänzend werden mit dem Thermosol- und dem Pad-Stream-Verfahren zwei kontinuierliche Färbeverfahren einbezogen, die sich durch eine vom Ausziehprinzip grundlegend abweichende Prozessführung auszeichnen und damit einen Vergleich zwischen diskontinuierlicher und kontinuierlicher Färbung innerhalb der konventionellen Verfahren ermöglichen.

Die Denim-Färbung mit Indigo und Schwefelfarbstoffen wird als Beispiel für ein Spezialfärbeverfahren mit mehrstufigem Prozessablauf und globaler wirtschaftlicher Bedeutung aufgenommen.

Das Siebdruckverfahren ergänzt die Auswahl als Druckverfahren mit einer gegenüber Färbeprozessen grundlegend anderen Prozesslogik, der lokalen statt flächigen Farbmittelapplikation. Dies ermöglicht einen prozesslogischen Vergleich innerhalb der konventionellen Verfahren selbst.

4.1.1 Jigger- und Jet-Färbung

Die Jigger- und die Jet-Färbung zählen zu den wichtigsten diskontinuierlichen Färbeverfahren in der Textilindustrie und unterscheiden sich voneinander insbesondere hinsichtlich ihrer Prozessführung, des Flottenverhältnisses sowie der mechanischen Beanspruchung des Materials. Beide Verfahren werden in der

industriellen Praxis eingesetzt und stellen daher zentrale Referenzpunkte für die Bewertung alternativer Färbetechnologien dar.⁵⁸

Die Jigger-Färbung ist ein klassisches Verfahren zur Färbung von Geweben, bei dem das Textilmaterial in offener Warenbahn durch eine Färbeflotte geführt wird. Das Material wird dabei abwechselnd von einer Walze auf eine andere aufgewickelt und mehrfach durch das Färbebad transportiert, eine ruckartige Hin- und Herbewegung, die dem Verfahren seinen Namen gibt (engl. „to jig“). Die Färbung erfolgt somit diskontinuierlich und basiert auf wiederholten Kontaktzyklen zwischen Textil und Flotte, was im Vergleich zu kontinuierlichen Färbeverfahren zu vergleichsweise langen Prozesszeiten führt. Charakteristisch für die Jigger-Färbung ist ein niedriges Flottenverhältnis, wodurch der Wasserverbrauch reduziert sein kann. Gleichzeitig erfordert das Verfahren eine gleichmäßige Spannung des Materials, um eine homogene Färbung zu gewährleisten. Bei empfindlichen oder dehnbaren Materialien kann dies zu Kantenmarkierungen oder ungleichmäßiger Farbaufnahme führen, weshalb sich das Verfahren in der Praxis überwiegend auf gewebte Stoffe konzentriert.⁵⁹

Der schematische Aufbau einer Jigger-Färbemaschine mit der wechselseitigen Warenbahnführung über zwei Walzen ist in Abbildung 4 dargestellt.

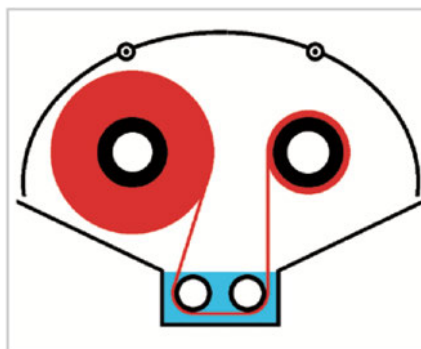


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Jigger-Färbemaschine⁶⁰

⁵⁸ Vgl. Wardman (2018), 176 ff.

⁵⁹ Im Ergebnis ebenso: Wardman (2018), 188 ff.

⁶⁰ Vgl. *Glossar Textilveredlung* (o. J.)

Im Gegensatz dazu erfolgt die Jet-Färbung in geschlossenen Systemen, in denen das Textilmaterial als Schlingenstrang durch die Maschine zirkuliert. Die Bewegung des Materials erfolgt dabei nicht mechanisch, sondern mittels eines unter Druck stehenden Flüssigkeitsstroms, der durch ein Venturirohr geführt wird und dem Verfahren seinen Namen gibt (engl. „jet“ = Strahl, Düse). Aufgrund der Querschnittsverengung im Venturirohr kommt es zu einer lokalen Druckabsenkung, die eine Sogwirkung erzeugt. Dadurch wird das Gewebe durch das System bewegt, wodurch ein intensiver Kontakt zwischen Faser und Farbstoff gewährleistet wird. Jet-Färbeverfahren arbeiten mit Flottenverhältnissen von etwa 10:1 und ermöglichen eine gleichmäßige Durchfärbung bei reduzierten mechanischen Spannungen im Material, da das Gewebe nicht durch physischen Zug, sondern durch den Flüssigkeitssog transportiert wird.⁶¹

Das Verfahren arbeitet mit Druck, wodurch Färbetemperaturen bis zu 140 °C möglich sind, ohne dass das Färbebad in die gasförmige Phase übergeht. Dadurch eignet sich das Verfahren insbesondere für Fasern wie Polyester.⁶²

Der schematische Aufbau einer Jet-Färbemaschine, einschließlich des Venturirohrs zur Erzeugung der Sogwirkung, ist in Abbildung 5 dargestellt.

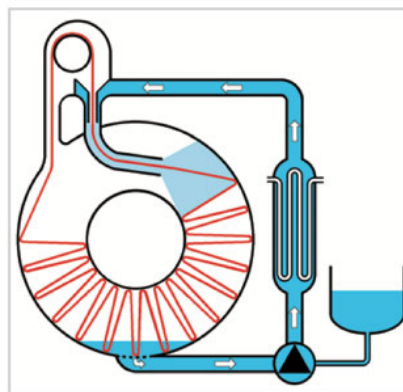


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Jet-Färbemaschine⁶³

Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt somit in der Art der Warenführung sowie im Verhältnis von Textilmaterial zu Färbeflotte.

⁶¹ Vgl. zum Ganzen: Wardman (2018), S. 192 f.

⁶² Ebd.

⁶³ Vgl. *Glossar Textilveredlung* (o. J.)

Während die Jigger-Färbung eher materialspannungsbasiert arbeitet und mit geringeren Flüssigkeitsmengen auskommt, basiert die Jet-Färbung auf einer strömungsmechanischen Bewegung des Materials in einer größeren Flottenmenge. Die Unterschiede in der Waren- und Flottenführung wirken sich dabei nicht nur auf die Prozessführung selbst, sondern auch auf nachfolgende Fixier- und Nachbehandlungsschritte aus.

4.1.2 Kontinuierliche Färbeverfahren: Thermosol- und Pad-Steam-Verfahren

Das in Abschnitt 3.4 beschriebene Prinzip kontinuierlicher Färbeverfahren wird nachfolgend anhand des Thermosol-Verfahrens für Polyester und des Pad-Steam-Verfahrens für Baumwolle näher erläutert. Beide Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass das Textilmaterial ohne längere Verweilzeiten in Färbebädern kontinuierlich durch die einzelnen Prozessstufen geführt wird.⁶⁴

Beide Verfahren beruhen auf dem in Abschnitt 3.4 bereits angesprochenen Prinzip des Klotzens (Foulardierens). Dabei wird das Textilmaterial zunächst durch eine Färbeflotte geführt und anschließend zwischen zwei Walzen eines Foulards auf eine definierte Flottenaufnahme abgequetscht. Die Färbeflotte enthält die für den Färbeprozess erforderlichen Farbstoffe und Hilfsmittel, deren Konzentration durch ein Dosiersystem konstant gehalten wird. Durch das Abquetschen wird eine gleichmäßige Flottenverteilung auf dem Textilmaterial erreicht und damit die Voraussetzung für eine homogene Färbung geschaffen.⁶⁵

Während bei diskontinuierlichen Verfahren die Farbstoffaufnahme über das in Abschnitt 3.5 beschriebene Flottenverhältnis sowie den Ausziehgrad gesteuert wird, tritt bei kontinuierlichen Verfahren die Flottenaufnahme als funktional entsprechender Kennwert an deren Stelle: Sie bezeichnet den Quotienten aus der Gewichtszunahme des Textilmaterials nach dem Foulardieren und dessen Trockengewicht und lässt sich durch den Anpressdruck der elastischen Walzen des Foulards gezielt regulieren.⁶⁶

⁶⁴ Vgl. Peter (1985), S. 149

⁶⁵ Vgl. Ebener & Schelz (1989), S. 282

⁶⁶ Ebd.

Beim Thermosol-Verfahren durchläuft das geklotzte Gewebe im Anschluss einen kurzen Luftgang und einen Infrarot-Trockner, in dem der Farbstoff vorgetrocknet wird. Die eigentliche Fixierung erfolgt anschließend durch das Thermosolieren: Der vorgetrocknete Farbstoff wird mittels Heißluft bei Temperaturen zwischen 200 und 225 °C für eine Kontaktzeit von etwa 15 bis 60 Sekunden fixiert. Bei dieser Temperatur sublimiert der Dispersionsfarbstoff und diffundiert in die sich öffnende Polymerstruktur der Polyesterfaser, wo er nach dem Abkühlen irreversibel fixiert wird. Danach wird die gefärbte Ware gewaschen und geseift, um restliche Chemikalien sowie nicht fixierte Farbstoffanteile zu entfernen, bevor sie abschließend getrocknet wird.⁶⁷

Das Pad-Steam-Verfahren setzt demgegenüber auf Sattdampf als Fixiermedium. Das mit Reaktivfarbstoff, Salz und Alkali geklotzte Baumwollgewebe wird direkt im Anschluss, ohne vorherige Trocknung, in eine Dampfkammer geführt, in der die Fixierung bei etwa 102 °C innerhalb von 30 bis 60 Sekunden erfolgt. Der typische Anlagenaufbau – bestehend aus Foulard, Hotflue, einem zweiten Foulard, Dämpfer und Waschabteilen – ist in Abbildung 6 dargestellt. Das Verfahren ist besonders für cellulosische Fasern wie Baumwolle und Viskose geeignet und ermöglicht schonendere Prozessbedingungen gegenüber der Trockenhitze-fixierung.⁶⁸

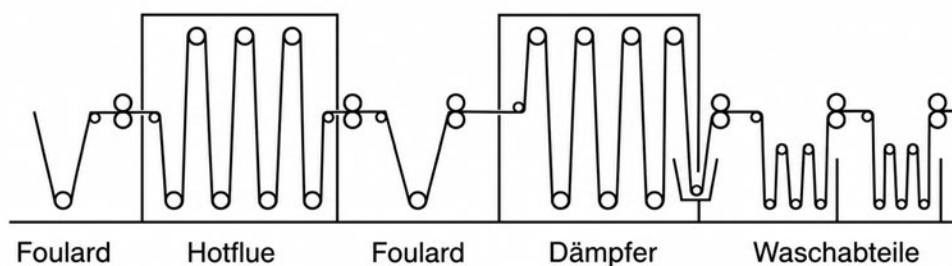


Abbildung 6: Schema einer Pad-Steam-Anlage⁶⁹

⁶⁷ Vgl. Ebener & Schelz (1989), S. 320 f.

⁶⁸ So auch: Rouette (2006), S. 271 ff.

⁶⁹ Rouette (2006), S. 273, Abb. 8.509

4.1.3 Denim-Färbung

Die Denim-Färbung ist ein Beispiel für ein textiles Spezialfärbeverfahren und ist eng mit der Verarbeitung von Baumwollgeweben verbunden. Im Gegensatz zu konventionellen Flächenfärbeverfahren wird beim Denim ausschließlich das Kettgarn vor der Webverarbeitung gefärbt. Dieses als Kettfärbung bezeichnete Verfahren beeinflusst sowohl die optischen Eigenschaften des Endprodukts als auch die ressourcenbezogenen Parameter des Prozesses.⁷⁰

Der traditionell eingesetzte Farbstoff ist Indigo, ein organischer Farbstoff, der in seiner Grundform wasserunlöslich ist. Die Denimbranche verarbeitet weltweit rund 50.000 Tonnen synthetisches Indigo pro Jahr.⁷¹

Während natürliches Indigo durch Extraktion aus Färberpflanzen, vor allem *Indigofera tinctoria*, gewonnen wird, ist das heute industriell eingesetzte synthetische Indigo ein petrochemisch hergestelltes Produkt. Chemisch sind beide Formen identisch (Indigotin, $C_{16}H_{10}N_2O_2$). Der Unterschied liegt im Herstellungsweg. Die industrielle Synthese wurde Ende des 19. Jahrhunderts entwickelt und verdrängte das pflanzliche Produkt aufgrund seiner Mengenskalierbarkeit, Qualitätskonstanz und Kosteneffizienz nahezu vollständig vom Markt.⁷²

Aufgrund seiner Wasserunlöslichkeit muss Indigo zunächst mithilfe von Alkali und einem Reduktionsmittel in eine lösliche Form überführt werden, bevor es auf die Kettfäden aufgetragen werden kann. Als Reduktionsmittel wird überwiegend Natriumdithionit ($Na_2S_2O_4$) eingesetzt. Es überträgt Elektronen auf Indigo, wodurch dessen Kohlenstoff-Sauerstoff-Doppelbindungen ($C=O$) zu negativ geladenen Kohlenstoff-Sauerstoff-Einfachbindungen ($C-O$) werden. Sauerstoff wird dabei nicht entfernt, die Ladung macht Indigo aber wasserlöslich. Diese Leukoform ist im alkalischen Milieu stabil, daher erfolgt die Reduktion mit Natronlauge. Nach dem Eindringen in die Faser wird Leuko-Indigo an der Luft reoxidiert und dadurch fixiert. Jährlich werden für diesen Prozessschritt etwa 84.500 Tonnen Natriumdithionit verbraucht.⁷³

Nach dem Auftrag auf die Faser erfolgt die Rückoxidation durch Luftsauerstoff, wodurch der Farbstoff in seiner unlöslichen Form in der Faser fixiert wird. Zur

⁷⁰ Vgl. Periyasamy & Periyasami (2023)

⁷¹ Vgl. Hsu u. a. (2018), zit. n. Periyasamy & Periyasami (2023)

⁷² Vgl. zum Ganzen: Periyasamy & Periyasami (2023)

⁷³ Vgl. Paulina (2018), zit. n. Periyasamy & Periyasami (2023)

Erzielung der gewünschten Farbtiefe wird dieser Eintauch- und Oxidationsvorgang mehrfach wiederholt.⁷⁴

Ein charakteristisches Merkmal der Indigofärbung ist die unvollständige Durchdringung der Faser. Da Indigo sich überwiegend in den äußeren Faserschichten anlagert, während der Faserkern weitgehend ungefärbt bleibt, entsteht eine oberflächennahe Färbung der Baumwollfaser. Diese führt zu einem ungleichmäßigen Farabbau bei mechanischer Beanspruchung oder gezielten Waschbehandlungen und beeinflusst das optische Erscheinungsbild von Denim.⁷⁵

Für Farbtöne im Bereich Schwarz und Dunkelbraun werden ergänzend Schwefelfarbstoffe eingesetzt. Diese werden durch Reduktion mit Natriumsulfit in ihre lösliche Form überführt und nach der Applikation durch Oxidation fixiert. Die Kombination beider Farbstoffsysteme erfordert mehrere aufeinanderfolgende Färbe-, Oxidations- und Trocknungsschritte.⁷⁶

Das im Färbeprozess eingesetzte synthetische Indigo sowie weitere Prozesschemikalien gelangen als schwer biologisch abbaubare Substanzen in das Abwasser. Dieses kann toxische und teilweise kanzerogene Verbindungen enthalten und erfordert daher eine mehrstufige Abwasserbehandlung. Darüber hinaus führen die zwischen den einzelnen Tauchvorgängen erforderlichen Zwischentrocknungsschritte zu einem erhöhten Energieverbrauch.⁷⁷ Die Prozesskette ist dabei auf kontinuierliche Großserien ausgelegt, was die Flexibilität bei wechselnden Artikeln oder kleineren Produktionsmengen begrenzt.⁷⁸

Aus prozessbezogener Sicht ist die Denim-Produktion damit über mehrere Prozessschritte hinweg mit dem Einsatz von Wasser, Energie und Chemikalien verbunden. Einen Überblick über die einzelnen Prozessschritte der Denim-Herstellung sowie die dabei jeweils entstehenden potenziellen Schadstofffrachten gibt Abbildung 7. Besonders die Schritte Färben (Dyeing), Entschlichten (Desizing) und Bleichen (Bleaching) tragen dabei wesentlich zur Belastung des Abwassers bei.

⁷⁴ So auch: Peter (1985), S. 197

⁷⁵ So auch: Periyasamy & Periyasami (2023)

⁷⁶ Im Ergebnis ebenso: Periyasamy & Periyasami (2023)

⁷⁷ Ebd.

⁷⁸ Vgl. Castillo-Suárez u. a. (2023)

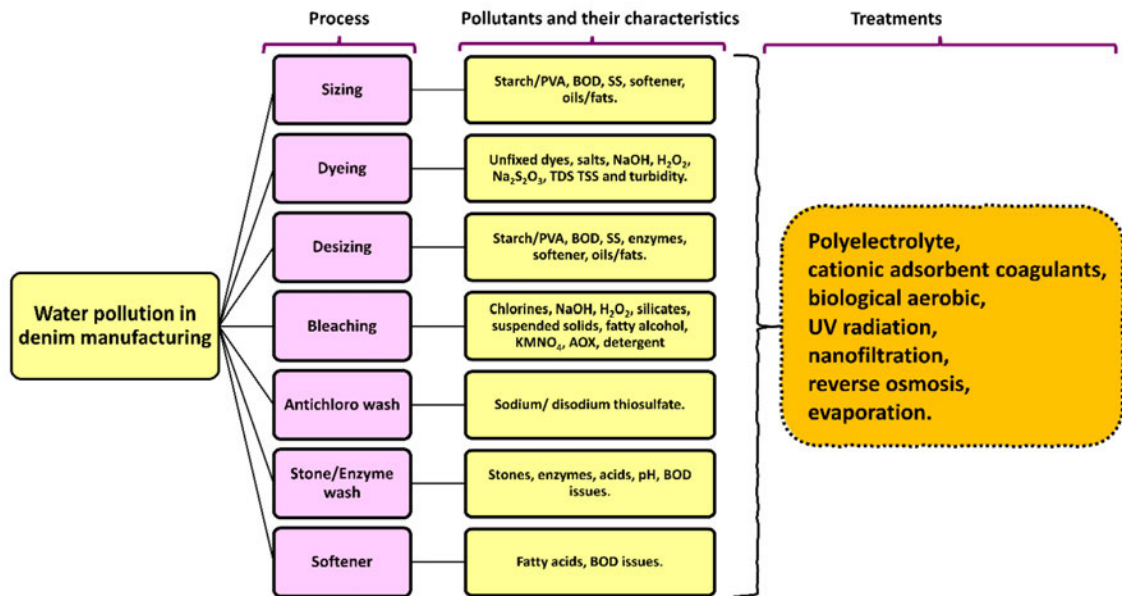


Abbildung 7: Wasserverschmutzung während der Denim Verarbeitung⁷⁹

Abkürzungen: PVA = Polyvinylalkohol; BOD = biochemischer Sauerstoffbedarf; SS = suspendierte Feststoffe; TDS = gesamte gelöste Feststoffe; TSS = gesamte suspendierte Feststoffe; AOX = adsorbierbare organisch gebundene Halogene

4.1.4 Siebdruckverfahren als Alternative zu Färbeprozessen

Der Rotationssiebdruck, im Englischen als Rotary Screen Printing (RSP) bezeichnet, gilt als das in der industriellen Textilproduktion am weitesten verbreitete Druckverfahren und stellt innerhalb der textilen Farbgebung eine alternative Herangehensweise zu klassischen Färbeverfahren dar.⁸⁰

Während bei Färbeprozessen der Farbstoff in die Faser eindringt und eine chemische oder physikalische Bindung eingeht, erfolgt beim Siebdruck lediglich ein Auftrag von Farbe auf die Oberfläche des Textils. Diese Unterscheidung betrifft die Art des Farbauftrags einerseits sowie die Wechselwirkung zwischen Farbmittel und Textiloberfläche andererseits. Grundlage dieser Unterscheidung ist die Differenzierung zwischen Farbstoffen und Pigmenten. Farbstoffe besitzen eine intrinsische Affinität zur Textilfaser und werden durch chemische Wechselwirkungen in der Faser fixiert. Pigmente hingegen sind wasserunlösliche Farbmittel ohne Faseraffinität, die mittels eines Bindemittels auf der Faseroberfläche verankert werden.⁸¹

⁷⁹ Periyasamy & Periyasami (2023), Abbildung 3

⁸⁰ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

⁸¹ Vgl. Wardman (2018), S. 107

Das Siebdruckverfahren kann mit verschiedenen Farbmittelsystemen kombiniert werden. Grundsätzlich ist zwischen pigment- und farbstoffbasierten Druckpasten zu unterscheiden. Pigmentdruckpasten enthalten keine Farbstoffe im chemischen Sinne, sondern unlösliche Farbpartikel, die mittels eines Bindemittels auf der Faseroberfläche fixiert werden, ohne chemische Bindung zur Faser einzugehen. Sie sind daher auf allen Fasertypen einsetzbar, weisen jedoch Unterschiede hinsichtlich Griff und Farbtiefe auf. Bei Pigmentdruckpasten entfällt der Schritt der Nachwäsche in der Regel nach der thermischen Fixierung.⁸²

Farbstoffbasierte Druckpasten hingegen, darunter Reaktiv-, Dispersions- und Säuredruckpasten, enthalten Farbstoffe, die in die Faser eindringen. Sie erfordern faser- und farbstoffspezifische Prozessbedingungen wie Dämpfen, Hochtemperaturfixierung oder alkalische Behandlung sowie eine anschließende Nachwäsche.⁸³ Bei Reaktiv- und Dispersionsdruckpasten ist eine Nachwäsche prozessnotwendig, um Verdicker- und Farbstoffreste zu entfernen.⁸⁴

Dabei wird die jeweilige Druckpaste durch zylindrische, gravierte Schablonen mittels eines Rakels auf die Textilbahn aufgetragen.⁸⁵ Die Schablone definiert dabei das gewünschte Druckmotiv und begrenzt den Farbauftrag auf die vorgesehenen Bereiche der Oberfläche. Nach dem Druckvorgang durchläuft das Textil eine Trocknungsphase, in der die aufgetragene Druckpaste zunächst getrocknet und anschließend durch Hitzebehandlung fixiert wird. Die thermische Fixierung bewirkt eine dauerhafte Vernetzung des Bindemittels mit der Faseroberfläche, wodurch die erforderlichen Echtheitseigenschaften erzielt werden.⁸⁶

Im Prozess konzentriert sich der Wasserverbrauch beim Rotationssiebdruck insbesondere auf die Reinigung der Druckzylinder und Druckaggregate sowie auf Nachwaschprozesse und nicht auf eine Färbeflotte, da Farbmittel ausschließlich lokal aufgetragen werden.⁸⁷

Das Verfahren ermöglicht eine hohe Designflexibilität. Durch den Einsatz unterschiedlicher Schablonen lassen sich komplexe Muster, Mehrfarbdrucke und

⁸² Vgl. zum Ganzen: Rath (1972), S. 668 ff.

⁸³ Vgl. Wardman (2018), S. 216 f.

⁸⁴ Vgl. zum Ganzen: Rath (1972), aaO.

⁸⁵ Vgl. Wardman (2018), S. 213 f.

⁸⁶ So auch: Wardman (2018), S. 212

⁸⁷ Vgl. Wardman (2018), S. 217

präzise Motivwiederholungen realisieren, die mit Färbeverfahren nicht oder nur mit zusätzlichem Aufwand erzielbar wären.⁸⁸

Das Verfahren ist sowohl für die industrielle Serienproduktion als auch für kleinere Auflagen geeignet, wobei der Schablonenwechsel bei Motivänderungen einen zusätzlichen Prozessaufwand darstellt.

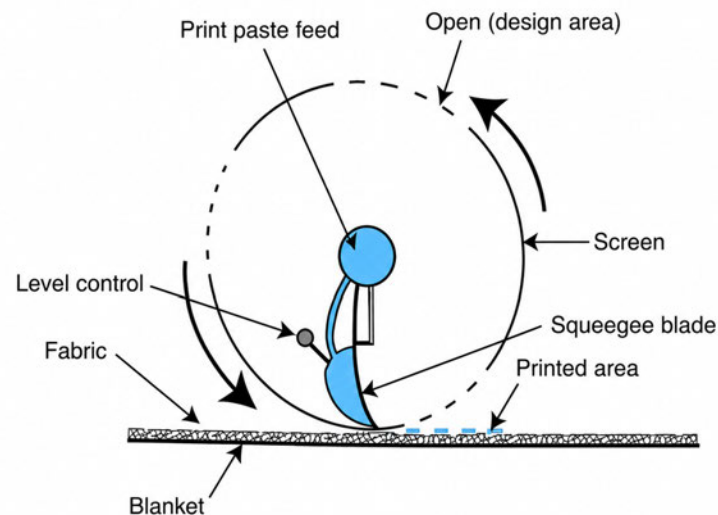


Abbildung 8: Querschnitt einer Rotationsdruckschablone mit Rakel und Druckpastenauftrag⁸⁹

4.2 Ressourcenverbrauch konventioneller Verfahren

Die Bewertung der Nachhaltigkeit konventioneller Textilveredelungsverfahren erfordert eine differenzierte Betrachtung ihrer jeweiligen Ressourcen- und Umweltprofile. Obwohl alle Verfahren auf den Einsatz von Wasser, Energie und Chemikalien angewiesen sind, unterscheiden sie sich deutlich hinsichtlich der Verbrauchsmengen, der Prozesseffizienz sowie der Art und Intensität der verursachten Umweltbelastungen. Besonders relevant sind dabei der Wasser- und Chemikalienbedarf, das Abwasseraufkommen sowie der Energieeinsatz. Die folgenden Abschnitte analysieren diese Aspekte für die Jigger- und Jet-Färbung, die Denim-Färbung und das Siebdruckverfahren und zeigen die zentralen Belastungsschwerpunkte der jeweiligen Verfahren auf.

⁸⁸ Vgl. Wardman (2018), S. 217

⁸⁹ Vgl. Wardman (2018), S. 223, Abbildung 5.9

4.2.1 Wasserverbrauch

Wasser stellt den mengenmäßig bedeutendsten Ressourcenfaktor der betrachteten Verfahren dar. Für den Färbeschritt selbst wird ein spezifischer Wasserverbrauch von 110-150 L/kg Faser angegeben, wobei Gewebe aus Webware (130-150 L/kg) tendenziell am oberen und Maschenware (110-130 L/kg) am unteren Ende dieser Spanne liegen.⁹⁰ Insbesondere diskontinuierliche Ausziehverfahren wie die Jigger- und Jet-Färbung sind hierbei als zentraler Belastungsschwerpunkt innerhalb der textilen Prozesskette zu betrachten, da sie im Vergleich zu kontinuierlichen Verfahren deutlich höhere Flottenverhältnisse aufweisen.⁹¹

Der hohe Verbrauch ist auf die begrenzte Fixierrate konventioneller Farbstoffsysteme zurückzuführen. Zwischen 10 und 50 % des eingesetzten Farbstoffs gelangen als nicht fixierter Farbstoff ins Abwasser und müssen durch mehrere Spülbäder vollständig ausgewaschen werden.⁹²

Der Umfang der Nachbehandlung variiert dabei farbstoffklassenabhängig. Die Reaktivfärbung erfordert aufgrund des hohen Salzeintrags und der begrenzten Fixierrate einen besonders umfangreichen Nachwäscheprozess.⁹³ Säure- und Direktfarbstoffe weisen demgegenüber einen geringeren Nachbehandlungsaufwand auf.⁹⁴

Die nachfolgende Tabelle verdeutlicht die farbstoffklassenspezifischen Unterschiede im Anteil nicht fixierter Farbstoffe, die als systematische Prozessverluste in das Abwasser übergehen:

Tabelle 1: Nicht fixierter Farbstoffanteil (in %) ausgewählter Farbstoffklassen; Daten aus Lit.⁹⁵

Farbstoffklassen	Nicht fixierter Farbstoffanteil [%]
Entwicklungsfarbstoffe (Azoic Dyes)	5-10
Reaktivfarbstoffe	20-50
Direktfarbstoffe	5-20
Pigmente	1
Küpenfarbstoffe	5-20
Schwefelfarbstoffe	30-40

⁹⁰ Vgl. Mikucioniene u. a. (2024)

⁹¹ Vgl. zum Ganzen: De Oliveira u. a. (2024) (Tabelle 1)

⁹² Vgl. Chequer u. a. (2013), S. 160

⁹³ Vgl. Broadbent (2001), S. 340 f.

⁹⁴ Im Ergebnis ebenso: Broadbent (2001), S. 287

⁹⁵ Saxena & Raja (2017), zit. n. Kabir u. a. (2019) (Tabelle 2)

Beim Thermosol- und Pad-Steam-Verfahren entfällt das für Ausziehverfahren typische Vollbad strukturell, da das Gewebe lediglich geklotzt wird. Bei einem Flottenverhältnis von 1:1 ergibt sich für den Klotzprozess selbst ein Wasserbedarf von näherungsweise 1 L/kg Ware, was deutlich unter dem Niveau der Ausziehverfahren liegt.⁹⁶ Der Wasserverbrauch beider Verfahren beschränkt sich damit auf die Nachbehandlung. Beim Pad-Steam-Verfahren fällt diese aufgrund der begrenzten Fixierrate von Reaktivfarbstoffen umfangreicher aus als beim Thermosol-Verfahren (vgl. obenstehende Tabelle 1).

Im Unterschied dazu entfallen bei der Denim-Färbung die ausgedehnten Spülbäder nach der Fixierung weitgehend, da Indigo nicht durch kovalente Bindung, sondern durch mechanischen Einschluss in der Faser fixiert wird. Der prozessbedingte Abwasseranfall liegt zwischen 40 und 65 L/kg produziertem Denim.⁹⁷ Der auf den Färbeschritt bezogene Wasserverbrauch beläuft sich auf 3-5 L/kg Ware.⁹⁸ Im Vergleich zu den wasserintensiven Ausziehverfahren fällt der Wasserverbrauch des eigentlichen Färbeprozesses damit deutlich geringer aus.

Beim Siebdruckverfahren entfällt das für Ausziehfärbeverfahren typische Flottenvolumen, denn der Wasserverbrauch beschränkt sich auf Schablonenreinigung und Nachwaschprozesse, was sich in deutlich geringeren Verbrauchswerten niederschlägt.⁹⁹

Neben alternativen Applikationsverfahren wie dem Siebdruck existieren auch Ansätze zur Optimierung des Ausziehprozesses selbst. Aufgrund des hohen Wasserbedarfs konventioneller Ausziehfärbeverfahren wurden verschiedene Maßnahmen zur Verbrauchsreduktion entwickelt. Eine zentrale Rolle spielen hierbei sogenannte Low-Liquor-Verfahren, die das Verhältnis von Färbeflotte zu Textilmaterial reduzieren.¹⁰⁰

Eine Studie untersuchte hierzu drei Farbtöne – hell, mittel und dunkel – hinsichtlich Energieverbrauch und Farbabweichung bei unterschiedlichen

⁹⁶ Vgl. De Oliveira u. a. (2024)

⁹⁷ Vgl. Manu & Chaudhari (2002), zit. n. Periyasamy & Periyasami (2023)

⁹⁸ So auch: Bechthold & Pham (2023), S. 282 f.

⁹⁹ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

¹⁰⁰ Vgl. Abeer u. a. (2026)

Flottenverhältnissen. Es wurde belegt, dass eine Reduktion des Flottenverhältnisses von 1:10 auf 1:3 den Wärmebedarf bei hellen Farbtönen um 34-38 % senkt.¹⁰¹

Die optimale Einstellung des Flottenverhältnisses ist dabei farbtonabhängig. Sehr niedrige Flottenverhältnisse wie 1:3 führen zu erhöhten Farbabweichungen, wie die nachfolgende Abbildung 9 für den hellen Farbton exemplarisch zeigt. Da helle Farbtöne besonders sensibel auf Flottenschwankungen reagieren und die stärksten Abweichungen aufweisen, wird der helle Farbton als kritischster Fall dargestellt. Der ΔE -Wert beschreibt die messbare Farbabweichung gegenüber einem definierten Farbstandard. Werte unter 1 gelten als für das menschliche Auge praktisch nicht wahrnehmbar.¹⁰²

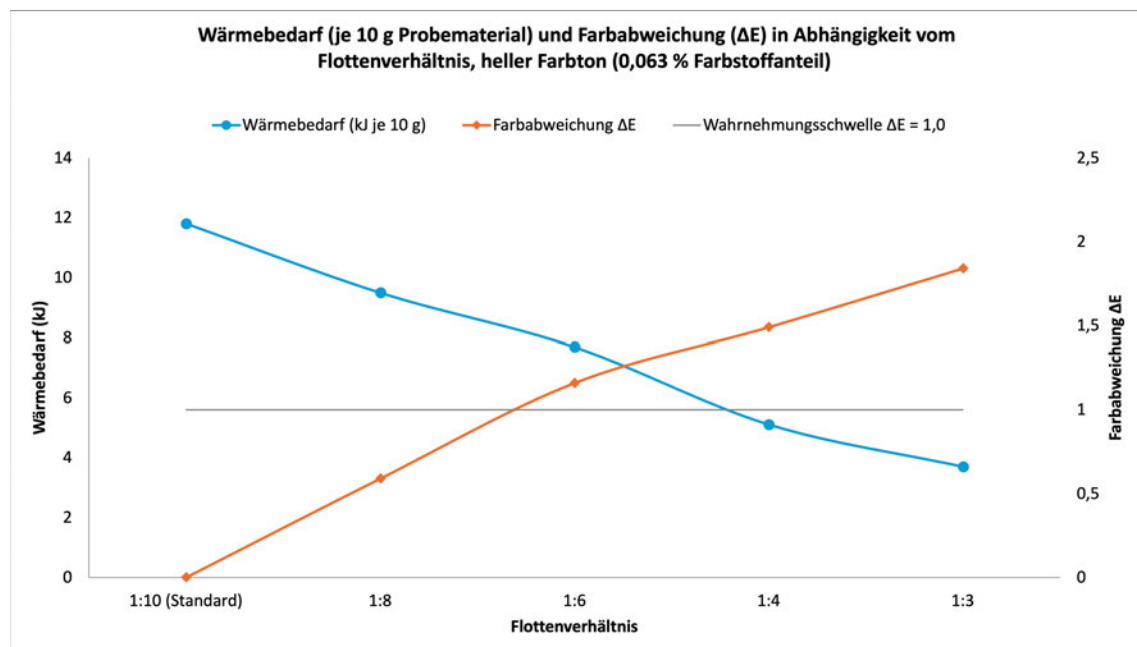


Abbildung 9: Wärmebedarf und Farbabweichung (ΔE) in Abhängigkeit vom Flottenverhältnis, heller Farbton¹⁰³

Die Werte verdeutlichen, dass eine Absenkung des Flottenverhältnisses zwar zu einer Reduzierung des Energiebedarfs führt, sich ab einem Flottenverhältnis von 1:6 jedoch negativ auf die Farbqualität auswirkt. Für die Praxis ergibt sich daraus

¹⁰¹ Vgl. zum Ganzen: Abeer u. a. (2026)

¹⁰² Ebd.

¹⁰³ Abeer u. a. (2026); Angaben je 10 g Probematerial bei 0,063 % Farbstoffanteil; Darstellung der Absolutwerte in Anhang A1

kein universell optimales Flottenverhältnis, sondern ein farbtonabhängiger Zielkorridor, der beide Parameter berücksichtigen muss.

4.2.2 Energiebedarf

Der Energiebedarf der Jigger- und Jet-Färbung resultiert vor allem aus den thermischen Anforderungen von Spülen, Trocknen und Fixieren.

Für nasse Veredelungsprozesse wird ein Energiebedarf von 8 bis 18 MJ/kg Faser angegeben, wobei ein wesentlicher Anteil auf das Aufheizen der Behandlungsbäder entfällt.¹⁰⁴

Beim Thermosol-Verfahren erfolgt die Fixierung durch trockene Hitzebehandlung bei Temperaturen von 180 bis 220 °C.¹⁰⁵ Beim Pad-Steam-Verfahren wird die für die Fixierung erforderliche Wärme hingegen über Sattdampf eingebracht.¹⁰⁶ Beide Verfahren unterscheiden sich damit primär im Medium der Wärmeübertragung, nicht jedoch im grundsätzlichen Prinzip der kontinuierlichen Fixierung. Für kontinuierliche Verfahren wird ein Energiebedarf von 7,0 bis 20,0 MJ/kg angegeben. Die zugrunde liegende Quelle differenziert dabei nicht zwischen Thermosol- und Pad-Steam-Verfahren, sodass der Wert für beide näherungsweise gilt. Trotz des Wegfalls des Vollbads liegt dieser in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den diskontinuierlichen Ausziehverfahren, da der thermische Fixierschritt den energetischen Vorteil der reduzierten Flottenmenge weitgehend kompensiert.¹⁰⁷

Bei der Denim-Kettfärbung erhöht sich der Energiebedarf gegenüber einfachen Nassveredelungsverfahren durch die verfahrensbedingt notwendigen Zwischentrocknungsschritte zwischen den einzelnen Tauchdurchgängen.¹⁰⁸

Im Siebdruckverfahren konzentriert sich der Energiebedarf auf den Trocknungs- und Fixierprozess nach dem Druckvorgang, da Färbebäder verfahrensbedingt

¹⁰⁴ Vgl. Gong et al. (2021), zit. n. De Oliveira u. a. (2024)

¹⁰⁵ Vgl. Burkinshaw (2024)

¹⁰⁶ So auch: Shu u. a. (2019)

¹⁰⁷ Umfassend hierzu: Hasanbeigi & Price (2012)

¹⁰⁸ Vgl. Bechthold & Pham (2023), S. 279 ff.

entfallen.¹⁰⁹ Für das Rotationssiebdruckverfahren wird ein Energiebedarf von 2,5 bis 8,5 MJ/kg angegeben.¹¹⁰

Der Energiebedarf der betrachteten Verfahren wird damit maßgeblich durch Flottenmenge, Prozesstemperatur und Trocknungsschritte bestimmt – Stellgrößen, die je nach Verfahren und Farbton unterschiedlich stark ins Gewicht fallen.

4.2.3 Chemikalieneinsatz

Der Chemikalieneinsatz ist bei der Jigger- und Jet-Färbung mit Reaktivfarbstoffen besonders erheblich. Im konventionellen Reaktivfärbeprozess werden je nach Farbtiefe, Farbstoffstruktur und Flottenverhältnis bis zu 100 g/L Salz eingesetzt, das nicht verbraucht, sondern vollständig in das Abwasser eingetragen wird.¹¹¹

Ursache des hohen Chemikalienbedarfs ist die geringere Fixierrate der Farbstoffe, die den Einsatz zusätzlicher Elektrolyte und umfangreiche Nachbehandlungen erforderlich macht.

Beim Thermosol-Verfahren entfällt der Salzeintrag strukturell, da Dispersionsfarbstoffe ohne Elektrolytzusatz appliziert werden (vgl. Abschnitt 4.1.2). Beim Pad-Steam-Verfahren hingegen ist (analog zur Jigger- und Jet-Färbung) ein erheblicher Salzeintrag ins Abwasser verfahrensbedingt, da Reaktivfarbstoffe den Einsatz von Elektrolyten erfordern (vgl. Abschnitt 4.1.1, Jigger- und Jet-Färbung). Da die Salzmenge in erster Linie eine Funktion des eingesetzten Farbstoffsystems und nicht der Applikationstechnik ist, ist auch beim Pad-Steam-Verfahren von einer vergleichbaren Größenordnung von bis zu 100 g/L auszugehen wie bei der Ausziehfärbung mit Reaktivfarbstoffen.¹¹²

Bei der Denim-Kettfärbung wird der Chemikalienbedarf hingegen maßgeblich durch Natriumdithionit und Natronlauge als Reduktions- beziehungsweise Alkalisierungsmittel bestimmt. Das Färbebad wird kontinuierlich aus einer konzentrierten Vorratslösung nachgespeist, die typischerweise 65 g/L Natriumdithionit und

¹⁰⁹ So auch: Broadbent (2001), S. 493 f.

¹¹⁰ Vgl. Hasanbeigi & Price (2012)

¹¹¹ Vgl. Gabris u. a. (2025)

¹¹² Ebd.

70 mL/L Natronlauge enthält. Für eine kommerzielle Anlage mit einer Tagesproduktion von 15.000 kg Baumwollgarn ergibt sich daraus ein Tagesverbrauch von 50-126 kg Natriumdithionit.¹¹³ Die eingesetzten Mengen verdeutlichen den erheblichen Chemikalienbedarf der konventionellen Denim-Kettfärbung und verweisen zugleich auf die damit verbundene Abwasserbelastung durch Sulfitverbindungen, die im Rahmen der Nachbehandlung und Abwasseraufbereitung gesondert behandelt werden müssen.

Beim Siebdruckverfahren entfällt diese Salzfracht strukturell, da keine Färbeflotte eingesetzt wird. Der Chemikalieneinsatz beschränkt sich auf Druckpasten und Hilfsmittel, die gezielt und lokal appliziert werden.¹¹⁴

Zusammenfassend zeigt sich, dass Wasser-, Energie- und Chemikalienverbrauch aller drei Verfahren maßgeblich durch dieselben strukturellen Einflussfaktoren bestimmt werden. Hierzu zählen insbesondere das Flottenvolumen, die Fixierrate der eingesetzten Farbstoffe sowie der Umfang der erforderlichen Nachbehandlungsschritte. Die Ausprägung dieser Faktoren unterscheidet sich jedoch zwischen den Verfahren. Welche konkreten Umweltauswirkungen sich daraus ergeben, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

4.3 Einordnung des Ressourcenverbrauchs konventioneller Verfahren

Die in Abschnitt 4.2 dargestellten Daten machen deutlich, dass die Ressourcenbelastung der betrachteten Verfahren nicht auf einzelne Prozessschritte zurückzuführen ist, sondern in der grundlegenden Prozesslogik der Verfahren begründet liegt. Die mehrstufige Prozesskette, bestehend aus Vorbehandlung, Färbung, Fixierung, Nachbehandlung und Trocknung, akkumuliert an jeder Stufe eigenständige Ressourcenbedarfe, die in ihrer Gesamtwirkung über das hinausgehen, was durch die Optimierung einzelner Schritte kompensiert werden kann. Jigger- und Jet-Färbung sowie Denim-Färbung sind damit nicht ineffizient aufgrund mangelnder technischer Reife, sondern aufgrund ihrer Prozesslogik. Einer Logik, die

¹¹³ Vgl. Bechthold & Pham (2023), S. 282 f.

¹¹⁴ Umfassend hierzu: Azizul Hoque u. a. (2024)

sich aus der Notwendigkeit ergibt, Farbstoffe in wässrigem Medium zu lösen, aufzuziehen, zu fixieren und anschließend nicht fixierte Anteile auszuwaschen.

Dabei besteht beim Energieverbrauch ein verfahrensimmanenter Zielkonflikt: Eine Absenkung der Prozesstemperatur geht auf Kosten der Fixierrate und erhöht damit den Nachbehandlungsaufwand. Gleiches gilt für den Chemikalieneinsatz: Eine Reduktion der Salzfracht ist ohne Wechsel des Farbstoffsystems strukturell nicht möglich, da Elektrolyte eine prozessnotwendige Funktion bei der Reaktivfärbung erfüllen.

Das Thermosol- und das Pad-Steam-Verfahren zeigen demgegenüber, dass eine Prozessführung auf Basis des Klotzens anstelle einer vollständigen Flottenbehandlung den Flottenbedarf strukturell reduzieren kann (vgl. Abschnitt 4.2.1). Der thermische beziehungsweise dampfbasierte Energiebedarf wird dadurch jedoch nicht im gleichen Maße verringert und liegt weiterhin in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den diskontinuierlichen Ausziehverfahren (vgl. Abschnitt 4.2.2). Der geringere Wasserbedarf des Klotzprozesses wird somit durch den Energiebedarf der thermischen beziehungsweise dampfbasierten Fixierung teilweise kompensiert. Insgesamt zeigt sich, dass Verbesserungen in einer Ressourcendimension nicht zwangsläufig mit entsprechenden Einsparungen in anderen Ressourcendimensionen einhergehen.

Das Siebdruckverfahren zeigt, dass eine lokale statt flächige Farbmittelapplikation günstigere Ressourcenwerte ermöglichen kann. Dies verdeutlicht, dass die Ressourcenintensität nicht universell für die textile Farbgebung gilt, sondern verfahrensspezifisch durch die jeweilige Applikationslogik bedingt ist.

Die nachfolgende Tabelle 2 fasst die wesentlichen Ressourcenprofile der betrachteten Verfahren zusammen:

Tabelle 2: Ressourcenprofil der betrachteten konventionellen Verfahren im Überblick; *Daten aus Lit.*

Verfahren	Wasserverbrauch	Energiebedarf	Chemikalieneinsatz
Jigger- und Jet-Färbung	110-150 L/kg ¹¹⁵	8-18 MJ/kg ¹¹⁶	Salz bis 100 g/L ¹¹⁷
Thermosol-/Pad- Steam-Verfahren	~ 1 L/kg (Klotzprozess); 4-12 L/kg (Nachbehandlung) ¹¹⁸	~ 7-20 MJ/kg ¹¹⁹	Thermosol: Kein Salzeintrag Pad-Steam: bis zu 100 g/L ¹²⁰
Denim-Kettfärbung	3-5 L/kg (Färbeschritt); 40-65 L/kg (Gesamtprozess) ¹²¹	Erhöht durch Zwischentrocknung ¹²²	65 g/L Natriumdithionit ¹²³
Rotationssiebdruck	Strukturell geringer, da kein Flottenvolumen ¹²⁴	2,5-8,5 MJ/kg ¹²⁵	Keine Salzfracht ¹²⁶

Anmerkung: Die angegebenen Werte stammen aus unterschiedlichen Quellen und Erhebungskontexten und sind teils direkt gemessene, teils aus Flottenverhältnissen abgeleitete Größen. Eine vollständige Vergleichbarkeit zwischen den Verfahren ist entsprechend nur eingeschränkt gegeben.

Die Gegenüberstellung verdeutlicht, dass alle vier Verfahrensgruppen in unterschiedlichem Maße von denselben strukturellen Einflussgrößen geprägt sind: der wasserbasierten Prozessführung, der begrenzten Fixierrate der eingesetzten Farbstoffsysteme sowie dem Umfang der erforderlichen Nachbehandlung. Während Thermosol- und Pad-Steam-Verfahren sowie Rotationssiebdruck zeigen, dass einzelne Belastungsfaktoren durch eine veränderte Prozessführung

¹¹⁵ Vgl. Mikucioniene u. a. (2024)

¹¹⁶ Vgl. Gong et al. (2021), zit. n. De Oliveira u. a. (2024)

¹¹⁷ Vgl. Gabris u. a. (2025)

¹¹⁸ Vgl. Kiran-Ciliz (2003); De Oliveira u. a. (2024)

¹¹⁹ Vgl. Hasanbeigi & Price (2012)

¹²⁰ Vgl. Gabris u. a. (2025)

¹²¹ Vgl. Bechthold & Pham 2023, S. (282)

¹²² Vgl. Periyasamy & Periyasami (2023)

¹²³ Vgl. Bechthold & Pham (2023), S. 283

¹²⁴ Vgl. Wardman (2018), S. 212 f.

¹²⁵ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

¹²⁶ Vgl. Abschnitt 4.1.4 dieser Arbeit

reduziert werden können, bleibt die Frage offen, inwiefern alternative Verfahren diese strukturellen Ursachen grundsätzlich vermeiden können. Diese Frage steht im Mittelpunkt der vergleichenden Analyse in Kapitel 6.

5 Auswahl und Darstellung alternativer Färbeverfahren

Die in Kapitel 4 dargestellte Ressourcenintensität konventioneller Färbeverfahren ist nicht auf einzelne Prozessschritte zurückzuführen, sondern in der grundlegenden wasserbasierten Prozesslogik begründet, die verschiedene konventionelle Färbeverfahren wie Jigger- und Jet-Färbung, Thermosol- und Pad-Steam-Verfahren sowie die Denim-Färbung verbindet. Diese strukturelle Betrachtung bildet den Ausgangspunkt für die Analyse alternativer Ansätze, die zentrale Elemente der konventionellen Prozessführung – insbesondere das Prozessmedium, das Farbstoffsystem oder die Applikationslogik – verändern.

Da in Forschung und industrieller Praxis eine Vielzahl unterschiedlicher alternativer Verfahren existiert, kann im Rahmen dieser Arbeit keine vollständige Betrachtung aller Ansätze erfolgen. Stattdessen wird eine exemplarische Auswahl getroffen, die im folgenden Abschnitt anhand definierter Kriterien begründet wird.

5.1 Auswahlkriterien für die exemplarische Betrachtung alternativer Färbeverfahren

Die Auswahl der in den folgenden Kapiteln betrachteten Verfahren orientiert sich an drei zentralen Kriterien. Berücksichtigt wurden der Innovationsgrad, die Datenverfügbarkeit sowie die industrielle Relevanz. Die ausgewählten Verfahren stellen grundlegende Abweichungen vom konventionellen wasserbasierten Färbeprozess dar, sind durch ausreichend wissenschaftliche Literatur belegt und weisen einen hinreichenden technologischen Reifegrad auf, sodass sie bereits in industriellen oder industrienahen Kontexten eingesetzt oder erprobt werden.

Auf Basis dieser Kriterien wurden die scCO₂-basierte Färbung, biobasierte und enzymatische Färbeverfahren sowie der digitale Textildruck (Inkjet) für die exemplarische Betrachtung ausgewählt. Gemeinsam decken diese Verfahren ein breites Spektrum alternativer Ansätze ab und ermöglichen folgend eine differenzierte vergleichende Analyse.

5.2 Verfahren I: scCO₂-basierte Färbung

Die scCO₂-basierte Färbung verwendet Kohlendioxid im überkritischen Zustand (scCO₂) als alternatives Prozessmedium anstelle von Wasser. Kohlendioxid erreicht seinen überkritischen Zustand oberhalb seines kritischen Punktes bei 31 °C und 74 bar. In diesem Zustand vereint es die hohe Diffusionsfähigkeit eines Gases mit den Lösungseigenschaften einer Flüssigkeit. Der eigentliche Färbeprozess erfolgt jedoch bei deutlich höheren Werten von 100 bis 140 °C und 250 bis 350 bar, um sowohl den überkritischen Zustand des CO₂ sicherzustellen als auch die Polymerstruktur der Faser oberhalb ihres Glasübergangspunktes für die Farbstoffdiffusion zugänglich zu machen.¹²⁷

Der Färbeprozess beruht auf dem Zusammenwirken zweier Effekte. Zum einen lösen sich lipophile Dispersionsfarbstoffe sehr gut in scCO₂, sodass auf Tenside, Dispergiermittel oder andere Hilfsstoffe verzichtet werden kann. Zum anderen diffundiert das Kohlendioxid in die Polymerstruktur von Polyester und senkt damit die Glasübergangstemperatur. Dadurch erhöht sich die Beweglichkeit der Polymerketten, wodurch die Diffusion des Farbstoffs in die Faser erleichtert, und die Färbung begünstigt wird.¹²⁸

Der Prozessablauf gliedert sich in folgende Schritte: Zunächst wird das Textil in einen geschlossenen Druckbehälter eingebracht. Anschließend wird das Kohlendioxid auf den überkritischen Zustand komprimiert und der darin gelöste Farbstoff in das textile Substrat eingetragen. Nach Abschluss der Färbung wird der Druck kontrolliert abgesenkt, wodurch das CO₂ in den gasförmigen Zustand übergeht und aus dem Prozess entfernt werden kann. Nicht fixierter Farbstoff verbleibt als trockenes Pulver und kann grundsätzlich zurückgewonnen und wiederverwendet werden (vgl. Abbildung 10).¹²⁹

¹²⁷ Vgl. Feil (2004)

¹²⁸ So auch: Goñi u. a. (2021)

¹²⁹ Vgl. Feil (2004)

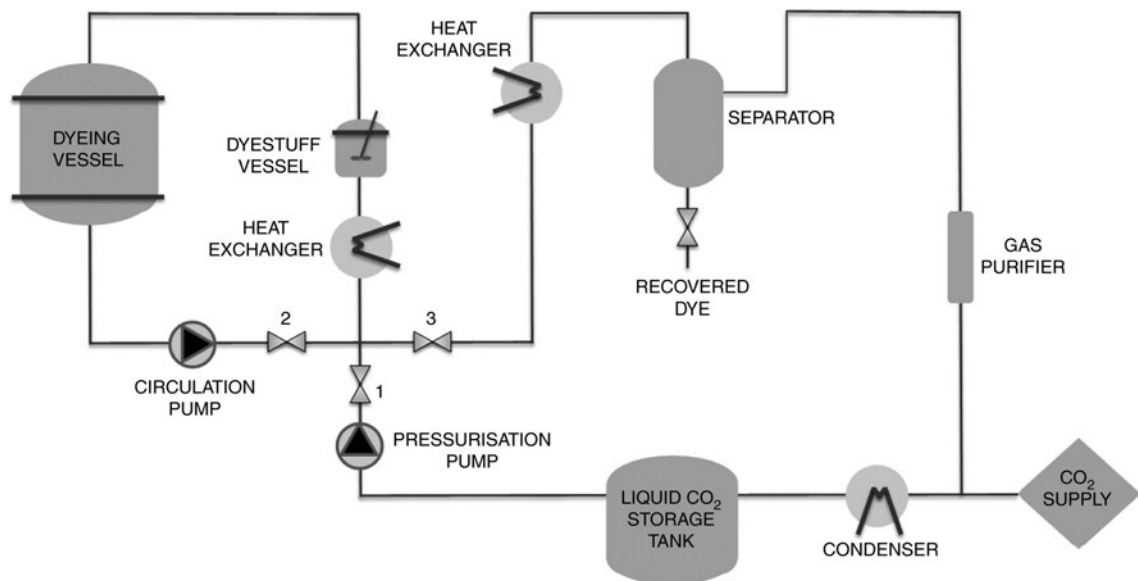


Abbildung 10: Vereinfachtes Schema einer typischen Anlage zur Färbung mit überkritischem CO₂¹³⁰

Das Verfahren ist derzeit industriell etabliert für hydrophobe Synthefasern, insbesondere Polyester (PET) in Kombination mit Dispersionsfarbstoffen. Daneben können auch Polylactid (PLA) und Acetat gefärbt werden.¹³¹

Die industrielle Umsetzung erfolgte bislang durch das niederländische Unternehmen DyeCoo, das lange Zeit als einziger kommerzieller Anbieter entsprechender Anlagen galt und die Technologie bei mehreren asiatischen Textilbetrieben etablierte, unter anderem werden Marken wie Nike, Adidas und Bonprix als Abnehmer genannt.¹³² Im Dezember 2025 wurde DyeCoo Textile Systems für insolvent erklärt.¹³³

Die technologische Grundlage des Verfahrens entstand am Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West (DTNW), wo Anfang der 1990er Jahre unter anderem Prof. Dr. Eckhard Schollmeyer die Färbung mit überkritischem CO₂ (scCO₂)

¹³⁰ Banchero (2020)

¹³¹ Vgl. VDTF INFOBRIEF V1-24 (2024)

¹³² Ebd.

¹³³ Vgl. IO+ (2025)

entwickelte. Die erste wissenschaftliche Veröffentlichung erschien 1993, das zugehörige Patent wurde 1995 erteilt.¹³⁴

Ergänzend zur Literatur liefert das im Rahmen dieser Arbeit geführte Experteninterview mit Dr. Klaus Opwis, Leiter der Arbeitsgemeinschaft Umwelttechnologie & Katalyse am DTNW, aktuelle Einschätzungen zum Entwicklungsstand der Technologie. Dr. Opwis bestätigt, dass Polyester gegenwärtig die einzige industriell etablierte Anwendung darstellt. Zwar sei eine Färbung von Cellulosefasern grundsätzlich möglich, etwa durch chemische Modifikation von Reaktivfarbstoffen zur Erhöhung ihrer Lipophilie, dies widerspreche jedoch dem Grundprinzip des Verfahrens, kommerziell verfügbare Farbstoffe ohne zusätzliche Aufbereitung einzusetzen. Zudem führten bisherige Ansätze zur Färbung von Naturfasern aus überkritischem CO₂ nach seiner Einschätzung überwiegend zu einer oberflächlichen Farbstoffablagerung und nicht zu einer dauerhaften Färbung mit ausreichender Farbechtheit.¹³⁵

Hinsichtlich des Chemikalieneinsatzes hebt Dr. Opwis hervor, dass bei der scCO₂-basierten Färbung keine zusätzlichen Prozesschemikalien wie Carrier, Reduktionsmittel oder weitere Hilfsstoffe erforderlich sind. Bei einer kontrollierten Druckentspannung sei zudem keine Nachbehandlung notwendig, da überschüssiger Farbstoff nach der Entspannung trocken vorliege und entfernt beziehungsweise zurückgewonnen werden könne.¹³⁶

Auch aktuell wird intensiv daran gearbeitet, die technologische Grenze der scCO₂-Färbung zu überwinden, dass sich Cellulosefasern nicht mit herkömmlichen Reaktivfarbstoffen behandeln lassen. So wurden speziell modifizierte reaktive Dispersionsfarbstoffe mit s-Triazin-Reaktivgruppe entwickelt, die eine gemeinsame Ein-Bad-Färbung von Polyester-Baumwoll-Mischgeweben in scCO₂ ermöglichen. Dieser Ansatz zeigt, dass an einer Übertragung des Verfahrens auf cellulosische Fasern durch chemische Farbstoffmodifikation weiterhin geforscht wird. Ergänzend liefert ein aktueller Übersichtsartikel einen systematischen

¹³⁴ Vgl. Saus u. a. (1993); so auch Opwis (2026)

¹³⁵ Vgl. Opwis (2026)

¹³⁶ Ebd.

Überblick über die Forschungsentwicklung im Bereich der scCO₂-Färbung für den Zeitraum 2015-2020.¹³⁷

5.3 Verfahren II: Biobasierte / enzymatische Färbung

Biobasierte und enzymatische Färbeverfahren umfassen eine heterogene Gruppe von Technologien, die biologische Ressourcen oder Prozesse gezielt für die textile Farbgebung nutzen. Im Unterschied zu konventionellen Färbeverfahren, deren Farbstoffe überwiegend auf petrochemischen Rohstoffen basieren, verfolgen diese Ansätze das Ziel, den Einsatz fossiler Ressourcen zu reduzieren und die Umweltwirkungen des Färbeprozesses zu verringern. Die Verfahren unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Art und des Umfangs, in dem biologische Systeme in den Färbeprozess integriert werden.

Das Spektrum reicht von biosynthetischen Verfahren, bei denen natürliche Reststoffe als Ausgangsmaterial für die Farbstoffherstellung dienen¹³⁸, über fermentationsbasierte Ansätze, bei denen Mikroorganismen Farbpigmente produzieren¹³⁹, bis hin zu weiteren biobasierten und enzymatischen Ansätzen, die im Folgenden überblicksartig dargestellt werden. Trotz ihrer unterschiedlichen technologischen Ausgestaltung verfolgen alle Ansätze das gemeinsame Ziel, Ressourcenverbrauch, Chemikalieneinsatz und Umweltbelastungen gegenüber konventionellen Färbeverfahren zu reduzieren.

EarthColors® (Archroma)

Ein industriell bereits kommerzialisiertes Beispiel für die biosynthetische Färbung ist die EarthColors®-Technologie des Schweizer Unternehmens Archroma. Das Verfahren beruht auf einer patentierten Synthesemethode, bei der Reststoffe aus der Lebensmittel- und Kräuterindustrie als Rohstoff für die Farbstoffherstellung genutzt werden.

¹³⁷ Vgl. zum Ganzen: Zhou u. a. (2022); Goñi u. a. (2021)

¹³⁸ Vgl. Archroma (2023) (Herstellerangabe)

¹³⁹ Vgl. Ginsberg u. a. (2018)

Zur chemischen Klassifizierung der EarthColors®-Farbstoffe liegen allerdings widersprüchliche Herstellerangaben vor. Frühere Informationen sowie die Produktbezeichnung (Diresul®, Archromas etablierte Schwefelfarbstoff-Linie) deuten auf Schwefelfarbstoffe hin, die üblicherweise durch Thionierung eines aromatischen, häufig chlororganischen Ausgangsmaterials mit Schwefel hergestellt werden. Die aktuelle Produktdokumentation von Archroma beschreibt dagegen nur noch eine mit Schwefelfarbstoffen vergleichbare Fixierung und Echtheit, verweist zugleich jedoch auf eine kovalente Bindung an die Faser – ein Merkmal, das eher für Reaktivfarbstoffe charakteristisch ist, da klassische Schwefelfarbstoffe in der Regel nicht kovalent, sondern durch Aggregation in der Faser fixiert werden. Dies deckt sich mit Hinweisen aus einer Marktanalyse, wonach neben der schwefelfarbstoffbasierten offenbar auch eine reaktivfarbstoffbasierte Variante von EarthColors® existiert.¹⁴⁰ Die verfügbaren Informationen zur genauen chemischen Einordnung der Farbstoffe sind insgesamt uneindeutig und lassen sich anhand öffentlich zugänglicher Herstellerangaben nicht abschließend klären.

Verwendet werden ausschließlich nicht essbare Nebenprodukte, während die für die Nahrungsmittelproduktion nutzbaren Bestandteile im Stoffkreislauf verbleiben. Aktuell umfasst das Sortiment sechs Produkte, die sich hinsichtlich ihrer Reststoffbasis unterscheiden: Diresul® Earth-Oak (Mandelschalen), Diresul® Earth-Cotton (Baumwollpflanzenreste), Diresul® Earth-Sand (Bitterorangen-Reste), Diresul® Earth-Clay (Rübenreste) sowie Diresul® Earth-Forest und Diresul® Earth-Stone (jeweils Sägepalmen-Reste). Laut Herstellerangabe erreichen die EarthColors®-Varianten unabhängig von ihrer genauen chemischen Einordnung dieselbe Fixierrate, Echtheit und Gesamtleistung wie die konventionelle Diresul®-Produktlinie.¹⁴¹

Die daraus gewonnenen Farbstoffe sind für cellulosische Fasern wie Baumwolle, Viskose, Leinen und Bambus geeignet und können auf bestehenden industriellen Anlagen verarbeitet werden. Dadurch sind keine grundlegenden Anpassungen der Produktionsinfrastruktur erforderlich, was die industrielle Implementierung erleichtert. Nach Angaben des Unternehmens lassen sich insbesondere die mit der Rohstoffgewinnung verbundenen Umweltwirkungen reduzieren.¹⁴²

¹⁴⁰ Vgl. *Reactive Dyes Market Size & Growth, Forecast 2035* (o. J.)

¹⁴¹ Vgl. Archroma (2023) (Herstellerangabe)

¹⁴² Ebd.

Colorifix

Einen konzeptionell anderen, fermentationsbasierten Ansatz verfolgt das britische Unternehmen Colorifix.

Das Verfahren basiert auf gentechnisch veränderten Mikroorganismen, die natürliche Pigmente produzieren und diese direkt auf das Textilmaterial übertragen. Zunächst werden die Mikroorganismen in einem Bioreaktor kultiviert, wobei als Nährmedien unter anderem landwirtschaftliche Nebenprodukte wie Zucker, Peptide und Salze eingesetzt werden. Die dabei entstehende hochkonzentrierte Kultur wird anschließend direkt auf das Textil aufgebracht. Eine Wärmebehandlung bei 121 °C führt zum Aufschluss der Zellen, wodurch die Pigmente freigesetzt und gleichzeitig in der Faser fixiert werden. Abschließende Waschschrte dienen der Entfernung der Zellreste.¹⁴³

Das Verfahren ist sowohl für Natur- als auch für Synthefasern geeignet.¹⁴⁴

Im Unterschied zu konventionellen Färbeprozessen werden Pigmenterzeugung, Farbauftrag und Fixierung damit weitgehend in einem integrierten biologischen Prozess zusammengeführt, wie in Abbildung 11 dargestellt.

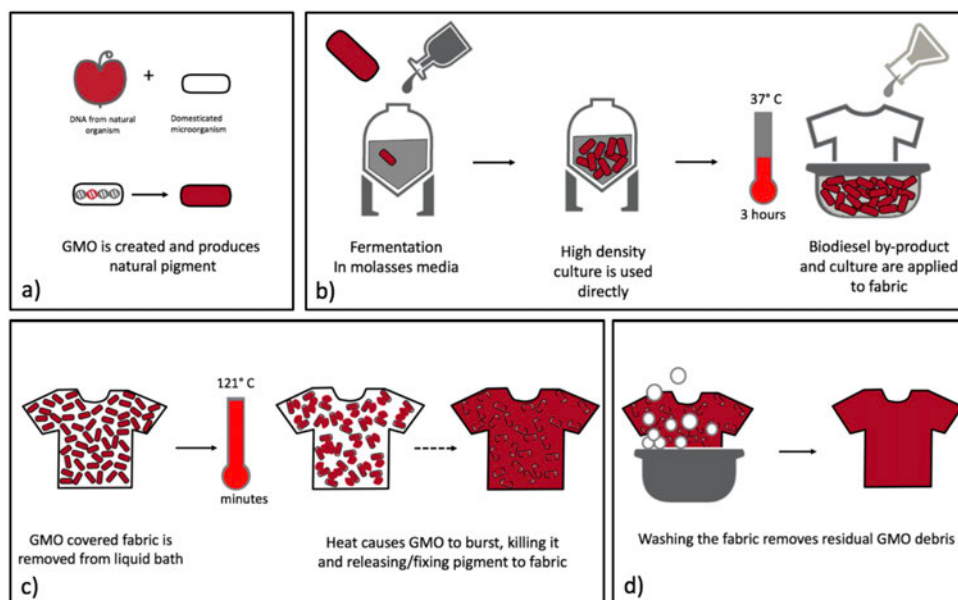


Abbildung 11: Der Colorifix-Prozess: Von der Pigmenterzeugung durch gentechnisch veränderte Mikroorganismen bis zum gefärbten Textil¹⁴⁵

¹⁴³ Vgl. Ginsberg u. a. (2018)

¹⁴⁴ Vgl. Colorifix (2026) (Herstellerangabe)

¹⁴⁵ Ginsberg u. a. (2018), Credit: Jim Ajioka und Orr Yarkoni

Das Unternehmen wird unter anderem von Innovation Ventures, der Venture-Capital-Einheit des schwedischen Einrichtungsunternehmens Inter IKEA Group, finanziell unterstützt.¹⁴⁶ Eine vergleichende Ressourcenanalyse des Verfahrens erfolgt in Kapitel 6.

Weitere Entwicklungen im Bereich biobasierter und enzymatischer Färbung

Neben den beiden vertieft betrachteten Verfahren existieren weitere Ansätze, die die Vielfalt biobasierter und enzymatischer Färbetechnologien verdeutlichen. Das österreichische Unternehmen Vienna Textile Lab entwickelt auf Basis von Bakterien und Pilzen natürliche Farbstoffe für die Textilfärbung, die sowohl auf Natur- als auch auf Synthefasern eingesetzt werden können.¹⁴⁷ Das französische Startup Ever Dye verfolgt einen physikalisch-chemischen Ansatz mit positiv geladenen Pigmenten auf Basis eines biomassebasierten Mineralkomposits, die bei Raumtemperatur ohne zusätzliche Hilfsmittel auf die Faser aufgebracht werden können.¹⁴⁸ Die enzymatische Färbung im engeren Sinne nutzt isolierte Enzyme, insbesondere Laccasen, als Biokatalysatoren, um phenolische Farbvorstufen direkt auf der Faseroberfläche oxidativ zu polymerisieren. Der Prozess erfolgt bei Temperaturen von etwa 40 bis 60 °C und kommt ohne den Einsatz von Salz oder Alkalien aus.¹⁴⁹

Diese Ansätze werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht vertieft betrachtet. Zwar zeigen sie ein erhebliches Innovationspotenzial, befinden sich jedoch hinsichtlich Datenverfügbarkeit und industrieller Relevanz in einem früheren Entwicklungsstadium als EarthColors® und Colorifix. Die Fokussierung auf diese beiden vertieft dargestellten Verfahren entspricht daher den in Abschnitt 5.1 definierten Auswahlkriterien und ermöglicht eine vertiefte exemplarische Betrachtung.

¹⁴⁶ Vgl. *A new way to see colour* (2026)

¹⁴⁷ Vgl. *Vienna Textile Lab* (2025) (Herstellerangabe)

¹⁴⁸ Vgl. Catarino u. a. (2025)

¹⁴⁹ Vgl. Atav u. a. (2022)

5.4 Verfahren III: Digitaler Textildruck (Inkjet)

Der digitale Textildruck, auch als Digital Textile Printing (DTP) bezeichnet, basiert auf dem Tintenstrahlprinzip. Im Gegensatz zum konventionellen Rotationssiebdruck werden dabei keine physischen Druckschablonen benötigt. Digitale Drucksysteme verwenden eine Software zur Rasterbildverarbeitung sowie digital gesteuerte Druckköpfe, die flüssige Tintentröpfchen durch feinste Düsen gezielt auf die Textilbahn aufbringen. Das Verfahren ermöglicht die Reproduktion komplexer mehrfarbiger Designs innerhalb einer einzigen Druckkonfiguration, ohne die beim Rotationssiebdruck erforderliche Herstellung farbseparierter Schablonen.¹⁵⁰

In der praktischen Anwendung lassen sich beim digitalen Textildruck drei grundlegende Verfahrensansätze unterscheiden. Beim Direct-to-Garment-Druck (DTG) wird die Tinte direkt auf ein bereits konfektioniertes Kleidungsstück aufgebracht, wodurch sich das Verfahren insbesondere für Einzelstücke und Kleinserien eignet. Beim Direct-to-Film-Druck (DTF) wird das Druckmotiv zunächst auf eine Trägerfolie aufgebracht und anschließend mithilfe eines Heißschmelzklebstoffs auf das Textil übertragen. Für die kontinuierliche großindustrielle Fertigung ist hingegen das Roll-to-Roll-Verfahren (auch Direct-to-Fabric) von Bedeutung, bei dem die textile Warenbahn direkt von der Rolle bedruckt wird. Da dieses Verfahren hinsichtlich des kontinuierlichen Materialdurchlaufs strukturell mit dem ebenfalls kontinuierlich arbeitenden Rotationssiebdruck vergleichbar ist, bildet es die Grundlage für die im Folgenden betrachtete Fallstudie.¹⁵¹

Der Prozessablauf des digitalen Textildrucks gliedert sich in drei Hauptschritte: die Vorbehandlung des Substrats zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Tintenaufnahme, den eigentlichen Druckvorgang mittels digital gesteuerter Tintenstrahlköpfe sowie die Nachbehandlung durch Trocknung, Dämpfen und Waschen.

Technologisch lassen sich die am Markt verfügbaren Tintenstrahlverfahren in zwei Grundprinzipien einteilen: Continuous-Inkjet-Systeme (CIJ), bei denen ein kontinuierlicher Tröpfchenstrom unter einem angelegten elektrischen Feld

¹⁵⁰ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

¹⁵¹ Vgl. *Digital printing direct to fabrics and garments* (2025)

erzeugt wird, und Drop-on-Demand-Systeme (DOD), bei denen einzelne Tröpfchen gezielt durch einen Spannungsimpuls ausgestoßen werden. Im DTP-Bereich dominieren DOD-Systeme, da sie eine präzisere Tröpfchenpositionierung und damit eine höhere Druckauflösung ermöglichen. Innerhalb der DOD-Verfahren hat sich die piezoelektrische Tintenstrahltechnologie als Standard für industrielle Textilanwendungen etabliert. Dabei verformt sich ein piezoelektrisches Element unter einer angelegten Spannung, wodurch ein Druckimpuls in der Tinten-kammer erzeugt wird, der den Austritt eines Tintentröpfchens aus der Düse bewirkt. Gegenüber thermischen Druckköpfen, bei denen die Tropfenbildung durch lokale Erhitzung und Dampfblasenbildung erfolgt, ermöglicht die piezoelektrische Technologie die Verarbeitung einer größeren Bandbreite an Tintensystemen, da die Tinte keiner thermischen Belastung ausgesetzt wird.¹⁵²

Die Druckqualität piezoelektrischer Systeme wird wesentlich durch die angelegte Spannungswellenform bestimmt, über die sich Tropfengröße, Tropfengeschwindigkeit und die Bildung unerwünschter Satellitentröpfchen gezielt beeinflussen lassen. Beim berührungslosen Tintenstrahldruck kommt es nach dem Auftreffen der Tröpfchen auf die textile Oberfläche zu deren Spreiten sowie zur Koaleszenz benachbarter Tröpfchen. Beide Effekte beeinflussen die erzielbare Bildqualität sowie die Druckauflösung des Textils wesentlich.¹⁵³ Diese Steuerungsmöglichkeiten sind auch ressourcenrelevant, da eine unzureichende Tropfenkontrolle zu Fehldrucken und damit zu Farbstoff- und Materialverlusten führen kann.

Die Wahl des Tintensystems richtet sich nach dem Fasermaterial. Für Cellulosefasern wie Baumwolle werden überwiegend Reaktivtinten eingesetzt, für Polyester Dispersionstinten und für Protein- sowie Polyamidfasern Säuretinten.¹⁵⁴

Ein verfahrensspezifischer Unterschied gegenüber dem Rotationssiebdruck besteht in der Notwendigkeit einer Gewebevorbehandlung vor dem Druckvorgang. Das Substrat muss mit Verdicker, Harnstoff, Alkali und Hilfsmitteln vorbehandelt werden, um eine gleichmäßige Tintenaufnahme zu gewährleisten. Der dabei eingesetzte Harnstoff stellt einen relevanten Umweltbelastungsfaktor dar, da er

¹⁵² Vgl. Shah u. a. (2021)

¹⁵³ Ebd.

¹⁵⁴ Ebd.

erhebliche Stickstoffmengen ins Abwasser einträgt.¹⁵⁵ In der Forschung wurden daher harnstofffreie Alternativen entwickelt, darunter das sogenannte Ecosteam-Verfahren, bei dem das noch feuchte Substrat aus der Vorbehandlung direkt bedruckt und gedämpft wird. Dadurch kann eine um rund 15% höhere Farbstofffixierung erzielt werden.¹⁵⁶

Im Anschluss an den Druckvorgang sind, wie beim Rotationssiebdruck, Trocknung, Dämpfen und Waschen prozessnotwendig. Durch den gezielten, punktgenauen Farbauftrag entfällt jedoch die beim Rotationssiebdruck erforderliche Herstellung und Reinigung von Druckschablonen.

Mit einem Marktanteil von rund 11 % befindet sich der digitale Textildruck trotz seines dynamischen Wachstums weiterhin in einer frühen Phase der Marktdurchdringung, während der Rotationssiebdruck mit etwa 65 % den Textildruckmarkt dominiert.¹⁵⁷

Durch den gezielten Farbauftrag ohne Druckschablonen reduziert der digitale Textildruck Farbverluste sowie den Wasser- und Chemikalienverbrauch gegenüber dem Rotationssiebdruck. Trotz dieser Marktposition ist der digitale Textildruck im Vergleich zum Rotationssiebdruck mit höheren Kosten verbunden und eignet sich vor allem für kleinere Serien und bietet eine hohe Designflexibilität.¹⁵⁸ Da digitale Drucksysteme auf softwaregesteuerte Druckköpfe sowie kontinuierliche Trocknungs- und Dämpfprozesse angewiesen sind, kann der Energiebedarf pro bedruckter Fläche im Vergleich zum Rotationssiebdruck höher ausfallen; eine vergleichende Einordnung erfolgt in Kapitel 6.3

¹⁵⁵ Vgl. Sheth (2004) zit. nach Catarino u. a. (2025)

¹⁵⁶ Vgl. zum Ganzen: Wang (2017) zit. nach Catarino u. a. (2025); Vgl. Wang u. a. (2017)

¹⁵⁷ Vgl. Link (2023), zit. n. Azizul Hoque u. a. (2024)

¹⁵⁸ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

6 Vergleichende Analyse der Verfahren hinsichtlich der Ressourcenschonung

Nachdem in Kapitel 5 die drei ausgewählten alternativen Ansätze der scCO₂-basierten Färbung, der biobasierten Färbung sowie des digitalen Textildrucks hinsichtlich ihrer technologischen Grundprinzipien dargestellt wurden, erfolgt im vorliegenden Kapitel eine vergleichende Bewertung ihres Potenzials zur Ressourcenschonung. Im Mittelpunkt steht die Frage, inwieweit die in Kapitel 4 identifizierten Ursachen des Ressourcenverbrauchs konventioneller Verfahren, die anhand der Jigger- und Jet-Färbung, des Thermosol- und Pad-Steam-Verfahrens, der Denim-Färbung sowie des Siebdruckverfahrens aufgezeigt wurden, durch die alternativen Ansätze vermieden, reduziert oder lediglich auf andere Prozessschritte verlagert werden. Ziel ist es, die Verfahren hinsichtlich ihrer ökologischen Potenziale und ihrer bestehenden Einschränkungen systematisch einzuordnen.

6.1 Methodik und Vergleichsrahmen

Die vergleichende Analyse der alternativen Verfahren erfolgt, wie in Kapitel 1.4 angekündigt, nicht als systematische Gegenüberstellung exakter Kennzahlen über alle Verfahren und Dimensionen hinweg, sondern als qualitative Einordnung in Anlehnung an die Ökobilanzierungsmethodik nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044.¹⁵⁹ Im Unterschied zu einer vollständigen Lebenszyklusanalyse beschränkt sich die Betrachtung auf den Färbe- und Druckprozess als funktionale Systemgrenze. Vorgelagerte Prozesse der Rohstoffgewinnung sowie nachgelagerte Phasen der Produktnutzung und Entsorgung werden nicht berücksichtigt. Diese Eingrenzung basiert auf der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit der herangezogenen Studien und ermöglicht dennoch eine vergleichbare Einordnung der Verfahren auf Prozessebene.

Als funktionelle Einheit wird, soweit die Datenlage dies zulässt, ein Kilogramm Fertigtextil zugrunde gelegt. Für den digitalen Textildruck wird aufgrund der zugrunde liegenden Fallstudie ergänzend die dort verwendete Bezugsgröße von

¹⁵⁹ Vgl. Fonseca u. a. (2023)

1.000 Laufmetern Baumwollgewebe berücksichtigt.¹⁶⁰ Eine vollständige Harmonisierung der funktionellen Einheiten ist daher nicht möglich und wird bei der Interpretation der Ergebnisse entsprechend berücksichtigt.

Die Bewertung konzentriert sich auf die drei zentralen Belastungsdimensionen, die in Kapitel 4 als strukturelle Ursachen der Ressourcenintensität konventioneller Färbe- und Druckverfahren identifiziert wurden: den Wasserverbrauch infolge des wasserbasierten Prozessmediums und der begrenzten Fixierrate, den Energiebedarf infolge thermisch beziehungsweise dampfbasierter Prozessführung sowie den Chemikalieneinsatz infolge der elektrolytischen Farbstoffapplikation und chemischen Nachbehandlung. Als Referenzrahmen dienen die in Kapitel 4 dargestellten konventionellen Verfahren der Jigger- und Jet-Färbung, des Thermosol- und Pad-Steam-Verfahrens sowie der Denim-Färbung.

Die drei Belastungsdimensionen werden im Folgenden jeweils als eigenständige Ressourcenprobleme betrachtet. Für jedes der untersuchten alternativen Verfahren wird analysiert, ob das jeweilige strukturelle Problem grundsätzlich vermieden oder lediglich innerhalb des bestehenden Prozesssystems reduziert wird. Punktuell verfügbare quantitative Kennzahlen werden ergänzend herangezogen, ohne den Anspruch einer vollständig vergleichbaren Bewertung über alle Verfahren und Dimensionen hinweg zu erheben.

Die Datengrundlage setzt sich aus wissenschaftlichen Fachpublikationen, unabhängigen Ökobilanzen sowie einem im Rahmen dieser Arbeit geführten Experteninterview zusammen. Für die scCO₂-Färbung liegen überwiegend qualitative Aussagen sowie ergänzende Einschätzungen und eine unveröffentlichte Vergleichsberechnung aus einem Experteninterview mit Dr. Klaus Opwis (DTNW, 23.06.2026) vor.¹⁶¹ Quantitative Energiedaten aus unabhängigen publizierten Quellen stehen bislang nicht zur Verfügung, weshalb die im Interview genannte Berechnung lediglich als ergänzende Orientierung unter entsprechendem Vorbehalt herangezogen wird.

¹⁶⁰ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

¹⁶¹ Vgl. Opwis (2026)

Für biobasierte Färbeverfahren bildet eine unabhängige Ökobilanz des portugiesischen Textilforschungsinstituts Citeve nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 die zentrale Datengrundlage. Die Studie wurde im Rahmen eines EU-geförderten Projekts für das Colorifix-Verfahren erstellt (Colorifix LCA Report, 2022).¹⁶² Für den digitalen Textildruck dient die industrielle Fallstudie von 2024 als Grundlage. Diese untersucht den digitalen Textildruck im Vergleich zum Rotationssiebdruck anhand eines mit Reaktivfarbstoff bedruckten, 16-farbigen Designs auf 1.000 Laufmetern Baumwollgewebe am Produktionsstandort Peru.¹⁶³

Die Vergleichbarkeit der verfügbaren Kennzahlen ist aufgrund unterschiedlicher Substrate, Prozessbedingungen und Referenzsysteme eingeschränkt. Die scCO₂-Färbung wurde überwiegend für synthetische Fasern untersucht, während sich die Ökobilanz zum Colorifix-Verfahren auf ein Baumwoll-Mischgewebe aus 50 % biologischer und 50 % recycelter Baumwolle bezieht. Die Studie zum digitalen Textildruck vergleicht den Digitaldruck mit dem Rotationssiebdruck und nicht mit der Jigger- oder Jet-Färbung als primären konventionellen Referenzverfahren dieser Arbeit. Diese methodischen Unterschiede werden in der Ergebnisdarstellung jeweils kenntlich gemacht und in Kapitel 8 kritisch diskutiert.

6.2 Ressourcenproblem I: Wasserverbrauch

Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, stellt der Wasserverbrauch den mengenmäßig bedeutendsten Ressourcenfaktor konventioneller Färbeverfahren dar. Ursächlich hierfür sind die wasserbasierte Prozessführung sowie die begrenzte Fixierate konventioneller Farbstoffsysteme. Im Folgenden wird untersucht, inwieweit die drei alternativen Verfahren diese strukturelle Ursache des Wasserverbrauchs überwinden. Dabei wird zwischen Verfahren unterschieden, die den Wasserbedarf prinzipiell vermeiden, und solchen, die ihn innerhalb des bestehenden wasserbasierten Prozesssystems lediglich reduzieren.

¹⁶² Vgl. Yarkoni u. a. (2022)

¹⁶³ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

scCO₂-Färbung

Als Referenzgröße für den Wasserverbrauch konventioneller Ausziehverfahren gilt ein spezifischer Verbrauch von 110-150 L/kg Textilsubstrat, der in Abhängigkeit von Gewebeat, Maschinenkonfiguration, Flottenverhältnis und Nachbehandlung variiert.¹⁶⁴ Im Gegensatz zu einer Optimierung innerhalb dieses Systems ersetzt die scCO₂-Färbung das wässrige Prozessmedium vollständig durch überkritisches Kohlendioxid (scCO₂).¹⁶⁵ Dieses übernimmt die Transportfunktion des Wassers und ermöglicht die Diffusion geeigneter Farbstoffe in die Faser, ohne dass eine wasserbasierte Färbung erforderlich ist. Gleichzeitig entfällt die wasserintensive Nachbehandlung zur Entfernung nicht fixierter Farbstoffreste. Der Wasserverbrauch wird damit im eigentlichen Färbeprozess nicht nur reduziert, sondern grundsätzlich eliminiert. Diese Einschätzung stützt sich auf qualitative Prozessanalysen, da belastbare quantitative Vergleichsdaten aus industriellen Anwendungen bislang nur eingeschränkt verfügbar sind.¹⁶⁶ Zudem ist die Anwendbarkeit des Verfahrens derzeit auf hydrophobe Fasern, insbesondere Polyester, beschränkt. Für Cellulosefasern wie Baumwolle bestehen zwei grundlegende Einschränkungen. Zum einen sind die hierfür eingesetzten Reaktivfarbstoffe ionisch und damit in Wasser, nicht jedoch in scCO₂ löslich. Zum anderen beruht die Diffusion von Dispersionsfarbstoffen in Polyester auf der erhöhten Beweglichkeit der Polymerketten oberhalb der Glasübergangstemperatur, die durch das Eindringen von scCO₂ in die Faser abgesenkt wird. Bei Cellulosefasern lässt sich dieser Mechanismus nicht in vergleichbarer Weise nutzen. Als vergleichsweise unpolares Medium kann scCO₂ die Wasserstoffbrückenbindungen innerhalb der Cellulosefaser, anders als Wasser, nicht aufbrechen. Dadurch bleiben die amorphen Bereiche der Faser weitgehend starr, sodass die für die Farbstoffdiffusion erforderliche Beweglichkeit nicht erreicht wird.¹⁶⁷ Die Fixierung von Reaktivfarbstoffen erfolgt stattdessen über eine kovalente Bindung an die Celluloseketten und lässt sich daher nicht auf das scCO₂-Verfahren übertragen.¹⁶⁸ Die vollständige Eliminierung des Wasserverbrauchs ist somit auf geeignete synthetische Fasern beschränkt. Innerhalb dieses Anwendungsbereichs stellt die

¹⁶⁴ Vgl. Mikucioniene u. a. (2024)

¹⁶⁵ Vgl. Saus u. a. (1993)

¹⁶⁶ Vgl. Opwis (2026)

¹⁶⁷ Vgl. zum Ganzen: De Oliveira u. a. (2024)

¹⁶⁸ So auch: Opwis (2026), aaO.

scCO₂-Färbung jedoch das einzige der untersuchten Verfahren dar, das den Wasserverbrauch durch einen vollständigen Wechsel des Prozessmediums grundsätzlich vermeidet.

Biobasierte Verfahren

Für biobasierte Färbeverfahren ergibt sich ein differenzierteres Bild. Ausgangspunkt bildet derselbe Referenzbereich konventioneller Ausziehverfahren von 110-150 L/kg Textilsubstrat.¹⁶⁹ Im Unterschied zur scCO₂-Färbung verbleiben diese Verfahren jedoch grundsätzlich innerhalb einer wasserbasierten Prozessführung, denn Einsparungen werden durch Optimierungen einzelner Prozessschritte erzielt.

Für das mikrobiell pigmentbasierte Verfahren von Colorifix weist eine vom portugiesischen Textilforschungsinstitut Citeve durchgeführte Ökobilanz eine Reduktion des Wasserverbrauchs um 49,55 % gegenüber dem konventionellen Referenzverfahren aus.¹⁷⁰ Die Studie wurde von einer externen Institution durchgeführt, wobei die Systemgrenzen durch das Unternehmen definiert wurden – dies ist bei der Einordnung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Die Aussagekraft ist zudem dadurch eingeschränkt, dass der vorgelagerte Fermentationsschritt zur Pigmentproduktion nicht in die Systemgrenze einbezogen wurde und sich die ausgewiesene Einsparung ausschließlich auf den Applikationsprozess bezieht. Die Wasserreduktion beruht vor allem auf geringeren Flottenvolumina sowie dem Wegfall einzelner Nachbehandlungsschritte – ein grundlegender Wechsel des Prozessmediums findet hingegen nicht statt.¹⁷¹

Nach Herstellerangaben reduziert EarthColors® in einem spezifischen Anwendungsszenario den Wasserverbrauch um 40 %, den Stromverbrauch um 23 % sowie die CO₂-Emissionen um 36 % gegenüber konventionellen Verfahren.¹⁷²

Da die ausgewiesenen Einsparungen auf unternehmensinternen Berechnungen beruhen und bislang nicht durch eine unabhängige Prüfinstitution verifiziert wurden, sind sie nur eingeschränkt belastbar. Ein direkter Vergleich mit den

¹⁶⁹ Vgl. Mikucioniene u. a. (2024)

¹⁷⁰ Vgl. zum Ganzen: Yarkoni u. a. (2022), S. 4

¹⁷¹ Ebd.

¹⁷² Vgl. *Sustainability Report Archroma* (2024), S. 49 (Herstellerangabe)

Ergebnissen der unabhängigen Ökobilanz des Citeve für das Colorifix-Verfahren ist daher nicht möglich. Unabhängig davon bleibt EarthColors® innerhalb einer wasserbasierten Prozessführung und nutzt die konventionelle Applikationschemie. Die ausgewiesenen Ressourceneinsparungen beruhen folglich auf einer Optimierung einzelner Prozessschritte und nicht auf einer grundlegenden Änderung des Verfahrensprinzips.

Digitaler Textildruck (DTP)

Für den digitalen Textildruck liegt eine industrielle Fallstudie des peruanischen Textilunternehmens Creditex vor, die einen direkten Vergleich mit dem konventionellen Rotationssiebdruck (RSP) ermöglicht (vgl. Abbildung 12).

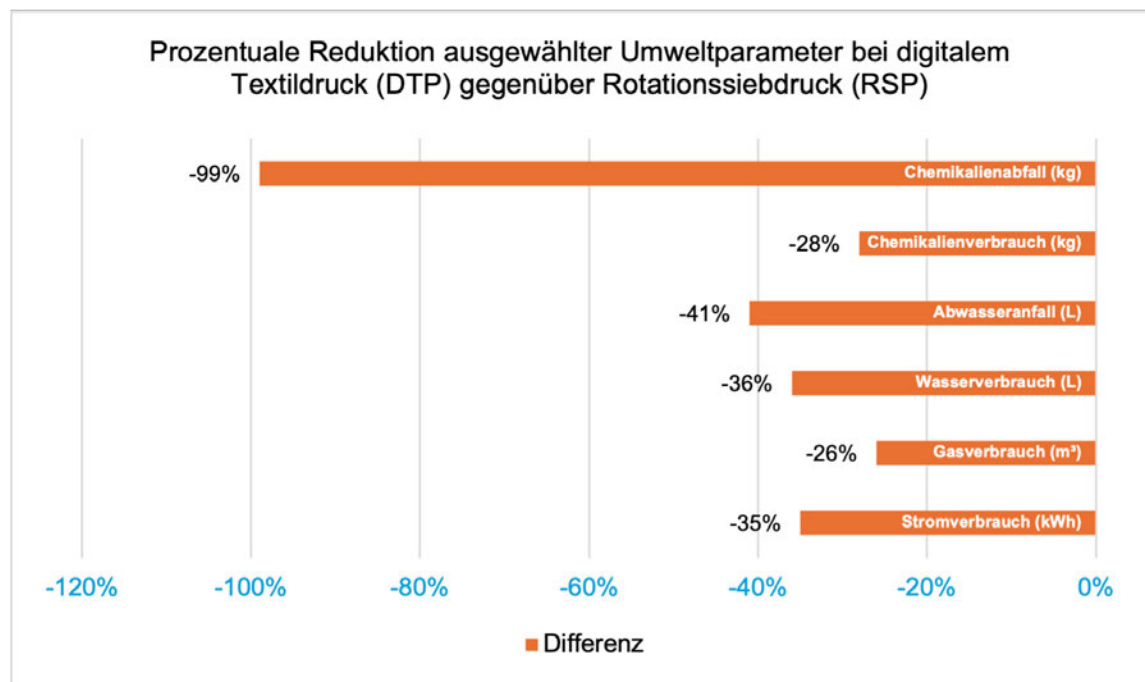


Abbildung 12: Prozentuale Reduktion ausgewählter Umweltparameter bei digitalem Textildruck (DTP) gegenüber Rotationssiebdruck (RSP) ¹⁷³

Der Wasserverbrauch beträgt beim Rotationssiebdruck 1.680,7 L pro 1.000 Laufmeter bedrucktem Baumwollgewebe. Für den digitalen Tintenstrahldruck wird

¹⁷³ Eigene Darstellung in Anlehnung an Azizul Hoque u. a. (2024); Darstellung der Absolutwerte in Anhang A2

gegenüber diesem Referenzverfahren eine Reduktion des Wasserverbrauchs um 36 % ausgewiesen.¹⁷⁴

Die angegebenen Wasserverbrauchswerte umfassen nicht nur den eigentlichen Druckvorgang, sondern den gesamten Prozess einschließlich der Nachbehandlung durch Dämpfen und Waschen. Der Dämfschritt zur Farbstofffixierung stellt dabei mit 602,7 L bei beiden Verfahren den größten Einzelposten des Wasserverbrauchs dar. Die Differenz zwischen Rotationssiebdruck (RSP) und digitalem Textildruck (DTP) resultiert folglich ausschließlich aus den druckspezifischen Prozessschritten – der Schablonen- beziehungsweise Druckpastenherstellung beim RSP und der Gewebevorbehandlung beim DTP – und nicht aus der bei beiden Verfahren identischen Nachbehandlung. Diese Einsparung ist auf zwei verfahrensbedingte Unterschiede zurückzuführen. Zum einen entfällt das für die Herstellung und Applikation der Druckpaste erforderliche Flottenvolumen. Zum anderen ist keine Schablonenreinigung notwendig, die beim Rotationssiebdruck einen wasserintensiven Prozessschritt darstellt.¹⁷⁵ Die Wasserreduktion ergibt sich somit aus der veränderten Prozessführung innerhalb des Druckverfahrens.

Methodisch ist zu berücksichtigen, dass die Studie den digitalen Textildruck ausschließlich mit dem Rotationssiebdruck vergleicht. Ein direkter Vergleich mit den in dieser Arbeit als Referenz herangezogenen Ausziehverfahren (Jigger- und Jet-Färbung) ist daher nicht möglich. Zudem beruhen die Ergebnisse auf Produktionsdaten eines einzelnen Unternehmens, sodass ihre Übertragbarkeit auf andere Produktionsstandorte nur eingeschränkt beurteilt werden kann. Die verwendete Bezugsgröße (Laufmeter Gewebe) lässt sich zudem nicht unmittelbar in die im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendete gewichtsbezogene Einheit (L/kg) umrechnen, da die Gewebebreite in der zugrunde liegenden Studie nicht angegeben ist. Die Vergleichbarkeit der beiden Verfahren RSP und DTP wird dadurch jedoch nicht beeinträchtigt, da beide innerhalb derselben Studie unter identischen Versuchsbedingungen untersucht wurden. Zur näherungsweisen Einordnung lässt sich der Wert dennoch anhand einer Beispielrechnung mit angenommenen, plausiblen Substratparametern veranschaulichen: Für ein Textil mit einem Flächengewicht von 200 g/m² und einer Rollenbreite von 1,5 m ergibt sich

¹⁷⁴ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

¹⁷⁵ Ebd.

für die untersuchten 1.000 Laufmeter ein Gesamtgewicht von 300 kg. Daraus errechnet sich ein spezifischer Wasserverbrauch von 5,60 L/kg (RSP) beziehungsweise 3,61 L/kg (DTP). Da diese Rechnung auf angenommenen statt auf den tatsächlichen Substratdaten der Creditex-Studie beruht, liefert sie jedoch nur eine grobe Orientierung.¹⁷⁶ Auffällig ist, dass beide Werte – auch der des konventionellen Rotationssiebdrucks – deutlich unter dem Referenzbereich der Ausziehverfahren (110-150 L/kg) liegen. Dies lässt darauf schließen, dass der Wasserverbrauch beim Druckverfahren anderen strukturellen Bedingungen unterliegt als beim Färben. Während beim Ausziehverfahren die gesamte Warenbahn im Flottenbad benetzt wird, beschränkt sich der Wasserbedarf beim Druck auf die tatsächlich bedruckte Fläche. Im Vergleich zur scCO₂-Färbung handelt es sich beim digitalen Textildruck ebenso wie bei den biobasierten Verfahren um eine Optimierung innerhalb eines wasserbasierten Prozesssystems.

Während die scCO₂-Färbung den Wasserverbrauch durch den vollständigen Ersatz des Prozessmediums grundsätzlich eliminiert, erzielen Colorifix sowie der digitale Textildruck, ihre Einsparungen durch eine effizientere Prozessführung, ohne die grundlegende wasserbasierte Verfahrenslogik zu verlassen.

6.3 Ressourcenproblem II: Energiebedarf

Der Energiebedarf konventioneller Verfahren resultiert, wie in Kapitel 4 dargestellt, vor allem aus den thermischen beziehungsweise dampfbasierten Anforderungen des Aufheizens, Trocknens und Fixierens. Im Folgenden wird geprüft, ob die alternativen Verfahren diese thermische Prozessführung strukturell vermeiden, innerhalb des bestehenden Systems reduzieren oder lediglich auf andere Prozessstufen beziehungsweise Energieträger verlagern.

scCO₂-Färbung

Als energetische Referenzgröße für konventionelle Ausziehverfahren wird in der Literatur ein spezifischer Wärmebedarf von 8-18 MJ/kg (entspricht: 2,22-5

¹⁷⁶ Eigene Berechnung auf Basis der Werte aus Azizul Hoque u. a. (2024)

kWh/kg) verarbeiteter Faser angegeben.¹⁷⁷ Der Energieverbrauch der scCO₂-Färbung wird häufig als zentraler Vorteil gegenüber konventionellen Hochtemperaturverfahren (HT-Verfahren) dargestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit herangezogene Experteneinschätzung relativiert diesen Vergleich jedoch: Nach Berechnungen des DTNW liegen beide Verfahren hinsichtlich Wärme- und Strombedarf bei etwa 4,5 kWh pro Kilogramm gefärbtem Polyester und sind damit energetisch vergleichbar.¹⁷⁸ Eine weitere Skalierung der Anlagen könnte zwar zu Effizienzgewinnen führen, insbesondere durch ein günstigeres Verhältnis von Energieeinsatz zu Substratmenge bei größeren Autoklaven. Der grundsätzliche Befund einer ähnlichen Energieintensität bleibt jedoch bestehen.¹⁷⁹

Der ökologische Vorteil der scCO₂-Färbung liegt somit nicht im Energieverbrauch, sondern in der Prozessstruktur: Durch den vollständigen Verzicht auf Wasser entfallen sowohl wasserbasierte Prozessschritte als auch die damit verbundenen Abwasser- und Chemikalienbehandlungen. Im Energiebereich stellt das Verfahren damit – im Gegensatz zum Wasserverbrauch – keine strukturelle Abweichung von der Prozessenergieintensität konventioneller Hochtemperaturverfahren dar.¹⁸⁰

Biobasierte Verfahren

Für biobasierte Färbeverfahren zeigt sich im Hinblick auf den Energiebedarf ein heterogenes Bild, das stark vom jeweiligen technologischen Ansatz abhängt.

Für das Colorifix-Verfahren weist eine vom Citeve durchgeführte Ökobilanz eine Reduktion des Stromverbrauchs um 35,94 % gegenüber dem konventionellen Referenzverfahren aus.¹⁸¹ Die Aussagekraft dieser Einsparungen ist durch die Systemgrenzen der Studie eingeschränkt, da der Fermentationsprozess zur Pigmentsynthese vollständig ausgeschlossen bleibt und sich die ausgewiesenen Werte allein auf den Färbeschritt beziehen.¹⁸² Daraus lässt sich ableiten, dass der tatsächliche Gesamtenergiebedarf des Colorifix-Verfahrens höher liegen dürfte als in dieser reinen Applikationsbilanz ausgewiesen.

¹⁷⁷ Vgl. Gong et al. 2021, zit. n. De Oliveira u. a. (2024)

¹⁷⁸ Vgl. Opwis (2026)

¹⁷⁹ Ebd.

¹⁸⁰ Ebd.

¹⁸¹ Vgl. Yarkoni u. a. (2022), S. 4

¹⁸² Vgl. Yarkoni u. a. (2022), S. 4 f.

Für EarthColors® (Archroma) ergeben sich im Hinblick auf den Energiebedarf keine grundlegenden Unterschiede zu konventionellen Verfahren. Da die Farbstoffe in bestehenden industriellen Anlagen ohne wesentliche prozesstechnische Anpassungen eingesetzt werden, bleibt die energiebezogene Prozessstruktur im Wesentlichen unverändert.¹⁸³ Potenzielle Einsparungen betreffen primär vorge-lagerte Stufen der Rohstoffgewinnung und Farbstoffsynthese und liegen damit außerhalb der in dieser Arbeit definierten Systemgrenzen.

Digitaldruck (DTP)

Für den digitalen Textildruck liefert die Creditex-Fallstudie auch im Energiebe-reich quantitative Vergleichswerte. Gegenüber dem konventionellen Rotations-siebdruck weist der Tintenstrahldruck eine Reduktion des Stromverbrauchs um 35 % sowie des Gasverbrauchs um 26 % auf.¹⁸⁴ Wie bereits in Abschnitt 6.2 erläutert, beziehen sich auch diese Werte auf den absoluten Druckauftrag (1.000 Laufmeter) und sind nicht unmittelbar in die an anderer Stelle dieser Arbeit ver-wendete gewichtsbezogene Einheit umzurechnen. Auf Basis der dort hergeleiteten Beispielrechnung (300 kg Gesamtgewicht) ergäbe sich näherungsweise ein spezifischer Energiebedarf von 1,79 kWh/kg (RSP) beziehungsweise 1,16 kWh/kg (DTP). Die Stromreduktion ist auf den Wegfall energieintensiver Prozess-schritte wie Schablonenherstellung und -reinigung zurückzuführen.¹⁸⁵

Die Reduktion des Gasverbrauchs ist hingegen nicht ausschließlich verfahrens-bedingt, sondern wesentlich durch die Anlagenkonfiguration bestimmt. Während im untersuchten Szenario der Digitaldruck mit einem elektrischen Trocknungs-system betrieben wurde, kam im Rotationssiebdruck ein gasbefeuetes System zum Einsatz.¹⁸⁶ Der ausgewiesene Vorteil ist daher nur eingeschränkt verallge-meinerbar und standortspezifisch zu interpretieren.

Zusammenfassend zeigt der Energievergleich ein anderes Muster als der Was-serververbrauch: Keine der untersuchten Technologien ermöglicht eine vollständige energetische Eliminierung, wie sie die scCO₂-Färbung hinsichtlich des

¹⁸³ Vgl. *Sustainability Report Archroma* (2024) (Herstellerangabe)

¹⁸⁴ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

¹⁸⁵ Eigene Berechnung auf Basis der Werte aus Azizul Hoque u. a. (2024) und der in Abschnitt 6.2 hergeleiteten Beispielrechnung

¹⁸⁶ So auch: Azizul Hoque u. a. (2024), aaO.

Prozesswassers erreicht. Stattdessen erzielen Colorifix und der digitale Textildruck prozessbedingte Effizienzgewinne, deren Aussagekraft aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen sowie standortspezifischer Rahmenbedingungen eingeschränkt ist. Die scCO_2 -Färbung weist im Energiebereich keinen strukturellen Vorteil auf. Ihre ökologische Relevanz ergibt sich vielmehr aus der vollständigen Substitution des Prozesswassers.

6.4 Ressourcenproblem III: Chemikalieneinsatz

Der Chemikalieneinsatz konventioneller Verfahren resultiert, wie in Kapitel 4 dargestellt, vor allem aus der elektrolytischen Farbstoffapplikation sowie dem Einsatz von Reduktions- und Alkalisierungsmitteln zur Fixierung und Nachbehandlung. Im Folgenden wird geprüft, ob die alternativen Verfahren diese chemikalienintensive Prozesslogik strukturell vermeiden oder lediglich innerhalb des bestehenden Systems reduzieren beziehungsweise auf andere Chemikalien verlagern.

scCO_2 -Färbung

Der Chemikalieneinsatz der scCO_2 -Färbung unterscheidet sich strukturell von konventionellen Ausziehverfahren. Wie in Kapitel 5.2 dargestellt, werden bei der Dispersionsfärbung mit scCO_2 weder Tenside noch Dispergiermittel, Reduktionsmittel oder Alkalisierungsmittel benötigt. Der Farbstoff wird direkt in das überkritische Medium eingebracht und diffundiert ohne chemische Hilfsstoffe in die Polymerstruktur der Faser. Da die Farbstofflöslichkeit im scCO_2 -Medium nicht durch ionische Wechselwirkungen vermittelt wird, entfällt auch der Einsatz von Elektrolyten vollständig. Überschüssiger Farbstoff fällt nach kontrollierter Druckentspannung als trockener Feststoff aus und kann zurückgewonnen werden, ohne dass chemisch belastetes Abwasser entsteht.¹⁸⁷

Diese Eigenschaft stellt, neben der Wasserfreiheit, die zweite strukturelle Prozessveränderung des scCO_2 -Verfahrens dar: Nicht nur das Prozessmedium, sondern auch die gesamte Hilfsmittelchemie des konventionellen Nassveredelungsprozesses entfällt systeminherent. Eine Verlagerung auf andere

¹⁸⁷ Vgl. Opwis (2026)

Chemikalien findet dabei nicht statt. Die einzige Einschränkung betrifft die Formulierung der eingesetzten Dispersionsfarbstoffe, die handelsüblich nicht vollständig hilfsmittelfrei sind. Im Prozess selbst sind jedoch keine zusätzlichen Substanzen erforderlich.¹⁸⁸

Biobasierte Verfahren

Für biobasierte Verfahren ergibt sich beim Chemikalieneinsatz ein heterogenes Bild, das zwischen erheblicher Reduktion, struktureller Veränderung und möglicher Verlagerung differenziert werden muss.

Für das Colorifix-Verfahren weist die Citeve-Ökobilanz eine Reduktion des Chemikalieneinsatzes um 66,36 % gegenüber dem konventionellen Referenzverfahren aus.¹⁸⁹ Im Hinblick auf den Chemikalieneinsatz stellt dies die höchste relative Reduktion der in diesem Kapitel betrachteten Verfahren dar. Sie resultiert aus dem integrierten biologischen Prozess, bei dem Farbstoffherstellung, Applikation und Fixierung in einem Schritt zusammengeführt werden, ohne den Einsatz von Salzen, Reduktions- oder Alkalisierungsmitteln. Zugleich ist analytisch zu differenzieren, dass sich die ausgewiesene Reduktion ausschließlich auf den Applikationsprozess bezieht und der vorgelagerte Fermentationsschritt zur Pigmentproduktion nicht in die Systemgrenze der Studie einbezogen wurde. Der Fermentationsprozess erfordert eigene Nährmedien-Substrate. In Abschnitt 5.3 genannt werden unter anderem Zucker, Peptide und Salze, deren Umweltwirkung in der ausgewiesenen Einsparung nicht vollständig erfasst ist, da die zugrunde liegende Ökobilanz den Fermentationsschritt explizit ausklammert.¹⁹⁰ Es stellt sich damit die Frage, ob der ausgewiesene Rückgang des Chemikalieneinsatzes eine echte Reduktion darstellt oder teilweise eine Verlagerung von Prozesschemikalien auf Fermentationssubstrate. Eine abschließende Bewertung ist auf Basis der vorliegenden Datenlage nicht möglich.

Für EarthColors® (Archroma) ist festzuhalten, dass die Farbstoffe zwar aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden, die Applikation jedoch auf bestehenden industriellen Anlagen mit weitgehend unveränderter Prozesschemie

¹⁸⁸ Vgl. Opwis (2026)

¹⁸⁹ Vgl. Yarkoni u. a. (2022)

¹⁹⁰ Ebd.

erfolgt.¹⁹¹ Sofern schwefelhaltige oder reaktive Farbstoffsysteme eingesetzt werden, bleibt die chemikalienintensive Nachbehandlung strukturell bestehen. Eine Reduktion des Chemikalieneinsatzes auf Applikationsebene ist damit nicht zu erwarten. Potenzielle Vorteile liegen ausschließlich in der Rohstoffbasis der Farbstoffe selbst.

Digitaldruck (DTP)

Für den Digitaldruck liefert die Creditex-Fallstudie auch beim Chemikalieneinsatz quantifizierte Vergleichswerte: Gegenüber dem konventionellen Rotationssiebdruck weist der Tintenstrahldruck eine Reduktion des Chemikalienverbrauchs um 28 % sowie eine Reduktion des Chemikalienabfalls um 99 % aus.¹⁹² Analog zu den in Abschnitt 6.2 und 6.3 diskutierten Werten beziehen sich auch diese Angaben auf den absoluten Druckauftrag und sind nicht unmittelbar auf eine gewichtsbezogene Einheit übertragbar.

Die Verbrauchsreduktion resultiert aus dem präzisen Drop-on-Demand-Prinzip, bei dem Tinte ausschließlich an den zu bedruckenden Stellen aufgetragen wird, ohne den beim RSP üblichen Überschuss an Druckpaste. Die nahezu vollständige Abfallreduktion ist strukturell bedingt: Da keine physischen Druckschablonen hergestellt und gereinigt werden müssen, entfällt der chemikalienintensive Reinigungsprozess, der im RSP erhebliche Mengen an Reinigungsmitteln und kontaminierten Abwässern erzeugt.

Gleichwohl ist auch hier eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Die im Digitaldruck eingesetzten Tintensysteme, beispielsweise Reaktiv-, Dispersions- oder Säuretinten, sind chemisch komplexe Formulierungen, die neben den eigentlichen Farbstoffen weitere Hilfsstoffe, wie beispielsweise Feuchthaltemittel zur Vermeidung des Eintrocknens der Tinte oder zur Stabilisierung ihrer Eigenschaften, enthalten können. Eine vollständige Reduktion der Chemikalienlast ist daher nicht gegeben. Vielmehr erfolgt eine partielle Verlagerung von volumenintensiven Druckpastenchemikalien hin zu den funktionellen Bestandteilen der Tintensysteme. Ob diese Verlagerung insgesamt zu einem ökologischen Vorteil führt, lässt sich auf Grundlage der verfügbaren Daten nicht abschließend beurteilen.¹⁹³

¹⁹¹ Vgl. *Archroma* (2023)

¹⁹² Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

¹⁹³ Vgl. zum Ganzen: Wang u. a. (2017)

6.5 Gesamtbewertung der Ressourceneffizienz

Die vergleichende Analyse der drei Ressourcendimensionen Wasserverbrauch, Energiebedarf und Chemikalieneinsatz bildet die Grundlage für die abschließende Gesamtbewertung der betrachteten alternativen Färbeverfahren. Die Auswahl dieser Dimensionen basiert auf ihrer zentralen Bedeutung für die Bewertung der Ressourcenintensität textiler Nassveredelungsprozesse. Sie sind quantitativ erfassbar, in der wissenschaftlichen Literatur sowie in relevanten Normen als wesentliche Bewertungsgrößen etabliert und stehen in direktem Zusammenhang mit den in Kapitel 2 dargestellten Umweltwirkungen der Textilfärberei.

Tabelle 3: Ressourcenprofil der betrachteten alternativen Verfahren im Überblick; Daten aus Lit.

Verfahren	Wasserverbrauch	Energiebedarf	Chemikalieneinsatz
scCO₂-Färbung	Strukturelle Elimination ¹⁹⁴	Vergleichbar mit HT-Verfahren (~4,5 kWh/kg) ¹⁹⁵	Strukturelle Elimination der Hilfsmittel ¹⁹⁶
Colorifix	-49,55 % (Applikationsschritt) ¹⁹⁷	-35,94% Strom (Applikationsschritt) ¹⁹⁸	-66,36% (Applikationsschritt) ¹⁹⁹
EarthColors® (Archroma)	Qualitativ reduziert (Herstellerangabe) (Vgl. Kapitel 6.2)	Kein struktureller Unterschied (Vgl. Kapitel 6.2/6.4)	Kein struktureller Unterschied auf der Applikationsebene (Vgl. Kapitel 6.2/6.4)
Digitaldruck (DTP)	-36% (vs. RSP) ²⁰⁰	-35% Strom, -26% Gas (vs. RSP) ²⁰¹	-28% Verbrauch, -99% Abfall (vs. RSP) ²⁰²

Anmerkung: Alle Prozentwerte beziehen sich auf den jeweils angegebenen Referenzprozess und die dort definierten Systemgrenzen. Vergleiche zwischen Verfahren mit unterschiedlichen Referenzsystemen sind nur eingeschränkt möglich.

¹⁹⁴ Vgl. De Oliveira u. a. (2024)

¹⁹⁵ Vgl. Opwis (2026)

¹⁹⁶ Ebd.

¹⁹⁷ Vgl. Yarkoni u. a. (2022)

¹⁹⁸ Ebd.

¹⁹⁹ Ebd.

²⁰⁰ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

²⁰¹ Ebd.

²⁰² Ebd.

Keines der betrachteten Verfahren löst alle drei strukturellen Ressourcenprobleme gleichzeitig und vollständig. Die scCO₂-basierte Färbung adressiert Wasserverbrauch und Chemikalieneinsatz strukturell, weist beim Energiebedarf jedoch eine mit konventionellen HT-Verfahren vergleichbare Bilanz auf – der ökologische Vorteil liegt nicht in der Energieeinsparung, sondern in der Vermeidung chemisch belasteten Abwassers und seiner energieintensiven Behandlung. Die biobasierten Verfahren optimieren alle drei Dimensionen in unterschiedlichem Ausmaß, ohne jedoch eine strukturelle Lösung zu bieten. Bei Colorifix verhindert zudem eine erhebliche Datenlücke beim vorgelagerten Fermentationsprozess eine abschließende Gesamtbilanzierung. Der digitale Textildruck reduziert den Ressourcenverbrauch durch eine veränderte Applikationslogik, ohne die zugrunde liegenden Prozessmedien zu verändern, und ist zudem nur eingeschränkt mit den Färbeverfahren des konventionellen Referenzsystems vergleichbar.

Diese Befunde deuten darauf hin, dass eine vollständige Substitution konventioneller Verfahren durch ein einzelnes alternatives Verfahren auf absehbare Zeit nicht realistisch erscheint. Vielmehr zeichnet sich ab, dass unterschiedliche alternative Ansätze unterschiedliche strukturelle Herausforderungen adressieren und dass eine substanzielle Verbesserung der Ressourcenbilanz möglicherweise eine Kombination mehrerer Ansätze erfordert, abhängig von Faserart, Farbstoffklasse und Produktionskontext. Die Ursachen für die bislang begrenzte industrielle Etablierung alternativer Verfahren trotz ihrer bestehenden Potenziale werden im folgenden Kapitel 7 untersucht.

7 Grenzen und Herausforderungen

Trotz der in Kapitel 6 aufgezeigten Ressourcenpotenziale haben sich die untersuchten Verfahren bislang nur begrenzt industriell etabliert. Die Betrachtung konzentriert sich auf drei zentrale Einflussbereiche, die ihre Marktdurchdringung begrenzen: technologische Grenzen, wirtschaftliche Aspekte einschließlich der Skalierbarkeit sowie Markt- und Akzeptanzfaktoren.

7.1 Technologische Grenzen

Eine wesentliche technologische Hürde liegt in der begrenzten Kompatibilität der alternativen Verfahren mit unterschiedlichen Faser- und Farbstoffsystemen. Im Gegensatz zu konventionellen Färbeverfahren, die ein breites Spektrum an Substraten und Farbstoffklassen abdecken, ist jedes der untersuchten Verfahren an spezifische Material- oder Prozessbedingungen gebunden. Diese eingeschränkte Anwendungsbreite begrenzt ihre industrielle Einsetzbarkeit.

Am deutlichsten tritt dies bei der scCO_2 -Färbung hervor: Das unpolare scCO_2 -Medium schließt die direkte Anwendung ionischer Reaktivfarbstoffe auf Cellulosefasern strukturell aus, da diese aufgrund ihrer ionischen Gruppen nicht in scCO_2 löslich sind.²⁰³ Forschungsarbeiten zeigen zwar, dass eine Einbadfärbung von Polyester-Baumwolle-Mischgeweben unter Einsatz eigens synthetisierter reaktiver Dispersionsfarbstoffe grundsätzlich möglich ist.²⁰⁴ Dieser Ansatz widerspricht jedoch dem Grundprinzip des Verfahrens, kommerziell verfügbare Farbstoffe ohne zusätzliche Aufbereitung einzusetzen. Das Farbstoffspektrum bleibt damit auf lipophile Dispersionsfarbstoffe für hydrophobe Synthesefasern beschränkt.²⁰⁵ Hinzu kommt die anlagentechnische Komplexität, da die Prozessführung bei bis zu 350 bar spezialisierte Hochdruckanlagen erfordert, die sich grundlegend von konventionellen Färbemaschinen unterscheiden und ein hohes Maß an technischer Expertise voraussetzen.²⁰⁶ Die am DTNW in Zusammenarbeit mit dem Anlagenbauer UHDE errichtete Pilotanlage erreichte beispielsweise

²⁰³ Vgl. Opwis (2026)

²⁰⁴ Ebd.

²⁰⁵ Vgl. Abou Elmaaty & Abd El-Aziz (2018)

²⁰⁶ Vgl. Feil (2004)

einen Maximaldruck von 280 bar.²⁰⁷ Zusätzlich erschwert die mit jeder Modesaison wechselnde Farbnuancierung den wirtschaftlichen Betrieb: Da jede neue Rezeptur eine erneute Prozessanpassung erfordert, eignet sich das Verfahren primär für große, farblich invariante Chargen und weniger für die kurzfristigen Sortimentswechsel der Modeindustrie.²⁰⁸

Für biobasierte Färbeverfahren liegen die technologischen Grenzen deutlich anders als bislang dargestellt – bezogen auf Colorifix und EarthColors® als die beiden im Rahmen dieser Arbeit vertieft betrachteten Verfahren. Bei Colorifix beruht die Farbstoffproduktion auf der Fermentation gentechnisch programmierter Mikroorganismen, die ein natürliches Pigment erzeugen.²⁰⁹

Die Faser wird dabei jedoch nicht direkt im Fermentationsprozess gefärbt: Der biologisch erzeugte Farbstoff wird anschließend mit derselben konventionellen Jet-Färbetechnik appliziert, die auch im Referenzprozess zum Einsatz kommt. Technologisch ersetzt die bioreaktorbasierte Infrastruktur damit nur die Farbstoffsynthese, nicht die -applikation. Die eigentliche Färbung bleibt an die konventionelle Anlagentechnik gebunden. Dies zeigt sich auch an der im Rahmen der Citeve-LCA durchgeführten Untersuchung, die an einem Partnerbetrieb stattfand, der sowohl einen für den Colorifix-Prozess vorgesehenen Fermentor als auch dieselbe Jet-Färbeanlage wie im konventionellen Vergleichsprozess einsetzte.²¹⁰

Offen bleibt dabei, wie sich die pro Fermentationszyklus erzielbare Farbstoffkonzentration im Vergleich zu synthetischen Farbstoffen verhält – hierzu liegt keine belastbare Quelle vor.

Bei EarthColors® ergibt sich die technologische Grenze aus der Rohstoffbasis selbst: Die Pigmente werden aus spezifischen, nicht verzehrbaren Reststoffströmen der Agrar- und Lebensmittelindustrie gewonnen, etwa aus Mandelschalen, Baumwollpflanzenresten, Rückständen der Grapefruit- und Bitterorangenverarbeitung sowie aus Zuckerrübenresten.²¹¹ Anders als bei synthetischen

²⁰⁷ So auch: Opwis (2026)

²⁰⁸ Vgl. Feil (2004)

²⁰⁹ Vgl. Periyasamy & Periyasami (2023)

²¹⁰ Yarkoni u. a. (2022)

²¹¹ Vgl. *Sustainability Report Archroma* (2024)

Farbstoffen, deren Ausgangsstoffe standardisiert und großindustriell verfügbar sind, ist die Farbstoffproduktion damit an die Verfügbarkeit und Konsistenz dieser spezifischen, meist regional gebundenen Reststoffströme gekoppelt.²¹² Das erzielbare Farbtonspektrum ist entsprechend auf sechs Farbtöne im warmen, erdigen Bereich begrenzt, die sich aus der Eigenfarbe der jeweiligen Reststoffe ergeben. Zudem eignet sich das Verfahren ausschließlich für cellulosische Fasern wie Baumwolle, Viskose, Leinen, Bambus und Kapok – eine Einsetzbarkeit auf Synthefasern, wie sie etwa bei der scCO₂-Färbung für Polyester besteht, ist damit nicht gegeben.²¹³

Der Digitaldruck weist technologische Grenzen insbesondere im Bereich der Produktionsgeschwindigkeit auf. Bei Großauflagen ist die Druckleistung digitaler Systeme dem Rotationssiebdruck deutlich unterlegen, wodurch der Einsatz im Massenproduktionssegment eingeschränkt ist. Die Technologie befindet sich trotz erster kommerzieller Anwendungen seit den 1980er-Jahren weiterhin in einer frühen Adoptionsphase.²¹⁴ Zusätzlich erfordert das Verfahren eine Substratvorbehandlung, die einen weiteren Prozessschritt darstellt und die erzielten Effizienzgewinne teilweise wieder reduziert.²¹⁵ Zudem besteht ein technischer Zielkonflikt zwischen Druckgeschwindigkeit und erreichbarer Detailgenauigkeit: Die kurze Kontaktzeit zwischen Farbstoff und Faser lässt insbesondere bei Naturfasern nicht immer ausreichend Zeit für eine vollständige Diffusion des Farbstoffs, was die Fixierquote und Designpräzision im Vergleich zu konventionellen Verfahren verringern kann.²¹⁶

7.2 Wirtschaftliche Aspekte und Skalierbarkeit

Ein grundlegendes Muster, das sich bei mehreren der betrachteten alternativen Verfahren zeigt, lässt sich mit dem in der Innovationsforschung gebräuchlichen Begriff des „Tal des Todes“ (valley of death) beschreiben: Forschungsergebnisse, die im Labor- oder halbertechnischen Maßstab erfolgreich erprobt wurden, schaffen den Übergang in die industrielle Anwendung häufig nicht, weil die dafür

²¹² Vgl. *Archroma* (2023)

²¹³ Ebd.

²¹⁴ Vgl. Azizul Hoque u. a. (2024)

²¹⁵ Ebd.

²¹⁶ So auch: Catarino u. a. (2025)

notwendige, von der Industrie finanzierte Maßstabsvergrößerung ausbleibt.²¹⁷ Dieses Muster lässt sich auch auf die in dieser Arbeit betrachtete scCO₂-Färbung und auf biobasierte Verfahren übertragen, bei denen technisch vielversprechende Forschungsergebnisse bislang nicht in eine breite industrielle Anwendung überführt wurden.

Der wirtschaftliche Engpass der scCO₂-Färbung liegt konkret in den hohen Investitionskosten für die erforderliche Hochdruckanlagentechnik. Diese Kosten sinken auch bei einer Vergrößerung des Anlagenmaßstabs nicht wesentlich: Größere Autoklaven reduzieren zwar das Investitionsvolumen bezogen auf die umsetzbare Masse, das Verfahren bleibt jedoch eine Hochpreistechnologie, bei der mit steigendem Maßstab tendenziell eher höhere als niedrigere Anschaffungskosten anfallen.²¹⁸ Eine klassische Kostendegression durch Skaleneffekte, wie sie bei etablierten Technologien zu erwarten wäre, tritt damit nur eingeschränkt ein.

Vor diesem Hintergrund ist die Insolvenz von DyeCoo Textile Systems im Dezember 2025 exemplarisch: Das niederländische Unternehmen war über anderthalb Jahrzehnte hinweg einer der wenigen industriellen Anbieter kommerzieller scCO₂-Färbeanlagen und wurde nach Jahren wirtschaftlicher Verluste trotz Investitionen von Nike und IKEA für insolvent erklärt.²¹⁹ Das Unternehmen hatte den industriellen Maßstab für die Polyesterfärbung nachweislich erreicht und rund 95 % des eingesetzten scCO₂ im Kreislauf zurückgewonnen.²²⁰ Der Fall zeigt exemplarisch, dass die technische Bewährung eines alternativen Färbeverfahrens keine hinreichende Bedingung für dessen wirtschaftliche Tragfähigkeit darstellt.

Für biobasierte Verfahren stellt sich die wirtschaftliche Ausgangslage bei Colorifix und EarthColors® unterschiedlich dar. Bei Colorifix entspricht die notwendige Bioreaktor-Infrastruktur einer eigenen Investitionskategorie, die sich grundlegend von den Hochdruckanlagen der scCO₂-Färbung unterscheidet, jedoch in ihrer Aufbauphase vergleichbar kapitalintensiv sein dürfte; belastbare Kostendaten

²¹⁷ Vgl. Opwis (2026)

²¹⁸ Ebd.

²¹⁹ Vgl. IO+ (2025)

²²⁰ Vgl. De Oliveira u. a. (2024)

hierzu liegen nicht vor. Denkbar sind zudem regulatorische Zusatzkosten, sofern Märkte wie die EU biotechnologisch hergestellte Produkte strengeren Zulassungs- oder Kennzeichnungsanforderungen unterwerfen als konventionelle Farbstoffe – auch dies wäre gesondert zu belegen. Bei EarthColors® ergibt sich ein anderer Kostenfaktor: Da die Rohstoffe aus spezifischen, geografisch gebundenen Reststoffströmen stammen (unter anderem Mandelschalen aus Katalonien, Baumwollreste aus den USA, Zitrusreste aus Südspanien), entsteht ein Logistikaufwand für Sammlung und Aufbereitung, der bei standardisierten Lieferketten synthetischer Farbstoffe in dieser Form nicht existiert.²²¹

Beim Digitaldruck liegt eine wirtschaftliche Herausforderung im Tintenpreis: Die für den Inkjet-Druck formulierten Tinten sind pro Kilogramm deutlich teurer als konventionelle Druckpasten, da sie ein aufwendigeres Formulierungsverfahren erfordern. Ob sich dieser höhere Stückpreis durch den in Abschnitt 6.4 gezeigten geringeren Gesamtverbrauch (–28 % gegenüber RSP) vollständig kompensieren lässt, ist auf Basis der verfügbaren Daten nicht abschließend zu beurteilen – für eine verlässliche Gesamtkostenbewertung wäre ein direkter Vergleich der tatsächlichen Materialkosten pro Druckauftrag erforderlich. Forschung und Entwicklung (F&E) konzentrieren sich daher auf die Senkung der Tintenkosten sowie auf die Verbesserung von Druckkopfleistung und Systemperformance. Wirtschaftlich vorteilhaft ist der Digitaldruck bislang vor allem bei Kleinauflagen und komplexen, farbintensiven Designs, während er bei standardisierter Massenproduktion dem Rotationssiebdruck unterlegen bleibt.²²²

7.3 Markt- und Akzeptanzprobleme

Neben technologischen und wirtschaftlichen Hürden wirken sich auch strukturelle Marktfaktoren hemmend auf die Verbreitung der untersuchten Verfahren aus. Bei der scCO₂-Färbung zeigt sich dies exemplarisch: Trotz nachgewiesener technischer Funktionsfähigkeit bleibt die industrielle Verbreitung gering, da sich

²²¹ Vgl. *Archroma* (2023)

²²² Vgl. zum Ganzen: Azizul Hoque u. a. (2024)

angesichts des ungünstigen Verhältnisses zwischen Investitionskosten und erzielbarem Nutzen nur wenige Unternehmen an eine Umstellung wagen.²²³

Bei der scCO₂-Färbung zeigt sich die bestehende Marktproblematik anhand zweier Aspekte: Einerseits verdeutlicht die frühzeitige Beteiligung von Unternehmen wie Nike und IKEA in den Jahren nach der Unternehmensgründung 2008 ein grundsätzliches industrielles Interesse an der Technologie.²²⁴ Andererseits blieb die tatsächliche industrielle Verbreitung der Technologie deutlich hinter diesem Interesse zurück: Bis Ende 2018 waren weltweit lediglich zwölf DyeCoo-Anlagen in Taiwan, Thailand und Vietnam in Betrieb.²²⁵ Die Insolvenz von DyeCoo Ende 2025 zeigt zudem, dass das Interesse einzelner großer Marken allein nicht ausreicht, um eine breite Marktdurchdringung und eine erfolgreiche industrielle Etablierung einer Technologie sicherzustellen.²²⁶

Bei biobasierten Verfahren zeigt sich ein deutlicher Kontrast zwischen Colorifix und EarthColors® hinsichtlich ihrer regulatorischen und marktseitigen Ausgangslage. Colorifix unterliegt als gentechnisches Verfahren den regulatorischen Rahmenbedingungen für gentechnisch veränderte Organismen (GVO): Die eingesetzten Mikroorganismen werden von der Europäischen Kommission als sogenannte Class-1-Aktivität eingestuft, die mit einem vernachlässigbaren Risiko verbunden ist. Im abschließenden Verarbeitungsschritt werden sämtliche Mikroorganismen durch die in Kapitel 5.3 beschriebene Wärmebehandlung inaktiviert und die Biomasse vollständig aus dem gefärbten Textil ausgewaschen, sodass ein GVO-freies Endprodukt entsteht. Erste Markteinführungen erfolgten in Kooperation mit H&M und Pangaia, weitere Kooperationen mit Handels-, Luxus- und Sportswear-Marken sind laut Unternehmensangaben in Vorbereitung.²²⁷

Bei EarthColors® zeigt sich dagegen eine andere Marktdynamik: Das Upcycling nicht verzehrbarer Reststoffe lässt sich als vermarktungsfähiges Nachhaltigkeits- und Kreislaufwirtschaftsnarrativ nutzen und wurde bereits in mehreren Markenkooperationen aktiv kommuniziert, unter anderem mit Ternua, Kathmandu und

²²³ Vgl. Opwis (2026)

²²⁴ Vgl. IO+ (2025)

²²⁵ So auch: Banchemo (2020)

²²⁶ Vgl. IO+ (2025)

²²⁷ Vgl. Cobb (2022)

G-Star RAW.²²⁸ Damit unterscheidet sich die Marktpositionierung von EarthColors® deutlich von der eher technisch-neutralen Positionierung der scCO₂-Färbung. Eine Gemeinsamkeit beider biobasierter Verfahren besteht darin, dass ihre Marktdurchdringung bislang vor allem durch einzelne Pilotkollektionen und Markenkooperationen geprägt ist, während eine breite industrielle Etablierung noch aussteht.

Der Digitaldruck ist im Marktsegment der Kleinauflagen und des Modedesigns bereits weitgehend akzeptiert, konnte sich im Bereich der textilen Massenproduktion jedoch bislang nicht durchsetzen: Mit einem Marktanteil von rund 11 % gegenüber etwa 65 % beim Rotationssiebdruck bleibt er trotz nachgewiesener ökologischer Vorteile ein Nischenverfahren gegenüber der weiterhin dominierenden konventionellen Technik. Als Hauptbarriere für eine breitere Adoption gelten dabei nach wie vor die Tintenkosten.²²⁹ Die in Abschnitt 7.2 dargestellte wirtschaftliche Stärke des Digitaldrucks gerade in diesem Marktsegment relativiert die Nischenposition allerdings teilweise: Sie deutet weniger auf eine generelle technologische Unterlegenheit hin als auf eine Spezialisierung auf ein ökonomisch abgrenzbares Segment.

²²⁸ Vgl. *Archroma* (2023)

²²⁹ Vgl. zum Ganzen: Azizul Hoque u. a. (2024)

8 Fazit und Ausblick

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.2 formulierten Zielsetzung, konventionelle und alternative Färbeverfahren hinsichtlich ihres Beitrags zu einer ressourcenschonenderen Textilproduktion zu untersuchen, lassen sich die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wie folgt zusammenfassen und einordnen.

Die Arbeit analysiert alternative Färbeverfahren der Textilindustrie im Hinblick auf ihre ökologischen Potenziale, technischen Restriktionen sowie ihre industrielle Implementierbarkeit im Vergleich zu konventionellen Prozessen. Betrachtet wurden insbesondere die scCO_2 -basierte Färbung, biobasierte Färbeverfahren sowie der digitale Textildruck als alternative Prozessansätze.

Die vergleichende Analyse in Kapitel 6 zeigt, dass keines der drei untersuchten Verfahren alle drei Ressourcendimensionen Wasser, Energie und Chemikalien gleichzeitig und strukturell löst. Die scCO_2 -Färbung reduziert insbesondere den Wasserverbrauch deutlich, bleibt jedoch hinsichtlich der Verarbeitung von Cellulosefasern eingeschränkt. Die biobasierte Färbung (Colorifix und EarthColors®) ermöglicht eine Reduktion konventioneller Prozesschemikalien, weist jedoch Defizite in der Farbstofffixierung und den Echtheitseigenschaften auf. Der digitale Textildruck reduziert Chemikalien- und Abwasserströme erheblich, ist jedoch funktional auf dekorative Anwendungen begrenzt und ersetzt keine vollumfänglichen Durchfärbeprozesse. Die jeweiligen Potenziale und Grenzen sind in der Gesamtbewertung in Kapitel 6.5 im Detail dargestellt. In der Gesamtschau zeigt sich, dass die betrachteten Verfahren weder eine universelle Lösung noch Substitute darstellen. Vielmehr handelt es sich um komplementäre Technologien mit klar abgegrenzten Anwendungsfeldern, deren Optimierung jeweils einzelne Teilaspekte der textilen Wertschöpfung adressiert. Das konventionelle Referenzsystem bleibt daher trotz bestehender ökologischer Nachteile weiterhin industrieller Standard, insbesondere aufgrund ausgereifter Prozessstabilität, Skaleneffekte und wirtschaftlicher Effizienz.

Kapitel 7 verdeutlicht darüber hinaus, dass die bislang begrenzte industrielle Verbreitung alternativer Färbeverfahren nicht primär auf eine mangelnde technische Funktionsfähigkeit zurückzuführen ist. Ausschlaggebend sind vielmehr strukturelle Zielkonflikte. Zentrale Divergenzen bestehen zwischen ökologischer

Zielsetzung und wirtschaftlicher Tragfähigkeit, da die Mehrkosten alternativer Verfahren – wie am Beispiel der scCO_2 -Färbung gezeigt – nicht durch Skaleneffekte kompensiert werden können. Ein weiterer Zielkonflikt besteht zwischen Ressourceneffizienz und Produktqualität, etwa aufgrund farbmetrischer Abweichungen (ΔE) in Low-Liquor-Prozessen. Hinzu tritt ein Spannungsfeld zwischen technologischer Spezialisierung und universeller Einsetzbarkeit: Die faserabhängige Spezifität zahlreicher Technologien verhindert eine universelle Anwendbarkeit über unterschiedliche Substratklassen hinweg, während die unzureichende industrielle Skalierbarkeit vieler Ansätze deren breite Implementierung zusätzlich limitiert, da Labor- und Pilotresultate nur eingeschränkt auf Produktionsmaßstäbe übertragbar sind.

Auch die Aussagekraft der zugrunde liegenden Datenbasis ist differenziert zu bewerten. Life-Cycle-Assessment-Studien sind häufig kontext- und standortabhängig und damit nur eingeschränkt übertragbar. Zusätzlich wird die Vergleichbarkeit durch heterogene funktionelle Einheiten sowie unterschiedliche Systemgrenzen eingeschränkt. Unternehmensinterne LCA-Daten sind darüber hinaus potenziell interessengeleitet und daher kritisch zu interpretieren. Insbesondere im Bereich innovativer Verfahren wie der enzymatischen Färbung besteht eine ausgeprägte Datenlücke auf industrieller Ebene, sodass zentrale Aussagen vielfach auf Labor- oder Pilotmaßstäben beruhen. Diese methodischen Einschränkungen werden zudem durch zeitliche Inkonsistenzen zwischen den zugrunde liegenden Studien und unterschiedliche Energiemixe verstärkt.

Diese Befunde legen ein wiederkehrendes Muster nahe: Technische Funktionsfähigkeit und teils erhebliche ökologische Vorteile allein genügen offenbar nicht, um eine breite industrielle Umstellung auszulösen. Der Fall DyeCoo verdeutlicht dies exemplarisch. Das Unternehmen hatte den industriellen Maßstab nachweislich erreicht und rund 95 % des eingesetzten scCO_2 zurückgewonnen, scheiterte jedoch wirtschaftlich. Dagegen ließe sich einwenden, dass nicht alle betrachteten Verfahren gleichermaßen marktreif sind. Bei Colorifix bestehen beispielsweise noch Defizite hinsichtlich der Farbstofffixierung und der Echtheitseigenschaften. Die bislang begrenzte Verbreitung lässt sich daher teilweise auch auf die noch nicht vollständige technische Reife zurückführen.

Dieser Einwand relativiert die zugrunde liegende These jedoch nicht grundsätzlich. Gerade die scCO_2 -Färbung – als das in dieser Arbeit technisch am weitesten

entwickelte und industriell bereits erprobte Verfahren – verdeutlicht am Beispiel von DyeCoo, dass selbst eine nachgewiesene technische Funktionsfähigkeit und erste kommerzielle Etablierung nicht zwangsläufig zu einer breiten Marktdurchsetzung führen. Ausschlaggebend ist vielmehr, dass die bislang nicht internalisierten Umweltfolgekosten konventioneller Referenzsysteme ressourcenschonendere Alternativen wirtschaftlich benachteiligen, solange diese externen Kosten nicht im Marktpreis berücksichtigt werden.

Auch bei den biobasierten Verfahren und beim Digitaldruck bleibt die Marktdoption bislang auf einzelne Pilotprojekte und Markenkooperationen beschränkt, obwohl die ökologischen Potenziale in dieser Arbeit belegt wurden. Naheliegender als die Annahme, die Technologien seien schlicht noch nicht ausgereift genug, erscheint daher die Deutung, dass es an begleitenden politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen fehlt. Solange sich die Umweltfolgekosten konventioneller Verfahren nicht in deren Marktpreis niederschlagen und solange keine verbindlichen Grenzwerte für Wasser-, Energie- und Chemikalienverbrauch in der textilen Lieferkette bestehen, bleibt der wirtschaftliche Anreiz zur Umstellung auf ressourcenschonendere Alternativen gering – unabhängig davon, wie ausgereift diese technisch bereits sind.

Diese Einschätzung deckt sich auch mit der Position des im Rahmen dieser Arbeit befragten Experten Dr. Klaus Opwis: Auf die Frage, welche Rahmenbedingungen sich ändern müssten, damit sich alternative Verfahren wie die scCO₂-Färbung am Markt durchsetzen, verweist er explizit auf eine Verteuerung der wasserbasierten Färberei – etwa durch eine strengere CO₂-Bepreisung oder eine erschwerte bzw. teurere Abwasserbehandlung – als Voraussetzung dafür, dass sich die Investitionskosten alternativer Anlagen über deren gesamte Laufzeit wirtschaftlich rechnen. Auch aus fachlicher Sicht wird die begrenzte industrielle Verbreitung damit weniger auf technologische Unreife als auf fehlende ökonomische und regulatorische Anreizstrukturen zurückgeführt. Die Analyse legt somit nahe, dass die begrenzte industrielle Verbreitung der untersuchten Verfahren weniger auf technologische Einschränkungen als vielmehr auf politisch-ökonomische Rahmenbedingungen zurückzuführen ist.

Für die künftige Entwicklung ergibt sich daraus ein zweiteiliger Handlungsbedarf. Zum einen konzentriert sich der Forschungsbedarf insbesondere auf die Erweiterung der scCO₂-Färbung auf Cellulosefasern, die Skalierung enzymatischer

Prozesse unter industriellen Bedingungen sowie die Verbesserung der Prozessstabilität alternativer Systeme. Perspektivisch erscheint vor allem die Kombination verschiedener Verfahren vielversprechend, um technologische Einzelgrenzen systematisch zu kompensieren und hybride Prozesslösungen zu ermöglichen.

Zum anderen bleibt die in Kapitel 7.2 aufgezeigte strukturelle Hürde bestehen, dass vielversprechende Forschungsergebnisse häufig am Übergang in die industrielle Anwendung scheitern, weil die dafür nötige, von der Industrie finanzierte Maßstabsvergrößerung ausbleibt (das sogenannte „Tal des Todes“). Ob und wie sich dieses Hemmnis für die in dieser Arbeit betrachteten Verfahren künftig auflösen lässt, bleibt aus heutiger Sicht offen. Zusätzlich fehlt es weiterhin an belastbaren industriellen Daten, insbesondere zu vorgelagerten Prozessstufen wie der Fermentation bei biobasierten Verfahren. Zukünftige Studien sollten hier ansetzen, um die in dieser Arbeit aufgezeigten Datenlücken zu schließen.

Ergänzend stellt die Färbung in ionischen Flüssigkeiten einen weiterführenden Forschungsansatz dar, der über die vertieft betrachteten Verfahren hinausgeht und im Rahmen des für diese Arbeit geführten Experteninterviews mit Herrn Dr. Klaus Opwis ebenfalls kurz angesprochen wurde.²³⁰ Aktuelle Forschungsarbeiten zeigen, dass sich ionische Flüssigkeiten bereits erfolgreich zur Färbung von Hochleistungsfasern wie PET-²³¹ und m-Aramidfasern²³² einsetzen lassen. Der Einsatz wasserfreier, thermisch stabiler Lösungsmittel ermöglicht dabei prinzipiell energie- und ressourceneffiziente Hochtemperaturprozesse ohne klassische Druckapparate sowie mit reduziertem Einsatz von Hilfs- und Carrierchemikalien.²³³ Ungelöst bleibt bislang die Rückgewinnung und das Recycling der eingesetzten ionischen Flüssigkeiten, was eine zentrale Hürde für die industrielle Implementierung darstellt.²³⁴ Trotz fehlender Einordnung in die vergleichende Hauptanalyse verdeutlicht dieser Ansatz das erhebliche Innovationspotenzial jenseits etablierter Verfahren und markiert einen relevanten Ausgangspunkt für zukünftige Forschung.

²³⁰ Vgl. Opwis (2026)

²³¹ Vgl. Opwis u. a. (2017)

²³² So auch: Opwis u. a. (2020)

²³³ Im Ergebnis ebenso: Opwis u. a. (2017)

²³⁴ Vgl. Opwis (2026)

Die eingangs beschriebene Ausstellung „Waterpressure“ und das dort vorgestellte Unternehmen Colorifix bildeten den Ausgangspunkt für die Auseinandersetzung mit dieser Thematik. Die vorliegende Arbeit zeigt jedoch, dass sich hinter diesem ersten Eindruck ein differenziertes Spektrum technologischer Ansätze verbirgt, die jeweils spezifische und klar begrenzte Beiträge zur Ressourcenschonung leisten. Die Zukunft der Textilfärberei liegt daher weniger in einer einzelnen, die Branche grundlegend verändernden Lösung als vielmehr in der gezielten Kombination komplementärer Verfahren. Deren Potenziale können jedoch nur ausgeschöpft werden, wenn geeignete regulatorische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen ihre industrielle Umsetzung und breite Marktdurchdringung ermöglichen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] **A new way to see colour** (2026), IKEA, <https://www.ikea.com/global/en/stories/sustainability/innovation-ventures-colorifix-250716/> [letzter Zugriff: 8.06.2026]
- [2] **Abeer, J. J. E., Islam, M. I., Dola, D. R., Haq, H. M., Biswas, H., & Hossain, M. M.** (2026), Reducing water and energy consumption in sustainable cotton dyeing using a low liquor ratio process, *Discover Chemistry*, S. 1-23, <https://doi.org/10.1007/s44371-026-00506-x>
- [3] **Abou Elmaaty, T., & Abd El-Aziz, E.** (2018), Supercritical carbon dioxide as a green media in textile dyeing: A review, *Textile Research Journal*, 88(10), S. 1184-1212, <https://doi.org/10.1177/0040517517697639>
- [4] **Archroma** (2023), https://www.archroma.com/uploads/files/Archroma_EarthColors_230130_OPTIMIZED-PDF_002.pdf [letzter Zugriff: 01.07.2026]
- [5] **Atav, R., Buğdaycı, B., Bozkurt, Ö., Yıldız, A., Güneş, E., & Yakın, İ.** (2022), Laccase-catalyzed enzymatic dyeing of cotton fabrics. *Textile Research Journal*, 92(17–18), S. 2980-3015
<https://doi.org/10.1177/00405175211006937>
- [6] **Awuah, E.** (2006), *Pathogen removal mechanisms in macrophyte and algal waste stabilization ponds* [Dissertation, Wageningen University], <https://doi.org/10.18174/32925>
- [7] **Azizul Hoque, S. M., Chapman, L. P., Moore, M., Lavelle, J., Saloni, D., Woodbridge, J., & Maguire King, K.** (2024), Environmental Sustainability Analysis of Rotary-Screen Printing and Digital Textile Printing, *AATCC Journal of Research*, 11(6), S. 464-473, <https://doi.org/10.1177/24723444241275996>

- [8] **Banchero, M.** (2020), Recent advances in supercritical fluid dyeing. *Coloration Technology*, 136(4), S. 317-335, <https://doi.org/10.1111/cote.12469>
- [9] **Bechthold, T., & Pham, T.** (2023), *Textile Chemistry*, Walter de Gruyter
- [10] **Behr, D., & Hanisch, I.** (1981), *Grundlagen der Textilchemie* (3. Auflage), VEB Fachbuchverlag Leipzig
- [11] **Bobeth, W.** (Hrsg.) (1993), *Textile Faserstoffe: Beschaffenheit und Eigenschaften* (1. Auflage), Springer
- [12] **Broadbent, A. D.** (2001), *Basic principles of textile coloration*, Society of Dyers and Colourists
- [13] **Burkinshaw, S. M.** (2024), The roles of elevated temperature and carriers in the dyeing of polyester fibres using disperse dyes: Part 1 fundamental aspects, *Coloration Technology*, 140(2), S. 149-207, <https://doi.org/10.1111/cote.12715>
- [14] **Cabrera-Jiménez, R., Gallardo-Llamas, A., & Guillén-Gosálbez, G.** (2025), The hidden cost of textiles production, *Cleaner and Responsible Consumption*, 19, S. 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2025.100325>
- [15] **Castillo-Suárez, L. A., Sierra-Sánchez, A. G., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., & Teutli-Sequeira, E. A.** (2023), A critical review of textile industry wastewater: green technologies for the removal of indigo dyes, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Band 20, S. 10553–10590, <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04810-2>
- [16] **Catarino, M. L., Sampaio, F., & Gonçalves, A. L.** (2025), Sustainable Wet Processing Technologies for the Textile Industry: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 17(7), S. 1-33, <https://doi.org/10.3390/su17073041>

- [17] Chequer, F. M. D., De Oliveira, G. A. R., Ferraz, E. R. A., Cardoso, J. C., Zaroni, M. V. B., & De Oliveira, D. P. (2013), Textile Dyes: Dyeing Process and Environmental Impact, In *Eco-Friendly Textile Dyeing and Finishing*, IntechOpen, <https://doi.org/10.5772/53659>
- [18] Clark, M. (2011), *Handbook of textile and industrial dyeing 1: Principles, processes and types of dyes*, Woodhead Publishing Limited
- [19] Cobb, D. (3. April 2022), *Dyeing for Change - Textile Insight*, <https://www.formula4media.com/articles/dyeing-for-change> [letzter Zugriff: 17.07.2026]
- [20] Cole, J. (2020), VOGUE - 5 nachhaltige Lösungsansätze für das größte Umweltproblem der Modeindustrie: Färben, *Vogue Germany*, <https://www.vogue.de/mode/artikel/das-groesste-umweltproblem-der-modeindustrie-faerben> [letzter Zugriff: 06.05.2026]
- [21] **Colorifix** (2026), <https://www.colorifix.com/solution> [letzter Zugriff: 08.07.2026]
- [22] De Oliveira, C. R. S., De Oliveira, P. V., Pellenz, L., De Aguiar, C. R. L., & Da Silva Júnior, A. H. (2024), Supercritical fluid technology as a sustainable alternative method for textile dyeing: An approach on waste, energy, and CO2 emission reduction, *Journal of Environmental Sciences*, 140, S. 123-145, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.06.007>
- [23] **Digital printing direct to fabrics and garments** (21. Juli 2025), Knitting Industry, <https://knittingindustry.com/reports/digital-printing-direct-to-fabrics-and-garments/> [letzter Zugriff: 30.07.2026]
- [24] Ebener, G., & Schelz, D. (1989), *Textilfärberei und Farbstoffe (Beispiel angewandter organischer Chemie)*, Springer-Verlag

- [25] Feil, S. (2004), Färben in überkritischem Kohlendioxid, *Chemie in unserer Zeit*, 38(2), S. 89, <https://doi.org/10.1002/ciuz.200490036>
- [26] Fonseca, A., Ramalho, E., Gouveia, A., Henriques, R., Figueiredo, F., & Nunes, J. (2023), Systematic Insights into a Textile Industry: Reviewing Life Cycle Assessment and Eco-Design, *Sustainability*, 15(21), S. 1-23, <https://doi.org/10.3390/su152115267>
- [27] Gabris, M. A., Periyasamy, A. P., & Tehrani-Bagha, A. (2025), Top ten super-adsorbents for removal of textile dyes from wastewater, *Environmental Research*, 285, S. 1-33, <https://doi.org/10.1016/j.env-res.2025.122424>
- [28] Ginsberg, A. D., Chieza, N., Okafor, E., Ajioka, J., & Vilutis, J. (2018), Decentralising Biotech, *Journal of Design and Science*, Issue 4, S. 1-18
- [29] *Glossar Textilveredlung* (o. J.), [https://solutions.cht.com/cht/menue.nsf/gfx/med_ASAN-9QYLMA_55ED6B/\\$file/Glossar-CHT-Textilveredlung-DE.pdf](https://solutions.cht.com/cht/menue.nsf/gfx/med_ASAN-9QYLMA_55ED6B/$file/Glossar-CHT-Textilveredlung-DE.pdf) [letzter Zugriff: 11.06.2026]
- [30] Goñi, M. L., Gañán, N. A., & Martini, R. E. (2021), Supercritical CO₂-assisted dyeing and functionalization of polymeric materials: A review of recent advances (2015–2020), *Journal of CO₂ Utilization*, 54, S. 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101760>
- [31] Hasanbeigi, A., & Price, L. (2012), A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), S. 3648-3665, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.029>
- [32] IO+ Team (4. Dezember 2025), *DyeCoo collapses; wanted to make textile sector more sustainable*, IO+ Innovation Origins, <https://ioplus.nl/en/posts/dyecoo-collapses-wanted-to-make-textile-sector-more-sustainable> [letzter Zugriff: 10.07.2026]

- [33] Kabir, S. M. F., Chakraborty, S., Hoque, S. M. A., & Mathur, K. (2019), Sustainability Assessment of Cotton-Based Textile Wet Processing, *Clean Technologies*, 1(1), S. 232-246, <https://doi.org/10.3390/clean-technol1010016>
- [34] Kiran-Ciliz, N. (2003), Reduction in resource consumption by process modifications in cotton wet processes, *Journal of Cleaner Production*, 11(4), S. 481-486, [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00069-0)
- [35] Kuzma, S., Saccoccia, L., & Chertock, M. (16. August 2023), 25 Countries, Housing One-Quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress, <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries> [letzter Zugriff: 11.06.2026]
- [36] Lellis, B., Fávaro-Polonio, C. Z., Pamphile, J. A., & Polonio, J. C. (2019), Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms, *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), S. 275-290, <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>
- [37] Li, X., Zhu, L., Ding, X., Wu, X., & Wang, L. (2024), *Climate Change and the Textile Industry: The Carbon Footprint of Dyes*, S. 109-123, <https://doi.org/10.1177/24723444231212954>
- [38] Lin, L., Jiang, T., Xiao, L., Pervez, Md. N., Cai, X., Naddeo, V., & Cai, Y. (2022), Sustainable fashion: eco-friendly dyeing of wool fiber with novel mixtures of biodegradable natural dyes, *Scientific Reports*, 12, Art. 21040, S. 1-16, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25495-6>
- [39] Mikucioniene, D., Mínguez-García, D., Repon, M. R., Milašius, R., Prinitakis, G., Chronis, I., Kiskira, K., Hogeboom, R., Belda-Anaya, R., & Díaz-García, P. (2024), Understanding and addressing the water footprint in the textile sector: A review, *AUTEX Research Journal*, 24(1), S. 1-27, <https://doi.org/10.1515/aut-2024-0004>

- [40] **MK&G Water Pressure** (2024), https://mdo.mkg-hamburg.de/MDO/media-delivery/asset/b683b25b922a4c34ad722cbc80420a52/MK&G_Water_Pressure_Handout.pdf?contentdisposition=inline [letzter Zugriff: 06.05.2026]
- [41] **Opwis, K.** (2026), *Experteninterview mit Herrn Dr. Klaus Opwis vom 23.06.2026, Institution: Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH*
- [42] **Opwis, K., Benken, R., Knittel, D., & Gutmann, J. S.** (2017), *Dyeing of PET Fibers in Ionic Liquids*, 3(11), S. 101-108, <https://www.neliti.com/publications/263192/dyeing-of-pet-fibers-in-ionic-liquids>
- [43] **Opwis, K., Celik, B., Benken, R., Knittel, D., & Gutmann, J. S.** (2020), Dyeing of m-Aramid Fibers in Ionic Liquids. *Polymers*, 12(8), Art. 1824, S. 1-13. <https://doi.org/10.3390/polym12081824>
- [44] **Periyasamy, A. P., & Periyasami, S.** (2023), Critical Review on Sustainability in Denim: A Step toward Sustainable Production and Consumption of Denim. *ACS Omega*, 8(5), S. 4472-4490, <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06374>
- [45] **Peter, M.** (1985), *Grundlagen der Textilveredlung - Handbuch für Textilingenieure und Textiltechniker*, (12. Auflage), Deutscher Fachverlag GmbH
- [46] **Rath, H.** (1972), *Lehrbuch der Textilchemie (einschließlich der textilchemischen Technologie)*, (3. Auflage), Springer-Verlag
- [47] **Reactive Dyes Market Size & Growth, Forecast 2035**, (o. J.), <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/reactive-dyes-market-112457> [letzter Zugriff: 15.07.2026]

- [48] **Rouette, H.-K.** (2006), *Handbuch Textilveredlung Farbgebung 2, Band 2*, (15. Auflage), Deutscher Fachverlag GmbH
- [49] **Saus, W., Knittel, D., & Schollmeyer, E.** (1993), *Dyeing of Textiles in Supercritical Carbon Dioxide*, S. 135-142, <https://doi.org/10.1177/004051759306300302>
- [50] **Shah, M. A., Lee, D.-G., Lee, B.-Y., & Hur, S.** (2021), Classifications and Applications of Inkjet Printing Technology: A Review, *IEEE Access*, Band 9, S. 140079-140102, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119219>
- [51] **Shu, D., Fang, K., Liu, X., Cai, Y., An, F., Qu, G., & Liang, Y.** (2019), Cleaner pad-steam dyeing technology for cotton fabrics with excellent utilization of reactive dye, *Journal of Cleaner Production*, Band 241, Art. 118370, S. 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118370>
- [52] **Sustainability Report Archroma** (2024), https://www.archroma.com/uploads/files/Sustainability-Report-2024_2024-12-02-092435.pdf [letzter Zugriff: 04.06.2026]
- [53] **Turba, E., & Rumpf, H.** (1964), Zugfestigkeit von Preßlingen mit vorwiegender Bindung durch van der Waals-Kräfte und ihre Beeinflussung durch Adsorptionsschichten, *Chemie Ingenieur Technik*, 36(3), S. 230-240, <https://doi.org/10.1002/cite.330360312>
- [54] **Umweltbundesamt (UBA)**, (9. Januar 2023), <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebereiche/textilindustrie> [letzter Zugriff: 08.05.2026]
- [55] **VDTF INFOBRIEF V1-24** (Januar 2024), <https://sway.cloud.microsoft/yaYoqsqGcZmGI8IM> [letzter Zugriff: 30.06.2026]

- [56] **Vienna Textile Lab** (2025), <https://www.viennatextilelab.at/about-us/> [letzter Zugriff: 30.06.2026]
- [57] **Wang, L., Yan, K., & Hu, C.** (2017), Cleaner production of inkjet printed cotton fabrics using a urea-free ecosteam process. *Journal of Cleaner Production*, 143, S. 1215-1220, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.182>
- [58] **Wardman, R. H.** (2018), *An Introduction to Textile Coloration (Principles and Practice)*, John Wiley & Sons Ltd
- [59] **Water Scarcity** (o. J.), UN-Water, <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity> [letzter Zugriff: 11.06.2026]
- [60] **Yarkoni, O., Ajioka, J., Sa, R., Costa, M., & Rowe, D.** (2022), *Life Cycle Assessment Report*, <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5ed4999eb&appId=PPGMS> [letzter Zugriff: 13.08.2026]
- [61] **Zandt, F.** (21. März 2024), *Infografik: Wer 2050 genug Wasser zur Verfügung hat – und wer nicht*, Statista Daily Data, <https://de.statista.com/infografik/31951/geschaetzter-anteil-menschlicher-wassernutzung-an-wasserverfuegbarkeit--wasserstress--im-jahr-2050b> [letzter Zugriff: 30.06.2026]
- [62] **Zhou, T., Wang, Y., Zheng, H., Du, B., & Zheng, L.** (2022), Sustainable and eco-friendly strategies for polyester-cotton blends dyeing in supercritical CO₂, *Journal of CO₂ Utilization*, 55, Art. 101816, S. 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101816>

Anhang

Anhang A1

Absolutwerte zu Wärmebedarf und Farbabweichung (ΔE) in Abhängigkeit vom Flottenverhältnis, heller Farbton (0,063 % Farbstoffanteil); Daten aus Lit.²³⁵

Flottenverhältnis	Wärmebedarf (kJ)	Farbabweichung ΔE
1:10 (Standard)	11,80	–
1:8	9,49	0,59
1:6	7,69	1,16
1:4	5,11	1,49
1:3	3,70	1,84

Anhang A2

Absolutwerte zur prozentualen Reduktion ausgewählter Umweltparameter bei digitalem Textildruck (DTP) gegenüber Rotationssiebdruck (RSP); Daten aus Lit.²³⁶

Parameter	RSP	DTP	Differenz
Stromverbrauch (kWh)	537,9	347,6	-35 %
Gasverbrauch (m ³)	133,6	99,2	-26 %
Wasserverbrauch (L)	1.680,7	1.082,7	-36 %
Abwasseranfall (L)	580,0	340,0	-41 %
Chemikalienverbrauch (kg)	67,6	48,7	-28 %
Chemikalienabfall (kg)	96,0	0,4	-99 %

²³⁵ Abeer u. a. 2026

²³⁶ Azizul Hoque u. a. 2024

Anhang A3

Transkript des Experteninterviews mit Herrn Dr. Klaus Opwis:

Durchgeführt von: Mathilda Ulbricht (U)

Gesprächspartner: Dr. Klaus Opwis (O)

Institution: Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH (DTNW)

Datum: 23.06.2026, 11:00 Uhr

O: Hallo Frau Ulbricht, hören Sie mich?

U: Ja, ich höre Sie. Schönen guten Tag, Herr Dr. Opwis. Ich möchte Sie einmal kurz darauf hinweisen, dass ich das Gespräch gern aufnehmen würde, um es anschließend für die Bachelorarbeit zu transkribieren. Sind Sie damit einverstanden?

O: Ja, das können wir machen.

U: Dann würde ich das einmal über Teams freischalten, dann bekommen Sie gleich eine Nachricht und müssten dieser einmal zustimmen.

O: Bekomme ich das als E-Mail oder hier im Browser?

U: Da müsste gleich so ein kleines Fenster angezeigt werden.

U: Super, das hat funktioniert, ja perfekt.

O: Perfekt, ja cool. Herr Markus Oberthür hat ja früher hier bei uns in Krefeld gearbeitet. Bestellen Sie ihm anschließend schöne Grüße. Ich hatte ihn, glaub ich, noch bei der *Techtextil* in Frankfurt getroffen. Das war im April. Ja, und das ist das Thema Ihrer Bachelorarbeit?

U: Genau. Ich schreibe über Färbeverfahren in der Textilindustrie sowie über Chancen und Grenzen alternativer Färbeverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Ressourcenschonung.

O: Das hört sich doch schon mal spannend an. Ja, teilweise machen wir das ja hier. Da haben Sie uns schon richtig gefunden, aber wir sind sicherlich nicht die Einzigen.

U: Ja, ich danke Ihnen auf jeden Fall sehr, dass Sie sich heute die Zeit nehmen für ein Interview im Rahmen meiner Bachelorarbeit.

O: Ja, legen Sie mal los.

U: Sie sind seit 2007 Leiter der Arbeitsgruppe Umwelttechnologie & Katalyse beim Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West in Krefeld. Und eines Ihrer

Forschungsgebiete sind alternative Färbeverfahren in der Textilindustrie. Seit wann setzen Sie sich am DTNW mit alternativen Färbeverfahren auseinander? Und was motiviert Sie zu diesem Thema?

O: Also das Färben mit überkritischem CO₂ habe ich von meinem Vorgänger, Herrn Dr. Knittel, geerbt. Er ist zusammen mit unserem ehemaligen Chef, dem Herrn Schollmeyer, der Erfinder dieses Verfahrens – des Färbens mit überkritischem CO₂. Das wurde bei uns auch weltweit als Erstes beschrieben, und zwar ging das los Anfang der 1990er Jahre. Die erste Publikation stammt aus dem Jahr 1993 und gleichzeitig wurde auch ein Patent geschrieben. Das wurde dann erst 1995 anerkannt, aber das ist jetzt alles, wie gesagt, schon sehr lange her und die Idee der Kollegen – also vor meiner Zeit – war, ein wasserfreies Verfahren zu entwickeln. Ich weiß nicht. Kennen Sie die besonderen physikalischen Eigenschaften von überkritischem CO₂?

U: Ja, genau, ich hatte mir die beiden Paper im Vorfeld durchgelesen, die Sie mir geschickt hatten, aber ich hatte mich für meine Arbeit schon im Vorfeld stärker auf die Färbung mit überkritischem CO₂ festgelegt.

O: Ja, das meine ich. Aber kennen Sie die Vorteile, also was überkritisches CO₂ ist? Wissen Sie das?

U: Ja, die sind mir bekannt. Die Färbung mit überkritischem CO₂ kommt ohne Wasser und Abwasserchemikalien aus und spart durch den Wegfall der Trocknung Energie.

O: Ja, super, okay. Die Idee war also, dass sich die Farbstoffe, die in der Textilindustrie verwendet werden, auch für das Färben mit überkritischem CO₂ eignen. Man wollte also keine neuen Farbstoffe entwickeln, sondern das verwenden, was es bereits auf dem Markt gibt – teilweise schon seit 100 Jahren. Das Großartige an den Dispersionsfarbstoffen für Polyester ist eben, dass sie in überkritischem CO₂ löslich sind. Grundsätzlich gilt, das kann man so als Faustformel sagen: Alles, was sich in Wasser löst, löst sich in überkritischem CO₂ nicht. Das heißt, man braucht irgendwas Hydrophobes – die Moleküle müssen hydrophob sein. Dann besteht eine Chance, dass sie sich lösen. Und das trifft eben auf die Dispersionsfarbstoffe zu. Das war die herausragende Idee. Beim Färben, wird ja sehr viel Wasser eingesetzt – Wasser als Färbemedium, Wasser zum Spülen. Außerdem haben Sie auch das Problem, dass Sie dieses Wasser ja nachher beim Trocknen loswerden müssen. Wasser hat eine sehr

hohe Wärmekapazität. Das heißt, Sie brauchen sehr viel Energie, um Wasser in die Gasphase zu bringen. Und Sie haben beim Waschen natürlich auch immer noch eine sogenannte Farbflotte, die dann in die Abwasserbehandlung muss oder in den Vorfluter – sprich beispielsweise in die Elbe. Die blaue Elbe haben Sie wahrscheinlich nicht mehr kennengelernt. Vor 100 Jahren gab es das noch, und in anderen Ländern ist das teilweise auch heute noch so. Bei uns muss das jedoch nachbehandelt werden. Das ist auch mit Kosten verbunden. Das ist die Idee der Färberei aus überkritischem CO₂ gewesen – damals.

U: Und um noch einmal auf das Thema zurückzukommen: Wie würden Sie dann die Färbung mit überkritischem CO₂ einem Außenstehenden in zwei Sätzen erklären?

O: Der Farbstoff löst sich in überkritischem CO₂ und dringt oberhalb der Glas-temperatur der Faser in diese ein. Wenn man dann Druck und Temperatur wegnimmt, bleibt der Farbstoff in der Faser.

U: Okay, das ist nachvollziehbar.

O: Das waren, glaube ich, drei Sätze.

U: Das ist vollkommen okay. Im Flyer des DTNW wird die wasserfreie Färbung von synthetischen Fasern und Cellulosematerial erwähnt. Für welche Textilfasern ist die Färbung mit überkritischem CO₂ grundsätzlich geeignet? Welche Fasertypen werden bereits industriell mit diesem Verfahren gefärbt, und inwieweit ist die Anwendung auch für Fasermischungen wie Polyester-Baumwolle möglich?

O: Da müsste ich zunächst selbst auf meinen Flyer schauen. Grundsätzlich kann man cellulosische Fasern mit überkritischem CO₂ färben – aber nicht wirklich. Also ich glaube, da muss ich mal ran. Ich weiß gar nicht, wie das da hergekommen ist. Da habe ich wahrscheinlich irgendwelche alten Texte irgendwo rauskopiert. Ich hatte Ihnen das gerade mit der Löslichkeit der Farbstoffe versucht zu erklären. Also Baumwolle wird normalerweise mit so genannten Reaktivfarbstoffen gefärbt. Diese reaktiven Gruppen sind meistens ionische Gruppen. Und ionische Gruppen sind, weil sie halt eine Ladung tragen, eher in Wasser löslich. Und auf gar keinen Fall in überkritischem CO₂. Es gab aber hier am DTNW, in der Zeit, als ich meine Doktorarbeit geschrieben habe, eine

andere Doktorarbeit – nicht von mir – die sich damit beschäftigt hat, auch Baumwolle aus überkritischem CO₂ zu färben. Das geht auch, indem man die bestehenden Reaktivfarbstoffe nachträglich mit einer chemischen Funktionalisierung hydrophob macht. Und dann lösen sie sich auch in überkritischem CO₂, und dann reagiert der reaktive Teil des Moleküls immer noch mit der Baumwolle. Das widerspricht aber genau dem, was wir ja eigentlich hier immer propagieren. Man nimmt alles das, was man schon kaufen kann. Und deshalb ist dieser Ansatz schlecht. Ja, ist so. Es gibt natürlich eine Menge Paper, und es gibt auch viele Kollegen, die aus überkritischem CO₂, alles Mögliche färben. Wir haben auch vor 20 Jahren alle Fasern durchgefärbt oder auch nicht und auch alles ausprobiert. Das macht auch Sinn, alles auszuprobieren. Aber ich würde sagen, richtig etabliert ist der Prozess heute einzig und allein für Polyester. Und wenn ich Polyester sage, dann meine ich PET, Polyethylenterephthalat. Alles andere kann man färben, aber es ist keine echte Färbung. Man legt den Farbstoff, sage ich mal, ab auf der Faser. Das ist aber nicht waschecht. Ja, also die Frage war ja, glaube ich auch, wenn ich mich richtig erinnere, was industriell verwirklicht ist und da würde ich mal sagen, gilt das für Polyester. Und da muss man aber auch die Einschränkung sagen: Das machen ja sehr wenige. Das Hauptproblem ist, also wir hatten damals die Patente, die sind irgendwann verkauft worden oder ausgelaufen, weiß ich gar nicht. Wir haben damals diese Technologie hier am DTNW, damit meine ich unter Frau Bach und Herrn Knittel, wer da vor meiner Zeit mit beschäftigt war. Wir hatten als Partner die Firma UHDE. UHDE sitzt in Hagen und ist eine Tochter der Thyssenkrupp AG – aus der Stahlindustrie. Und die machen halt Hochdrucktechnologie hauptsächlich für Lebensmittel. Und damals haben die halt für uns Anlagen gebaut, dass wir das hier in Groß mit der Färberei hinkriegen. Die können das, die machen das. Und es ist halt sehr teuer, diese Anlagen. Es ist halt eine Hochdrucktechnologie. Der Druck geht bis zu 280 bar. Wir hatten damals sehr viel Besuch aus der Türkei, wo halt sehr viele Textilunternehmen sind. Wir hatten damals regelmäßig Besuch aus Japan, wo eben auch sehr viel an überkritischem CO₂ geforscht wird. Und ich glaube, die allermeisten haben dann, als sie gehört, haben: *„Wir müssen da so und so viele Millionen Euro in die Hand nehmen, um die Anlage dahin zu stellen“*, gesagt: *„Ja, hört sich cool an, machen wir aber nicht. Ist zu teuer.“* Das gilt immer noch. Es gibt in den Niederlanden ein Unternehmen, die

auch immer irgendwie sagen, dass die das erfunden haben. Das stimmt aber gar nicht. Diese Firma heißt DyeCoo. Die machen das kommerziell. Die finden Sie auch. Ich meine, ich hoffe, Sie haben die schon gefunden.

U: Ja, dieses Unternehmen ist mir bereits bekannt.

O: Dann können Sie sich ja mal auf deren Homepage umschauen. Und die haben auch Kooperationen mit verschiedenen Sportherstellern. Ich glaube, es gibt Sachen für Nike und für Adidas. Es gibt auch in Deutschland ein paar Unternehmen, die irgendwas mit überkritischem CO₂ färben. Mein Eindruck ist – und das sollten Sie vielleicht nicht unbedingt in Ihre Arbeit schreiben, sondern eher als Hintergrundinformation verstehen –, dass das teilweise Greenwashing ist. Das heißt, man macht das, um zu zeigen: „*Wir können das.*“ Wenn man sich jedoch die tatsächlich gefärbten Mengen im Vergleich zur gesamten Produktionsmenge ansieht, dann ist das verschwindend gering. Und das liegt meiner Meinung nach einzig und allein an der Angst vor dem hohen Investment. Das ist auch so. Das ist halt sehr teuer die Anlage dahinzustellen. Und wir hier am DTNW haben jetzt auch neue Ansätze, die über das Färben hinausgehen und machen auch Funktionalisierung. Zur Metallisierung hatten wir auch ein Projekt. Wir haben gerade auch wieder einen neuen Antrag geschrieben. Das hängt auch damit zusammen, dass sich seit Beginn des Ukraine-Krieges die Energiepreise deutlich verändert haben. Anfang 2022 gab es diese starken Preissteigerungen bei Strom und Gas. Sie erinnern sich vielleicht an die Strom- und Gaspreisbremsen. Im Moment erleben wir das wieder wegen der Iran-Geschichte, der Situation im Nahen Osten. Also Energie ist eben der große Treiber auf der anderen Seite, mit Wasser.

Je teurer die konventionelle Färberei – unabhängig von den Investitionskosten für die Anlagen – wird, desto weniger fallen die hohen Anschaffungskosten einer CO₂-Anlage ins Gewicht. Dadurch ist das Verfahren mit überkritischem CO₂ in den vergangenen Jahren wieder stärker in den Fokus gerückt.

Das ist eigentlich auch eine Frage, die Sie später noch stellen werden, aber ich kann es schon jetzt erwähnen. Sie werden das Interview ja später ohnehin thematisch sortieren.

Die Energie für Wärme beziehungsweise Strom ist bei beiden Verfahren – also sowohl bei der konventionellen HT-Färbung als auch bei der Färbung mit überkritischem CO₂ – ungefähr gleich. Nach Berechnungen aus älteren Projekten

liegen beide Verfahren bei etwa 4,5 kWh pro Kilogramm Polyester. Und das heißt, eigentlich sparen sie da gar nicht so richtig.

Natürlich könnte sich das noch verbessern, wenn größere Autoklaven eingesetzt würden. Dann ließe sich die Energiebilanz weiter optimieren. Aber grundsätzlich ist der Energiebedarf beider Verfahren ähnlich. Der Vorteil liegt trotzdem erstmal bei der Wasserfreiheit. Das heißt, Sie bringen kein Wasser ins System rein. Sie bekommen kein verschmutztes Wasser raus. Sie haben also auch kein Entsorgungsproblem. Sie haben einen vollkommenen Kreislauf. Das CO₂ lässt sich nahezu 100% zurückgewinnen. Der Farbstoff, auch der überschüssige Farbstoff, bleibt im System. Und Sie brauchen auch eigentlich, ich sage jetzt eigentlich, keine Hilfsmittel. Also irgendwelche Carrier oder sowas. Der Farbstoff wird direkt eingebracht. Beim Entspannen des Systems fällt überschüssiger Farbstoff wieder als Feststoff aus.

Der ökologische Vorteil des Verfahrens besteht daher vor allem darin, dass kein Wasser eingesetzt wird, kein verschmutztes Abwasser entsteht und keine zusätzlichen Chemikalien erforderlich sind – abgesehen vom Farbstoff selbst.

Der Energieverbrauch wird häufig als Vorteil genannt. Wenn man sich die Zahlen jedoch genauer ansieht, ist dieser Unterschied gar nicht so groß.

Demgegenüber stehen allerdings die hohen Investitionskosten.

Solange sich dieses Verhältnis nicht deutlich verbessert, wird sich das Verfahren meiner Einschätzung nach nur schwer großflächig durchsetzen.

Aber machen Sie am besten mit Ihren Fragen weiter.

U: Okay, ich wollte Sie auch eigentlich nicht unterbrechen. Also, die nächste Frage lautet: Wie wird dieses Verfahren technisch realisiert und wie bewerten Sie den aktuellen Entwicklungsstand? Gibt es bereits Unternehmen oder Projekte, die das Verfahren kommerziell oder im Pilotmaßstab einsetzen? Das haben Sie ja eben gerade schon angesprochen und die Firma DyeCoo genannt.

O: Da könnten Sie natürlich mal versuchen, bei DyeCoo anzurufen. Ich weiß nicht, ob die Ihnen etwas erzählen. Außerdem gibt es vom Verband Deutscher Textilfachleute (VDTF) einen Infobrief aus dem Januar 2024 mit dem Titel „*Färben mittels überkritischem CO₂ – Die Revolution in der Färberei!*“. Darin finden Sie auch so ein paar Daten, wer was macht. Schauen Sie mal, ob Sie das im Internet finden. Wenn nicht, melden Sie sich nochmal.

U: Das mache ich auf jeden Fall. Vielen Dank.

O: Dort finden Sie auch einige Zahlen sowie Informationen zu DyeCoo, Nike und weiteren Unternehmen. Außerdem wird dort kurz zusammengefasst, welche Mengen derzeit umgesetzt werden und welche deutschen Unternehmen sich mit dem Verfahren beschäftigen.

Sie sollten dabei allerdings immer bedenken, dass diese Mengen im Verhältnis zu den vielen tausend Tonnen, die weiterhin konventionell gefärbt werden, äußerst gering sind.

U: Ja, auf jeden Fall.

O: Wir finden das natürlich cool, wenn das auch mal technisch im sehr großen Maßstab umgesetzt wird. Okay. Das nur zur Wiederholung.

U: Okay, das werde ich auf jeden Fall versuchen. Dann wäre die nächste Frage – die haben Sie eben auch schon einmal angeschnitten: Welche Farbstoffklassen sind außer Dispersionsfarbstoffen nutzbar? Das war nur eine Nachfrage, ob das auch für andere Farbstoffklassen realisierbar ist. Aufgrund der Gegebenheiten würde ich jetzt selbst behaupten, dass sich das weitgehend ausschließt.

O: Ja und nein, also grundsätzlich können Sie alle Farbstoffe verwenden, die in überkritischem CO₂ löslich sind. Also zum Beispiel werden wir jetzt bald ein Projekt starten, wo es um natürliche Farbstoffe geht, die eben aus der Natur entnommen werden: von Pilzen, Algen und so weiter. Und grundsätzlich: Jeder Farbstoff ist verwendbar, der in überkritischem CO₂ löslich ist. Und die Dispersionsfarbstoffe sind das, alle anderen könnte man nachträglich so chemisch modifizieren.

U: Was Sie eben schon angesprochen hatten?

O: Genau. Das wäre technisch und chemisch grundsätzlich kein Problem. Ob das Sinn macht, ist die andere Frage.

U: Dann habe ich noch eine Frage: Welche Rolle spielen Hilfsmittel und Chemikalien bei der Färbung mit überkritischem CO₂ und was passiert mit nicht fixiertem Farbstoff in der Praxis? Auch da haben Sie eben gerade schon mal was zu gesagt.

O: Also die Formulierung der Dispersionsfarbstoffe, so wie man sie kauft, ist natürlich nicht vollständig hilfsmittelfrei. Sie müssen aber keine zusätzlichen Stoffe

– etwa Substanz XY – mit in die Farbflotte geben. Auch Reduktionsmittel oder ähnliche Hilfschemikalien werden nicht benötigt.

Für die Polyesterfärbung ist in der Regel auch keine Nachreinigung erforderlich. Allerdings sollten Sie folgenden Punkt in Ihrer Arbeit berücksichtigen: Man kann bei der Färbung mit überkritischem CO₂ – wir haben das hier über viele Jahre gemacht, damals noch zusammen mit Ado – sehr viel falsch machen.

Ich weiß gar nicht, ob Ihnen Ado noch etwas sagt. Das war früher ein bekannter Gardinenhersteller – „Ado: Gardinen mit der Goldkante“. Fragen Sie ruhig einmal Ihre Eltern, die kennen das wahrscheinlich noch.

Entscheidend ist nämlich, wie das System entspannt wird.

Die Anlage wird zunächst unter Druck gesetzt. Wenn man den Druck anschließend einfach schlagartig ablässt, fällt der Farbstoff aus dem CO₂ aus und rieselt praktisch auf das Textil herab. Dann liegt der Farbstoff wie feiner Staub auf der Oberfläche.

Wir wissen nicht, wie andere Unternehmen das machen. Wir wissen aber aus unserer Erfahrung, dass man an dieser Stelle sehr viel falsch machen kann.

Wenn man den Prozess dagegen richtig durchführt – das heißt, wenn der Farbstoff bereits vor der Druckentspannung weitgehend aus dem CO₂-Kreislauf entfernt wurde –, dann ist keine Nachreinigung erforderlich. Das Textil kommt trocken und fertig gefärbt aus der Anlage.

Das zeigt aber auch, dass die Färbung mit überkritischem CO₂ keineswegs trivial ist.

Natürlich glauben wir hier am DTNW immer, dass wir diejenigen sind, die das am besten können. Ob andere das genauso gut beherrschen, kann ich allerdings nicht beurteilen.

U: Okay, verstehe. Gibt es belastbare Zahlen zum Energie-, Chemikalien- und Wasserbedarf pro Kilogramm gefärbtem Textil im Vergleich zu konventionellen Verfahren? Und gibt es dazu veröffentlichte Life-Cycle-Assessment-Studien?

O: Also wir haben hier Partner. Wir haben Partner aus der Industrie, die konventionell färben. Gemeinsam mit ihnen habe ich einmal entsprechende Berechnungen durchgeführt. Die sind allerdings nicht veröffentlicht worden und erfüllen auch nicht die Anforderungen einer wissenschaftlich publizierten Studie.

Sie können diese Zahlen gerne nennen und darauf verweisen, dass sie von mir stammen. Als zitierfähige Publikation eignen die sich allerdings nicht.

Das ist das, was ich vorhin schon erwähnt habe: Beide Verfahren benötigen hinsichtlich Wärme- und Stromverbrauch ungefähr 4,5 kWh pro Kilogramm gefärbtem Polyester. Die Energiebilanz ist also bei beiden Verfahren nahezu identisch.

Für die HT-Färbung haben wir damals, glaube ich, einen 2-Liter-Autoklaven als Referenz verwendet. Beim CO₂-Szenario haben wir zunächst eine Anlage mit etwa 120 bis 150 Litern Volumen angesetzt.

Das bedeutet natürlich, dass sich durch größere Anlagen noch Verbesserungen erzielen lassen. Man kann die Bilanz also durchaus noch in die eine oder andere Richtung beeinflussen.

Der grundsätzliche Befund bleibt aber bestehen: Der Energiebedarf ist in etwa gleich.

Was den Wasserverbrauch der konventionellen Färbung betrifft, habe ich die genaue Zahl ehrlich gesagt nicht parat. Die können Sie aber sicherlich recherchieren.

Beim CO₂-Verfahren beträgt der Wasserbedarf null.

Außerdem muss man beim Wasserverbrauch immer zwei Aspekte betrachten: Zum einen das eingesetzte Frischwasser und zum anderen das belastete Abwasser, das anschließend behandelt werden muss. Letzteres verursacht häufig die höheren Kosten.

(kurze Unterbrechung)

O: Jetzt muss ich mal eben schauen, wo waren wir? Wo waren wir im Energiebedarf? Wasser.

U: Beim Energiebedarf und Wasserverbrauch. Das war Frage sieben.

O: Genau. Also normalerweise müsste man beim HT-Verfahren nachträglich noch irgendwelche Reduktionsschritte machen. Die kann man lassen oder nicht. Das kommt immer ein bisschen darauf an, welchen Anspruch man hat. Das ist halt kein einstufiger Prozess, wie das meiste ja kein einstufiger Prozess ist. Das ist erstmal nicht so schlimm. Bei jedem fällt halt irgendwas an: Energie und Wasser und eben auch Hilfschemikalien. Und ja, das mit den Zahlen, das

ist so eine Sache. Also ich habe nur diese eine Zahl, die ich Ihnen liefern kann, was diese 4,5 kWh angeht. Alles andere weiß ich nicht. Für weitere Quellen sollten Sie vielleicht Ihren Betreuer, Herrn Oberthür, fragen. Er kann Ihnen bestimmt Hinweise auf geeignete Literatur geben.

U: Aber die Zahl bezieht sich auf das Färben mit überkritischem CO₂?

O: Ganz genau. Also der Vergleich bezieht sich auf den Energiebedarf. Der Energiebedarf ist gleich. Und Wasser und Hilfschemikalien sind auf der Seite von scCO₂ deutlich geringer. Es gibt also durchaus Vorteile. Demgegenüber steht halt das hohe Investment für die Autoklaven. Also so müsste man das sagen.

U: Dann habe ich noch eine Frage: Was sind aus Ihrer Sicht die größten technologischen Hürden für das Färben mit überkritischem CO₂ bei Naturfasern?

O: Bei Naturfasern, das hatte ich Ihnen ja schon gesagt: Die Farbstoffe, die für Naturfasern typischerweise eingesetzt werden, sind typischerweise nicht in überkritischem CO₂ löslich. Das ist auch das, was ich vorhin mit den zwei Sätzen beschrieben habe: Die Löslichkeit ist die eine Sache, und sie müssen halt in die Faser eindringen, das ist die andere Sache.

Das heißt, um in die Faser zu gelangen, müssen Sie oberhalb der Glas-temperatur des Polymers sein. Baumwolle oder Cellulose hat überhaupt keine Glas-temperatur. Das ist kein Thermoplast. Das ist Cellulose. Das können Sie theo-retisch also auch bei Raumtemperatur färben. Und das funktioniert ja über ei-nen ganz anderen Mechanismus. Bei der Dispersionsfärbung dringen Sie halt in die Faser ein, der Farbstoff ist gelöst. Er dringt oberhalb der Glas-tempera-tur ein. Wenn die Polymerketten beweglich sind, kann er dazwischen. Und wenn Sie das Ganze dann wieder einfrieren, indem Sie es abkühlen und den Druck wegnehmen, dann ist er drin.

Und bei der Reaktivfärbung, bei Baumwolle, gehen Sie ja nicht in die Faser, sondern an die Celluloseketten dran, also an die Zuckereinheiten. Und brin-gen dort den Reaktivanker an. Das ist also ein ganz anderes Prinzip.

Und deshalb, wenn Sie an andere Naturfasern denken – es gibt ja andere, die auch cellulosebasiert sind, also Hanf oder so. Oder Wolle wäre dann eher eine

Proteinfaser. Da wird auch keine Reaktivfärbung gemacht, aber da ist auch keine Diffusion im klassischen Sinne möglich.

Deshalb: Alles, was man so über überkritisches CO₂ und Naturfasern im Internet findet – da muss ich jetzt mal vorsichtig sein, weil ich ja über Kollegen spreche –, aber ich halte das für keinen sinnvollen Ansatz, um das mal so zu sagen. Und wenn man da Färbungen erzielt, was ja durchaus möglich ist, dann lagert man den Farbstoff quasi auf der Faser ab. Und das ist keine echte Färbung. Also „echt“ im Sinne von wirklicher Echtheit, was Farbechtheit angeht. Und ich kenne die Studien im Einzelnen nicht. Wir haben das erfunden (Bezug: scCO₂-Verfahren). Wir haben gezeigt: Das geht und das geht nicht.

Wir haben aber dann auch gesagt: Ja, ist ja jetzt auch gut. Wir können das. Die Patente sind nicht mehr bei uns. Wir machen mittlerweile hier Funktionalisierungen mit überkritischem CO₂. Das ist jetzt mein Thema.

Die Färberei ist für uns ja quasi abgehakt. Außer, dass wir jetzt versuchen, Polyester mit Naturfarbstoffen zu färben, die in überkritischem CO₂ löslich sind.

Das ist jetzt noch mal ein Färbethema bei uns.

Aber was so das Große und Ganze angeht, sind wir mit dem Thema hier eigentlich durch.

U: Okay, ja. Und wie beurteilen Sie die Qualität der Färbung im Vergleich zu konventionellen Verfahren? Also gerade was die Echtheit betrifft?

O: Also bei Polyester ist es ja nur eine andere Methode, aber Sie verwenden dieselben Farbstoffe. Daher kann man für Polyester schon sagen, dass das eins zu eins vergleichbar ist.

U: Okay, verstehe.

O: Die Qualität ist super, wenn man es richtig macht und nicht dieses Ausregnen des Farbstoffs auf die Faser. Dann ist da kein Qualitätsunterschied zu sehen. Und das war auch hier damals in den Studien, die hier gemacht wurden: Wenn wir diese Färbespulen hatten, wurden hier auch sehr viele Optimierungen gemacht, wie man das überkrische CO₂ durch diese Garnwickel führt – von innen nach außen, hin und her und so weiter.

Und wenn man dann irgendwann das richtige Verfahren hat, dann ist das eine perfekte Färbung – für Polyester.

U: Was würden Sie sagen, ist aus Expertensicht der realistische Zeitrahmen für eine breitere industrielle Adaption und wie beurteilen Sie dabei die Möglichkeit einer Kostendegression bei steigender Verbreitung? Sie hatten eben schon angesprochen, dass das der große Punkt ist bei diesem Verfahren.

O: Ja. Also, Sie haben halt auf der einen Seite die Investitionskosten. Die werden auch bei einer Vergrößerung des Maßstabs nicht geringer. Sie können natürlich größere Autoklaven bauen, sodass das Investitionsvolumen bezogen auf die umsetzbare Masse geringer wird. Trotzdem ist das eine Hochpreistechnologie. Und diese Anlagen werden eher teurer als weniger teuer. Deshalb kann man auch schlecht einen Zeitrahmen setzen. Der Zeitrahmen ist dann, wenn die Entwicklung von Politik und Gesellschaft dahin geht, dass die Rahmenfaktoren gegeben sind. Das, was wir vorhin schon gesagt haben. Die Energie ist ja gar nicht so relevant, hatten wir schon gesagt, die kann man aber noch ein bisschen verbessern. Aber wenn Wasser, Hilfsmittel und die Rückführung von Materialien in den Prozess durch die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen so teuer werden oder einfach nicht mehr gewünscht sind – wenn Sie Ihren Farbstoff in irgendeinen Vorfluter schicken, auch wenn Sie ihn hundertmal verdünnen, ist er ja trotzdem noch da –, dann wird das wieder relevant. Und auch, wenn dann mehr aus überkritischem CO₂ gefärbt wird, ist es aus meiner Sicht eher nicht zu erwarten, dass das dadurch billiger wird. Ich bin allerdings auch kein Ökonom, das muss man dazu sagen. Wenn von etwas viel gemacht wird, werden die Herstellungskosten für die Einzelzahlen billiger. Da aber ja dieselben Dispersionsfarbstoffe eingesetzt werden, die jetzt auch schon eingesetzt werden, ist nicht zu erwarten, dass die damit billiger werden. Sie machen es einfach mit einem anderen Verfahren. Und dasselbe gilt natürlich für das Textil selbst. Das ist auch vorher wie nachher dasselbe Textil. Deshalb könnte man Effekte einer Maßstabsvergrößerung nur dadurch erzielen, dass man einfach effektiver wird. Es ist bestimmt billiger, 1.000 T-Shirts auf einmal zu färben als zehnmal 100. Das wird aber immer eine Stückfärbung bleiben. Das ist auch erstmal nicht schlimm. Man kann durch das Upscaling der Maschinen sicherlich noch Effekte erzielen, aber ich kann nicht vorhersagen, wie sich das entwickeln wird. Da wäre Potenzial. Wann das stattfindet? Wie gesagt: Das findet dann statt, wenn das Drumherum so teuer wird, dass man es machen muss.

U: Ja, aber dann ist sowohl eine Stückfärbung als auch eine Garnfärbung möglich?

O: Ja, also wir haben das hier hauptsächlich am Garn gemacht, aber theoretisch kann man da auch ein Stück hineinwerfen. Da müsste man sich dann überlegen, wie das dann läuft. Aber ich habe das so verstanden – da bin ich mir jetzt aber nicht sicher –, dass das bei diesen Leuchtturmprojekten der Sportartikelhersteller so gemacht wird.

U: Ja, okay.

O: Aber da müssten Sie selbst nochmal recherchieren, bevor ich da jetzt Quatsch sage. Aber ich habe das so in Erinnerung, dass dort so Sport-BHs oder sowas am Stück gefärbt werden. Schauen Sie da aber bitte nochmal nach.

U: Auf der Internetseite von DyeCoo, was Sie eben schon erwähnt hatten?

O: Ja, und ich hatte Ihnen doch auch vorhin diesen VDTF-Infobrief genannt. Da waren auch irgendwelche Links zu irgendwelchen anderen Herstellern. Da waren auch ein paar deutsche Namen dabei. Wie gesagt: Wenn Sie das nicht finden, dann melden Sie sich nochmal per E-Mail, dann schicke ich Ihnen da irgendwas hinterher. Ja, gucken Sie mal, was Sie da so finden.

U: Ja, das mache ich auf jeden Fall, vielen Dank schonmal. Gibt es regulatorische Aspekte, zum Beispiel Druckbehälter oder Sicherheitsanforderungen, die die Verbreitung limitieren?

O: Ja, es ist natürlich Hochdrucktechnologie, aber das als Limitierung zu sehen, sehe ich nicht so. Die Hersteller müssen das natürlich garantieren. Es wird eine TÜV-Abnahme geben. Und es wird auch regelmäßige TÜV-Prüfungen geben. Bei uns kommt ja auch alle zwei Jahre der TÜV. Das heißt, dass dort bestimmte Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden müssen. Aber ich glaube nicht, dass das ein Hemmnis für die Verbreitung ist. Das Problem ist gelöst.

U: Und wie ist die derzeitige Kostensituation, also die Investitions- und Betriebskosten, des überkritischen CO₂-Verfahrens im Vergleich zu konventionellen Färbeverfahren und wie kostenintensiv wäre die Umstellung bestehender Färberein?

O: Ja, wie alles schon mehrfach gesagt: Es gibt halt einmal das Invest. Das wird bei so einer Anlage sicherlich siebenstellig sein. Sie könnten ja mal bei

DyeCoo versuchen herauszubekommen, was so eine Anlage kostet. Die gibt es allerdings auch in unterschiedlichen Größen. Von UHDE, unserem Partner, gibt es die ebenfalls in verschiedenen Größen. Günstig ist das alles nicht. Preise kenne ich allerdings nicht, zumal keine aktuellen.

Die anderen Kosten ergeben sich natürlich aus dem Arbeitsaufwand. Den kann man bestimmt beziffern. Die Anlage kostet viel. Und solange das in einem ungünstigen Verhältnis zum Rest steht, trauen sich nur wenige Unternehmen daran.

Außer diejenigen, die das machen wollen, um sich als „grün“ darzustellen. Wo bei das dann wahrscheinlich bedeutet, dass sie vielleicht 0,06 % ihrer Gesamtproduktion mit überkritischem CO₂ färben. Das ist keine offizielle Zahl. Die habe ich jetzt nur einmal so in den Raum gestellt.

U: Welche alternativen Verfahren sehen Sie denn aktuell als vielversprechendste Entwicklung im Bereich der Textilfärberei neben dem scCO₂-Verfahren?

O: Also vom Verfahren her hatte ich Ihnen ja schon die ionischen Flüssigkeiten genannt. Damit lässt sich sozusagen weiterarbeiten. Also alle synthetischen Fasern, die wir untersucht haben – Polyamid, Polyester, auch Aramide, wo das ein ganz großer Vorteil sein könnte –, lassen sich damit färben. Und was die Farbstoffe selbst angeht, was dann natürlich nicht direkt das Färbeverfahren ist, da ist natürlich schon ein gewisses Potenzial bei den naturbasierten Farbstoffen vorhanden. Das ist jetzt nicht das Verfahren, aber das wäre dann kein, sagen wir mal, petrochemisch erzeugtes Material, wodurch man auch den CO₂-Fußabdruck senken könnte. Die Hemmnisse bei diesen beiden Ansätzen – und das ist ja Forschung, also F&E, das ist noch kein Produkt – sind folgende: Bei den ionischen Flüssigkeiten ist das ganz klar: Die Farbstoffmoleküle sind ungefähr in der Größe der Moleküle, die in dem ionischen Salz vorliegen. Das heißt, eine Trennung – wie sie zum Beispiel beim Einsatz ionischer Flüssigkeiten für Lyocell, also für die Faserherstellung, genutzt wird –, funktioniert dort nicht. Da sind die Molekulargewichte sehr viel größer, sodass man sie, ich nenne das mal so, über eine Nanofiltration locker herausfischen kann. Hier funktioniert das nicht, weil die Moleküle sozusagen gleich groß sind.

Und solange das nicht gelöst ist, könnte man das nur so machen, dass man immer mit derselben Flotte arbeitet. Wissen Sie, wie ich das meine?

Man fährt also immer dasselbe Blau und nimmt dann nachher die Restflotte, gibt wieder ein bisschen Farbstoff dazu und kann dann noch einmal blau färben.

Das ist aber, glaube ich, wenn Sie sich die – wie heißt das heute? – Fast Fashion anschauen, eine Illusion, die wir uns als Forscher hier so zurechtstücken. Ich glaube, das geht an der Realität vollkommen vorbei.

Sodass dieser Ansatz vielleicht für Nischenprodukte interessant wäre, zum Beispiel für Aramide, die als Feuerwehrjacken oder so etwas verwendet werden. Da könnte das durchaus ein Thema werden, weil man dort carrierfrei arbeiten kann.

Ich weiß nicht, ob Sie sich mit Aramidfärbung auskennen. Das ist halt so ein großes Problem. Das große Problem sind dort diese Carrier, die für die Umwelt problematisch sind. Da könnten ionische Flüssigkeiten eine Alternative sein – für Spezialfasern, die immer dieselbe Farbe haben. Und bei den Naturfarbstoffen: Wir haben da jetzt ein Projekt. Das wird auch spannend, um die grundsätzliche Machbarkeit zu zeigen. Die Naturfarbstoffe haben allerdings in den meisten Fällen eine schlechte Lichtechtheit. Das Projekt ist noch nicht bewilligt, aber das wird jetzt irgendwann kommen. Die Echtheit gegenüber Licht ist ein großes Thema. Ein weiteres Problem könnte die Egalität der Färbung sein. Das könnte man allerdings auch wieder – wenn man es geschickt vermarktet – für ein Konzept des, nennen wir es mal, „ökologisch interessierten Kunden“ nutzen. Wenn man zum Beispiel keine ganz egale Färbung hinbekommt, weil es eben ein Naturprodukt ist, dann kann man das – wenn man es geschickt vermarktet – auch als individuell bezeichnen. Das kommt immer so ein bisschen darauf an. Die Farben gehen meistens so in Richtung Braun, Gelb oder Rot. Das könnte man dann auch als hippes Sommer-T-Shirt oder im Batikstil vermarkten. Das muss man dann eben so bewerben, dass man ein natürliches Produkt hat, damit man etwas Gutes für die Umwelt tut und dass jedes Stück individuell ist. Das ist aber natürlich nicht mit Primark vergleichbar, wo Sie 800 verschiedene Farben bekommen, die gestochen scharf sind – zumindest am Anfang.

Und bei unserem Projekt geht es ehrlich gesagt auch ein bisschen darum, die CO₂-Geschichte wieder voranzubringen. Denn bei den Naturfarbstoffen selbst

sehe ich schon noch Herausforderungen. Da muss man erst noch etwas wirklich Interessantes finden. Ich fahre nächste Woche zu einer Firma nach Ostdeutschland, wo es angeblich auch grüne und blaue Naturfarbstoffe geben soll. Aber die meisten Naturfarbstoffe haben eben diese etwas matschigen Untertöne. Das ist für bestimmte Anwendungen sehr schön und für andere eben nicht.

Ich wollte nur sagen: Da geht vielleicht auch ein gewisser Trend hin. Allerdings ist auch dort noch nicht klar, wie man mit diesen Farbstoffen tatsächlich färbt, weil ihnen die üblichen chemischen Gruppen fehlen, die man beispielsweise bei Reaktivfarbstoffen benötigt. Und wenn man dann Ansätze hört wie: „Ja, dann bringen wir eben noch eine reaktive Gruppe an den Naturfarbstoff an“, dann muss man sich natürlich fragen, was an diesem Farbstoff dann eigentlich noch natürlich ist.

Dann kann man auch direkt wieder auf petrochemisch hergestellte Farbstoffe zurückgreifen.

Also, das ist so meine Einschätzung.

U: Und in Ihren Veröffentlichungen von 2017 und 2020 haben Sie die Färbung mit ionischen Flüssigkeiten untersucht, wobei die Rückgewinnung der ionischen Flüssigkeiten als zentrale Herausforderung benannt wurde. Wie hat sich dieses Forschungsgebiet seitdem entwickelt insbesondere im Hinblick auf die Rückgewinnung? Das habe ich mich direkt als Erstes gefragt.

O: Ja, gar nicht.

Also wir hatten die beiden Projekte. Das sind sogenannte IGF-Projekte gewesen. Der Herr Oberthür kann Ihnen bestimmt dazu etwas sagen, wie diese Projekte laufen. Es ist so eine vorwettbewerbliche Forschung. Wir hatten auch noch ein ZIM-Projekt dazu für die Aramid-Färbung. Und da war halt die Aussage des Industriepartners genau das, was ich vorhin gesagt habe, dass die Färbung immer dieselbe Farbe hat. Wir hatten das so ein bisschen propagiert, dass es theoretisch auch kommerziell machbar wäre. Das nannte sich „Everlasting Dye bath“. Das heißt, man hat einen Bottich, da sind so und so viele 1.000 Liter der ionischen Flüssigkeit drin, und darin färbe ich immer in derselben Farbe. Da brauche ich den Farbstoff eben nicht aus der ionischen Flüssigkeit herausholen. Ich muss ihn nur nachdosieren. Und das Wasser, das bei den

Waschprozessen mit in die ionische Flüssigkeit hineinkommt und das ich anschließend wieder entfernen muss, kann ich theoretisch und praktisch abkochen. Das ist natürlich auch ein energieintensiver Vorgang.

Allerdings lässt sich das dadurch rechtfertigen, dass man mit der ionischen Flüssigkeit – weil man sie theoretisch beliebig hoch erhitzen kann, ohne dass etwas siedet, solange kein Wasser enthalten ist – keine Hochdrucktechnologie benötigt, wie sie bei Aramiden sonst erforderlich ist.

Ich rede jetzt nicht von überkritischem CO₂.

Sie arbeiten dort ja sonst mit Wasser oberhalb von 100 Grad und deshalb ebenfalls in Autoklaven. Sonst würde das Wasser ja verdampfen. Das wäre also schon eine interessante Lösung. Die Aussage des Industriepartners war allerdings: „Ja, aber das Problem ist noch nicht gelöst.“ Das ist ja immer das Problem zwischen Forschung und technischer Umsetzung. Es gibt dieses sogenannte „Tal des Todes“. Ich weiß nicht, ob Sie den Begriff schon einmal gehört haben. Das ist im Grunde Folgendes: Wir machen hier ein Forschungsprojekt, dabei kommt ein interessantes Ergebnis heraus, anschließend entsteht ein Bericht oder eine Publikation.

Auf der anderen Seite steht die Industrie. Die braucht am Ende aber eine funktionierende Anlage. Und dieses Upscaling – also der Technologietransfer vom Labor beziehungsweise vom halbertechnischen Maßstab in den industriellen Prozess – findet ohne zusätzliche Entwicklung, die von der Industrie finanziert wird, häufig nicht statt. Genau das ist dieses „Tal des Todes“.

Es gibt inzwischen einige Förderprogramme, weil die Ministerien mittlerweile verstanden haben, dass dieses Problem existiert und gezielt unterstützt werden muss. Bei vielen Projekten ist es aber so: Wenn wir keinen neuen Antrag schreiben, veröffentlichen wir ein Paper, freuen uns darüber – und das war es dann.

Dann liegt das Thema hier so lange, bis wir irgendwann wieder darauf zurückkommen. Das Problem ist also nicht gelöst. Zumindest nicht von uns.

Und ich habe ehrlich gesagt auch nicht verfolgt, ob das inzwischen irgendwo anders in der wissenschaftlichen Community gelöst wurde.

Wir haben jedenfalls keine Lösung. Außer, dass man das Ganze eben in diesem Ein-Topf-Verfahren macht. Aber das will bisher niemand.

U: Aus dem Grund, dass es dann auf diese eine Farbe beschränkt ist?

O: Ganz genau.

U: Wir haben jetzt eben nur technische-wirtschaftliche Aspekte beleuchtet. Welche Rahmenbedingungen müssten sich noch ändern, damit sich diese Verfahren am Markt durchsetzen?

O: Ja, also grundsätzlich – das hatte ich ja jetzt auch schon ein paar gesagt – ist die Sache so, wie sie ist. Es müsste sich ändern, dass die wässrige Färberei viel zu teuer wird. Dass die CO₂-Bilanz – es gibt ja diese Zertifikate – einen positiven Effekt für das überkritische CO₂-Verfahren bringt. Auch wenn da CO₂ im Namen steht: Die CO₂-Bilanz ist insgesamt besser. Was die Energie angeht, nicht. Und alles, was ich vorhin schon gesagt habe, gilt hier genauso: Die Rahmenbedingungen müssten sich so verändern, dass die wässrige Abwasserbehandlung nicht mehr akzeptiert wird beziehungsweise so teuer wird, dass sich die Investitionskosten für eine solche Anlage über ihre gesamte Laufzeit rechnen. So eine Anlage betreibt man ja zehn, zwanzig oder dreißig Jahre. Dann würden die Investitionskosten im Verhältnis zu den gesamten Produktionskosten deutlich weniger ins Gewicht fallen.

U: Okay, verstehe, und gibt es einen Aspekt bei dem Färbeverfahren mit überkritischem CO₂ und bei der Färbung mit ionischen Flüssigkeiten, den Sie für besonders unterschätzt halten und den ich in meiner Arbeit unbedingt berücksichtigen sollte?

O: Ja, wir haben ja schon diese Metallisierung aus überkritischem CO₂ gemacht. Ich hatte das auch jetzt schon mal in Ansätzen gesagt, dass wir hier mit dem Färben, allerdings mit dem Wald-und-Wiesen-Färben, eigentlich fertig sind. Das stimmt jetzt wieder nicht, weil wir jetzt noch die Naturfarbstoffe betrachten. Aber der Trend in meiner Forschung hier geht jetzt dahin, dass wir das überkritische CO₂ zum Funktionalisieren nehmen. Also, wir haben zum Beispiel sogenannte metallorganische Verbindungen über überkritisches CO₂ in die Faser hineingebracht. Damit bekommt man katalytisch aktive Fasern hin. Ich habe dazu auch noch sehr viel mehr Ideen, aber die kann ich Ihnen leider hier nicht sagen. Vielleicht zu Ihrer Masterarbeit, aber nicht zu Ihrer Bachelorarbeit.

Aber das Stichwort hier ist, dass man überkritisches CO₂ eben auch zur Funktionalisierung benutzen kann.

U: Okay, verstehe.

O: Den Rest können Sie sich ja vielleicht selbst zusammenspinnen, was damit gemeint ist. Aber zum Beispiel, kann man ein katalytisch wirksames Textil über eine Funktionalisierung mit überkritischem CO₂ machen.

U: Damit sind wir dann auch schon am Ende des Interviews angekommen. Ich bedanke mich auf jeden Fall ganz herzlich für Ihre Zeit und für die ausführlichen Einblicke. Ich werde jetzt im Anschluss noch mal das Gespräch transkribieren und würde Ihnen das Transkript auch noch mal zur Überprüfung auf inhaltliche Richtigkeit zusenden. Also, Sie werden auf jeden Fall noch mal von mir hören.

O: Wenn ich da drüber schauen muss, bis wann brauchen Sie das spätestens zurück?

U: Also ich denke, ich werde das diese Woche noch fertigstellen und Ihnen dann schicken. Vielleicht innerhalb der nächsten zwei Wochen, wenn das für Sie möglich ist?

O: Ja, nur wenn das jetzt bis Freitag passieren sollte, das wäre schwierig.

U: Ja nein, das ist okay. Ja, ich habe das extra so geplant, dass noch ein bisschen Zeit danach ist, weil ich sehr darauf gehofft habe, dass ich hier noch mal für meine Arbeit wertvolle Erkenntnisse herausziehen werde, und das ist auch auf jeden Fall so.

O: Ist Ihre Arbeit jetzt eher auf rein theoretischer Basis oder machen Sie auch etwas im Labor? Sie machen das alles nur über die Recherche mit mir und mit anderen?

U: Ja.

O: Ja, cool, das ist toll. Ja, schön. Ja, also wie gesagt, ich bin gerne dabei. Bestellen Sie dem Herrn Oberthür schöne Grüße.

U: Das mache ich auf jeden Fall.

O: Und ich wünsche Ihnen da viel Erfolg. Und wenn Sie dann nochmal draufschauen und dann eben etwas nicht klar ist, dann fragen Sie gerne nochmal nach per E-Mail, oder wir können auch sowas nochmal wiederholen. Und diese Sache, die ich Ihnen da vorhin genannt hatte, gucken Sie mal, ob Sie damit

was, also mit diesem VDTF, ob Sie da was finden. Wenn nicht, kann ich Ihnen da bestimmt auch noch irgendwie einen Link schicken oder sowas.

U: Okay, ja, ich würde auch erstmal nochmal recherchieren und komme dann aber vielleicht nochmal darauf zurück. Ich wollte Sie sowieso noch fragen, ob Sie mir Veröffentlichung oder Berichte empfehlen können zu der Thematik. Ich hatte natürlich schon selber recherchiert, aber wenn Ihnen jetzt sofort irgendwas einfällt, würde ich mich sehr freuen. Ich werde das auch nochmal in die E-Mail schreiben mit dem Transkript.

O: Vielleicht kann ich aus irgendeinem Antrag ein paar Sachen herauskopieren. Da muss ich überlegen. Der Antrag ist von letztem Jahr, das ist ja dann noch relativ frisch. Das schaue ich nach. Aber schreiben Sie das dann mit in die E-Mail als Frage oder als Bitte rein, damit ich das dann auf dem Zettel habe. Weil morgen habe ich das ehrlich gesagt wieder vergessen.

U: Ja, alles gut. Ja, kein Problem. Das werde ich machen

O: Und ich versuche, da mehr oder weniger klug weiterzuhelfen.

U: Okay, ich danke Ihnen ganz herzlich.

O: Super. Dann wünsche ich Ihnen noch einen schönen Tag.

U: Ja, danke gleichfalls. Dankeschön. Tschüss.

O: Ciao.

Selbstständigkeitserklärung



Name, Vorname: Ulbricht, Ida Mathilda Luise

Matrikelnummer: [REDACTED]

Selbstständigkeitserklärung zu meiner Bachelorarbeit zum Thema: Färbefahrverfahren in der Textilindustrie – Chancen und Grenzen alternativer Verfahren unter besonderer Berücksichtigung der Ressourcenschonung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Quellen werden korrekt angegeben. Ich versichere, dass alle wörtlich und sinngemäß übernommenen Stellen unter Angabe der Quellen gekennzeichnet wurden.

Ich versichere ferner, dass der Inhalt der Textdatei der digitalen Fassung identisch mit der eingereichten schriftlichen Ausfertigung ist.

Hamburg, den 19.08.2026

Ort, Datum

Unterschrift